



**VYSOKÁ ŠKOLA
CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ
V PRAZE**



**UNIVERZITNÍ
CENTRUM
ENERGETICKY
EFEKTIVNÍCH BUDOV
ČVUT V PRAZE**

Vstupní parametry modelů rozvoje požáru desek vyráběných na bázi dřeva

Zpracovali:	
MV-GŘ HZS ČR Technický ústav požární ochrany	Ing. Lucie Hasalová, Ph.D.
Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemického inženýrství	Ing. Vojtěch Šálek doc. Dr. Ing. Milan Jahoda
České vysoké učení technické v Praze, Univerzitní centrum energeticky efektivních budov	Ing. arch. Bc. Petr Hejtmánek, Ph.D. Ing. Daniela Pitelková

Projekt:	Modelování tepelné degradace a hoření deskových materiálů na bázi dřeva
Identifikační kód:	VI20192022120
Poskytovatel:	Ministerstvo vnitra České republiky

OBSAH

1	Cíle a uplatnění metodiky	1
2	Struktura metodiky	1
3	Úvod do problematiky	1
4	Studované materiály – aglomerované desky na bázi dřeva	2
4.1	Elementární složení aglomerovaných desek a zuhelnatělých zbytků desek	4
4.2	Naměřené hodnoty pro studované desky a jejich zuhelnatělé zbytky	5
5	Vstupní data, parametry CFD modelu požáru	6
5.1	Parametry týkající se pevného materiálu	6
5.1.1	Vedení tepla	7
5.1.2	Zjednodušený model reakce	8
5.1.3	Komplexní model rozkladné reakce - pyrolýza	9
5.1.4	Volba rozkladného reakčního schématu v komplexním modelu pyrolýzy	9
5.1.5	Reakční teplo rozkladné reakce	10
5.2	Parametry týkající se procesů v plynné fázi	11
5.2.1	Výhřevnost	11
5.2.2	Reaktanty a produkty spalné reakce	12
5.3	Ostatní parametry	13
5.3.1	Výpočetní síť – proč je velikost buňky důležitá?	13
5.3.2	Počáteční a okrajové podmínky	14
6	Parametry modelu tepelného rozkladu aglomerovaného dřeva	14
6.1	Kinetické parametry	14
6.1.1	Jak byly parametry získány? – Teorie	14
6.1.2	Správná praxe v měření	15
6.1.3	Kinetické parametry aglomerovaných desek	17
6.1.4	Citlivostní analýza	19
6.2	Reakční teplo tepelného rozkladu	20
6.2.1	DSC křivka dějů, při kterých se mění hmotnost vzorku	21
6.2.2	Naměřené hodnoty	21
7	Fyzikální a materiálové vlastnosti, tepelně-technické charakteristiky	22
7.1	Objemová hmotnost	23
7.1.1	Jak byly parametry získány? – surové aglomerované dřevo	23
7.1.2	Jak byly parametry získány? – zuhelnatělé zbytky aglomerovaného dřeva	23
7.1.3	Naměřené hodnoty – surové aglomerované dřevo	24
7.1.4	Příprava zuhelnatělých zbytků	27

7.1.5	Naměřené hodnoty – zuhelnatělé zbytky	27
7.1.6	Citlivostní analýza	28
7.2	Měrná tepelná kapacita	29
7.2.1	Jak byly parametry získány? – Teorie	29
7.2.2	Správná praxe v měření	30
7.2.3	Naměřené hodnoty.....	30
7.2.4	Citlivostní analýza	33
7.3	Součinitel tepelné vodivosti.....	34
7.3.1	Jak byly parametry získány? – Teorie.....	34
7.3.2	Naměřené hodnoty.....	34
7.3.3	Citlivostní analýza	37
8	Model hoření v plynné fázi	38
8.1	Složení plynného paliva.....	38
8.2	Efektivní výhřevnost, podíl sazí, podíl CO.....	39
9	Výpočetní síť	40
9.1	Jak volit velikost buněk výpočetní sítě?	40
9.1.1	Velikost vírů	40
9.1.2	Model turbulence ve vztahu k velikosti vírů a velikosti buněk.....	42
9.1.3	Citlivostní analýza sítě.....	44
10	Velkorozměrové zkoušky pro získání vstupních dat do modelů požáru a jejich validaci.....	44
10.1	Popis zkušebního prostoru.....	45
10.2	Vliv okrajových podmínek na rychlost uvolňování tepla	46
10.2.1	Umístění sestavy uvnitř místnosti versus pod odtahovým zvonem	47
10.2.2	Vliv materiálu	49
10.2.3	Umístění hořáku.....	49
10.2.4	Vliv ventilace	49
10.2.5	Vliv chování vzorku	49
10.3	Opakovatelnost naměřených dat.....	49
10.4	Použití křivky HRR jako vstupního parametru CFD modelu - souhrn	51
11	Použitá literatura	52
12	Seznam symbolů	55

1 Cíle a uplatnění metodiky

Metodika se snaží podpořit rozvoj a využití numerických modelů šíření požáru poskytnutím relevantní sady vstupních parametrů pro v praxi velmi často používané materiály. **Hlavní cílem metodiky je prezentovat vstupní parametry do CFD modelu hoření pro desky z aglomerovaného dřeva, konkrétně dřevotřískovou desku, OSB desku, dřevovláknitou desku a překližku.** Diskuzí k jednotlivým parametrům z hlediska jejich vlastností, měřících postupů a vlivu parametrů na výstupy modelu se metodika snaží definovat nároky na správnou praxi při modelování rozvoje požáru metodou CFD.

Metodika nachází uplatnění u odborné veřejnosti jak v komerční sféře, tak i na úseku státní správy v oblasti projektování požární bezpečnosti staveb a zjišťování příčin vzniku požáru. Metodika také může sloužit jako vzdělávací materiál pro studenty technických oborů v oblasti požární ochrany.

2 Struktura metodiky

Metodika je tematicky rozdělena do následujících kapitol:

- **Kapitola 3** udává stručný úvod k problematice modelování požáru metodou CFD s důrazem na aplikační oblast výsledků modelu a v kontextu vstupních dat modelu.
- **Kapitola 4** popisuje, u jakých materiálů byly stanovovány vstupní parametry modelů, tedy desky z aglomerovaného dřeva. Kapitola krátce shrnuje, jak se desky z aglomerovaného dřeva vyrábí, popisuje čtyři konkrétní typy desek, jejichž parametry byly stanovovány v rámci metodiky a upozorňuje na konkrétní problémy spojené s modelováním hoření těchto materiálů.
- **Kapitola 5** teoreticky zavádí a přehledně shrnuje formou tabulek, jaké jsou požadované vstupní parametry v závislosti na typu modelu pro modelování hoření desek aglomerovaného dřeva.
- **Kapitola 6** uvádí a diskutuje konkrétní hodnoty parametrů pro aglomerované dřevo týkající se modelu tepelného rozkladu desek.
- **Kapitola 7** uvádí a diskutuje konkrétní hodnoty parametrů pro aglomerované dřevo týkající se fyzikálních, materiálových a tepelně technických charakteristik desek.
- **Kapitola 8** uvádí a diskutuje konkrétní hodnoty parametrů pro aglomerované dřevo týkající se modelu hoření.
- **Kapitola 9** diskutuje problematiku tvorby sítě, zejména pak velikost buněk výpočetní sítě, a uvádí doporučení vycházející z odborné literatury.
- **Kapitola 10** ukazuje výsledky experimentů hoření nábytkových sestav z aglomerovaných desek ve vztahu k využívání dat z velkorozměrových zkoušek jako vstupních údajů CFD modelů.

3 Úvod do problematiky

„Společným úkolem požární vědy a inženýrské praxe je vytvořit prostředí, ve kterém by bylo minimalizováno riziko vzniku požáru a jeho případné následky na zdraví osob, ochranu majetku a životní prostředí. Jako moderní nástroj k dosažení těchto cílů lze v dnešní době využít matematické modelování metodou počítačové dynamiky tekutin (CFD – Computational Fluid Dynamics). CFD je univerzální nástroj sloužící k analýze problémů zahrnujících tok tekutin a může být úspěšně aplikován na široké spektrum úloh. V oblasti požární bezpečnosti lze tyto úlohy obecně rozdělit do tří kategorií – věda a výzkum, požární bezpečnost staveb a vyšetřování příčin vzniku požáru.“ [1].

CFD modely požáru lze z hlediska výstupů modelu rozdělit na **modely sledující následky** přítomnosti zdroje hoření a **modely rozvoje požáru** založené na fyzikálním a chemickém popisu tepelného rozkladu. Volba přístupu k modelování závisí na zpracovateli, který tuto volbu musí jednoznačně vymezit a zdůvodnit.

Převážná část matematických modelů využívaných v oblasti požární bezpečnosti staveb patří do první zmíněné skupiny modelů posuzujících následky požáru (tzv. consequence based modeling). Základem těchto modelů je, že uživatel zadává množství uvolněného tepla a spalných produktů jako jeden ze vstupů modelu. Z principu tak model není možné využít pro předpověď rozvoje požáru a jeho šíření. Výstupem modelu je vývoj teplotního a koncentračního pole v čase i prostoru vzhledem k umístění zdroje. Modely posuzující následky požáru jsou vhodné pro studium vlivu tepelného pole na konstrukce, funkce prvků stabilní požární ochrany (např. čas do spuštění nebo počet aktivovaných zařízení) a pohyb osob v zakouřeném prostředí [2].

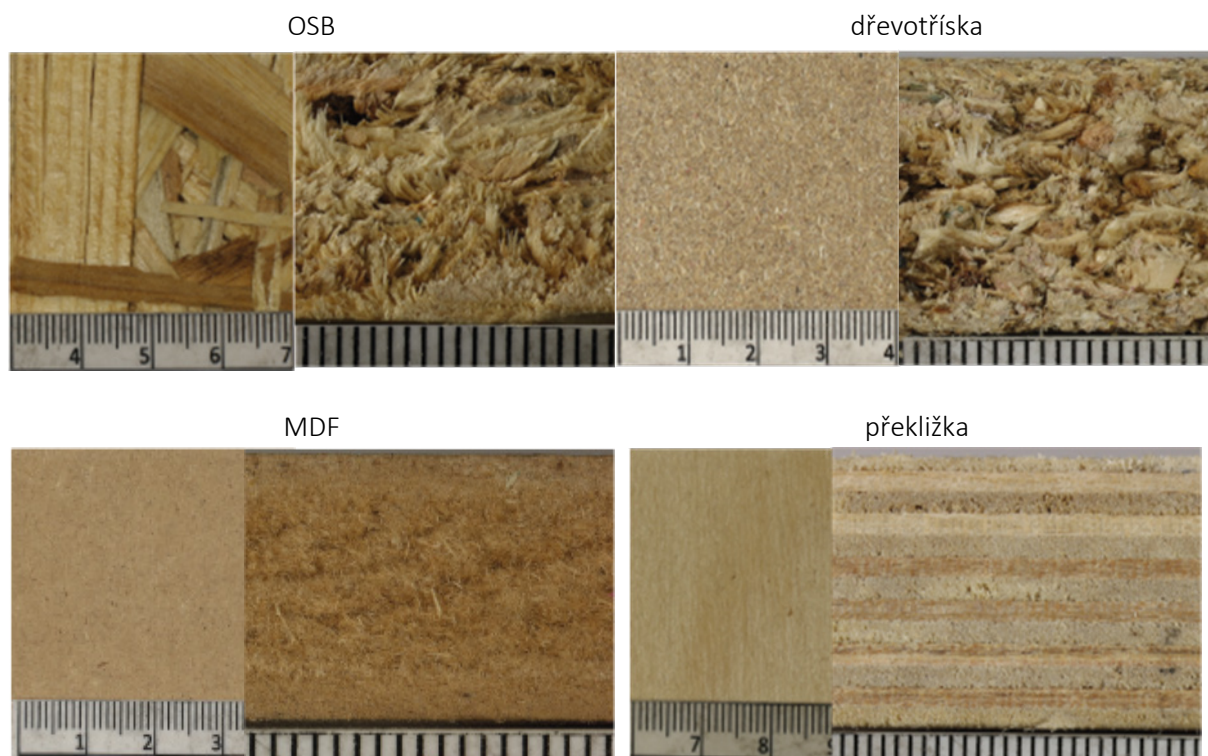
Druhá zmíněná skupina modelů předvídá časový průběh požáru (tzv. fire development modeling) na základě popisu procesu tepelného rozkladu pevných látek (pyrolýzy) a současného hoření produktů rozkladu v plynné fázi. Uživatel jako vstup do modelu zadává tepelně technické charakteristiky a další materiálové vlastnosti všech látek vystupujících v simulaci a reakční parametry, které popisují tepelný rozklad materiálu. Rychlost vývinu tepla (HRR, heat release rate) a rychlost úbytku hmotnosti materiálů (MLR, mass loss rate) je dopočítána modelem. Stejně jako v předchozím případě, model předvídá časový vývoj teplotního a koncentračního pole, nicméně ze své podstaty navíc umožňuje simulovat i rozvoj požáru a jeho šíření. Využití modelů, které zahrnují model pyrolýzního rozkladu, je limitováno špatnou dostupností velkého počtu uživatelem zadávaných vstupních materiálových parametrů. Parametry, které nejsou k dohledání v literatuře, je nutné odhadnout, nebo zjistit experimentálně, přičemž v současné době neexistují jednotné standardizované postupy získávání těchto vstupních dat [2].

Speciálním přístupem k modelování požáru je kombinace obou zmíněných přístupů, kdy model předvídá prohřívání pevné látky a vzplanutí, zatímco následné hoření je definováno uživatelem. K dosažení teploty vzplanutí software řeší vedení tepla materiálem a po dosažení teploty vzplanutí začne materiál předepsaným způsobem hořet. Tímto způsobem lze aproximovat scénář šíření hoření od zdroje. Aby bylo možné simulovat prohřívání materiálu vedoucí k dosažení teploty vzplanutí, je po uživateli vyžadováno, stejně jako v případě komplexních modelů, zadání tepelně technických charakteristik zahříváního materiálu.

CFD je velmi užitečný nástroj v mnoha oblastech jak požární vědy, tak požárního inženýrství, ale je třeba si uvědomit, že klade vysoké nároky na odbornost jak osob, které modely vytváří, tak osob, které posuzují výsledky CFD analýz. Ponecháme-li stranou problém validace matematických modelů, předpověď modelu bude jen tak správná (reálná), jak správné jsou vstupní parametry simulace. V případě modelů požáru se jedná zejména o požárně technické, tepelně technické a reakční parametry. Jako u každé CFD úlohy má ale klíčovou roli také výpočetní síť. Úloha také musí mít správně zadány počáteční a okrajové podmínky tak, aby odpovídaly reálnému scénáři.

4 Studované materiály – aglomerované desky na bázi dřeva

Aglomerované desky na bázi dřeva jsou materiály, které vhodným výrobním postupem využívají přirozených a žádoucích vlastností původního materiálu, surového dřeva, a naopak eliminují jeho nepříznivé vlastnosti. Aglomerované materiály tak využívají a zachovávají vlastnosti dřeva, kterými jsou především pevnost, obrobitelnost, dobré izolační vlastnosti, ekologický charakter a nízká cena. Mezi částečně nebo úplně eliminované vlastnosti dřeva patří nehomogenita, hygroskopicitata, anizotropie nebo nízká odolnost proti vysokým teplotám a otevřenému ohni [3]. Díky svým výsledným mechanicko-fyzikálním vlastnostem patří aglomerované desky celosvětově mezi nejčastěji používaný a dostupný materiál, který nachází uplatnění jako konstrukční materiál dřevostaveb, interiérové vybavení domácností a kanceláří nebo izolace. Je tedy vysoce žádoucí, abychom byli schopni hoření a rozvoj požáru těchto materiálů předpovědět/napodobit matematickým modelem.



Obr. 1: Fotografie detailu čelní stěny (levá strana) a profilu-řezu (pravá strana) OSB, dřevotřískové, MDF a překližkové desky.

Výroba aglomerovaných desek je založena na spojení částic dřeva, pojiva a případně dalšího aditiva za pomoci zvýšené teploty, tlaku a popř. vlhkosti. Výsledné vlastnosti desky a oblast jejího použití jsou tak určeny tloušťkou, typem použitého dřeva, velikostí a orientací dřevěných částic (drť, štěpky, třísky, dýhy), lepidlem, aditivou a použitými technologickými faktory, jako je teplota a tlak. Na základě rozdílného výrobního postupu a použitých částic dřeva je možné aglomerované desky rozdělit do několika skupin. V rámci této metodiky byly studovány čtyři typy aglomerovaných desek na bázi dřeva:

- **Dřevotřískové desky.** Lisované z dřevěných třísek jehličnanů a měkkých listnatých dřevin smíchaných s pojivem (nejčastěji močovinoformaldehydovými nebo, v případě vodovzdorných desek, fenolformaldehydovými lepidly), tvrdidly a aditivou. Dřevotřískové desky se mohou vyrábět z více vrstev o různé hrubosti třísek (vnější plochy jemné, střední vrstva hrubá).
- **OSB (Oriented Strand Board) desky.** Lisované za zvýšené teploty z plochých orientovaných třísek smíchaných s pojivem (výhradně polyuretanové pryskyřice bez obsahu formaldehydu). Obdobně jako u dřevotřísek se lisuje více vrstev o různé velikosti dřevěných částic.
- **Dřevovláknité desky.** Lisované z kvalitní bílé rozvlákněné štěpky z odkorněného, většinou jehličnanového dřeva (nejčastěji smrkového) spojená syntetickým lepidlem nebo na základě pojivých vlastností samotného dřeva. Dřevovláknité desky jsou vyráběny ve třech typech: měkké (Hobra), polotvrdé (MDF, Medium density fiberboard) a tvrdé (Sololit). V této metodice je zkoumán pouze typ MDF, který je lepen močovinoformaldehydovými, fenolformaldehydovými nebo melaminformaldehydovými lepidly.
- **Překližkové desky.** Kompozitní desky z na sebe kolmo lepených dýh (tenkých pásů dřeva z měkkých dřevin – smrk, topol, borovice, bříza atd.). K lepení se používají polyvinylacetátová disperzní lepidla: typ D2 pro vodě neodolné (interierové truhlářské překližky); typ D3 pro odolné proti vlhkosti; typ D4 pro odolné trvalému působení vody.

Tab. 1: Specifikace zkoumaných aglomerovaných desek dle volně dostupných informací výrobce.

Název	Tloušťka [mm]	Výrobce	Lepidlo	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Tepelná vodivost [W/(m·K)]	Měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)]
KRONOPOL KRONOPLY OSB/3	12, 18, 25	Kronopol	-	-	0,13	-
Dřevotřísková deska PB P2	12, 18, 25, 28	Kronospan	-	600–700	0,13	1500
Za sucha vyráběná dřevovláknitá deska MDF.HLS	12, 18, 25, 30	Kronospan	-	≥700 (pro tloušťky 10–22 mm)	0,13	1600
Potahovaná březová překližka	12, 18, 24, 30	Plyterra	Fenol-formaldehydové	-	-	-

Všechny druhy desek obsahují minimálně 94 hm. % dřeva [4]. Dřevo je hlavní složkou aglomerovaných desek, jejich chemické složení je tedy podobné. Elementární složení jednotlivých aglomerovaných desek se může lehce lišit v závislosti na množství a typu použitých dřevin a také použitých pojiv a aditiv. Struktura desek, která má výrazný vliv na jejich prohívání a rychlost tepelného rozkladu a hoření, je ale díky rozdílným výrobním procesům výrazně jiná, jak je vidět z Obr. 1.

Specifikace konkrétních aglomerovaných desek zkoumaných v této metodice dle dat výrobce je uvedena v Tab. 1. Z tabulky je patrné, že někteří výrobci nspecifikují ani základní materiálové vlastnosti desek, které jsou nutnými vstupy do matematických modelů. Tyto a další potřebné materiálové vlastnosti je proto nutné stanovit experimentálně, viz kapitola 5.

Aglomerované desky na bázi dřeva jsou z hlediska matematického modelování komplikovaným materiálem. Dřevo, jako základní složka aglomerovaných desek, zanechává při tepelném rozkladu pevný zbytek. Rychlost tvorby zuhelnatělého zbytku a jeho vlastnosti významně ovlivňují celkový proces hoření a rozvoje požáru těchto desek. Do modelu hoření aglomerovaných desek je tak třeba zadat nejen vlastnosti surové desky, ale i zuhelnatělého zbytku. Aglomerované desky dále nemají konstantní objemovou hmotnost podél průřezu desky, což výrazně ovlivňuje vedení tepla materiálem. Pro desky je charakteristický vertikální hustotní profil (VDP, vertical density profile). VDP vzniká při horkém lisování tím, že tlak působící na stěny desky způsobuje lokální kompresi materiálu, která následně postupuje do středu materiálu [5]. Komprese je zpravidla nejvýraznější na povrchu desky, a proto je zde i nejvyšší hustota materiálu. Hustotní profily jednotlivých aglomerovaných desek jsou uvedeny v kapitole 7.1.3.

4.1 Elementární složení aglomerovaných desek a zuhelnatělých zbytků desek

Elementární složení pevných materiálů lze zjistit pomocí destruktivní laboratorní metody malého měřítka – elementární analýzy. Elementární analýza je založena na spálení velmi malého (~1 mg) zhomogenizovaného a klimatizovaného vzorku (stejně jako při přípravě TGA analýzy, viz kapitola 6.1.2). Vzorek je před měřením zvážen na velmi přesných váhách s přesností na řádově tisícinu miligramu a uzavřen do kapsle z nízkotavitelného kovu. Po spuštění analýzy je vložený vzorek zcela spálen v přebytku kyslíku. Vzniklá plynná směs je zachycena a chromatograficky separována. Z množství jednotlivých odseparovaných plynných složek (CO₂, H₂O, N₂, případně dalších) se na základě známé navážky vzorku vypočítá zastoupení jednotlivých atomů ve vzorku. Běžně je stanovováno hmotnostní zastoupení uhlíku, dusíku a vodíku, případně dalších heteroatomů (síry, halogenů).

Metoda elementární analýzy poskytuje velmi přesné výsledky s velmi dobrou opakovatelností. Vzhledem k nehomogenitě aglomerovaných materiálů a velmi nízké navážce vzorku používané při

elementární analýze je nicméně vhodné provádět alespoň dvě opakování pro každé měření. Pokud se tato dvě opakování výrazně liší (směrodatná odchylka složení uhlíku větší než 2 %), je vhodné rozšířit sadu o další měření daného materiálu.

4.2 Naměřené hodnoty pro studované desky a jejich zuhelnatělé zbytky

Elementární složení surových aglomerovaných materiálů a zuhelnatělých zbytků aglomerovaných desek, jejichž vlastnosti jsou diskutovány a uváděny v této práci, je uvedeno v Tab. 2. Výsledky odpovídají průměru ze dvou (tří v případě nesplnění podmínek v předchozí kapitole) nezávislých měření. Mimo přímo stanovované množství uhlíku, vodíku a dusíku je uváděno i hmotnostní zastoupení kyslíku. Množství kyslíku není stanovováno, ale je dopočítáváno tak, že tvoří zbytek do 100 % původní hmotnosti vzorku. Hodnoty hmotnostního složení zuhelnatělých zbytků odpovídají průměrnému složení zuhelnatělých zbytků vytvořených v kónickém kalorimetru (viz kapitola 7.1.4) při tepelném toku 20, 40, 60, 80 a 100 kW/m².

Elementární složení všech aglomerovaných materiálů je velmi podobné, což odpovídá skutečnosti, že alespoň 94 % jejich hmotnosti je tvořeno stejným výchozím materiálem – dřevem. Pro porovnání je proto do Tab. 2 přidán i průměr složení devíti měkkých a jedenácti tvrdých dřevin převzatých z [6]. Zbývajících nejvýše 6 % hmotnosti aglomerovaných desek, které představují lepidla a případná další aditiva, se projevuje především zvýšeným obsahem dusíku. V tomto případě je použití lepidel bohatých na dusík (močovinoformaldehydových pryskyřic) patrné u dřevotřísky a MDF. Naopak obsah uhlíku je o odpovídající podíl nižší oproti surovému dřevu. U OSB není zvýšený obsah dusíku pravděpodobně proto, že bylo využito pouze malé množství polyuretanových lepidel a dále parafínu, ve kterém dusík není obsažen. Parafín je naopak bohatý na uhlík, čemuž odpovídá i vysoký obsah uhlíku v OSB blížící se surovému dřevu. U překližkové desky je množství uhlíku srovnatelné s dřevotřískou nebo MDF a množství dusíku nízké (odpovídající množství dusíku v surovém dřevě, protože polyvinylacetátová lepidla neobsahují dusík). Naopak množství kyslíku je vyšší v porovnání se surovým dřevem i ostatními aglomerovanými materiály, což může být způsobeno kyslíkem přítomným v polyvinylacetátovém lepidle nebo nezanedbatelným množstvím dalších prvků, které se z principu dopočtu obsahu kyslíku, ne jeho přímého stanovení, projeví právě zde.

Složení zuhelnatělých zbytků se oproti původním materiálům projevilo výrazným poklesem obsahu vodíku (u všech materiálů na méně než na třetinu původní hodnoty) a výrazným nárůstem podílu uhlíku. Mezi zuhelnatělými zbytky je patrný trend ve vztahu k původním materiálům – původní materiály bohatší na jednotlivé složky toto zachovávají i ve formě zuhelnatělých zbytků. Poměrně výrazný rozdíl v zastoupení uhlíku a kyslíku mezi zuhelnatělými zbytky (např. OSB oproti překližce) je pravděpodobně ovlivněn přítomností dalších prvků, které se projeví vyšším obsahem kyslíku.

Tab. 2: Elementární složení původních aglomerovaných desek a jejich zuhelnatělých zbytků. V porovnání vystupuje také průměr devíti měkkých dřevin a jedenácti tvrdých dřevin [6].

Materiál	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]
	Surové aglomerované dřevo				Zuhelnatělý zbytek			
OSB	49,6	6,2	0,3	43,9	84,2	1,9	1,2	12,7
Dřevotříska	47,6	6,3	2,5	43,6	76,4	2,0	3,5	18,0
MDF	47,6	6,2	4,4	41,8	72,1	1,9	5,4	20,6
Překližka	47,6	6,2	0,3	45,9	71,0	1,7	0,4	26,9
Průměr	48,1	6,2	1,9	43,8	75,9	1,9	2,6	19,6
Měkké dřevo	52,7	6,3	0,2	40,8	-	-	-	-
Tvrdé dřevo	50,2	6,2	0,1	43,5	-	-	-	-

Na základě výsledků elementární analýzy lze očekávat, že parametry aglomerovaného dřeva, které nejsou výrazně závislé na struktuře vzorku, by měly být blízké parametrům dřeva.

5 Vstupní data, parametry CFD modelu požáru

Pro různě složitě CFD modely hoření a rozvoje požáru aglomerovaného dřeva potřebujeme rozdílné množství vstupních parametrů. Parametry modelu vychází přímo z popisu dějů, které při hoření aglomerovaných desek probíhají. Při působení tepelné energie pevné látky degradují, dochází k jejich rozkladu. Při tom dochází k uvolňování hořlavých plynů do okolí. Proces hoření pak probíhá v plynné fázi. Reakce hoření (spalování) se tedy přímo mohou účastnit pouze plynná paliva. V přítomnosti kyslíku se hořlavé plyny spálí za vzniku spalných produktů a dojde k uvolnění tepla. Uvolněné teplo dále přispívá k tepelné degradaci pevné látky, a tak podporuje vznik hořlavých plynů. Produkty spalování a uvolněné teplo se dále transportuje od zdroje hoření. Matematický model těchto dějů implementovaný v CFD modelech požáru zahrnuje zákony zachování hmoty i energie jak v pevné, tak v plynné fázi. Mezi fyzikálně chemické procesy, které při hoření pevných látek probíhají, patří: sdílení tepla (vedením v pevné fázi, prouděním a sáláním ve fázi plynné), přestup tepla mezi plynem a pevnou fází, heterogenní reakce (přechod látky z pevného skupenství do plynného), homogenní reakce (spalování v plynné fázi) a sdílení hmoty (transport paliva, kyslíku a produktů spalování) [2].

Fyzikální a chemické procesy v CFD modelech lze rozdělit na dvě základní skupiny – procesy probíhající v pevné fázi (model pevné fáze) a procesy probíhající ve fázi plynné (model plynné fáze). Tyto procesy se navzájem ovlivňují a musí být vždy řešeny současně. Nepochopení, co je vstupem a co výstupem modelů pevné a plynné fáze, je častou chybou uživatelů a to zejména při výběru modelu s ohledem na požadované výstupy a při interpretaci výsledků modelu. Pro více podrobností o rozdělení modelů hoření s důrazem na volbu modelu ve vazbě na požadované výstupy modelu je čtenář odkázán na metodiku [2].

Pro účely metodiky jsou parametry modelu hoření desek z aglomerovaného dřeva rozděleny do tří skupin:

- 1) **Parametry týkající se pevného materiálu** – do této skupiny spadají materiálové, tepelně technické či požárně technické charakteristiky aglomerovaného dřeva a dále parametry popisující jeho tepelný rozklad.
- 2) **Parametry týkající se plynné fáze** – do této skupiny spadají parametry aglomerovaného dřeva jako pevné látky, ale v modelu se uplatňují v rovnicích popisujících dění v plynné fázi. Jedná se zejména o reakci spalování.
- 3) **Ostatní parametry** – do této skupiny spadají parametry modelu, které ovlivňují predikci modelu, ale netýkají se přímo aglomerovaného dřeva jako materiálu. Jedná se zejména o kvalitu výpočetní sítě modelu či okrajové a počáteční podmínky, které jsou úzce svázány s modelovaným scénářem hoření.

5.1 Parametry týkající se pevného materiálu

Fyzikální a chemické procesy zahrnuté v pevné fázi můžeme rozdělit na proces vedení tepla a proces heterogenní reakce, přeměny pevného materiálu na plynné palivo (pyrolýza). Tab. 3 shrnuje veškeré uživatelem zadávané hodnoty vyplývající z fyzikálního popisu těchto procesů. U jednotlivých parametrů je rovněž uvedeno, ve kterých typech CFD modelů požáru jsou tyto parametry vyžadovány a v jaké kapitole jsou uvedeny konkrétní hodnoty parametrů desek aglomerovaného dřeva. V dalších sekcích této kapitoly je pak vysvětleno, v jakých rovnicích jednotlivé parametry vystupují a jaké procesy tedy přímo ovlivňují.

Tab. 3: Přehled vstupních parametrů pro popis rozkladu pevné fáze. Typ modelu je označen zkratkou: Rozvoj (Modely rozvoje požáru založené na fyzikálním a chemickém popisu tepelného rozkladu), Následky (Modely sledující následky přítomnosti zdroje hoření) nebo Kombinace (Speciální zjednodušený model reakce kombinující oba předchozí přístupy).

Vstupní parametr	Značení [jednotka]	Typ modelu	Kapitola
Objemová hmotnost	ρ [kg/m ³]	Rozvoj, Kombinace	7.1
Objemová hmotnost zuhelnatělého zbytku	ρ_{zbytek} [kg/m ³]	Rozvoj	7.1
Měrná tepelná kapacita	c_p [J/(kg·K)]	Rozvoj, Kombinace	7.2
Měrná tepelná kapacita zuhelnatělého zbytku	$c_{p,zbytek}$ [J/(kg·K)]	Rozvoj	7.2
Součinitel tepelné vodivosti	λ [W/(m·K)]	Rozvoj, Kombinace	7.3
Součinitel tepelné vodivosti zuhelnatělého zbytku	λ_{zbytek} [W/(m·K)]	Rozvoj	---
Emisivita	ϵ [-]	Rozvoj, Kombinace	---
Emisivita zuhelnatělého zbytku	ϵ_{zbytek} [-]	Rozvoj	---
Reakční teplo	ΔH [kJ/kg]	Rozvoj, Kombinace	6.2
Výhřevnost	ΔH_c [kJ/kg]	Následky, Kombinace	8.2
Rychlost uvolňování tepla	\dot{q}_{HRR} [kW]	Následky, Kombinace	10.2
Předexponenciální faktor	A [1/s]	Rozvoj	6.1
Aktivační energie	E_A [J/mol]	Rozvoj	6.1
Reakční řád	N [-]	Rozvoj	6.1
Reakční řád oxidace	N_{O_2} [-]	Rozvoj	6.1
Složení materiálu	ν_A [-]	Rozvoj	6.1
Stechiometrický koeficient zuhelnatělého zbytku	ν_{zbytek} [-]	Rozvoj	6.1

V Tab. 3 jsou uvedeny tři parametry, jejichž hodnoty nejsou v metodice uvedeny. Součinitel tepelné vodivosti zuhelnatělého zbytku se nepodařilo metodou uvedenou v sekci 7.3 naměřit, protože zuhelnatělé zbytky aglomerovaného dřeva jsou příliš křehké. Emisivita je vlastnost povrchu, která vyjadřuje, jak účinně povrch vyzařuje tepelnou energii ve srovnání s ideálním černým tělesem. Emisivita nabývá hodnot mezi nulou a jedničkou. Lze předpokládat, že emisivita desek aglomerovaného dřeva bude podobná emisivitě povrchu dřeva, která se, podle druhu dřeva, pohybuje nad 0,9 [7]. Emisivita se mění, jak se mění barva a povrchová struktura desek aglomerovaného dřeva při jejich uhlénatění. Lze očekávat, že při uhlénatění emisivita povrchu desek aglomerovaného dřeva poroste.

5.1.1 Vedení tepla

Teplotní profil zahřívání materiálu se běžně popisuje Fourier-Kirchhoffovou rovnicí:

$$\rho c_p \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T(r,t)) + \dot{q}_s''' \quad , \quad (1)$$

kde ρ značí objemovou hmotnost materiálu (nikoliv hustotu, vysvětleno v kapitole 7.1), c_p specifickou tepelnou kapacitu, T teplotu závislou na poloze r a čase t , λ tepelnou vodivost a \dot{q}_s''' objemový zdroj tepla. Specifická tepelná kapacita a tepelná vodivost zde vystupují jako konstanty, nicméně mohou být nahrazeny teplotní závislostí $c_p(T)$, respektive $\lambda(T)$ viz kapitola 7.2.3. a 7.3.2.

Zdrojový člen \dot{q}_s''' lze dále vyjádřit jako součet radiační složky tepla \dot{q}_r''' a tepla uvolněného nebo pohlceného chemickou reakcí \dot{q}_c''' :

$$\dot{q}_s''' = \dot{q}_r''' + \dot{q}_c''' \quad , \quad (2)$$

kde za člen chemické reakce dosazujeme součet příspěvků všech reakcí probíhajících v daném místě materiálu: pomocí reakčního tepla i -té reakce ΔH_i :

$$\dot{q}_c''' = -\rho_0 \sum_i r_i(r, T) \Delta H_i \quad (3)$$

ρ_0 zde značí počáteční objemovou hmotnost, r_i reakční rychlost i -té reakce a ΔH_i reakční teplo i -té reakce, což je další z vyžadovaných vstupních parametrů.

Fourier-Kirchhoffova rovnice je parciální diferenciální rovnice. Pro její vyřešení je nutné znát okrajovou podmínku. Okrajová podmínka v tomto případě slouží pro přenos informace mezi modelem pevné a plynné fáze a je dána vztahem:

$$-\lambda \nabla T(r_0, t) = \dot{q}_c'' + \dot{q}_r'' \quad (4)$$

kde \dot{q}_c'' značí intenzitu konvektivního toku [kW/m^2] a \dot{q}_r'' intenzitu celkového radiačního toku tepla dopadajícího na stěnu r_0 zahřívaného materiálu. Intenzitu celkového radiačního tepelného toku je možné vyjádřit jako rozdíl intenzit vstupujícího ($\dot{q}_{r,in}''$) a vystupujícího ($\dot{q}_{r,out}''$) radiačního tepelného toku na povrchu materiálu:

$$\dot{q}_r'' = \dot{q}_{r,in}'' - \dot{q}_{r,out}'' = \dot{q}_{r,in}'' - \epsilon \sigma T_w^4 \quad (5)$$

kde ϵ značí další z uživatelem zadávaných vstupních parametrů - emisivitu, σ Stefan-Boltzmannovu konstantu a T_w teplotu stěny.

5.1.2 Zjednodušený model reakce

Jak již bylo zmíněno v úvodu (Kapitola 3), modely sledující následky přítomnosti zdroje hoření nahrazují proces přeměny pevného materiálu na plynný v důsledku působení tepla zadáním množství uvolněného tepla při hoření jako vstupního údaje zadávaného uživatelem. V takto zjednodušeném modelu uživatel kromě rychlosti uvolňování tepla \dot{q}_{HRR} (HRR) [kW] dále definuje pouze hodnotu výhřevnosti ΔH_c [kJ/kg] pevné látky (více informací v kapitole 5.2.1). Rychlost úbytku hmotnosti \dot{m} [kg/s] tepelně degradované pevné látky je pak dopočtena ze vztahu:

$$\dot{m} = \frac{\dot{q}_{HRR}}{\Delta H_c} \quad (6)$$

Tento vztah bývá ve značné části výpočetních softwarů vyjádřen v následujícím, upraveném, tvaru pro výpočet intenzity úbytku hmotnosti \dot{m}'' [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{q}_{HRR}''}{\Delta H_c} \quad (7)$$

kde došlo ke vztažení rychlosti úbytku hmotnosti a rychlosti uvolňování tepla na plochu, která ze svého povrchu uvolňuje vznikající hmotu i teplo. Uživatel je tak v závislosti na daném výpočetním nástroji často nucen přepočítat zadávané \dot{q}_{HRR} na rychlost uvolňování tepla na jednotku plochy \dot{q}_{HRR}'' (HRRPUA, heat release rate per unit area) [kW/m^2] nebo naopak pomocí známé plochy.

Výpočet intenzity úbytku hmotnosti ve zjednodušeném modelu reakce není ovlivněn ději probíhajícími v pevné látce nebo její aktuální teplotou. Teplota je do výpočtu zahrnuta pouze, pokud uživatel zadává teplotu vzplanutí. V tomto případě je pro teploty nižší než teplota vzplanutí intenzita úbytku hmotnosti rovna nule a po dosažení teploty vzplanutí odpovídá podílu zadaného \dot{q}_{HRR}'' ku ΔH_c . Teplota pevného materiálu je modelem vypočítávána i po přesažení teploty vzplanutí, ale nijak neovlivňuje výpočet intenzity úbytku hmotnosti.

5.1.3 Komplexní model rozkladné reakce - pyrolýza

Komplexní přístup k modelování reakce tepelného rozkladu vede ke stanovení množství plynných produktů uvolněných z povrchu pevného materiálu v čase. Množství uvolněných plynných produktů se rovná rychlosti úbytku hmoty pevné látky v čase \dot{m} [kg/s] (časové změně hmotnosti), respektive rychlosti úbytku r [kg/(m³·s)] (časové změně objemové hmotnosti ρ) vztažené na daný kontrolní objem V a lze vyjádřit jako:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\dot{m}}{V} = r = k(T)f(\rho) , \quad (8)$$

kde člen $k(T)$ značí funkční závislost reakční rychlosti na teplotě T a $f(\rho)$ značí tzv. reakční model neboli závislost na okamžitém množství pevného, zatím nezreagovaného, materiálu.

Závislost reakční rychlosti na teplotě bývá obvykle popsána Arrheniovou rovnicí:

$$k(T) = Ae^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)} , \quad (9)$$

kde parametry A , E_A jsou uživatelem zadávané konstantní hodnoty předexponenciálního faktoru, respektive aktivační energie a R je univerzální plynová konstanta (8,314 J/(mol·K)). Právě skrze Arrheniovu rovnici je rychlost reakce provázána s teplotou materiálu, respektive s dříve zmíněnou částí řešiče zodpovědnou za výpočet vedení tepla materiálem.

Reakční model bývá obvykle vyjádřen jako:

$$f(\rho) = \rho_s^N \rho_{O_2}^{N_{O_2}} , \quad (10)$$

kde N značí řád reakce a indexy s , O_2 pevný materiál podstupující reakci, respektive kyslík způsobující oxidaci. Pokud není uvažována závislost reakční rychlosti na koncentraci přítomného kyslíku, je reakční řád $N_{O_2} = 0$.

Rychlost úbytku hmoty bývá v literatuře často uváděna po dosazení z Arrheniovy rovnice (9) a vyjádření reakčního modelu následujícím způsobem:

$$\frac{d\rho_s}{dt} = r = Ae^{\left(\frac{-E_A}{RT}\right)} \rho_s^N \rho_{O_2}^{N_{O_2}} . \quad (11)$$

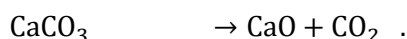
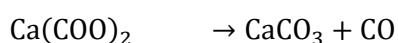
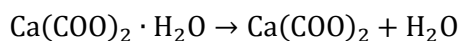
V případě, že tepelně degradovaný materiál podstupuje více reakcí, je úbytek hmoty popsán analogicky jako součet rychlostí úbytku hmoty způsobených i -tou reakcí:

$$\frac{d\rho_s}{dt} = \sum_i r_i = \sum_i A_i e^{\left(\frac{-E_{A,i}}{RT}\right)} \rho_s^{N_i} \rho_{O_2}^{N_{O_2,i}} . \quad (12)$$

Velkou výhodou uvedeného postupu vyjádření reakční rychlosti je možnost rozdělení výpočtu na dvě nezávislé části, konkrétně výpočet závislosti reakční rychlosti na teplotě a výpočet závislosti na stavu reaktantu – tepelně degradovaném materiálu.

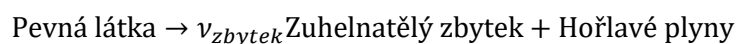
5.1.4 Volba rozkladného reakčního schématu v komplexním modelu pyrolýzy

Některé pevné látky podléhají při tepelném rozkladu malému počtu známých a dobře popsatelných reakcí. Příkladem může být tepelný rozklad šťavelanu vápenatého, který se rozkládá ve třech izolovaných krocích, které probíhají v různých teplotních intervalech dle schématu:

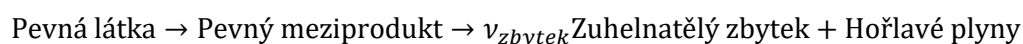


V takovém případě lze pak pro každou z těchto reakcí stanovit úbytek hmoty při tepelném rozkladu dle vztahu uvedeného v kapitole 5.1.3. Jiné pevné látky jsou složeny z více komponent (v případě dřeva a aglomerovaného dřeva se jedná zejména o lignin, celulózu a hemicelulózu), které jsou tvořeny velkým množstvím rozdílných chemických vazeb. Chemické vazby se rozpadají při odlišných teplotách a dochází tak řádově k desítkám až stovkám následných nebo překrývajících se rozkladných reakcí, které navíc zahrnují vznik nestabilních meziproductů. Takto složitý proces není možné popsat exaktně jako v případě štavelanu vápenatého na základě skutečně probíhajících reakcí. Přistupuje se proto ke zjednodušení, kdy je tepelný rozklad aproximován vhodným (nízkým) počtem fiktivních reakcí. Tyto fiktivní reakce nahrazují skutečné, částečně nebo úplně vzájemně se překrývající rozkladné děje tak, aby byl zachován kvalitativní i kvantitativní popis tepelného rozkladu.

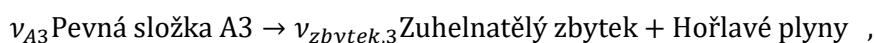
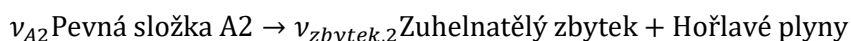
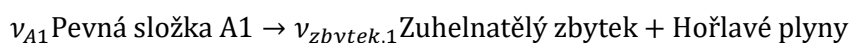
Kinetické parametry jsou díky zavedení zjednodušeného rozkladného schématu určovány pouze pro malý počet fiktivních reakcí typu:



v případě jednoduchého jednokrokového rozkladu nebo typu:



v případě následné reakce za vzniku pevného meziproductu. Pokud se rozkládá materiál, který zuhelnatělý zbytek nevytváří, stechiometrický koeficient ν_{zbytek} je roven nule. Složitější schémata zahrnující aproximaci tepelného rozkladu současným rozkladem více složek daného materiálu nabývají následujícího tvaru:



kde složky A1, A2 a A3 mohou představovat například tříložkový rozklad používaný pro dřevo a materiály na bázi dřeva. Různou kombinací výše uvedených typů fiktivních reakcí lze vytvářet velmi komplexní schémata, nicméně s každou další fiktivní reakcí roste i počet vstupních parametrů modelu, které musíme určit – kinetické parametry, stechiometrické koeficienty vznikajícího zuhelnatělého zbytku ν_{zbytek} , případně i poměrného zastoupení ν_A fiktivních složek (A1, A2, A3) v pevném materiálu (A). Z důvodu rostoucího počtu hledaných vstupních parametrů je proto vždy snaha zvolit co možná nejjednodušší reakční schéma tak, aby postačovalo k popisu modelovaného tepelného rozkladu.

Zjednodušené schéma tepelného rozkladu aglomerovaného dřeva (na základě experimentálně naměřených dat) a stanovené parametry rozkladného schématu pro desky z aglomerovaného dřeva jsou uvedeny v kapitole 6.1.

5.1.5 Reakční teplo rozkladné reakce

V předchozích sekcích bylo detailně vysvětleno, že působením tepelné energie na povrch materiálu dochází v důsledku vedení tepla k jeho prohřívání a při zahřátí materiálu nad teplotu rozkladu začíná uvolňování těkavých plynů do okolí. Přerušování chemických vazeb, kdy se přeměňuje pevný materiál na plynný, ale vyžaduje dodání energie. Množství této energie je dáno veličinou reakční teplo tepelného

rozkladu. Reakčního tepla by bylo možné použít i například pro vyjádření tepla potřebného na odpaření vody z vlhkého vzorku, krystalizaci, tání apod.

Reakční teplo tepelného rozkladu bývá často zanedbáváno, jelikož teplo dodané na uvolnění plynných složek je řádově nižší než teplo, které se následně uvolní spálením těchto uvolněných hořlavých plynů. Přesto může mít velikost reakčního tepla vliv na iniciaci požáru a jeho následný rozvoj. Proto je i reakční teplo tepelného rozkladu jedním z parametrů vyžadovaných v komplexních pyrolyzních modelech. Hodnoty reakčního tepla desek z aglomerovaného dřeva jsou uvedeny v kapitole 6.2.2.

5.2 Parametry týkající se procesů v plynné fázi

Vstupem modelu hoření (reakce spalování v plynné fázi) je rychlost úbytku hmotnosti vypočtená modelem pevné fáze, jak bylo podrobně diskutováno v předchozí kapitole. Model plynné fáze popisuje exotermickou reakci uvolněných hořlavých plynů se vzdušným kyslíkem za vzniku spalných produktů. Teplo uvolněné spalovací reakcí přímo ovlivňuje vývoj teplotního pole v modelu požáru. Zároveň je zpětně ohříván povrch pevného materiálu, a tím je ovlivněna i rychlost, se kterou se z pevné látky uvolňují hořlavé produkty.

Tab. 4 shrnuje veškeré uživatelem zadávané hodnoty vyplývající z popisu spalné reakce plynných produktů uvolněných při tepelné degradaci pevného materiálu. Oproti Tab. 3 zde již není uváděn typ CFD modelu, jelikož se týká pouze přístupu k popisu rozkladu pevné fáze, zatímco popis spalné reakce je pro všechny přístupy totožný.

Tab. 4: Přehled vstupních parametrů pro hoření v plynné fázi

Vstupní parametr	Značení [jednotka]
Elementární složení paliva	x, y, z, w [-]
Elementární složení sazí	m, n [-]
Podíl sazí	ν_{saze} [-]
Podíl CO	ν_{CO} [-]
Výhřevnost	ΔH_c [kJ/kg]

5.2.1 Výhřevnost

Množství uvolněného tepla spalnou reakcí se vyjadřuje pomocí hodnoty výhřevnosti ΔH_c [kJ/kg]. Výhřevnost vyjadřuje, kolik tepla se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství dané látky za standardních podmínek. Výhřevnost bývá někdy nahrazena hodnotou spalného tepla, které se od výhřevnosti liší tím, že voda vznikající reakcí je uvažována v kapalném, nikoliv plynném, skupenství. Spalné teplo je tak pro stejnou látku vyšší než výhřevnost o množství tepla uvolněného při kondenzaci vodní páry. Je třeba být pozorný při přebírání hodnot výhřevnosti nebo spalného tepla z literatury, jelikož obě veličiny mají stejnou jednotku a v angličtině často i stejné označení. Vzhledem k tomu, že je voda v prostředí požáru ve formě vodní páry, uvažuje se v modelech požáru výhřevnost.

Hodnota výhřevnosti se stanovuje experimentálně v aparatuře, ve které je zajištěno dokonalé spálení známého množství látky. Dokonalého spálení látky je v podmínkách požáru málokdy dosaženo a v praxi se často místo hodnoty „skutečné“ výhřevnosti udává tzv. efektivní výhřevnost (v ČSN 73 0824 lze také najít termín požární výhřevnost), která v sobě zahrnuje efektivitu spalování v reálných podmínkách požáru. Efektivní výhřevnost lze experimentálně stanovit na principu kyslíkové kalorimetrie, např. v kónickém kalorimetru. Poměr mezi efektivní (ΔH_{eff}) a „skutečnou“ výhřevností vyjadřuje tzv. účinnost spalování:

$$\chi = \frac{\Delta H_{eff}}{\Delta H_c} , \quad (13)$$

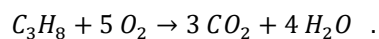
která nabývá hodnot od nuly do jedné, přičemž jednička odpovídá dokonalé spálení materiálu.

Hodnoty efektivní výhřevnosti desek aglomerovaného dřeva jsou uvedeny v kapitole 8.

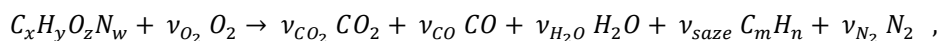
5.2.2 Reaktanty a produkty spalné reakce

S popisem exotermické spalné reakce je mimo množství uvolněného tepla spjaté i definování produktů hoření a výpočet jejich množství. Modely šíření kouře od zdroje studovaným prostorem jsou v oblasti požárního inženýrství jednou z nejčastějších aplikací CFD modelů. Některé materiály, jako například plasty, při hoření produkují velké množství kouře, jehož složení je výrazně odlišné např. od kouře při hoření dřevěných materiálů. Jiný poměr a množství produktů spalování – vody, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a sazí přitom v modelu silně ovlivňují vývoj koncentračního i teplotního pole (ovlivňují sdílení tepla sáláním). V pokročilých modelech požáru proto nestačí popsat pouze uvolněné množství tepla, ale i reaktanty a produkty spalné reakce včetně jejich poměrného zastoupení, stechiometrie.

Pro některé látky, zejména jednoduché plynné nebo kapalně hořlavé uhlovodíky, je snadné definovat probíhající spalnou reakci na základě jejich známého složení i vznikajících produktů. Příkladem může být hoření propanu:



Některé CFD programy dokážou ze zadaného složení uhlovodíků stechiometrii odvodit samy. U složitějších látek nebo směsí, které jsou typické pro značnou část pevných hořlavých materiálů, je obtížné definovat spalnou reakci na základě skutečného složení hořlavých par vzniklých tepelnou degradací. Spalnou reakci je třeba v modelu požáru definovat tak, aby co nejlépe reprezentovala skutečnou spalnou reakci v celém rozmezí teplot, kterých může být v modelu dosaženo. Spalná reakce bývá v pokročilých modelech požáru, zde převzato ze softwaru FDS [8], nejčastěji popsána jako reakce obecného uhlovodíku s kyslíkem za vzniku vodní páry, oxidu uhličitého, oxidu uhelnatého, dusíku a sazí:



kde ν značí stechiometrické koeficienty. Aby bylo možné dopočítat všechny stechiometrické koeficienty, musí uživatel specifikovat zastoupení atomů v molekule paliva (x, y, z, w), složení sazí (m, n), podíl sazí a podíl CO. Podílem je zde myšlena bezrozměrná veličina udávající, kolik kilogramů spalin nebo CO vznikne spálením jednoho kilogramu uhlovodíkového paliva. Pokud uživatel zadá nulový podíl sazí nebo CO, zvolí spalnou reakci, ve které nevznikají saze, respektive probíhá dokonalé spálení paliva až na CO_2 .

Velmi často nastává případ, kdy v simulované doméně nehoří pouze jeden materiál. Například při hoření dřevěného obložení zapáleného pomocí propanového hořáku nebo při hoření interiéru vybaveného dřevěným nábytkem, textilem, plastovými doplňky apod. Každý z výše uvedených materiálů tepelně degraduje jinak za tvorby různých plynných paliv. Z pohledu modelování představuje více plynných paliv výrazný nárůst ve výpočetní náročnosti modelu. Pro každé další plynné palivo v modelu je třeba řešit další transportní rovnici plynných složek. Většina výpočetních nástrojů proto uvažuje pouze jednu spalnou reakci. Toto zjednodušení se projeví tak, že všechny hořlavé materiály uvolňují jeden a ten samý plynný produkt, který podstupuje uživatelem definovanou spalnou reakci. Rozdíl v množství uvolněného tepla při spálení plynných produktů jednotlivých materiálů je pak zajištěn volbou odlišných hodnot výhřevnosti každého materiálu.

Podíl sazí a podíl CO při hoření desek aglomerovaného dřeva je uveden v kapitole 8.

5.3 Ostatní parametry

Na kvalitu předpovědi CFD modelu hoření desek aglomerovaného dřeva má kromě parametrů, které se týkají materiálu samotného vliv, ještě celá řada parametrů, které jsou spojeny se scénářem modelu nebo specifických parametrů různých řešičů v rámci CFD modelu. Některé tyto parametry se musí nastavovat vždy pro každou úlohu, jiné lze ponechat v jejich základním (defaultním) nastavení. V této kapitole jsou zmíněny pouze ty zcela základní parametry či oblasti, které je nutné mít na paměti při sestavování modelu hoření desek aglomerovaného dřeva. Zejména z hlediska modelů rozvoje požáru je třeba si uvědomit, že změna či vývoj podmínek v okolí hořlavých desek má zásadní vliv na průběh hoření samotný. V modelu rozvoje hoření je zásadní správně zachytit zejména tepelnou odezvu z okolí, protože ta přímo určuje, jak rychle se bude aglomerované dřevo rozkládat.

Je potřeba mít na paměti, že v metodice uváděné vstupní parametry postačují ke spuštění simulace, ale zdaleka to nejsou všechny parametry potřebné k prováděným výpočtům. V různých softwarech je zaváděno mnoho dalších korelací a vztahů, ve kterých jsou definovány další parametry, které je možné nebo nutné nastavovat. Uživatel je proto zodpovědný za znalost toho, zda pro konkrétní výpočetní software a hledané výsledky modelu postačuje defaultní nastavení daného řešiče.

5.3.1 Výpočetní síť – proč je velikost buňky důležitá?

Ačkoliv výpočetní síť není parametrem modelu, který by měl přímou souvislost s hořlavým materiálem, struktura výpočetní sítě výrazně ovlivňuje kvalitu předpovědi modelu. V případě modelu hoření se jedná zejména o predikci teploty, rychlosti proudění a koncentrace plynných složek v doméně. Typ buněk a jejich velikost jsou jedny ze základních vlastností výpočetní sítě. V případě nevhodně zvolené výpočetní sítě může mít modelová předpověď malou vypovídající hodnotu i přesto, že ostatní parametry modelu jsou zvoleny korektně. Proč tomu tak je? Jádrem každého CFD modelu 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 (tj. buňky výpočetní sítě) jsou ale hodnoty proměnných v daném časovém kroku konstantní. Je třeba si tedy uvědomit, že 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. Vytvoření dostatečně jemné výpočetní sítě je tedy základním předpokladem pro vytvoření kvalitní CFD simulace. S narůstajícím počtem buněk ale neúměrně narůstá výpočetní náročnost, protože soustava parciálních diferenciálních rovnic je převedena na soustavu algebraických rovnic a řešena v každém kontrolním objemu sítě.

Druhým problémem, který je s kvalitou výpočetní sítě v CFD softwarech úzce spojen, je modelování turbulence. Převážná část požárních úloh je spojená s turbulentním (vířivým) tokem plynů. Turbulence silně ovlivňuje stoupající proud horkých spalin nasáváním čerstvého vzduchu z okolí. Turbulence ovlivňuje také reakční chemii v plynné fázi, protože turbulentní proudění je dominantnější než difuzní procesy při mísení hořlavých plynů a kyslíku. Schopnost modelu co nejlépe popsat časově proměnnou a nahodilou turbulentní strukturu toku plynů v oblasti požáru tak silně ovlivňuje přesnost, s jakou model dokáže predikovat dynamiku požáru.

5.3.2 Počáteční a okrajové podmínky

Aby simulace věrně zachytila reálné chování studovaného scénáře hoření, je třeba věrně popsat okolní a počáteční podmínky. Tzv. okrajové podmínky si můžeme představit jako stav systému na jeho hranicích (mezních bodech). V úlohách hoření se jedná zejména o to, zda je výpočetní doména otevřená či uzavřená do okolí. Je-li doména otevřená, je pak třeba určit, zda v ní dochází k jinému proudění, než je proudění způsobené hořením samotným, jako je například proudění vzduchu. Pokud modelem studovaná situace zahrnuje výrazný vliv proudění okolního vzduchu, je třeba ho do simulace zahrnout. V uzavřených doménách zase musíme definovat, jak se budou z hlediska sdílení tepla chovat stěny obklopující daný prostor, respektive obecně všechny pevné povrchy v doméně. Povrch může být inertní, tedy nijak neinteragující s okolím, nebo může docházet k výměně tepla mezi pevným povrchem a okolním prostředím. Jestliže se např. odvádí teplo do okolních stěn, kde se v průběhu času akumuluje a může se vyzařovat zpět do prostředí požáru, bude se teplota plynů v místnosti vyvíjet výrazně jinak, než když budeme uvažovat stěnu inertní. V uzavřených prostorách se také v modelu často uvažuje tzv. nucená konvekce, tedy proudění vyvolané systémy pro ventilaci, vytápění či klimatizaci.

Počáteční podmínky udávají stav prostředí na počátku simulace. Nejčastěji se jedná o teplotu prostředí, ale ve speciálních případech můžeme simulovat i prostředí s jiným než atmosférickým tlakem nebo jinou okolní atmosférou, než je atmosféra vzduchu.

Nelze obecně říci, jak silný vliv budou mít v konkrétní simulaci okrajové a počáteční podmínky na výslednou předpověď modelu, respektive na jeho vypovídající hodnotu. Správnost a úroveň detailu z tohoto hlediska musí vždy posoudit uživatel před simulací samotnou. Klíčové jsou tyto podmínky v případech CFD modelů použitých pro validaci.

6 Parametry modelu tepelného rozkladu aglomerovaného dřeva

V následující sekci je stanoveno schéma tepelného rozkladu všech čtyř studovaných aglomerovaných desek a jsou tabelovány odpovídající kinetické parametry tepelného rozkladu těchto desek.

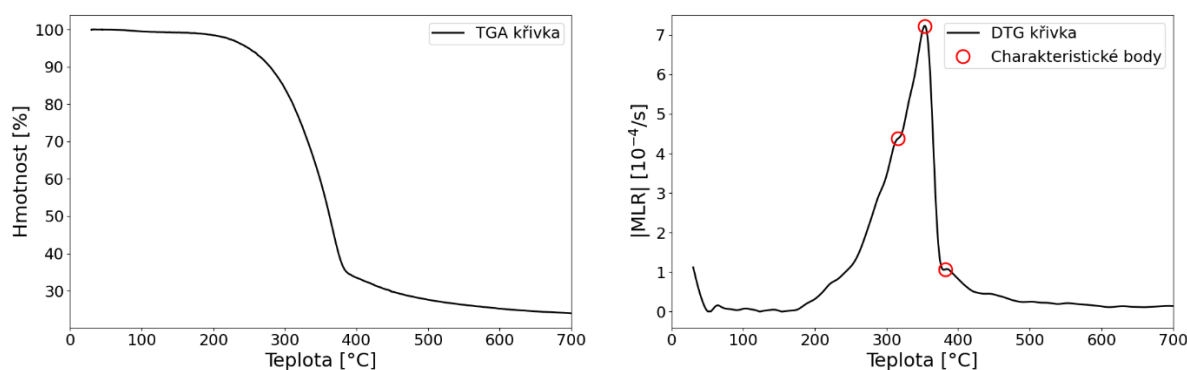
6.1 Kinetické parametry

Mezi kinetické parametry řadíme trojici parametrů, které jsou teoreticky zavedeny v sekci 5.1.3: Aktivační energii E_A , předexponenciální faktor A a řád reakce N .

6.1.1 Jak byly parametry získány? – Teorie

Kinetické parametry pyrolýzního modelu není možné změřit přímo, ale musí být nepřímo vypočteny s využitím experimentálně naměřených dat. Experimentální data se získávají pomocí termogravimetrické analýzy (TGA). **Termogravimetrická analýza** je destruktivní laboratorní metoda, založena na principu řízeného zahřívání několikamiligramového vzorku umístěného v měřicím kelímku v peci na přesných vahách. Konstrukce pece umožňuje měření provádět ve zvolené atmosféře, standardně za přístupu vzduchu, kdy dochází k zahoření plynných produktů, nebo v inertním prostředí (nejčastěji dusíku), kde dochází pouze k tepelnému rozkladu bez následného zahoření. Výstupem metody je tzv. TGA křivka, závislost úbytku hmotnosti měřeného vzorku na teplotě nebo čase v předem zvoleném teplotním, resp. časovém intervalu.

Aby bylo možné provést výpočet kinetických parametrů, je nutné derivací TGA křivky získat tzv. DTG křivku, neboli závislost rychlosti úbytku hmotnosti na teplotě, resp. čase, viz Obr. 2. DTG křivka je



Obr. 2: TGA křivka tepelného rozkladu dřevotřísky v inertní atmosféře (levá strana). Vyhlazená DTG křivka pro dané měření s vyznačením charakteristických bodů (pravá strana).

následně vyhlazena a porovnána s výsledky teoretického modelu TGA aparatury popsaného níže. Na základě porovnání jsou vhodnou matematickou metodou (matematickou optimalizací) dopočítány kinetické parametry popisující rychlost úbytku hmotnosti zkoumaného materiálu. Více informací o principu matematické optimalizace pro řešení inverzní úlohy (tzv. inverse modelling) přesahuje rozsahem tuto metodiku a čtenář je odkázán například na publikace [9], [10], [11].

Na Obr. 2 vpravo jsou zároveň zvýrazněny teploty, kterým odpovídají tzv. charakteristické body DTG křivky. Tyto body odpovídají maximálním rychlostem rozkladu (vrcholům) a inflexním bodům DTG křivky, které rovněž značí maximální rychlost jedné z vícero paralelně probíhajících (překrývajících se) reakcí. Počet charakteristických bodů na DTG křivce v oblasti tepelného rozkladu napovídá, kolik fiktivních reakcí zvolit v rámci hledání vhodného zjednodušeného schématu tepelného rozkladu, viz kapitola 5.1.4. Tento postup zvaný K-K metoda [12] pro volbu počtu fiktivních reakcí na základě počtu charakteristických bodů nelze univerzálně aplikovat na každý rozkládající se materiál a stejně tak nelze předem stanovit, zda je vhodné dané reakce volit jako paralelní, následné nebo jejich kombinaci. Přesto je K-K metoda využívána [13], protože poskytuje velmi dobrý odhad pro počáteční volbu zjednodušeného rozkladného schématu, kterou je následně možné pozměnit na základě uživatelem požadované přesnosti shody experimentálních dat s modelem.

Teoretický model TGA aparatury vychází ze dvou předpokladů: 1) vzorek je zahříván nízkou rychlostí, a je proto možné předpokládat tepelnou rovnováhu mezi měřeným vzorkem a plynnou atmosférou, 2) pro malé navážky vzorků je možné zanedbat vznik teplotního gradientu ve vzorku. Jsou-li obě podmínky splněny, je zaveden předpoklad tzv. OD vedení tepla, kde nejsou uvažovány materiálové vlastnosti vzorku a teplota ve všech částech vzorku je stejná jako v měřící aparatuře. Naměřená data jsou pak funkcí pouze tepelného rozkladu. Jiné fyzikální procesy nejsou uvažovány, a proto se právě tato experimentální metoda využívá ke stanovení kinetických parametrů. Podmínky pro splnění předpokladu tepelné rovnováhy a nulového gradientu tepla ve vzorku jsou podrobněji diskutovány v kapitole 6.1.2.

6.1.2 Správná praxe v měření

Z postupu získávání kinetických parametrů pomocí TGA dat vyplývá, že je naprosto zásadní kvalita naměřených experimentálních dat. Kinetické parametry tepelného rozkladu mohou být vždy jen tak „dobré“, jak dobrá jsou kvalitní experimentální data. Přitom právě nastavení měření, příprava vzorku, správná údržba a kalibrace zařízení jsou klíčové z hlediska opakovatelnosti měření a splnění předpokladů uvedených v předchozí kapitole. Zpráva vydaná v rámci mezinárodní iniciativy MaCFP (Measurement and Computation of Fire Phenomena) pro rozvoj modelů tepelné degradace látek porovnávala TG data totožného materiálu s totožným zadáním měření získaná od 16 na sobě nezávislých institucí po celém

světě [14]. Z porovnání jasně vyplynulo, jak výrazný vliv na měření mají níže zmíněné parametry, lidský faktor i rozdílnost TG přístrojů.

Z pohledu uživatele je nezbytné před měřením zvolit několik parametrů, které úzce souvisí s další analýzou dat pro stanovení kinetických parametrů:

- **Plynná atmosféra.** Oxidativní atmosféra (vzduch) odpovídá dobře ventilovanému prostředí mimo pyrolyzní zónu (zóna, kde probíhá tepelný rozklad a kde zároveň dochází ke spotřebování většiny přítomného kyslíku díky hoření). Naopak inertní atmosféra odpovídá tepelnému rozkladu v prostoru bez přístupu kyslíku nebo v pyrolyzní zóně.
- **Navážka vzorku.** Platí pravidlo, že čím větší navážka, tím je silnější měřicí signál a menší chyba měření hmotnosti. Příliš velká navážka ovšem může způsobit vznik tepelného gradientu ve vzorku a porušení předpokladu 2), viz kapitola 6.1.1. Optimální navážku nelze univerzálně určit, liší se pro různé typy TGA aparatur, zvolené měřicí kelímky a měřené materiály. Vhodnou navážku je nutné najít a ověřit pro dané experimentální nastavení pomocí několika zkušebních měření. Příliš nízká navážka se projeví nestabilním signálem hmotnosti a obtížně vyhladitelnými DTG daty. Příliš vysoká navážka způsobí rozdíly (posuny) v průběhu TGA křivek pro dvě různé navážky v jinak identickém nastavení měřicí metody.
- **Teplotní program.** Začátek a konec teplotního programu je volen tak, aby bezpečně zahrnoval celé teplotní rozmezí tepelného rozkladu vzorku (pro aglomerované dřevěné materiály 25–600 °C). Pro vytemperování aparatury a ustálení měřeného signálu je vhodné na začátku a konci tohoto intervalu ponechat alespoň 10 minut izotermní segment. Rychlost ohřevu mezi izotermními segmenty je volena konstantní a dostatečně nízká, aby byl splněn předpoklad 1), viz kapitola 6.1.1. Běžně je používána rychlost ohřevu 5 nebo 10 °C/min. V případě, že je potřeba rozlišit tepelné děje, které probíhají na velmi krátkém teplotním intervalu, může být výhodné přistoupit i k nižší rychlostí ohřevu. Při velmi nízkých rychlostech ohřevu ale úměrně narůstá doba zdržení vzorku v aparatuře. Pokud měření zároveň probíhá v inertní atmosféře, může dojít k nežádoucímu proniknutí oxidativní atmosféry z okolí aparatury difúzí skrze netěsnosti a přívody inertního plynu. Při použití vyšších rychlostí ohřevu než 20 °C/min začínáme narážet na limity spojené s kvalitou kalibrace přístroje.
- **Kelímky na měření.** Kelímek je potřeba zvolit tak, aby v průběhu měření nereagoval s měřeným vzorkem ani s plynnou atmosférou. Zároveň musí mít kelímek dostatečně vysokou teplotu tání, aby vydržel podmínky dané teplotním intervalem měření (pro aglomerované materiály je vhodný například hliníkový, do 600 °C, nebo korundový kelímek). Uzavření kelímku víčkem není pro měření úbytkem hmotnosti nutné. Při uzavření víčkem by mohlo dojít k natlakování kelímku vznikajícími pyrolyzními produkty a k poškození aparatury.

Před samotným měřením je dále nutné provést kalibraci vah a teploty v peci TGA aparatury. Kalibrace se provádí zvláště pro každou konkrétní výše zvolenou plynnou atmosféru, rychlost ohřevu, měřicí kelímek a navážku vzorku (kalibrační standard by měl v ideálním případě mít podobnou navážku a tepelné vlastnosti jako měřený vzorek). Tímto způsobem je možné eliminovat rozdíl v teplotách mezi vzorkem a plynnou atmosférou. Správně provedená kalibrace je klíčová pro zajištění „kvalitních“ TG dat.

Samotný vzorek by měl být před měřením zhomogenizován na jemný prášek neobsahující velké částice (třísky v případě dřevěných materiálů). Pokud je předmětem zájmu vliv vlhkosti vzorku, je vhodné před zahájením měření vzorek alespoň 24 hodin klimatizovat, nebo naopak vysušit, pokud je žádoucí vlhkost eliminovat.

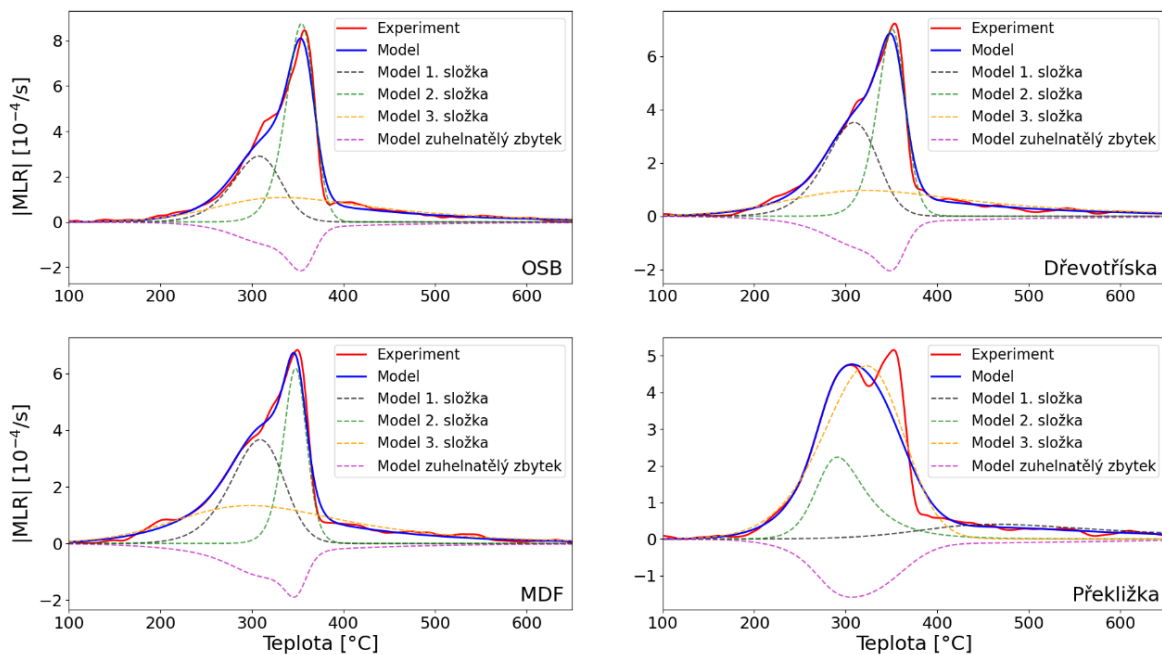
Po měření by měla vždy následovat kontrola obdržení dat, která zahrnuje ověření, zda byl dodržen předepsaný teplotní program měření. Především, zda byla dodržena zvolená konstantní rychlost ohřevu vzorku. Kontrola se provádí vynesáním závislosti teploty vzorku na čase. Tato závislost by v měřeném intervalu měla mít lineární průběh a směrnici rovnou zvolené hodnotě rychlosti ohřevu.

V případě, že směrnice není konstantní po celou dobu ohřevu nebo se liší od zvolené hodnoty, je nutné tuto skutečnost zohlednit v teoretickém modelu TGA. Přestože je snaha přípravou vzorku zamezit vlivu nehomogenity materiálu a rozdílné vlhkosti, aglomerované materiály nedosahují opakovatelnosti měření jako např. některé anorganické materiály a je žádoucí každé měření alespoň třikrát opakovat. V rámci kontroly je pak nutné uživatelem ověřit předem stanovená kritéria shody jednotlivých měření (např. teplotu počátku a konce tepelného rozkladu, šířku teplotního intervalu rozkladu, teplotu odpovídající maximu rychlosti rozkladu a hodnotu této rychlosti) a na základě této shody v případě potřeby vyřadit některé datové sady nebo doměřit další.

6.1.3 Kinetické parametry aglomerovaných desek

TGA data byla naměřena na aparatuře Netzsch STA 449 F1 Jupiter vybavené autosamplerem v atmosféře dusíku při rychlosti ohřevu 5 °C/min a pro navážku 9–11 mg vzorků umístěných v otevřených korundových kelímcích (85 μ L). Vzorky před měřením nebyly klimatizovány ani vysušovány. Klimatizování bylo nahrazeno 5 min trvajícím izotermním segmentem před začátkem ohřevu, aby došlo k ustálení signálů aparatury a vyrovnání teplot vzorku s teplotou v peci. Měřící cela byla před samotným začátkem měření třikrát vevakuována a naplněna dusíkovou atmosférou. Měření každého materiálu bylo třikrát opakováno.

V případě měření TGA, kde je sledován proces tepelného rozkladu, nebylo nutné eliminovat přítomnost vlhkosti ve vzorku, jelikož odpaření vlhkosti probíhá při výrazně nižších teplotách než samotný rozklad. Odpaření vlhkosti přímo v TGA aparatuře zároveň nijak neovlivňuje následný tepelný rozklad a vzhledem k použití otevřeného kelímku není riziko jeho natlakování a zdeformování.



Obr. 3: Porovnání experimentálních DTG křivek s výsledky modelu s použitím optimalizovaných vstupních parametrů. Čárkované křivky představují jednotlivé reakce zvoleného třísložkového rozkladného schématu a vznikající zuhelnatělý zbytek.

Na základě analýzy TGA dat K-K metodou představenou v úvodu této kapitoly bylo pro všechny čtyři aglomerované materiály stanoveno tříkrokové paralelní rozkladné schéma,

v_1 Pevná složka 1 $\rightarrow v_{zbytek}$ Zuhelnatělý zbytek + Hořlavé plyny

v_2 Pevná složka 2 $\rightarrow v_{zbytek}$ Zuhelnatělý zbytek + Hořlavé plyny

v_3 Pevná složka 3 $\rightarrow v_{zbytek}$ Zuhelnatělý zbytek + Hořlavé plyny

ve kterém se tři fiktivní složky rozkládají na pevný zbytek a hořlavé plyny. Stechiometrický koeficient zuhelnatělého zbytku je stejný pro všechny tři složky a rovná se množství zbytku naměřeného v TG.

Pro každý krok byly stanoveny kinetické parametry. Porovnání experimentálních a modelových dat s využitím stanoveného rozkladného schématu a kinetických parametrů je uvedeno na Obr. 3. Je patrné, že shoda je velmi dobrá a zvolené schéma a jeho parametry velmi dobře vystihují tepelný rozklad jednotlivých desek aglomerovaného dřeva při jeho zahřívání v TG aparatuře. Na Obr. 3 jsou také zakresleny jednotlivé fiktivní reakce a vznikající zuhelnatělý zbytek. Přestože grafy na obrázku zobrazují absolutní hodnotu rychlosti úbytku hmotnosti, zuhelnatělý zbytek je uváděn v záporných hodnotách, aby bylo zdůrazněno, že na rozdíl od všech ostatních zanikajících složek zuhelnatělý zbytek vzniká. Sada optimalizací získaných vstupních parametrů, odpovídající výstupům zakreslených na Obr. 3, je souhrnně uvedena v Tab. 5.

Tab. 5: Přehled kinetických parametrů a složení pro popis tepelného rozkladu aglomerovaných materiálů.

Materiál	Vstupní parametr	Hodnota parametru		
		Reakce 1	Reakce 2	Reakce 3
OSB	$\log A$ [log 1/s]	8,601	19,313	2,820
	E_A [kJ/mol]	127	267	58
	N [-]	1,26	1,32	3,02
	N_{O_2} [-]	0	0	0
	v [%]	0,240	0,421	0,339
	v_{zbytek} [-]	0,210	0,210	0,210
Dřevotřískas	$\log A$ [log 1/s]	7,535	20,356	1,415
	E_A [kJ/mol]	116	278	44
	N [-]	1,20	1,45	2,70
	N_{O_2} [-]	0	0	0
	v [%]	0,310	0,339	0,351
	v_{zbytek} [-]	0,230	0,230	0,230
MDF	$\log A$ [log 1/s]	7,471	26,490	1,014
	E_A [kJ/mol]	115	349	41
	N [-]	1,23	1,57	2,23
	N_{O_2} [-]	0	0	0
	v [%]	0,329	0,249	0,422
	v_{zbytek} [-]	0,220	0,220	0,220
Překližka	$\log A$ [log 1/s]	5,032	15,833	3,499
	E_A [kJ/mol]	83	189	74
	N [-]	3,96	3,01	1,13
	N_{O_2} [-]	0	0	0
	v [%]	0,159	0,204	0,637
	v_{zbytek} [-]	0,250	0,250	0,250

Je třeba mít na paměti, že uvedené parametry jsou svázané s rychlostí ohřevu použitou při TG měření. Při porovnání modelové předpovědi při jiné rychlosti ohřevu s parametry z Tab. 5 bude shoda horší. Problematika kalibrace kinetických parametrů přes větší rozsah rychlostí ohřevu je v odborné komunitě stále diskutována bez jednoznačných doporučení a překračuje rámec této metodiky.

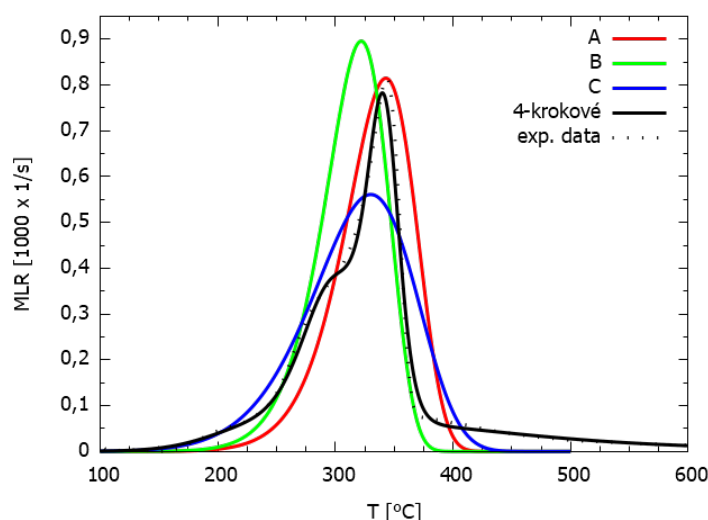
6.1.4 Citlivostní analýza

Z hlediska vztahu modelu a vstupních parametrů, je vhodné provádět tzv. citlivostní analýzy, tedy studie, jak velký vliv má změna jednoho vstupního parametru na výstup modelu – v tomto konkrétním případě na rychlost úbytku hmotnosti (MLR). Takové studie nám ukáží, které parametry zatíží model největší chybou, jsou-li stanoveny nepřesně nebo s velkou mírou nejistoty.

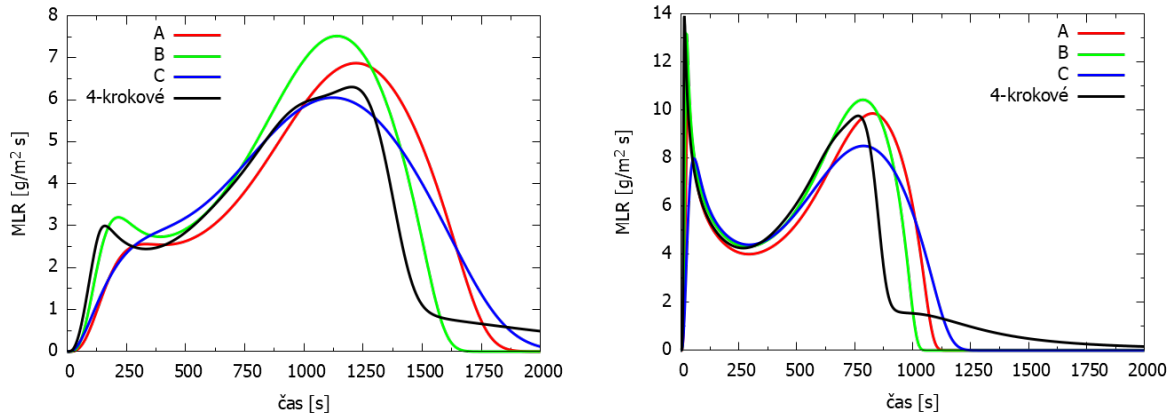
Lautenberger ve své dizertaci ukazuje citlivost komplexního pyrolyzního modelu Gpyro na předpověď rychlosti úbytku materiálu, který nezanechává a který zachovává pevný zbytek při rozkladu [15]. Podobnou studii provedl Stoliarov a kol. v softwaru ThermaKin pro materiál rozkládající se beze zbytku [16]. Z obou těchto studií vyplývá, že rychlost hmotnostního úbytku (obvykle demonstrována rozdílem maximální hodnoty) MLR předpovězená modelem je silně závislá na kinetických parametrech, zejména na poměru aktivační energie a předexponenciálního faktoru. Tyto dva parametry se v modelech tepelného rozkladu dokáží vzájemně kompenzovat, tzn., že lze nalézt dvě rozdílné kombinace A a E_A , které ve výsledku povedou na stejnou rychlost tepelného rozkladu v modelu.

Stanovení rozkladného schématu a určení parametrů rozkladu je tedy pro předpověď chování modelu tepelné degradace zásadní. Citlivostní studie se obvykle provádí na jednoduchých jednokrokových schématech rozkladu. Na Obr. 4 je vidět porovnání vlivu komplexity rozkladného schématu na předpověď chování teoretického modelu TGA aparatury. Experimentální data z TGA analýzy aglomerovaného dřeva byla vyhodnocena tak, že byla stanovena postupně čtyři rozkladná schémata:

- komplexní čtyřkrokové, které zachycuje všechny atributy MLR křivky naměřené pomocí TGA,
- jednokrokové, ve kterém byla zachována poloha a maximum hlavního MLR píku (A),
- jednokrokové, ve kterém byla zachována šířka píku MLR dle experimentu TGA (B),
- jednokrokové, ve kterém byl zachován tzv. onset, tedy teplota, při které začíná docházet k rozkladu (C).



Obr. 4: Porovnání vlivu komplexity rozkladného schématu na předpověď rychlosti hmotnostního úbytku v teoretickém modelu TGA aparatury - čtyřkroková a tři zjednodušená jednokroková rozkladná schémata.



Obr. 5: MLR predikovaný 1D modelem tepelného rozkladu v softwaru Gpyro pro čtyři různá rozkladná schémata viz Obr. 4 a dvě hodnoty externího tepelného toku 20 (vlevo) a 50 (vpravo) kW/m^2 . $\lambda_i = 0.13 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\lambda_{zbytek,i} = 0.06 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $c_{p,i} = 1600 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $c_{p,zbytek,i} = 1000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $\Delta H = 10 \text{ kJ/kg}$.

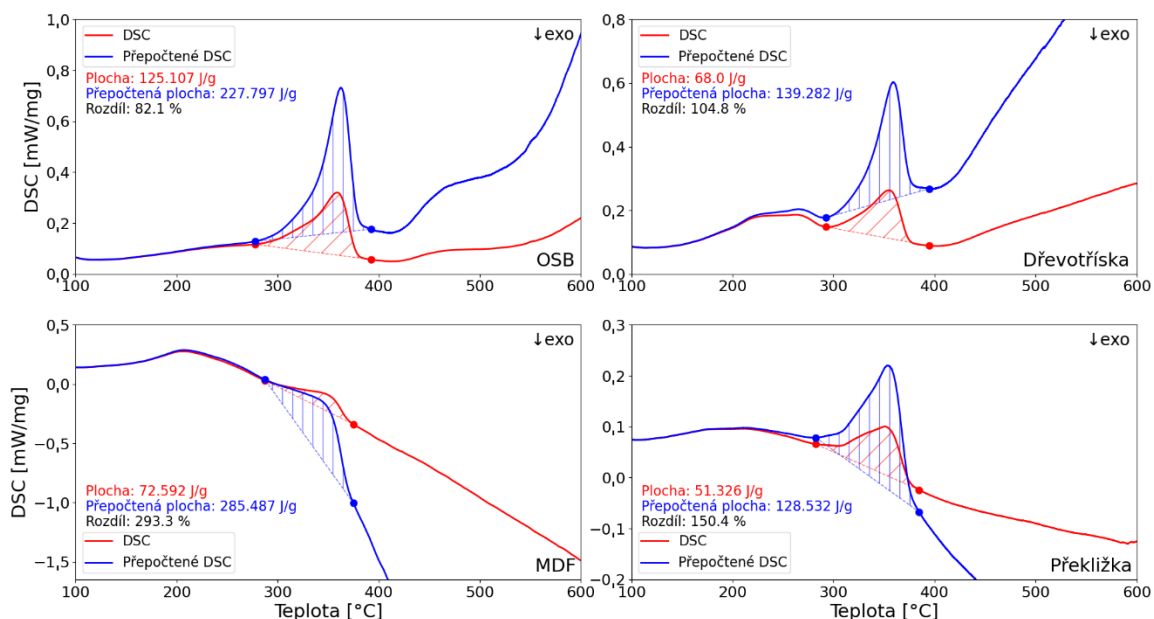
Obr. 4 demonstruje, jak výrazně se může projevit příliš velké zjednodušení rozkladného schématu na modelem předpovídanou rychlost tepelného rozkladu. S jednokrokovým schématem u dřeva a desek z aglomerovaného dřeva nelze napodobit jejich tepelný rozklad tak, aby byly zachovány tři hlavní atributy MLR křivek z TG – poloha a maximum MLR píku, počátek tepelného rozkladu a teplotní interval tepelného rozkladu. Zjednodušení vždy vede k tomu, že některý z těchto charakteristických bodů TG křivky je silně podhodnocen nebo nadhodnocen.

Na Obr. 5 je ukázáno, jak se projeví zjednodušení rozkladného schématu na křivce hmotnostního úbytku v 1D modelu tepelného rozkladu, tedy v situaci, kdy uvažujeme také parametry spojené s vedením tepla materiálem. Na Obr. 5 jsou výsledky dvou totožných simulací, které se od sebe liší v okrajové podmínce – v intenzitě tepelného toku dopadajícího na povrch pevné látky a to 20 a 50 kW/m^2 . Ve všech čtyřech simulacích jsou všechny ostatní parametry kromě kinetického schématu a jemu příslušných parametrů konstantní. Obr. 5 tedy jednoznačně potvrzuje, že kinetické parametry hrají v předpovědi modelu tepelné degradace a tím pádem následně i hoření aglomerovaného dřeva velmi důležitou roli.

6.2 Reakční teplo tepelného rozkladu

K získání hodnoty reakčního tepla tepelného rozkladu (a zároveň jakýchkoliv dalších reakčních tepel, např. pro odpaření vlhkosti) se využívá diferenční kompenzační kalorimetrie (zkratka DSC z anglického Differential Scanning Calorimetry). DSC je destruktivní laboratorní metoda založená na velmi podobném principu jako metoda TGA. Měřený několikamiligramový vzorek je umístěn v měřicím kelímku v peci a je sledována jeho tepelná odezva na řízené zahřívání oproti referenčnímu materiálu. Probíhající exotermické, resp. endotermické děje nebo změna tepelné kapacity vzorku způsobí měřitelný rozdíl teplot mezi měřeným vzorkem a referenčním materiálem, který se přístroj snaží kompenzovat. Energie potřebná na tuto kompenzaci pak odpovídá enthalpii probíhajícího děje (např. fázové přeměny, skelného přechodu, oxidace, tání, rozkladu nebo změně měrné tepelné kapacity). Metoda DSC bývá často kombinována se současným měřením úbytku hmotnosti, tedy s metodou TGA. V takovém případě se jedná o simultánní termickou analýzu (STA).

Výstupem metody DSC je DSC křivka vyjadřující množství energie dodané nebo uvolněné vzorkem v závislosti na teplotě. Pro potřeby výpočtu reakčního tepla je třeba změřit DSC křivku prázdného kelímku, tzv. blanku (více o významu a postupu měření blank je uvedeno v kapitole 7.2.1), a vzorku za totožných podmínek. DSC křivka blanku je při zpracování dat odečtena od DSC křivky vzorku. Reakční



Obr. 6: Porovnání přepočítaných (viz kapitola 6.2.1) i původních DSC křivek jednotlivých aglomerovaných materiálů s vyznačením plochy pod rozkladným píkem.

teplo se pak rovná ploše pod píkem DSC křivky (po odečtení blanku) příslušného probíhajícího děje, v tomto případě tepelného rozkladu, viz Obr. 6.

DSC křivky na Obr. 6 odpovídají měření v dusíkové atmosféře při rychlosti ohřevu 5 °C/min. Dusíková atmosféra je v tomto případě nutností, jelikož přítomnost kyslíku (nebo jiného oxidačního činidla) by způsobila výrazně exotermické zahoření uvolňovaných plynů, které by svým tepelným efektem přebilo hledané reakční teplo. Více o vhodné volbě nastavení DSC a správné praxi v měření je podrobně uvedeno v kapitole 7.2.2.

6.2.1 DSC křivka dějů, při kterých se mění hmotnost vzorku

DSC křivka standardně zobrazuje tepelný tok vztažený na počáteční hmotnost vzorku (hmotnost vzorku je možné zaznamenat jen před samotným měřením). Pokud se v průběhu měření hmotnost vzorku změnila, dochází tak k „deformaci“ DSC křivky. DSC se standardně používá pro studium jevů, při kterých nedochází ke změně hmotnosti, jako je například tání. Při využití DSC ke studiu jevů tepelného rozkladu dochází k výrazným změnám hmotnosti vzorku v čase. Reakční teplo tepelného rozkladu, spočtené standardně z původní hmotnosti vzorku na začátku měření, by tak bylo nižší než skutečné reakční teplo, protože by bylo vztaženo i na část vzorku, která již v daném momentu byla přeměněna na plynnou fázi. Tento fakt je možné korigovat v případě STA měření. TGA měření zaznamenává závislost hmotnosti vzorku na teplotě (viz Obr. 2), kterou je možné započítat při vykreslení DSC křivky. Výsledné naměřené hodnoty tak nejsou vztaženy na počáteční hmotnost vzorku, ale na hmotnost aktuální. Takto přepočítané DSC křivky a plochy odpovídající tepelnému rozkladu přepočítaných křivek jsou také vykresleny na Obr. 6.

6.2.2 Naměřené hodnoty

Přepočítaná (korigovaná) i nepřepočítaná hodnota reakčního tepla rozkladu studovaných aglomerovaných materiálů je uvedena v Tab. 6. DSC měření byla prováděna simultánně s TGA měřeními popisovanými v kapitole 6.1.3 a tedy i za stejných podmínek.

Jak je vidět z Tab. 6, rozdíl v plochách píku může být po přepočítání značný. Například pro děje spojené s malým úbytkem hmotnosti, jako je odpaření vlhkosti (úbytek jsou řádově jednotky procent), se rozdíl projeví minimálně. Pro rozkladné píky, kde dochází k odstranění až 80 % původní hmotnosti (zbytek do 100 % tvoří zuhelnatělý zbytek), se rozdíl může projevit i několikanásobným navýšením reakčního tepla. Navýšení se projeví především, pokud je tzv. baseline (DSC signál odpovídající teplotám, kdy neprobíhají žádné exotermní nebo endotermní děje) nekonstantní. Tato skutečnost je nejlépe patrná při měření MDF, kde je baseline signál výrazně klesající a po přepočítání se rychlost poklesu ještě umocní. V takovýchto případech má na plochu pod křivkou velký vliv volba základny pod píkem (zde vždy volena lineární), která může nabývat také například sigmoidálního nebo tangenciálního tvaru. Pro volbu základny pod píkem neexistují žádná pravidla, přestože zásadně ovlivňuje výsledné reakční teplo. Je proto potřeba mít na paměti, že s ohledem na chybu DSC měření (o potlačení chyb více v kapitole 7.2.2) a vliv různých přístupů k vyhodnocení dat se může hodnota reakčního tepla tepelného rozkladu lišit řádově o desítky procent pro konkrétní měřící aparaturu a vyhodnocovatele dat.

Tab. 6: Přehled reakčních tepep tepelného rozkladu aglomerovaných materiálů.

Materiál	Reakční teplo tepelného rozkladu [J/g]	Přepočítané reakční teplo tepelného rozkladu [J/g]
OSB	115	201
Dřevotříska	69	124
MDF	70	265
Překližka	50	123

7 Fyzikální a materiálové vlastnosti, tepelně-technické charakteristiky

V kapitole 5.1.1 bylo ukázáno, že v rovnici pro vedení tepla vystupuje objemová hmotnost ρ , měrná tepelná kapacita c_p a součinitel tepelné vodivosti λ . Tyto vlastnosti jsou vzájemně provázané pomocí veličiny tepelná difuzivita a [m²/s]

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}. \quad (14)$$

Tyto materiálové vlastnosti obecně nejsou konstantní. V případě aglomerovaného dřeva se objemová hmotnost mění s průřezem desky. Měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti jsou zase rostoucí funkcí teploty. Parametry přitom mají klíčový význam pro předpověď zahřívání pevné fáze a rychlosti uvolňování hořlavých plynů.

Při experimentálním stanovení těchto vlastností nebo při jejich dohledání v odborné literatuře je třeba si jejich vzájemné propojení uvědomit a je třeba rozumět pozadí a limitům použitých měřících metod, včetně metod přípravy vzorků, které naměřené hodnoty výrazně ovlivňují. V případě modelování hoření aglomerovaných desek je také třeba určit tyto parametry pro zuhelnatělý zbytek. Zuhelnatělý zbytek jsou křehké, silně nehomogenní a obtížně se s nimi pracuje. U experimentálních metod, kde velikost, respektive struktura vzorku, ovlivňují výslednou naměřenou hodnotu, je pak otázkou, jak připravit reprezentativní vzorek.

V této kapitole jsou postupně stanoveny všechny tři výše zmíněné vlastnosti všech čtyř surových aglomerovaných desek. Pro zuhelnatělý zbytek byla stanovena objemová hmotnost a měrná tepelná kapacita. Součinitel tepelné vodivosti se použitou metodou nepodařilo naměřit.

7.1 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost [kg/m^3] vyjadřuje podíl hmotnosti ku objemu materiálu. Na rozdíl od hustoty se v případě objemové hmotnosti jedná o objem, který zahrnuje i dutiny a póry v materiálu. Pro materiál, který neobsahuje žádné dutiny ani póry je hodnota objemové hmotnosti totožná s hustotou. Naopak pro materiál, jakým jsou například některé aglomerované desky nebo jejich zuhelnatělé zbytky, které obsahují dutiny a póry, je objemová hmotnost vždy nižší než hustota. V oblasti CFD modelování není používána hustota, protože není možné výpočetní sítí postihnout jemnou strukturu pórů a dutin v materiálu. Další měřené vlastnosti, jako je například součinitel tepelné vodivosti, jsou také určovány na základě chování materiálu včetně pórů a dutin. Pórovitost jako vlastnost materiálu není běžně v modelech hoření zavedena, a materiál je proto modelován pomocí jednotlivých vrstev (1D modely) nebo objemů (3D modely), které jsou popsány jednou hodnotou objemové hmotnosti.

7.1.1 Jak byly parametry získány? – surové aglomerované dřevo

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, aglomerované materiály jsou charakteristické vertikálním hustotním profilem, VDP (pro porézní materiály by se termín měl nazývat vertikální profil objemové hmotnosti, který se ale nepoužívá). K měření VDP se používá buďto rentgenové denzitometrie [17], [18], [19] nebo je opakovaně měřena průměrná objemová hmotnost v jednotlivých velmi tenkých podélných řezech vzorku. Tato průměrná hustota se dopočítává na základě měření hmotnosti a objemu dané vrstvy. V této metodice je dále diskutován pouze druhý přístup, který ke zjištění objemové hmotnosti nevyžaduje speciální aparaturu.

Výhodou aglomerovaných materiálů je jejich snadná obrobiteľnosť. Měření průměrné objemové hmotnosti ve velmi tenkých podélných vrstvách je proto možné provést vykroužením válcového vzorku a jeho následným postupným odbroušováním. Odbroušení tenké vrstvy materiálu vždy předchází vážení na laboratorních vahách a změření průměru a výšky válce posuvným měřítkem. Průměrná objemová hmotnost v dané odbroušené vrstvě je poté dána výpočtem:

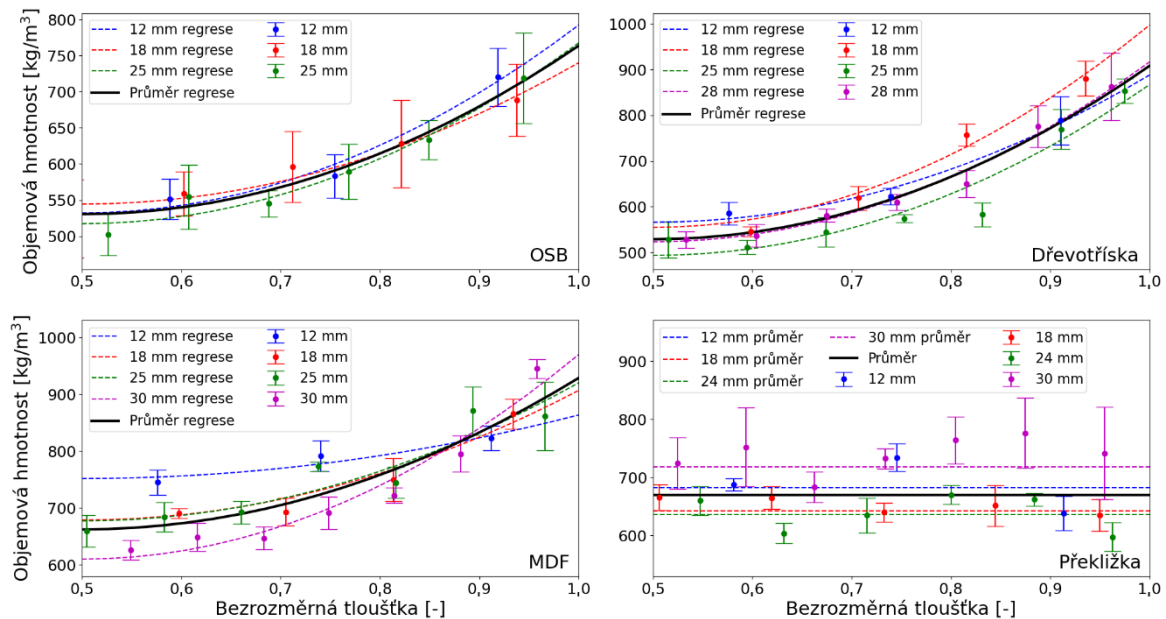
$$\rho_i = \frac{4 m_i - m_{i-1}}{\pi d^2 (h_{v,i} - h_{v,i-1})} , \quad (15)$$

kde ρ_i značí objemovou hmotnost i -té vrstvy, m_i hmotnost po i -tém odbroušení, d průměr válce a $h_{v,i}$ výšku válce po i -tém odbroušení. Takto vypočítaná hodnota ρ_i odpovídá průměrné objemové hmotnosti vrstvy a v grafech na Obr. 7 je vynesena do polohy $(h_{v,i} + h_{v,i-1})/2$ tedy do středu této vrstvy.

7.1.2 Jak byly parametry získány? – zuhelnatělé zbytky aglomerovaného dřeva

Zatímco VDP původního materiálu lze na počátku simulace definovat pomocí různě tlustých vrstev materiálu o různé objemové hmotnosti (konstantní v celé vrstvě), zuhelnatělý zbytek v každé z této vrstev vznikne až na základě probíhající rozkladné reakce a jeho objemová hmotnost je konstantou pro celou vrstvu. Z tohoto důvodu je zjišťována pouze průměrná objemová hmotnost zuhelnatělých zbytků a případný VDP zuhelnatělých zbytků je dopočítán modelem na základě postupného degradování různých vrstev materiálu.

K výpočtu objemové hmotnosti zuhelnatělého zbytku je opět zapotřebí získat hmotnost vzorku a jeho objem zahrnující póry a dutiny. Zatímco změření hmotnosti nepředstavuje na laboratorních vahách problém, určení objemu zuhelnatělého zbytku je obtížné vzhledem k jeho nepravidelnému tvaru a porézní a křehké struktuře. Standardní metody měření objemu nepravidelných částic, jako je plynová nebo kapalinová pyknometrie, není možné v případě zuhelnatělých zbytků použít, protože tyto metody měří objem bez pórů. K měření objemu se proto v této metodice použilo fotogrammetrické metody. Fotogrammetrie je založena na digitálním zrekonstruování měřeného vzorku z fotografií daného vzorku pořízeným z různých úhlů. Specializovaný fotogrammetrický software, např. MeshRoom2020, zpracuje



Obr. 7: Hustotní profil OSB, dřevotřísky, MDF a překližky naměřený pro desky různé tloušťky. Chybové úsečky značí minimální a maximální naměřené hodnoty. Plná čára je dopočtená kvadratická regresní funkce vypočtená přes všechny tloušťky daného materiálu, čárkovaná čára je regresní funkce pouze pro danou tloušťku.

jednotlivé fotografie, nalezne společné body v těchto fotografiích a na základě těchto bodů vytvoří prostorovou rekonstrukci vzorku. Prostorovou rekonstrukci lze vyexportovat a opět existují programy, např. MeshLab, které vypočítají objem rekonstruovaného objektu. Pro více detailů je čtenář odkázán na uvedené literární zdroje – [20], [21], [22].

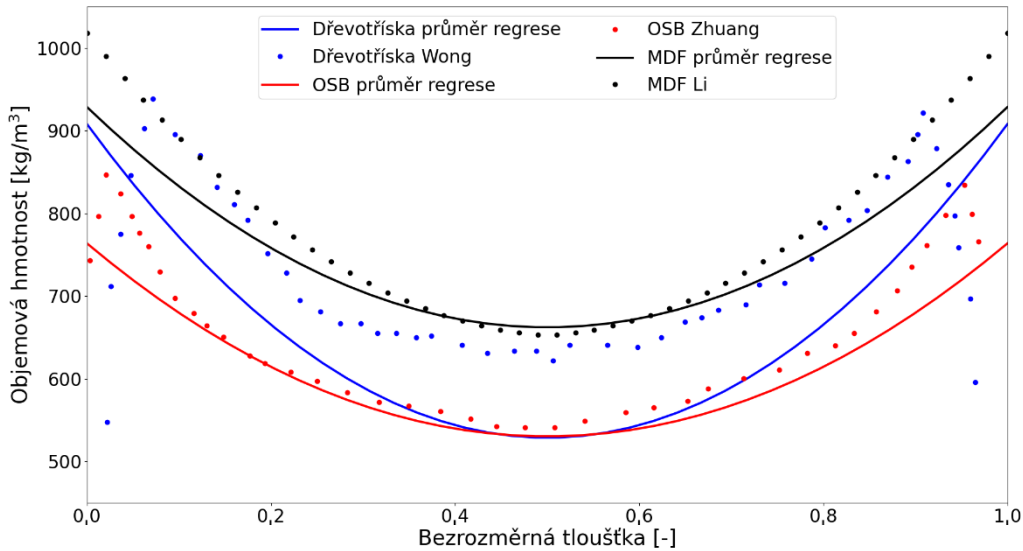
7.1.3 Naměřené hodnoty – surové aglomerované dřevo

Na Obr. 7 jsou uvedeny VDP jednotlivých aglomerovaných materiálů získané odbroušením přibližně dvoumilimetrových vrstev z válcových vzorků o průměru 30,2 mm. Válcové vzorky byly postupně odbroušeny pouze do poloviny celkové tloušťky vzorku, druhá polovina považována za symetrickou (nebyl zaváděn rozdíl mezi čelní a zadní stěnou desky). Pro každou tloušťku konkrétního materiálu bylo odbroušeno pět válečků.

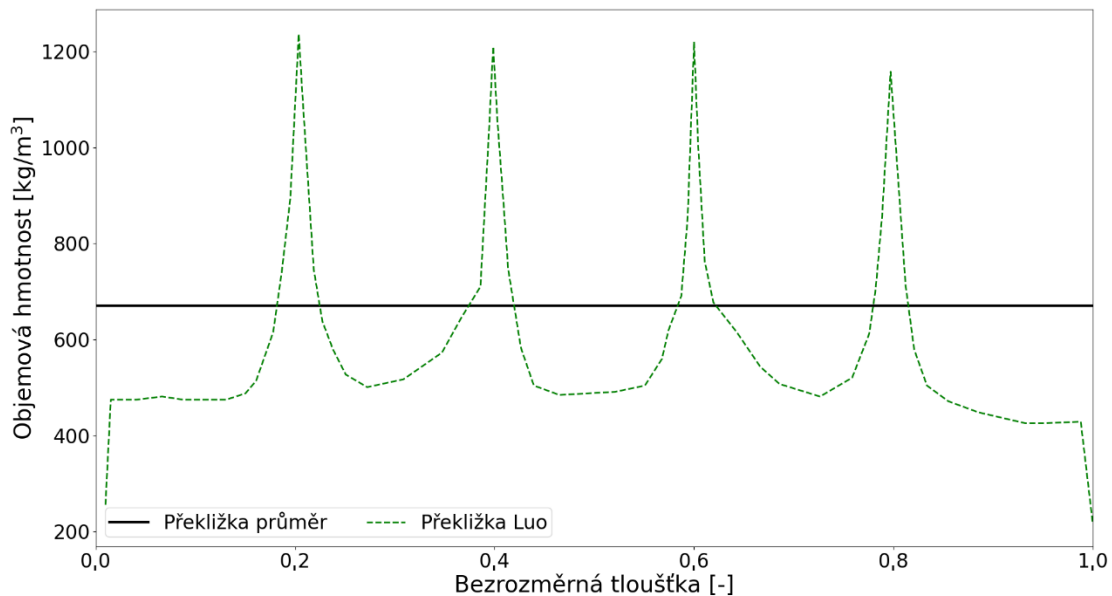
VDP na Obr. 7 jsou vykresleny oproti bezrozměrné tloušťce vzorků, aby bylo možné graficky porovnat jednotlivé tloušťky každého materiálu. Naměřené profily jsou zároveň proloženy kvadratickou regresní funkcí s minimem ve středu vzorku pro každou konkrétní tloušťku a průměr ze všech tlouštěk daného materiálu. Přehled předpisů regresních funkcí a průměrné objemové hmotnosti přes celou tloušťku vzorku je uveden v Tab. 7. Z naměřených VDP vyplývá, že OSB, dřevotřísky a MDF mají nezávisle na původní tloušťce vzorku standardní tvar hustotního profilu odpovídající procesu lisování při výrobě vzorku. V případě OSB a dřevotřísky je VDP profil málo závislý na původní tloušťce materiálu a lze tak se zavedením chyby do 10 % všechny tloušťky materiálu popsat pomocí průměrné regresní křivky pro daný materiál. V případě MDF dochází k výraznějšímu rozptýlení hodnot objemových hmotností pro jednotlivé tloušťky, a to především ve středu desky. Průměrná regresní křivka MDF velmi dobře popisuje desky o tloušťce 18 a 25 mm, tloušťka 30 mm ještě stále spadá do 10 % chyby oproti průměrné regresní křivce. Pro desku o tloušťce 12 mm je objemová hmotnost proti průměrné regresní křivce především uprostřed desky nadhodnocená, nicméně tato skutečnost může být výrazně ovlivněna tím, že je zde kvůli malé tloušťce desky profil určen pouze na základě tří odbroušení materiálu, což může profil deformovat směrem k průměrné hustotě přes celou tloušťku. Pro OSB, dřevotřísku a MDF je zároveň patrný,

v případě dřevotřísky až dvojnásobný, rozdíl mezi objemovou hmotností ve středu desky oproti povrchu. V samotném modelu tak může být výrazný rozdíl v chování materiálu (např. při vedení tepla) v jednotlivých tloušťkách.

VDP překližkové desky nemá standardní tvar odpovídající lisovaným aglomerovaným deskám a odpovídá skutečnosti, že jednotlivé dýhy, které tvoří překližkovou desku, nelze lisováním stlačit. Stlačení je možné pouze u vrstev lepidla mezi jednotlivými dýhami. Tyto vrstvy jsou však příliš tenké na to, aby je bylo možné rozeznat při odbrušování přibližně dvoumilimetrových vrstev, a rozdíl mezi objemovou hmotností dýh a lepidel je tak zprůměrovaný a tvoří přibližně konstantní VDP. Z tohoto důvodu není v případě překližkové desky vypočtena kvadratická regrese, ale jen průměr skrze celou tloušťku.



Obr. 8: Porovnání navržených bezrozměrných vertikálních profilů s profily uváděnými v literatuře [23], [17], [24].



Obr. 9: Bezrozměrný vertikální hustotní profil překližky naměřený jednoduchou metodou odbrušování a vážení v porovnání s výsledky rentgenové denzitometrie [18].

Tab. 7: Přehled navržených regresních funkcí objemové hmotnosti v závislosti na bezrozměrné tloušťce a průměrných objemových hmotností pro jednotlivé aglomerované materiály. Pro porovnání jsou uvedeny i VDP dohledané v literatuře [23], [17], [24], [18].

Materiál	Tloušťka, L_0 [mm]	Regresní funkce objemové hmotnosti v závislosti na bezrozměrné tloušťce L	Průměrná objemová hmotnost, $\rho_{PRŮM}$ [kg/m ³]
OSB	12	$1041 L^2 - 1041 L + 792$	623
	18	$783 L^2 - 783 L + 740$	602
	25	$1002 L^2 - 1002 L + 768$	598
	Průměr	$933 L^2 - 933 L + 764$	608
OSB Zhuang	15	Neuvedena	601
Dřevotřísky	12	$1288 L^2 - 1288 L + 888$	696
	18	$1770 L^2 - 1770 L + 997$	705
	25	$1494 L^2 - 1494 L + 867$	619
	28	$1573 L^2 - 1573 L + 916$	643
	Průměr	$1517 L^2 - 1517 L + 908$	666
Dřevotřísky Wong	12	Neuvedena	700
MDF	12	$447 L^2 - 447 L + 864$	800
	18	$912 L^2 - 912 L + 907$	758
	25	$972 L^2 - 972 L + 920$	757
	30	$1439 L^2 - 1439 L + 970$	729
	Průměr	$1065 L^2 - 1065 L + 929$	761
MDF Li	Různé	$0.9691 \rho_{PRŮM} - 1392 X + 1321 X^2 + 280$, kde $X = (0.5 L_0 - x - 0.5 L_0) / L_0$ a x je vzdálenost od kraje materiálu	Neuvedena
Překližka	12	Nahrazeno konstantou $\rho_{PRŮM}$	683
	18	Nahrazeno konstantou $\rho_{PRŮM}$	643
	24	Nahrazeno konstantou $\rho_{PRŮM}$	636
	30	Nahrazeno konstantou $\rho_{PRŮM}$	718
	Průměr	Nahrazeno konstantou $\rho_{PRŮM}$	670
Překližka Luo	8	Neuvedena	Neuvedena

Tento průměr není výrazně závislý na původní tloušťce překližkové desky a je opět možné, s chybou do 10 %, použít průměrnou hodnotu vypočtenou skrze všechny původní tloušťky.

Porovnání navržených průměrných regresních křivek OSB, dřevotřísky a MDF s VDP uváděnými v literatuře je zobrazeno na Obr. 8. V případě OSB a MDF je shoda velmi dobrá, především ve středu desek. V případě dřevotřísky jsou navrhované hodnoty přibližně o 20 % podhodnoceny oproti hodnotám uváděným v publikaci [23]. Pro literaturou uváděné profily dřevotřísky a OSB, měřené rentgenovou denzitometrií, je patrný i pokles objemové hmotnosti těsně u okraje desky a zároveň vyšší maximální hodnota oproti navrhovaným profilům přiléhající na tento pokles. Toto maximum a pokles u kraje desky není možné postihnout při odbrušování vrstev a dochází ke zprůměrování poklesu i maxima do jedné, krajní, vrstvy.

Na Obr. 9 je samostatně uvedeno porovnání VDP překližky, protože vykazuje výrazně odlišné chování oproti zbylým aglomerovaným materiálům, které odpovídá způsobu její výroby. Prudké nárůsty publikované v [18] jsou způsobené stlačením pojiva při lisování desky. Naopak segmenty mezi píky představují jednotlivé dřevěné dýhy, které jsou velmi málo stlačitelné. Profil, kde jsou patrné rozdíly mezi dýhou a lepidlem, je možné postihnout pouze rentgenovou denzitometrií. Při měření pomocí odbrušování hodnoty průměrujeme přes tenkou vrstvu, nezachytíme tedy rozdíl mezi dýhou a lepidlem,

a získáme proto konstantní profil. Konstantní profil pak z logiky věci nadhodnocuje objemovou hmotnost dých a naopak podhodnocuje stlačená lepidla.

7.1.4 Příprava zuhelnatělých zbytků

Jedním z hlavních důvodů, proč lze v literatuře nalézt velmi málo informací o vlastnostech zuhelnatělých zbytků dřeva či aglomerovaného dřeva, je kromě toho, že jsou zuhelnatělé zbytky křehké a těžko se s nimi pracuje, také to, že jsou silně nehomogenní. To je dáno jak počáteční strukturou dřeva či aglomerovaného dřeva, tak ale také zejména širokým rozmezím podmínek, za jakých ze surového materiálu vznikly – jakému tepelnému toku byly vystavené, zda rozklad probíhá v přítomnosti kyslíku a je doprovázený plamenným hořením či rozklad probíhá v inertních podmínkách. Zuhelnatělý zbytek také může po ukončení plamenného hoření silně žhnout, což dále mění jeho vlastnosti.

Zuhelnatělé zbytky desek pro stanovení objemové hmotnosti, měrné tepelné kapacity (kapitola 7.2.3) a elementárního složení (kapitola 4.1.1) byly získány spálením desek aglomerovaného dřeva popsaných v sekci 4 v kónickém kalorimetru. Měření proběhla ve standardním uspořádání zařízení dle ISO 5660-1. Výhodou tohoto zařízení jsou dobře definované okrajové podmínky, zejména externí tepelný tok, kterému je vzorek vystaven. Před samotným měřením byly vzorky 24 hodin kondicionovány v klimakomoře. Poté byly desky aglomerovaného dřeva o rozměru 10 × 10 cm a tloušťce 25 mm z pěti stran obaleny alobalem. Neobalenou stranou nahoru pak byly vzorky položeny na váhu kalorimetru umístěnou pod kónickým zářičem. Zájemem měření nebyl hmotnostní úbytek vzorku ani stanovení rychlosti vývinu tepla, ale pouze spálení desek za definovaných podmínek. Mezi držákem vzorku a vzorkem samotným byla umístěna vrstva izolační hmoty. Pro měření nebyl použit kovový rámeček. Vzorky všech čtyř aglomerovaných materiálů byly vystaveny konstantnímu tepelnému toku 20, 40, 60, 80 a 100 kW/m². V přítomnosti jiskry došlo při všech hodnotách tepelného toku ke vzplanutí vzorku. Po ukončení plamenného hoření byly vzorky přemístěny do digestoře, kde se nechaly volně za přístupu vzduchu vychladnout.

Pro měření objemové hmotnosti metodou fotogrammetrie byly vzorky získané za různých tepelných toků dále nalámány či nařezány na menší kusy o velikosti přibližně 4 × 4 × 2 cm. Kousky zuhelnatělé destičky byly také v hmoždíři nadrceny na prášek, který byl použit pro prvkovou analýzu zuhelnatělého zbytku a stanovení měrné tepelné kapacity.

7.1.5 Naměřené hodnoty – zuhelnatělé zbytky

V Tab. 8 jsou uvedeny fotogrammetricky měřené objemové hmotnosti zuhelnatělých zbytků OSB, MDF, dřevotřísky a smrku spálených při daném tepelném toku. Tabulka obsahuje průměr ze 3 až 6 měření pro daný tepelný tok, průměr přes všechna měření nezávisle na tepelném toku a směrodatné odchylky. Zuhelnatělý zbytek překližkové desky nebylo možné měřit, protože při tepelném namáhání překližkové desky v kónickém kalorimetru docházelo k rozlepení desky na jednotlivé dýhy, které jsou příliš tenké a křehké pro manipulaci potřebnou k fotogrammetrickému měření. V případě MDF a dřevotřísky není uvedena objemová hmotnost při 20 kW/m², protože při tomto toku nedocházelo k zuhelnatění vzorku přes celou jeho tloušťku.

Z uvážených objemových hmotností zuhelnatělých zbytků vyplývá, že není možné pozorovat jednoznačný trend mezi objemovou hmotností a tepelným tokem, při kterém zuhelnatělý zbytek vznikl. Mimo tepelný tok 20 kW/m², kde pravděpodobně ani v případě OSB a smrku nedošlo k úplnému zuhelnatění materiálu (hodnoty objemové hmotnosti jsou vyšší než při ostatních tepelných tocích), je vzhledem ke směrodatné odchylce možné objemovou hmotnost vyjádřit průměrem přes všechny tepelné toky. Dále je patrné, že se významně liší objemové hmotnosti zuhelnatělých zbytků jednotlivých materiálů. Stejně tak se liší poměr mezi objemovou hmotností zuhelnatělých zbytků a původních materiálů, který je 45 % pro OSB, 38 % pro dřevotřísku, 52 % pro MDF a 27 % pro smrk.

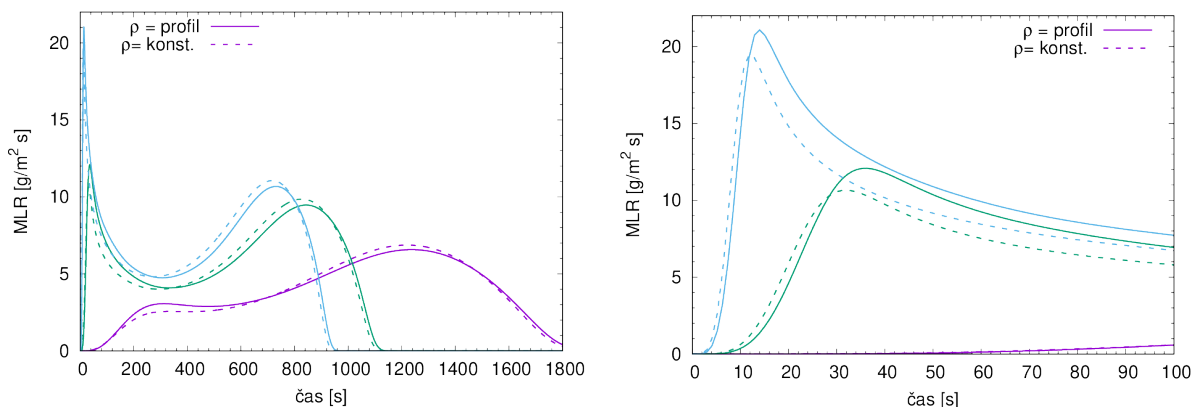
Tab. 8: Objemová hmotnost zuhelnatělých zbytků naměřená metodou fotogrammetrie v závislosti na tepelném toku zářiče při spalování vzorku v kónickém kalorimetru.

	Tepelný tok kónického zářiče kW/m ²					Průměr ze všech měření
	20	40	60	80	100	
OSB	301 ± 13,6	277 ± 17,4	277 ± 18,9	262 ± 13,2	258 ± 11,5	276 ± 20,5
MDF	---	416 ± 12,8	395 ± 14,8	412 ± 12,5	371 ± 12,2	399 ± 21,9
Dřevotříška	---	258 ± 5,3	266 ± 10,3	249 ± 3,7	249 ± 7,6	256 ± 10,0
Smrk	172 ± 16,7	142 ± 25	119 ± 8,6	128 ± 21,3	127 ± 16	138 ± 26,3

7.1.6 Citlivostní analýza

Objemová hmotnost materiálů je v praktických úlohách hoření většinou uvažována konstantní v celém objemu materiálu. Jak bylo ukázáno v této kapitole, u aglomerovaných materiálů tomu ale tak není. Tepelný rozklad materiálu tak, jak probíhá v kónickém kalorimetru, lze zjednodušeně popsat pomocí modelu tepelného rozkladu, kde k vedení tepla dochází pouze ve směru kolmém na povrch vzorku. Tento zjednodušený model je ideální pro citlivostní analýzu vlivu objemové hmotnosti na předpověď rychlosti tepelného rozkladu – MLR. Na Obr. 10 vlevo je vidět odlišný průběh MLR s konstantní hodnotou objemové hmotnosti (čárkovaná čára) a s vertikálním hustotním profilem (plná čára). Podíváme-li se na první pík, nezávisle na hodnotě externího tepelného toku, který na povrch vzorku působí, je s konstantní hodnotou objemové hmotnosti pík nižší. Rozdíl se na první pohled nemusí zdát výrazný, ale v případě zelené křivky (měření při 50 kW/m²) je rozdíl v maximu prvního píku 12 procent. U druhého píku MLR, který je u modelu tepelného rozkladu v kónickém kalorimetru typický pro materiály, které zanechávají zuhelnatělý zbytek (přítomnost druhého píku také odvisí od tloušťky materiálu), je trend naopak opačný.

Z citlivostní analýzy nelze stanovit jednoznačný univerzální trend pro všechny materiály či scénáře, ale demonstruje, jak citlivá je předpověď modelu na změnu vstupních parametrů. V literatuře lze nalézt několik publikací, které se věnovaly vlivu zavedení hustotního profilu do modelu tepelné degradace aglomerovaného dřeva, zejména u materiálu MDF [25], [26], [27], [24], [28]. Tyto studie pro problémy tepelného rozkladu malého i středního měřítka jasně ukazují, že zavedení teplotního profilu do modelu tepelného rozkladu má výrazný vliv na tvorbu a vývoj teplotního profilu v materiálu a tím i čas do vzplanutí a následně rychlost odhořívání.



Obr. 10: Rychlost hmotnostního úbytku aglomerovaného dřeva v 1D modelu tepelného rozkladu s konstantní objemovou hmotností surového aglomerovaného dřeva a se zavedením vertikálního hustotního profilu při třech hodnotách tepelného toku dopadajícího na povrch vzorku 20 (fialová), 50 (zelená) a 80 (modrá) kW/m². Všechny ostatní parametry modelu jsou konstantní. Tepelný rozklad je jednokrokový. Na obrázku vpravo je detail prvních 100 sekund simulace na obrázku vlevo.

7.2 Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita [J/(kg·K)] je definována jako množství tepla potřebné k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden stupeň Celsia, respektive jeden Kelvin, a je jednou z materiálových vlastností ovlivňující transport tepla skrze materiál (viz Fourierova rovnice uvedená v kapitole 5.1.1). Hodnota měrné tepelné kapacity daného materiálu je obecně závislá na teplotě. Závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě jsou tabelovány pro velké množství chemicky čistých plynů, kapalin i pevných látek v širokém teplotním rozmezí. Problém s dostupností těchto dat nastává u materiálů, které při běžných teplotách na požářišti podléhají tepelnému rozkladu nebo jiné chemické reakci, obsahují vlhkost, případně zanechávají zuhelnatělý zbytek. Pro zjednodušení nebo pro nedostupnost teplotní závislosti některých materiálů bývá tepelná kapacita v požárních modelech často vyjadřována konstantou měřenou při běžné teplotě. Je potřeba vzít v úvahu, že přestože se toto zjednodušení běžně zavádí, může mít značný vliv na čas do vznícení daného materiálu a na následné šíření požáru.

7.2.1 Jak byly parametry získány? – Teorie

Měrná tepelná kapacita, respektive její závislost na teplotě se měří pomocí diferenční kompenzační kalorimetrie, DSC, viz kapitola 6.2. Výstupem metody DSC je křivka vyjadřující množství energie dodané nebo uvolněné vzorkem v závislosti na teplotě. Aby bylo možné dodané nebo uvolněné množství tepla přepočítat na měrnou tepelnou kapacitu vzorku, jsou vždy zapotřebí alespoň tři navazující měření. Jako první probíhá měření prázdného měřicího kelímku, tomuto měření se říká „blank“. Hodnoty měření blank jsou následně odečítány od všech následujících měření, čímž je odstraněn vliv samotné měřicí aparatury a měřicího kelímku. Jako druhý je změřen materiál o známé tepelné kapacitě, tzv. standard. Ve třetím měření je změřen vzorek o neznámé měrné tepelné kapacitě. Všechny tři měření je nutné provádět při stejném teplotním programu pece, přičemž referenční kelímek je ponechán vždy prázdný. Měrná tepelná kapacita je následně vypočtena na základě vztahu:

$$c_p^{vzorek} = c_p^{standard} \frac{m^{standard} (DSC^{vzorek} - DSC^{blank})}{m^{vzorek} (DSC^{standard} - DSC^{blank})}, \quad (16)$$

kde c_p^{vzorek} značí měrnou tepelnou kapacitu vzorku, $c_p^{standard}$ známou teplotní závislost měrné tepelné kapacity standardu, m navážky neznámého vzorku a standardu a DSC množství energie dodané nebo uvolněné při měření vzorku uvedeného v horním indexu. Existují i další možnosti výpočtu měrné tepelné kapacity neznámého vzorku z různě modifikovaných DSC měření (uvedeny například v knize [29]), které přesahují svým rámcem tuto metodiku, nicméně princip tří po sobě následujících měření (blanku, standardu a neznámého vzorku) zůstává neměnný.

Z výpočtu měrné tepelné kapacity pomocí DSC křivky vzorku vyplývá, že aby bylo možné vypočítat měrnou tepelnou kapacitu při konkrétní teplotě, nesmí při této teplotě ve vzorku docházet k žádnému exotermnímu nebo endotermnímu jevu. Pro představu například k odpaření vlhkosti ve vzorku je potřeba dodat více než 2 MJ energie na jeden kilogram vody, zatímco měrná tepelná kapacita dřeva se pohybuje v řádu jednotek kJ/(kg·K). Tepelný efekt odpaření vlhkosti proto mnohonásobně převyšuje změnu měrné tepelné kapacity a vypočítaná hodnota c_p^{vzorek} by tak neodpovídala skutečné materiálové vlastnosti. Měrná tepelná kapacita je z tohoto důvodu definována pouze při teplotách, pro které v daném vzorku neprobíhají jiné tepelné jevy. V případě, že při dané teplotě dochází k tepelnému jevu, nazývá se vypočtená měrná tepelná kapacita specifickou (značeno $c_p^{*vzorek}$). Specifická měrná tepelná kapacita pak v sobě zahrnuje nejen vliv změny měrné tepelné kapacity, ale především energii potřebnou na průběh daného tepelného jevu, například odpaření vlhkosti.

7.2.2 Správná praxe v měření

DSC aparatura je svou konstrukcí i principem velmi podobná TGA aparatuře. Pro DSC měření proto platí shodná doporučení jako pro TGA uvedené v kapitole 6.1.2, především včetně snahy zachovat tepelnou rovnováhu mezi vzorkem a plynnou atmosférou. Odlišnosti nebo rozšiřující informace oproti doporučení pro měření TGA jsou uvedeny níže:

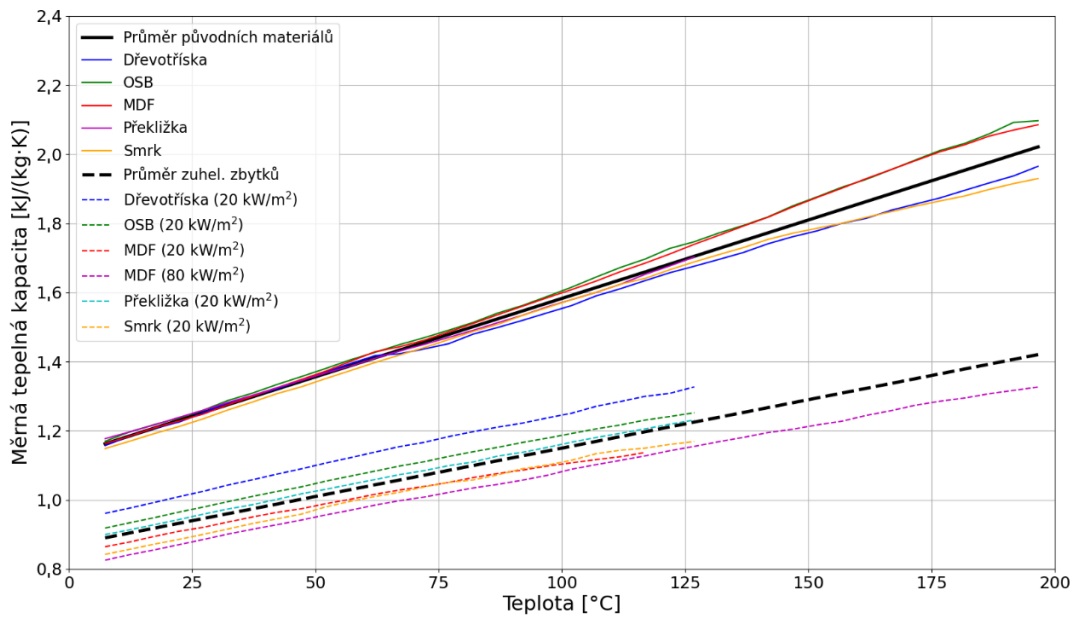
- **Plynná atmosféra.** V případě měření měrné tepelné kapacity je třeba zamezit reakci okolní atmosféry se vzorkem nebo měřícím kelímkem. V naprosté většině případů je proto volena inertní atmosféra.
- **Navážka vzorku.** Navážka vzorku je volena tak, aby vzorek pokryl celou plochu dna kelímku. Zároveň je doporučeno navážku zvolit tak, aby se výsledný naměřený DSC signál co nejvíce přiblížil DSC hodnotám naměřeným v případě měření standardu.
- **Teplotní program.** Začátek a konec teplotního programu musí bezpečně zahrnovat celé zkoumané teplotní rozmezí. Při měření měrné tepelné kapacity je navíc vhodné začít měřit alespoň 20 °C pod nejnižší teplotou, při které chceme měrnou tepelnou kapacitu stanovit. Pokud je to možné, je výhodné nastavit teplotní program nejprve na ohřev, následně na chlazení a poté opět na ohřev. Smyslem vícenásobného ohřevu je v prvním ohřevu odpařit vlhkost ze vzorku nebo provést rekystalizaci apod., tak aby při druhém ohřevu nebylo měření zatíženo tímto tepelným jevem, a bylo tak možné měřit „teoretickou“ nikoliv specifickou tepelnou kapacitu. U některých materiálů, například plastů, může první ohřev posloužit k roztavení vzorku, a tím je zajištěn velmi dobrý kontakt vzorku s celou plochou dna měřícího kelímku. Reakční rychlost je volena nízká (jednotky °C/min, maximálně 20 °C/min), aby byla zachována tepelná rovnováha mezi vzorkem, plynnou atmosférou a měřícím senzorem.
- **Měřící kelímek.** Měřící kelímek, obdobně jako při TGA měření, nesmí reagovat se vzorkem a musí mít dostatečně vysokou teplotu tání vzhledem k maximální teplotě nastavené v teplotním programu pece. Pro zvýšení přesnosti stanovení měrné tepelné kapacity je vhodné používat kelímky specializované na DSC měření. Tyto kelímky mají zpravidla širší dno, aby byl zajištěn lepší kontakt s měřícím senzorem, a jsou vyráběny z materiálů, které mají vysokou tepelnou vodivost (např. Al kelímky). Pokud nehrozí natlakování kelímku uvolněnou vlhkostí nebo pyrolýzními plyny, je pro DSC měření vhodné uzavřít kelímek víčkem. Víčko je případně možné opatřit malým otvorem, aby nedocházelo k jeho tlakování uvolňujícími se plyny.

Jakémukoliv měření metodou DSC by měla předcházet kalibrace teploty v peci a citlivosti DSC. Kalibrace je stejně jako u měření metodou TGA nutné provádět pro každou konkrétní plynnou atmosféru, rychlost ohřevu, měřící kelímek a navážku vzorku (kalibrační standard by měl v ideálním případě mít podobnou navážku a tepelné vlastnosti jako měřený vzorek).

Na výslednou hodnotu vypočtené měrné tepelné kapacity má velký vliv blank měření, které se následně odečítá od měření standardu i neznámého vzorku. Je proto doporučeno měření blank provádět více než jednou. V ideálním případě tolikrát, aby se poslední dvě měření blank nelišila v naměřených hodnotách o více než 1 %, přičemž měřící kelímek používaný pro blank měření zůstává stejný i pro měření standardu a neznámého vzorku. Pokud je to možné, všechna měření blank, standardu i vzorku by měla probíhat v návaznosti za sebou a ideálně v jeden den.

7.2.3 Naměřené hodnoty

Závislosti měrné tepelné kapacity aglomerovaných materiálů, smrkového dřeva a jejich zuhelnatělých zbytků na teplotě (Obr. 11) byly měřeny na přístroji PerkinElmer DSC 8500 vybaveným autosamplerem. Přístroj byl kalibrován na teplotu v peci a nejistota měření teploty je odhadována na 0,1 °C. Vzorky aglomerovaných materiálů i jejich zuhelnatělých zbytků byly před měřením sušeny (80 °C)



Obr. 11: Měrná tepelná kapacita aglomerovaného dřeva a zuhelnatělého zbytku aglomerovaného dřeva v závislosti na teplotě. Plná čára – surový materiál, přerušovaná čára – zuhelnatělý zbytek.

a uloženy ve vakuu (< 60 Pa) po dobu alespoň 18 dní. Po vysušení byly vzorky udržovány v suché atmosféře dusíku. Navážka vzorků pro měření byla v rozmezí 15–21 mg a vzorky byly hermeticky uzavřeny do hliníkových kelímků (50 μ L). Pro stanovení c_p zuhelnatělých zbytků byly vybrány vzorky, které byly připraveny v kónickém kalorimetru při působení externího tepelného toku 20 kW/m² (kapitola 7.1.4), protože při tomto tepelném toku vykazovaly vzorky nejmenší rozptyl v prvkovém složení v porovnání mezi jednotlivými typy desek.

Při samotném měření byl vzorek opakovaně skokově ohříván o 5 °C rychlostí 5 °C/min (tzv. temperature increment method, [29]) z teploty 0 °C na 200 °C, respektive na 125 °C v případě zuhelnatělých zbytků a překližky. Mezi každým ohřevem vzorku byl zařazen 1 min trvající izotermní segment. Horní interval teploty pro měření c_p byl volen s ohledem na to, kdy se na DSC signálu začaly projevovat rozkladné, tepelně výrazně zabarvené děje, které probíhají při vyšších teplotách a brání tak stanovení c_p . V případě aglomerovaných desek rozklad probíhá nad 200 °C. Rozkladné děje se ale projevovaly i u všech zuhelnatělých zbytků a již při teplotě nad 125 °C. V grafu na Obr. 11 je také uvedeno měření c_p ze vzorku MDF, připraveného v kónickém kalorimetru při působení externího tepelného toku 80 kW/m². U tohoto vzorku se rozklad na DSC křivce začal projevovat až při teplotě nad 200 °C, bylo ho tak možné proměřit do této teploty. Rozdíl v teplotě, kdy se začne projevovat rozklad MDF v DSC aparatuře, naznačuje, že všechny ostatní zuhelnatělé vzorky (připravené při působení externího tepelného toku 20 kW/m²) se nepodařilo dokonale tepelně rozložit již při přípravě zuhelnatělého zbytku. Dřívější počátek tepelného rozkladu zuhelnatělých zbytků (přibližně o 75 °C dříve, než u surových materiálů) je pravděpodobně způsoben autokatalytickým průběhem rozkladných reakcí. Jelikož byl materiál před samotným ohřevem v DSC aparatuře již jednou vystaven působení tepelného toku, při opakovaném ohřevu tak rozklad nevyžaduje tak vysokou teplotu. Dřívější začátek tepelného rozkladu překližky oproti ostatním aglomerovaným materiálům je dán pravděpodobně přítomností lepidel, které se rozkládají již při teplotách pod 200 °C.

Průtok dusíku aparaturou při měření byl nastaven na 250 cm³/min. Měření každého vzorku bylo třikrát opakováno a na Obr. 11 je zakreslen průměr těchto tří měření. K výpočtu c_p se využívalo dat ze

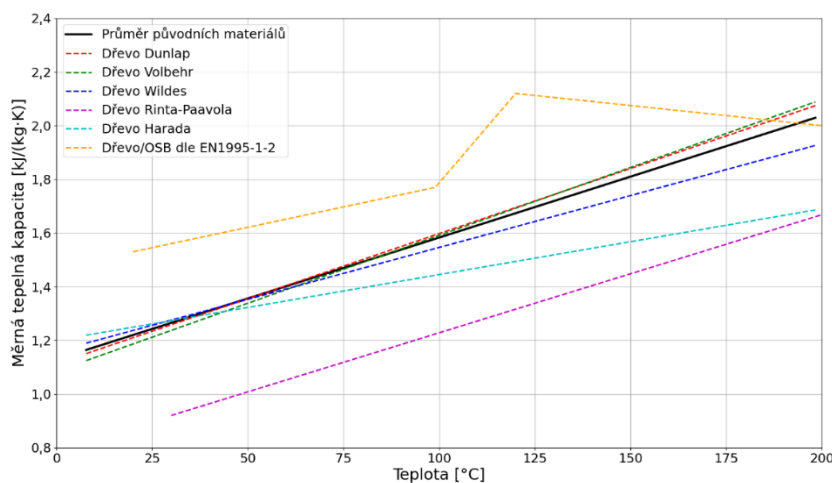
tří následujících měření (blank, safírový standard a neznámý vzorek viz předešlá kapitola). Dle [29] je tímto postupem možné pro daný typ DSC přístroje stanovit c_p s nejistotou měření pod 5 %.

Výsledné závislosti měrné tepelné kapacity na teplotě na Obr. 11 je možné velmi dobře proložit lineární funkcí. Přehled funkčních předpisů pro teplotu zadávanou ve stupních Celsia je uveden v Tab. 9. Tabulka obsahuje také funkční předpisy pro tepelnou závislost c_p vypočítané jako průměr všech původních aglomerovaných materiálů a průměr všech zuhelnatělých zbytků. Obecně lze říci, že rozdíly v c_p jednotlivých původních materiálů i jednotlivých zuhelnatělých zbytků jsou v rámci 5 % nejistoty měření c_p a je možné k jejich popisu použít dopočítaných průměrů. Velmi dobré shody je dosaženo i mezi chováním smrkového dřeva a jednotlivými aglomerovanými materiály (původními i zuhelnatělými zbytky) a to především při teplotách do 100 °C. Při vyšších teplotách se již začíná projevovat odlišná směrnicí MDF a OSB oproti dřevotřískce a smrkovému dřevu. Pokud by byla u těchto materiálů navržena funkční závislost c_p na teplotě extrapolována pro vysoké teploty (300 °C a více), lze již předpokládat rozdíl v chování MDF a OSB oproti dřevotřískce a smrku.

Na Obr. 12 je uvedeno porovnání naměřené průměrné měrné tepelné kapacity aglomerovaného dřeva s korelacemi dřevin dostupných v literatuře a normou EN1995-1-2, která uvádí totožnou závislost pro dřevo i OSB. Hodnoty z EN1995-1-2 jsou odečteny bez odpaření vodní vlhkosti, aby bylo možné porovnání se suchými materiály. Směrnicí všech uváděných závislostí je velmi podobná vyjma normové

Tab. 9: Měrná tepelná kapacita aglomerovaného dřeva a zuhelnatělého zbytku při 20 °C a funkční předpis pro závislost měrné tepelné kapacity na teplotě. Zuhelnatělé zbytky byly získány spálením v kónickém kalorimetru při externím tepelném toku kónického zářiče 20 kW/m². U MDF je stanovena také měrná tepelná kapacita vzorku při spálení při 80 kW/m².

Materiál	Měrná tepelná kapacita při 20 °C [kJ/(kg·K)]	Měrná tepelná kapacita [(kJ/(kg·K))] v závislosti na teplotě T [°C]	Měrná tepelná kapacita při 20 °C [kJ/(kg·K)]	Měrná tepelná kapacita [(kJ/(kg·K))] v závislosti na teplotě T [°C]
	Surové aglomerované dřevo		Zuhelnatělý zbytek	
OSB	1,219	0,00498 T + 1,11962	0,960	0,00282 T + 0,90396
Dřevotřískka	1,224	0,00419 T + 1,14038	1,005	0,00305 T + 0,94380
MDF	1,211	0,00500 T + 1,11126	0,905	0,00250 T + 0,85477
MDF (80 kW/m ²)	---	---	0,868	0,00265 T + 0,81506
Překližka	1,227	0,00433 T + 1,14084	0,939	0,00278 T + 0,88310
Smrk	1,217	0,00423 T + 1,13256	0,884	0,00281 T + 0,82738
Průměr	1,220	0,00454 T + 1,12898	0,926	0,00280 T + 0,86965



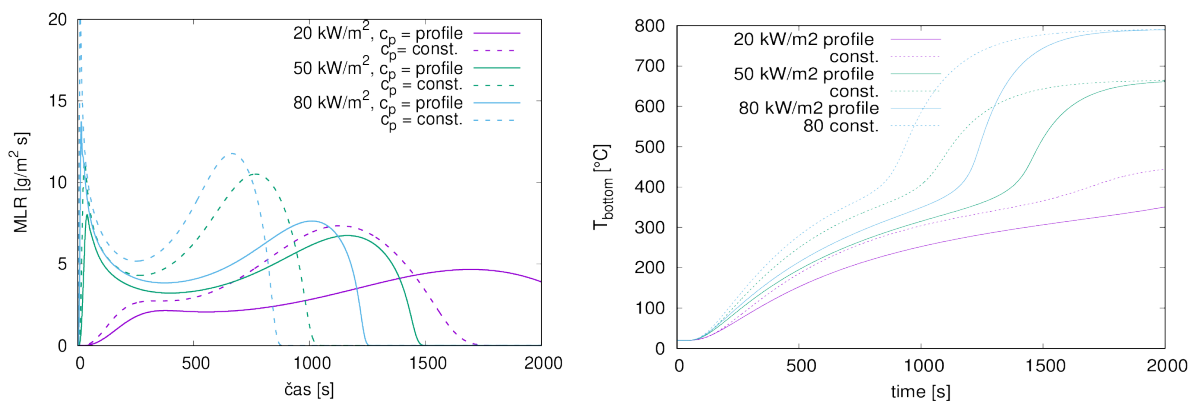
Obr. 12: Porovnání teplotní závislosti průměrné měrné tepelné kapacity aglomerovaného dřeva se závislostmi dřevin dostupných v literatuře a normou EN1995-1-2.

křivky, která neuvádí, za jakých podmínek a pro jaké dřevo byla naměřena, a vyjma křivky publikované v [30], která odpovídá průměru 13 japonských měkkých i tvrdých dřevin, jejichž porovnání s Evropskými dřevinami je velmi obtížné. Shodnou směrnicí, nicméně výrazně nižší hodnoty c_p publikoval pro smrkové a borovicové dřevo [31]. Velmi dobré shody dosahuje průměr aglomerovaných materiálů s blíže nespécifikovaným vysušeným dřevem publikovaným v [32], dále v [33], kde autor předpis upravil i pro různé vlhkosti dřeva (na Obr. 12 vyneseno pro suché dřevo s 0 % vlhkosti) a v publikaci [34], kde je závislost c_p vypočtena regresí z více než 150 datových sad různých suchých dřevin.

Lze tedy konstatovat, že měrná tepelná kapacita aglomerovaných desek a její závislost odpovídá měrné tepelné kapacitě dřeva, ze kterých jsou desky vyráběny. Toto chování je očekáváno vzhledem k tomu, že desky a surové dřevo mají velmi podobné chemické složení. Při přebírání hodnot z literatury či jejich porovnávání lze ale nalézt i výrazně se odlišující hodnoty. To může být způsobeno několika faktory, zejména pak faktory spojenými s přípravou vzorku, vlhkostí vzorku a přesností měření. Měření c_p je proces velmi náročný na správnou praxi v měření.

7.2.4 Citlivostní analýza

Následující jednoduchá analýza ukazuje vliv změny jednoho izolovaného parametru – měrné tepelné kapacity – na celkovou předpověď modelu tepelné degradace. Měrná tepelná kapacita aglomerovaného dřeva roste s teplotou. Vyšší měrná tepelná kapacita znamená, že je látce třeba dodat více tepla, aby došlo k jejímu ohřátí na teploty, při kterých dochází k tepelnému rozkladu aglomerovaného dřeva. Ve výsledku se tedy zavedení teplotní závislosti c_p projeví v poklesu rychlosti tepelného rozkladu v porovnání s nižší (konstantní) hodnotou c_p . Křivka na levé části Obr. 13 ukazuje typický průběh MLR křivky materiálu zanechávajícího pevný zbytek, jak ji lze pozorovat při měření na kónickém kalorimetru (viz sekce 7.1.4). Při zavedení teplotní závislosti c_p surového aglomerovaného dřeva do modelu se výrazně snížila maximální hodnota prvního MLR píku a posunula se lehce směrem doprava. Maximum druhého píku je také výrazně nižší a posunuté směrem doprava na časové ose. Materiál se celkově rozkládá delší dobu. Zpomalení rozkladu vlivem zvýšení c_p lze stejně tak pozorovat na teplotě zadní strany materiálu. Ta při zavedení teplotně závislé funkce c_p narůstá pomaleji. Toto modelem předpovězené chování je nezávislé na intenzitě působícího tepelného toku.



Obr. 13: Porovnání MLR a teploty na zadní straně vzorku vypočítané 1D modelem tepelného rozkladu s konstantní – při pokojové teplotě - (čárkovaná čára) nebo teplotně závislou (plná čára) měrnou tepelnou kapacitou surového aglomerovaného dřeva pro tři hodnoty externího tepelného toku 20, 50 a 80 kW/m². Rozkladné schéma je jednodukové, měrná tepelná kapacita uuhelnatělého zbytku je konstantní.

Nárůst c_p s rostoucí teplotou jsme schopni změřit jen pod rozkladnou teplotou. V momentě, kdy dochází k rozkladu a uuhelnatění, se mění struktura i složení aglomerovaného dřeva. V modelu tuto skutečnost překlenujeme zavedením zjednodušeného rozkladného schématu. Surové aglomerované dřevo se v modelu přímo přeměňuje na uuhelnatělý zbytek v poměru, který je dán stechiometrickým

koeficientem. S postupujícím časem tedy ubývá surové dřevo, přibývá zuhelnatělý zbytek a mění se jejich poměrné zastoupení. Výsledná hodnota \bar{c}_p částečně zuhelnatělého materiálu je tedy kombinací c_p surového materiálu i zbytku. V různých modelech může být tato závislost vyjadřována rozdílně, ale nejjednodušší a nejčastější formou je vyjádření pomocí hmotnostních zlomků jednotlivých složek:

$$\bar{c}_p = w_{drevo}c_{p_drevo} + w_{zbytek}c_{p_zbytek} \quad (17)$$

7.3 Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti vyjadřuje, jak dobře látka vede teplo. Čím vyšší je hodnota součinitele tepelné vodivosti, tím rychleji se pevná látka zahřívá. Je to tedy vlastnost materiálu, která silně ovlivňuje jak čas do vznícení či do vzplanutí, tak i rychlost tepelného rozkladu. Součinitel tepelné vodivosti se mění s teplotou.

7.3.1 Jak byly parametry získány? – Teorie

Metody měření součinitele tepelné vodivosti λ lze rozdělit na dvě skupiny podle toho, zda je při měření ve vzorku dosaženo ustáleného teplotního profilu či ne. Uvádí se, že ustálené metody jsou přesnější, ale časově velmi náročné. Neustálené metody jsou méně časově náročné a umožňují pracovat s menšími vzorky. Oba druhy metod ale vždy vycházejí ze vztahu pro vedení tepla, který má v jednorozměrné formulaci podobu:

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\Delta T}{L}, \quad (18)$$

kde L je tloušťka vzorku, přes kterou měření proběhlo, a ΔT je naměřený teplotní rozdíl přes danou tloušťku vzorku. Jednotlivé měřicí principy se mezi sebou pak liší tím, jakým způsobem dodávají a definují tepelný tok, který na vzorek působí, jakým způsobem určují změnu teploty a podobou rovnice nebo sady rovnic vycházejících z rovnice pro vedení tepla, ze které se λ dopočítává.

Jednotkou součinitele tepelné vodivosti je W/(m·K). Z uvedené jednotky vyplývá, že při měření součinitele tepelné vodivosti je důležitý délkový rozměr. Prostorová souřadnice předpokládá, že po celé délce jsou vlastnosti ovlivňující tok tepla stejné. Tak tomu ale u látek, jejichž struktura se v objemu mění, není. Z toho jinými slovy vyplývá, že naměřená hodnota silně závisí na struktuře vzorku v měřeném objemu. Hodnota je tak provázána s objemovou hmotností, která je u aglomerovaných desek nehomogenní.

Pro naměření dat prezentovaných v kapitole 7.3.2 byla využita neustálená metoda Hot disk. Při měření touto metodou je uvnitř vzorku vygenerováno malé množství tepla a je měřena teplotní odezva [35]. Instrumentace tohoto měření je taková, že měřicí senzor, který slouží jako tepelný zdroj a snímač teploty zároveň, se umístí mezi dva kusy vzorku. Výhoda této metody je malá velikost senzoru. Sondy se liší podle požadovaného teplotního rozsahu pro měření a vlastností měřeného materiálu, ale nejmenší sondy mají velikost kolem 0,5 cm, největší pak kolem 3 cm. Od toho se pak vyvíjí i požadovaná velikost vzorku. V porovnání s ustálenými metodami měření λ ale tato metoda pracuje s podstatně menšími vzorky. Další výhodou této metody je možnost měřit tepelnou vodivost za zvýšené teploty.

7.3.2 Naměřené hodnoty

Na Obr. 14 a Obr. 15 jsou zobrazené hodnoty součinitele tepelné vodivosti aglomerovaných desek v závislosti na teplotě. Součinitel tepelné vodivosti byl měřen po 25 °C od 25 do 150 °C, tedy celkem v 7 bodech. Při jiné teplotě jsou hodnoty λ v grafu lineárně aproximovány. Pruhy na Obr. 14 značí rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hodnotou. Prezentované hodnoty jsou průměrem ze tří až šesti měření. Na grafu je jasně vidět, že součinitel tepelné vodivosti s rostoucí teplotou roste pro všechny

čtyři desky aglomerovaného dřeva do 100 °C (pro MDF do 125 °C). Poté se hodnota součinitele tepelné vodivosti ustaluje. Hodnoty na Obr. 14 jsou z měření vysušených vzorků. Na Obr. 15 je vyneseno porovnání součinitele tepelné vodivosti suchých vzorků (sušené při 60 °C), vzorků klimatizovaných v definovaném prostředí (exsíkátor se solným roztokem LiCl, 11 % relativní vlhkost při teplotě 25 °C) a vzorků, které nebyly před měřením nijak kondicionovány (neklimatizované). Z porovnání je jasné, že vlhkost má výrazný vliv na hodnotu součinitele tepelné vodivosti. S rostoucí teplotou λ také roste i u vlhkých vzorků, kolem 100 °C se začíná křivka tepelné vodivosti ohýbat směrem k hodnotám suchého materiálu. Měření vlhkých vzorků je problematické. Při zahřívání vzorku se voda vzorkem pohybuje, mění se složení v čase a v prostoru. To vše se díky principu měření odráží v naměřené hodnotě. Vzorky, které nebyly nijak klimatizovány, vykazují největší rozptyl naměřených hodnot. U suchých vzorků je rozptyl naměřených hodnot výrazně nižší.

Problém s přesností měření, nebo lépe vhodností měření λ , nastává také, začne-li docházet ke změnám struktury či složení aglomerovaných desek vlivem tepelného rozkladu. V takovém případě se naměřené hodnoty vztahují k již částečně degradovanému materiálu. Data z TGA analýzy aglomerovaných desek ukazují, že k rozkladu nedochází pod 200 °C. Naměřená data součinitele tepelné vodivosti ale ukazují, že při teplotách nad 100 °C se trend nárůstu λ s teplotou zastavuje. Důvod, proč tomu tak je, není známý.

Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě není příliš velká, uvádí se, že součinitel tepelné vodivosti pro dřevo roste přibližně o 10 % pro každých 50 °C [15]. Tato závislost je vynesena v grafu na Obr. 14 plnou čarou pro dvě hodnoty počátečního součinitele tepelné vodivosti. Je vidět, že směrnice přímků růstu součinitele tepelné vodivosti dřeva s teplotou je velmi blízká směrnici rychlosti růstu součinitele tepelné vodivosti všech čtyř desek aglomerovaného dřeva.

Hodnota λ při pokojové teplotě, tedy úsek na svislé ose, se pro jednotlivé desky liší. Hodnota součinitele tepelné vodivosti je kromě vlhkosti také silně závislá na objemové hmotnosti. V literatuře lze nalézt korelace pro závislost součinitele tepelné vodivosti na vlhkosti a objemové hmotnosti [36], [15]. Z korelace pro dřevo dle [37]:

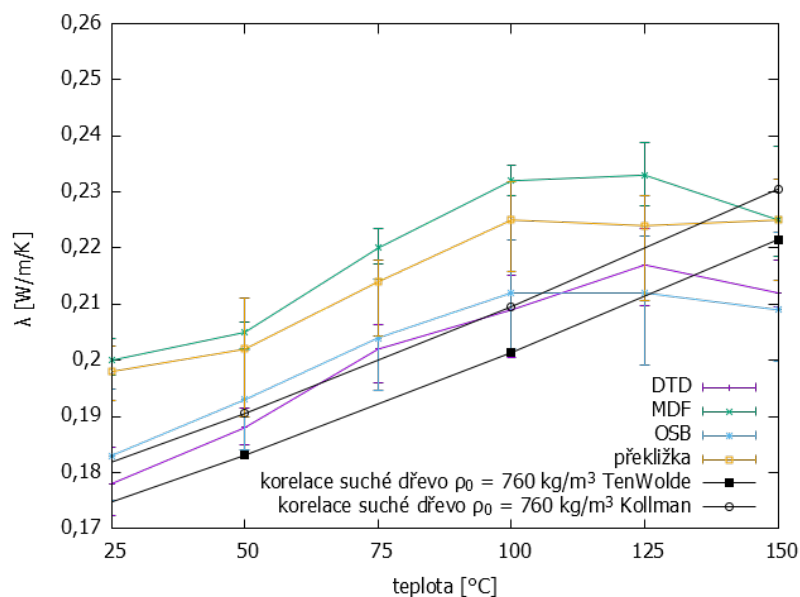
$$\lambda = 0,019 + \frac{\rho_0}{1000} (0,194 + 0,406 w_{voda}), \quad (19)$$

kde w_{voda} je hmotnostní zlomek vlhkosti ve dřevě a ρ_0 je objemová hmotnost suchého dřeva i [38]:

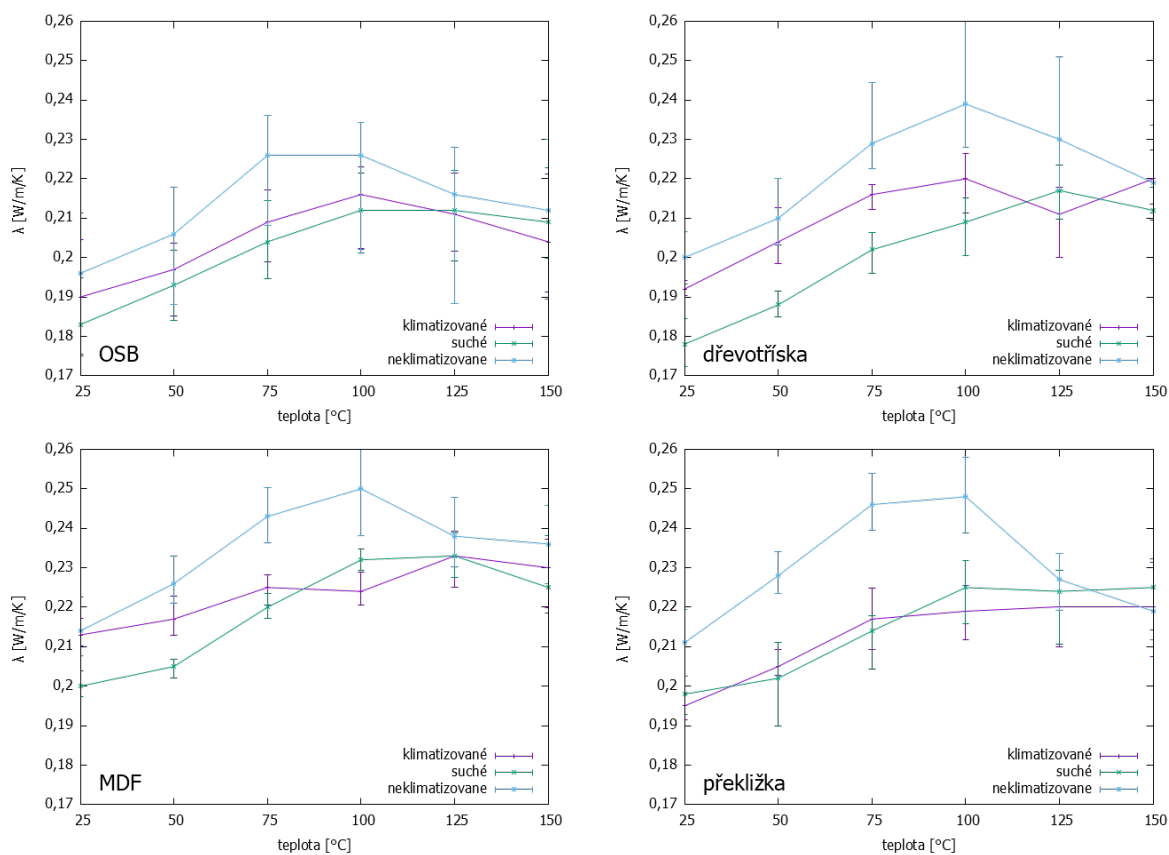
$$\lambda = 0,000195\rho + 0,025 \quad (20)$$

vyplývá, že s rostoucí objemovou hmotností roste součinitel tepelné vodivosti. Ačkoliv se pásy na Obr. 14 částečně vzájemně překrývají, je vidět, že nejvyšších hodnot součinitele tepelné vodivosti dosahuje MDF deska, které má ze všech čtyř aglomerovaných desek nejvyšší hodnotu objemové hmotnosti (viz Tab. 7). Dřevotříška a překližka mají podobnou objemovou hmotnost, nejnižší objemovou hmotnost má ze studovaných desek deska OSB. U těchto tří desek ale nelze z dat určit jasný trend závislosti součinitele tepelné vodivosti na objemové hmotnosti, respektive rozdíl v objemové hmotnosti spadá do rozptylu naměřených hodnot λ .

Hodnota λ pro dřevo při pokojové teplotě v grafu na Obr. 14 byla spočtena podle obou výše uvedených korelací pro suché dřevo (w_{voda} je rovno nule). Hodnoty λ z této korelace, které by odpovídaly hodnotám λ naměřeným pro vysušené aglomerované dřevo, odpovídá deskám o objemové hmotnosti 760 kg/m³ a vyšší. Tato hodnota odpovídá průměrné objemové hmotnosti MDF, viz Tab. 7, nicméně MDF má z naměřených dat nejvyšší hodnotu součinitele tepelné vodivosti a v porovnání z grafu je patrné, že naměřená data pro MDF a křivka spočtená dle korelace jsou na svislé ose výrazně posunuty. Objemové hmotnosti dalších tří materiálů se pohybují výrazně níž, mezi 600 a 700 kg/m³. Objemová hmotnost desek v Tab. 7 byla navíc stanovena pro vlhké vzorky, vysušené by tedy měly hodnoty ještě



Obr. 14: Součinitel tepelné vodivosti vysušených aglomerovaných desek v závislosti na teplotě. Pruh ukazuje rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hodnotou. Plná čára ukazuje průběh součinitele tepelné závislosti dřeva dle korelace [37], [38].



Obr. 15: Součinitel tepelné vodivosti aglomerovaného dřeva v závislosti na teplotě pro vzorky klimatizované při podmínkách v exsikátoru se solným roztokem LiCl, 11 % relativní vlhkost při teplotě 25 °C, vzorky vysušené v peci při 60 °C, a vzorky neklimatizované – vzorky bez úpravy podmínek před měřením.

mírně nižší. Z porovnání na Obr. 14 je patrné, že použití výše uvedených korelací pro dřevo vede k podhodnocení hodnoty součinitele tepelné vodivosti aglomerovaného dřeva při pokojové teplotě.

Pro stanovení součinitele tepelné vodivosti zuhelnatělých zbytků aglomerovaného dřeva metodou Hot disk se nepodařilo připravit vzorky. Destičky zuhelnatělého materiálu, které byly získány spálením v kónickém kalorimetru (viz sekce 7.1.4) byly příliš křehké a nepodařilo se z nich připravit vzorky dostatečně velké a s dostatečně dobrým kontaktem se senzorem.

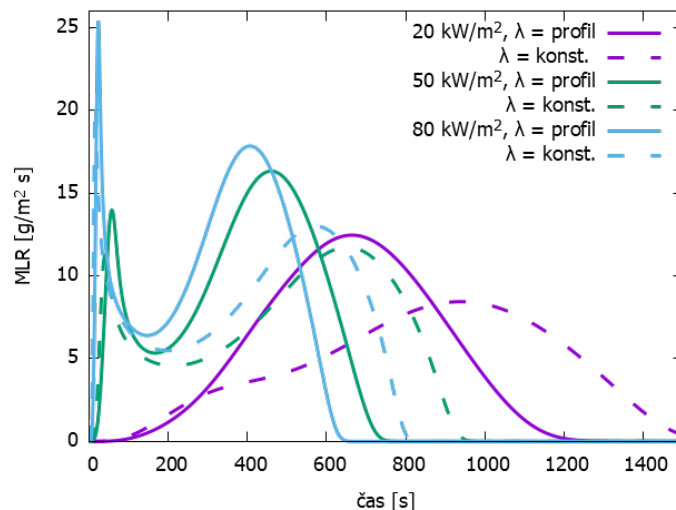
7.3.3 Citlivostní analýza

Na Obr. 16 je ukázán vliv zavedení součinitele tepelné vodivosti jako funkce teploty v 1D modelu tepelného rozkladu. Výsledné chování předpovězené modelem je vždy kombinací modelu tepelného rozkladu, materiálových vlastností a okrajových podmínek. Tato zjednodušená analýza ale demonstruje vliv součinitele tepelné vodivosti na celkovou předpověď modelu tepelné degradace.

V modelu je použito jednoduché jednokrokové schéma, ve kterém se surové aglomerované dřevo přeměňuje na zuhelnatělý zbytek a hořlavé plyny. Stejně jako u měrné tepelné kapacity (kapitola 7.2.4) je třeba si uvědomit, že hodnota součinitele tepelné vodivosti vzorku v modelu $\bar{\lambda}$ se bude s časem měnit například podle vztahu

$$\bar{\lambda} = w_{drevo}\lambda_{drevo} + w_{zbytek}\lambda_{zbytek} , \quad (21)$$

tak, jak se mění jeho složení, respektive jak rychle se surové dřevo mění na zuhelnatělý zbytek. Průběh křivek na Obr. 16 je tak ovlivněn nejen samotnou hodnotou součinitele tepelné vodivosti, ale i definovaným modelem tepelného rozkladu. Zvýšení hodnoty součinitele tepla vede k tomu, že látka snáze vede teplo, tedy že teplo je z okolí rychleji vedeno dovnitř materiálu. Ve výsledku je tak povrchová teplota nižší. Na začátku ohřevu látky je rychlost jejího rozkladu řízena spíše kinetikou a MLR je tak více citlivý na teplotu blíž k povrchu. MLR tak ze začátku může být vyšší pro nižší hodnotu λ . Při dalším ohřevu se ale děj stává limitovaný spíše rychlostí sdílení tepla a v pozdější fázi ohřevu tak zvýšení λ vede ke zvýšení rychlosti hmotnostního úbytku [15]. To je jasně demonstrováno na Obr. 16. Při zavedení λ jako funkce teploty v porovnání s použitím hodnoty λ při pokojové teplotě je první i druhý pík na křivce rychlosti úbytku hmotnosti vyšší. Celková doba rozkladu vzorku v 1D modelu tepelné degradace je také



Obr. 16: MLR v čase pro konstantní hodnoty součinitele tepelné vodivosti v porovnání s hodnotou součinitele tepelné vodivosti proměnného s teplotou. Predikce 1D modelu tepelného rozkladu (1 krokové rozkladné schéma) při třech hodnotách externího tepelného toku 20, 50 a 80 kW/m². Plná čára – λ závislé na teplotě, čárkovaná čára – λ je konstantní.

kratší pro λ závislé na teplotě. Tvar křivek a zejména průběh druhého píku je ale u takovéto analýzy silně ovlivněn také λ zuhelnatělého zbytku.

8 Model hoření v plynné fázi

V kapitole 5.2 bylo vysvětleno, jaké veličiny a proč vystupují v modelu hoření v plynné fázi. V této kapitole jsou shrnuty možnosti stanovení složení plynného paliva jako reaktantu exotermní reakce spalování a tabelovány hodnoty podílu sazí a CO, které při spalování aglomerovaných desek vznikají. V poslední části této kapitoly je uvedena efektivní výhřevnost desek aglomerovaného dřeva.

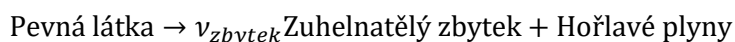
8.1 Složení plynného paliva

V sekci 5.2.2 je uvedena obecná rovnice spalování tak, jak je uvažována v jednom z nejběžněji používaných softwarů pro modelování hoření FDS. I při jiném zadefinování reakce spalování je klíčové určit reaktanty v této rovnici – složení plynného paliva, které je proti realitě zjednodušeno na nízký počet reakcí, často pouze jednu reakci. Plynné palivo, které do ní vstupuje, tedy musí reprezentovat všechny materiály v doméně.

Složení plynného paliva lze analyzovat metodami plynové chromatografie s hmotnostní spektrometrií či infračervenou spektroskopií při jejich napojení na přístroj pro termickou analýzu, jako je TGA či DSC. V takovém případě mohou být produkty tepelného rozkladu ať v inertní nebo oxidativní atmosféře jímány a následně analyzovány tzv. online (v reálném čase) či off-line (se zpožděním). Vyhodnocení takových analýz vyžaduje velmi dobrou znalost dané analytické metody a je instrumentačně relativně náročné zejména u online analýz. Výstupy analýz mohou být různě detailní. Podrobné analýzy je s výhodou možno použít tam, kde kromě běžných látek očekáváme např. bromované či fluorované sloučeniny, HCN či jiné toxické látky, které chceme zahrnout v analýze toxicity spalin v simulaci hoření zejména v kontextu evakuace. Postup a vyhodnocení takových měření je mimo rozsah této metodiky.

Z výstupu analýzy plynů lze ale také stanovit „jednoduchý“ sumární vzorec zastoupení základních prvků plynného paliva uvažovaného v modelu tedy C, H, O, N. Tento postup je ale časově náročný a komplikovaný a je otázkou, zda jeho výstupy jsou vypovídající vzhledem ke značně zjednodušené modelové představě reakce spalování.

Jednoduchým postupem pro stanovení složení plynného paliva je dopočet na základě prvkového složení pevné látky. Tab. 10 obsahuje dopočítané složení plynného paliva (hořlavých plynů), které vzniká dle jednoduché fiktivní reakce (případně více paralelních fiktivních reakcí) typu:



uvedených v kapitole 5.1.4. Pro známý stechiometrický koeficient vznikajícího zbytku je možné hmotnostní zlomek uhlíku v plynném palivu rozkládajícího se materiálu X , značený $w_{C,X}^{\text{plynné palivo}}$ dopočítat dle vzorce:

$$w_{C,X}^{\text{plynné palivo}} = \frac{w_{C,X}^{\text{původní materiál}} - \nu_{X,\text{zbytek}} w_{C,X}^{\text{zbytek}}}{1 - \nu_{X,\text{zbytek}}}. \quad (22)$$

Na příkladu OSB lze ukázat:

Po dosazení pro známý stechiometrický koeficient zuhelnatělého zbytku (Tab. 5) a známé složení OSB (Tab. 2) vypočítáme hmotnostní zlomek uhlíku v plynném palivu jako:

$$w_{C,OSB}^{plynné palivo} = \frac{w_{C,OSB}^{původní materiál} - v_{OSB,zbytek} w_{C,OSB}^{zbytek}}{1 - v_{OSB,zbytek}} = \frac{49,6 - 0,21 \cdot 84,2}{1 - 0,21} \% = 40,4 \% . \quad (23)$$

Analogicky je výpočet hmotnostního složení proveden pro všechny zbývající prvky.

V závislosti na daném softwaru může být látkové složení plynného paliva zadáváno v hmotnostních nebo molárních procentech. Pokud je vyžadováno zadání v molárních procentech, lze hodnoty uvedené v Tab. 10 přepočítat dle vzorce:

$$x_{i,X}^{plynné palivo} = \frac{w_{i,X}^{plynné palivo} / M_i}{\sum_j w_{j,X}^{plynné palivo} / M_j} , \quad (24)$$

kde x značí molární zlomek, M molární hmotnost a indexy i a j jednotlivé atomy (C, H, N, O). Například molární zlomek atomu C v OSB lze vypočítat následovně:

$$x_{C,OSB}^{plynné palivo} = \frac{w_{C,OSB}^{plynné palivo} / M_C}{\sum_j w_{j,OSB}^{plynné palivo} / M_j} = \frac{40,4/12,0}{\frac{40,4}{12,0} + \frac{7,3}{1,0} + \frac{0,1}{14,0} + \frac{52,2}{16,0}} \% = 24,1 \% . \quad (25)$$

Tab. 10: Dopočítané složení plynného paliva na základě znalosti složení surového aglomerovaného dřeva (naměřeného elementární analýzou) a ze stechiometrického koeficientu zuhelnatělého zbytku (naměřeného z TG).

Materiál	C [%]	H [%]	N [%]	O [%]
	Plynné palivo – dopočteno			
OSB	40,4	7,3	0,1	52,2
Dřevotřísk	39,0	7,6	2,2	51,2
MDF	40,7	7,4	4,1	47,8
Překližka	39,8	7,7	0,3	52,2
Průměr	39,9	7,5	1,7	50,9

Obecný postup, jak stanovit složení plynného paliva do simulace hoření, neexistuje. Např. novozélandský dokument závazný pro aplikaci CFD modelů hoření v požární bezpečnosti staveb [39] doporučuje dva možné postupy. Prvním postupem je, že dokument definuje podíl CO₂, H₂O, CO a sazí jako konstanty pro daný typ objektu – požárního zatížení. Ze stechiometrie je pak možné dopočítat složení paliva (reaktantu reakce). Druhou možností pak je využít obecnou molekulu paliva CH₂O_{0,5}, experimentálně či z literatury stanovit podíl sazí a CO a podíl CO₂ a H₂O dopočítat ze stechiometrie.

8.2 Efektivní výhřevnost, podíl sazí, podíl CO

Efektivní výhřevnost, podíl sazí a podíl CO jsou parametry, které se týkají hoření pevného materiálu, ale jejich vliv je v modelu zahrnut při popisu procesů probíhajících v plynné fázi. Význam těchto tří parametrů byl vysvětlen v kapitole 5.2. Experimentálně zjištěné hodnoty těchto parametrů pro všechny čtyři desky aglomerovaného dřeva byly převzaty z [13] a jsou uvedeny v Tab. 11. Hodnoty efektivní výhřevnosti jsou podobné pro všechny desky z aglomerovaného dřeva až na desku překližkovou, jejíž efektivní výhřevnost je výrazně vyšší. Překližka má také největší podíl CO a nejmenší podíl sazí. Nejvyšší podíl sazí má deska OSB.

Tab. 11: Efektivní výhřevnost, podíl CO a podíl sazí aglomerovaného dřeva. Tabulka převzata z [13].

	ΔH_{eff} [MJ/kg]	ν_{saze} [-]	ν_{CO} [-]
OSB	11,71	0,0075	0,0049
MDF	11,61	0,0049	0,0058
Dřevotříska	11,14	0,0045	0,0044
Překližka	12,55	0,0038	0,0079

9 Výpočetní síť

V kapitole 5.3.1 bylo krátce vysvětleno, proč je velikost buněk výpočetní sítě CFD modelu důležitá. Následující kapitola se detailně věnuje metodám odhadu velikosti buněk výpočetní sítě v návaznosti na studovaný problém – scénář – a zvolený model turbulence.

9.1 Jak volit velikost buněk výpočetní sítě?

CFD úlohy se díky své komplexitě řeší výhradně numericky. Pro řešení existují obecně tři přístupy (metoda sítí, metoda konečných objemů a metoda konečných prvků), které se liší postupy aproximace diferenciálních rovnic a diskretizace, tj. náhrada spojitého prostředí systémem uzlových bodů. Původní systém parciálních diferenciálních rovnic se tak převádí na řešení soustavy algebraických rovnic. Principy metod jsou snadno dostupné v odborné literatuře [40] a jejich popis je nad rámec tohoto textu. Klíčovým problémem je ale nastavení vhodné hustoty uzlových bodů ve výpočetní síti tak, aby numerické řešení bylo stabilní a získané predikované hodnoty veličin (rychlost, hustota, tlak, koncentrace, ...) se co nejvíce blížily k fyzikální realitě. Zde je nutné připomenout, že hodnoty veličin se během výpočtu uchovávají buď v uzlových bodech, nebo centrech výpočetních buněk, které jsou uzlovými body ohraničené (Obr. 18), přičemž platí konstantní hodnoty veličin pro celou výpočetní buňku. Aplikace pro vizualizaci vypočtených hodnot veličin ve výpočetní doméně umí zpětně aproximovat změny veličin mezi uzlovými body, resp. centry výpočetních buněk, a znázornit změny spojitě.

9.1.1 Velikost vírů

Proudění plynů při požáru je turbulentní. Řešení turbulentního proudění je důležité z pohledu přenosu energie, kdy velké vírové struktury obsahují většinu kinetické energie, velké víry se postupně rozpadají na menší a kaskáda rozpadu je ukončena zánikem nejmenších vírů disipací, kdy dochází k přeměně kinetické energie na teplo díky vazkým silám. **Z pohledu nastavení velikosti buněk výpočetní sítě je nutné nejdříve určit základní měřítko velikosti turbulentních vírů.** Při řešení budeme uvažovat turbulentní proudění tekutin v dostatečné vzdálenosti od pevných stěn, tj. mimo vazkou vrstvu (vrstva v bezprostřední blízkosti pevné stěny, kde je laminární proudění).

Velikost největších vírů

Velikost největších vírů L (tzv. integrální velikost) počítáme z turbulentní kinetické energie k a střední rychlosti disipace turbulence ε :

$$L = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}, \quad (26)$$

$$k = \frac{1}{2} (\overline{v_x'^2} + \overline{v_y'^2} + \overline{v_z'^2}), \quad (27)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \nu \overline{\left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i} \right)^2}, \quad (28)$$

$$\varepsilon = \nu \left\{ \begin{array}{l} 2 \left(\overline{\left(\frac{\partial v'_x}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'_y}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'_z}{\partial x} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'_x}{\partial y} \right)^2} + \right. \\ 2 \left(\overline{\left(\frac{\partial v'_y}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'_z}{\partial y} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'_x}{\partial z} \right)^2} + \overline{\left(\frac{\partial v'_y}{\partial z} \right)^2} + \right. \\ \left. \left. 2 \left(\overline{\left(\frac{\partial v'_z}{\partial z} \right)^2} + 2 \left(\overline{\left(\frac{\partial v'_x}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v'_y}{\partial x} \right)} + \overline{\left(\frac{\partial v'_y}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial v'_z}{\partial x} \right)} + \overline{\left(\frac{\partial v'_x}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial v'_z}{\partial y} \right)} \right) \right) \right\}, \quad (29)$$

kde $\overline{v'_j}$ jsou střední hodnoty fluktučních složek rychlosti ve směru j a ν je kinematická viskozita. Fluktuační rychlosti v jednotlivých směrech (tj. odchylky okamžité rychlosti od střední hodnoty za dané časové období) lze při vhodné instrumentaci zjistit experimentálně, nebo hodnoty k a ε zjistíme z CFD simulace. O metodách měření fluktuací a odhadů rychlosti disipace turbulence pojednává například článek [41]. V případě přítomnosti plamene je ale experimentální zjištění rychlosti proudění velmi obtížné, mnohdy nemožné. V tomto případě užíváme základní odhad integrální velikosti

$$L \approx 0,5 D, \quad (30)$$

kde D je průměr horizontální základny plamene (např. pro ohraničený požár hořlavé kapaliny se jedná o průměr nádoby s hořící kapalinou). U vertikální hořící stěny je základní odhad maximální velikosti turbulentních vírů ovlivněn okrajovými podmínkami, zde je výhodnější vycházet z předběžné CFD simulace.

Dále lze fluktuační rychlosti odhadovat přímo. Pokud jsou fluktuační rychlosti ve všech směrech stejné (jedná se o tzv. izotropní turbulenci) a intenzita turbulence je vysoká ($\sim 20\%$), lze odhadnout fluktuaci rychlosti z maximální rychlosti nad plamenem

$$v' \approx 0,3 v_{max} \quad (31)$$

Maximální rychlost proudění nad plamenem můžeme odhadnout z experimentů, např. pro hořlavé kapaliny platí [42]:

$$v_{max} [ms^{-1}] \approx 1,93 (\dot{Q} [kW])^{\frac{1}{5}}, \quad (32)$$

kde \dot{Q} je teplo uvolněné při hoření [kW].

Velikost nejmenších vírů

Pro odhad minimální velikosti vírů (tj. vírů, které následně zaniknou disipací) se počítá tzv. Kolmogorovo měřítko:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (33)$$

kde ν je kinematická viskozita tekutiny a ε – střední rychlost disipace turbulence. Hodnoty Kolmogorova měřítka můžeme odhadnout z Reynoldsova kritéria a integrální velikosti vírů:

$$\eta \approx L Re^{-\frac{3}{4}}, \quad (34)$$

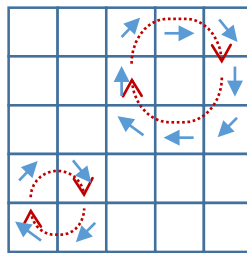
$$Re = \frac{v' L}{\nu} . \quad (35)$$

Příklad

Stručný příklad hoření petroleje v ohraničené nádobě o průměru 0,66 metru (tj. plocha $A = 0,342 \text{ m}^2$) ukazuje, že rozdíl velikostí nejmenších a největších vírů může být přes několik řádů. Dle rovnice (30) lze odhadnout velikost velkých vírů na 0,33 m ($L = 0,5 \times 0,66$). Uvažujeme-li HRRPUA petroleje přibližně $1\,400 \text{ kW/m}^2$ [43], pak množství uvolněného tepla $\dot{Q} = \dot{q}_{HRR}'' \times A$, je 479 kW. Maximální vertikální rychlost proudění nad plamenem podle rovnice (32) je pak 6,6 m/s a fluktuace rychlosti dle rovnice (31) je 2 m/s. Hodnota Reynoldsova čísla je 6 600 (rovnice (35)) a průměr nejmenších vírů (Kolmogorovo měřítko) následně vychází 0,45 mm (rovnice (34)).

9.1.2 Model turbulence ve vztahu k velikosti vírů a velikosti buněk

Turbulentní proudění lze metodou CFD modelovat různými postupy od nejvíce přesného řešení *přímou numerickou simulací* (angl. Direct Numerical Simulation, **DNS**), která ale vyžaduje extrémní výpočetní výkony díky velkému počtu bodů ve výpočetní síti – musíme být schopni přímo počítat všechny velikosti vírů, přes *metodu velkých vírů* (angl. Large Eddy Simulation, **LES**), kde velké víry jsou počítány přímo a malé modelovány, až k metodě *Reynoldsového středování Navierových-Stokesových rovnic* (angl. Reynolds Averaged Navier-Stokes, **RANS**),



Obr. 17: Výpočetní síť, příklad směru vektorů rychlosti v buňkách pro různé velikosti vírů.

kde získáme časové střední hodnoty neznámých (počítaných) veličin. Vždy ale platí pravidlo, že pro přímý výpočet turbulentního víru potřebujeme minimálně čtyři buňky výpočetní sítě, viz Obr. 17. V požárním inženýrství je důležitá dynamika dějů, proto se často používá časově neustálená metoda velkých vírů. U metody velkých vírů je třeba volit takovou hustotu sítě, aby byla schopna zachytit velké víry a odfiltrovat víry malé, které se následně modelují tzv. podsíťovými modely (angl. Sub-Grid Modelling). Při filtraci Navierových-Stokesových rovnic vzniká podsíťové napětí, které musí být modelováno, resp. modeluje se podsíťová turbulentní viskozita, která je součástí výpočtu podsíťového napětí [44], [45]. V dalším textu budou ukázána doporučení právě pro metodu LES.

V základní teorii metody velkých vírů se doporučuje, aby hustota výpočetní sítě byla taková, že nejméně 80 % turbulentní kinetické energie k bude počítáno přímo a zbytek modelováno podsíťovými modely. Pro počáteční odhad velikosti buněk výpočetní sítě v turbulentní oblasti lze použít minimálně pět buněk (lépe 10 buněk) na integrální velikost vírů, tj. vzdálenost mezi uzlovými body $\Delta \approx L/5$, resp. $\Delta \approx L/10$. V případě modelování blízkého okolí turbulentního plamene je doporučováno deset buněk výpočetní sítě. Integrální velikost vírů můžeme vypočítat buď ze základny plamene

$$L = 0s,5 D \left(\Delta \approx \frac{D}{20} \right) \quad (36)$$

nebo z předběžné RANS numerické simulace

$$L = \frac{k^{(3/2)}}{\varepsilon} . \quad (37)$$

Protože velikost vírových struktur v doméně se bude lišit, bude se lišit také velikost buněk výpočetní sítě v prostoru. Pro oblast plamene je doporučováno použít jemnější výpočetní síť $\Delta \approx L/15 = D/30$.

Po výpočtu lze udělat jednoduchou kontrolu, zdali hustota výpočetní sítě odpovídá velikosti vírových struktur za použití funkcí následného zpracování výsledků, tzv. post-processing. Vypočítáme parametr f a jeho velikost znázorníme přes celou doménu:

$$f = \frac{k^{3/2}}{\Delta x \varepsilon} , \quad \Delta x = (\text{lokální objem buňky})^{1/3} . \quad (38)$$

Pokud bude hodnota parametru menší než zvolená hodnota (např. 5, resp. 10), je nutné zvýšit počet buněk v dané oblasti – výpočetní síť zahustit.

U obecných CFD řešičů, např. OpenFOAM nebo ANSYS Fluent/CFX, je relativně snadné zjistit poměr přímého výpočtu turbulentní kinetické energie, k_{res} , a modelované podsíťovými modely, k_{sgs} . Celkovou hodnotu turbulentní kinetické energie vypočteme jako $k = k_{res} + k_{sgs}$. V post-processingu můžeme vypočítat poměr:

$$\frac{k_{res}}{k_{res} + k_{sgs}} \quad (39)$$

a následně hodnotu vizualizovat, přičemž požadavek je dosažení hodnoty větší než 0,8.

Specializovaný CFD řešič požárního inženýrství Fire Dynamics Simulator (FDS) má poměr definován obráceně:

$$\text{MTR}(\mathbf{x}, t) = \frac{k_{sgs}}{k_{res} + k_{sgs}} , \quad (40)$$

přičemž při hodnotách MTR (angl. Measure of Turbulence Resolution) kolem 0,2 lze získat uspokojivě shodných výsledků veličin ve srovnání s experimenty. Lokální hodnoty MTR lze pro verzi FDS 6.2.0 a starší znázornit v programu Smokeview. Od FDS verze 6.3.0 je nutné výpočet provést dle postupu uvedeného v FDS User's Guide pod heslem „measure of turbulence resolution“. Pro prvotní odhad vhodné velikosti výpočetní sítě v FDS vývojáři softwaru navrhuji použít charakteristický průměr plamene:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{2/5} , \quad (41)$$

\dot{Q} je uvolněné teplo při hoření [kW], ρ_{∞} – hustota vzduchu [kg/m³], c_p – měrné teplo vzduchu [kJ/kg/K], T_{∞} – okolní teplota vzduchu [K], g – tíhová konstanta [m/s²].

FDS Users Guide doporučuje použít rozmezí $4 < D^*/\Delta x < 16$. V případě poměru $D^*/\Delta x = 4$ se ale jedná o velmi hrubou síť, a proto se obecně doporučuje dodržet poměr $D^*/\Delta x > 10$.

Počet buněk v mezní vrstvě

U modelování hoření je další klíčová volba u hustoty výpočetní sítě v oblasti základny plamene (např. konec plynového hořáku, volná hladina hořlavé kapaliny nebo pyrolýzní oblast pevné fáze). Základna plamene má poměrně tenkou mezní vrstvu (~ 1 cm), tj. vrstvu v blízkosti stěny s převládajícím

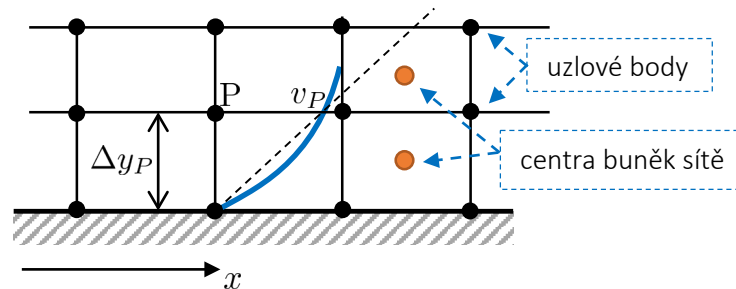
laminárním charakterem proudění, které přechází do turbulentního. V mezní vrstvě se doporučuje mít alespoň 15 výpočetních buněk v normálovém směru od okraje, přičemž maximální změna velikosti mezi sousedními buňkami by neměla přesáhnout násobek 1,2. Obecně lze v mezní vrstvě použít překlenovací stěnovou funkci pro výpočet rychlostního profilu, kdy je doporučována hodnota bezrozměrné vzdálenosti od stěny k první výpočetní buňce, y^+ , v rozsahu $30 < y^+ < 100$. Při užití stěnové funkce lze vzdálenost prvního uzlového bodu od stěny, P , viz Obr. 18, vypočítat:

$$\Delta y_P = \frac{y^+ \nu}{v_\tau}, \quad v_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (42)$$

kde ν je kinematická viskozita tekutiny, v_τ – smyková (třecí) rychlost a τ_w – smykové napětí na stěně. Hodnoty smykového napětí na stěně lze získat v post-processingu po simulačním výpočtu.

9.1.3 Citlivostní analýza sítě

V každém případě je nutné po prvotním výpočtu analyzovat výpočetní síť a testovat její “nezávislost”, kdy zahuštění výpočetní sítě nesmí změnit vypočtené hodnoty veličin o uživatelem stanovenou odchylku. Doporučuje se provést alespoň tři různá nastavení hustoty výpočetní sítě. Začínáme s nastavením výpočetní sítě podle doporučených odhadů, kde nejvíce uzlových bodů bude v základně plamene mezi stěnou a plamenem, dále v plamenu a jeho bezprostředním okolí. V širším okolí od plamene lze udělat výpočetní síť relativně hrubou. Pozor se musí dát v místech s očekávanými vyššími gradienty rychlosti, kde je nutné výpočetní síť lokálně zahustit (např. vstupní/výstupní větrací otvory). Při tvorbě výpočetní sítě je nutné mít na paměti stabilitu numerického výpočtu a volit vhodné tvary buněk sítě s dodržением poměru hran (ploch) buněk (angl. Aspect Ratio), kdy ideální poměr je jedna.



Obr. 18: Rychlostní profil v mezní vrstvě predikovaný stěnovou funkcí.

Po prvotním CFD výpočtu je nutné udělat analýzu výpočetní sítě a popřípadě zvýšit nebo snížit počet uzlových bodů podle výsledků analýzy. Následně provedeme testování nezávislosti výpočetní sítě zvýšením počtu buněk výpočetní sítě s kontrolou, jak změna ovlivnila hodnoty sledovaných veličin (např. teplota, koncentrace, rychlost). V některých případech bude po úpravách výpočet značně časově náročný z důvodu velkého množství buněk ve výpočetní síti. Finální rozhodnutí o velikosti výpočetní sítě je vždy na uživateli s vědomím o možné nepřesnosti numerické predikce požadovaných veličin.

10 Velkorozměrové zkoušky pro získání vstupních dat do modelů požáru a jejich validaci

Běžná praxe s používáním CFD modelů již byla nastíněna v kapitole 3. V inženýrské praxi nachází běžné využití CFD modely, které nedefinují tepelný rozklad materiálů, ale používají jako vstup křivky rychlosti uvolněného tepla (HRR) a jsou sledovány následky hořících materiálů v prostoru. Sledovanou hodnotou v modelu může být například teplota, která je klíčová pro hodnocení konstrukčních částí.

Problémem praxe u těchto typů modelů je časová náročnost nejen samotné simulace, ale i rešeršní činnosti. Mnohdy nejsou okrajové podmínky, které tvoří nedílnou součást experimentů a modelování, k dispozici nebo se ne úplně shodují s modelovanou situací. V literatuře se nejčastěji vyskytuje pouze samotná křivka rychlosti uvolňování tepla obecně popsaného testovaného modelu bez detailnějšího rozboru. Chybí nejen popis a množství zkoušeného materiálu, ale i například počáteční teplota, vlhkost prostředí či účinek ventilace nebo dokonce materiálové vlastnosti a tepelné technické charakteristiky, které se navíc mohou během zvýšených teplot měnit.

Použití křivky HRR bez detailní znalosti okrajových podmínek může přinášet zcela odlišné chování oproti realitě. V této kapitole je ukázán vliv okrajových podmínek na HRR křivku při pálení nábytkové sestavy ze všech čtyř desek aglomerovaného dřeva. Dále je diskutován vliv samotného materiálu na průběh hoření nábytkové sestavy.

10.1 Popis zkušebního prostoru

Zkušební model představoval běžnou nábytkovou sestavu v administrativní budově. Přesný zakres je zobrazen na Obr. 19. Sestava zahrnuje kancelářský stůl, nízkou zásuvkovou skříň a otevřenou knihovnu. Všechny tři kusy nábytku byly v přímém kontaktu bez mechanické vazby. Pod stolem, u jeho pravé stojny, byla umístěna zásuvková skříň. Vedle pravé stojny byla dále umístěna knihovna. Sestava se svým rozložením neměnila mezi jednotlivými zkouškami ani mezi jednotlivými materiály. Měnilo se jen umístění celé sestavy a místo iniciace. Modelovanou situací bylo hoření odpadkového koše umístěného pod pracovním stolem. Odpadkový koš byl v experimentech nahrazen plynovým pískovým hořákem o konstantním výkonu 30 kW po dobu 480 s (8 minut).

Sestava se zkoušela v Požární laboratoři UCEEB ČVUT v Praze. Jde o prostor uzpůsobený pro velkorozměrové zkoušení obkladových materiálů dle ISO 9705, tzv. Room Corner Test. Tento prostor lze nicméně využít jako nábytkový kalorimetr. Základními měřenými veličinami jsou tedy obsah O_2 , CO a CO_2 ve zplodinách hoření a rychlost proudění a teplota plynů v odtahovém potrubí. Z těchto veličin se dopočítává zmiňovaná rychlost uvolňování tepla HRR a dále celkové uvolněné teplo THR.

Měřicími zařízeními mimo soustavu nábytkového kalorimetru byly dále termočlánky přímo upevněné na zkušební model. Termočlánky byly stíněny nefalitivými destičkami tak, aby byla monitorována pouze povrchová teplota desek a bylo eliminováno zaznamenání teplot plyné fáze. Jejich rozložení bylo voleno tak, aby zobrazovalo průběh rozvoje požáru iniciovaným hořícím odpadkovým košem. Znázornění polohy termočlánků je patrné na Obr. 19. Uprostřed stolu z jeho spodní strany vodorovné desky byl umístěn termočlánek pro zjištění aktuální povrchové teploty spodní roviny stolu. Symetricky z horní strany byl umístěn další termočlánek. Ten zobrazoval prohřátí vodorovné desky a možnou indikaci teplot sloužící pro predikci vznícení běžně se vyskytujících materiálů na pracovním stole. Z této horní strany byl dále umístěn termočlánek v blízkosti levé stojny stolu. Čtvrtý termočlánek osazený na stůl se nacházel na vnější straně pravé stojny. Další termočlánky byly umístěny z boční stěny zásuvkové skříň směrem k hořáku a symetricky na opačné stěně zásuvkové skříň – tento monitoroval přenos tepla mezi jednotlivými deskami nábytku. Poslední soubor termočlánků byl umístěn na knihovně. Byla snímána povrchová teplota stojen zevnitř i vně v nejvýše umístěné polici.



Obr. 19: Schéma nábytkové sestavy včetně rozmístění termočlánků. Fotka sestavy z překližky v rohu místnosti.

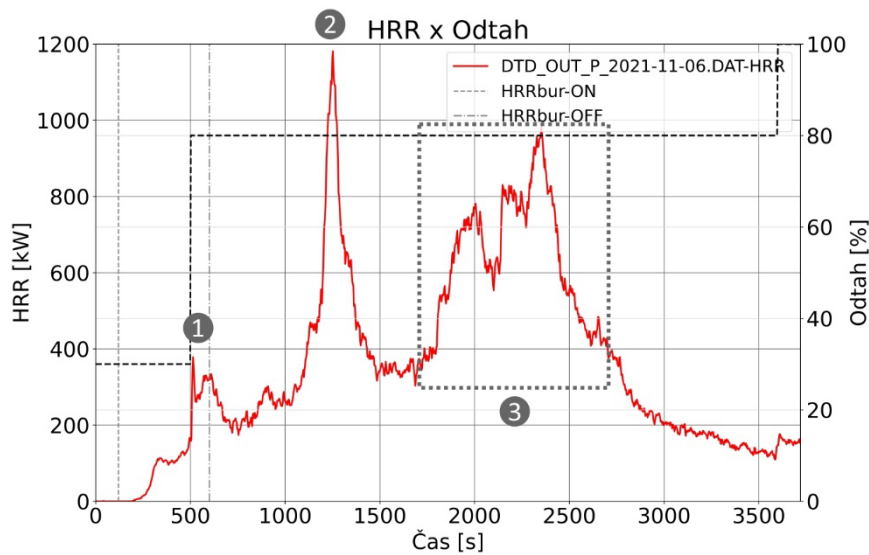
10.2 Vliv okrajových podmínek na rychlost uvolňování tepla

Celkem bylo provedeno 25 zkoušek, z toho 2 sestavy byly opakovány čtyřikrát, jedna sestava třikrát a jedna dvakrát, viz Tab. 12. Jednotlivé scénáře měly za cíl porovnat chování vzorků při požárních zkouškách za různých okrajových podmínek:

- **umístění nábytkové sestavy** – přímo pod odtahovým zvonem (dále označováno jako „OUT“), nebo v rohu zkušební místnosti RCT (dále označováno jako „RCT“);
- **materiálová struktura** – byly zkoušeny nábytkové sestavy ze všech čtyř materiálů (dřevotřísková deska – DTD, dřevovláknitá deska – MDF, dřevostěpková deska – OSB, překližka – PLY);
- **umístění hořáku** – u levé stojny (dále označováno „vlevo“), nebo u levé bočnice zásuvkové skříně (dále označováno „vpravo“);
- **způsob ventilace** – ventilace přímo souvisí s umístěním nábytkové sestavy (OUT x RCT) a vliv ventilace na průběh zkoušek je nutné popsat detailněji;
- **chování vzorku** – nejde o systémově uvažovanou, nýbrž o náhodnou okrajovou podmínku, kterou je třeba popsat detailněji.

Tab. 12: Počet opakování experimentů pro jednotlivé scénáře – pálení sestavy uvnitř místnosti (RCT) nebo pod odtahovým zvonem (OUT), umístění hořáku pro iniciaci pod deskou stolu (vpravo, vlevo).

	RCT vlevo	RCT vpravo	OUT vlevo	OUT vpravo
Dřevotřísková (DTD)	4	1	4	1
MDF	1	1	1	3
OSB	1	1	2	1
překližka	1	1	1	1

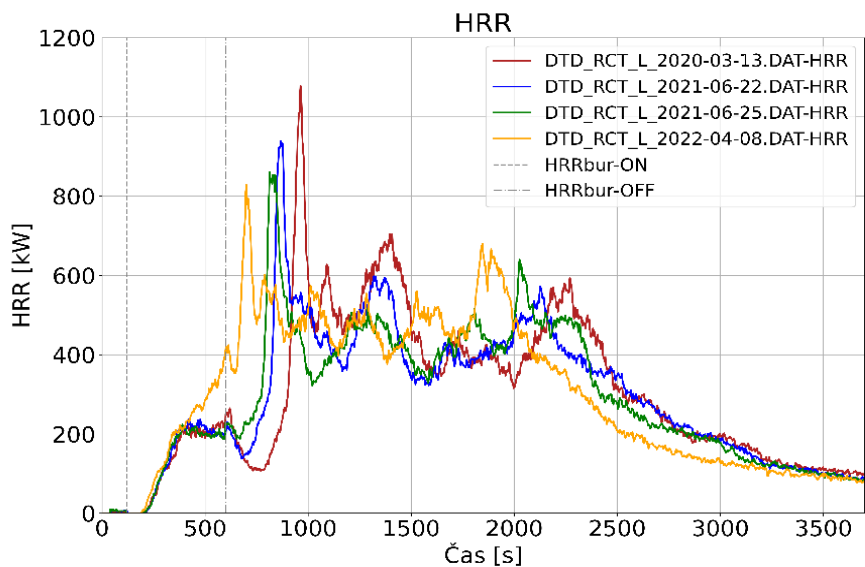


Obr. 20: Rychlost uvolňování tepla při velkorozměrové zkoušce nábytkové sestavy z DTD (vrcholy křivky HRR: 1 – vypnutí hořáku, 2 – celkové vzplanutí horní plochy stolové desky, 3 – hoření zásuvkové skříně a knihovny).

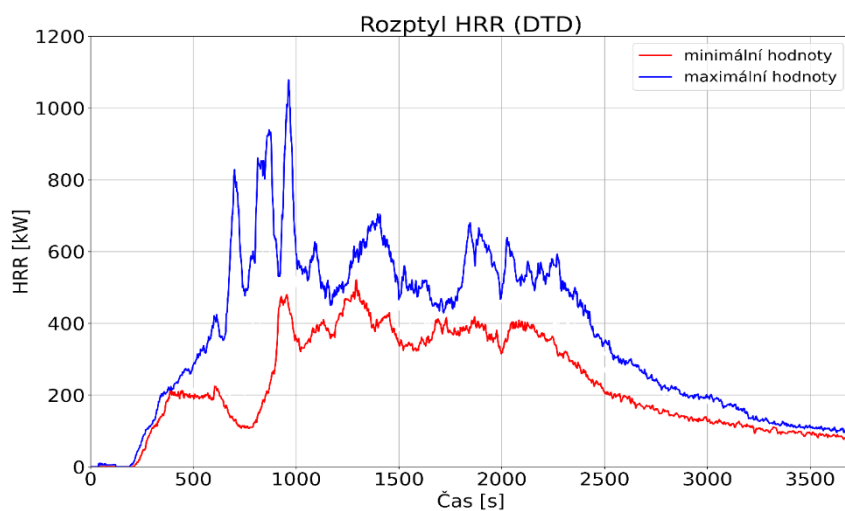
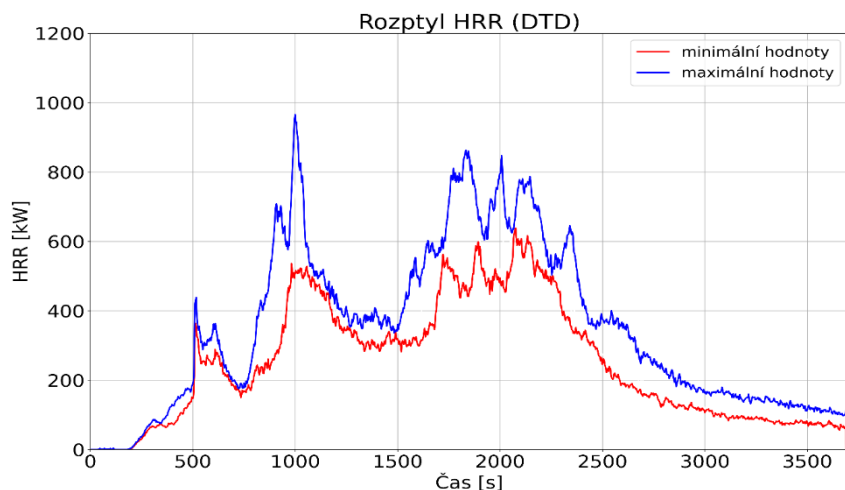
Přestože chování vzorků a křivka HRR byly někdy značně rozdílné, lze průběh experimentů v zásadě zobecnit. Charakteristický průběh křivky HRR nábytkové sestavy z aglomerovaného dřeva je na Obr. 20. Po spuštění hořáku docházelo ke kumulaci plamene pod deskou stolu. Hořák byl vždy vypnut po 480 sekundách. Vypnutí hořáku se projevilo poklesem HRR, čímž se vytvořil první vrchol křivky HRR (požár pod deskou již nebyl zásobován hořákem a došlo k jeho útlumu). Plamen se rozšiřoval na stojny a svislou výztužnou desku stolu. Zároveň zapaloval horní a boční stranu zásuvkové skříně. Degradovaná deska stolu se prohřívala a zároveň se postupně prohýbala. Při dostatečném průhybu došlo k zahoření celého horního povrchu desky. Při tomto stavu byla plocha hořících částí rozsáhlá a byl zaznamenán **druhý, nejčastěji nejvyšší, vrchol** v křivce HRR. Porušením desky stolu vznikl prostor vhodný pro přesun plamene také na knihovnu. V době kompletního odhoření stolní desky a jeho výztužné desky byl plamen přesunut primárně na levou a horní desku zásuvkové skříně a dále na levou boční stěnu knihovny. Postupným šířením plamene po boční stěně zásuvkové skříně došlo k degradaci této stěny a otevření skříně se zcela náhodným vysunutím jednotlivých zásuvek směrem k hořáku. Plamen se přesouval rozevřenou zadní levou spárou do jednotlivých polic knihovny. Vždy došlo k zahoření nejprve horní poloviny polic. Několik vteřin po otevření boční stěny zásuvkové skříně došlo opět k navýšení tepelného výkonu a byl zaznamenán **třetí, déle trvající, vrchol** křivky HRR. Tento vrchol nabýval vysokých hodnot až do doby odhoření většiny hořlavého materiálu a jeho tvar závisel právě na faktu, zda knihovna i zásuvky hořely postupně nebo současně. Následně křivka HRR pouze klesala.

10.2.1 Umístění sestavy uvnitř místnosti versus pod odtahovým zvonem

Byly sledovány dvě situace: zkouška uvnitř místnosti (RCT) a zkouška přímo pod odtahovým zvonem (OUT). Zkouška RCT odpovídá hoření v malé místnosti, např. v pokoji nebo jednotlivé kanceláři, zatímco zkouška OUT lze připodobnit rozvoji požáru ve velké místnosti, např. openspace. Vliv na rozvoj požáru při rozdílném umístění vzorku je zcela zásadní: V případě zkoušky RCT se místnost velmi rychle zaplnila horkými zplodinami hoření a zahřála. Zahřátá kouřová vrstva a okolní konstrukce zpětně sálaly na vzorek. Zkoušky v RCT byly obecně rychlejší.



Obr. 21: Rychlost uvolňování tepla při hoření sestavy z dřevotřísky – 4 opakování



Obr. 22: Rozptyl rychlosti uvolňování tepla při hoření sestav z dřevotřísky při shodných okrajových podmínkách; Nahoře – Sestava umístěná pod odtahovým zvonem (OUT) – tři opakování; Dole – Sestava umístěná uvnitř místnosti (RCT) – 4 opakování

10.2.2 Vliv materiálu

Struktura materiálů popsaná v kapitole 4 ovlivňuje rozvoj požáru. Zajímavé je, že největší hodnoty uvolněného tepla HRR vykazovaly sestavy OSB. Důvodem je velikost štěpek, z nichž je OSB vyráběno a které delší dobu zajišťovaly integritu desky. Ve chvíli, kdy již deska nedokázala udržet tvar a sesunula se, byla z druhé strany prohřátá větší část desky než u jiných materiálů, což se odrazilo i ve větší ploše požáru. Naopak sestava s MDF a překližkou se v některých případech (ne vždy) chovala jinak – pracovní deska se nezačala prohýbat, došlo pouze k lokálnímu prohoření desky nad hořákem a druhý vrchol křivky HRR byl tedy výrazně menší.

10.2.3 Umístění hořáku

Při zkoušce vlevo se plamen šířil vertikálně podél levé stojny a plynule se stácel pod vodorovnou pracovní deskou stolu. Zahřátím spodní strany pracovní desky se plamen rozšířil až do štěrbin mezi zásuvkovou skříní a pracovní deskou. Při zkoušce vpravo se sice plamen šířil vertikálně podél zásuvkové skříně, ale při styku se spodní hranou pracovní desky o ni tříštil do obou stran. Plamen v této situaci nebyl tak konzistentní a trvalo déle, než došlo k prohřátí pracovní desky a dalšímu rozvoji požáru.

10.2.4 Vliv ventilace

Průběh experimentu byl zejména v případě zkoušky pod zvonem (OUT) ovlivněn ventilací. Vyšší výkon odtahu způsoboval v prvních fázích potrhání plamene, v dalších fázích pak urychloval proces odhořívání, a především při hoření vysoké knihovny došlo k tvorbě plamenných vírů. Výkon vzduchotechniky byl proto po dobu zkoušek udržován co nejdéle na nejnižší možné úrovni. Nicméně z bezpečnostních důvodů, při přílišném zakouření laboratoře, bylo nutno výkon navýšit. Je třeba si uvědomit, že skokovým zvýšením výkonu vzduchotechniky dojde ke zkreslení křivky HRR.

10.2.5 Vliv chování vzorku

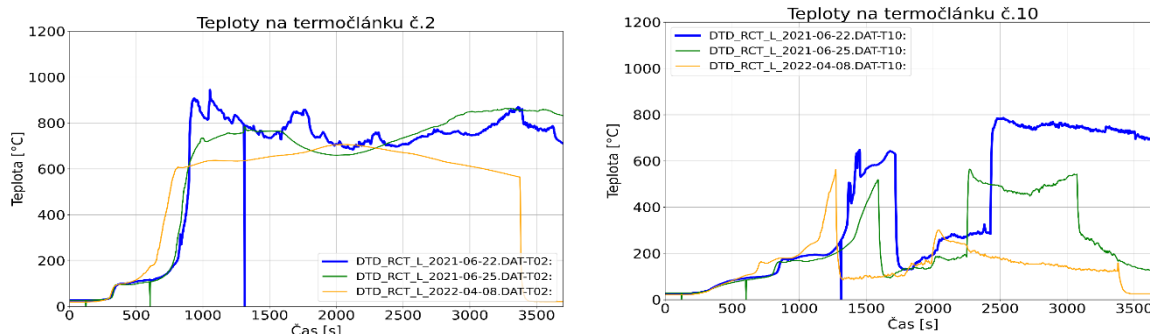
Náhodnou okrajovou podmínkou je samotné chování zkoušeného vzorku. Jeho prohořívání a postupné odpadávaní nelze s jistotou predikovat. Velmi dobře byl tento jev patrný na zásuvkové skříní. Při některých zkouškách nedošlo k postupnému sesuvu zásuvek, ale například k sesuvu tří zásuvek jako celku, které na sobě nehnute držely, nebo nedošlo k sesuvu vůbec a jednotlivé zásuvky odhořívaly na místě původního umístění zásuvkové skříně. Tyto náhodné stavy jsou zároveň velmi dobře zobrazeny v porovnání jednotlivých křivek HRR identicky zkoušených nábytkových sestav shodného materiálu, které nejsou v žádném ze zkoušených stavů stejné, viz Obr. 22.

10.3 Opakovatelnost naměřených dat

Maximální hodnota tepelného výkonu při všech zkouškách je v Tab. 13. Tabulka je seřazena dle lokace zkušební vzorku v prostoru a umístění zápalného zdroje. Z dat v tabulce je jasně vidět, že i zcela identicky provedené zkoušky se mohou svými výsledky lišit. I zkoušky uvnitř místnosti RCT, přestože byly nejméně ovlivněny odtahovou ventilací i jinými předvídatelnými faktory, se u stejného materiálu lišily v maximální hodnotě HRR v rozmezí 250 kW a v čase od iniciace požáru v rozmezí až 260 s, tedy přes 4 minuty, viz Obr. 22. Rozdílný je i průběh, respektive hodnota a poloha třetího vrcholu křivky HRR. Zkouška označená „2020-03-13“ na Obr. 21 má dvě oddělená maxima, dosahující hodnot 700 a 600 kW, jedno pro hoření horní části knihovny a jedno pro hoření zásuvkové skříně. U zkoušky označené „2022-04-08“ lze pozorovat až tři maxima dosahující hodnoty 550 kW (hoření 1., 2. a 3. police) zakončený posledním maximem, kdy hořela zásuvková skříně.

Markantnější rozdíly jsou samozřejmě patrné při komparaci zkoušek s jinými materiály nebo při porovnání zkoušek uvnitř místnosti (RCT) a pod zvonem (OUT). Rozdíl vrcholových hodnot HRR se liší až dvojnásobně: 655 kW pro MDF a 1154 kW při zkoušce OSB pod zvonem.

Při porovnání teplot měřených na povrchu vzorku (Obr. 22) je ze začátku patrné odpařování vody vázané ve vzorku – v čase okolo 500 sekund se prohřívání vzorku zastaví na úrovni 100 °C.



Obr. 23: Porovnání povrchové teplota desek sestavy z dřevotřísky uvnitř místnosti (RCT) při čtyřech totožných opakovaných zkoušky na pozici Termočlánek 2 – teplota ve středu horní strany pracovní desky stolu a Termočlánek 10 – teplota na odvrácené straně knihovny, viz Obr. 19

Tab. 13: Maximální hodnota tepelného výkonu a celkové množství uvolněného tepla při všech zkouškách viz Tab. 12

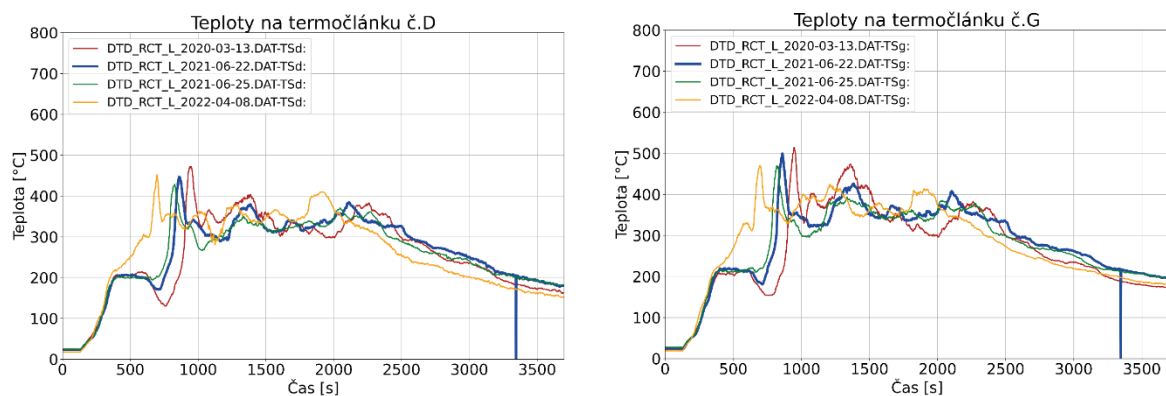
		Max HRR [kW]	THR [MJ], 3600 s od iniciace	označení v grafech
RCT-P (hořák vpravo)	dřevotříska	949	1665	DTD_RCT_P_2020-05-21
	MDF	838	1585	MDF_RCT_P_2020-05-29
	OSB	874	1632	OSB_RCT_P_2020-12-10
	překližka	800	825	PLY_RCT_P_2020-06-01
RCT-L (hořák vlevo)	dřevotříska 1	1078	1115	DTD_RCT_L_2020-03-13
	dřevotříska 2	939	1071	DTD_RCT_L_2021-06-22
	dřevotříska 3	861	1065	DTD_RCT_L_2021-06-25
	dřevotříska 4	828	1107	DTD_RCT_L_2022-04-08
	MDF	1099	1668	MDF_RCT_L_2020-05-28
	OSB	1132	1527	OSB_RCT_L_2020-11-27
	překližka	996	1437	PLY_RCT_L_2020-05-14
OUT-P (hořák vpravo)	dřevotříska	1181	1313	DTD_OUT_P_2021-11-06
	MDF 1	708	1161	MDF_OUT_P_2021-07-07
	MDF 2	809	1123	MDF_OUT_P_2021-07-15
	MDF 3	1045	1398	MDF_OUT_P_2021-11-09
	OSB	1018	1004 ¹	OSB_OUT_P_2021-07-27
	překližka	756	945	PLY_OUT_P_2021-07-05
OUT-L (hořák vlevo)	dřevotříska 1	670	1018	DTD_OUT_L_2020-03-05
	dřevotříska 2	836	1126	DTD_OUT_L_2022-04-11
	dřevotříska 3	754	1051	DTD_OUT_L_2022-04-12
	dřevotříska 4	966	1085 ¹	DTD_OUT_L_2022-04-13
	MDF	655	1643	MDF_OUT_L_2020-12-11
	OSB	1143	1094	OSB_OUT_L_2021-08-09
	OSB	1154	1469	OSB_OUT_L_2020-12-17
	překližka	708	627 ¹	PLY_OUT_L_2020-06-03

¹ Zkouška byla ukončena před časem 3720 s (iniciace ve 120. sekundě), proto je v tabulce zapsána maximální hodnota THR.

Následně docházelo ke kolapsu pracovní desky stolu a razantnímu nárůstu teploty (termočlánek 2), který se ocitl v zóně plamene. Termočlánek připevněný k desce se s ní následně sesunul a měřil výhradně hořící a posléze žhnoucí rezidua. Termočlánek 10, připevněný ke stojně knihovny odvrácené od plamene, zaznamenal samozřejmě pozvolnější nárůst teploty a nad teplotu vzplanutí se dostává až

v čase od 1250 sekund, kdy došlo k zahoření nejvyšší police. V tomto čase je nutné upozornit na srovnání křivek HRR a termočlánu 10 – výrazný nárůst teploty odpovídá prvnímu nárůstu třetího vrcholu křivky HRR. V tuto chvíli ale došlo k odhoření vršku levé stojny v úrovni první police, pravá stojna knihovny ještě vydržela. Následně křivka HRR klesá (požár se s menší intenzitou přesouvá o polici níže) a i teploty na pravé stejně klesají. K jejich nárůstu dochází až později, při kolapsu celé pravé stojny knihovny a konkrétní velikost teploty závisí na tom, zda stojna dopadla směrem do hořícího prostoru („2021-06-22“) nebo zda dopadla od vzorku („2022-04-08“).

Při porovnání teplot v prostoru místnosti RCT mezi čtyřmi totožnými zkouškami (Obr. 23), je zde stále patrná časová diference jednotlivých zkoušek, nicméně absolutní hodnoty teplot zaznamenaných v protější rohu místnosti dosahují ve všech zkouškách cca 500 °C. Zároveň je nutné upozornit na fakt, že zkoušená nábytková sestava sama dokázala vytvořit dostatečně mocnou kouřovou vrstvu, která sahala až do poloviny výšky místnosti (teploty na termočláncích D v cca polovině místnosti a G u stropu dosahují téměř stejných hodnot).



Obr. 24: Porovnání teploty plynu v místnosti v opačném rohu, než byla umístěna sestava – ve výšce 1,4 m nad podlahou (Termočlánek D) a v pod stropem (Termočlánek G).

10.4 Použití křivky HRR jako vstupního parametru CFD modelu - souhrn

Jak bylo již řečeno, křivka HRR se jako vstupní parametr používá při modelování sledující následky (consequence based modelling) a jde o nejjednodušší formu CFD modelování. Z provedených velkorozměrových zkoušek je ale patrné, že i v tomto případě (a možná právě v tomto případě) leží největší břímě na uživateli, jeho zkušenostech a znalostech reálného chování požáru. Je nutné se oprostit od iluze, že zadání přesné křivky HRR do modelu zajistí přesný výsledek.

Při použití křivky HRR jako vstupního parametru při modelování je znalost okrajových podmínek původního experimentu zcela zásadní a je nutné hledat taková data, která odpovídají modelovanému prostoru, popřípadě data, která prošla ověřením (např. soubor opakovaných měření). V opačném případě je správným postupem uvažovat s dostatečnou rezervou, která však není nijak normově nebo legislativně stanovena, na vstupu nebo výstupu modelu:

- Rezervou na vstupu do modelu může být zobecnění původních přesných křivek HRR, jejich procentuální navýšení. Možností je také původní křivky HRR použít jen jako inspiraci a nahradit je jiným způsobem zadání požáru, např. t-kvadratickou křivkou.
- Rezervou na výstupu se rozumí dostatečná rezerva v kritériích přijatelnosti analýzy, pro kterou je CFD model zpracováván.

11 Použitá literatura

- [1] L. Hasalová, „CFD modelování v požární vědě a inženýrství,“ 112 - *odborný časopis požární ochrany, integrovaného záchranného systému a ochrany obyvatelstva*, 2017.
- [2] L. Hasalová a P. Hejtmánek, Vstupní data do modelů požáru, *Metodika CERO 5/2019*, 2019.
- [3] M. Böhm, J. Reisner a J. Bomba, „Materiály na bázi dřeva,“ Česká zemědělská univerzita v Praze, fakulta lesnická a dřevařská, 2012.
- [4] N. M. Stark, Z. Cai a C. Carll, „Wood-Based Composite Materials,“ v *Wood handbook: wood as an engineering material*, Forest Products Laboratory General Technical Report FPL-GTR-190, 2010.
- [5] S. Wang a P. M. Winistorfer, „Fundamentals of vertical density profile formation in wood composites. Part II. Methodology of vertical density profile formation under dynamic conditions,“ *Wood fiber science* 32, 2000.
- [6] K. W. Ragland, D. J. Aerts a A. J. Baker, „Properties of Wood for Combustion Analysis,“ *Bioresource Technology* 37, 1991.
- [7] R. Pitarma, J. Crisóstomo a L. Jorge, „Analysis of Materials Emissivity Based on Image Software,“ v *New Advances in Information Systems and Technologies. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 444. Springer, Cham.*, 2016.
- [8] K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd a M. Vanella, *Fire Dynamics Simulator User's Guide (6th ed.)*, NIST special publication 1019, 2019.
- [9] C. Lautenberger a C. Fernandez-Pello, „Optimization algorithms for material pyrolysis property estimation,“ v *Fire Safety Science proceedings of 10th international symposium*, 2011.
- [10] M. Chaos, M. Khan, N. Krishnamoorthz, J. L. de Ris a S. B. Dorofeev, „Optimization Schemes and Determination of Solid Fuel Properties for CFD Fire Models Using Bench-scale Pyrolysis Tests,“ v *Proceedings of the Combustion Institute* 33, 2011.
- [11] L. Hasalová, J. Ira a M. Jahoda, „Practical Observations on the Use of Shuffled Complete Evolution (SCE) Algorithm for Kinetic Parameter Estimation in Pyrolysis Modeling,“ *Fire Safety Journal*, 2016.
- [12] K. Li, X. Huang, C. Fleischmann, G. Rein a L. Ji, „Pyrolysis of medium-density Fiberboard: Optimized search for kinetics scheme and Parameters via a Genetic algorithm driven by Kissinger's method,“ *Energy Fuel* 28, pp. 6130-6139, 2014.
- [13] J. Ira, L. Hasalová, V. Šálek, M. Jahoda a V. Vystřčil, „Thermal Analysis and Cone Calorimeter Study of Engineering Wood with an emphasis on Fire Modelling,“ *Fire Technology*, 2019.
- [14] I. Leventon, T. Batiot, M. Bruns, S. Hostikka, Y. Nakamura, P. Reszka, T. Rogaume a S. Stoliarov, „The MaCFP Condensed Phase Working Group: A Structured, Global Effort Towards Pyrolysis Model Development,“ *ASTM Selected Technical Papers (STP)*, 2021.
- [15] C. Lautenberger, *A generalized pyrolysis model for combustible solids*, Dizertace - University of California, 2007.
- [16] S. Stoliarov, N. Safronova a R. E. Lyon, „The effect of variation in polymer properties on the rate of burning,“ *Fire and Materials* 33, pp. 257-271, 2009.
- [17] B. Zhuang, A. Cloutier a A. Koubaa, „Physical and mechanical properties of oriented strand board made from eastern canadian softwood species,“ *Forests* 13, 2002.
- [18] J. Luo, J. Luo, Q. Gao a J. Li, „Effects of heat treatment on wet shear strength of plywood bonded with soybean meal-based adhesive,“ *Industrial crops and products* 63, 2015.

- [19] E. D. Wong, M. Zhang, Q. Wang a S. Kawai, „Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard,“ *Wood science and technology* 33, 1999.
- [20] I. Dixit, S. Kennedy, J. Piemontesi, B. Kennedy a C. Krebs, „Which tool is the best: 3D scanning or photogrammetry - it depends on the task,“ *Biomedical visualisation, volume 1*, pp. 107-119, 2019.
- [21] J. Tannús, „Optimizing and automating computerized photogrammetry for 360° 3D reconstruction,“ 2020.
- [22] M. Whiting, S. W. Salley, D. K. James a J. W. Karl, „Rapid bulk density measurement using mobile device photogrammetry,“ *Soil science society of america journal* 84(3), pp. 811-817, 2020.
- [23] E.-D. Wong, M. Zhang, Q. Wang a S. Kawai, „Formation of the Density Profile and Its Effects on the Properties of Particleboard,“ *Wood Science and Technology* 33, 1999.
- [24] K. Y. Li, C. M. Fleischmann a M. J. Spearpoint, „Determining thermal physical properties of pyrolyzing New Zealand medium density fibreboard (MDF),“ *Chemical Engineering Science* 95, pp. 211-220, 2013.
- [25] I. Vermesi, M. Chaos a G. Rein, „Ignition and burning of fibreboard exposed to transient irradiation,“ *Fire Technology* 57, pp. 1095-1113, 2020.
- [26] D. Zeinali, A. Gupta, G. Marakgos, G. Agarwal, T. Beji, M. Chaos, Y. Wang, J. Degroote a B. Merci, „Study of the importance of non-uniform mass density in numerical simulations of fire spread over MDF panels in corner configuration,“ *Combustion and Flame* 200, pp. 303-315, 2019.
- [27] K. Y. Li, X. Cheng a H. Zhang, „A simplified model on vertical density profile and shrinkage ratio of virgin and charred medium density fibreboard,“ *Fire and Materials* 38, pp. 659-672, 2014.
- [28] X. Huang, K. Li a H. Zhang, „Modelling bench-scale fire on engineered wood: effects of transient flame and physicochemical properties,“ *Proceedings of the combustion Institute* 36, pp. 3167-3175, 2017.
- [29] G. W. Höhne, W. F. Hemminger a H. J. Flammershein, *Differential Scanning Calorimetry 2nd ed.*, Springer, 2003.
- [30] T. Harada, T. Hata a S. Ishihara, „Thermal Constants of Wood During the Heating Process Measured with the Laser Flash Method,“ *Journal of Wood Science* 44, 1998.
- [31] A. Rinta-Paavola a S. Hostikka, „A Model for the Pyrolysis of Two Nordic Structural Timbers,“ *Fire and Materials*, 2021.
- [32] F. Dunlap, „The Specific Heat of Wood,“ *USDA, Forest Service Bulletin 110, U.S. Department of Agriculture, Government Printing Office, Washington, D.C.*, 1912.
- [33] B. Volbehr, Kiel, Německo, 1896.
- [34] G. B. Wilkes a C. O. Wood, „The Specific Heat of Thermal Insulating Materials,“ *ASHRAE Trans. vol. 48*, 1942.
- [35] M. A. Rodríguez-Pérez, J. A. Reglero, D. Lehmus, M. Wichmann, J. A. Saja a A. Fernández, „THE TRANSIENT PLANE SOURCE TECHNIQUE (TPS) TO MEASURE THERMAL CONDUCTIVITY AND ITS POTENTIAL AS A TOOL TO DETECT IN-HOMOGENEITIES IN METAL FOAMS,“ v *International Conference "ADVANCED METALLIC MATERIALS"*, 2003.
- [36] B. Adl-Zarrabi a L. Boström, „Determination of Thermal Properties of Wood and Wood Based Products by Using Transient Plane Source,“ v *8th world conference on timber engineering*, 2004.
- [37] A. Ten Wolde, J. D. McNatt a L. Krahn, „Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings,“ *USDA Forest Products Laboratory DOE/USDA-21697/1*, 1988.

- [38] F. P. Kollman a W. A. Cote, Principles of Wood science and Technology, 1968.
- [39] C/VM2 Verification method, „C/VM2 Verification Method: Framework for Fire safety Design For New Zealand Building Code Clauses C1-C6 Protection from Fire,“ Ministry of Business, innovation and employment, 2014.
- [40] S. Mazumder, Numerical methods for partial differential equations: Finite difference and finite volume methods, Academic Press, 2015.
- [41] G. Wang, F. Yang, K. Wu, Y. Ma, C. Peng a T. Liu, „Estimation of the dissipation rate of turbulent kinetic energy: A review,“ *Chemical Engineering Science* 229, 2021.
- [42] B. McCaffrey, „Purely buoyant diffusion flames: Some experimental results,“ NIST - NBSIR 79-1910, 1976.
- [43] X. Chen, S. Lu, C. Li, J. Zhang a K. M. Liew, „Experimental study on ignition and combustion characteristics of typical oils,“ *Fire and Materials* 38, pp. 409-417, 2014.
- [44] P. Sagaut, Large Eddy Simulation for incompressible flows, Springer, 2005.
- [45] E. Garnier, N. Adams a P. Sagaut, Large Eddy Simulation for compressible flows, Springer, 2009.

12 Seznam symbolů

a	Tepelná difuzivita	$m^2 \cdot s$
A	Předexponenciální faktor	$1/s$
c_p	Měrná tepelná kapacita	$J/(kg \cdot K)$
c_p^*	Specifická měrná tepelná kapacita	$J/(kg \cdot K)$
\bar{c}_p	Měrná tepelná kapacita částečně zuhelnatělého materiálu	$J/(kg \cdot K)$
d	Průměr	m
D^*	Charakteristický průměr plamene	m
E_A	Aktivační energie	J/mol
g	Tíhové zrychlení	m/s^2
h_v	Výška válce	m
ΔH	Reakční teplo	kJ/kg
ΔH_c	Výhřevnost	kJ/kg
ΔH_{eff}	Efektivní výhřevnost	kJ/kg
k	Turbulentní kinetická energie	m^2/s^2
L	Tloušťka, Integrovaná velikost	m, m
m, n	Elementární složení sazí	-
\dot{m}	Rychlost úbytku hmotnosti	kg/s
\dot{m}''	Intenzita úbytku hmotnosti	$kg/(m^2 \cdot s)$
M	Molární hmotnost	kg/mol
N	Reakční řád	-
N_{O_2}	Reakční řád oxidace	-
\dot{q}_{HRR}	Rychlost uvolňování tepla	kW
\dot{q}_{HRR}''	Intenzita uvolňování tepla	kW/m^2
\dot{q}_c''	Intenzita konvektivního toku	kW/m^2
\dot{q}_r''	Intenzita radiačního toku	kW/m^2
$\dot{q}_{r,in}''$	Intenzita vstupujícího radiačního toku	kW/m^2
$\dot{q}_{r,out}''$	Intenzita vystupujícího radiačního toku	kW/m^2
\dot{q}_c'''	Reakční složka tepla	kW/m^3
\dot{q}_r'''	Radiační složka tepla	kW/m^3
\dot{q}_s'''	Objemový zdroj tepla	kW/m^3
\dot{Q}	Teplo uvolněné při hoření	kW
r	Rychlost úbytku hmoty, Poloha	$kg/(m^3 \cdot s), m$
r_i	Reakční rychlost i -té reakce	$1/s$
R	Molární plynová konstanta	$8,314 J/(mol \cdot K)$
Re	Reynoldsovo kritérium	-
t	Čas	s
T	Teplota	K
T_w	Teplota stěny	K
v'	Fluktuace rychlosti	m/s
V	Objem	m^3
w	Hmotnostní zlomek	kg/kg
x	Molární zlomek	mol/mol
x, y, z, w	Elementární složení paliva	-
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$
ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3

ε	Střední rychlost disipace turbulence	m^2/s^3
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
ϵ	Emisivita	-
ν	Stechiometrický koeficient, Kinematická viskozita	-, m^2/s
ν_{saze}	Podíl sazí	-
ν_{CO}	Podíl CO	-
v_{τ}	Smyková (třecí) rychlost	m/s
τ_w	Smykové napětí na stěně	$\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$
χ	Účinnost spalování	-
η	Kolmogorovo měřítko	m