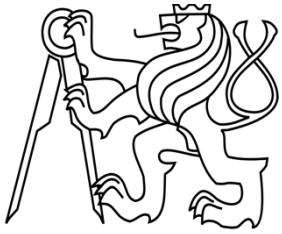
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

HASICÍ ÚČINNOST VODNÍ MLHY

FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY OF WATER MIST

Bc. Tereza Verunáčová

vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Mózer, PhD.

Praha 2021

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Verunáčová Jméno: Tereza Osobní číslo: 458858

Zadávající katedra: K124 - Katedra pozemních staveb

Studijní program: (N3607) Stavební inženýrství

Studijní obor: (3607T047) Q Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Hasicí účinnost vodní mlhy

Název diplomové práce anglicky: Extinguishing efficiency of water mist

Pokyny pro vypracování:
1. Oboznámenie sa z aktuálnym stavom (state of art) problematiky počítačového modelovania hasiaceho efektu vodnej hmly v ČR a zahraničí + vypracovanie literárnej rešerše
2. Identifikácia medzier v súčasnom stave poznania a obmedzení využitia počítačových modelov požiaru při simulácii hasiaceho efektu vodnej hmly
3. Špecifikácia metodiky spracovania praktickej časti práce - výber vhodného modelovacieho software, potrebné zjednodušenia, spôsob získavania a definície vstupných parametrov, definícia scenárov, spôsob validácie a vyhodnotenia výsledkov
4. Realizácia praktickej časti práce, vyhodnotenie výsledkov a formulácia odporúčaní - vytvorenie modelov a realizácia modelácie v zvolenom software - parametrická štúdia, identifikácia a kvantifikácia vplyvu významných vstupných parametrov trysiek, validácia výsledkov voči realizovaným štúdiám a experimentov, prípadne vlastný validačný experiment, špecifikácia nevyhnutných zjednodušení a obmedzení a možností využitia simulácie hasenia vodnou hmlou

Seznam doporučené literatury:
relevantní kapitoly z M. J. Hurley et al., Ed., SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th ed. New York, NY: Springer New York, 2016. ISBN 978-1-4939-2564-3
Bellas, R., Gómez, M.A., González-Gil, A. et al. Assessment of the Fire Dynamics Simulator for Modeling Fire Suppression in Engine Rooms of Ships with Low-Pressure Water Mist. Fire Technol 56, 1315–1352 (2020).
Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening Nucl. Eng. Technol., 51 (2019), pp. 410-423
NFPA 750 Standard on Water Mist Fire Protection Systems 2015 Edition
CSN P CEN TS 14972 Stabiliní hasící zařízení - Mlhová zařízení - Navrhování a instalace

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Mózer, PhD.

Datum zadání diplomové práce: 28.09.2020 Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Tereza Verunáčová

Název diplomové práce: Hasicí účinnost vodní mlhy

Základní část: Požární bezpečnost podíl: 100 %

Formulace úkolů:

1. Oboznámenie sa z aktuálnym stavom (state of art) problematiky počítačového modelovania hasiaceho efektu vodnej hmly v ČR a zahraničí + vypracovanie literárnej rešerše

2. Identifikácia medzier v súčasnom stave poznania a obmedzení využitia počítačových modelov požiaru při simulácii hasiaceho efektu vodnej hmly

3. Špecifikácia metodiky spracovania praktickej časti práce - výber vhodného modelovacieho software, potrebné zjednodušenia, spôsob získavania a definície vstupných parametrov, definícia scenárov, spôsob validácie a vyhodnotenia výsledkov

4. Realizácia praktickej časti práce, vyhodnotenie výsledkov a formulácia odporúčaní - vytvorenie modelov a realizácia modelácie v zvolenom software - parametrická štúdia, identifikácia a kvantifikácia vplyvu významných vstupných parametrov trysiek, validácia výsledkov voči realizovaným štúdiám a experimentov, prípadne vlastný validačný experiment, špecifikácia nevyhnutných zjednodušení a obmedzení a možností využitia simulácie hasenia vodnou hmlou

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

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

2. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

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

3. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

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

4. Část: _____ podíl: _____ %

Konzultant (jméno, katedra): _____

Formulace úkolů: _____

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

Obsah

1 Úvod 1
1.1 Motivace ke zpracování práce 1
1.2 Cíl práce 2
1.3 Obsahová struktura práce 2
2 Přehled současného stavu problematiky 3
2.1 Průběh požáru 3
2.2 Stabilní hasicí zařízení 6
2.3 Mlhové SHZ 8
2.3.1 Návrh 9
2.3.2 Faktory vodní mlhy ovlivňující hašení 9
2.3.3 Mechanismy hašení 11
2.3.4 Použití 13
2.4 Možnost aplikace matematického modelování 14
2.4.1 Zónové modely 15
2.4.2 CFD modely 16
2.5 Modelování hašení pomocí vodní mlhy v programu FDS 18
2.5.1 Základní informace o FDS 18
2.5.2 Výpočetní síť 25
2.5.3 Modelace hoření 27
2.5.4 Modelace vodního spreje 30
2.5.5 Modelace hašení 34
2.5.6 Přehled tuzemského a zahraničního výzkumu 35
3 Experimentální část 37
3.1 Experimentální posouzení účinnosti vodní mlhy 37
3.1.1 Příprava experimentů 37
3.1.2 Popis použitých měřidel a trysky vodní mlhy 40
3.1.3 Průběh experimentu a jeho výsledky 41
3.2 Matematické modely jednotlivých částí experimentu 49
3.2.1 Volba zjednodušujících parametrů modelu na volném hoření etanolu 49
3.2.2 Volné hoření etanolu 56
3.2.3 Hašení etanolu vodní mlhou s proměnnou výškou 58
3.2.4 Hašení n-heptanu vodní mlhou s proměnnou výškou 59
3.3 Výsledky a diskuse 60
4 Závěr 67
Literatura 68
Seznam obrázků 71
Seznam tabulek 73
Přílohy 74

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci s názvem Hasicí účinnost vodní mlhy zpracovala samostatně a za použití uvedené literatury a pramenů pod vedením doc. Ing. Vladimíra Mózera, PhD. Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

…….

V Praze dne 1. 1. 2021 Bc. Tereza Verunáčová

Poděkování

Děkuji tímto vedoucímu mé práce, panu doc. Ing. Vladimíru Mózerovi, PhD. za jeho odborné vedení a mnohé užitečné rady při zpracování diplomové práce. Dále také mé rodině a nejbližším za podporu, motivaci a za umožnění kvalitních podmínek pro mé studium.

Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je zhodnocení vlivu vodní mlhy na míru ochlazení prostoru zasaženého požárem a na schopnost vodní mlhy omezit šíření požáru, či jej uhasit. Práce je rozdělena na několik částí – část literární, jež shrnuje současné poznání o dynamice požáru, o mlhových SHZ a o možnosti modelovat sdílení tepla mezi požárem a vodní mlhou v modelovaném prostoru. V druhé, experimentální části, bylo využitím poznatků z části první sestaveno několik modelů, v nichž se sledovala míra shody průběhu teplot mezi uskutečněnými experimenty a matematickými modely. Matematické modely byly také využity pro podpoření či vyvrácení autorových předpokladů o vlivu jednotlivých příkazů na výsledná data. V experimentální části bylo pro modelaci přestupu tepla využito modelů CFD, konkrétně programu FDS.

Klíčová slova

Hasicí účinnost vodní mlhy; vodní mlha; požární bezpečnost; aktivní požární bezpečnost; požární ochrana; SHZ; stabilní hasicí zařízení; mlhové SHZ; mlhové stabilní hasicí zařízení; CFD; FDS; ČSN P CEN/TS 14975

Abstract

The purpose of this diploma thesis is to evaluate the influence of the water mist nozzle on the cooling factor in the area under the fire conditions and on the ability to reduce the spread of the fire or its extinguishing efficiency. This work is divided into several main chapters, where the first chapter lists the background theory of current knowledge about the fire dynamics, water mist systems and mathematical model of the heat transfer between fire and water mist in the model. In the second experimental chapter, several models were compiled using the knowledge from the first part. In this chapter, the amount of accordance of temperatures between the performed experiments and mathematical models was monitored. Mathematical models were also used to support or refute the author's assumptions about the influence of individual parameters on the resulting data. CFD models, specifically the FDS program, was used in the experimental part.

Keywords

Fire extinguishing efficiency of water mist; water mist; fire safety; active fire safety; fire protection; active fire protection; water mist systems; fire sprinkler system; CFD; FDS; NFPA 750

Seznam použitých zkratek

SHZ	Stabilní hasicí zařízení
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
EPS	Elektrická požární signalizace
PBZ	Požárně bezpečnostní zařízení
DHZ	Doplňkové hasicí zařízení
PHZ	Polostabilní hasicí zařízení
ZOKT	Zařízení pro odvod kouře a tepla
PDR	Parciální diferenciální rovnice
LAR	Lineární algebraická rovnice
DNS	Přímá numerická simulace (*direct numerical simulation*)
HRR	Rychlost uvolněného tepla (*heat release rate*)
UCEEB	Univerzitní centrum energeticky efektivních budov
TC	Termočlánek (*thermo couple*)

1 Úvod

1.1 Motivace ke zpracování práce

Stabilní hasicí zařízení (dále jen SHZ) je jedním z prvků aktivní požární ochrany, který významným způsobem zvyšuje úroveň požární bezpečnosti objektů, v nichž je instalován. Může díky své instalaci zajistit mj. i to, že mnohé požadavky pasivní požární ochrany nejsou tak přísné a pomyslné limity ve vnitřním členění objektu se tím posouvají. Tato práce se zabývá především mlhovým SHZ, které prošlo od začátku 20. století velkým vývojem. V posledních letech se těší velkému zájmu nejen proto, že je schopno efektivněji odebírat teplo z prostoru, ale také proto, že současně využívá menšího množství vody dopravené do prostoru v porovnání s často užívanými sprinklerovými soustavami. Případné škody způsobené nadměrným množstvím vody jsou tak značně eliminovány. Úspora hasicího média s sebou přináší nejen možnost využití rozvodného potrubí o menších rozměrech, ale také nižší prostorové nároky na strojovnu a nádrže v ní umístěné.

Pro většinu použití je obvykle preferována vysokotlaká vodní mlha, která je velmi efektivní v odebírání tepla z prostoru, v posledních letech se však těší poměrně velkému zájmu také nízkotlaká a středotlaká vodní mlha. Popularita nízkotlakého řešení stoupá především proto, že nároky na těsnost systému, či na materiál použitý pro rozvodné potrubí jsou nižší než u vysokotlaké mlhy, s čímž se snižuje cena nejen pro instalaci, ale také pro následnou údržbu.

Narůstající počet aplikací tohoto systému aktivní požární ochrany do objektů vybízí k využití matematických modelů jako podpory návrhu, či k částečnému nahrazení požární zkoušky. Motivací práce je zhodnocení modelace přestupu tepla mezi vodní mlhou a požárem využitím programu FDS se zaměřením na nalezení způsobu reprezentace, který co nejpřesněji reflektuje skutečnost. Důvodem využití programu FDS je jeho dostupnost a poměrně nízká míra zjednodušujících podmínek v porovnání s ostatními programy.

Součástí každého matematického modelování by měly být nejen údaje o míře zjednodušení dat, ale také o limitech ať už programu samotného, či výpočetní techniky. Nalezení ideálního poměru mezi přesností výsledků a výpočetním časem za současné co největší shody modelu s experimentem je v práci provedeno parametrickou analýzou na základě změn různých vstupních parametrů. Jedná se nejen o vlastnosti použité mlhové trysky, ale také o samotnou geometrii prostoru, hrubost mřížky a další vlastnosti programu, které jsou pro správnou reprodukci získaných dat stěžejní.

1.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je zhodnocení možnosti počítačové modelace vodní mlhy jako nástroje pro posouzení jejího hasícího účinku. Pro dosažení tohoto cíle byly stanoveny tyto dílčí body

1) rešerše současného stavu poznání v oblasti dynamiky požáru, mlhového SHZ;
2) popis některých možných přístupů k modelování požáru spolu s popisem fungování zvoleného programu FDS a hlavních příkazů v něm aplikovaných;
3) vytvoření různých matematických modelů pro demonstraci hasicích schopností vodní mlhy v závislosti na změně vzdálenosti trysky od paliva;
4) zhodnocení výstupů z matematických modelů s porovnáním míry shody s experimentálními daty v oblasti hasicí účinnosti vodní mlhy.

1.3 Obsahová struktura práce

V teoretické části byl věnován prostor především třem hlavním tématům. Prvním je analýza procesu hoření a jeho přerušení. Druhá podkapitola se následně zaměřuje na popis SHZ s rozdělením a detailnějším popisem vodních SHZ. Vzhledem k zaměření práce je nadále věnována pozornost mlhovému SHZ s popisem principu hašení se svými výhodami a nevýhodami a vlivu různých charakteristik vodní mlhy na odebírání tepla při požáru. Posledním tématem literární části je současný stav poznání v oblastí matematického modelování a zhodnocení možnosti jeho využití, a to konkrétně v programu implementujícím tzv. principy dynamického proudění tekutin (CFD), pro zefektivnění návrhového procesu. V této části bylo také definováno, s jakými vstupními podmínkami a omezeními program FDS 6.7.4, jenž byl v experimentální části použit, pracuje.

Navazuje experimentální část, v níž jsou implementovány poznatky obsáhlé v literární části této práce. Nejprve byly popsány experimenty realizované v univerzitním centru UCEEB, ČVUT v Praze s využitím trysky CSFH 11. Při těchto experimentech byl mj. sledován hasicí účinek této trysky a vliv změn různých parametrů nastavení experimentu. Následně byly téže experimenty vymodelovány a výstupní data z nich byla použita k prokázání míry shody mezi modelem a výsledkem experimentu. Posouzení míry shody a případně zdůvodnění neshody je, spolu se shrnutím vlivu jednotlivých parametrů vodní mlhy, popsáno v závěrové části této diplomové práce.

2 Přehled současného stavu problematiky

Pro modelaci přestupu tepla v systému je nutné nejprve přiblížit samotný proces hoření s jeho jednotlivými fázemi. Na toto téma je zaměřena první část této práce. Následně je obecně charakterizováno SHZ s detailnějším popisem těch zařízení, která používají jako hasicí médium vodu. Následující podkapitola teoretické části práce se zabývá vlastnostmi vodní mlhy, návrhem systému mlhového SHZ, principem fungování mechanismů hašení, vhodností použití mlhového SHZ do různých prostor a popisuje interakci tepla s mlhovým SHZ v okolí požáru. Popisuje také jednotlivé odlišnosti v systémech nízko-, středo- a vysokotlaké mlhy.

Pro možnost studia interakce vodní mlhy s požárem lze využít několika modelů. Tato práce se tedy zaměřuje na výhody a nevýhody fyzikálních a zónových modelů pro danou problematiku se zdůvodněním, proč je pro experimentální část použito softwarového nástroje využívajícího principů CFD (Computational Fluid Dynamics), které program FDS uplatňuje. Detailnímu popisu fungování jednotlivých příkazů programu FDS s jejich oblastmi použití je věnována přibližně druhá polovina této kapitoly.

2.1 Průběh požáru

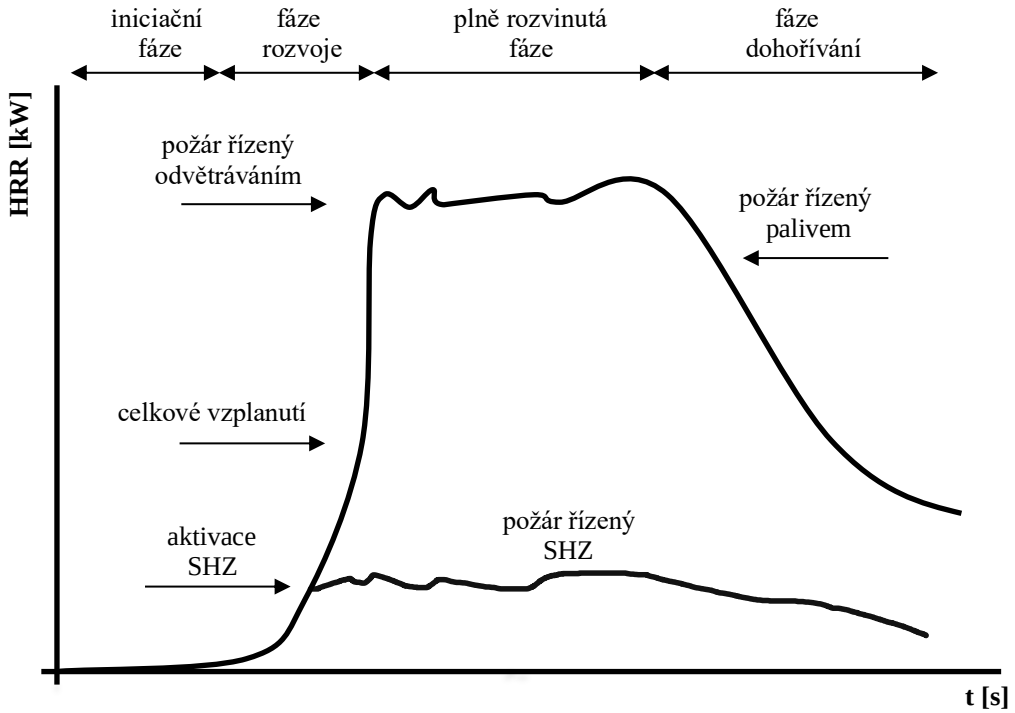
Hoření je fyzikální jev, jehož hlavními produkty jsou světlo, teplo a spaliny, vznikající v důsledku exotermní řetězové reakce spolupůsobením tří hlavních faktorů. Prvním faktorem je palivo, což může být látka kapalného, pevného či plynného skupenství. Dalším faktorem je přítomnost oxidačního činidla. Funkci oxidačního činidla nejčastěji zastává kyslík, který se nachází v prostoru v dostatečné koncentraci, jež se liší v závislosti na tlaku a konkrétní látce. Třetím faktorem je iniciační zdroj, jímž může být plamen, jiskra či zdroje vzniklé přeměnou jiné energie na tepelnou. Tato synergie, známá jako tzv. trojúhelník hoření, je znázorněna na obr. 1. Hoření může být dokonalé, kde vznikají pouze produkty neschopné dalšího hoření či nedokonalé, vytvářející zplodiny schopné dalšího hoření, často toxické či výbušné.

Obrázek 1: Trojúhelník hoření

Při hoření dochází k šíření tepla, což může nastat kondukcí (vedením), radiací (sáláním) nebo konvekcí (prouděním), nejčastěji však jejich kombinací v různých poměrech. Je-li sledován odběr tepla vodní mlhou v tepelně izolovaném prostoru, má především význam sledovat šíření tepla konvekcí a radiací. Ke sdílení tepla kondukcí dochází naopak při střetu vodních kapek s pevnými materiály, což hraje roli především při samotném procesu hašení. [1]

Při šíření tepla prouděním může docházet k proudění laminárnímu nebo turbulentnímu. Proudění je způsobeno vztlakovou silou, která v okolí požáru působí mimo jiné i na kapky vodní mlhy. Tato síla je způsobena rozdílnou hustotou plynů v okolí požáru. To, zda je proudění turbulentní nebo laminární, je dáno především rozdílem hustot jednotlivých vzduchových částic, což je podmíněno jejich teplotou a dále charakterem pohybu vstřikovaných vodních částic.[2] V této práci je uvažováno proudění turbulentní, jelikož k laminárnímu proudění dochází pouze v minimálním počtu případů (velmi malý oheň).[1]

V terminologii požární bezpečnosti staveb se v mnohých případech hovoří spíše o požáru tak, jak je definován ve Vyhlášce Ministerstva vnitra č. 246/2001 Sb. o požární prevenci, tedy jako o každém nežádoucím hoření, při kterém došlo k usmrcení nebo zranění osob nebo zvířat, ke škodám na materiálních hodnotách nebo životním prostředí a nežádoucím hoření, při kterém byly osoby, zvířata, materiální hodnoty nebo životní prostředí bezprostředně ohroženy. Obecně lze průběh požáru v uzavřeném prostoru rozdělit na čtyři základní fáze, jež jsou znázorněny na obr. 2.



Obrázek 2: Fáze požáru v uzavřeném prostoru (upraveno z [3])

Poznámka: Graf demonstruje orientační znázornění průběhu požáru, ve skutečnosti může být jeho průběh různý

V 1. fázi (počáteční, iniciační) se postupně akumuluje energie postačující pro uvolnění dostatku produktů pyrolýzy k tomu, aby bylo možné další žhnutí či hoření. Tato fáze se pohybuje v řádu jednotek minut.

Ve 2. fázi (rozvoje) dochází k prudšímu šíření požáru, než tomu bylo v první fázi. V prostoru dochází k současnému zvyšování teploty a snižování hustoty produktů hoření, díky čemuž stoupají horké zplodiny pod strop a je vytlačován chladnější vzduch. Tento jev nastává v těsné blízkosti nad zdrojem požáru a je označován jako tzv. fire plume. Stoupající zplodiny se rozpínají postupně po celé ploše stropu, což je dáno jejich menší hustotou oproti okolním plynům. Jakmile však dosáhnou ohraničujících konstrukcí, začnou tvořit vyšší vrstvu postupně rostoucí směrem k podlaze. Při dosažení teploty kouřové vrstvy 500–600 °C, sálavého tepelného toku v úrovní podlahy 20 $kW.m^{-2}$, či hodnoty rychlosti uvolňovaného tepla (HRR) přes 1 MW, dochází obvykle k celkovému vzplanutí v prostoru, tzv. flashover efektu. [4] V této fázi je již velmi obtížné zabránit ztrátám na životech přítomných osob. [3] Zároveň je obzvlášť významná role SHZ, které slouží mj. k tomu, aby k flashoveru nedošlo.

3. fáze (plně rozvinutá) je obvykle řízena buď palivem, ventilací, či v některých případech také SHZ. Je-li požár řízený palivem, přísun kyslíku je dostatečný a HRR narůstá s časem, dokud není spotřebováno veškeré palivo. Při požáru řízeném ventilací může dojít k dosažení bodu, při kterém je hodnota HRR v čase téměř konstantní. Na obr. 2 je možné pozorovat, kdy dochází k aktivaci SHZ. Je také možné sledovat jednu z hlavních funkcí SHZ při správném návrhu, při níž požár obvykle pomocí SHZ nebývá zcela uhašen, dochází však k uvedení pod kontrolu a zabránění dalšímu šíření. K tomu dochází ochlazováním samotného paliva na teplotu nižší, než při které se palivo vznítí, ochlazováním okolí, ale také dalšími mechanismy, které jsou pro mlhové SHZ popsány dále v kapitole 2.3.3.

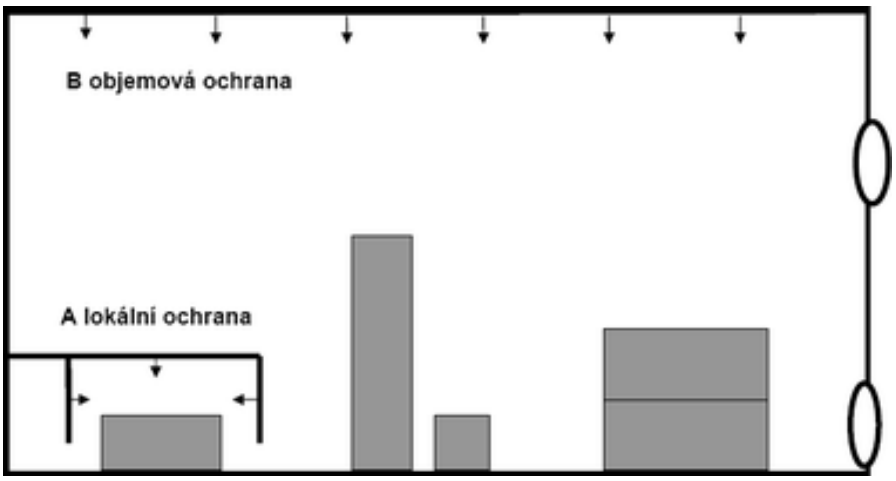
Ve 4. fázi (dohořívání) je obvykle požár řízený palivem a postupně dochází ke snížení intenzity požáru až do kompletního vyhoření veškerého dostupného paliva. K této fázi dochází po odhoření zhruba 70–80% paliva z prostoru. Dohořívání se v grafu obvykle pro zjednodušení uvažuje jako lineární závislost uvolňování tepla v čase, což bylo potvrzeno i výstupními daty z provedeného experimentu viz kap. 3.1.

Pro požár v uzavřeném prostoru je charakteristický především omezený přísun kyslíku do prostoru a hromadící se horké plyny a zplodiny, čímž se výrazně liší od venkovního požáru, kde je přísun kyslíku neomezený a hořící plyny se místo hromadění rozplynou do okolí. Uzavřenost prostoru hraje pro návrh systému významnou roli, je proto velice důležité dbát na součinnost při návrhu dalších PBZ.

2.2 Stabilní hasicí zařízení

V případě plně rozvinutého požáru je obvykle pro uhašení potřebná jednotka HZS. Použitím PBZ je však možné požár včas detekovat, omezit jeho šíření, či ho zcela uhasit a díky tomu zabránit rozvoji požáru a případným škodám na životech či majetku. Veškeré druhy PBZ jsou definovány Vyhláškou 246/2001 Sb. [5], patří mezi ně např. EPS, SHZ, PHZ, DHZ, ZOKT, zařízení pro únik osob při požáru a zařízení pro zásobování požární vodou.

Následující část se věnuje především zařízením pro potlačení požáru, tedy SHZ (PHZ či DHZ). SHZ jsou prostředky zvyšující požární ochranu a jsou používány v místech, kde je zásah v počátcích požáru důležitý, ne-li nezbytný a patří do kategorie aktivní požární ochrany. SHZ se liší v závislosti na typu prostoru, potenciálním palivu pro požár a na vybavení objektu. Dle různých parametrů se tedy SHZ liší nejen v použité výstřikové koncovce, ale také v tom, jak je SHZ do prostoru instalováno. V závislosti na rozmístění se tedy může jednat o hašení objemové, či lokální, jak je znázorněno na obr. 3. Lokální ochrana se používá především při ochraně konkrétních technologických zařízení, na rozdíl od objemového hašení, kde se chrání celý prostor.



Obrázek 3: Znázornění objemové a lokální ochrany SHZ (převzato z [6])

Dle samotného významu zkratky SHZ je patrné, že se jedná o pevně zajištěný systém uvnitř objektu. Publikace [7] na základě tohoto doslovného výkladu řadí do kategorie SHZ také hadicové systémy. Existují však zařízení, která fungují principiálně stejně jako SHZ, liší se však způsobem dodání hasicího média do systému. Mezi tato zařízení patří např. PHZ a DHZ, které jsou definovány normou ČSN 73 0810. PHZ je bez zásobníku hasiva a potrubní rozvody jsou stejně tak, jako koncové hlavice otevřené. V případě požáru v prostoru vybaveným PHZ, probíhá zásobování hasicím médiem ze zařízeních typu CAS Hasičského Záchranného Sboru. DHZ funguje na podobném principu, je však před příjezdem jednotek HZS zásobováno z veřejného vodovodu a/nebo z nádrže. V případě zásobování z veřejného vodovodu nemůže být ovšem ve většině případů provozovatelem garantován průtok, a proto nesnižují požární riziko v takové míře, jako standardní SHZ.

SHZ lze podle hasební látky dělit na vodní, pěnová, plynová, prášková a kombinovaná. Veškerá SHZ rozdělená podle hasební látky lze ještě dále dělit, tato práce se zaměřuje na vodu jako hasební médium a další rozdělení ostatních SHZ proto nejsou popsána. Vodní SHZ se dělí na zařízení:

a) sprinklerová
b) sprejová (drenčerová, záplavová)
c) mlhová

Níže jsou popsány vlastnosti jednotlivých druhů vodních SHZ. S ohledem na zaměření práce je mlhovým SHZ věnována samostatná podkapitola 2.3 literární části a následně prochází celou touto prací.

Sprinklerová SHZ lze považovat za nejrozšířenější a veřejnosti nejznámější formu SHZ, které představují způsob aktivní požární ochrany osob i majetku s širokou škálou možností aplikace. Velikost kapek je pohybuje v rozmezí 1–3 mm a hlavní hasicí funkcí je díky vysoké kinetické energii kapek především ochlazení paliva. Sprinklerová SHZ jsou primárně navržena pro lokální hašení, a sice tak, že dochází k otevření hubice a uvedení do provozu až po zahřátí náplně pojistky na její otevírací teplotu. Jejich spuštění je tedy automatické, vypnutí se následně provádí ručně. Sprinklerové soustavy mohou být zavodněné či nezavodněné. Zavodněné mohou být instalovány pouze v místech, kde nehrozí zamrznutí vody (s výjimkou užití nemrznoucí kapaliny, vyhřívání či zateplení), výhodou však je, že mají oproti nezavodněné soustavě často výrazně kratší reakční čas. Navrhování sprinklerových SHZ je popsáno v normovém postupu dle ČSN EN 12845 [8].

Hlavním rozdílem mezi sprejovými a sprinklerovými SHZ je to, že v případě sprejových (nebo také záplavových či drenčerových) zařízení dochází k uvedení do činnosti všech hubic současně, ne pouze těch, kde dojde k porušení pojistky, jelikož veškeré výstřikové armatury jsou otevřené. Ke spuštění sprejových SHZ dochází ručně či samočinně využitím EPS. Sprejová SHZ mohou pro hašení využívat kromě vody také kombinaci pěny a vody, tedy tzv. pěno-vodní sprejová zařízení, což může na požár působit také efektem izolačním. Typickým využitím sprejových SHZ je např. ochrana různých technologických zařízení, mezi něž patří kabelové kanály, transformátory, pásové dopravníky a spalovny odpadů. Dále se používá pro skrápění kulových zásobníků na zkapalněný plyn, pro zvýšení požární odolnosti zkrápěním ohraničujícím konstrukcí, či jako clony k omezení šíření tepelného toku aj. [7]

2.3 Mlhové SHZ

Vodní mlha je definována velikostí kapek, jejichž průměr $D_{v0,90}$ ve vzdálenosti 1 m pod tryskou je při běžném provozním tlaku menší než 1 mm. [9] To znamená, že 90 % kapek musí mít průměr menší než 1 mm. Pro schválený návrh mlhových SHZ je potřeba znát specifikace druhu nebezpečí, rozmístění trysek, typu a orientace trysek, tlaku a proudu procházejícího tryskou, objemu a geometrie prostoru, rychlosti proudění vzduchu a specifikace podmínek pro větrání. Způsoby rozdělení vodní mlhy dle různých parametrů jsou znázorněny v tab. 1 a tab. 2.

Tabulka 1: Rozdělení mlhových SHZ dle konstrukčního řešení

Rozdělení do skupin dle konstrukčního řešení, dále podle:			
tlaku	**způsobu spuštění**	**zaplavovací soustavy**	**počtu hasiv**
nízkotlaká (do 12,5 bar)	elektrická (př. EPS)	mokrá	Jednofázová (pouze voda)
středotlaká (12,5–35 bar)	pneumatická	suchá	dvoufázová (voda a atomizační plyn)
vysokotlaká (35– max 150 bar)	hydraulická	předstihová	

Tabulka 2: Rozdělení mlhových SHZ dle systémového řešení

Rozdělení do skupin dle systémového řešení, dále podle:		
účelu	**způsobu hašení**	**chráněných úseků**
uhašení požáru	lokální (konkrétní prostor či zařízení)	jednozónová
zamezení šíření sálavého tepla	objemový (distribuce v celém prostoru)	vícezónová
zvýšení odolnosti stavební konstrukce		
potlačení a uvedení požáru pod kontrolu		

Je možné tvrdit, že mlhové SHZ kombinuje výhody vodního a plynového SHZ. Voda používaná v tomto systému je netoxická, snadno dostupná, má relativně nízkou cenu a vysokou ochlazovací schopnost díky vysokému výparnému teplu. Navíc pro většinu provozů nemá destrukční následky, což je obecným kladem všech vodních SHZ. Tam, kde lze případné destrukční následky vody očekávat, je výhodou, že při užití mlhového SHZ je dodáváno do prostoru podstatně menší množství tohoto média a většina se při odebírání tepla z prostoru odpaří. Tím je reprezentována také funkce plynového SHZ, jelikož vodní pára, která se postupně vytváří, vytlačí kyslík, čímž se naruší pomyslný trojúhelník hoření. Zároveň je zde eliminováno ohrožení osob, jelikož v počátcích spuštění systému, kdy je vodní pára v malé koncentraci, nepředstavuje pro člověka ohrožení na životě. Nejen z těchto důvodů je tedy vhodným zařízením pro velkou škálu provozů.

Pozitivní vlastností mlhových SHZ také je, že rozvodné potrubí a zásobní nádrž na hasivo ve strojovně má u mlhových SHZ menší rozměry, než v případě sprinklerových SHZ. To je způsobeno tím, že potřebné minimální průtoky v soustavách mlhových SHZ jsou výrazně menší. Z důvodu vysokých tlaků, které v soustavě především vysokotlakých mlhových SHZ mohou vznikat, je však kladen důraz na těsnost spojů. Díky menším rozměrům kapek mlhových SHZ je možné se stejným objemem vody docílit výrazně vyššího hasicího účinku.

2.3.1 Návrh

Druh a velikost požárního nebezpečí jsou v případě sprinklerových SHZ klíčovými faktory umožňující návrh soustavy. U mlhových SHZ je tomu nejinak, je však nutné pro tento návrh ještě uskutečnit požární zkoušku. Postupy zkoušení zařízení, hasicí schopnosti, či jednotlivých komponentů mlhových SHZ, jsou popsány v předběžné České technické normě ČSN P CEN/TS 14972.[10] Ta rovněž udává minimální požadavky pro návrh mlhových SHZ a doporučuje, jak je navrhovat, instalovat a zkoušet, neposkytuje však univerzální návod.

Obecný postup pro navrhování vodní mlhy je takový, že se nejprve stanoví druh požárního nebezpečí, který se v daném objektu vyskytuje, na základě čehož se stanoví minimální požadavek na intenzitu dodávky vody. Návrh probíhá obdobně jako pro sprinklerové SHZ (dle ČSN EN 12845). Následně je určena velikost účinné plochy, což je maximální ochlazovaná plocha při činnosti všech hlavic a doba, po kterou musí být zajištěna nepřerušená dodávka vody do systému. Veškeré parametry konkrétní aplikace je však nutné před použitím experimentálně ověřit.

2.3.2 Faktory vodní mlhy ovlivňující hašení

Faktory ovlivňujících hasicí schopnost vodní mlhy lze rozdělit na vlivy externí a parametry trysky, která přímo ovlivňuje tvar vodního kužele. Mezi externí vlivy patří především výška prostoru, jeho členitost a vybavení a z něho odvozené množství uvolňovaného tepla. Dále také rychlost proudění spalin a okolního vzduchu v případě požáru. Důležité parametry trysky jsou mj. vzájemná vzdálenost mezi instalovanými zařízeními, průtok na jednotku plochy požáru, distribuce kapek uvnitř a kolem požáru, směr aplikace trysky, rychlost proudícího vzduchu a rychlost kapek vzhledem k okolnímu vzduchu, rychlosti plamenů a druhu paliva.[11]

Ze všech těchto zmíněných charakteristik se tato práce zaměřuje na tři nejdůležitější, což jsou velikost kapek a jejich rozdělení, hybnost kapek a průtok vody.[12] Veškeré zmíněné faktory však nelze uvažovat jako odizolované děje s přímo úměrnou změnou hasicí účinnosti vodní mlhy. Významným způsobem spolu totiž souvisí a vzájemně se ovlivňují, což je nutné brát při návrhu v úvahu. Tyto parametry jsou primárně funkcí trysky resp. tvaru a velikosti otvorů a tlaku resp. průtoku vody v systému.

Velikost kapek a jejich rozdělení

V případě kapek obecně platí, že čím jsou jednotlivé kapky menší, tím je jejich celková plocha větší a díky tomu má větší schopnost odebrání tepla. Nelze však plošně tvrdit, že nejmenší kapky budou fungovat nejlépe. Se snížením velikosti kapky se snižuje také její hmotnost a tím také její hybnost. Může nastat situace, kdy vztlaková síla působící na kapku v proudu zahřátých plynů je větší než tíha kapky. V takovém případě nepůsobí kapka přímo v ohnisku, kde by mohla palivo ochladit, ale je unášena mimo ohnisko. Namísto hašení požáru však velice efektivně absorbuje teplo z horkých plynů v okolí. Větší kapky mohou sice snáz proniknout přímo k palivu a tím ho ochladit, nemají však v součtu tak velkou plochu pro možnost odebrání tepla z prostoru a nejsou proto tolik efektivní v odebírání tepla, ale spíše v chlazení. Oba jevy jsou při hašení žádoucí, nelze pevně určit ideální poměr rozdělení velikostí kapek, který bude vyhovující pro všechny druhy požárů. Vždy totiž návrh závisí také mj. na návrhu ventilace a charakteru paliva. Je však efektivnější volit trysku s různými průměry kapek, nikoliv stejnými, jelikož tím může vodní mlha uplatnit při hašení více mechanismů a být tak skutečně efektivní.[12]

Průtok vody

Se zvyšujícím se průtokem vody je množství dopravené vody do prostředí větší a s ním také teplo odebrané prostředí. Je však možné, že při vysokém průtoku se sice okolí ochladí, bude to však tak rychlý proces, že nebude docházet k tvorbě vodní páry v takovém množství, jako při použití menšího množství vody a dusivý účinek způsobený nedostatkem O_2 se neprojeví tak výrazně.[2]

Jelikož se voda ve své kapalné fázi nechová jako plynná látka, je obtížné zde hovořit o kritické koncentraci (minimální množství vody na jednotku objemu či plochy) vodních kapek dostačujících pro uhašení požáru. Množství kapek dopadajících na místo požáru je navíc ovlivněno několika faktory, mezi něž patří, kromě již zmíněných, také úhel výstřiku, rozsah požáru, případně to, kde se požár nachází a jak obtížný přístup k němu pro kapky vodní mlhy je.

Hybnost kapek

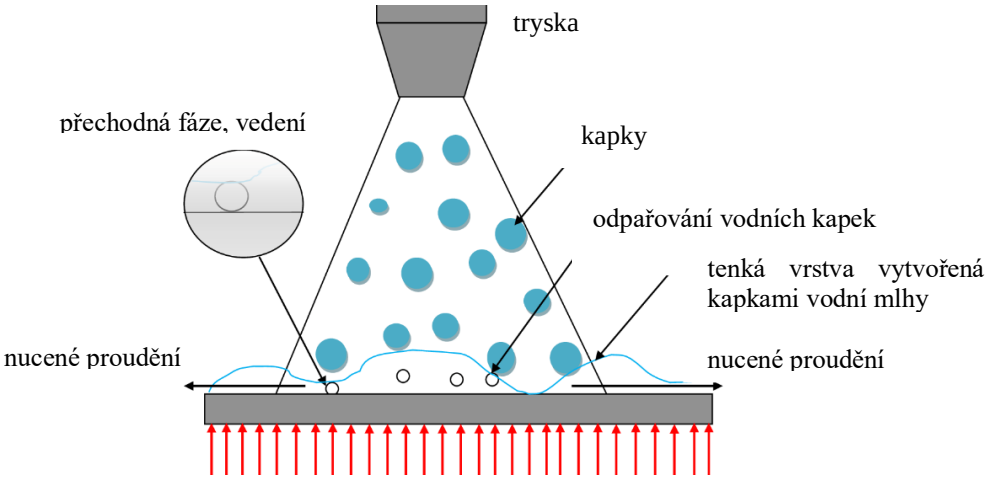
Hybnost je dána hmotností (resp. velikostí) kapek a jejich rychlostí (ta je ovlivněna mj. úhlem výstřiku). Hybnost zčásti udává nejen zda kapky projdou skrz plameny až na hořící palivo, ale také to, jakým způsobem proniká okolní vzduch do vodního kužele a dále s ním reaguje. Zde je nutné počítat s turbulentním prouděním způsobeným mísením horkého vzduchu, kapek vodní mlhy a vodní páry, která vzniká vypařováním vodních kapek. Hybnost musí být tedy dostatečně veliká na to, aby umožnila dopad kapek na palivo ještě před jejich samotným vypařením. Bude-li však příliš veliká a úhel, pod nimž budou kapky vystřikovány, nebude vhodně zvolený, může dojít k nasávání vzduchu a tím k podpoření hoření.

2.3.3 Mechanismy hašení

Mlhové SHZ uplatňují v případě hašení požáru několika mechanismů, které jsou založeny na výhodách menších rozměrů kapek. Patří mezi ně mechanismy chladicí, dusivý, mechanismus stínění radiačního tepla, kinetický a nařeďovací.

Chlazení

Chlazením se nazývá efekt, který je projevem interakce vodních kapek s plameny, palivem či okolními předměty. Jak bylo již popsáno, pro velikost kapek vodní mlhy a schopnost absorbovat teplo platí, že čím jsou kapky menší, tím je plocha větší a spolu s ní se zvyšuje i přestup tepla přispívající k ochlazovacímu efektu. Kromě ochlazování plynů je potřeba samotného ochlazení hořícího povrchu, aby bylo zabráněno procesu pyrolýzy viz obr. 4. Aby došlo k dopadu kapek na hořící povrch, je potřeba větších průměrů kapek, které se liší v závislosti na hustotě kouře a dynamice plynů uvnitř prostředí. K uhašení požáru musí klesnout teplota pod hodnotu, která je pro možnost hoření vzduchu a hořlavých par limitní. [12]



Obrázek 4: Schématická ilustrace ochlazovacího efektu (upraveno z[13])

V některých případech může být požár v počáteční fázi pouze hloubkový a může být doprovázen žhnutím. Při žhnutí nedochází k uvolňování hořlavých plynů a par. Tento jev může být komplikací především v materiálu s větší hloubkou či obtížnou dostupností, kam kapky vodní mlhy nedokáží proniknout. V takovém případě je velmi obtížné požár uhasit a vhodnějším hasivem je plynové SHZ [6] či sprinklerové, které díky velkému množství vody dopravené do prostoru umožňuje proniknutí vody na obtížně dostupné palivo.

Vytěsnění kyslíku

Nedostatek kyslíku v prostoru zasaženém požárem způsobuje dusivý účinek, který nastává především díky dvěma faktorům. Prvním faktorem je kyslík, který se spotřebovává procesem hoření a druhým je vytlačení kyslíku z prostoru vodní párou, přičemž platí, že z 1 l vody vznikne zhruba 1700 l vodní páry. To lze prokázat vyjádřením (2) z rovnice ideálního plynu (1).

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \tag{1}$$

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p} = \frac{55{,}6 \cdot 8{,}314 \cdot 373}{101\,325} \doteq 1{,}7\ m^3 \tag{2}$$

Dusivý mechanismus je však velice citlivý na otevřenost a ventilaci prostoru. V absolutně uzavřeném prostoru, kde je požár řízený ventilací, by byl dusivý účinek velmi intenzivní. V praxi je však proudění vzduchu v různé míře standardním jevem a je s ním tedy nadále potřeba při návrhu uvažovat. Zdánlivě uzavřený prostor může být naopak komplikovaný v souvislosti s náhlými změnami tlaku uvnitř prostoru. Při uvedení systému hašení vodní mlhou do provozu a pronikání kapek systému skrze vrstvy horkých par dochází k prudkému ochlazení. Ochlazením se změní objem vrstvy plynů, což vyvolá tlakové změny. Způsobený podtlak může vyústit až v porušení otvorových výplní. [6]

Hašení vodní mlhou působením dusivého mechanismu může být méně účinné v porovnání s jinými mechanismy v případě otevřených prostorů. Množství kyslíku, které musí být odvedeno z prostoru, je obvykle výrazně větší než množství kyslíku, které je v prostoru odebráno pomocí odpařování vody a spotřebě při hoření. Možným lepším řešením pro otevřené prostory se poté jeví buď využití lokální ochrany, či zvýšení prvků výstřikových armatur. Podobné může platit také v případě požáru, který je v porovnání s objemem, v němž se nachází, velmi malý a jedná se o požár řízený palivem. Požadovaného hasicího účinku je však docíleno správným návrhem. V případě, že by hrozila nedostatečná hasicí účinnost, bylo by nutné zvážit volbu jiného systému s vhodnější aplikací do daného prostoru.

Stínění radiačního tepla

Radiační záření je emise energie ve formě elektromagnetického vlnění. Vodní kapky jsou schopny část záření pohltit, část odrazit a část opětovné vyzářit využitím fyzikálního principu absorpce a rozptylu záření. V případě stínění radiačního tepla platí, že čím menší průměry a větší hustota kapek vodní mlhy, tím je šíření menší.[14] Přítomností velkého množství velmi malých kapek dochází k postupnému zmírnění záření, které dopadá na okolní prostředí a je tím možné omezit šíření požáru do okolí a zpomalit proces pyrolýzy. [15] [16] Maximální míry utlumení radiačního záření bylo dosaženo dle publikace [17] při poloměru kapek přibližně stejném jako jsou vlnové délky záření, tedy 0,6 – 25 μm.

Kinetický účinek

Jak bylo popsáno při definici hybnosti kapek mlhového SHZ, při výstřiku z hlavic o vysoké rychlosti může docházet k prudkému přisátí chladného vzduchu do ohniska požáru a následnému zvýšení jeho tepelného výkonu. Tento účinek je tedy spíše negativní a pro požár působí namísto potlačení posilujícím efektem.[18] Vhodným dimenzováním systému by měla pozitiva, kterými může být také ochrana konstrukce před destrukcí způsobenou přetlakem, významným způsobem převládnout nad negativy.

2.3.4 Použití

Jako u většiny ostatních systémů, ani v případě vodní mlhy nelze tvrdit, že se jedná o systém, který je vhodný k použití v jakémkoliv provozu. Vodní mlha má několik omezujících podmínek a jednou z nich je například proudění okolního vzduchu, které může nepříznivě ovlivnit směr pohybu kapek. Systémy vodní mlhy jsou proto výhodné pro použití především do uzavřených prostor a tam, kde nejsou vzdálenosti mezi tryskou a případným ohniskem požáru příliš velké. Kapky jsou v případě vodní mlhy s ohledem na své rozměry často velmi lehké a může se stát, že při velké rychlosti proudění vzduchu v okolí mlhové trysky dojde ke změně dopadu kapky a požadovaný prostor nebude moci být ochlazen tak, jak návrh předpokládal.[19] Ze stejného důvodu je kladen zvýšený důraz na součinnost při návrhu s jinými PBZ, jakými může být např. ZOKT. Především z důvodu zachování možnosti uplatnění dusivého efektu vodní mlhy je vhodné, aby byl přísun čerstvého vzduchu co možná nejmenší.

Mlhová SHZ byla dříve používána především ke specifickým provozům, kde byl kladen důraz na minimální množství použité vody. K nárůstu využití a samotnému vývoji vodní mlhy přispěly v historii především tři události. První z událostí byla nehoda letadla v Manchesteru roku 1984, na jejímž základě vyvstal požadavek na vytvoření systému, který umožní prodloužit možnou dobu evakuace za současných co nejmenších nároků na tíhu tohoto zařízení. Druhou událostí, která podpořila zájem o vývoj vodní mlhy, bylo podepsání Montrealského protokolu roku 1987. V této mezinárodní dohodě bylo mj. nařízeno omezení prvků narušujících ozonovou díru, mezi něž patřil také halon, do té doby hojně užívaný plyn v plynových SHZ. Třetím důležitým milníkem, který ovlivnil rozvoj vodní mlhy, bylo rozhodnutí Mezinárodní námořní organizace o nutnosti aplikace mlhových SHZ do všech lodí s přepravní kapacitou nad 35 osob. Toto nařízení vyšlo v platnost roku 1995 a bylo reakcí na množství ztrát na životech, ke kterým při požárech na palubách docházelo. [9]

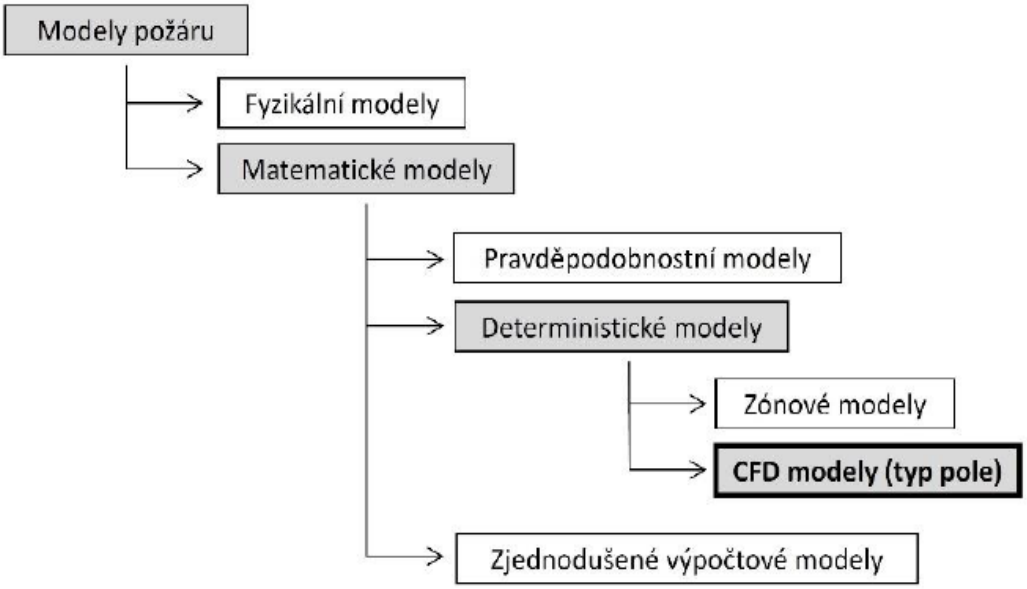
V současné době možnost využití a uplatnění vodní mlhy stále narůstá. Vodní mlha se kromě hojného využití na lodích těší využití také v řadě specifických provozů, kterými jsou např. ochrana kabelových rozvodů, či jako hasicí zařízení v průmyslových objektech. Velký zájem o instalace je také v objektech kulturního dědictví, či v objektech jej uchovávajících. Vzhledem ke skutečnosti, že v těchto prostorech hrozí často nevyčíslitelné škody, je nutné je důkladně zabezpečit, aby nedošlo k případným nevratným změnám způsobených požárem. Bylo-li by však použito větší množství, než jaké je nezbytně nutné, je možné, že dojte k promáčení historických objektů, či k porušení historických předmětů. Takovým příkladem mohou být dřevěné kostely, opery či galerie. Neméně výhodné je použití v knihovnách a archivech. Pro výše popsané provozy je však vždy důležité co možná nejmenší množství použité vody v případě zásahu.

2.4 Možnost aplikace matematického modelování

V oboru požární bezpečnosti staveb se pro svůj návrh často využívá normových postupů založených na desítkách let zkušeností. Díky významnému rozvoji výpočetní techniky je však možné diskretizovat výpočty pokročilými modely ve velké škále inženýrských disciplín. Ve stavebnictví je výpočetních modelů využíváno mj. právě pro zkoumání požární bezpečnosti. Jak již bylo zmíněno, mlhové SHZ pouze na základě normových postupů navrhovat nemůžeme – nejen proto je tedy žádoucím tématem možnost demonstrovat hasicí účinnost a chování vodní mlhy využitím počítačových modelů.

Požár sám o sobě je možné modelovat velkou spoustou programů. Problém však může nastat v okamžiku, kdy vyvstane požadavek na zjištění toho, jak velkou míru má vodní mlha na ochlazování uzavřeného prostoru. Různé programy, které jsou používány při aplikaci požárně inženýrského přístupu, mají různé vstupy, výstupy, možné hranice využití a určitá zjednodušující kritéria. Na základě znalosti těchto informací a programů samotných je možné vhodně reprodukovat výsledky jednotlivých modelací.

Modelovat požár je možné několika různými způsoby v závislosti na tom, co je pro uživatele žádoucí modelem zjistit, či k čemu mu model slouží. Základní rozdělení modelů je znázorněno na obr. 5. Realizace fyzikálních modelů spočívá ve vytvoření takových modelů ve zmenšeném měřítku, které se budou chovat stejně jako reálný systém. K tomu, aby byla zachována podobnost nejen dynamická, ale také geometrická a kinematická, slouží řada škálovacích vztahů založených na různých kritériích podobnosti, jako např. podobnostní čísla Re, Pr, Ca, Sc, Ma, Fr. [20] Tato práce se však detailněji zabývá matematickým modelováním, proto fyzikálním modelům není nadále věnována detailnější pozornost.



Obrázek 5: Schématické dělení modelů požáru (převzato z [21])

Matematické modelování požáru se potýká s třemi hlavními problémy, které tím nastavují hranice využití matematických modelů. Prvním problémem je fakt, že je mnohdy velmi obtížné zvolit požární scénář pro návrh matematického modelu tak, aby se mohl naprosto ztotožnit s reálným průběhem. Zaprvé je obrovské množství různých požárních scénářů, které mohou nastat vzhledem ke skutečnosti, že se obvykle jedná o nechtěný incident, který nastal kombinací několika náhodných jevů. Druhým problémem je skutečnost, že pro některé fyzikální jevy, především pro ty, které jsou proměnné v čase, je výpočetní výkon limitovaný. Následkem je to, že každý základní přístup pro např. aerodynamiku těles, přenos tepla či spalování ve svých výpočtech již nějaké aspekty zanedbává. Poslední komplikací je poté samotné palivo, u nějž data, která jsou potřebná pro matematický model pyrolýzy, často nejsou dostačující. Především pro vícesložkové materiály totiž není znám mechanismus ani kinetika pyrolyzních reakcí. Vzhledem k tomu, že je snaha se ve vývoji modelování požáru posunout, dochází do jisté míry ke zjednodušování modelů.

Je důležité zmínit, že zatím neexistuje model, který by mohl dokonale popsat opravdu veškeré děje, které se při požáru především tuhých paliv odehrávají. Je si proto nutné uvědomit, k jakým zjednodušením, či úpravám dochází při konkrétních přístupech k modelování. V následujících odstavcích jsou detailněji popsány některé z přístupů, které při modelaci trysky vodní mlhy může případný uživatel uplatnit a se kterými má autor práce osobní zkušenost z průběhu studia.

2.4.1 Zónové modely

Zónové modely patří do modelů deterministických. Můžeme říci, že v současné době jsou stále zónové modely jedním z nejpoužívanějších typů modelů, které slouží k předpovědi rozvoje požáru v uzavřeném prostoru. Dvouzónový model pomyslně dělí prostor ve vodorovné rovině na dvě části dle teploty – spodní vrstva má teplotu nižší, horní vyšší. Pro každou vrstvu platí předpoklad hmotnostní a energetické bilance, které mohou být doplněny modely popisujícími ostatní fyzikální procesy využitím diferenciálních nebo algebraických rovnic. Mezi takové procesy patří např. tok tepelné energie a částic procházejících otvory, sdílení tepla radiací či prouděním, pyrolýza tuhých paliv a popis sloupce zplodin hoření – fire plume, který zajišťuje výměnu mezi vrstvami. Dochází tím však k výraznému zjednodušení dynamiky ohně. [22] V zónových modelech však není, s ohledem na zanedbání rovnice zachování hybnosti, možné odhadnout rychlost proudění plynů.

Vzhledem k tomu, že jsou prostory děleny pouze do jedné či dvou vrstev, je velmi těžké detailněji sledovat vliv vodní mlhy na ochlazení prostoru. V některých programech, jakým je například C-FAST, je možné do výpočtu zakomponovat také spuštění trysky vodního SHZ. To se může jevit jako pozitivní, jelikož není potřeba tolika vstupních dat, uživatel však nemá prostor pro nastavení vlastních parametrů trysky a odebrání tepla z prostoru je obvykle uvažováno pouze poklesem tepelného výkonu požáru. Program je však schopen zaznamenat čas aktivace a teplotu, která byla při aktivaci hlavice, v prostoru.[23] Významnou výhodu mají zónové modely však v krátké výpočetní době, která se obvykle pohybuje v řádu jednotek či desítek minut.

2.4.2 CFD modely

Jelikož je v případě zónových modelů podstatou výpočtů velká míra zjednodušení, nenabízí se již další možnost, jak je dál systematicky zlepšovat. S prudkým nárůstem schopností výpočetní techniky a vývojem přístupu CFD k modelování proudění, došlo postupně k tomu, že modely pole, jak jsou také CFD modely někdy označovány, našly své využití také v požárním inženýrství. CFD představuje počítačové simulace, které popisují co nejpřesněji proudění pomocí parciálních diferenciálních rovnic (PDR), reprezentujících principy zachování energie, hmoty (rovnice kontinuity) a hybnosti (Navier-Stokesovy rovnice), případně dalších rovnic pro bilanci škodlivin. Numerickým řešením lineárních algebraických rovnic (LAR), které využitím CFD vytváří model proudící tekutiny, jsou hodnoty rychlostí, teplot, tlaků, koncentrací škodlivin aj.

Převod systému PDR na LAR je následně proveden nejčastěji metodou konečných objemů. Systém se rozdělí na vysoké množství velmi malých prvků, kde se nejprve výpočetní oblast v CFD modelech rozdělí na konečný počet uživatelem definovaných trojrozměrných prvků, které dohromady tvoří výpočetní síť. To slouží k výrazně přesnějšímu průběhu jednotlivých tepelných výměn v prostoru, než tomu je u zónových modelů. Každý prvek se nejprve integruje přes všechny kontrolní objemy, čímž jsou získány spojité integrální funkce, vyjadřující pro jednotlivé objemy zmíněné principy zachování veličin. Tyto spojité integrální funkce se následně diskretizují pro získání hodnoty v konkrétním bodě, čímž se integrální rovnice přenosu sledovaných parametrů proudění převedou do systému LAR. Následné získání hodnot v každém bodě systému probíhá iterací.[22][24]

Tento postup je však komplikovaný pro turbulentní proudění, jelikož pro možnost zachycení proudění je třeba velmi malých objemů jednotlivých prvků výpočetní sítě. Toho může být docíleno užitím přímé numerické simulace (DNS), která vyžaduje pro svůj výpočet velmi jemnou síť, dle Ing. Bartáka [22] se jedná o 10^9 až 10^{12} kontrolních objemů pro krychli o hraně 10 cm a časový krok ideálně 0,1 milisekundy. Výpočet takto detailní simulace je, vzhledem k výpočetní náročnosti, téměř nemožné provést běžně dostupným počítačem, a proto jsou zajímavé spíše metoda Reynodsovo středování Navier-Stokesových rovnic (RANS), či metoda velkých vírů (LES).

Pro RANS přístup se obvykle jednotlivé parametry proudění rozdělí na střední časovou hodnotu a fluktuační složku, čímž se Navier-Stokesovy rovnice převedou na RANS a pro možnost interakce s dalšími PDR se doplní o tzv. model turbulence, umožňující stanovit přidané Reynoldsovy členy korelací. Nejčastějším modelem turbulence je k–ε, v němž je uplatňována Boussinesquova hypotéza o turbulentní viskozitě. Model k–ε řeší dvě dodatečné transportní rovnice (pro kinetickou energii turbulence k a pro disipaci kinetické energie ε). V průběhu zjednodušení Navier-Stokesových rovnic na metodu RANS však dochází mj. k časovému zprůměrování veličin, které charakterizují tok tekutin, a proto se tato metoda nejeví jako nejvhodnější volba pro využití k této práci. [25]

Metoda LES by se dala považovat za jakýsi mezistupeň mezi RANS a DNS, je totiž poměrně přesná a výpočetní náročnost není tak vysoká. K získání řídících rovnic dochází filtrací vírů, jejichž měřítko je menší, než uživatelem definovaná šířka jednotlivých objemů. Zjednodušeně řečeno je na základě velikosti výpočetní sítě stanoven objem, pod jehož rozměry jsou již zanedbávány víry probíhající ve sledovaném systému.[15]

Mezi CFD modely patří např. program ANSYS Fluent či FDS. V programu ANSYS je možno velmi detailně modelovat trysku mlhového SHZ, svou detailností a množstvím vstupních parametrů je však práce v programu poměrně náročná a bylo by velmi obtížné ho pro zadání této práce použít i přesto, že je ve svém výpočtu přesnější. Vhodnějším softwarem se proto jeví FDS. V něm je však, stejně jako ve všech ostatních modelech, důležitým parametrem přesnost vstupních dat. Mezi nejvýznamnější vstupní charakteristiky patří zejména požárně technické charakteristiky, jež definují chování materiálu za požáru, především však vlastní kinetika hoření. Tu lze simulovat využitím znalosti hodnoty HRR, proměnné v čase, kterou je možné zjistit experimentálně pomocí kalorimetru. Druhou možností je přímý výpočet kinetiky chemických reakcí v průběhu hoření, což je náročnější na výpočetní čas. Celý proces hoření lze však poté modelovat bez nutnosti předchozích experimentů, postačí znalosti obvykle zjednodušené hodnoty HRR.[21]

2.5 Modelování hašení pomocí vodní mlhy v programu FDS

V této práci je pro potřebné výpočty využit program Fire Dynamics Simulator (FDS), konkrétně verze FDS 6.7.5. Program FDS byl vytvořen společnou prací americké instituce National Institute of Standards and Technology (NIST) a finského výzkumného centra VTT Technical Research Centre of Finland. Jedná se o volně dostupný program modelu typu CFD, jehož primárním zaměřením je sledování transportu tepla a dalších dějů probíhajících při procesu hoření. V tomto programu je možné definovat nejen veškeré okolní podmínky, ale také výstřikové parametry trysky. V závislosti na výstupních datech je možné určit vliv daných parametrů na požární účinnost vodní mlhy. Následující podkapitoly se věnují detailnímu popisu fungování programu FDS a jeho možné aplikaci pro téma této práce.

2.5.1 Základní informace o FDS

Samotný přístup k modelování využitím CFD není pro problematiku požáru a jeho hašení primárně uzpůsoben, podrobněji se jím zabývají programy pro to vhodnější (tzv. požární submodely), mezi něž patří program FDS. Ten numericky řeší Navier-Stokesovy rovnice pro nízkorychlostní oblast proudění tekutin specifikované Machovým číslem Ma < 0,3, avšak validace konkrétní verze FDS se vztahuje pouze na číslo Ma přibližně 0,1.[26] Forma numerických rovnic a míra jejich aproximací či zanedbání jejich částí závisí na tom, který proces je pro tvůrce modelu žádoucí. [27]

FDS je postupně vyvíjen od roku 2000 a v současné době je možné na webových stránkách organizace NIST stáhnout současnou poslední aktuální verzi, FDS 6.7.5, která je použita v této práci. Spolu s programem FDS bylo vyvinuto grafické rozhraní Smokeview (SMV), které je ve své aktuální verzi SMV 6.7.15 možné stáhnout ze stejné webové stránky.

Příkazy jsou do programu FDS zadávány pomocí textového souboru, v němž jsou napsány a při zadávání se obvykle pracuje s SI jednotkami – délky jsou v m, čas v s, tlak v Pa, hmotnost v kg, teplota v °C, avšak některé z jednotek jsou výjimkou, jako např. rychlost uvolňování tepla, která je zadávána v kW, a měrná tepelná kapacita v kJ/kg·K. Program FDS je při správné definici vstupních parametrů schopen modelovat mimo jiné následující:

- přestup tepla za nízké rychlosti
- produkty vznikající při spalování,
- přenos tepla radiací a konvekcí mezi plyny a pevnými povrchy,
- pyrolýzu pevné či kapalné fáze
- proces hoření plynných produktů,
- šíření a rozvoj požáru,
- aktivaci tepelných a kouřových hlásičů,
- vodní a mlhová hasicí zařízení.

Výstupní data z modelu mohou být značně obsáhlá vzhledem ke způsobu modelování, počtu implementovaných měřicích prvků, palivu apod. FDS funguje totiž obecně tak, že každou jednu buňku a její vlastnosti počítá v každém časovém kroku. Pomocí datového výstupu je možné zjistit mj. následující: teplotu plynu či povrchů, rychlost proudění plynu a jejich koncentrace, viditelnost při zakouření, tlak, množství uvolněného tepla v závislosti na ploše, poměr směsi vzduchu a paliva, hustotu plynu, množství kapek na plochu/objem, celkové množství uvolněného tepla a časy aktivace trysek či hlásičů.

S využitím matematického modelování souvisí také nutnost validace a verifikace použitého programu. Validací se rozumí zhodnocení toho, jak moc se počítačový model shoduje s experimentálně získanými údaji, verifikací se poté rozumí ověření modelu ze strany matematické přesnosti výpočtů, kontroly algoritmů a funkčnosti vytvořeného modelu.

Pro zajištění lepší přehlednosti zdrojového kódu bývá souslednost specifikace podmínek následující [21]:

1) Obecné informace o modelu

&HEAD

Tímto příkazem obvykle zdrojový kód začíná a slouží k pojmenování či ke krátkému popisu konkrétní simulované situace. Ve zdrojovém kódu se příkaz &HEAD stejně tak, jako &TAIL či &MISC může vyskytnou vždy pouze jednou. Obvykle se skládá ze dvou částí níže popsaných.

CHID	Slouží jako název souboru, pod nímž budou ukládány veškeré výstupní soubory. Obvykle krátký (max. 50 znaků).
TITLE	TITLE slouží uživateli jako detailnější popis dané simulace. Pro tento příkaz může být použit popis o celkové délce až 256 znaků.

&MISC

Oddíl „Miscellaneous“ obvykle mění obecné parametry nastaveny FDS automaticky.

TMPA	Pomocí tohoto příkazu lze nastavit jinou počáteční teplotu, než je obvyklých 20 °C. Obdobně lze změnit např. počáteční vlhkost (HUMIDITY), či počáteční rychlost proudění v prostoru v jednotlivých směrech (U0,V0,W0).
RESTART	Zadáním hodnoty .TRUE. je umožněno spuštění výpočtu i v případě jeho přerušení. To je možné provést při vypnutí uživatelem, ale také při nechtěném přerušení např. při přerušení dodávky el. proudu.
POROUS_FLOOR	Vepsáním hodnoty .FALSE. je zajištěné, že kapky při dopadu na zem nezmizí z výpočetní domény, což je využíváno především pokud se jedná o kapky paliva.

2) Čas výpočtu, případný čas restartu.

&TIME

Tímto příkazem se definuje především doba simulace.

T_BEGIN	Zadaný čas udává začátek simulace. V případě, že uživatel nezadá žádné číslo, spouští se simulace ihned. Tento příkaz může být vhodný pro kontrolu aktivací různých zařízení, otevřenosti otvorů apod.
T_END	Udává konec simulace v s. V případě zadání hodnoty 0 s je možnost pustit pouze velmi krátký výpočet, který nám umožní rychle zkontrolovat geometrii.
DT	Tento příkaz dává uživateli možnost zadání počátečního časového kroku při simulaci.
LOCK_TIME_STEP	Zadáním hodnoty .TRUE. zadá uživatel příkaz k tomu, aby byly veškeré kroky výpočtu stejně dlouhé a doba DT výše popsána se nebude prodlužovat. V tomto případě je však nutná detailní znalost chování modelů, jelikož příliš dlouhý časový krok by mohl vést k numerické nestabilitě a nepřesným výsledkům.

&DUMP

Tento oddíl je obzvláště důležitý pro výpočetně náročnější simulace, při nichž hrozí, že by mohl být výpočet přerušen. Dá se totiž použít pro vyvolání poslední uložené části výpočtu v závislosti na nastavení parametru DT_RESTART. Je jím také možné změnit celkový počet Lagrangeových částic či vypnout zobrazení kouře ve Smokeview.

DT_RESTART	Definuje, po kolika sekundách se má periodicky ukládat soubor umožňující pokračování v simulaci v případě přerušení výpočtu. V případě nastavení DT_RESTART 10 s a výpadku po 29 s je tedy možné pokračovat od 20. s.
STATUS_FILES	Při zadání hodnoty .TRUE. dojde k vytvoření dočasného souboru s názvem CHID.notready, který nebude smazán, dokud nebude výpočet úspěšně ukončen. To může sloužit jako indikátor chyby ve výpočtu. Základní nastavení této hodnoty je .FALSE.
NFRAMES	Tento příkaz slouží pro specifikování času, při němž budou periodicky ukládané snímky zobrazení hodnot dané vyspecifikované veličiny ve Smokeview.

3) Výpočetní síť

– viz kapitola 2.5.2.

4) Popis využitých materiálů se specifikací jejich vlastností

&MATL

V oddílu „Material Properties“ jsou uživatelem definovány požárně technické vlastnosti materiálů. Jedná se o důležitou část, jelikož materiály hrají významnou roli při odebírání tepla z prostoru či podpoření jeho šíření. Pokud chce uživatel ve svých výpočtech mít stěny, které reprezentují izotermní povrch s teplotou okolí (TMPA), je možné využít možnosti inertních materiálů. To je možné buď definicí konkrétních ploch v SURF_ID, či tak, že uživatel příkaz &MATL vůbec nezadá. Níže jsou zmíněné pouze některé z příkazů. Je však možné definovat mnohé další jako např. reakční teplo, bod varu, absorpční koeficient, emisivitu apod., které slouží pro popis vlastností paliva, jak je následně popsáno dále v kapitole 2.5.3.

ID	Pomocí ID se jednoznačně definuje materiál, na který se bude možné následně odkázat při popisu jednotlivých povrchů.
SPECIFIC HEAT	Možnost definování měrné tepelné kapacity.
CONDUCTIVITY	Zadáním této hodnoty uživatel definuje součinitel tepelné vodivosti.
DENSITY	Slouží pro definici objemové hmotnosti materiálu.

5) Definice okrajových podmínek

&SURF

„Surface Properties“ slouží především k definování ohraničujících povrchů pevných těles či ke specifikaci otvorů využitím již definovaných materiálových charakteristik. Pro možnost izolace tepelné výměny lze definovat povrch jako adiabatický. Sdílení tepla z plynu na teplý povrch v případě adiabatického povrchu na rozdíl od inertního povrchu není umožněno, a tak hodnota sumy tepelného toku, který byl přenesen sáláním a prouděním, bude nulová.

ID	Tímto identifikuje konkrétní povrch.
MATL_ID	Příkaz odkazující na materiál, na němž se daný povrch nachází.
COLOR	Umožňuje nastavit barvu, která bude zobrazena ve Smokeview.
THICKNESS	Tloušťka zadávaná v metrech pro daný povrch.
HRR, HRRPUA, TMP_FRONT	Příkazy, s jejichž pomocí je možné definovat rychlost uvolněného tepla v prostoru, resp. rychlost uvolněného tepla vztaženou na plochu a teplotu např. v případě sálavého panelu. Tyto příkazy jsou blíže popsány v kapitole 2.5.3

6) Popis pevných těles

&OBST

„Obstruction“ se používá především pro vytvoření těles uvnitř vytvořeného prostoru. Svým názvem napovídá, že tvoří jakousi překážku, která ovlivňuje další pohyb tekutin v prostoru. Pro možnost opakování určitých OBSTů je možné využít oddílu &MULT, který je nakopíruje do požadovaných míst.

ID	Je-li žádoucí konkrétní objekt identifikovat, využije se příkazu ID.
XB	Pro specifikaci těles slouží souřadnice X,Y,Z s popisem počátečního a koncového bodu, obdobně jako tomu je u jiných oddílů.
SURF_ID, SURF_IDS, SURF_ID6	Pomocí příkazu SURF_ID je obecně možné odkázat se na vlastnosti povrchu, které byly specifikovány v předchozím oddíle. Použitím příkazu *_IDS přiřazuje FDS různé vlastnosti plochám v dané souřadnicové ose – obě strany budou tedy totožné. Pokud je však požadavek na to, aby každé ze stran byla přiřazena jiná vlastnost, je možné použít příkaz *_ID6, v němž uživatel definuje všech 6 stěn daného tělesa.

&VENT

„Vent Parameters“ poskytuje uživateli možnost implementace otvoru v prostoru, či přidělit pevnému tělesu část plochy o vlastnostech definovaných oddílem &SURF, což může být vhodné pro definování hořáku či sálavého panelu, nebo také otvoru do exteriéru, který umožňuje výměnu plynů. Použít lze pouze na povrchu pevného tělesa, či na hranicích výpočetní domény.

XB	Pro specifikaci otvoru slouží souřadnice X,Y,Z s popisem počátečního a koncového bodu, obdobně jako tomu je při vytváření geometrie prostoru.
SURF_ID	Pomocí tohoto příkazu je možné odkázat se na vlastnosti povrchu, obdobně jako v oddíle &OBST. Hodnotu 'OPEN' je možné použít pro modelaci proudění plynů mezi exteriérem a prostorem ohraničeným konstrukcemi. Otevřenost by však neměla být v průběhu aktivována, či deaktivována. Je-li požadavek na proměnnou otevřenost daného prvku, lze jej definovat v oddíle &DEVC.
TMP_EXTERIOR	Hodnoty mimo prostor, v němž se požár nachází, jsou programem FDS nastaveny jako ambientní, pokud je uživatel nezmění na jiné. Teplota je tedy automaticky uvažována jako 20 °C, pokud není tímto příkazem změněna. Obdobně lze měnit další veličiny jako jsou tlak, hustota aj.

&HOLE

„Obstruction Cutout Parameters“ slouží k podobnému účelu jako „otevřený“ VENT. Umísťuje se ale pouze na prvky OBST a může se s jeho pomocí modelovat otvor skrze pevné překážky uvnitř prostoru.

XB	Definice umístění je principiálně stejná jako v případě předchozího příkazu. V případě definování otvoru na &OBST-u, je zadáván rozměr vždy nepatrně před počátečním bodem pevné konstrukce a nepatrně za koncovým bodem konstrukce – obvykle stačí přesah v délce 1 cm.

7) Zdroj hoření a jeho reakce

– viz kapitola 2.5.3

8) Měřicí zařízení (vč. mlhového SHZ)

– viz kapitola 2.5.4

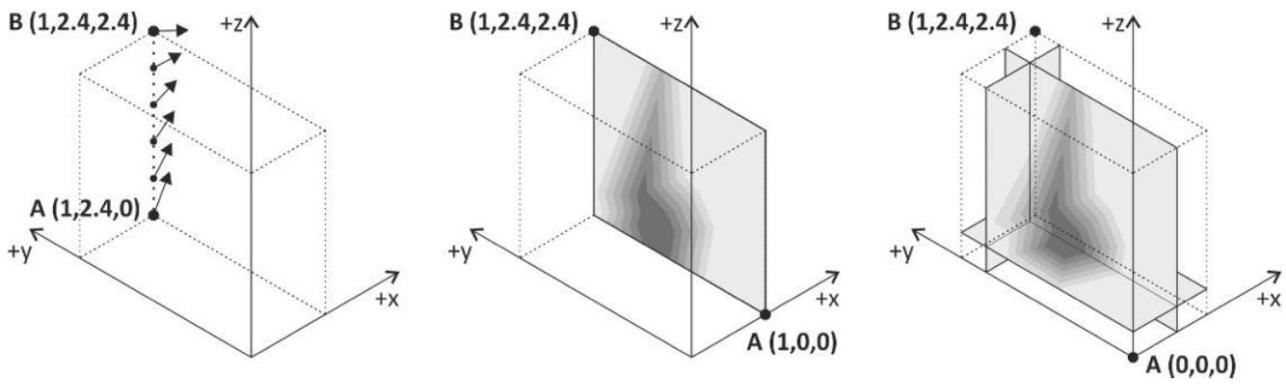
9) Specifikace výstupů,

V nich uživatel definuje nejen zobrazení ve Smokeview (&SLCF, &BNDF a &ISOF), ale také to, jaké hodnoty chce v daných místech zjišťovat a následně ukládat do výstupního souboru (&DEVC). Obvykle se uvádí na konci vstupního textového souboru.

&SLCF

Tento oddíl slouží pro zobrazení hodnot dané vyspecifikované veličiny ve Smokeview, ve výstupním souboru se hodnoty nezaznamenávají.

XB	Možnost zadání souřadnic, v nichž je žádoucí sledování veličin. V případě, že budou dvě souřadnice ve dvou osách totožné, je možné zobrazení úsečky. V případě shody v jedné rovině, Smokeview zobrazí řezovou rovinu, pokud nejsou žádné ze souřadnic v ose totožné, bude zobrazen průmět všech os, viz obr 6.
VECTOR	Hodnotou .TRUE. zadáme příkaz pro zobrazení vektoru dané veličiny. Právě při zobrazení vektoru může být vhodné zobrazení SLCF pouze jako úsečky.
QUANTITY	V tomto příkaze uživatel definuje sledovanou veličinu.



a) jako přímka *b) jako rovina* *c) jako tři roviny*

Obrázek 6: Různá zobrazení příkazu &SLCF (převzato z [21])

&BNDF

Tento příkaz je velmi podobný SLCF, slouží však pro zobrazení povrchových hodnot včetně hranic. Není nutné specifikovat umístěni, stačí pouze definovat veličinu.

QUANTITY	Zadáním definuje uživatel veličinu, která zobrazí hodnoty na každém povrchu.

&ISOF

Tímto příkazem vznikne v zobrazení isoplocha spojená hodnotami, které jsou uživatelem definovány. Není proto opět nutné zadávat umístění, protože plocha je definována na základě hodnot dané veličiny.

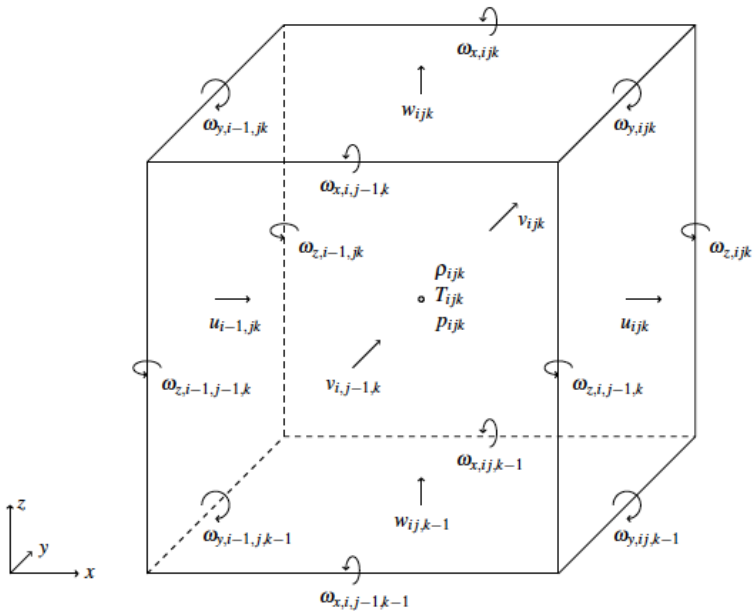
QUANTITY	Zadáním definuje uživatel veličinu, jejíž hodnoty požaduje uživatel v postprocesoru zvýraznit.
VALUE	Hodnota, v jejíchž bodech se má vytvořit isoplocha. Je možné definovat více hodnot očíslováním příkazu: VALUE(1)=10, VALUE(2)=15 apod.

10) Zakončení kódu příkazem &TAIL/

2.5.2 Výpočetní síť

Pro vytvoření simulace je prvním krokem vytvoření geometrického modelu a volba hustoty výpočetní sítě v závislosti na velikosti prostoru a zkoumaných procesech uvnitř něj. Tento krok je velmi důležitý, jelikož jím ovlivňujeme nejen nutný čas pro výpočet, ale také přesnost, se kterou můžeme výsledky očekávat. Dle FDS Reference Guide [26] je volena mřížka v závislosti na sledovaných procesech, kde je např. pro detailnější sledování průběhu hoření doporučena velikost buněk v mřížce o hraně 1 mm. Naopak při simulaci požáru ve velkých prostorech, jakým je např. hala, je realistické použití mřížky o délce hrany v řádech desítkách cm – někdy dokonce více.

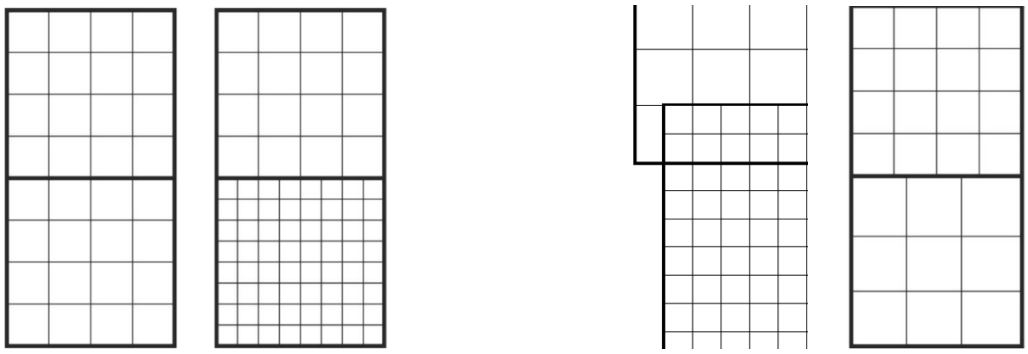
Jak již bylo zmíněno, program využívá metodu konečných objemů, kde probíhají výpočty rovnic pro každou buňku zvlášť. Na obr. 7 je znázorněno, jaké je rozmístění jednotlivých veličin v kontrolní buňce. Skalární veličiny, kterými jsou např. teplota (T), hustota (ρ) a tlak (p) se nachází ve středu buňky, vektorové veličiny jako je rychlost (u, v, w) vystupují ze stěn buněk a vorticita (ω), charakterizující míru rotace v kontinuu, se nachází v každé z hran výpočetní buňky.[26] Kromě toho je na obr. 7 také znázorněn kladný směr os x, y a z.



Obrázek 7: Umístění veličin v jednotlivé buňce výpočetní sítě (převzato z [26])

&MESH

V oddílu „Mesh Parameters“ definuje uživatel jednotlivými příkazy výpočetní doménu, konkrétně geometrii prostoru a rozdělení na síť buněk. Pro možnost detailního zkoumání pouze žádoucích úseků prostoru je možné mít v prostoru i více sítí s různými rozměry. Pokud na sebe jednotlivé sítě navazují, musí být zvoleny rozměry tak, aby byl umožněn transport informací o hodnotách veličin mezi jednotlivými buňkami viz obr. 8 a).



a) *b)*

Obrázek 8: Napojení mřížek v FDS a) správné, b) špatné (převzato z [21]a [28])

XB

V programu FDS je využíván pravoúhlý souřadnicový systém. Umístění konkrétních bodových prvků je obvykle specifikováno souřadnicemi X,Y,Z, oddělenými čárkou. Plochy a třírozměrná tělesa jsou naopak vždy definovány celkem šesti souřadnicemi, konkrétně svým počátečním a koncovým bodem v jednotlivých souřadnicových osách, např. krychle o hraně 1 m by měla své souřadnice zapsány ve tvaru XB=(0.0,1.0,0.0,1.0,0.0,1.0).

IJK

Velikost mřížky je v FDS definována pomocí příkazu IJK, v němž definujeme počet buněk, na které se uživatelem definovaný prostor rozdělí ve směrech os X (I), Y (J) a Z (K). Aplikace tohoto příkazu lze demonstrovat na zmíněné krychli o hraně 1 m, kterou rozdělíme na mřížku, v níž je jednotlivý objem roven krychli o hraně 10 cm, pomocí příkazu IJK=10,10,10. Pro zjištění ideální velikosti mřížky se využívá poměru $D^*/\delta x$, jehož ideální výsledek se pohybuje mezi hodnotou 4 a 16. [18] Velikost hrany jedné krychle je vyjádřena jako δx [m] a charakteristický průměr požáru D^*, který zohledňuje HRR, je vyjádřen rovnicí (3) jako:

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g}}\right)^{2/5}, \tag{3}$$

kde

$\dot{Q}$ – rychlost uvolňování tepla [kW],

ρ_∞ – hustota okolního vzduchu za konstantního tlaku [kg·m^{-3}],

c_p – měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku [kJ·kg^{-1}·K^{-1}],

T_∞ – teplota okolního vzduchu [K],

g – gravitační zrychlení [m·s^{-2}].

2.5.3 Modelace hoření

Nejjednodušším popisem chemické podstaty hoření může být pro FDS hoření uhlovodíků za přítomnosti kyslíku a za vzniku oxidu uhličitého a vodní páry. Požár je však považován za relativně neefektivní spalování, zahrnující v sobě velkou spoustu různého paliva, při němž vzniká výrazně více produktů hoření, než jen oxid uhličitý a vodní pára. Proto je oblast modelování téměř neomezená. To by bylo výpočetně velmi náročné, a proto se model hoření omezuje obvykle na jedno palivo a počet reakcí na jednu až dvě.

I v případě významných zjednodušení je stále sledováno alespoň šest různých druhů plynných látek (palivo, O_2, CO_2, H_2O, CO, N_2) a případné saze. Není však nutné v každém kroku počítat sedm transportních rovnic, stačí spočítat rovnici pro palivo a k ostatním produktům. Proto se využívá tzv. pseudosložky, označované jako „*lumped species*“, kterou si je možné představit jako skupinu různých složek, ve které všechny složky reagují a pohybují se stejně, a na něž je pohlíženo z pohledu numerického modelu jako na částice o jednom druhu. Příkladem je vzduch, který je složen z několika různých plynů, a v modelu je na něj pohlíženo právě jako na „jednodruhovou“ pseudosložku. Díky tomu je možné významné zrychlení výpočtu.[28]

Pyrolyzní model

V předchozích odstavcích bylo popsáno, jak přistupuje program FDS k hoření plynných látek, jinak tomu je však u kapalin a pevných látek, které figurují v modelu jako palivo. K hoření plynných látek dochází až po termickém rozkladu povrchu látek, po pyrolýze. U kapalin je nutné doplnit úvahy o odpar hořlavých par z kapaliny, v případě pevných látek poté o vznik hořlavých plynů a pevných částic. Odpar při hoření kapalných látek je oproti pevným látkám popsán pouze jednou reakcí vzniku plynné složky, přičemž reakční entalpie této složky je rovna výparné entalpii.

&REAC

„Reaction Parameters“ definuje jakým způsobem a za vzniku jakých produktů bude v programu FDS probíhat reakce hoření.

FUEL	FDS má vlastní databázi paliv, kterou lze použít bez nutnosti další specifikace vlastností. Mezi takové patří např. propan, butan, etan, metan, etanol, aceton aj. Tyto příkazy je nutné zadávat vždy velkými písmeny a anglicky např. 'PROPANE'
FORMULA	Není-li látka známá, je možné jí definovat jiným způsobem. Pro látku, která je složena z prvků C, H, O a N, je možné využít zápisu v podobě např. FORMULA='C7H11.4O5.1'
SOOT_YIELD	Určuje hmotnostní podíl sazí vzniklých při spalování na 1 kg paliva [kg/kg], v hodnotách 0 až 1.
CO_YIELD	Určuje hmotnostní podíl oxidu uhelnatého vzniklého při spalování na 1 kg paliva [kg/kg], opět v hodnotách 0 až 1.

Pro co nejpřesnější výsledky je důležité zadat přesné termofyzikální charakteristiky všech hořících materiálů přítomných v modelovém prostoru. Ideálním řešením pro popis hoření pevných látek je přesná definice kinetiky reakcí a požárně technických charakteristik hořících materiálů.

&MATL

Byť byl tento oddíl již popsán kapitolou 2.5.1 v části 4), většina příkazů specifikujících průběh hoření či vlastnosti paliva nebyla ještě definována, a proto je v této kapitole důležité oddíl &MATL opět uvést. Některé příkazy jsou velmi podrobné a může být náročné získání vstupních hodnot.

N_REACTIONS	Udává počet reakcí, k nimž při hoření dochází. V případě kapalného paliva je automaticky uvažována hodnota 1, maximálně jich však může být 10. Vyšším číslem však není myšleno to, že jeden materiál prochází několika reakcemi, ale spíše tak, že probíhá reakce na více komponentech daného tělesa při různých teplotách.
SPEC_ID	Popisuje, které plynné části při reakci vznikají. Minimálně musí být uvedena jedna plynná látka, popsána v oddíle &REAC. Pro pevné produkty jako např. popel je vhodné využít příkazu MATL_ID.
NU_SPEC	Tento příkaz udává poměr jednotlivých plynných produktů specifikovaných v předchozím příkazu. Pro pevné látky se využije příkazu NU_MATL.
REFERENCE_ TEMPERATURE	Udává teplotu, při níž dochází k reakci, tzv. reakční teplotu.
HEAT_OF_REACTION	Udává teplo [kJ/kg], které je potřebné k započetí reakce.
HEAT_OF_COMBUSTION	Udává teplo, které se při dané rovnici uvolní z hmoty (jednotkové), označováno také jako efektivní výhřevnost paliva. Tento příkaz je možné definovat také v oddíle &REAC.
BOILING_TEMPERATURE	Jedná se o příkaz, který se používá pro kapalné palivo a udává teplotu varu dané látky.
ABSORPTION_ COEFFICIENT	Vyjadřuje schopnost látky pohltit elektromagnetické záření, a to nejen ze svého povrchu, ale také v určité hloubce, která může být především u kapalin pro odebírání tepla, významná.[21]

&SURF

Jedná se o je skupinu, která definuje strukturu všech pevných povrchů nebo otvorů uvnitř nebo ohraničující tokovou doménu. Kromě toho je však možné využitém tohoto oddílu definovat palivo, které se principiálně chová jako povrch, který je však pro své vlastnosti uveden v hoření.

BURN_AWAY	Hodnotou .TRUE. zajistíme, že bude docházet nejen k hoření, ale také k odhořívání. Palivo tedy hoří, dokud je v buňce dostatečné množství paliva. Následně postoupí reakce dál.

Přesná definice mechanismu a kinetiky pyrolyzních reakcí je především u materiálu složeného z více složek často neznámá, a proto je často nahrazována pomocí HRR. Hodnota HRR (HRRPUA) vyjadřuje rychlost uvolňování tepla a je jí možné stanovit experimentálně např. využitím kónické kalorimetrie. Pro jednodušší simulaci hoření v FDS lze použít také druhou, s ohledem na dostupnost informací více požívanou metodu, která je popsána níže. Simulace hoření touto metodou je možná definicí reaktantu či definicí rychlosti uvolňování tepla.

&SURF

TMP_FRONT	Zadáním uživatel definuje teplotu na povrchu, kterému je příkaz přiřazen. V případě tohoto zápisu ovšem není produkován kouř a neprobíhá ani plamenné hoření.
HRR, HRRPUA	Pomocí příkazu HRR je možné definovat výkon požáru, u HRRPUA je tento výkon pouze převeden na účinnou plochu.
MLRPUA	Tímto příkazem je možné definovat hmotnostní úbytek požáru vztažený jako v případě HRRPUA na účinnou plochu. Jednomu povrchu SURF však nelze přiřadit obojí, HRRPUA a MLRPUA lze tedy použít pouze samostatně.
RAMP_T, RAMP_Q	Příkazy sloužící k určení, jaké hodnoty budou proměnné v čase. Zadáním RAMP_Q='název' upravuje uživatel hodnoty výkonu požáru v čase, u RAMP_T='název' naopak hodnoty teploty.
E_COEFFICIENT	Pomocí tohoto koeficientu, který musí být experimentálně změřen, je možné definovat, jak velkou mírou se redukuje výkon požáru, kterému vodní mlha odebírá tepelnou energii. Používá se v případě definování zdroje tepla pomocí příkazu HRRPUA tepelným hořákem.

&RAMP

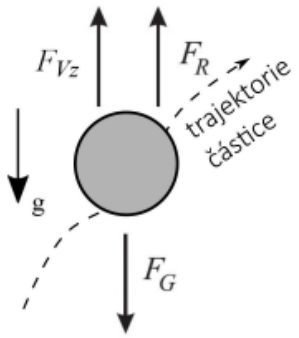
HRR a HRRPUA je stejně jako TMP_FRONT primárně hodnotou konstantní, ale může být také proměnná v čase využitím právě oddílu &RAMP. V něm je tedy možné definovat hodnoty těchto příkazů v konkrétním čase simulace.

ID	Přesné určení, o který zdroj hoření se jedná z oddílu SURF.
T	Udá čas, v němž je stanovena konkrétní hodnota teploty či výkonu. Hodnoty mezi jednotlivými časy jsou spojeny mezi sebou lineárně.
F	Definuje poměr mezi hodnotou, kterou chce uživatel definovat a maximální hodnotou výkonu či teploty. Při zadání čísla 1 je uvažována hodnota HRRPUA (HRR) či TMP_FRONT definována v předchozím oddíle.

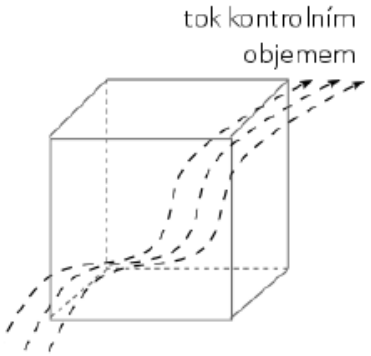
2.5.4 Modelace vodního spreje

Při práci v programu FDS lze obvykle modelovat dvoufázový systém dvojím přístupem ke konkrétním fázím, a sice pomocí Eulerova či Lagrangeova přístupu. Lagrangeovy částice mohou v FDS reprezentovat více druhů částic, pro tuto práci se však uplatní především pro kapky vodní mlhy. Tryska a její výstřikový kužel jsou mj. specifikovány konečným počtem částic dopravených do modelovaného prostoru. Automaticky nastavený počet částic dopravených do prostoru každou sekundu je 5 000, je však možné je uživatelem změnit. [28] Zvýšení počtu částic v modelů však způsobí nárůst výpočetní náročnosti a s tím i času. Pohybuje-li se však uživatel na opačné straně spektra ve snaze o úsporu času, mohou modely ve svých výsledcích generovat chybné výsledky. Snížením počtu částic se ovšem nesnižuje průtok, pouze počet kapek, které reprezentuje kužel vodní mlhy. V modelu je následně sledován pohyb každé částice v čase a prostoru se současným sledováním vlivu působících sil, jak je naznačeno na obr. 9. [15][24]

Eulerův přístup popisuje naopak plynné fáze, mezi něž patří spaliny či okolní vzduch a uvažuje je jako kontinuum. Jednotlivé změny sledovaných veličin jsou charakterizovány v kontrolních objemech obvykle mnohem větších, než jsou Lagrangeovy částice. To je znázorněno na obr. 10. Je-li však sprej velmi hustý, dochází ke vzájemným interakcím mezi jednotlivými kapkami vodní mlhy a je možné, že dojde ke změně jeho aerodynamických vlastností. Předpoklad je takový, že k tomuto jevu dochází. Problémem popisu vzájemné interakce částic v Euler-Lagrangeově modelu je v tom, že mřížka bývá v případě vodní mlhy několikanásobně větší, než uvažované částice. Eulerovy kontrolní objemy v sobě proto nezohledňují Lagrangeovy částice vzhledem k jejich malým rozměrům a zároveň je vzdálenost dvou částic obvykle několikrát menší, než velikost výpočetní sítě.[29] [20]



Obrázek 9: Largrangeův přístup k částicím (převzato z[15])



Obrázek 10: Eulerův přístup k částicím (převzato z[15])

Tryska vodní mlhy je definována pomocí kombinace různých oddílů – příkazů. Z pohledu běžného pozorovatele se může zdát vhodné nejprve definovat umístění trysky v modelovaném prostoru, její orientaci, či podmínky pro její spuštění, samotné vlastnosti trysky, konkrétně její výstřikové charakteristiky, které často vychází z technického listu daného výrobcem. Principiálně tedy od obecného popisu dále postupovat až k popisu vlastností částic, které budou trysku opouštět, kde by posledním bodem ve specifikování mlhového SHZ byl popis hasebního média.

Ve zdrojovém kódu, který je popsaný níže, je řazení příkazů uvedeno naopak. Nejprve je definována látka jako taková a pomocí ní následně popsané částice. Při popisu trysky se příkaz odkazuje na pospané částice a nakonec je specifikováno umístění již popsané trysky. Nicméně program je schopen příkazy vyhodnotit bez ohledu na jejich souslednost. Níže jsou popsané vlastnosti, funkce a vliv některých příkazů použitých v experimentální části na hasicí účinnost vodní mlhy.

&SPEC

V tomto oddíle „Species Parameters“ jsou především příkazy popisující chemické složky, na něž se poté tryska odkazuje. Některé prvky, mezi něž patří i voda a vodní pára, jsou již v FDS definovány a není je proto nutné popisovat jejich termofyzikálními vlastnostmi.

ID	Pro využití u sprinkleru, či mlhového SHZ se používá 'WATER VAPOR'. Do výsledného množství vodní páry se uvádí kromě vodní páry z trysky také pára, která vzniká jako produkt hoření. Pro možnost izolace těchto jevů je možné sledovat vodní páru pouze z trysky pomocí 'WATER VAPOR SPK'.

&PART

Zde v oddíle „Lagrangian Particle“ je možné specifikovat Lagrangeovy částice. Ty mohou být v modelu pouze jako nehmotné částice sloužící primárně v postprocesoru pro vizualizace nějakého jevu (MASSLES=.TRUE.), jako části pevných těles, které jsou menších rozměrů, než je definovaná výpočetní síť, či jako kapky kapaliny.

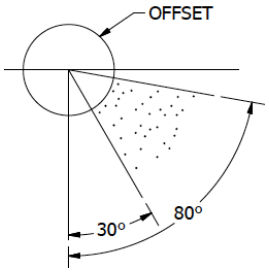
ID	Název, který reprezentuje částice.
SPEC_ID	Specifikace použité látky pro kapky. V případě využití pro částice pevných látek se využívá SURF_ID.
INITIAL_TEMPERATURE	Tímto příkazem je specifikována teplota kapek v moment aplikace do prostoru [°C].
DIAMETER	Definuje průměr kapek [μm]. Obecně je to hodnota mediánu kumulativní křivky dle objemu, což znamená, že polovina objemu dopraveného do prostoru má menší průměry, než je medián). Tento příkaz je velmi důležitý pro případy, kdy uživatel požaduje, aby se kapky vypařovaly.
MAXIMUM_DIAMETER, MINIMUM_DIAMETER	Hranice průměrů je možné definovat příkazy maximální a minimální hodnotou průměru, čímž je možné eliminovat příliš velké kapky. Hodnota minima je v FDS automaticky definována jako $D_{v,0,5}/200$. Toho můžeme využít především v případě vodní mlhy, která je definována mj. tím, že 99 % kapek má menší průměr než 1 mm.
MONODISPERSE	Hodnotou .TRUE. lze nastavit všem částicím stejnou velikost, s využitím rozměru definovaného příkazem DIAMETER.

DISTRIBUTION	V FDS je možné využít automaticky nastavenou kombinaci lognormální a Rosin-Rammelerovy funkce rozdělení ('ROSIN-RAMMLLER-LOGNORMAL'), případně využít pouze 'ROSIN-RAMMLLER' či 'LOGNORMAL'. Volba distribuce je velmi náročná a může do velké míry ovlivnit hasicí účinnost vodní mlhy. Tyto funkce se dají dále blíže upravovat, využitím parametrů σ sigma a γ gama.
SIGMA_D, GAMA_D	Parametr σ, udávající rozptyl funkce, se používá pro funkci Lognormální distribuce, kde čím je menší hodnota σ, tím více kapek se blíží zadané hodnotě mediánu. Naopak čím větší je hodnota γ, tím menší je rozptyl velikosti kapek kolem mediánu – distribuce bude hladší. Parametr γ se vztahuje především k Rosin-Rammlerově funkci. Příkazy σ a γ mají v FDS automaticky hodnotu 0,48 resp. 2,4.
CHECK_DISTRIBUTION	Při zadání .TRUE. proběhne výpis funkce kumulativní křivky distribuce velikosti částic do samostatného souboru dle počtu a objemu.
QUANTITIES	Zde je možné definovat různé barvy zobrazení ve Smokeview Podle rychlosti, průměru aj. užitím: 'PARTICLE DIAMETER', 'PARTICLE MASS', 'PARTICLE VELOCITY', 'PARTICLE TEMPERATURE' apod.
AGE	Pomocí tohoto příkazu je možné definovat, po kolika sekundách se kapka přestane simulovat a zohledňovat.

&PROP

V oddílu „Device Properties“ se zadávají veškeré parametry, které se týkají trysky mlhového SHZ (případně detektorů tepla či kouře aj.). Většinu těchto parametrů lze nalézt v technickém listu výrobce. Pro definici vlastností se používá pro mlhovou trysku obdobných příkazů jako pro trysku sprinkleru. Zadává se např. pracovní tlak, K faktor, průtok, úhel výstřiku, a velikost kapek.

ID	Název, který reprezentuje konkrétní trysku.
PART_ID	Odkazuje na částice, které jsou pro danou trysku použity
SPRAY_ANGLE	Dvě hodnoty úhlů ve stupních, které udávají tvar výstřikového kužele. Znázornění první a druhé velikosti úhlu viz obr. 11. Jedná-li se o plný úhel, první hodnota bude rovna 0.



Obrázek 11: Znázornění vnitřního (30°) a vnějšího (80°) úhlu a příkazu OFFSET (převzato z [28])

OPERATING_PRESSURE	Zadaná hodnota definuje pracovní tlak [bar] v potrubí.
K_FACTOR	Tímto příkazem definujeme průtok vody na trysce [l/(min·bar^{0,5}]. Většího významu nabývá především při zapojení více trysek k jejich vzájemnému srovnání.
FLOW_RATE	Průtok vody [l·min^{-1}], který lze zadat napřímo využitím flow rate, či pomocí pracovního tlaku a K-faktoru využitím vztahu $K \cdot \sqrt{p}$.
OFFSET	Poloměr pomyslné koule [m] obklopující trysku, kde je uvažováno spojené proudění kapek. Za její hranicí dojde k roztříštění a samostatnému transportu kapek. Tato tryska je znázorněna spolu s výstřikovým úhlem na obr. 11. Automaticky nastavená hodnota programem FDS je 0,05 m.

&DEVC

Oddíl „Device Parameters“ je možné použít pro širokou škálu využití, mezi něž patří např. trysky SHZ, zařízení, která v modelu fungují jako termočlánek zaznamenávající teplotu v daném místě modelovaného prostoru, případně měřicí zařízení pro tepelný tok.

Významnou roli v tomto oddíle tedy zastává příkaz QUANTITY, kterým lze definovat jaké veličiny a v jakém místě chce uživatel zařízením sledovat a v podobě záznamů přesných hodnot v jednotlivých časových krocích jej poté dostat. Díky tomu, že jsou tato zařízení schopna zaznamenat teplotu či jiné veličiny, je možné využití např. pro kouřové a teplotní detektory.

ID	Slouží pro identifikaci konkrétní trysky.
PROP_ID	Trysce přiřadí vlastnosti specifikované v oddíle &PROP.
XYZ	Definuje pozici trysky v prostoru pomocí pravoúhlých souřadnic.
ORIENTATION	Příkaz pro nastavení orientace zařízení, automaticky je bez zadání hodnot nastavený na (0,0,-1).
QUANTITY	Určuje, čím bude tryska spuštěna př. TIME, TEMPERATURE, případně může mít funkci termočlánku ('THERMOCOUPLE') nebo sloužit jako měřící zařízení pro účely jako sledování průměrů částic v určitém prostoru ('PDPA'). Tohoto příkazu lze také využít pro zaznamenání teploty zadáním parametru 'TEMPERATURE'.
SETPOINT	Možnost nastavení rychlosti spuštění dle specifikace v jednotkách dle specifikace sledované veličiny v příkazu QUANTITY.
INITIAL_STATE	Definuje, zda počáteční stav daného prvku bude odpovídat tomu, k čemu byl vytvořen, či jeho funkci chceme nějakým způsobem podmínit jinou akci jako např. aktivace až po 5 s, v oddíle &DEVC bude mimo jiné specifikace napsáno: QUANTITY='TIME', SETPOINT=5, INITIAL_STATE=.TRUE.

2.5.5 Modelace hašení

Hašení jako takové je výsledkem několika různých jevů, které ovlivňují v závislosti na probíhajících dějích schopnost látek více či méně pokračovat v procesu hoření. Mezi takové jevy patří (především v této práci) např. snižování teploty povrchu paliva vodními kapkami, ředění hořících plynů vodní párou a s tím související vytlačování kyslíku, ředění paliva při dopadu kapky na povrch a další jevy, které jsou podrobněji popsány v kapitole 2.3.3. Kapka po dopadu na povrch vytvoří tenký film (viz obr. 4) a obvykle polovinou svého objemu sdílí teplo a hmotu s povrchem a druhou polovinou s okolními plyny.

V programu FDS je hoření definováno dostatkem paliva a kyslíku za současné dostatečné teploty. V případě, že dojde k poklesu pod limitní hodnotu těchto parametrů umožňujících hoření, nastává v konkrétní buňce konec procesu hoření – uhašení. Hašení probíhá v FDS odlišně v závislosti na typu paliva a tom, jak bylo hoření uživatelem definováno.

Pokud byly kapalnému či pevnému palivu definovány termofyzikální parametry v příkazech oddílu &MATL, pro potlačení hoření není potřeba žádných bližších specifikací, jelikož se předpokládá, že voda dopadající na povrch odebírá palivu energii z procesu pyrolýzy a tím snižuje rychlost hoření. Naopak v případě využití oddílu &SURF a v něm příkazu HRRPUA hašení probíhá tak, že je nejprve nutné specifikovat parametr řídící potlačení hoření vodou. Nejedná se zde totiž o hoření jako takové, ale spíše hořák, jehož rychlost uvolněného tepla je pevně specifikována. Pro imitaci poklesu uvolňování tepla z hořícího materiálu se zavádí exponenciální rovnice (4), která vyjadřuje míru úbytku paliva na hořáku – $\dot{q}''(t)$. [28]

$$\dot{q}''(t) = \dot{q}_0''(t) \cdot e^{-\int k(t)dt} , \tag{4}$$

kde

$\dot{q}_0''(t)$ – uživatelem definovaná rychlost uvolňování tepla před hašením [W·m^{-2}]

k – funkce množství vody aplikované na plochu [s], vyjádřeno rovnicí (5)

$$k(t) = a \cdot m_w''(t) , \tag{5}$$

kde

a – empirická konstanta pro výpočet redukce úbytku paliva při hoření [m^2·kg^{-1}·s^{-1}] (v FDS označováno příkazem E_COEFFICIENT)

$m_w''(t)$ – množství vody dopadající na plochu [kg·m^{-2}]

2.5.6 Přehled tuzemského a zahraničního výzkumu

Téma diskutované v této práci se těší, především v posledních několika letech, velkému zájmu, a to především díky výraznému posunu ve výpočetní technice. Zkoumání hasicího účinku vodní mlhy a využití matematických modelů pro možnost detailního zkoumání tohoto procesu se staly předmětem spousty nejen vědeckých, ale také akademických prací u nás i v zahraničí. Vzhledem k množství zpracovaných prací v zahraničí na téma vodní mlhy je tato podkapitola zaměřena především na přehled tuzemských prací realizovaných v posledních několika letech

Z pohledu tuzemských prací bylo pro téma vodní mlhy zpracováno velké množství akademických prací na několika univerzitách, z nichž autoři některých prací pro posouzení účinků vodní mlhy využili také výpočetní techniky a programu FDS. Příkladem by mohly být dvě diplomové práce z VŠCHT autorek Čmelíková a Pechová pod vedením M. Jahody, které se ve svých pracích věnovaly ověření svých numerických modelů vytvořených v programu FDS.

Modely autorek se zabývaly především schopností modelace vodní mlhy, sdílení tepla a případným hašením. T. Čmelíková měla svou práci [15] zaměřenou nejen na model hašení vodní mlhou, ale také na model sdílení tepla mezi plynnou fází a pevným tělesem. Pro ověření tepelného namáhání pevného tělesa byl realizován experiment zahřívání ocelové trubky, který byl následně modelován a po postupném zpřesňování vykazoval poměrně vysokou míru shody i přes to, že kruhový průměr musel být vymodelován v pravoúhlé soustavě. M. Pechová ve své práci [20] mj. vhodně poukázala na možnost nestability systému při modelaci odpaření, která nastala při modelech velkorozměrové zkoušky.

Nedávno vznikly také práce na ČVUT v Praze pod vedením M. Pokorného autorů Eliáše [30] a Trska [18], které byly zaměřeny více na popis vodních clon a jejich schopnosti na izolaci tepelného toku. Eliáš se ve své práci věnoval chladicím i hasicím účinkům vodní mlhy. Při hašení na základě různých způsobů umístění trysky zkoumal hasicí účinky a výsledkem jeho pozorování bylo mj. i to, že na uhašení stačí i jedna tryska, která navíc nemusí být umístěna přímo nad ohniskem, důležité však je mít v modelovém prostoru uzavřené otvorové výplně. V opačném případě se sice vodní mlha chová velmi účinně co se potlačení týče, není však schopna požár uhasit.

V práci [30] jsou také srovnány hasicí účinky vodní mlhy se sprinklerovými SHZ. Ve druhé části autor poukázal na výborné ochlazovací schopnosti trysky vodní mlhy na ocelový nosník, čímž by se mohlo docílit delší požární odolnosti prvku. Toto tvrzení také podpořili M. Pokorný, M. Eliáš a F. Kregl ve svém článku [16].

Poznatky obsažené v odborném článku [31] byly využity v experimentální části této práce jako podpůrný materiál pro popis trysky vodní mlhy v programu FDS, jelikož v realizovaném experimentu byla použita totožná tryska, jako pro následné požární zkoušky této práci. Autory zvolené parametry trysky byly experimentálně ověřeny a vykazovaly vysokou míru shody.

Trsek ve své práci [18] dospěl na základě výsledků k tomu, že pro návrh vodní clony hraje klíčovou roli velikost a hybnost kapek. Tyto faktory nejvýznamněji ovlivnily prostup radiace a proudění vzduchu v okolí kužele, které by mohlo i přesto, že nemá na šíření tepla takový vliv, nepříznivě ovlivnit tvar výstřikového kužele.

Zkoumání vodní mlhy se těší velkému zájmu i z hlediska sledování míry její účinnosti s různými příměsemi do vody. Shrnutí několika různých příměsí se věnoval např J. Hiltz ve své práci [32], kde vyzdvihuje vysokou míru účinnosti solí alkalických kovů, poukazuje však také na negativum, v podobě produkce toxických plynů a způsobení koroze při nedostatečné údržbě systému. T. Zhang se spolu s dalšími autory věnovali ve své experimentální studii [33] tomu, jak mohou draselné soli zvýšit efektivitu hašení, a Q. Chen a kol. se věnovali ve své práci [34] nalezení ideálního aditiva a správného poměru pro co nejefektivnější uhašení metanu. Jako další práce podobného charakteru lze uvést např. [35] či [36].

Pozornost při studiu problematiky vodní mlhy v odborných publikacích byla upřena především k hořlavým kapalinám. Jedním z vhodných případů by mohl být odborný článek [37] zabývající se hašením n-heptanu vodní mlhou. Rozhodnuto o modelaci hoření kapalin bylo nejen kvůli skutečnosti, že by bylo poměrně obtížně odizolovat samotný vliv vodní mlhy, pokud by bylo v matematickém modelu využito pevného paliva, ale také proto, že proces hoření pevného paliva je náročný z hlediska popisu probíhajících reakcí, a tedy i pro samotnou modelaci.

Jak již bylo zmíněno, pro sestavení realistického modelu hoření pevných látek je nutné znát přesné složení se všemi svými požárně technickými charakteristikami, což je především v případě heterogenních materiálů, jakým je např. dřevo, náročné. Plynné palivo je naopak náročné pro případné experimentální ověření modelu. Požáry hořlavých kapalin jsou tak nejen při studiu vodní mlhy zajímavým tématem, kterému se ve svých pracích věnovala nemalá část autorů. Modely hoření, které využívají v experimentech palivo v obvykle ocelových nádobách jsou označovány jako tzv. pool fire, naopak palivo vstřikované do prostoru nese označení „jet fire“.

3 Experimentální část

Experimentální část této práce byla věnována především ověření teoretických znalostí získaných studiem vodní mlhy a jejího chování při požáru spolu s ověřením použitelnosti a limitů softwaru FDS. V průběhu zpracování práce bylo autorem realizováno několik různých experimentů v požární laboratoři v UCEEB, ČVUT v Praze. Tyto experimenty sloužily především pro demonstraci míry vlivu změn různých vstupních parametrů na hasicí schopnost vodní mlhy.

Mezi měněné parametry patřila především vzdálenost trysky vodní mlhy od hořlavé kapaliny, plocha nádob, v níž se kapalina nacházela a druh kapaliny. Využito bylo etanolu a následně také n-heptanu jako paliva. Experimentální část byla také věnována popisu zhotovených matematických modelů, zdůvodněni volby jednotlivých parametrů a pozorování průběhů teplot s následným srovnáním shody či případné neshody experimentálních měření a matematického modelu.

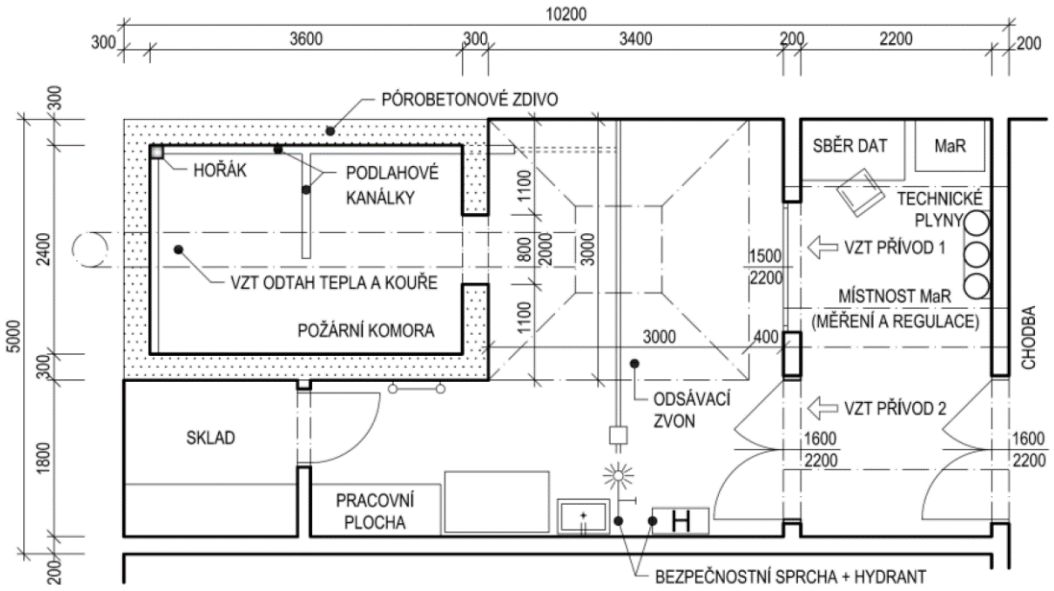
3.1 Experimentální posouzení účinnosti vodní mlhy

Tato část se zabývala validační studií matematického modelu, v tomto případě však bylo k validaci využito dat, které byly získány autorem této práce. Experimenty byly realizovány v průběhu jednoho dne v požární laboratoři Univerzitního centra UCEEB, ČVUT v Praze.

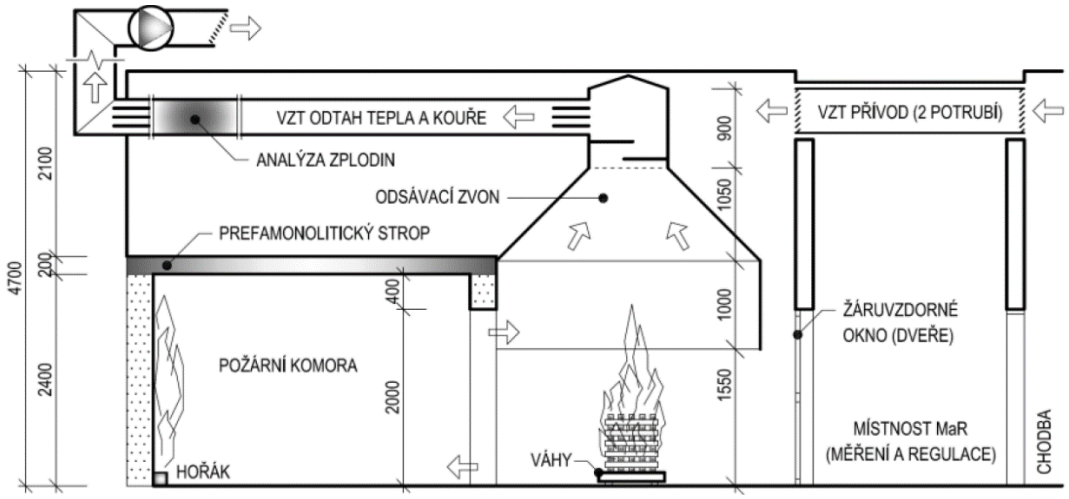
Nejprve byl sledován průběh volného hoření paliva. Na základě něj bylo stanoveno, že po přibližně 60 s bude nejvhodnější aplikovat vodní mlhu a sledovat hasicí účinek. Vodní mlha byla aplikována na různé typy paliva s proměnnou výškou umístění nad nádobou. Jako palivo byl použit etanol a n-heptan. Mezi jednotlivými experimenty byla nádoba s etanolem umístěna na digitální váhu a byl sledován úbytek hmoty v čase.

3.1.1 Příprava experimentů

Experimenty se uskutečnily dne 8. 12. 2020 v požární laboratoři v Buštěhradě. Laboratoř je vybavena zkušebním zařízením pro velkorozměrovou požární zkoušku (tzv. room corner test), samotný experiment se však neodehrával uvnitř samotného zařízení, ale pod odsávacím zvonem, který je jeho součástí. Stavební výkresy požární laboratoře jsou na obr. 12 a 13. Do místnosti, kde se zkušební zařízení nachází, byly otevřené dveře a bylo také v provozu centrální vzduchotechnické zařízení, které nebylo možné ovládat. Přísun vzduchu nebyl nijak omezen a docházelo tak v průběhu experimentů k přirozené výměně plynů. Teplota uvnitř místnosti se pohybovala mezi 19,8 a 20 °C.

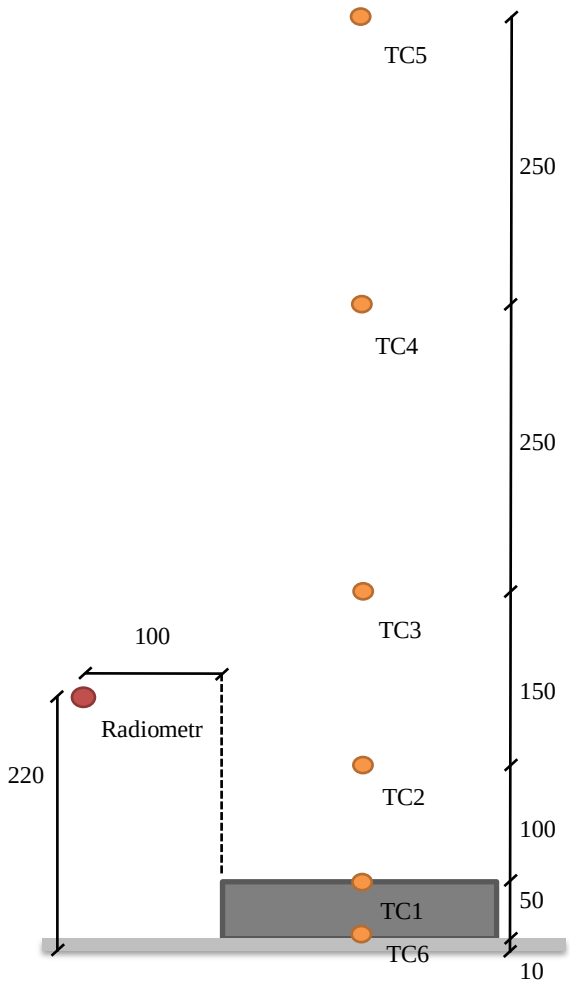


Obrázek 12: Půdorys požární laboratoře UCEEB, ČVUT Prha (převzato z [30])



Obrázek 13: Řez požární laboratoří UCEEB, ČVUT Prha (převzato z[30])

Pod odsávacím zvonem ve zkušební místnosti tedy bylo umístěné veškeré zařízení, které bylo využito pro uskutečnění experimentů. Čtvercová ocelová nádoba o vnitřních rozměrech 20 x 20 x 5 cm a tloušťce oceli přibližně 2 mm byla umístěna na kalcium-silikátové požárně ochranné stavební desce, aby bylo zabráněno výraznější tepelné výměně mezi nádobou s kapalinou a povrchem, na němž byla nádoba umístěna. Sledování průběhu teploty bylo umožněno celkem šesti termočlánky (dále jen TC) umístěnými do úrovně půdorysného středu nádoby ve vzájemných vzdálenostech dle obr.14. Pro zaznamenání rychlosti uvolňování tepla bylo využito vodou ochlazovaného radiometru. V případě použitého TC6 však není zcela jistá validita naměřených výsledků. Tloušťka vrstvy kapaliny byla velmi nízká a nebylo proto možné zaručit, kdy byl TC6 umístěn v kapalině a kdy už nikoliv.



Obrázek 14: Schéma umístění nádoby a vzdálenost měřících aparátů pro experiment [mm]

Použitá paliva

V experimentech bylo využito jako paliva hořlavých kapalin etanolu a n-heptanu. Jejich základní vlastnosti jsou popsány v tab. 3.

Tabulka 3: Fyzikální a chemické vlastnosti použitých hořlavých kapalin [38, 39]

Fyzikální a chemické vlastnosti	**etanolu**	**n-heptanu**
sumární vzorec	C_2H_6O	C_7H_{16}
hustota (při 20°C)	0,79 g·cm^{-3}	0,68 g·cm^{-3}
teplota vzplanutí	17 °C	-4 °C
teplota vznícení	366 °C	220 °C
Sspalné teplo	29,8 MJ·kg^{-1}	48,1 MJ·kg^{-1}
teplota varu	78 °C	96,5-98,5 °C

3.1.2 Popis použitých měřidel a trysky vodní mlhy

Při experimentu bylo využito celkem 6 plášťových TC, 1 radiometru a 1 trysky. Před započetím instalace TC na jejich místa byla provedena zkouška provozuschopnosti a přesnosti měření použitých TC, čímž bylo možno eliminovat případně chyby v měření na straně TC. Zároveň byla ověřena funkčnost přenosu informací mezi TC, datalogerem a softwarem, který data zaznamenával do datového souboru (*.DAT).

Radiometr byl na základě několika počátečních kalibračních měření hodnot rychlosti uvolňování tepla umístěn do takové vzdálenosti, aby mohl být tepelný tok, který se při hoření uvolňoval, zaznamenán co nejpřesněji, a sice 10 cm od středu hrany nádoby a ve výšce přibližně 22 cm nad povrchem. Vzhledem k vysokým teplotám působícím v přítomnosti radiometru bylo nutné opatření, které zamezí poškození přívodních kabelů a hadiček s vodou. K tomuto účelu bylo využito minerální vlny s přidanou izolační vrstvou. Proměnná výška umístění trysky vodní mlhy je popsána v konkrétních experimentech.

Termočlánky

Pro veškerá měření byly použity plášťové TC typu K o tloušťce 2 mm. Každý z použitých TC je tvořen dvojicí elektricky vodivých drátů různého chemického složení. TC skládající se ze specializované slitiny Inconel, vycházející ze základní slitiny niklu a chromu s obsahem hliníku, díky čemuž jsou TC vysoce odolně proti korozi a vysokým teplotám.

TC fungují na principu rozdílných napětí vznikajících na jednotlivých koncích. Při zahřátí spoje těchto dvou drátů na teplotu vyšší, než je teplota opačného konce drátu, vzniká elektromotorická síla – termočlánkové napětí. Srovnávací spoj se udržuje na konstantní teplotě a měří se rozdíl teplot obou konců. Pro sběr měření těchto odporů vzniklých rozdíly teplot se využívá kompenzační krabice (datalogeru) s můstkovým zapojením tepelně závislého odporu, kde následně dochází za pomocí softwaru k převodu na teplotu.

Radiometr

Radiometr měří záření přijímané rovnou plochou z úhlu zorného pole 180°. Radiometr, konkrétně při experimentu použitý typ SGB01, je navržen pro měření vysokých tepelných toků a zaznamenává přenos energie kondukcí či radiací. Přesnost měření míry radiace závisí na kosinu úhlu dopadu záření na čidlo. Ideální je kolmo na snímač, poloviční odezvy dosáhne při 60° úhlu dopadu. Za účelem dosažení správných směrových a spektrálních charakteristik je pro příjem záření použito vodou chlazené kovové tělo, jež funguje jako chladič a tepelný senzor s černým povrchem, který má téměř dokonalou směrovou odezvu a neodráží žádné tepelné záření. Povlak absorbuje veškeré záření a v okamžiku absorpce jej přemění na teplo. Teplo proudí interním termočlánkovým senzorem do kovového tělesa. Čidlo termočlánku generuje výstupní napěťový signál, který je úměrný ozáření.

Tryska CSFH 11

Ve všech experimentech s vodní mlhou byla použita nízkotlaká mlhová tryska CSFH 11 viz obr. 15, od společnosti TELESTO, která byla napojena pomocí dalších zařízení na čerpadlo. Celkový tlak v systému byl po veškerých ztrátách v potrubí a ve spojích změřen těsně před umístěním trysky na hodnotu 13,5 bar. Specifikace trysky, které definují její hasicí účinnost jsou popsané v tab. 4.

Tabulka 4: Specifikace výstřikových charakteristik trysky dle technického listu výrobce

Specifikace výstřikových charakteristik trysky CSFH 11	
pracovní tlak	13 bar
K faktor	2,15
střední velikost kapek	60
tvar proudu	kónický
rychlost	42,8
úhel vodního kužele	30°

Obrázek 15: Tryska CSFH 11 použita při experimentech

3.1.3 Průběh experimentu a jeho výsledky

Kromě kalibračních měření, do nichž bylo zahrnuto i samotné volné hoření etanolu a zkouška uvedení vodní mlhy do provozu pro zjištění tlaku, bylo navíc realizováno celkem 13 měření s různými proměnnými. Poslední ze třinácti měření však bylo spíše pro zajímavost. Jelikož nebylo použito čerpadla, nebyl pro toto měření stanovený tlak v potrubí a měření tlaku již nebylo uskutečněno primárně z časových důvodů, sekundárně však proto, že ani s výrazně nižším tlakem a celkem třemi nádobami s hořlavou kapalinou nebylo tak obtížné kapalinu uhasit.

V počátečních experimentech bylo využito etanolu jako paliva, po průběžných výsledcích experimentu bylo využito také n-heptanu pro své, s ohledem na experiment, vhodnější charakteristiky v oblasti hoření. Dále se v průběhu měření měnila velikost nádob, množství paliva či vzdálenost trysky od hořlavé kapaliny. Jednotlivé experimenty jsou dále v této práci blíže popsány. Pro eliminaci případných chyb v měření, či odhalení neobvyklého chování ze strany hořlavé kapaliny či vodní mlhy, byla některá počáteční měření provedena třikrát. Pro lepší orientaci v experimentech byla vytvořena tab. 5 s heslovitým popisem experimentů, které byly provedené v časové souslednosti.

Tabulka 5: Seznam a očíslování jednotlivých experimentů s vysvětlením

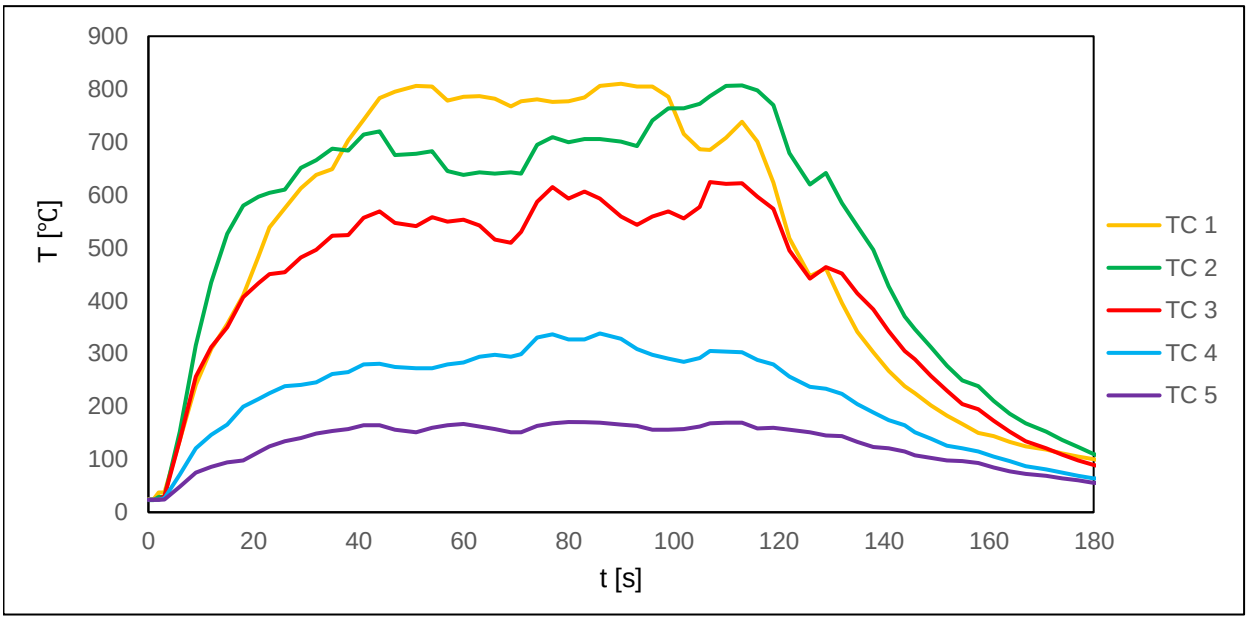
Heslovitý popis jednotlivých uskutečněných experimentů	
0	volné hoření etanolu (3 opakování)
1	hašení etanolu, tryska ve výšce 0,5 m (3 opakování)
2	hašení etanolu, tryska ve výšce 0,75 m (3 opakování)
3	hašení n-heptanu, tryska ve výšce 0,75 m
4	hašení etanolu, tryska ve výšce 1,0 m
5	hašení n-heptanu, tryska ve výšce 1,0 m
6	hašení etanolu, tryska ve v výšce 1,0 m, 3 nádoby (100, 100, 70 ml)
7	hašení n-heptanu, tryska ve výšce 1,0 m, 3 nádoby (100, 100, 70 ml)
8	hašení n-heptanu, tryska ve výšce 1,0 m, 3 nádoby (150, 150, 100 ml)

Pozn: Výška je měřena od horní hrany nádoby s palivem, viz také obr 14.

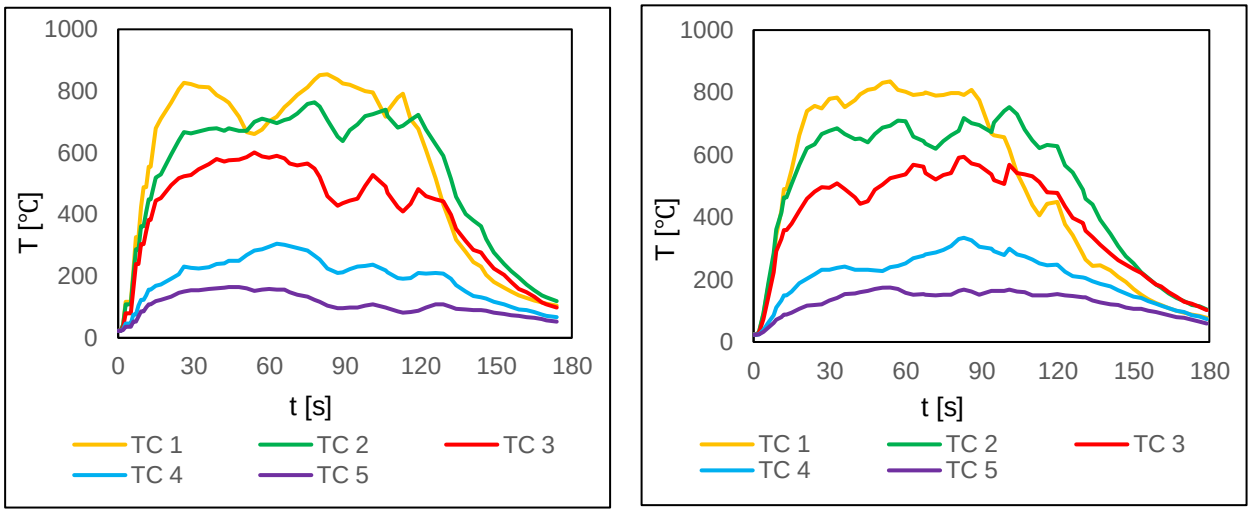
Volné hoření etanolu

Pro získání referenčních hodnot pro další experimenty, zjištění ideální doby pro započetí hašení vodní mlhou a zároveň pro jednoduchý model, na němž bude možné porovnat průběh teplot při samotném hoření etanolu s matematickým modelem, bylo pozorováno před započetím veškerých experimentů implementujících vodní mlhu volné hoření etanolu. Etanol o objemu 100 ml byl umístěn ve čtvercové ocelové nádobě, nad jejímž středem byly umístěny TC ve vzájemných vzdálenostech dle obr. 14.

Zápis dat z měření byl započat již po vlití etanolu do nádoby, následovalo přibližně minutové měření pro stabilizování okolních podmínek a měřidel a po minutě se palivo zapálilo. Hoření nebylo nijak usměrňováno ani hašeno. Experiment byl ukončen samotným vyhořením celého objemu paliva, což trvalo přibližně 3 min. Stejně jako při některých dalších měřeních byl tento experiment proveden celkem třikrát. Jednotlivé průběhy teplot v těchto třech opakováních jsou znázorněny v grafech na obr. 16 a 17 a), b).



Obrázek 16: Průběh teplot v TC u 1. volného hoření etanolu (experiment č. 0)

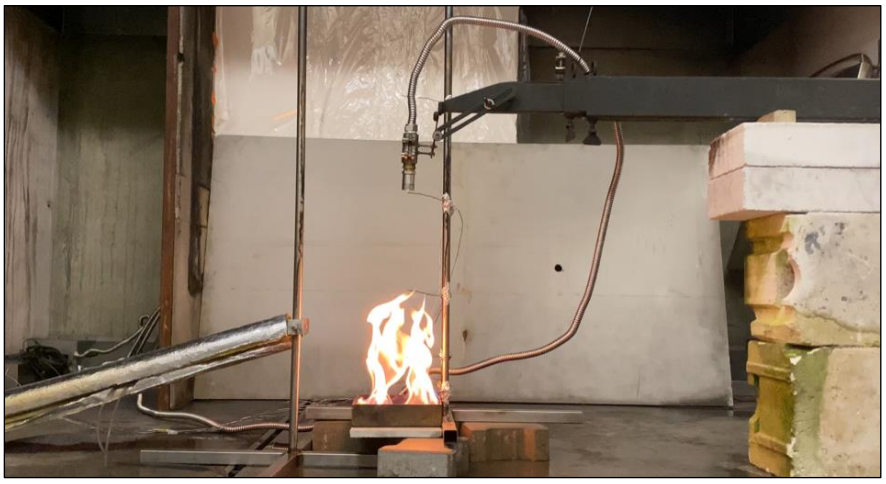


Obrázek 17: Průběh teplot v TC u a) 2. opakování a b) 3. opakování volného hoření etanolu

Byť byla kapalina vždy odměřena, je možné, že někdy došlo ke kompletnímu vyhoření o něco dříve než v ostatních případech. To je možné pozorovat na obr. 17 b) – u posledního opakování volného hoření etanolu, kde je patrné, že došlo vyhoření někdy po minutě a půl, zatímco v ostatních případech klesala teplota v TC1 až kolem druhé minuty. Na všech modelech volného hoření lze pozorovat předpokládanou linearitu poklesu teploty po vyhoření většiny paliva, jak bylo popsáno v teoretické kapitole této práce.

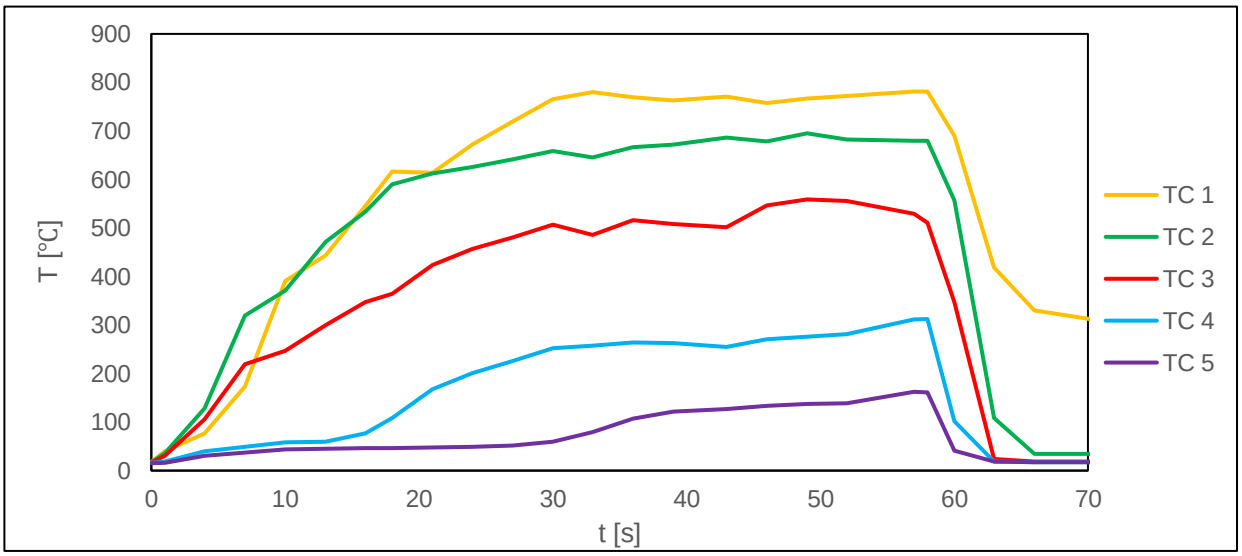
Etanol – hašeni vodní mlhou

Na základě pozorování průběhu teplot při volném hoření 100 ml etanolu bylo rozhodnuto o spuštění vodní mlhy po minutě od začátku volného hoření. Tryska vodní mlhy byla nejprve umístěna v úrovní TC 4, a sice 50 cm nad hranou nádoby s hořlavou kapalinou. Byla uskutečněna celkem 3 opakování, při kterých se však mlha vždy chovala při hašení až příliš úspěšně a požár byl ve všech případech uhašen do sekundy od spuštění vodní mlhy. Bylo proto rozhodnuto o zvýšení úrovně umístění vodní trysky do úrovně TC 5, který je umístěn ve výši 75 cm nad hranou nádoby s palivem viz obr. 18. Výsledek byl však po této úpravě téměř totožný a kapalina byla uhašena opět velmi rychle, stejně jako při následném umístění trysky do výše 1 m.



Obrázek 18: Fotografie z průběhu hašení etanolu s tryskou ve výši 75 cm nad hranou nádoby

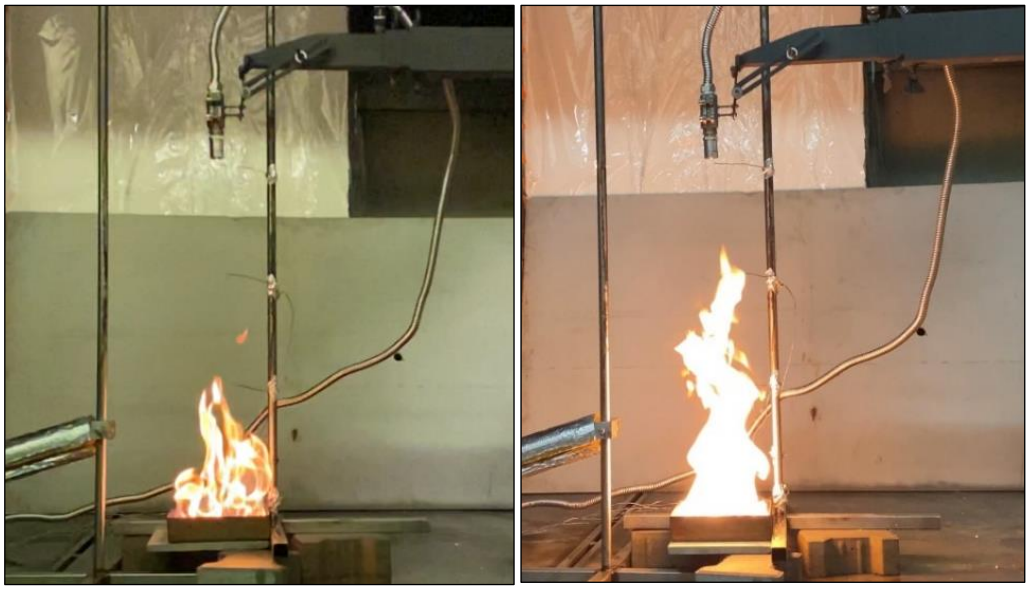
Pro reprezentaci výsledků z experimentů bylo rozhodnuto o prezentování veškerých průběhů hašení s tryskou ve výši 1 m, aby bylo umožněné srovnání rozdílů ve změnách jednotlivých parametrů. Na obr. 19 je znázorněn průběh hašení 100 ml etanolu vodní mlhou z trysky o výšce 1 m nad hranou nádoby. Ostatní výškové úrovně lze nalézt v přílohách práce.



Obrázek 19: Průběh teplot v TC u hašení etanolu s tryskou ve výši 1 m nad hranou nádoby (experiment č. 4)

N-heptan – hašení vodní mlhou

Ve snaze dosáhnout delšího trvání procesu hašení byl místo etanolu použit n-heptan ve stejném množství. Ve výšce trysky 75 cm byl realizován pokus se stejnými podmínkami jako v předcházejícím experimentu pro etanol. Bylo opět možné sledovat velmi rychlé uhašení, a proto byla tryska vodní mlhy umístěna opět výš o 25 cm. Ve výšce 1 m nad hranou nádoby byl však výsledek obdobný a palivo bylo opět velmi rychle uhašeno.

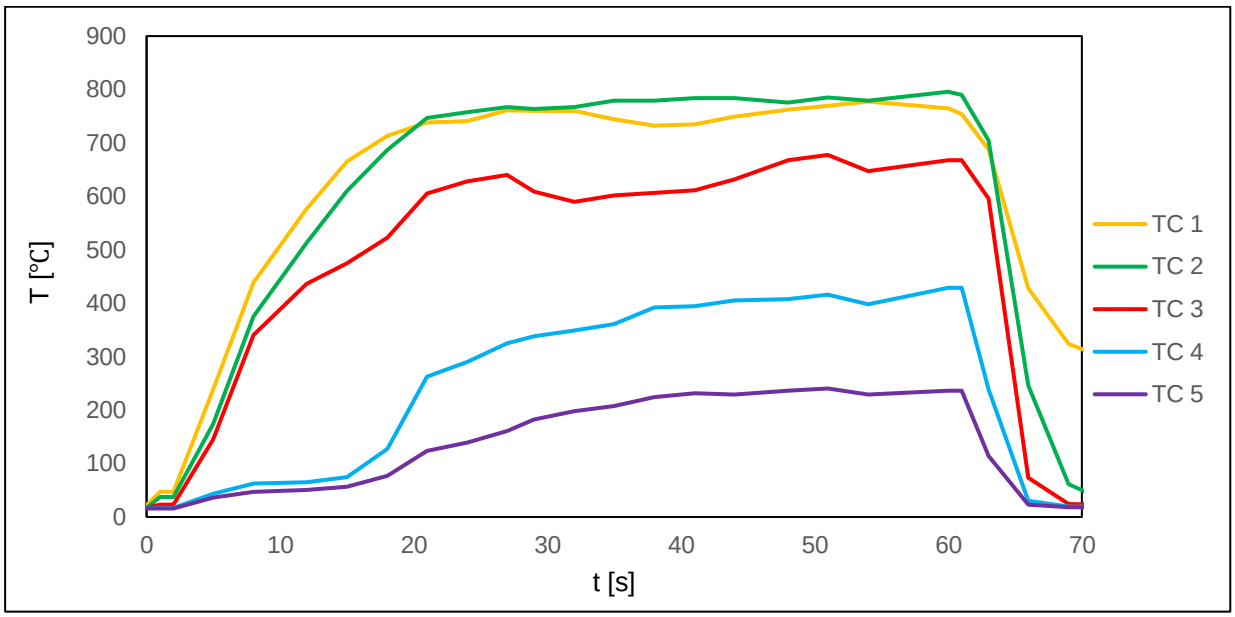


a) b)

Obrázek 20: Porovnání výše plamenů u a) etanolu a b) n-heptanu

Průběh teplot s tryskou ve výšce 1 m je znázorněn na obr. 21. Je patrné, že v případě n-heptanu jsou teplotní nárusty již na první pohled rychlejší než u etanolu, a navíc lze u všech TC kromě TC 1 pozorovat teploty přibližně o 100 °C vyšší.

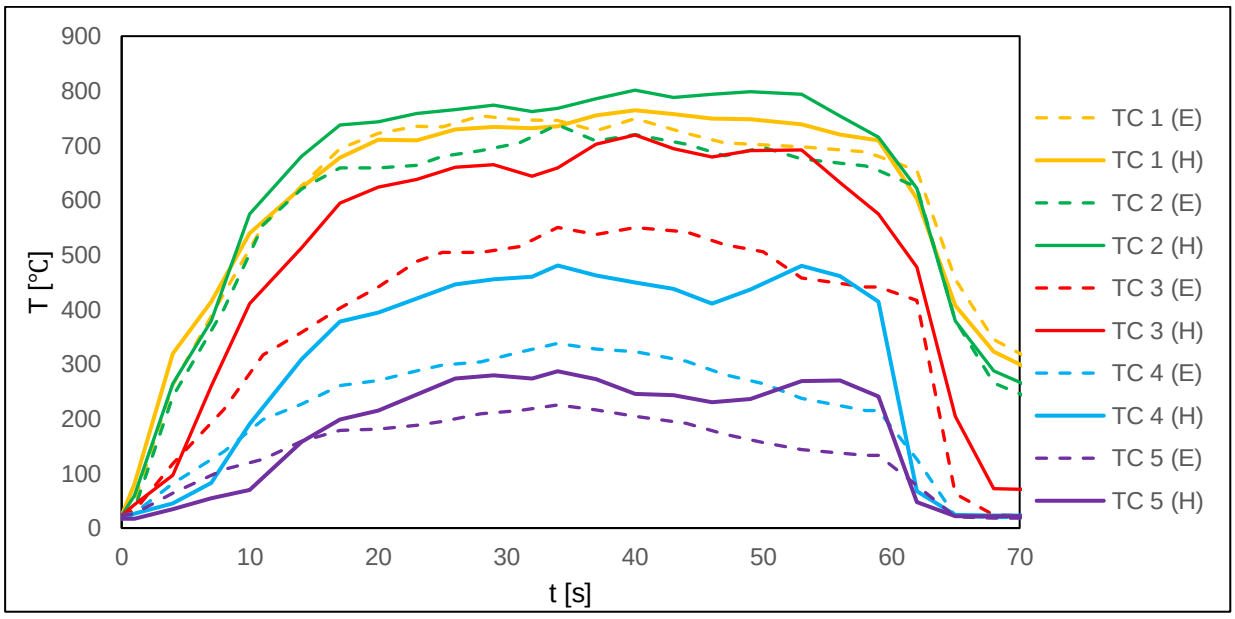
Již při samotném průběhu experimentu bylo patrné, že plameny sahaly výše a hoření bylo dynamičtější, průběhy tedy odpovídají předpokladům učiněným na základně výrazně vyšší hodnotě palného tepla. Fotografie pořízené v průběhu experimentů, které zachycují rozdíl ve výši plamenů z průběhu hoření etanolu a n-heptanu jsou na obr. 20 a) a b). Toto může být vysvětleno mj. výrazně vyšší hodnotou spalného tepla u n-heptanu.



Obrázek 21: Průběh teplot v TC u hašení n-heptanu s tryskou ve výši 1 m nad hranou nádoby (experiment č. 5)

Zvětšená plocha a objem paliva

Vzhledem k velmi vysoké účinnosti vybrané vodní trysky na hašení, bylo ve snaze o sledování delšího procesu hašení přistoupeno k aplikaci většího množství paliva s celkovou plochou 1,5 krát větší, než původních 0,04 m^2. Do tří nádob s rozměry 20 x 20 x 2 cm pro dvě čtvercové nádoby a 22 x 10 x 5 cm pro menší obdélníkovou nádobu bylo umístěno vždy dvakrát po 100 ml a jednou 70 ml kapaliny. S plochou zhruba 0,1 m^2 bylo nejprve sledováno hašení etanolu a následně n-heptanu s tryskou ve výši 1 m nad hranou nádob a TC v pomyslném středu těchto nádob.



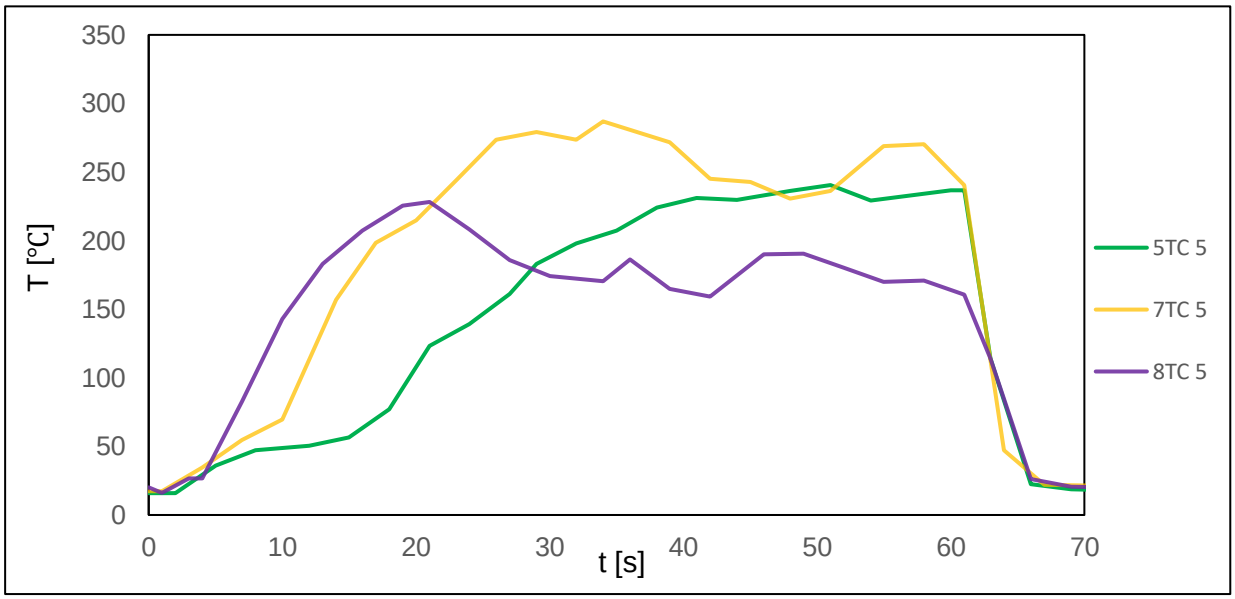
Obrázek 22: Srovnání průběhu teplot etanolu (E) a n-heptanu (H) při použití tří nádob s palivem (experiment č. 6 a 7)

Hašení doprovázel v obou případech výrazně větší plamen, palivo však bylo uhašeno opět velmi rychle. Srovnání n-heptanu a etanolu v případě využití tří nádob je znázorněno na obr. 22, přičemž průběhy teplot v TC při použití etanolu jsou v grafu znázorněny čárkovanou čárou, n-heptan plnou. Největší rozdíly teplot mezi jednotlivými kapalinami jsou ve výši 25 – 50 cm, tedy u TC3 a TC4. Zároveň je možné sledování výrazně pomalejšího chladnutí TC 1 a TC 2.

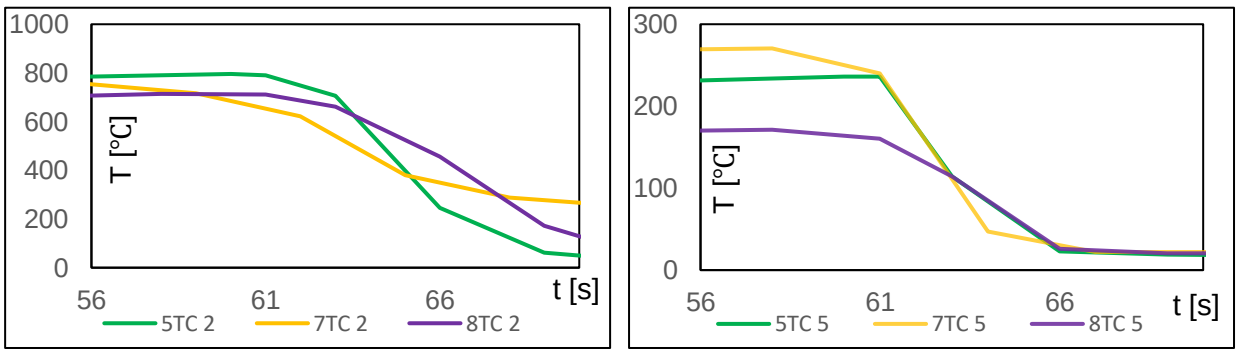
Sledování vlivu objemu n-heptanu na průběhy teplot

Pro zjištění míry vlivu jednotlivých změn množství paliva na průběh teplot při hašení n-heptanu byly sestrojeny obr. 23 a 24. Vzhledem k tomu, že je žádoucí sledovat především efekt hašení vodní mlhou, jsou na obr. 24 a) a b) znázorněny pouze průběhy teplot po započetí hašení. Znázornění celého průběhu pro obr. 24 a) a b) je možné nalézt v příloze této práce.

Z obr. 23 je znázorněn průběh teplot v TC 5. Na něm možné pozorovat větší rychlost poklesu teplot v případě menší plochy a také pomalejší nárust teploty pro menší plochu v počátku hoření, naopak rychlejší pokles teploty při hašení, což odpovídá předpokladům.



Obrázek 23: Srovnání průběhu teplot TC 5 na n-heptanu o různých objemech (experimenty č. 5, 7 a 8)



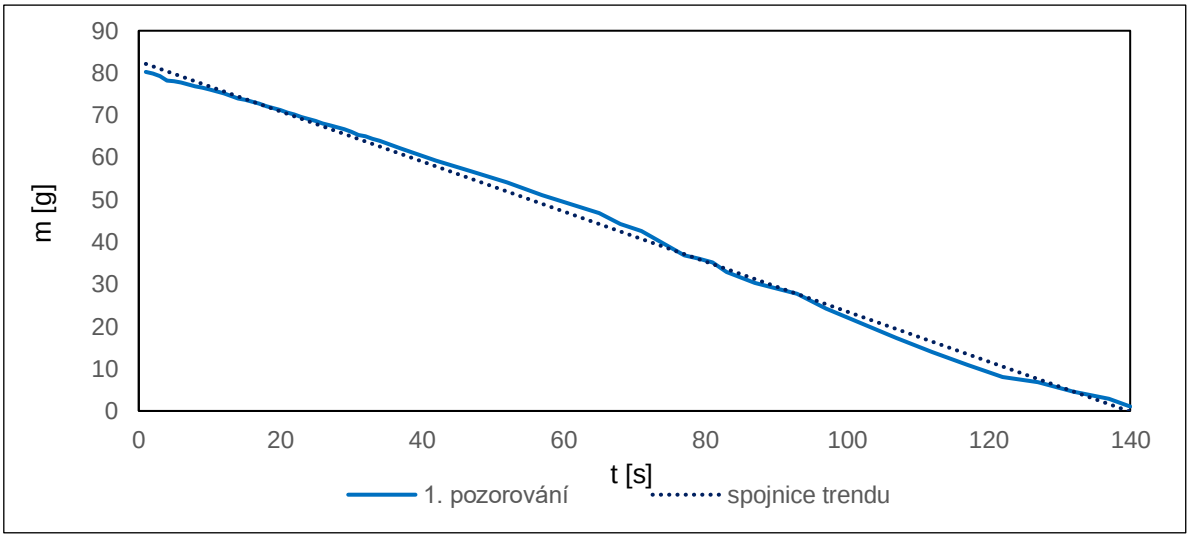
Obrázek 24: Pokles teplot u a) TC 2 a b) TC 5 při hašení n-heptanu o různých objemech paliva (experimenty č. 5, 7 a 8)

Měření rychlosti odhořívání etanolu

Jak již bylo zmíněno, v průběhu experimentů bylo také sledováno, jaká je rychlost odhořívání etanolu. Pro toto pozorování bylo využito digitální váhy Kern PCB 3500 s výrobcem uváděnou přesností na setiny gramu. Na váhu byla umístěna minerální vlna pro ochranu váhy před vysokými teplotami a na ni stejná čtvercová nádoba s kapalinou, která byla použita při dalších experimentech. Celý proces měření byl zaznamenán na video, z něhož bylo následně možné získat průběžná měření úbytku hmoty v čase. Toto sledování bylo provedeno celkem třikrát, vždy s objemem 100 ml etanolu.

Při pozorování úbytku v čase se jevila rychlost odhořívání jako lineárně závislá, nicméně při detailním zaznamenání změn hmotnosti v čase bylo patrné, že např. těsně před vyhořením zbytku kapaliny je úbytek hmoty mírně pomalejší, což lze zdůvodnit zmenšující se plochou, na níž probíhá hoření, naopak při počátku varu kapaliny v okrajích nádoby se rychlost nepatrně zvýšila. Závislost je však dále uvažována jako lineární, jelikož tyto jevy nebyly příliš výrazné. Toto rozhodnutí lze podpořit míra koeficientu determinace, která ve dvou ze tří případů přesahovala hodnotu 0,99.

Odhořívání jsou na první pohled podobná ve všech třech případech, avšak po následném porovnání se ukázalo, že úbytek hmoty jemně varioval jak je patrné dle sklonu spojnice trendu jednoho z měření na obr. 25. Průměr tří hodnot průměrného úbytku byl roven 0,539 g·s-1, který byl při přepočtu na plošnou závislost roven 0,01347 kg·m-2·s-1, což je velmi blízká hodnota k hodnotě 0,014 kg·m-2·s-1, kterou uvádí zdroj [9].



Obrázek 25: Příklad jednoho z měření úbytku hmoty s jeho spojnicí trendu

3.2 Matematické modely jednotlivých částí experimentu

Jedním z hlavních cílů této práce mělo být srovnání míry shody rychlosti hašení jednotlivých druhů paliva mezi skutečností a matematickým modelem. Vzhledem k průběhu požární zkoušky však bylo rozhodnuto o tom, že bude pozornost upřena především směrem ke sledování průběhu teplot v časech experimentů. Míra jejich shody je vyhodnocena v závěrečné části práce, tato podkapitola je věnována především popisu práce s daty, zdůvodnění jednotlivých úprav získaných dat a validita různých použitých příkazů v programu FDS.

3.2.1 Volba zjednodušujících parametrů modelu na volném hoření etanolu

S ohledem na charakter výpočtů a jejich náročnost na výpočetní výkon bylo zapotřebí zvolit vhodnou metodiku zjednodušení výpočetní náročnosti. Cílem této části práce bylo demonstrovat míru vlivu různých příkazů v modelu na průběh teploty v jednotlivých místech nad hořlavou kapalinou. Mezi zkoumané příkazy patřily především hustota mřížky a také to, zda je výhodné nastavovat pevný časový krok, který je použit v požadovaném výstupním souboru z jednotlivých &DEVC a také to, jak moc se teploty zprůměrované programem FDS liší od autorovy úpravy „hrubých“ výstupních dat.

Cílem celého kroku filtrace dat bylo zjistit, jakou možnou míru zjednodušení lze pro další výpočty využívat s přihlédnutím k výpočetnímu času. Čím jemnější mřížka byla, a čím více výpočtů v každém časovém kroku bylo použito, tím déle výpočet trval. Model byl napsán tak, aby odpovídal uskutečněným experimentům viz kap. 3.1. Na volném hoření etanolu o délce 150 s byly zkoumány následující specifika výpočetního modelu a jejich kombinace:

1) hrubost mřížky 1 cm v blízkém půdorysném okolí hořlavé kapaliny a po výšce celého modelu a 2 cm ve zbylém prostoru;
2) hrubost mřížky 2 cm v blízkém půdorysném okolí hořlavé kapaliny a po výšce celého modelu a 4 cm ve zbylém prostoru;
3) hrubost mřížky 2,5 cm v blízkém půdorysném okolí hořlavé kapaliny a po výšce celého modelu a 5 cm ve zbylém prostoru;
4) nastavení pevného časového kroku měření teploty čidly po 1 s a 2 s (příkaz DT_DEVC);
5) ponechání defaultního časového kroku programu FDS;
6) měření teploty softwarovým ekvivalentem termočlánku (příkaz THERMOCOUPLE).

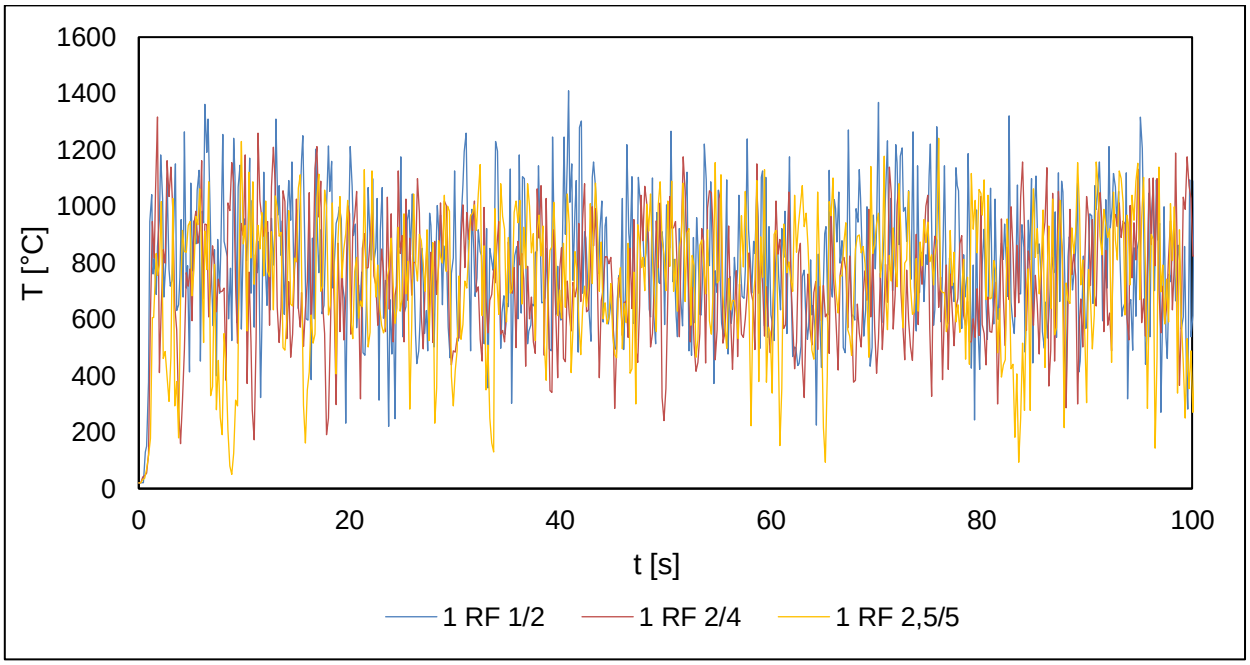
Ponecháním defaultního časového kroku programu FDS bylo vyexportováno měření teplot čidly provedených v průběhu nastavené doby trvání výpočtu měření. Čidlem je myšlen příkaz TEMPERATURE, který zaznamenává okamžitou teplotu plynů v zvoleném místě. Příkaz THERMOCOUPLE je popsán je v následující podkapitole. Pro hrubost mřížky 1 a 2 cm činil průměrný časový krok 0,15 s s odchylkou 0,00076 s, variační koeficient vyjádřený v procentech tedy činil 0,51. Pro hrubost mřížky 2 a 4 cm činil průměrný časový krok 0,18 s, a to s odchylkou 0,00211 s, procentuální variační koeficient 1,17. Nejhrubší mřížka 2,5 a 5 cm poté vykázala průměrný časový krok také 0,18 s s koeficientem 1,57 %.

Bylo tedy možné nadále uvažovat, že měření teplot na čidlech proběhla rovnoměrně v celém čase modelu. Jednotlivé výsledky pro všechny hrubosti mřížek tak byly ve stejném čase srovnatelné. Při využití příkazu DT_DEVC byl počet vyexportovaných měření teploty roven nastavenému časovému kroku, tedy 150 a 75.

Průměrování získaných dat, využití příkazu DT_DEVC a volba hrubosti mřížky

Při prvním pohledu na měření by se mohlo jevit, že pro co nejpřesnější popis průběhu teplot je výhodné použít co nejčastější zaznamenání teploty čidlem a co nejjemnější výpočetní síť. Avšak vzhledem k charakteru šíření tepla a dynamice výměny plynů při požáru se nejeví jako výhodné použití krátkého časového kroku měření, jelikož diference teploty na každém čidle jsou v krátkých časových krocích velké. Navíc v případě matematického modelu nelze předpokládat chybu měření čidla jako takového, a tedy výsledné teplotní rozdíly i o stovky °C v průběhu 1 s mohou být reálné. Pro tuto práci však takto detailní pozorování změn není žádoucí, spíše naopak.

Výsledek použití neupravených dat je vidět na obr. 26, kdy je vidět, že je obtížné vysledovat trend změny teplot, protože jednotlivé rozdíly jsou v krátkých časových krocích velké. Graf teploty v čase je tak nepřehledný a je složité z výsledku činit další závěry.



Obrázek 26: Průběh teploty na jednom z čidel úrovně 1, všechny hrubosti mřížky

Pro zploštění grafu a připodobnění k výsledkům vzniklým použitím příkazů DT_DEVC bylo provedeno zprůměrování změřených teplot v časových krocích podobných, jako byly předepsány příkazem DT_DEVC. S ohledem na prokázanou rovnoměrnost rozložení měření v čase byly zprůměrovány teploty po pěti a deseti krocích odpovídajících jedné a dvěma sekundám pro hrubší mřížky a tři čtvrtě sekundy a sekundu a půl pro jemnější mřížku. Pro popis výsledků bylo použito procentuální vyjádření průměrného variačního koeficientu v_x.

Výsledek popsaných zprůměrování je vidět v tab. 6, která ukazuje hodnoty na jednom teplotním čidle. Na ostatních čidlech byly hodnoty velmi podobné. Tučně jsou označeny výsledky v_x v procentech menší nebo rovné 30 a červeným písmem hodnoty v_x v procentech menší nebo rovné 25. Jako vyhovující byla uvažována hodnota procentuálního vyjádření variačního koeficientu 30 a menší. Je vidět, že všechny hrubosti mřížek mají srovnatelné výsledky, větší rozdíly tvoří různé hodnoty průměrování po pěti či deseti krocích.

S ohledem na to, že lepší charakteristiku vykazovaly průměry teplot po pěti krocích, bylo zvoleno, že pro další porovnání budou užívány tyto periody. S přihlédnutím k výrazně lepším výpočetním časům modelu pro mřížku 2,5/5 cm a výsledkům srovnatelným s jemnější mřížkou bylo rozhodnuto pokračovat v dalších modelech s nejhrubší mřížkou, tedy 2,5/5 cm. Mřížka 2,5/5 cm navíc koresponduje s rozměry a geometrií prostoru.

Tabulka 6: Průměrné hodnoty v_x vyjádřené v procentech pro průměr teplot po 5 a 10 krocích na čidle RF

kroky	**čidlo**	**Hrubost mřížky pro 1 čidlo RF**		
		1/2 cm	**2/4 cm**	**2,5/5**
5	1	**23,1%**	**24,0%**	**26,3%**
10		**26,3%**	**28,1%**	30,4%
5	2	**23,2%**	**24,9%**	**28,5%**
10		**27,0%**	**29,4%**	33,2%
5	3	30,6%	**29,5%**	33,1%
10		34,5%	34,6%	37,2%
5	4	34,1%	**29,9%**	30,1%
10		38,4%	**29,9%**	35,7%
5	5	**29,0%**	**26,4%**	**25,7%**
10		31,8%	30,7%	**30,0%**

Namísto jednoho čidla umístěného na středu nad hořící kapalinou byly v modelu využity čtyři čidla rozmístěné v rozích pomyslného čtverce o hraně 2 cm rovnoběžného s dnem nádoby. Čidla byla označena zprava a zepředu RF, LF, RB a LB (R – right, L – left, F – front, B – back) a po výšce vzestupně od 1 do 5 s výjimkou u čidla 6, které má předpokládané umístění v kapalině. Důvodem k tomuto kroku byla možnost eliminace případných extrémních výkyvů měření teplot u čidel v modelu, jak je zobrazeno na obr. 24 a také to, že u experimentu nebylo možné garantovat umístění TC přesně uprostřed. Přesnější pro následné srovnání matematického modelu s experimentem se tak jeví průměrná hodnota z teplot jednotlivých čidel v dané výškové úrovni.

Při využití celkem čtyř čidel namísto jednoho bylo rozhodnuto o využití průměru teplot zaznamenaných těmito čidly, což bylo umožněno zejména malou vzdálenosti mezi jednotlivými měřicími zařízeními. Pro kontrolu tohoto kroku byly opět využity průměry zaznamenaných teplot v jednotlivých bodech, a to nejen pro defaultní časový krok, ale také pro model s příkazem

DT_DEVC. S ohledem na předchozí výsledky této kapitoly byly v případě defaultního časového kroku porovnávány pouze teploty průměrované po pěti časových intervalech.

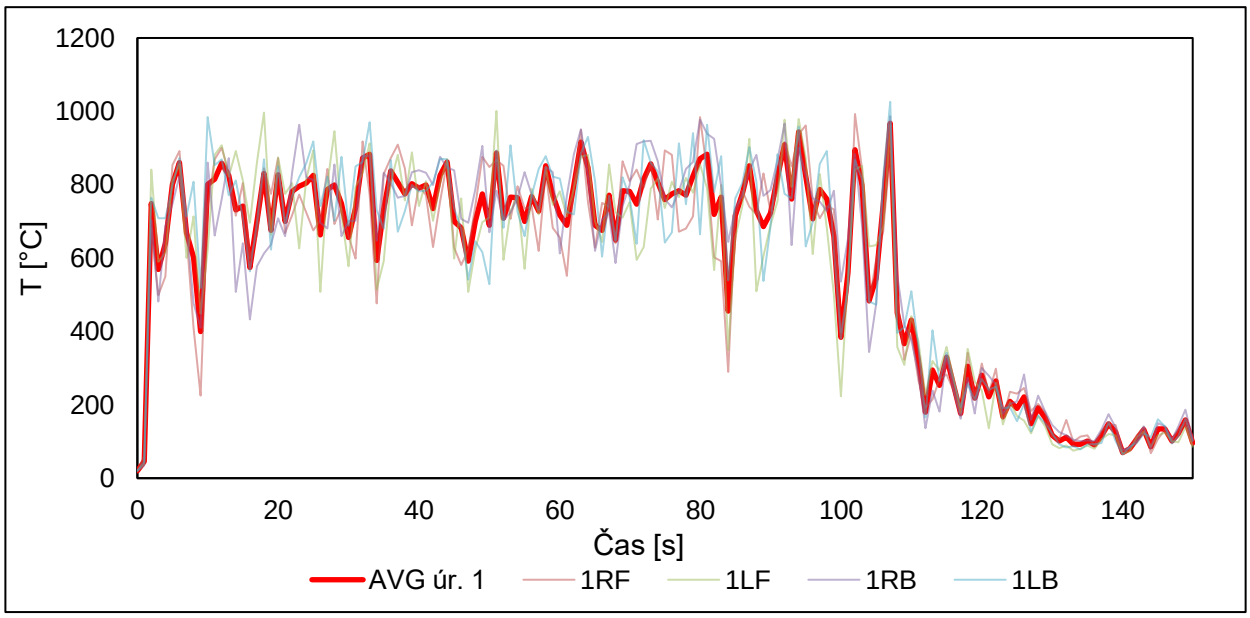
Pro popis kvality těchto dat byly opět využity variační koeficienty. Výsledky zobrazené v tab. 7 ukazují, že se jako nejlepší volba mřížky jeví hrubost 2/4 cm, s ohledem na náročnost výpočetního času a minimální rozdíly v odchylkách však bylo rozhodnuto pokračovat s hrubostí 2,5/5 cm. Jako důležité se ukázalo, že funkce DT_DEVC vykazuje téměř identické vlastnosti při měření teploty čidly jako průměrování kratších časových kroků. Z tohoto hlediska proto bylo možno tvrdit, že pro další výpočty lze používat funkci DT_DEVC namísto měření v kratších časových intervalech. To sice neumožnilo zkrátit výpočetní výkon, výrazně to však urychlilo následnou práci autora s reprodukcí získaných dat.

Při kombinaci s výsledky, které vykazovalo zkoumání různých jemností mřížky, se tak podařilo počet výpočetních buněk redukovat z 271 tis. pro kombinaci 1/2 cm na necelých 24 tis. pro kombinaci 2,5/5 cm, a to bez výrazného úbytku kvality výsledků. Ze zkoumání byly tedy vyjmuty varianty hrubosti mřížky 1/2 cm a 2/4 cm, a to z důvodu dlouhého času výpočtu při této jemnosti mřížky. Naopak proběhlo zapojení příkazu DT_DEVC do dalších modelů.

Tabulka 7: Průměrné v_x v procentech pro teplotu ze 4 čidel na jedné úrovni pro všechny hrubosti

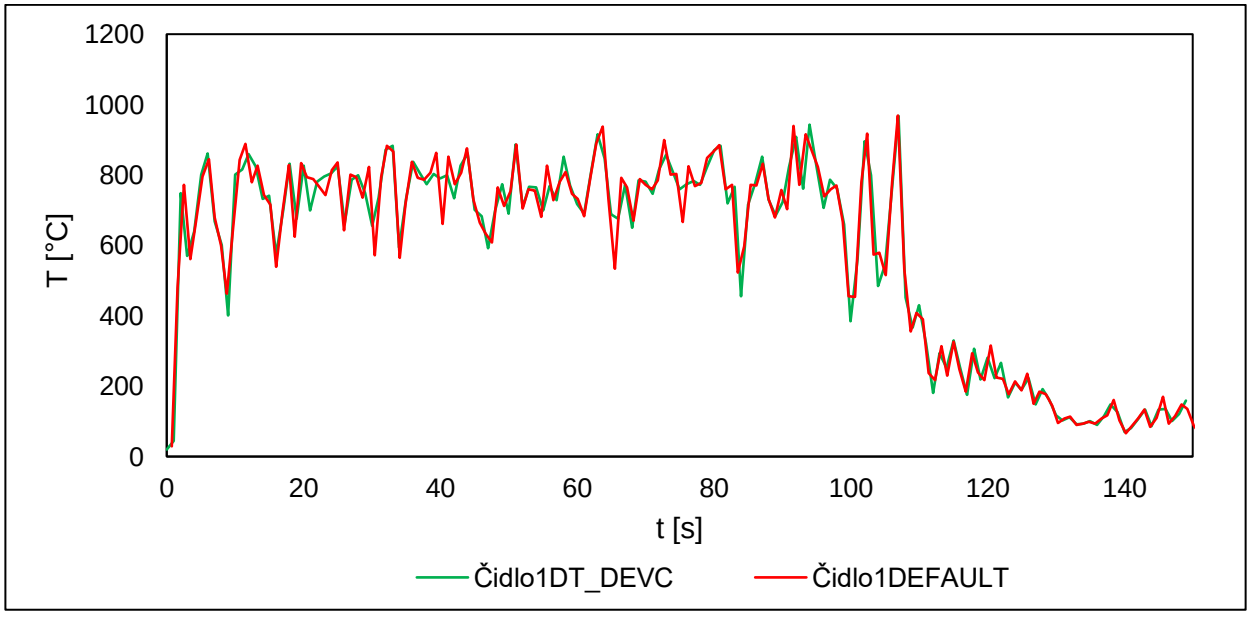
kroky	**čidlo**	**Hrubost mřížky:**		
		1/2 cm	**2/4 cm**	**2,5/5 cm**
default	1	12,3%	9,8%	11,5%
DT_DEVC		N/A	9,2%	11,2%
default	2	11,6%	10,8%	14,2%
DT_DEVC		N/A	10,4%	14,2%
default	3	13,7%	9,7%	12,0%
DT_DEVC		N/A	9,6%	12,0%
default	4	9,6%	6,4%	8,4%
DT_DEVC		N/A	6,1%	8,0%
default	5	6,0%	4,1%	5,8%
DT_DEVC		N/A	4,0%	5,6%

V této kapitole je zobrazeno porovnání průběhů teplot na jednotlivých čidlech s jejich průměrem na úroveň 1 a pro zapnutou funkci DT_DEVC, a to na obr. 27. Porovnání je provedeno již na vybrané úrovni hrubosti mřížky 2,5/5 cm. Tím je demonstrován pozitivní efekt využití funkce FDS pro průměrování teplot v definovaných časových krocích.

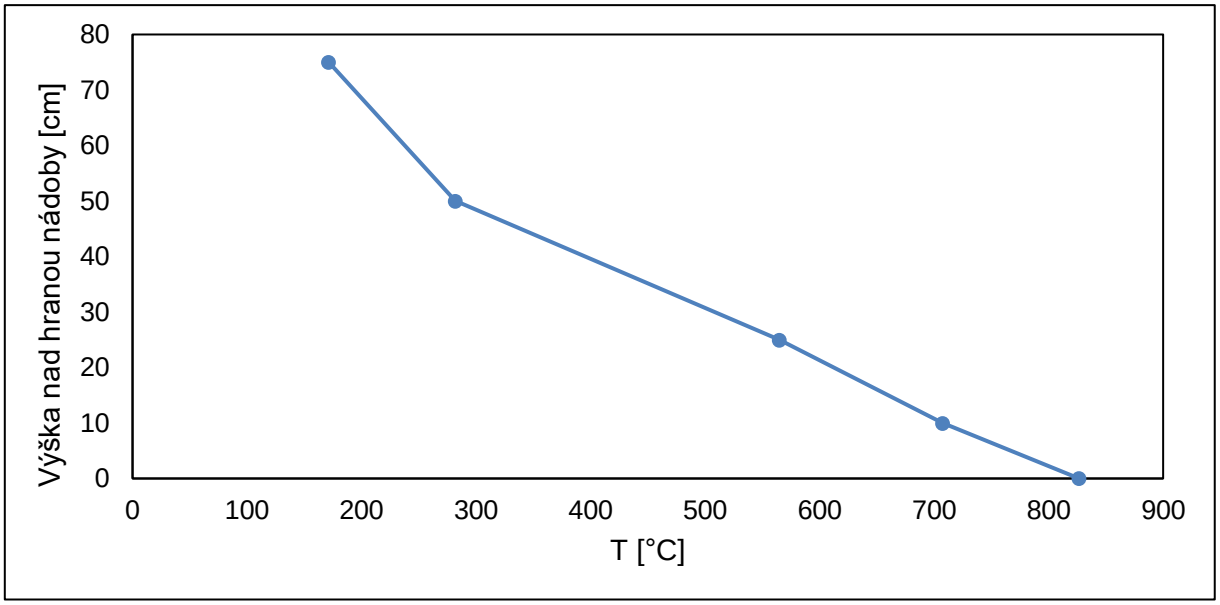


Obrázek 27: Porovnání jednotlivých teplot na čidlech úrovně 1 s jejich průměrem, DT_DEVC.

Jako poslední zbývalo srovnat průběh teplot po výběru dat pro defaultní časový krok s průběhem teplot po výběru dat pro zapnutou funkci DT_DEVC. Pro finální hrubou kontrolu byly na mřížce 2,5/5 cm vytvořeny vertikální profily teploty, které měly pouze potvrdit správnost výsledků a jejich fyzikální pozadí. Výsledky jsou vyobrazeny na obr. 28 a 29.



Obrázek 28: Průběh průměru teplot v úrovni čidla 1 při vlastním výběru dat a s použitím DT_DEVC



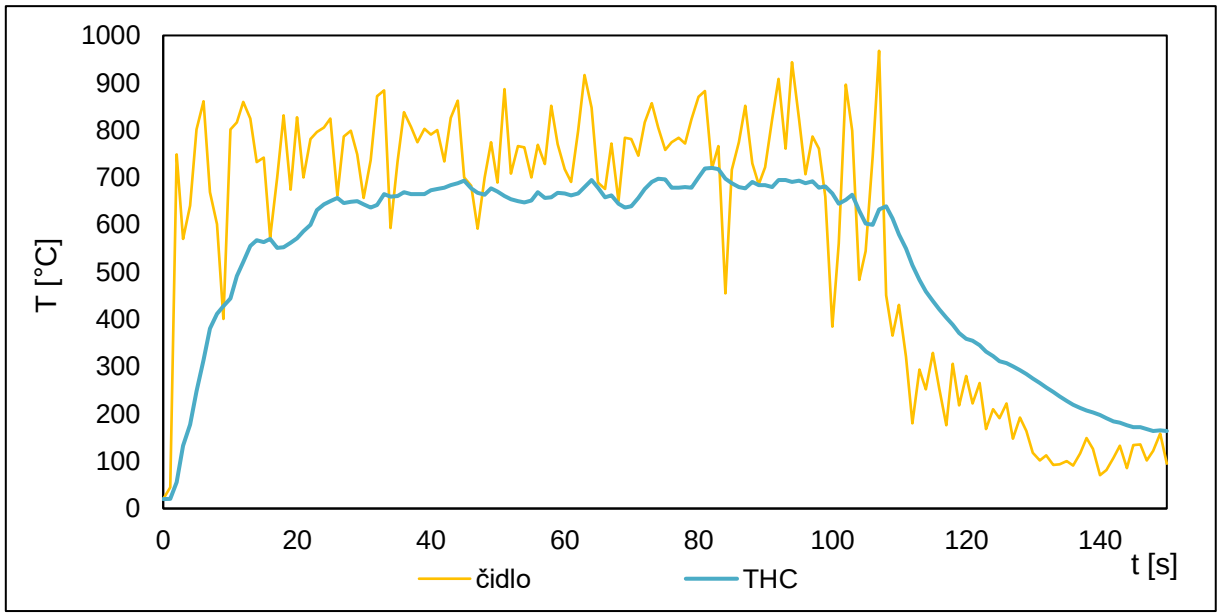
Obrázek 29: Vertikální profil teplot na jednotlivých úrovních v čase 20 s

Z obr. 29 je patrné, že po výběru dat popsaným způsobem, je průběh teplot téměř identický nejen pro defaultní časový krok, ale také pro zapnutou funkci DT_DEVC. Zároveň výběr teplot i po určité filtraci odpovídá realitě, tj. se zvyšující se výškou nad hranou nádoby se teplota snižuje.

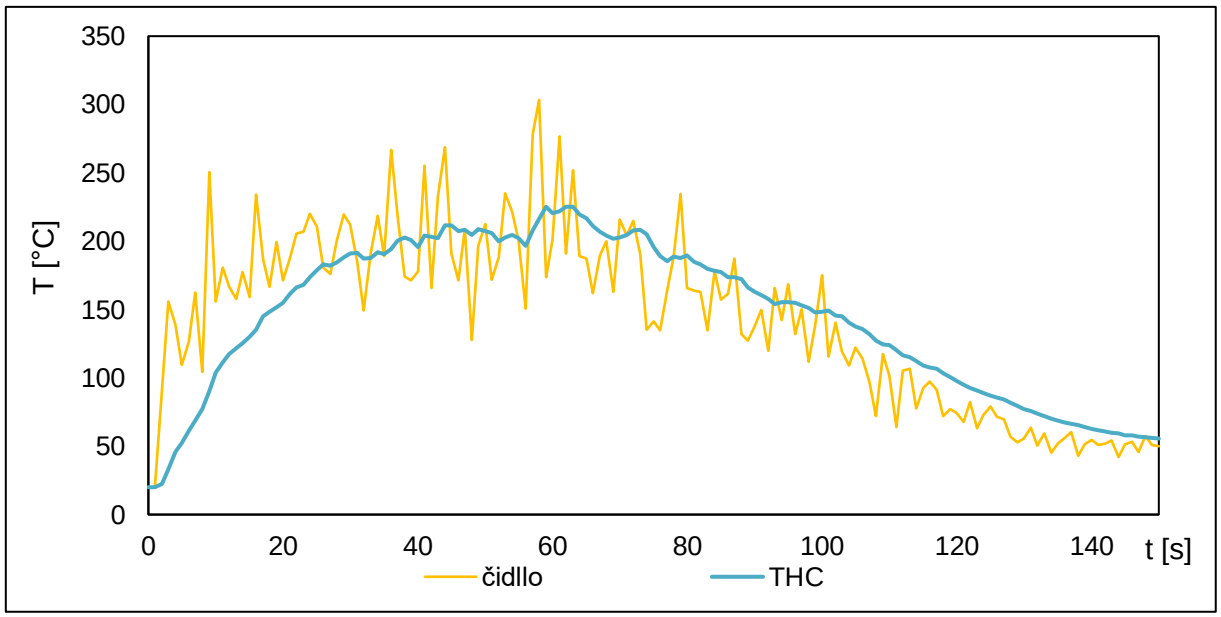
Volba měření teploty pomocí příkazu THERMOCOUPLE

S ohledem na to, že jednotlivé diference teplot byly při použití standardních čidel okamžité teploty (TEMPERATURE) i po popsaném zprůměrování stále vysoké, bylo rozhodnuto porovnat modelově identický výpočet při měření teploty čidly a termočlánky. Termočlánek (THERMOCOUPLE) ze svého fyzikálního principu nezapisuje extrémní výkyvy teplot, jako tomu bylo v případě teplotních čidel, viz výsledky prezentované v této kapitole. Termočlánky mají určitou tepelnou setrvačnost, průběh teplot tedy vyhlazují a nejsou tak citlivé na okamžité fluktuace. Výsledky z měření a programu FDS se zkoumají lépe na dlouhodobějším trendu změny teplot než na vývoji okamžitých teplot, cílem porovnání bylo proto zjistit, zda okamžité teploty změřené čidly po úpravách zmíněných v této kapitole odpovídají teplotám měřeným termočlánky.

Jak je patrné z obr. 30 a 31, porovnání teplot měřených čidly a termočlánky odpovídá očekávání. Na začátku lze vidět pomalejší nárůst teploty v případě měření termočlánkem, což je způsobeno pomalejším zahřátím a pozvolnějším zápisem. V čase od 30 s, kdy je plně rozvinuto volné hoření, odpovídá teplota měřená termočlánkem středním hodnotám okamžitých teplot měřených čidly. Při poklesu teploty lze pozorovat opačný trend vývoje teploty, kdy teplota měřená termočlánkem je mírně vyšší než okamžitá teplota měřená čidly, což opět odpovídá vlastnostem termočlánku. Důležitým zjištěním pro potřeby této práce bylo však to, že správnost měření i trend vývoje teplot byly zaručeny jak při měření okamžité teploty čidly, tak při měření teploty termočlánky. S ohledem na potřeby této práce tak bylo rozhodnuto dále pokračovat s hodnotami naměřenými termočlánky, což odpovídalo reálnému experimentu.



Obrázek 30: Porovnání měření teploty čidlem a TC, úroveň 1



Obrázek 31: Porovnání měření teploty čidlem a TC, úroveň 5

Z popsaných kroků a testů dat provedených na modelech volného hoření etanolu bylo prokázáno, že je možné používat hrubší mřížku a zapnutou funkci DT_DEVC. Tímto je možné docílit snížení nároku na výpočetní výkon, a to s minimální ztrátou kvality naměřených dat. Dále je možné tvrdit, že pro popis průběhu teplot není nejvhodnější volit co nejkratší časový interval. S pomocí základních statistických funkcí však lze křivku zploštit a zlepšit její možnosti interpretace, opět bez výrazné ztráty kvality takových výsledků. Pro potřeby práce je nejvhodnější měřit teplotu pomocí termočlánků. Měření termočlánky bylo otestováno a odpovídalo vývoji okamžitých teplot měřených čidly.

3.2.2 Volné hoření etanolu

S vytvářením modelu volného hoření etanolu vzniklo několik submodelů, které byly popsány v předchozí podkapitole. Pro samotný model volného hoření etanolu, na něž navazují veškeré další modely, bylo tedy využito mřížky 2,5/5 cm a měření teploty bylo nadále měřeno využitím termočlánku (příkaz THERMOCOUPLE), jehož výsledky měření byly zaznamenávány po 1 s.

V práci je pro lepší orientaci následně použito očíslování modelů, které reprezentují jednotlivé matematické modely a to, co simulovaly. Jejich popis lze nalézt v tab. 8.

Tabulka 8: Seznam a očíslování jednotlivých matematických modelů s vysvětlením

Heslovitý popis jednotlivých modelů, které odpovídají uskutečněným experimentům	
0	volné hoření etanolu
1	hašení etanolu, tryska ve výšce 0,5 m
2	hašení etanolu, tryska ve výšce 0,75 m
3	hašení n-heptanu, tryska ve výšce 0,75 m
4	hašení etanolu, tryska ve výšce 1,0 m
5	hašení n-heptanu, tryska ve výšce 1,0 m
6	hašení etanolu, tryska ve v výšce 1,0 m, 3 nádoby (100, 100, 70 ml)
7	hašení n-heptanu, tryska ve výšce 1,0 m, 3 nádoby (100, 100, 70 ml)
8	hašení n-heptanu, tryska ve výšce 1,0 m, 3 nádoby (150, 150, 100 ml)

Pozn: Výška trysky je měřena od horní hrany nádoby s palivem.

Geometrie prostoru

Vzhledem ke skutečnosti, že se experiment odehrával pod odtahovým zvonem a nebyl tedy ani jak je patrno z obr. 12 a 13 ohraničen žádnými stavebními konstrukcemi, byl uvažován prostor o rozměrech 1 x 1 x 1,4 m s veškerými obvodovými stěnami a stropem otevřenými. Tepelné výměně od požáru do okolního prostředí tak nebylo nijak zamezeno, pouze podlaha byla nespecifikována, tedy defaultně nastavena jako inertní, jelikož se jednalo o betonovou podlahu. Významné úniky tepla od dna nádoby nejsou uvažovány. Níže jsou zobrazeny úryvky ze zdrojových kódů pro různé modely, kompletní zdrojové kódy je možné nalézt v přílohách této práce.

```
&MESH ID='Mesh25', IJK=16,16,56, XB=0.3,0.7,0.3,0.7,0.0,1.4/
&MESH ID='Mesh50a', IJK=6,20,28, XB=0.0,0.3,0.0,1.0,0.0,1.4/
&MESH ID='Mesh50b', IJK=16,9,35, XB=0.7,1.0,0.0,1.0,0.0,1.4/
&MESH ID='Mesh50c', IJK=16,9,35, XB=0.3,0.7,0.0,0.3,0.0,1.4/
&MESH ID='Mesh50d', IJK=9,16,35, XB=0.3,0.7,0.7,1.0,0.0,1.4/
```

specifikace hrubší a jemnější mřížky

```
&VENT ID='Zed Fr', SURF_ID='OPEN', MB='YMIN'/
&VENT ID='Zed Le', SURF_ID='OPEN', MB='XMIN'/
&VENT ID='Zed Ri', SURF_ID='OPEN', MB='XMAX'/
&VENT ID='Zed Ba', SURF_ID='OPEN', MB=YMAX/
&VENT ID='Ceiling', SURF_ID='OPEN', MB='ZMAX'/
```

definice vlastností obvodových stěn a stropu

Definice paliva

Co se paliva týče, bylo použito množství 100 ml umístěné do čtvercové nádoby o straně 20 cm. Pro dodržení objemu 100 ml, bylo programu nastavena tloušťka této vrstvy na 2,5 mm. Jelikož se etanol nachází v knihovně FDS, nebylo nutné specifikovat veškeré termofyzikální charakteristiky v kódu, stačilo pouze definovat jeho název. Spolu s kapalinou byla definována reakce hoření a charakter spalin uvolňovaných při hoření.

```
&REAC ID='ETHANOL',
   FUEL='ETHANOL',
   CO_YIELD=6.0E-3,
   SOOT_YIELD=0.015/
```

reakce popisující hoření etanolu

```
&MATL ID='ETHANOL',
   SPECIFIC_HEAT=2.44,
   CONDUCTIVITY=0.17,
   DENSITY=789.0,
   ABSORPTION_COEFFICIENT=1534.3,
   EMISSIVITY=1.0,
   HEAT_OF_REACTION=838.0,
   SPEC_ID='ETHANOL',
   NU_SPEC=1.0,
   BOILING_TEMPERATURE=78.5/
```

```
&MATL ID='STEEL',
   SPECIFIC_HEAT=0.46,
   CONDUCTIVITY=45.8,
   DENSITY=7850.0,
   EMISSIVITY=1.0/
```

popis oceli a etanolu a jejich charakteristik použitých v modelu

```
&SURF ID='ETHANOL',
   COLOR='RED',
   BURN_AWAY=.TRUE.,
   MATL_ID(1,1)='ETHANOL',
   MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
   THICKNESS(1)=0.0025/
```

```
&SURF ID='STEEL SHEET',
   COLOR='BLACK',
   BACKING='INSULATED',
   MATL_ID(1,1)='STEEL',
   MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
   THICKNESS(1)=0.01/
```

přiřazení látce její vlastnosti

```
&OBST ID='Plech_Bo', XB=0.4,0.6,0.4,0.6,0.0,0.0, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Fr', XB=0.4,0.6,0.4,0.4,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Le', XB=0.4,0.4,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ri', XB=0.6,0.6,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ba', XB=0.4,0.6,0.6,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
```

vytvoření nádoby pro umístění hořlavé kapaliny

```
&VENT ID='horlava_kapalina', SURF_ID='ETHANOL', XB=0.4,0.6,0.4,0.6,0.0,0.0/
```

specifikace umístění etanolu

Měření teploty a tepelného toku

Smysl umístění termočlánků příkazem THERMOCOUPLE namísto celkem čtyř čidel okamžité teploty plynů příkazem TEMPERATURE do jedné výšky byl zdůvodněn v předchozí kapitole. Dle experimentu by měly být TC umístěny do celkem 6 výškových rovin. Pro měření bylo však použito pouze 5 výškových úrovní pro zaznamenání průběhu teplot, a sice 0, 10, 25, 50 a 75 cm umístěných nad hranou ocelové nádoby s palivem, číslovaných od čísla 1 vzestupně. V úrovni hořlavé kapaliny byl v prvotních modelech umístěn zmíněný šestý TC6, jeho hodnot však nebylo využito, jelikož by srovnávání mohlo být zavádějící vzhledem ke skutečnosti, že není v experimentu přesně patrné, po jaké době již TC nebyl ponořen v kapalině. Byť byl v modelu někdy ponechán, v práci se s ním dále nepracovalo.

```
&DEVC ID='THC1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.05,
  PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.15,
   PROP_ID = 'THERMOCPL'/
```

umístění jednotlivých termočlánků označených jako THC (příkaz

```
&DEVC ID='THC3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.3,
   PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.55,
   PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC5', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.8,
   PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&PROP ID='THERMOCPL', DIAMETER = 0.002/
```

THERMOCOUPLE), měřících teplotu

```
&DEVC ID='Heat_flux_senzor', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS',
XYZ=0.3,0.5,0.22, ORIENTATION=1,0,0/
```

popis radiometru

3.2.3 Hašení etanolu vodní mlhou s proměnnou výškou

Pro model hašení etanolu bylo využito předchozího modelu volného hoření etanolu. Na základě sledování průběhu hoření bylo rozhodnuto o spuštění trysky vodní mlhy po 60 s volného hoření. Výpočetní čas byl tedy zkrácen na dobu 70 s, jelikož k uhašení kapaliny došlo téměř okamžitě, jak je možné sledovat také z průběhu teplot, které téměř ihned po spuštění vodní mlhy výrazně klesly a nadále oscilovaly kolem hodnoty 50 °C.

Definice trysky

Jednalo se o první model s využitím vodní mlhy. Pro vytvoření tohoto modelu bylo využito poznatků z práce pánů Eliáše a Pokorného [31]. Jejich experiment se také odehrával v laboratoři UCEEBu, ČVUT v Praze, navíc byla použita tatáž tryska, jež byla použita pro tuto práci. Využití dosažených poznatků se tak jevilo jako velmi vhodné. Autoři zkoumali mj. to, jak nastavit v matematickém modelu jednotlivé parametry trysky tak, aby výsledný efekt modelu co nejvíce odpovídal skutečnému výstřikovému kuželu. Na základě závěru z jejich práce byla tedy definována tryska CSFH 11 a tyto experimentálně ověřené parametry definující trysku, byly následně uplatňovány ve všech dalších modelech s vodní mlhou.

Tabulka 9: Specifikace výstřikových charakteristik trysky pro dosažení požadovaného efektu [31]

Specifikace výstřikových charakteristik trysky CSFH 11	
pracovní tlak	13,5 bar
K faktor	2,15
střední velikost kapek	60
minimální/maximální velikost kapek	1 μm/1 000 μm
rychlost	42,8
úhel vodního kužele	55°
počet kapek za sekundu	10 000
typ distribuční funkce velikosti kapek	lognormální rozdělení

Níže je vložena část kódu z programu FDS, v němž jsou parametry pro trysku vodní mlhy nastaveny tak, jak popisuje tab. 9. V tomto případě bylo uvažováno hašení tryskou ve výšce 0,5 m nad hranou nádoby.

specifikace trysky vodní mlhy

```
&SPEC ID='WATER VAPOR'/

&PART ID='WATER DROPS',
    SPEC_ID='WATER VAPOR',
    DIAMETER=60.0,
    MINIMUM_DIAMETER=1.0,
    MAXIMUM_DIAMETER=1000.0,
    DISTRIBUTION='LOGNORMAL',
    QUANTITIES='PARTICLE DIAMETER','PARTICLE TEMPERATURE',
    AGE=10.0,
    SAMPLING_FACTOR=1/

&PROP ID='NOZZLE',
    PART_ID='WATER DROPS',
    OFFSET=0.01,
    PARTICLES_PER_SECOND=10000,
    K_FACTOR=2.15,
    OPERATING_PRESSURE=13.5,
    PARTICLE_VELOCITY=42.8,
    SPRAY_ANGLE=0.0,55.0/
&DEVC ID='NOZZLE_1', PROP_ID='NOZZLE', XYZ=0.5,0.5,0.55, QUANTITY='TIME', TPOINT=60.0/
```

3.2.4 Hašení n-heptanu vodní mlhou s proměnnou výškou

Při hašení n-heptanu zůstaly veškeré parametry modelu totožné, pouze se změnila definice paliva. Změněné příkazy jsou vypsány níže, konkrétně pro výši trysky v 0,75 m nad hranou nádoby. V experimentu hašení n-heptanu vodní mlhou s tryskou ve výši 0,75 m došlo nedopatřením ke spuštění hašení dříve než po 60 s, proto došlo v modelu k úpravě času spuštění trysky, aby bylo možné porovnání průběhu teplot.

reakce popisující hoření n-heptanu

```
 &REAC
   ID='N-HEPTANE',
   FUEL='N-HEPTANE',
   AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=20.0,
   CO_YIELD=0.01,  SOOT_YIELD=0.037,
   H=16.0, C=7.0/
```

popis n-heptanu a jeho charakteristik použitých v modelu

```
 &MATL ID='N-HEPTANE_LIQUID',
     SPECIFIC_HEAT=2.24,
     CONDUCTIVITY=0.14,
     DENSITY=675.0,
     ABSORPTION_COEFFICIENT=333.0,
     EMISSIVITY=1.0,
     HEAT_OF_REACTION=317.0,
     SPEC_ID(1,1)='N-HEPTANE',
     NU_SPEC(1,1)=1.0,
     BOILING_TEMPERATURE=98.35/
 &SURF ID='N-HEPTANE_POOL', COLOR='RED',
     BURN_AWAY=.TRUE.,
```

```
    MATL_ID(1,1)='N-HEPTANE_LIQUID',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.0025/
&DEVC ID='NOZZLE_1', PROP_ID='NOZZLE', XYZ=0.5,0.5,0.8, QUANTITY='TIME', SETPOINT=44.0/
```

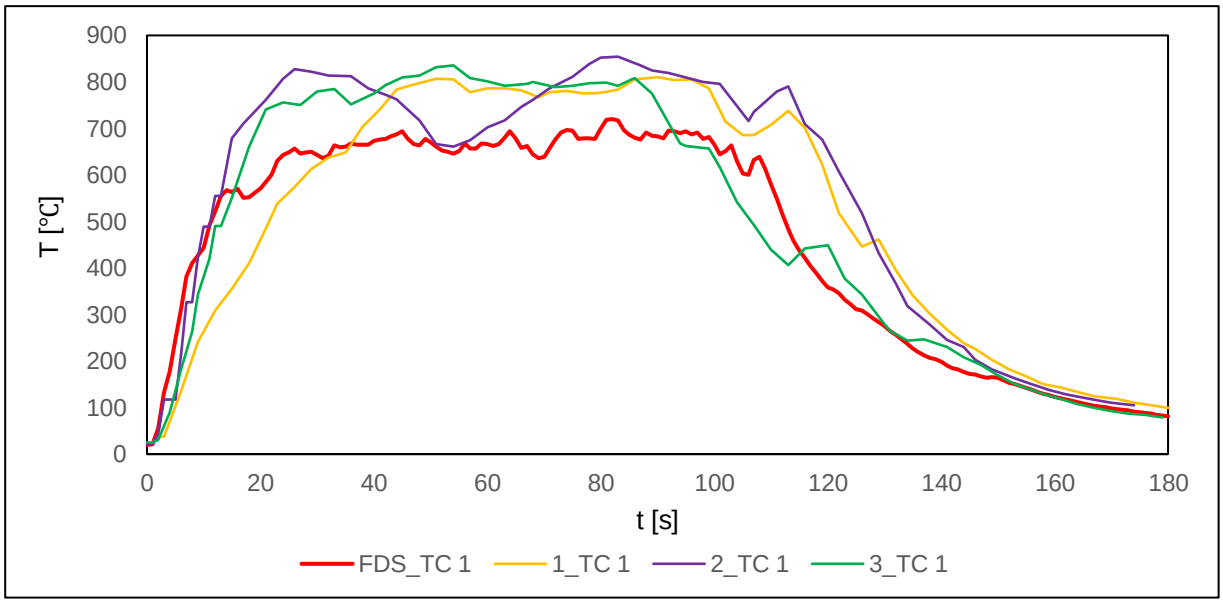
3.3 Výsledky a diskuse

V zájmu lepší prezentace výsledků hašení vodní mlhou a jeho vlivu na změnu teplot jsou v této části prezentovány především grafy zobrazující průběhy teplot v blízkosti času spuštění mlhové trysky. Takto bylo rozhodnuto především pro umožnění detailního pohledu na snižování teplot, ale také z toho důvodu, že průběh do doby před spuštěním trysky je principiálně volné hoření etanolu, které je popsáno v následujících odstavcích.

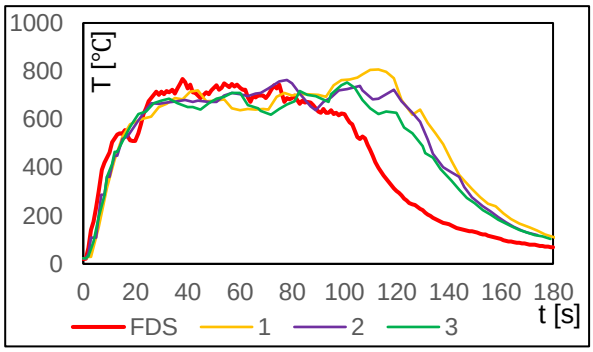
Volné hoření etanolu

Nejlepší shoda mezi experimentem a matematickým modelem se u volného hoření etanolu jevila v úrovni TC 2 a TC 3. To může být zapříčiněno především tím, že v této úrovni je nejvyšší míra intenzity hoření. Naopak čím výšková úroveň stoupá, tím více může být TC ochlazován okolím, či v případě nadměrného proudění okolního vzduchu ochlazován. Plamen ztrácí na intenzitě a tím se snižuje i rychlost proudění. To se u TC 4 a TC 5 projevilo.

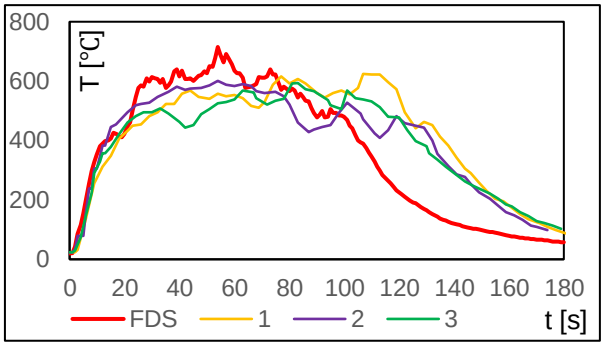
FDS předikovalo se stoupající výškou umístění TC vyšší teploty, než jaké byly v experimentu změřeny. Pro pozorování volného hoření paliva byla realizována celkem tři opakování. Bylo tedy možné porovnat výsledky FDS s celkem třemi experimenty. Jak je demonstrováno v následujících grafech (obr. 32 – obr. 36), FDS vykazovalo s ohledem na různé zjednodušující parametry modelu poměrně dobrou shodu s naměřenými daty.



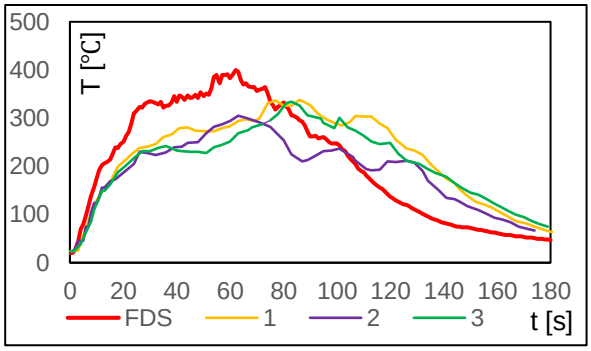
Obrázek 32: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 1 (model č. 0)



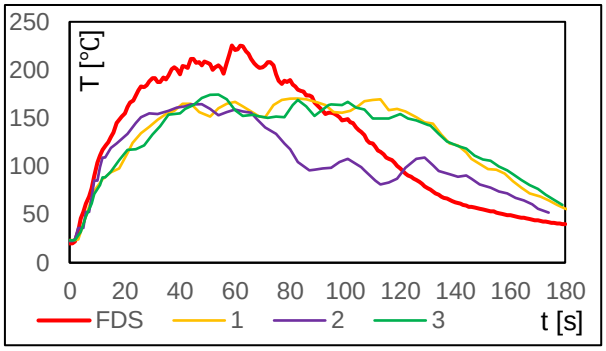
Obrázek 33: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 2 (model č. 0)



Obrázek 34: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 3 (model č. 0)



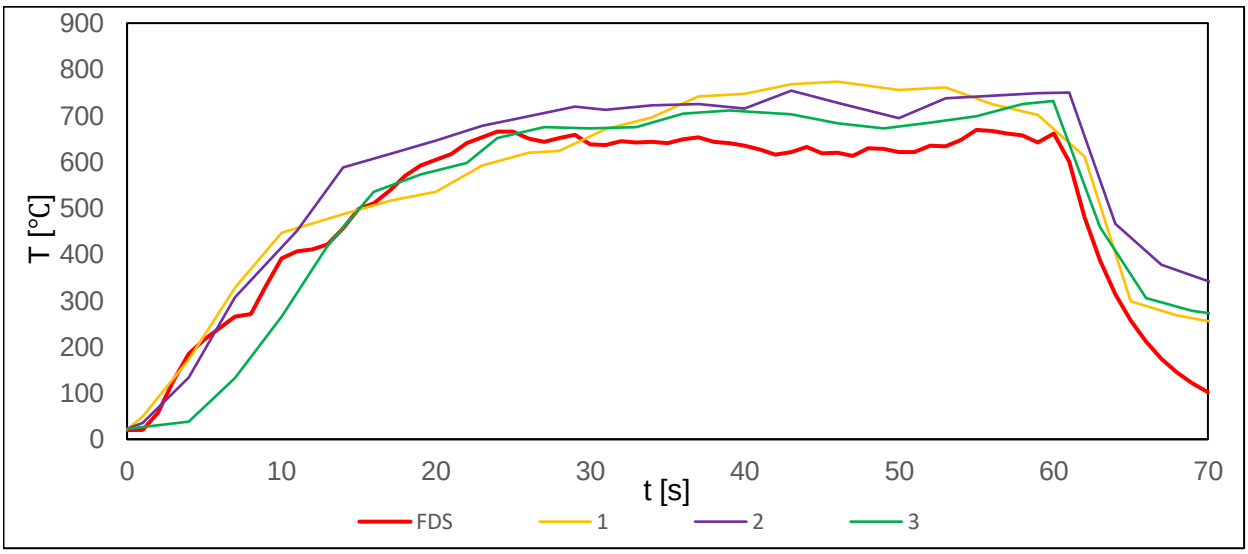
Obrázek 35: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 4 (model č. 0)



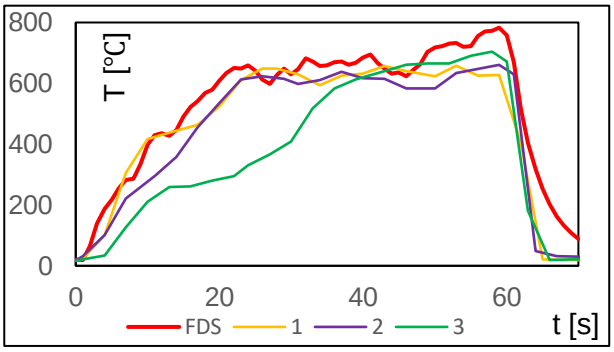
Obrázek 36: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 5 (model č. 0)

Hašení 100 ml etanolu

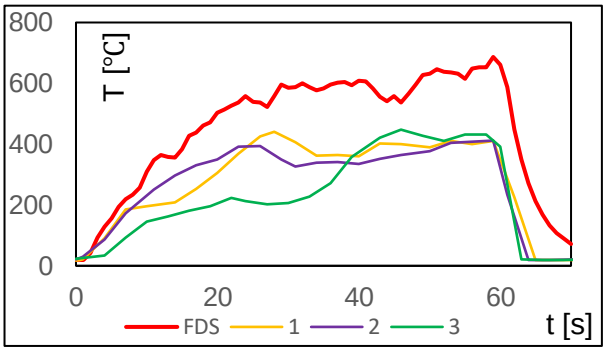
V této části jsou zobrazeny hašení vodní mlhy při trysce ve výši 0, 5 a 1 m, a to především proto, že v případě modelu č. 1 je možné využít dat ze tří opakování téhož experimentu k pozorování míry odlišných hodnot měření. Grafy na obr. 37 – obr. 41 jsou složeny ze všech tří měření a výsledky z programu FDS. U 3. opakování modelu č.1 jsou patrné mírné výkyvy teplot.



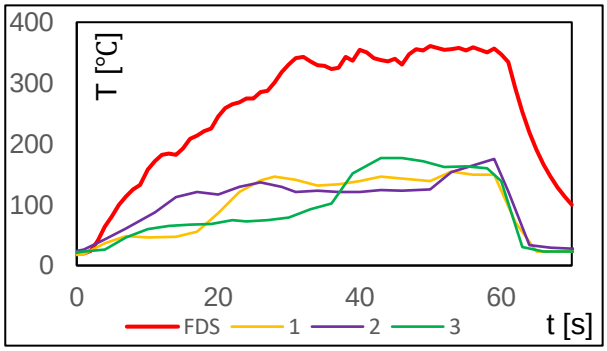
Obrázek 37: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 1, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)



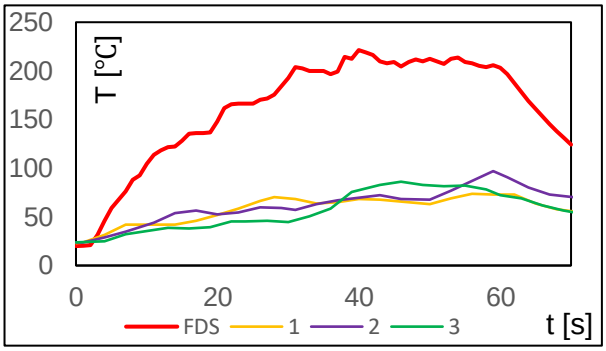
Obrázek 38: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 2, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)



Obrázek 39: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 3, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)

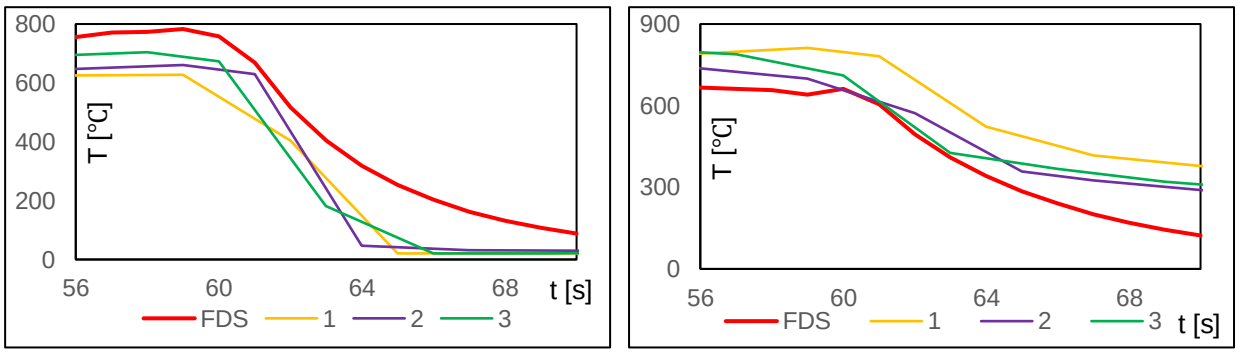


Obrázek 40: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 4, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)

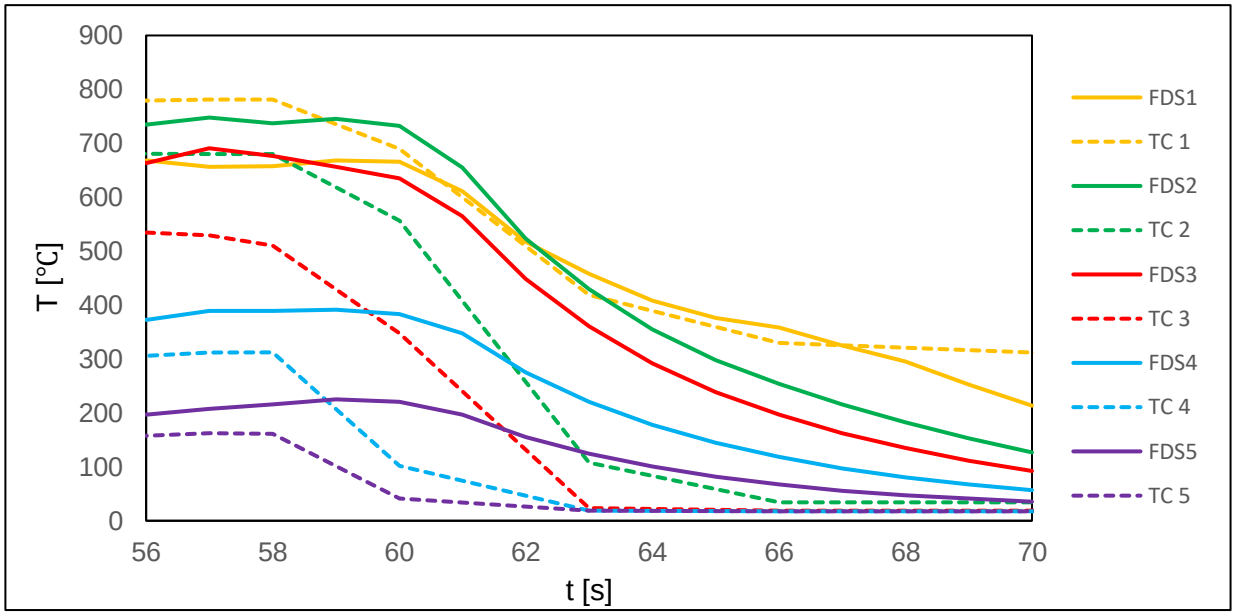


Obrázek 41: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 5, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)

Z obr. 37 – obr. 41 lze jednoznačně pozorovat korelace mezi výsledky experimentů a matematickým modelem, a to zejména na sledované úrovní TC2 pro etanol. Důvodem je to, že se jedná o místa s očekávaným nejstabilnějším průběhem teplot. Na obr. 42 a) a b) je možné pozorovat míru vlivu výšky trysky na průběh teploty. Obr. 42 b), který zobrazuje průběh teploty v TC 2 při hašení vodní mlhou s tryskou 75 cm nad hranou, má znatelně pomalejší průběh než obr. 42 a), kde má TC trysku vodní mlhy pouze 40 cm nad sebou. Tímto je potvrzen předpoklad, že výška trysky vodní mlhy má na odebírání teploty z okolí hořlavé kapaliny vliv.



Obrázek 42: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 2, tryska ve výši a) 0,5 a b) 0,75 m nad hranou (model č. 2)

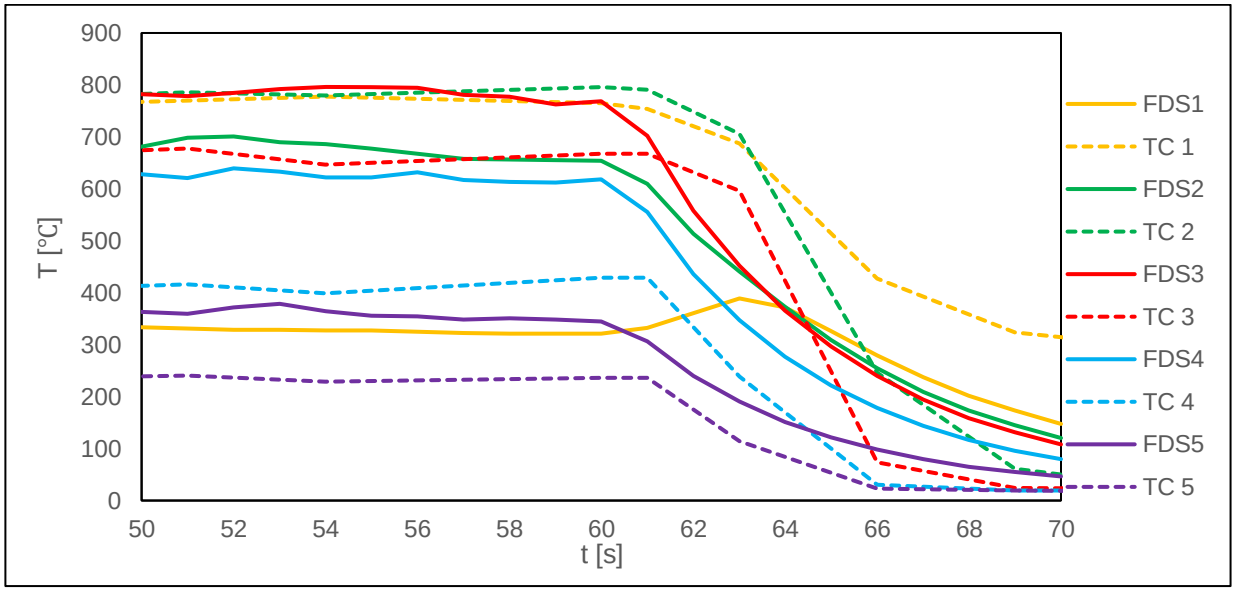


Obrázek 43: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS, tryska ve výši 1,0 m nad hranou nádoby (model č. 4)

Na obr. 43 je možné pozorovat průběh hašení 100 ml etanolu tryskou ve výši 1 m nad hranou nádoby. Je možné pozorovat že nejrychleji se ochladily TC v blízkosti trysky, naopak pomaleji chladl TC 1, který mohl být ovlivněn sáláním tepla z nádoby s kapalinou. Trend poklesu teplot na jednotlivých TC vykazuje mezi experimentem a matematickým modelem shodu.

Hašení 100 ml n-heptanu

Rozdíl mezi předpokládaným průběhem teplot z matematického modelu a naměřenými hodnotami je znázorněn na obr. 44. Jak bylo zmíněno, jedná se pouze o část hašení, celý průběh je součástí příloh této práce.



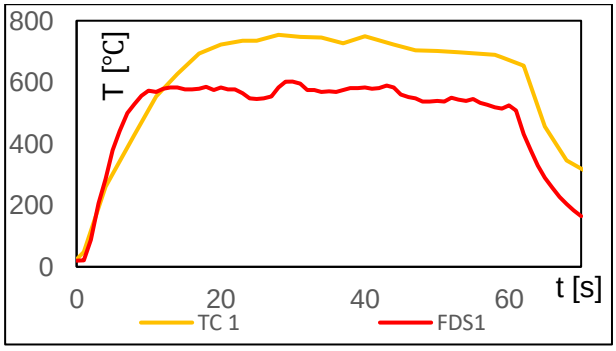
Obrázek 44: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS, tryska ve výši 1,0 m nad hranou (model č. 5)

Je možné pozorovat velký rozdíl v chování n-heptanu oproti ethanolu, a to v TC 1 a jeho průběhu teploty. Je možné, že FDS předpokládá, že u n-heptanu dochází k reakci hoření až nad TC 1, a proto jsou na něm teploty nižší, než je naměřeno. Z výsledků měření i matematického modelu je patrné, že čím blíže je TC ke kapalině, tím pomaleji se na něm snižuje teplota.

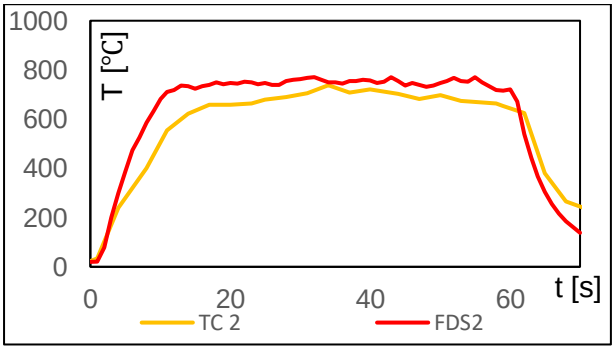
S nárustem výšky nad hranou nádoby je možno pozorovat odchylky hodnot měření teploty u realizovaných experimentů a matematických modelů při současném dodržení tvaru křivky vývoje teploty. Tato odchylka teplot se snižovala se vzrůstající hodnotou spalného tepla zkoumaného materiálu, a to z důvodu větší výšky plamenu, a tudíž menšího ovlivnění externími vlivy, kterými může být proudění okolního vzduchu, či teplota uvnitř prostoru.

Hašení paliva ve třech nádobách

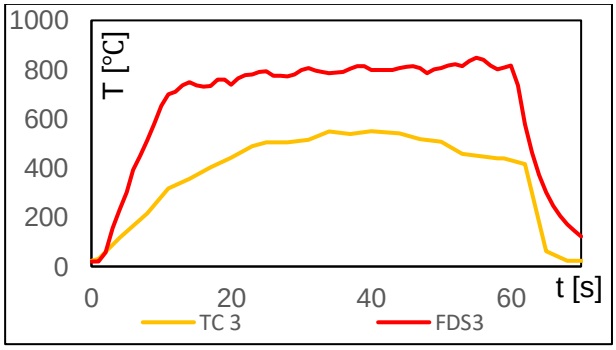
Pro srovnání bylo využito experimentálních dat a hodnot z matematických modelů č. 6 a 7, což byly experimenty s třemi nádobami etanolu (E) a n-heptanu (H) s tryskou vodní mlhy 1 m nad hranou nádoby. Na jednotlivých obr. 45 – obr. 49 je možno sledovat míru shody predikce programem FDS a reálným měřením v úrovních jednotlivých TC pro etanol, na obr. 50 – obr. 54 pro n-heptan.



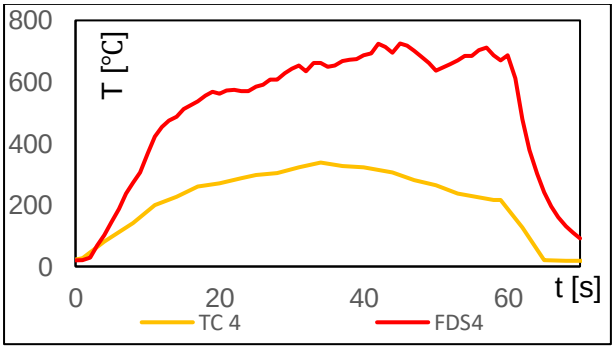
Obrázek 45: Srovnání shody průběhu teplot TC 1 (model 6) vs FDS



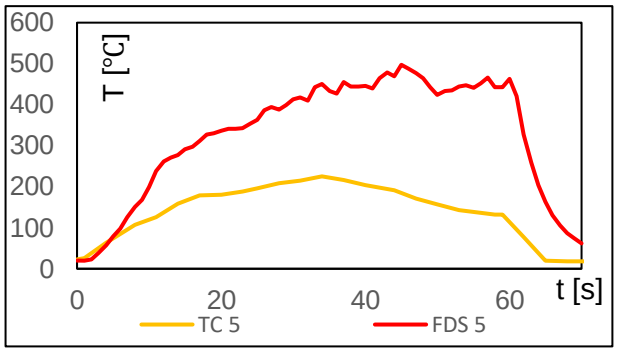
Obrázek 46: Srovnání shody průběhu teplot TC 2 (model 6) vs FDS



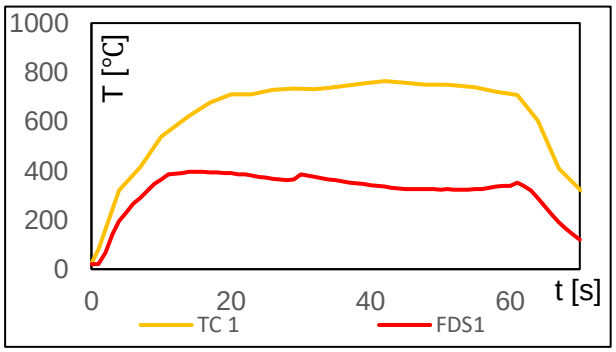
Obrázek 47: Srovnání shody průběhu teplot TC 3 (model 6) vs FDS



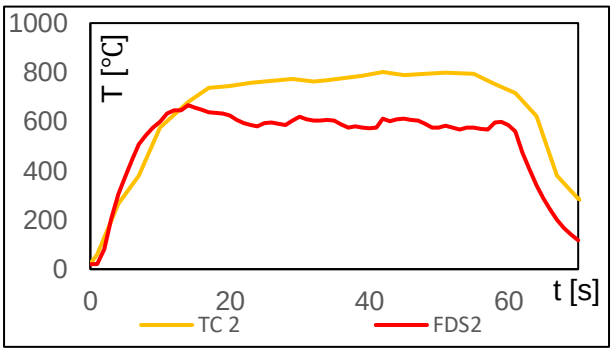
Obrázek 48: Srovnání shody průběhu teplot TC 4 (model 6) vs FDS



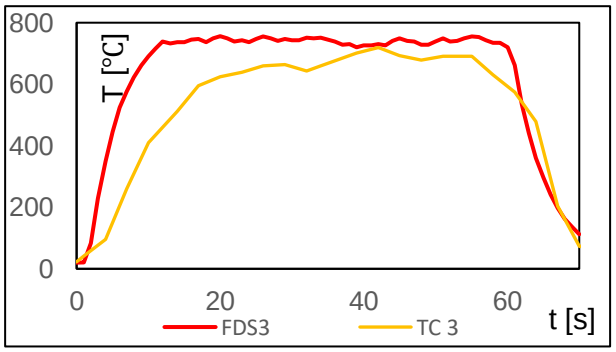
Obrázek 49: Srovnání shody průběhu teplot TC 5 (model 6) vs FDS



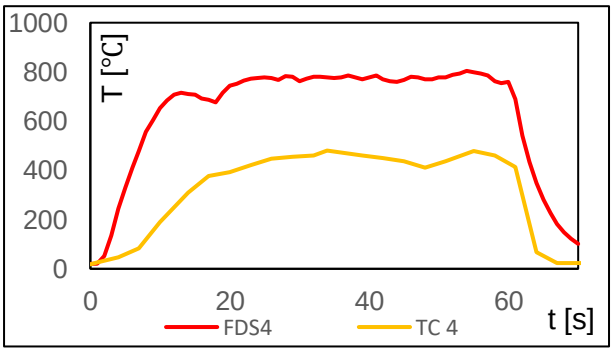
Obrázek 50: Srovnání shody průběhu teplot TC 1 (model 7) vs FDS



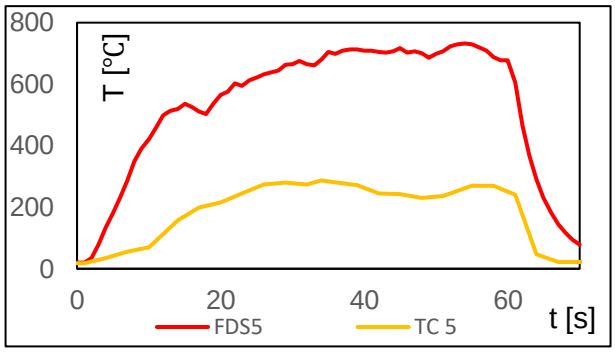
Obrázek 51: Srovnání shody průběhu teplot TC 2 (model 7) vs FDS



Obrázek 52: Srovnání shody průběhu teplot TC 3 (model 7) vs FDS



Obrázek 53: Srovnání shody průběhu teplot TC 4 (model 7) vs FDS



Obrázek 54: Srovnání shody průběhu teplot TC 5 (model 7) vs FDS

Z obrázku srovnávající průběhy teplot na jednotlivých TC pro hoření jednotlivých kapalin v celkem třech nádobách je možné sledovat, že ethanol měl větší shodu s TC 2, naopak heptan s TC 3. To může být vysvětleno již zmíněným prouděním vzduchu a pro n-heptan naopak moc blízkým umístěním TC 1 k povrchu kapaliny.

Shrnutí výsledků

Experimentální měření a simulace jednotlivých případů shodně potvrdily pro dané podmínky vysokou účinnost použité trysky vodní mlhy. Při zkoumání trendu poklesu teplot je možné pozorovat výraznou shodu mezi simulovanými modely a experimentálně změřenými hodnotami, je tedy patrné, že simulací bylo možné relativně dobře reprodukovat hasící účinek vodní mlhy.

V některých aspektech se naměřené a nasimulované výsledky lišily. Jednalo se především o průběhy teplot na TC ve velmi nízkých výškách nad hladinou kapaliny, a naopak v úrovních konce plamenů a výše. Jak bylo zmíněno, rozdíly hodnot mezi modelem a experimentem v TC 4 a TC 5 mohly být způsobeny především spuštěnou centrální vzduchotechnickou jednotkou či dalším prouděním okolního vzduchu. To však samotnou hasicí účinnost nijak výrazně neovlivnilo a na základě získaných dat z teplotních průběhů lze tedy považovat matematický model se současným nastavením parametrů na úspěšný v ohledu modelace hašení.

4 Závěr

Práce se zabývala zkoumáním hasicího účinku vodní mlhy, a to nejen zkoumáním uskutečněného experimentu, ale také porovnáním shody s matematickými modely z programu FDS. V teoretické části byl proveden popis aktuálního stavu problematiky vodní mlhy a možnosti modelace pro hašení pomocí vodní mlhy za požáru.

V práci bylo nejprve popsáno volné hoření etanolu pro validaci a popis měřících parametrů. Na základě této validační studie bylo rozhodnuto o volbě nastavení modelu FDS. Se zvolenou metodikou bylo dále pozorováno hašení vodní mlhou pro dvě hořlavé kapaliny v různých objemech a s různou výškou umístění trysky vodní mlhy. Pro zkoumání hasicí účinnosti bylo rozhodnuto o zkoumání změn průběhu teplot v čase v jednotlivých výškových úrovních. Zkoumání různých přístupů k filtraci a výběru dat prokázalo, že pro jednodušší modely je možné se spolehnout na funkce, které nabízí program FDS namísto ruční úpravy a popisu hrubých dat.

Na všech modelech byly pozorovány a popsány rozdíly mezi změřenými daty a výstupem z matematického CFD s využitím software FDS. Tyto rozdíly byly způsobeny zejména externími vlivy při experimentu a možnou nepřesností autora při instalaci experimentu. I přes mírné odchylky teplot bylo ve většině případů možné sledovat identické trendy vývoje teploty.

Dále bylo na všech modelech jednoznačně patrné, že hasicí účinnost vodní mlhy se specifikovanými parametry byla dostatečná ve všech sledovaných případech. K ochlazení z teploty rozvinutého hoření na požadovanou teplotu došlo u všech sledovaných modelů v čase kratším než 10 s. Při porovnání modelu volného hoření a modelu hašení vodní mlhou lze ve všech případech pozorovat výrazně rychlejší snížení teploty při zapojení vodní mlhy. Na základě těchto pozorování lze tedy tvrdit, že hašení vodní mlhou výrazně snižuje teploty v okolí hořlavé kapaliny ve velmi krátkém čase.

Na realizovaných experimentech a na odpovídajících modelech bylo možno potvrdit některé předpoklady vyjádřené v teoretických kapitolách této práce, jako např. linearitu poklesu teploty při volném odhořívání zbytkového etanolu. Dále bylo možno experimentálně potvrdit některé údaje uváděné v literatuře, jako např. hmotnostní úbytek etanolu při volném hoření.

Další zkoumání hasicí účinnosti vodní mlhy a samotná validace této práce může probíhat změnou různých dalších parametrů, jejichž míra vlivu nebyla v práci vyhodnocena. Mezi tyto parametry se řadí např. využití jiného paliva, další navýšení plochy hořlavého paliva, výstřikové charakteristiky trysky použité pro hašení, či modelace experimentu v prostoru s různou rychlostí proudícího vzduchu v blízkém okolí experimentu. V neposlední řadě se lze také zabývat zkoumáním hasicí účinnosti pro identické experimenty využitím jiné trysky (středo-, vysokotlaká vodní mlha), či jiného druhu vodního SHZ a zhodnotit efektivitu hašení v závislosti na použitém množství hasiva.

Literatura

[1] JANSSENS, Marc J. *An Introduction to Mathematical Fire Modeling*. Lancester, Pennsylvanie: Technomic Publishing Company, Inc., 2020. 2. série. ISBN 1-56676-920-5.

[2] QUINTIERE, James G. *Principles of Fire Behavior*. USA: CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4987-3562-9.

[3] KUČERA, Petr, Jiří POKORNÝ, Tomáš PAVLÍK a Rudolf KAISER. *Požární inžnýrství. Dynamika požáru*. 1. vydání. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, nedatováno. ISBN 978-80-7385-074-6.

[4] DILLON, Scot Edward. *Analysis of the ISO 9705 Room/Corner Test: Simulations, Correlations and Heat Flux Measurements.* Maryland, University of Maryland: Faculty of the Graduate School, University of Maryland, 1998.

[5] *Vyhláška č. 246/2001 Sb. Vyhláška o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci)*. Praha: Ministerstvo vnitra 2001

[6] RYBÁŘ, P. Mlhová stabilní hasicí zařízení pro protipožární ochranu objektů a technologií (1. část). *TZB-info* [online]. [vid. 2020-03-08]. Dostupné z: https://rb.gy/6feqmu

[7] RYBÁŘ, Pavel. *Příklady použití stabilních hasicích zařízení v ochraně majetku a technologií* [online]. 2. vydání. Elektronické vydání: Ministerstvo vnitra - generální ředitelství HZS ČR, 2014. ISBN 978-80-86466-71-2. Dostupné z: https://rb.gy/dlzb7y

[8] *ČSN EN 12845+A1 Stabilní hasicí zařízení - Sprinklerová zařízení - Navrhování, instalace a údržba*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2020

[9] HURLEY, Morgan J., Daniel T. GOTTUK, John R. HALL, Kazunori HARADA, Erica D. KULIGOWSKI, Milosh PUCHOVSKY, Jose L. TORERO, John. M. Jr. WATTS a Christopher WIECZOREK. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [online]. 2016. 5. edice. ISBN ISBN 978-1-4939-2565-0. Dostupné z: https://rb.gy/n2y5bm

[10] *ČSN P CEN/TS 14972 - Stabilní hasicí zařízení - Mlhová zařízení - Navrhování a instalace*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011

[11] RASHBASH, D. J. The Extinction of Fire with Plain Water: A Review. *Fire Safety Science Digital Archive* [online]. 1986. Dostupné z: https://rb.gy/ssodhn

[12] LIU, Zhigang a Andrew K. KIM. A review of water mist fire suppression systems - fundamental studies. *Research Gate* [online]. zima 2020. Dostupné z: https://rb.gy/p9gwok

[13] JAFARI, Masoumeh. *Analysis of heat transfer in spray cooling systems using numerical simulations* [online]. B.m., 2013. University of Windsor. Dostupné z: https://core.ac.uk/download/pdf/72770903.pdf

[14] HUSTED, Bjarne P., Goran HOLMSTED a Tommy HERTZBERG. The physics behind water mist. In: *IWMA conference* [online]. nedatováno. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237389286_The_physics_behind_water_mist_systems

[15] ČMELÍKOVÁ, Tereza. *Matematické modelování hašení vodní mlhou* [online]. B.m.: VŠCHT. 2016. Dostupné z: https://rb.gy/pcy9jy

[16] M, Pokorný, Eliáš M a Kregl F. Požární zkouška ochrany ocelového nosníku nízkotlakou vodní mlhou [online]. 2019 [vid. 2020-03-04]. ISSN 1210-1389 (print). Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/handle/10467/86894

[17] CHEUNG, W. Y. Radiation blockage of water curtains. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes* [online]. 2009, **1.**, str. 7-13. Dostupné z: https://www.bse.polyu.edu.hk/researchcentre/fire_engineering/summary_of_output/journal/IJEPBFC/2009/P7-13.pdf

[18] TRSEK, Vojtěch. *Útlum tepelného toku při prostupu vodní clonou* [online]. Praha, 2017. diplomová práce. ČVUT v Praze. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/74129/F1-DP-2018-Trsek-Vojtech-DP_ke_zverejneni.pdf?sequence=-1&isAllowed=y

[19] ANDERSSON, PETRA; ARVIDSON, MAGNUS; HOLMSTEDT, GÖRAN. Small scale experiments and theoretical aspects of flame extinguishment with water mist. *Research Portal at Lund University* [online]. 1996. Dostupné z: https://rb.gy/7gg2c8

[20] PECHOVÁ, Michaela, Bc. *Numerické modelování chlazení oblasti požáru vodní mlhou* [online]. B.m.: VŠCHT. 2018. Dostupné z: https://rb.gy/6b8eba

[21] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENÝŠEK, Marta KURKEJOVÁ a Ivo SCHWARZ. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.

[22] BARTÁK, Martin Ing. *Počítačové simulace proudění (CFD) ve větrání a klimatizaci* [online]. B.m.: ČVUT v Praze, FSI, Ústav techniky prostředí. Praha 2002. Dostupné z: https://rb.gy/fiqqr8

[23] PEACOCK, Richard D., Paul A. RENEKE a Glenn P. FORNEY. *CFAST – Consolidated Model of Fire, Growth and Smoke Transport Volume 2: User's Guide* [online]. B.m.: National Institute of Standards and Technology. 2020. Dostupné z: http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1889v2

[24] ARASTOOPOUR, Hamid, Dimitri GIDASPOW a Emad ABBASI. *Computational Transport Phenomena of Fluid-Particle Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2017. Mechanical Engineering Series. ISBN 978-3-319-45490-0.

[25] VLČEK, Petr, Ing. *Modelování turbulentního proudění* [online]. B.m.: České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky. 2013. Dostupné z: http://chps.fsid.cvut.cz/pt/2013/pdf/3509.pdf

[26] MCGRATTAN, Kevin, Simo HOSTIKKA, Jason FLOYD, Randall MCDERMOTT a Marcos VANELLA. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model* [online]. B.m.: National Institute of Standards and Technology. 2020. Dostupné z: https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html

[27] BELLAS, Roberto, Miguel A GÓMEZ, Arturo GONZÁLEZ-GIL, Jacobo PORTEIRO a José L. MÍGUEZ. Assessment of the Fire Dynamics Simulator for Modeling Fire Suppression in Engine Rooms of Ships with Low-Pressure Water Mist. *Fire Technol 56* [online]. 2020, 1315–1352. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1007/s10694-019-00931-8

[28] MCGRATTAN, Kevin, Simo HOSTIKKA, Jason FLOYD, Randall MCDERMOTT a Marcos VANELLA. *Fire Dynamics Simulator User's Guide* [online]. B.m.: National Institute of Standards and Technology. 2020. Dostupné z: https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html

[29] JAHODA, Milan. Počítačová dynamika tekutin - užitečný nástroj pro inženýry. In: [online]. B.m. 26. říjen 2020. Dostupné z: https://docplayer.cz/36832424-Pocitacova-dynamika-tekutin-uzitecny-nastroj-pro-inzenyry.html

[30] ELIÁŠ, Martin. *Hasicí a chladící účinky vodní mlhy v podmínkách požáru*. Praha, 2016. diplomová práce. ČVUT v Praze.

[31] ELIÁŠ, Martin a Marek POKORNÝ. Porovnání experimentální výstřikové charakteristiky vodních mlhových trysek a matematického CFD modelu. In: *Požární ochrana 2017: sborník příspěvků z mezinárodní konference*. Ostrava: SPBI, 2017. ISBN 978- 80-7385-188-0.

[32] HILTZ, John A. *Additives for water mist fire suppression systems. A review* [online]. B.m.: Defence R&D Canada - Atlantic. 2012. Dostupné z: https://bit.ly/3fCj9V9

[33] ZHANG, Tianwei a Liu HAO. Experimental study on the synergic effect of fire extinguishing by water and potassium salts. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* [online]. 2019, (138), 2. Dostupné z: doi:10.1007/s10973-019-08234-4

[34] CHEN, Qiang, Jun-cheng JIANG, Fan WU a Meng-ya ZOU. Performance Evaluation of Water Mist with Mixed Surfactant Additives based on Absorption Property. In: *8th International Conference on Fire Protection Engineering* [online]. 2018, s. Str. 85-93. Dostupné z: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.12.141.

[35] CONG, B.H., G.X. LIAO a Z. HUANG. *Extinguishment of liquid fuel fires by water mist with additives* [online]. B.m.: State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China. 2007. Dostupné z: http://www.iafss.org/publications/aofst/7/95/view

[36] XIAOMENG, Zhou, Liao GUANGXUAN a Cai BO. *Improvement of water mist´s fire-extinguishing efficiency with MC additive* [online]. B.m.: State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China. 2005. Dostupné z: http://www.paper.edu.cn/scholar/showpdf/MUT2MNwIOTD0Qx2h

[37] LEE, Jaiho. Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening. *Nuclear Engineeering and Technology* [online]. nedatováno, **51**(2), 410–423. ISSN 1738-5733. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.net.2018.10.026.

[38] *Bezpečnostní list: n-Heptan* [online]. B.m.: PENTA s.r.o. Praha 2019. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/bezpecnostni-listy/n-heptan.pdf

[39] *Bezpečnostní list: Ethanol* [online]. Praha 2020. Dostupné z: https://www.pentachemicals.eu/soubory/bezpecnostni-listy/ethanol_96_.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1: Trojúhelník hoření 3
Obrázek 2: Fáze požáru v uzavřeném prostoru (upraveno z [3]) 4
Obrázek 3: Znázornění objemové a lokální ochrany SHZ (převzato z [6]) 6
Obrázek 4: Schématická ilustrace ochlazovacího efektu (upraveno z[13]) 11
Obrázek 5: Schématické dělení modelů požáru (převzato z [21]) 14
Obrázek 6: Různá zobrazení příkazu &SLCF (převzato z [21]) 24
Obrázek 7: Umístění veličin v jednotlivé buňce výpočetní sítě (převzato z [26]) 25
Obrázek 8: Napojení mřížek v FDS a) správné, b) špatné (převzato z [21]a [28]) 26
Obrázek 9: Largrangeův přístup k částicím Obrázek 10: Eulerův přístup k částicím 30
Obrázek 11: Znázornění vnitřního (30°) a vnějšího (80°) úhlu a příkazu OFFSET (převzato z [28]) 32
Obrázek 12: Půdorys požární laboratoře UCEEB, ČVUT Prha (převzato z [30]) 38
Obrázek 13: Řez požární laboratoří UCEEB, ČVUT Prha (převzato z[30]) 38
Obrázek 14: Schéma umístění nádoby a vzdálenost měřících aparátů pro experiment [mm] 39
Obrázek 15: Tryska CSFH 11 použita při experimentech 41
Obrázek 16: Průběh teplot v TC u 1. volného hoření etanolu (experiment č. 0) 43
Obrázek 17: Průběh teplot v TC u a) 2. opakování a b) 3. opakování volného hoření etanolu 43
Obrázek 18: Fotografie z průběhu hašení etanolu s tryskou ve výši 75 cm nad hranou nádoby 44
Obrázek 19: Průběh teplot v TC u hašení etanolu s tryskou ve výši 1 m nad hranou nádoby (experiment č. 4) 44
Obrázek 20: Porovnání výše plamenů u a) etanolu a b) n-heptanu 45
Obrázek 21: Průběh teplot v TC u hašení n-heptanu s tryskou ve výši 1 m nad hranou nádoby (experiment č. 5) 46
Obrázek 22: Srovnání průběhu teplot etanolu (E) a n-heptanu (H) při použití tří nádob s palivem (experiment č. 6 a 7) 46
Obrázek 23: Srovnání průběhu teplot TC 5 na n-heptanu o různých objemech (experimenty č. 5, 7 a 8). 47
Obrázek 24: Pokles teplot u a) TC 2 a b) TC 5 při hašení n-heptanu o různých objemech paliva (experimenty č. 5, 7 a 8) 47
Obrázek 25: Příklad jednoho z měření úbytku hmoty s jeho spojnicí trendu 48
Obrázek 26: Průběh teploty na jednom z čidel úrovně 1, všechny hrubosti mřížky 50
Obrázek 27: Porovnání jednotlivých teplot na čidlech úrovně 1 s jejich průměrem, DT_DEVC. 53
Obrázek 28: Průběh průměru teplot v úrovni čidla 1 při vlastním výběru dat a s použitím DT_DEVC ... 53

Obrázek 29: Vertikální profil teplot na jednotlivých úrovních v čase 20 s 54

Obrázek 30: Porovnání měření teploty čidlem a TC, úroveň 1 55

Obrázek 31: Porovnání měření teploty čidlem a TC, úroveň 5 55

Obrázek 32: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 1 (model č. 0) 60

Obrázek 33: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 2 (model č. 0) 61

Obrázek 34: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 3 (model č. 0) 61

Obrázek 35: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 4 (model č. 0) 61

Obrázek 36: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 5 (model č. 0) 61

Obrázek 37: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 1, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1) 61

Obrázek 38: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 2, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1) 62

Obrázek 39: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 3, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1) 62

Obrázek 40: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 4, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1) 62

Obrázek 41: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 5, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1) 62

Obrázek 42: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 2, tryska ve výši a) 0,5 a b) 0,75 m nad hranou (model č. 2) 62

Obrázek 43: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS, tryska ve výši 1,0 m nad hranou nádoby (model č. 4) 63

Obrázek 44: Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS, tryska ve výši 1,0 m nad hranou (model č. 5) 63

Obrázek 45: Srovnání shody průběhu teplot TC 1 (model 6) vs FDS 64

Obrázek 46: Srovnání shody průběhu teplot TC 2 (model 6) vs FDS 64

Obrázek 47: Srovnání shody průběhu teplot TC 3 (model 6) vs FDS 64

Obrázek 48: Srovnání shody průběhu teplot TC 4 (model 6) vs FDS 64

Obrázek 49: Srovnání shody průběhu teplot TC 5 (model 6) vs FDS 65

Obrázek 50: Srovnání shody průběhu teplot TC 1 (model 7) vs FDS 65

Obrázek 51: Srovnání shody průběhu teplot TC 2 (model 7) vs FDS 65

Obrázek 52: Srovnání shody průběhu teplot TC 3 (model 7) vs FDS 65

Obrázek 53: Srovnání shody průběhu teplot TC 4 (model 7) vs FDS 65

Obrázek 54: Srovnání shody průběhu teplot TC 5 (model 7) vs FDS 66

Seznam tabulek

Tabulka 1: Rozdělení mlhových SHZ dle konstrukčního řešení 8
Tabulka 2: Rozdělení mlhových SHZ dle systémového řešení 8
Tabulka 3: Fyzikální a chemické vlastnosti použitých hořlavých kapalin [38, 39] 39
Tabulka 4: Specifikace výstřikových charakteristik trysky dle technického listu výrobce 41
Tabulka 5: Seznam a očíslování jednotlivých experimentů s vysvětlením 42
Tabulka 6: Průměrné hodnoty v_x vyjádřené v procentech pro průměr teplot po 5 a 10 krocích 51
Tabulka 7: Průměrné v_x v procentech pro teplotu ze 4 čidel na jedné úrovni pro všechny hrubosti 52
Tabulka 8: Seznam a očíslování jednotlivých matematických modelů s vysvětlením 56
Tabulka 9: Specifikace výstřikových charakteristik trysky pro dosažení požadovaného efektu [31]..... 58

Přílohy

Zdrojové kódy FDS

Model 0: Volné hoření etanolu (mřížka 1/2)

```
&HEAD CHID='1_2_cm', TITLE='Volne horeni 100 ml ethanolu po dobu 150 s'/
&TIME T_END=150.0/
&DUMP DT_RESTART=30.0/

&MESH ID='Mesh100',   IJK=28,28,140,XB=0.36,0.64,0.36,0.64,0.0,1.4/
&MESH ID='Mesh200-a', IJK=18,32,70, XB=0.00,0.36,0.00,0.64,0.0,1.4/
&MESH ID='Mesh200-b', IJK=32,18,70, XB=0.36,1.00,0.00,0.36,0.0,1.4/
&MESH ID='Mesh200-c', IJK=32,18,70, XB=0.00,0.64,0.64,1.00,0.0,1.4/
&MESH ID='Mesh200-d', IJK=18,32,70, XB=0.64,1.00,0.36,1.00,0.0,1.4/

&REAC ID='ETHANOL', FUEL='ETHANOL', CO_YIELD=6.0E-3, SOOT_YIELD=0.015/

&PROP ID='THERMOCPL', DIAMETER = 0.002/
&DEVC ID='THC1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.05, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.15, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.3, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.55, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC5', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.8, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='TC1_RF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.49,0.05/
&DEVC ID='TC1_LF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.49,0.05/
&DEVC ID='TC1_RB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.51,0.05/
&DEVC ID='TC1_LB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.51,0.05/
&DEVC ID='TC2_RF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.49,0.15/
&DEVC ID='TC2_LF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.49,0.15/
&DEVC ID='TC2_RB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.51,0.15/
&DEVC ID='TC2_LB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.51,0.15/
&DEVC ID='TC3_RF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.49,0.30/
&DEVC ID='TC3_LF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.49,0.30/
&DEVC ID='TC3_RB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.51,0.30/
&DEVC ID='TC3_LB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.51,0.30/
&DEVC ID='TC4_RF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.49,0.55/
&DEVC ID='TC4_LF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.49,0.55/
&DEVC ID='TC4_RB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.51,0.55/
&DEVC ID='TC4_LB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.51,0.55/
&DEVC ID='TC5_RF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.49,0.8/
&DEVC ID='TC5_LF', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.49,0.8/
&DEVC ID='TC5_RB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.49,0.51,0.8/
&DEVC ID='TC5_LB', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.51,0.51,0.8/
&DEVC ID='Heat_flux_senzor', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.3,0.5,0.22, ORIENTATION=1,0,0/

&MATL ID='STEEL',
    SPECIFIC_HEAT=0.46,
    CONDUCTIVITY=45.8,
    DENSITY=7850.0,
    EMISSIVITY=1.0/
&MATL ID='ETHANOL',
    SPECIFIC_HEAT=2.44,
    CONDUCTIVITY=0.17,
    DENSITY=789.0,
    ABSORPTION_COEFFICIENT=1534.3,
    EMISSIVITY=1.0,
    HEAT_OF_REACTION=838.0,
    SPEC_ID(1,1)='ETHANOL',
    NU_SPEC(1,1)=1.0,
    BOILING_TEMPERATURE=78.5/
&SURF ID='STEEL SHEET',
    COLOR='BLACK',
    BACKING='INSULATED',
    MATL_ID(1,1)='STEEL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.01/
&SURF ID='ETHANOL',
    COLOR='RED',
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    MATL_ID(1,1)='ETHANOL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.0025/

&OBST ID='Plech_Fr', XB=0.4,0.6,0.4,0.4,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Le', XB=0.4,0.4,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ri', XB=0.6,0.6,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ba', XB=0.4,0.6,0.6,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/

&VENT ID='horlava_kapalina', SURF_ID='ETHANOL', XB=0.4,0.6,0.4,0.6,0.0,0.0/
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=0.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.5/
&TAIL /
```

Model 0: Volné hoření etanolu (mřížka 2,5/5)

```
&HEAD CHID='2_5_cm_DT1', TITLE='Volne horeni ethanolu 180 s se 4 TC v kazde rovine'/
&TIME T_END=180.0/
&DUMP DT_DEVC=1, DT_RESTART=30.0/

&MESH ID='Mesh200-d-a', IJK=16,16,56, XB=0.3,0.7,0.3,0.7,0,1.4/0.025
&MESH ID='Mesh200-d-b', IJK=6,20,28, XB=0,0.3,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh200-d-c', IJK=6,20,28, XB=0.7,1,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh200-d-d', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0,0.3,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh200-d-e', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0.7,1,0,1.4/0.05

&REAC ID='ETHANOL', FUEL='ETHANOL', CO_YIELD=6.0E-3,  SOOT_YIELD=0.015/

&DEVC ID='THC1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.05, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.15, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.3, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.55, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC5', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.8, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&PROP ID='THERMOCPL', DIAMETER = 0.002/
&DEVC ID='Heat_flux_senzor', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.3,0.5,0.22, ORIENTATION=1,0,0/

&MATL ID='STEEL',
    SPECIFIC_HEAT=0.46,
    CONDUCTIVITY=45.8,
    DENSITY=7850.0,
    EMISSIVITY=1.0/
&MATL ID='ETHANOL',
    SPECIFIC_HEAT=2.44,
    CONDUCTIVITY=0.17,
    DENSITY=789.0,
    ABSORPTION_COEFFICIENT=1534.3,
    EMISSIVITY=1.0,
    HEAT_OF_REACTION=838.0,
    SPEC_ID(1,1)='ETHANOL',
    NU_SPEC(1,1)=1.0,
    BOILING_TEMPERATURE=78.5/
&SURF ID='STEEL SHEET',
    COLOR='BLACK',
    BACKING='INSULATED',
    MATL_ID(1,1)='STEEL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.01/
&SURF ID='ETHANOL',
    COLOR='RED',
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    MATL_ID(1,1)='ETHANOL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.0025/

&OBST ID='Plech_Fr', XB=0.4,0.6,0.4,0.4,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Le', XB=0.4,0.4,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ri', XB=0.6,0.6,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ba', XB=0.4,0.6,0.6,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/

&VENT ID='horlava_kapalina', SURF_ID='ETHANOL', XB=0.4,0.6,0.4,0.6,0.0,0.0/
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=0.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.5/
&TAIL /
```

Model 1, 2, 4: Hašení 100 ml etanolu tryskou z 0,5, 0,75 a 1,0 m

```
&HEAD CHID='2_5_cm_VM050_DT1', TITLE='Haseni 100 ml ethanolu tryskou z 0,5 m'/
&TIME T_END=70.0/
&DUMP DT_DEVC=1, DT_RESTART=30.0/

&MESH ID='Mesh250, IJK=16,16,56, XB=0.3,0.7,0.3,0.7,0,1.4/0.025
&MESH ID='Mesh500-d-b', IJK=6,20,28, XB=0,0.3,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-c', IJK=6,20,28, XB=0.7,1,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-d', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0,0.3,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-e', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0.7,1,0,1.4/0.05

&SPEC ID='WATER VAPOR'/

&PART ID='WATER DROPS',
    SPEC_ID='WATER VAPOR',
    DIAMETER=60.0,
    MINIMUM_DIAMETER=1.0,
    MAXIMUM_DIAMETER=1000.0,
    DISTRIBUTION='LOGNORMAL',
    QUANTITIES='PARTICLE DIAMETER','PARTICLE TEMPERATURE',
    AGE=10.0,
    SAMPLING_FACTOR=1.0,
    CHECK_DISTRIBUTION = .TRUE./
&REAC ID='ETHANOL', FUEL='ETHANOL', CO_YIELD=6.0E-3, SOOT_YIELD=0.015/

&PROP ID='NOZZLE',
    PART_ID='WATER DROPS',
    OFFSET=0.01,
    K_FACTOR=2.15,
    OPERATING_PRESSURE=13.5,
    PARTICLE_VELOCITY=42.8,
```

```
    SPRAY_ANGLE=0.0,55.0/
&DEVC ID='THC1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.05, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.15, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.3, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.55, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC5', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.8, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&PROP ID='THERMOCPL', DIAMETER = 0.002/

&DEVC ID='Heat_flux_senzor', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.3,0.5,0.22, ORIENTATION=1,0,0/
&DEVC ID='NOZZLE_1', PROP_ID='NOZZLE', XYZ=0.5,0.5,0.55, QUANTITY='TIME', SETPOINT=60.0/0.55 pro model 1, 0.8 pro model 2, 1.05 pro model 4

&MATL ID='STEEL', SPECIFIC_HEAT=0.46, CONDUCTIVITY=45.8, DENSITY=7850.0, EMISSIVITY=1.0/

&MATL ID='ETHANOL',
    SPECIFIC_HEAT=2.44,
    CONDUCTIVITY=0.17,
    DENSITY=789.0,
    ABSORPTION_COEFFICIENT=1534.3,
    EMISSIVITY=1.0,
    HEAT_OF_REACTION=838.0,
    SPEC_ID(1,1)='ETHANOL',
    NU_SPEC(1,1)=1.0,
    BOILING_TEMPERATURE=78.5/
&SURF ID='STEEL SHEET',
    COLOR='BLACK',
    BACKING='INSULATED',
    MATL_ID(1,1)='STEEL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.01/
&SURF ID='ETHANOL',
    COLOR='RED',
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    MATL_ID(1,1)='ETHANOL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.0025/

&OBST ID='Plech_Fr', XB=0.4,0.6,0.4,0.4,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Le', XB=0.4,0.4,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ri', XB=0.6,0.6,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ba', XB=0.4,0.6,0.6,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/

&VENT ID='horlava_kapalina', SURF_ID='ETHANOL', XB=0.4,0.6,0.4,0.6,0.0,0.0/
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=0.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.5/
&TAIL /
```

Model 3, 5: Hašení 100 ml n-heptanu tryskou z 0,75 a 1,0 m

```
&HEAD CHID='HE_2_5_cm_VM075_DT1', TITLE='Haseni 100 ml n-heptanu tryskou z 0,75 m'/
&TIME T_END=70.0/
&DUMP DT_DEVC=1, DT_RESTART=30.0/

&MESH ID='Mesh250, IJK=16,16,56, XB=0.3,0.7,0.3,0.7,0,1.4/0.025
&MESH ID='Mesh500-d-b', IJK=6,20,28, XB=0,0.3,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-c', IJK=6,20,28, XB=0.7,1,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-d', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0,0.3,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-e', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0.7,1,0,1.4/0.05

&SPEC ID='WATER VAPOR'/

&PART ID='WATER DROPS',
    SPEC_ID='WATER VAPOR',
    DIAMETER=60.0,
    MINIMUM_DIAMETER=1.0,
    MAXIMUM_DIAMETER=1000.0,
    DISTRIBUTION='LOGNORMAL',
    QUANTITIES='PARTICLE DIAMETER','PARTICLE TEMPERATURE',
    AGE=10.0,
    SAMPLING_FACTOR=1.0,
    CHECK_DISTRIBUTION =.TRUE./
&REAC ID='N-HEPTANE',
    FUEL='N-HEPTANE',
    AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=20.0,
    CO_YIELD=0.01,
    SOOT_YIELD=0.037,
    H=16.0,
    C=7.0/015/
&PROP ID='NOZZLE',
    PART_ID='WATER DROPS',
    OFFSET=0.01,
    K_FACTOR=2.15,
    OPERATING_PRESSURE=13.5,
    PARTICLE_VELOCITY=42.8,
    SPRAY_ANGLE=0.0,55.0/

&DEVC ID='THC1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.05, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.15, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.3, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.55, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC5', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.8, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&PROP ID='THERMOCPL', DIAMETER = 0.002/
&DEVC ID='Heat_flux_senzor', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.3,0.5,0.22, ORIENTATION=1,0,0/
```

```
&DEVC ID='NOZZLE_1', PROP_ID='NOZZLE', XYZ=0.5,0.5,0.8, QUANTITY='TIME', SETPOINT=44.0/, 0.8 pro model 3, 1.05 pro model 5

&MATL ID='STEEL', SPECIFIC_HEAT=0.46, CONDUCTIVITY=45.8, DENSITY=7850.0, EMISSIVITY=1.0/

&MATL ID='N-HEPTANE_LIQUID',
    SPECIFIC_HEAT=2.24,
    CONDUCTIVITY=0.14,
    DENSITY=675.0,
    ABSORPTION_COEFFICIENT=333.0,
    EMISSIVITY=1.0,
    HEAT_OF_REACTION=317.0,
    SPEC_ID(1,1)='N-HEPTANE',
    NU_SPEC(1,1)=1.0,
    BOILING_TEMPERATURE=98.35/
&SURF ID='STEEL SHEET',
    COLOR='BLACK',
    BACKING='INSULATED',
    MATL_ID(1,1)='STEEL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.01/
&SURF ID='N-HEPTANE_POOL',
    COLOR='RED',
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    MATL_ID(1,1)='N-HEPTANE_LIQUID',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.0025/

&OBST ID='Plech_Fr', XB=0.4,0.6,0.4,0.4,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Le', XB=0.4,0.4,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ri', XB=0.6,0.6,0.4,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ba', XB=0.4,0.6,0.6,0.6,0.0,0.05, SURF_ID='STEEL SHEET'/

&VENT ID='horlava_kapalina', SURF_ID='N-HEPTANE_POOL', XB=0.4,0.6,0.4,0.6,0.0,0.0/
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=0.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.5/
&TAIL /
```

Model 6: Hašení 3 nádob s etanolem tryskou z 1,0 m

```
&HEAD CHID='2_5_cm_VM100_DT1_3N', TITLE='Haseni ethanolu ve trech nádobách o plose 0.1 m2 tryskou z 1 m'/
&TIME T_END=70.0/
&DUMP DT_DEVC=1, DT_RESTART=30.0/

&MESH ID='Mesh250-d-a', IJK=16,16,56, XB=0.3,0.7,0.3,0.7,0,1.4/0.025
&MESH ID='Mesh500-d-b', IJK=6,20,28, XB=0,0.3,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-c', IJK=6,20,28, XB=0.7,1,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-d', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0,0.3,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-e', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0.7,1,0,1.4/0.05

&SPEC ID='WATER VAPOR'/

&PART ID='WATER DROPS',
    SPEC_ID='WATER VAPOR',
    DIAMETER=60.0,
    MINIMUM_DIAMETER=1.0,
    MAXIMUM_DIAMETER=1000.0,
    DISTRIBUTION='LOGNORMAL',
    QUANTITIES='PARTICLE DIAMETER','PARTICLE TEMPERATURE',
    AGE=10.0,
    SAMPLING_FACTOR=1
    CHECK_DISTRIBUTION = .TRUE./
&REAC ID='ETHANOL',
    FUEL='ETHANOL',
    CO_YIELD=6.0E-3,
    SOOT_YIELD=0.015/
&PROP ID='NOZZLE',
    PART_ID='WATER DROPS',
    OFFSET=0.01,
    K_FACTOR=2.15,
    OPERATING_PRESSURE=13.5,
    PARTICLE_VELOCITY=42.8,
    SPRAY_ANGLE=0.0,55.0/

&DEVC ID='THC1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.05, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.15, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.3, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.55, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC5', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.8, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&PROP ID='THERMOCPL', DIAMETER = 0.002/
&DEVC ID='Heat_flux_senzor', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.3,0.5,0.22, ORIENTATION=1,0,0/
&DEVC ID='NOZZLE_1', PROP_ID='NOZZLE', XYZ=0.5,0.5,1.05, QUANTITY='TIME', SETPOINT=60.0/

&MATL ID='STEEL',
    SPECIFIC_HEAT=0.46,
    CONDUCTIVITY=45.8,
    DENSITY=7850.0,
    EMISSIVITY=1.0/
&MATL ID='ETHANOL',
    SPECIFIC_HEAT=2.44,
    CONDUCTIVITY=0.17,
    DENSITY=789.0,
    ABSORPTION_COEFFICIENT=1534.3,
```

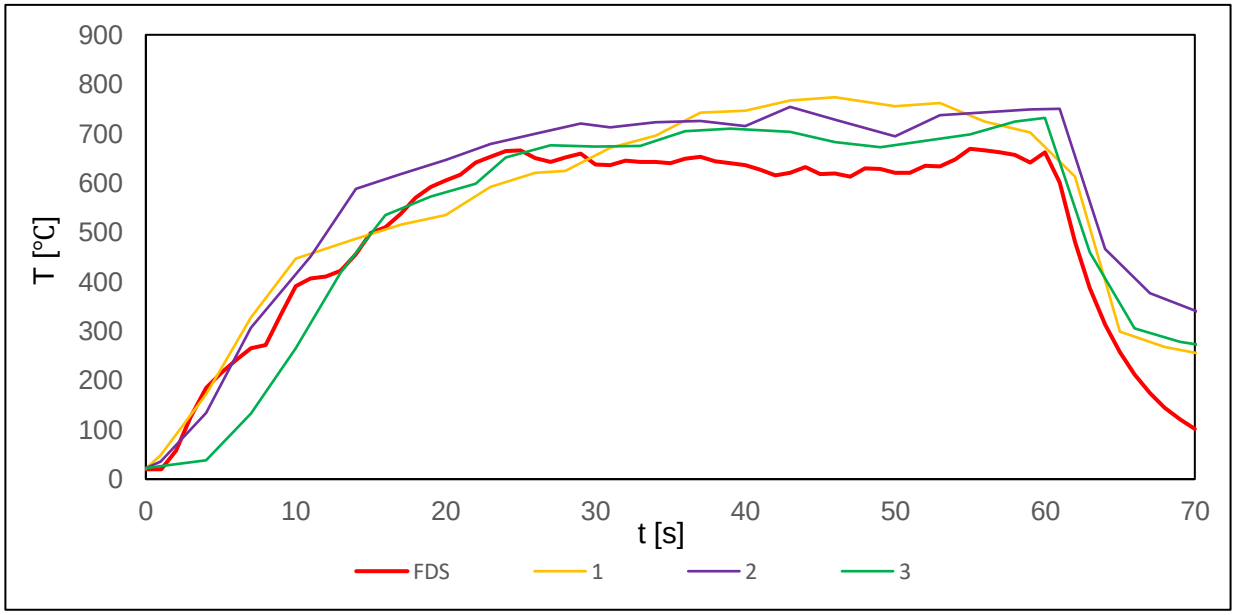
```
    EMISSIVITY=1.0,
    HEAT_OF_REACTION=838.0,
    SPEC_ID(1,1)='ETHANOL',
    NU_SPEC(1,1)=1.0,
    BOILING_TEMPERATURE=78.5/
&SURF ID='STEEL SHEET',
    COLOR='BLACK',
    BACKING='INSULATED',
    MATL_ID(1,1)='STEEL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.01/
&SURF ID='ETHANOL',
    COLOR='RED',
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    MATL_ID(1,1)='ETHANOL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.0025/

&OBST ID='Plech_Bo', XB=0.3,0.7,0.34,0.54,0.0,0.01, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Fr', XB=0.3,0.7,0.34,0.34,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Le', XB=0.3,0.3,0.34,0.54,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ri', XB=0.7,0.7,0.34,0.54,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ba', XB=0.3,0.7,0.54,0.54,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech2_Bo', XB=0.4,0.62,0.54,0.64,0.0,0.01, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech2_Le', XB=0.4,0.4,0.54,0.64,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech2 Ri', XB=0.62,0.62,0.54,0.64,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech2 Ba', XB=0.4,0.62,0.64,0.64,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/

&VENT ID='horlava_kapalina', SURF_ID='ETHANOL', XB=0.3,0.7,0.34,0.54,0.0,0.0/
&VENT ID='horlava_kapalina', SURF_ID='ETHANOL', XB=0.4,0.62,0.54,0.64,0.0,0.0/

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=0.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.5/
&TAIL /
```

Model 7, 8: Hašení 3 nádob s n-heptanem tryskou z 1,0 m objemy 100,100,70 ml a 150,150,100 ml

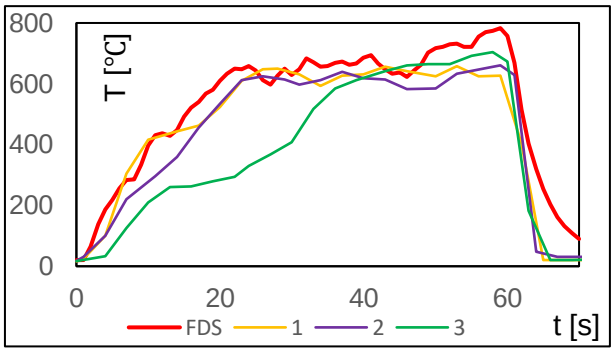
```
&HEAD CHID='HE_2_5_cm_VM100_DT1_3N', TITLE='Haseni n-heptanu ve trech nádobách o plose 0.1 m2 tryskou z 1 m'/
&TIME T_END=70.0/
&DUMP DT_DEVC=1, DT_RESTART=30.0/

&MESH ID='Mesh250-d-a', IJK=16,16,56, XB=0.3,0.7,0.3,0.7,0,1.4/0.025
&MESH ID='Mesh500-d-b', IJK=6,20,28, XB=0,0.3,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-c', IJK=6,20,28, XB=0.7,1,0,1,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-d', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0,0.3,0,1.4/0.05
&MESH ID='Mesh500-d-e', IJK=8,6,28, XB=0.3,0.7,0.7,1,0,1.4/0.05

&SPEC ID='WATER VAPOR'/

&PART ID='WATER DROPS',
    SPEC_ID='WATER VAPOR',
    DIAMETER=60.0,
    MINIMUM_DIAMETER=1.0,
    MAXIMUM_DIAMETER=1000.0,
    DISTRIBUTION='LOGNORMAL',
    QUANTITIES='PARTICLE DIAMETER','PARTICLE TEMPERATURE',
    AGE=10.0,
    SAMPLING_FACTOR=1
    CHECK_DISTRIBUTION = .TRUE./
&REAC ID='N-HEPTANE',
    FUEL='N-HEPTANE',
    AUTO_IGNITION_TEMPERATURE=20.0,
    CO_YIELD=0.01,
    SOOT_YIELD=0.037,
    H=16.0,
    C=7.0/
&PROP ID='NOZZLE',
    PART_ID='WATER DROPS',
    OFFSET=0.01,
    K_FACTOR=2.15,
    OPERATING_PRESSURE=13.5,
    PARTICLE_VELOCITY=42.8,
    SPRAY_ANGLE=0.0,55.0/

&DEVC ID='THC1', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.05, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC2', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.15, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC3', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.3, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC4', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.55, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&DEVC ID='THC5', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.5,0.5,0.8, PROP_ID = 'THERMOCPL'/
&PROP ID='THERMOCPL', DIAMETER = 0.002/
&DEVC ID='Heat_flux_senzor', QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX GAS', XYZ=0.3,0.5,0.22, ORIENTATION=1,0,0/
&DEVC ID='NOZZLE_1', PROP_ID='NOZZLE', XYZ=0.5,0.5,1.05, QUANTITY='TIME', SETPOINT=60.0/

&MATL ID='STEEL', SPECIFIC_HEAT=0.46, =45.8, DENSITY=7850.0, EMISSIVITY=1.0/
&MATL ID='N-HEPTANE_LIQUID',
    SPECIFIC_HEAT=2.24,
    CONDUCTIVITY=0.14,
    DENSITY=675.0,
    ABSORPTION_COEFFICIENT=333.0,
    EMISSIVITY=1.0,
    HEAT_OF_REACTION=317.0,
    SPEC_ID(1,1)='N-HEPTANE',
```

```
    NU_SPEC(1,1)=1.0,
    BOILING_TEMPERATURE=98.35/
&SURF ID='STEEL SHEET',
    COLOR='BLACK',
    BACKING='INSULATED',
    MATL_ID(1,1)='STEEL',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.01/
&SURF ID='N-HEPTANE_POOL',
    COLOR='RED',
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    MATL_ID(1,1)='N-HEPTANE_LIQUID',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
    THICKNESS(1)=0.0025/, 0.0025 pro model 7, 0.00375 pro model 8

&OBST ID='Plech_Bo', XB=0.3,0.7,0.34,0.54,0.0,0.01, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Fr', XB=0.3,0.7,0.34,0.34,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech_Le', XB=0.3,0.3,0.34,0.54,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ri', XB=0.7,0.7,0.34,0.54,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech Ba', XB=0.3,0.7,0.54,0.54,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech2_Bo', XB=0.4,0.62,0.54,0.64,0.0,0.01, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech2_Le', XB=0.4,0.4,0.54,0.64,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech2 Ri', XB=0.62,0.62,0.54,0.64,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/
&OBST ID='Plech2 Ba', XB=0.4,0.62,0.64,0.64,0.0,0.06, SURF_ID='STEEL SHEET'/

&VENT ID='horlava_kapalina', SURF_ID='N-HEPTANE_POOL', XB=0.3,0.7,0.34,0.54,0.0,0.0/
&VENT ID='horlava_kapalina', SURF_ID='N-HEPTANE_POOL', XB=0.4,0.62,0.54,0.64,0.0,0.0/

&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBY=0.5/
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE., PBX=0.5/
&TAIL /
```

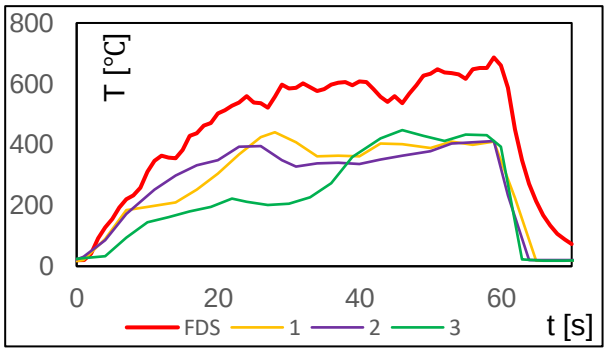
Grafy průběhů teplot



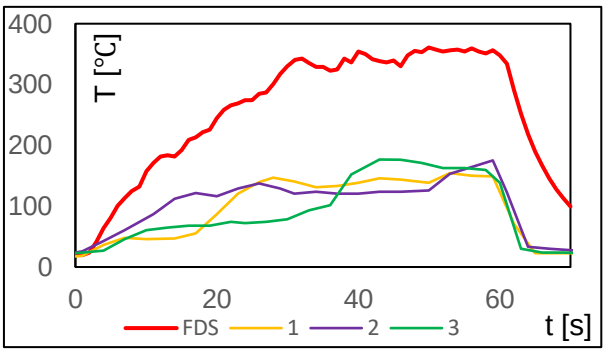
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 1, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)



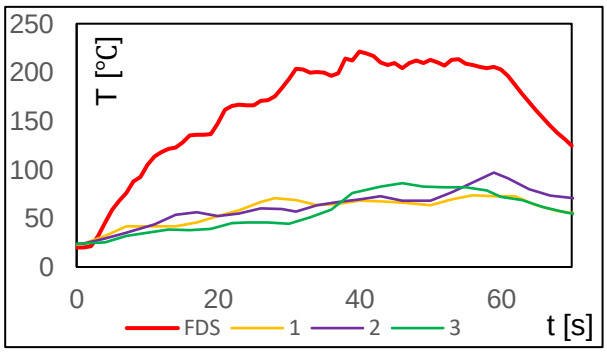
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 2, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)



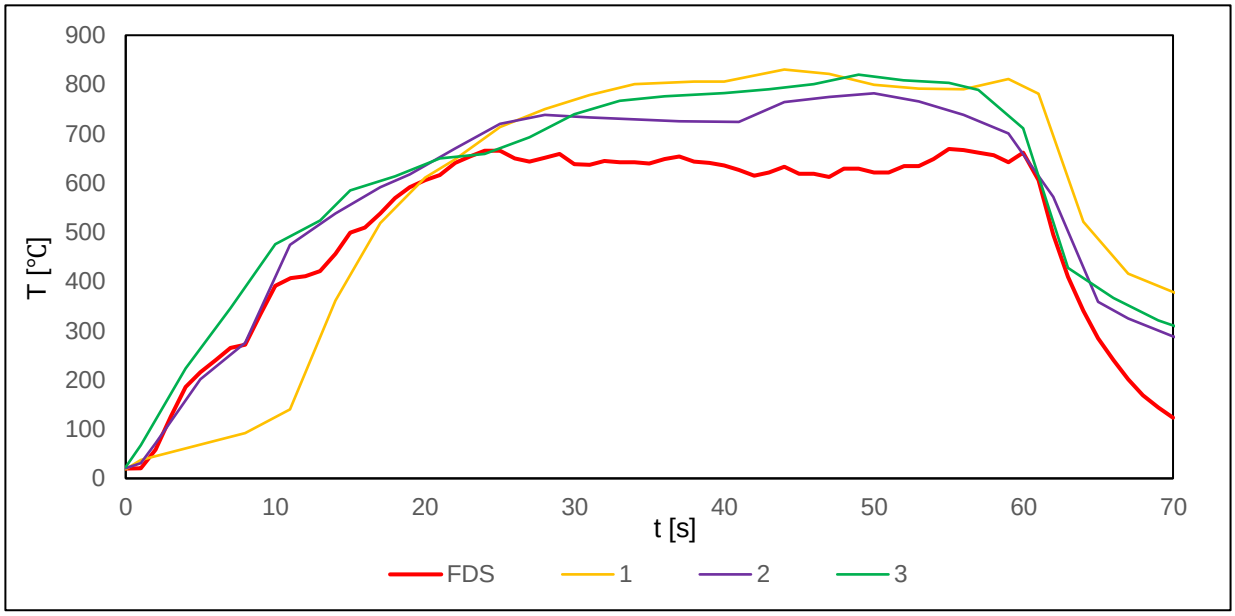
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 3, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)



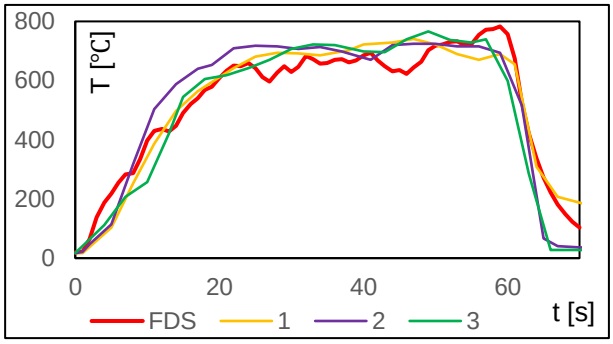
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 4, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)



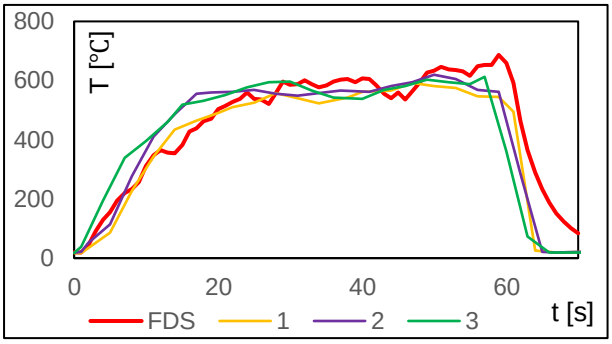
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 5, tryska ve výši 0,5 m nad hranou (model č. 1)



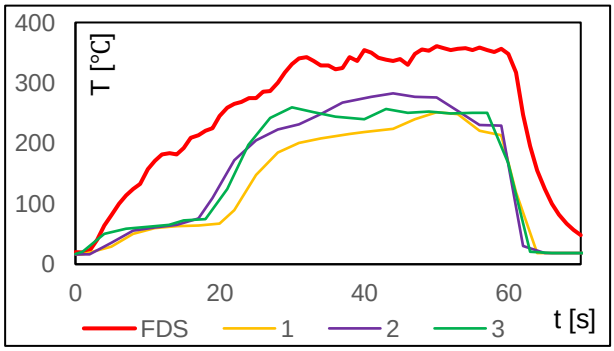
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 4, tryska ve výši 0,75 m nad hranou (model č. 2)



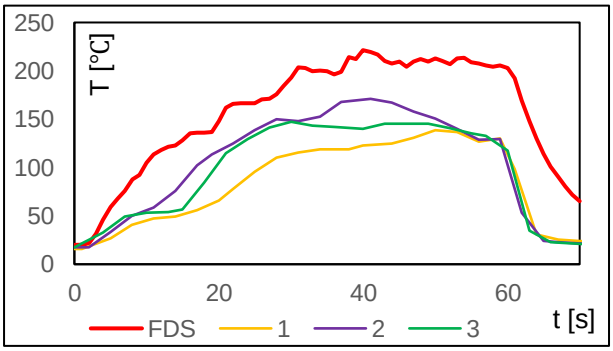
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 2, tryska ve výši 0,75 m nad hranou (model č. 2)



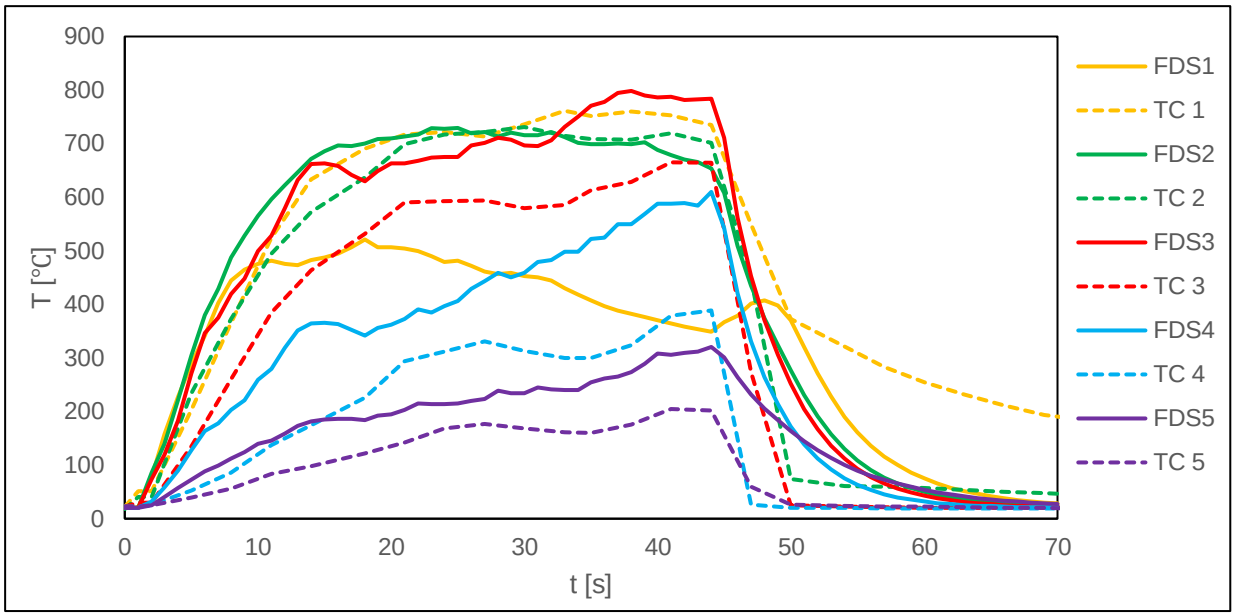
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 3, tryska ve výši 0,75 m nad hranou (model č. 2)



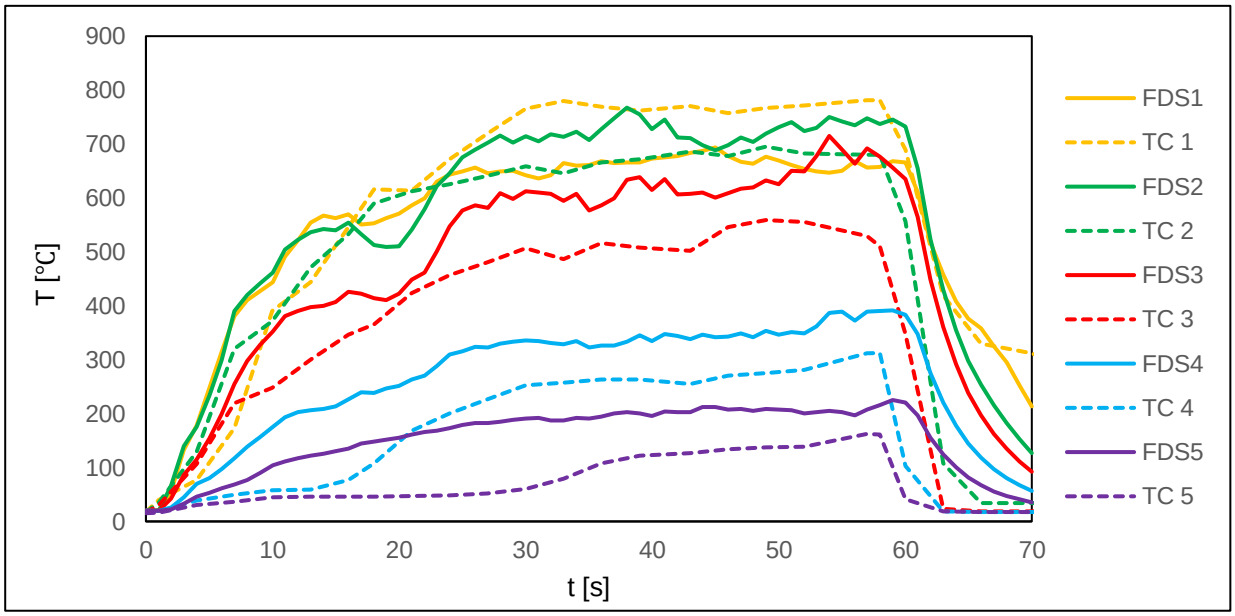
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 2, tryska ve výši 0,75 m nad hranou (model č. 2)



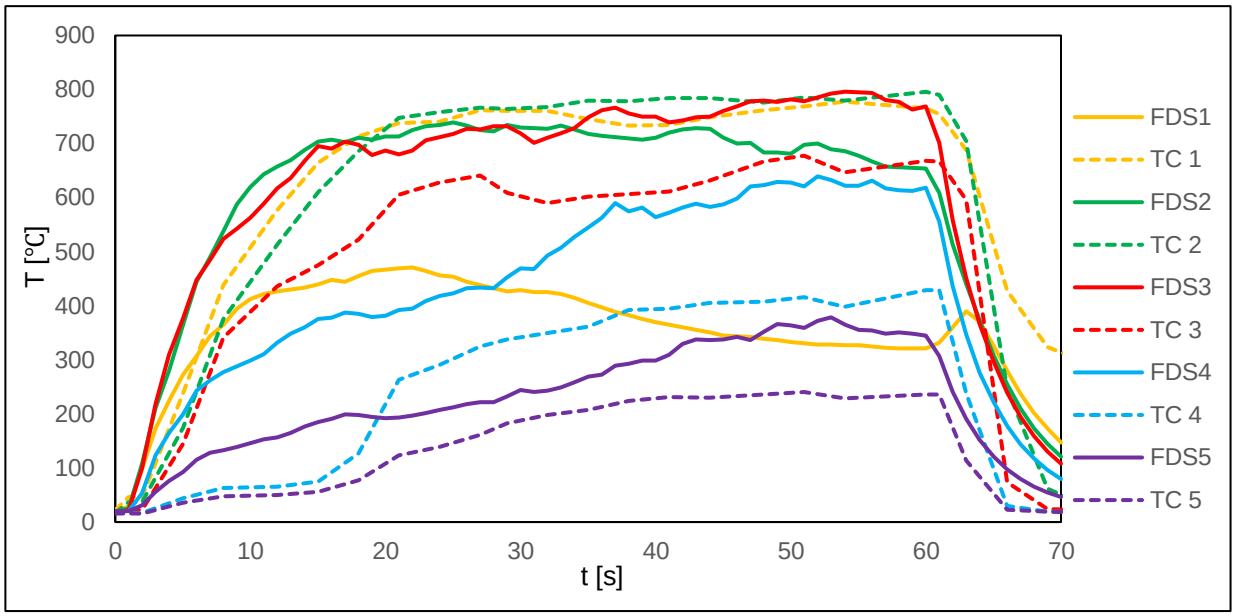
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na TC 3, tryska ve výši 0,75 m nad hranou (model č. 2)



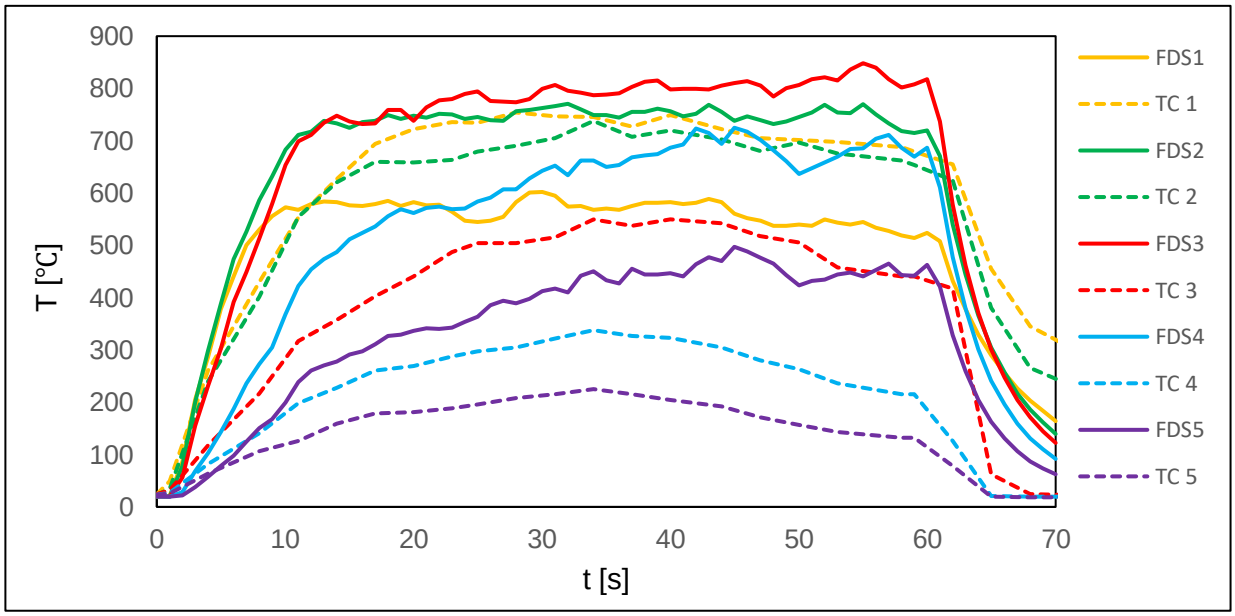
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na všech TC pro n-heptan, tryska ve výši 0,75 m nad hranou (model č. 3)



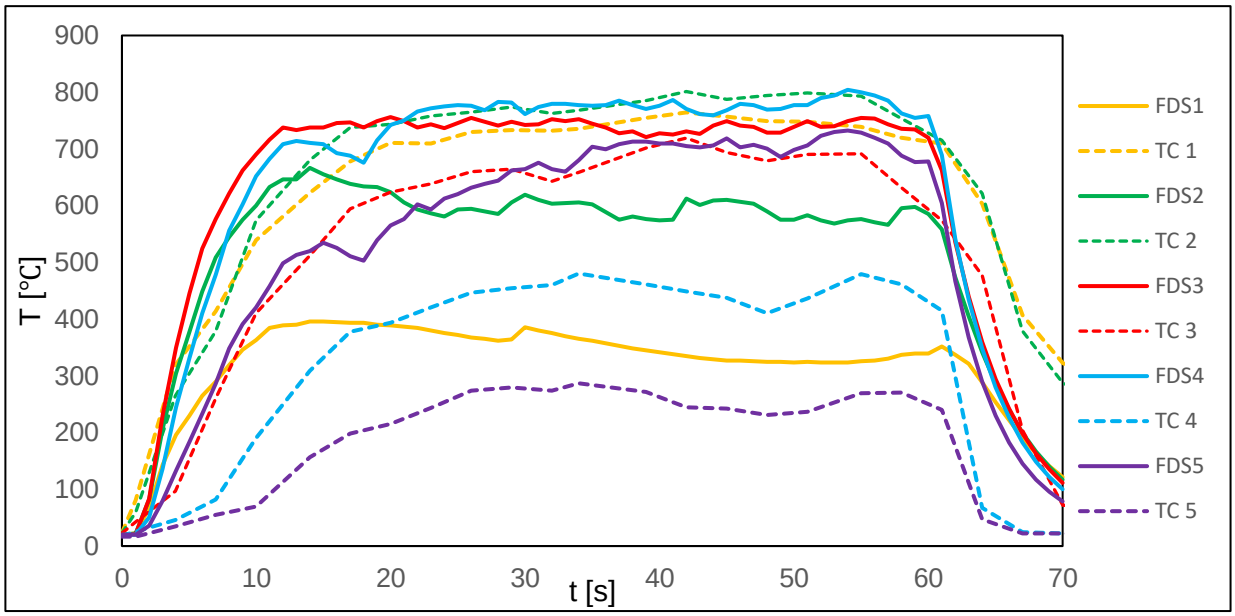
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS na všech TC pro etanol, tryska ve výši 1 m nad hranou (model č.4)



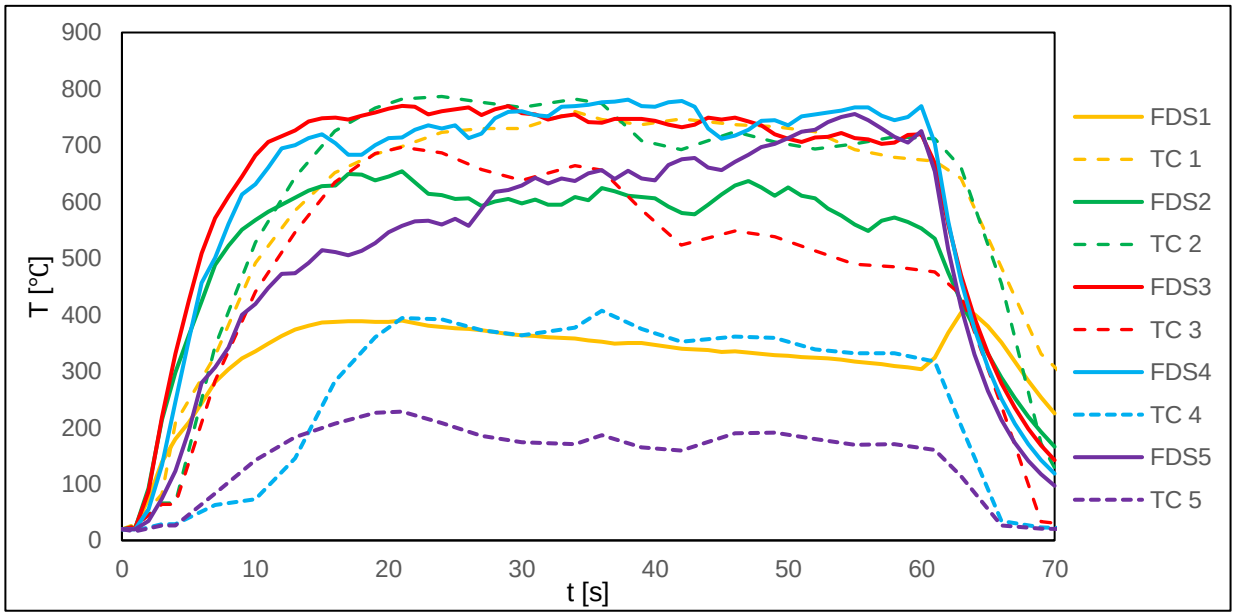
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS ve všech TC pro n-heptan, tryska ve výši 1 m nad hranou (model č. 5)



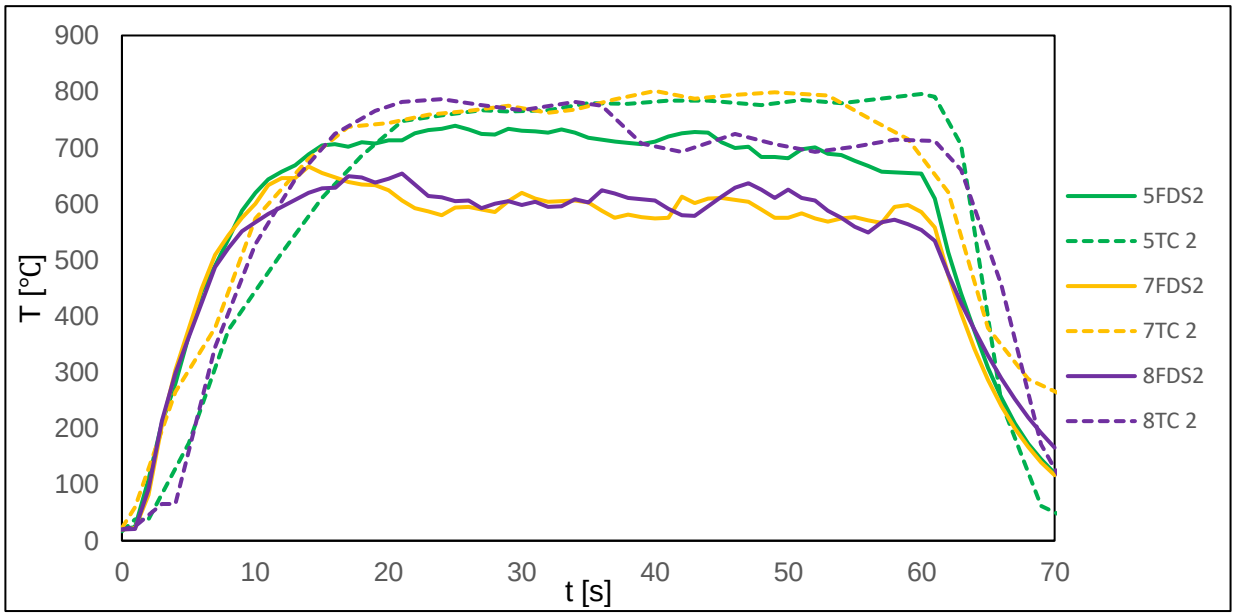
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS ve všech TC pro tři nádoby etanolu, tryska ve výši 1 m nad hranou (model č. 6)



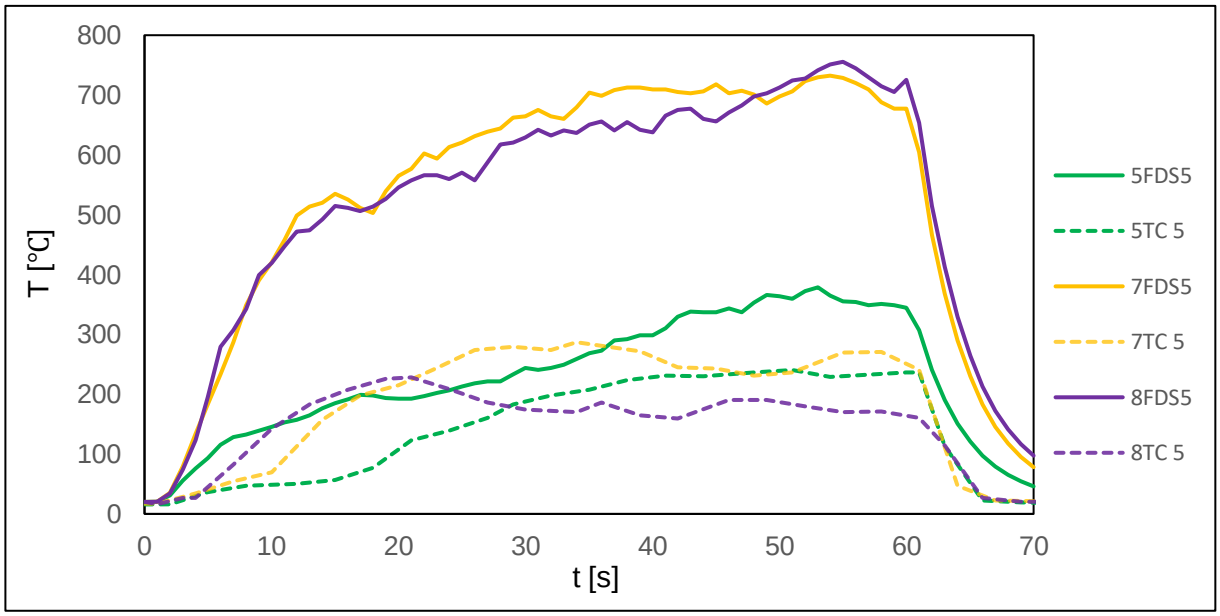
Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS ve všech TC pro tři nádoby n-heptanu, tryska ve výši 1 m nad hranou (model č. 7)



Srovnání průběhu teplot experiment vs FDS ve všech TC pro tři nádoby n-heptanu s vyšším objemem paliva, tryska ve výši 1 m nad hranou (model č. 8)



Srovnání průběhu teplot u TC 2 experiment vs FDS n-heptanu o různých objemech paliva (modely č. 5, 7 a 8)



Srovnání průběhu teplot u TC 5 experiment vs FDS n-heptanu o různých objemech paliva (modely č. 5, 7 a 8)