

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb

**Modelování požáru hořlavých kapalin se
zaměřením na kapalná paliva**

Fire Modelling of Flammable Liquids with a Focus
on Liquid Fuels

Vypracovala:

Bc. Helena Weiserová

Vedoucí práce:

Ing. Martin Benýšek, Ph.D.

2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Weiserová	Jméno: Helena	Osobní číslo: 477466
Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb		
Studijní obor/specializace:		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování požáru hořlavých kapalin se zaměřením na kapalná paliva	
Název diplomové práce anglicky: Fire modelling of flammable liquids with a focus on liquid fuels	
Pokyny pro vypracování:	
1. Rešerše současného stavu problematiky	
2. Parametrická studie vlivu velikosti plamenů při požáru hořlavých kapalin v modelu FDS	
3. Požární experiment plastové nádrže pro kapalná paliva	
4. Vyhodnocení	
5. Závěr	
Seznam doporučené literatury:	
RAJ, Phani K. Large hydrocarbon fuel pool fires: Physical characteristics and thermal emission variations with height. Journal of Hazardous Materials [online]. 2007, 140(1–2), 280–292. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2006.08.057	
DRYSDALE, Dougal. An introduction to fire dynamics. 3rd ed. Chichester, West Sussex: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-31903-1.	
WANG, Jiyun, Mingyan WANG, Xiaoyang YU, Ruowen ZONG a Shouxiang LU. Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning. Process Safety and Environmental Protection [online]. 2022, 159, 1203–1214. ISSN 09575820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2022.01.047	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Martin Benýšek, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 27.9.2023	Termín odevzdání DP v IS KOS: 8.1.2024
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)
-----------------------	---------------------

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

Bc. Helena Weiserová

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala svému vedoucímu Ing. Martinu Benýškovi, Ph. D., a to nejen za užitečné rady, ale i za přívětivost a podporu během tvorby této práce. Dále bych ráda poděkovala panu Ing. arch. Petru Hejtmánkovi, Ph.D. a vysokoškolskému ústavu UCEEB za možnost realizace požární zkoušky. Také děkuji firmám Euroheat s.r.o. a NRG GROUP a.s. za součinnost a poskytnutí nádrže pro požární zkoušku. V neposlední řadě děkuji za podporu Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS23/037/OHK1/1T/11.

Zároveň bych ráda poděkovala svým nejbližším za podporu, kterou jsem měla během celého studia na vysoké škole.

Obsah

Obsah	7
Seznam obrázků.....	10
Seznam tabulek	12
Abstrakt	13
Abstract.....	14
1 Úvod.....	15
1.1 Motivace.....	15
1.2 Cíle práce	15
2 Současný stav poznání.....	16
2.1 Hořlavé kapaliny	16
2.1.1 Požárně technické charakteristiky hořlavých kapalin.....	16
2.2 Chování plamene.....	17
2.2.1 Teplota (bod) vzplanutí.....	18
2.2.2 Teplota vznícení.....	18
2.2.3 Teplota hoření	18
2.2.4 Teplota samovznícení	18
2.2.5 Výhřevnost.....	19
2.2.6 Teplota varu	19
2.3 Plošný požár (Pool fire)	19
2.3.1 Dynamika plošného požáru hořlavé kapaliny.....	19
2.3.2 Sálavý výkon plamene	20
2.3.3 Výška plamene.....	20
2.3.4 Další parametry plošného požáru	20
2.4 Kapalná paliva.....	21
2.4.1 Benzin	21
2.4.2 Petrolej.....	21
2.4.3 Diesel (Nafta).....	21
2.4.4 Ethanol	22
2.4.5 Heptan.....	22
2.4.6 Propan	22
2.4.7 Topný olej	22
2.4.8 Extralehký topný olej.....	24
2.5 Nádrže na hořlavé kapaliny.....	26
2.5.1 Materiálové řešení nádrží na hořlavé kapaliny	26
2.5.2 Dvouplášťové nádrže se shodným materiálovým provedením plášťů	26

2.5.3	Dvouplášťové nádrže s rozdílným materiálovým provedením plášťů.....	31
2.6	Nehody nádrží na hořlavé kapaliny	32
2.6.1	BLEVE	32
2.6.2	Požár uhlovodíků (Hydrocarbon pool).....	33
2.7	Bojový řád jednotek požární ochrany ČR	34
2.8	Přístup českých technických norem k nádržím na hořlavé kapaliny.....	34
2.8.1	Skladování hořlavých kapalin	35
2.8.2	Skladování hořlavých kapalin pro vytápění	36
2.9	Přístup německých norem k nádržím na hořlavé kapaliny.....	36
2.10	Porovnání	37
2.11	Odstupová vzdálenost v České republice	37
2.11.1	Odstupová vzdálenost od nádrží s hořlavou kapalinou	38
2.12	Odstupová vzdálenost ve vybraných státech světa	39
2.12.1	Velká Británie.....	39
2.12.2	Německo.....	40
2.13	Druhy požárních zkoušek plastových nádrží	41
2.13.1	Požární zkouška plamenem (Flame impingement test).....	41
2.13.2	Flashover test.....	42
2.13.3	Požární zkouška stability hoření (Burning behavior test)	42
2.13.4	Požární zkouška pronikání tepla (Heat penetration test).....	42
2.13.5	Požární zkouška tání (Melting test).....	42
2.14	Související diplomové práce a odborné články	42
2.14.1	Analýza sálavého toku při požáru hořlavých kapalin [11].....	42
2.14.2	Charakteristika požáru hořlavých kapalin na ohraničené ploše [2].....	45
2.14.3	Spill and burning behavior of flammable liquids [71]	46
2.14.4	Hašení požáru vybraných typů hořlavých kapalin vodní mlhou [72] ...	48
2.14.5	Stanovení rychlosti uvolňování tepla u hořlavých kapalin [73].....	49
3	Praktická část.....	51
3.1	Numerické řešení nádrže na hořlavé kapaliny.....	51
3.1.1	Požární scénáře.....	51
3.1.2	Software	56
3.1.3	Výpočetní síť modelu.....	57
3.1.4	Sledované veličiny	58
3.1.5	Výška plamene hořlavých kapalin bez působení větru	58
3.1.6	Výška plamene hořlavých kapalin za působení větru	61
3.1.7	Vyhodnocení výšky plamene v souvislosti s normovou hodnotou pro vysokou hodnotu hustoty tepelného toku	63
3.1.8	Požárně nebezpečný prostor od modelovaných hořlavých kapalin	64

3.1.9 Požárně nebezpečný prostor od modelovaných hořlavých kapalin s působením větru.....	67
3.2 Požární zkouška	71
3.2.1 Room Corner Test (RCT)	71
3.2.2 Příprava požární zkoušky dvouplášťové nádrže	72
3.2.3 Průběh požární zkoušky	74
3.2.4 Vyhodnocení požární zkoušky.....	77
4 Závěr a doporučení	78
Literatura	80
Příloha 1 – Tabulkové hodnoty odstupových vzdáleností a výšek plamenů	87
Příloha 2 – Schéma požární zkoušky	88
Příloha 3 – Umístění termostromu v místnosti RCT.....	90

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Plošný požár neboli pool fire[5]	17
Obrázek 2 - Zóny požáru[13]	20
Obrázek 3 – Přenosná železobetonová nádrž na palivo [35]	26
Obrázek 4 – Železobetonová nádrž na palivo [36]	27
Obrázek 5 – Ocelové nádrže na palivo [39]	27
Obrázek 6 – Hliníkové nádrže na palivo [40, 41]	28
Obrázek 7 – Titanové nádrže na palivo [42]	28
Obrázek 8 – Monelové nádrže[44]	29
Obrázek 9 – Inconelové nádrže[46]	29
Obrázek 10 – Celoplastové nádrže[48]	30
Obrázek 11 – Sklolaminátové nádrže[50]	31
Obrázek 12 – Nádrž s vnitřním pláštěm z HDPE a vnějším pláštěm z oceli [51]	31
Obrázek 13 – Průběh BLEVE [54]	33
Obrázek 14 – Odstupová vzdálenost [61]	38
Obrázek 15 - Příklad prostorových nároků úložiště TOELu složeného ze tří dvouplášťových plastových nádrží. [31]	39
Obrázek 16 – Vzdálenost plastové nádrže od budovy podle německé normy [58, 59] ..	41
Obrázek 17 – Graf porovnání metod výpočtu výšky plamene pro různé hořlavé kapaliny při požáru jímky 4x4 m [11]	43
Obrázek 18 – Graf rozdílů velikosti odstupů vůči použité teplotní křivce při konstantní výšce plamene 6 m [11]	44
Obrázek 19 – Schéma vlivu velikosti plamene na použité hořlavé kapalině [11]	44
Obrázek 20 – Schéma porovnání velikosti a tvaru požárně nebezpečného prostoru pro hoření jímky o rozměrech 4x4 m [11].....	45
Obrázek 21 – Rozměry jednotlivých nádob: a) čtvercová nádoba; b) kruhová nádoba; c) obdélníková nádoba [2].....	46
Obrázek 22 – Graf porovnání tloušťky rozlité hořlavé kapaliny a jejího objemu [34]...47	47
Obrázek 23 – Graf závislosti rozlité plochy na objemu pro všechny zkoušené hořlavé kapaliny [34]	47
Obrázek 24 – Graf závislosti průměrné délky hoření na jejím objemu	48
Obrázek 25 – Graf porovnání naměřených hodnot [36]	50
Obrázek 26 – Graf porovnání celkového uvolněného tepla [36]	50
Obrázek 27 – Půdorysy modelů nádrží s heptanem bez působení větru a) 2x2 m; b) 4x4 m.....	51
Obrázek 28 – Půdorysy modelů nádrží s heptanem bez působení větru a) 6x6 m; b) 8x8 m.....	52

Obrázek 29 – Půdorysy modelů nádrží s heptanem za působení větru a) 2x2 m; b) 4x4 m	52
Obrázek 30 – Půdorysy modelů nádrží s heptanem za působení větru a) 6x6 m; b) 8x8 m	53
Obrázek 31 – Půdorys model nádrže 2x2 s propanem bez působení větru	53
Obrázek 32 – Půdorys model nádrže 4x4 s propanem bez působení větru	54
Obrázek 33 – Půdorys model nádrže 6x6 s propanem bez působení větru	54
Obrázek 34 – Půdorys model nádrže 8x8 s propanem bez působení větru	55
Obrázek 35 – Půdorysy modelů nádrží s propanem za působení větru a) 2x2 m; b) 4x4 m	55
Obrázek 36 – Půdorysy modelů nádrží s propanem za působení větru a) 6x6 m; b) 8x8 m	56
Obrázek 37 – a) Požár nádrže s heptanem o velikosti 2x2 m; b) Požár nádrže s heptanem o velikosti 8x8 m	59
Obrázek 38 – a) Požár nádrže s propanem o velikosti 2x2 m; b) Požár nádrže s propanem o velikosti 8x8 m	59
Obrázek 39 – a) Požár nádrže s TOELEM o velikosti 2x2 m; b) Požár nádrže s TOELEM o velikosti 8x8 m.....	60
Obrázek 40 – Graf výšky plamene v porovnání s normovou hodnotou pro vysokou hustotu tepelného toku	60
Obrázek 41 – Požár nádrže s heptanem o velikosti 2x2 m	61
Obrázek 42 – Požár nádrže s heptanem o velikosti 8x8 m	61
Obrázek 43 – Požár nádrže s propanem o velikosti 2x2 m.....	62
Obrázek 44 – Požár nádrže s propanem o velikosti 8x8 m.....	62
Obrázek 45 – Požár nádrže s TOELEM o velikosti 2x2 m.....	62
Obrázek 46 – Požár nádrže s TOELEM o velikosti 8x8 m.....	63
Obrázek 47 – Graf výšky plamene za působení větru v porovnání s normovou hodnotou pro vysokou hustotu tepelného toku	63
Obrázek 48 – Graf porovnání výšky plamene bez působení větru i za působení větru v porovnání s normovou hodnotou pro vysokou hustotu tepelného toku	64
Obrázek 49 – a) Hustota tepelného toku nádrže s heptanem o velikosti 2x2 m; b) Hustota tepelného toku nádrže s heptanem o velikosti 8x8 m.....	65
Obrázek 50 – Hustota tepelného toku nádrže s propanem o velikosti 2x2 m.....	65
Obrázek 51 – Hustota tepelného toku nádrže s propanem o velikosti 8x8 m.....	66
Obrázek 52 – a) Hustota tepelného toku nádrže s TOELEM o velikosti 2x2 m; b) Hustota tepelného toku nádrže s TOELEM o velikosti 8x8 m	66
Obrázek 53 – Graf odstupové vzdálenosti v porovnání s normovou hodnotou.....	67
Obrázek 54 – Hustota tepelného toku nádrže s heptanem o velikosti 2x2 m	68
Obrázek 55 – Hustota tepelného toku nádrže s propanem o velikosti 2x2 m.....	68

Obrázek 56 – Hustota tepelného toku nádrže s TOELEM o velikosti 2x2 m.....	68
Obrázek 57 – Graf odstupové vzdálenosti v porovnání s normovou hodnotou s působení větru.....	69
Obrázek 58 – Graf odstupové vzdálenosti v porovnání s normovou hodnotou bez působení větru i s působení větru	70
Obrázek 59 – Dispozice zkoušky RCT [80].....	71
Obrázek 60 – a) Zkoušená plastová nádrž – čelní strana; b) Zkoušená plastová nádrž – boční strana	72
Obrázek 61 – Otvory nádrže ve vrchní části nádoby	72
Obrázek 62 – Rozložitelnost nádrže: a) nádrž o větší kapacitě než 750l [81], b) víko zkoušené nádrže	73
Obrázek 63 – a) Zkoušená plastová nádrž – umístění v místnosti RCT; b) Umístění termočlánků na přední straně nádrže.....	73
Obrázek 64 – a) Umístění termočlánků na zadní straně nádrže; b) Umístění dřevěné hranice	74
Obrázek 65 – Zapálení dřevěné hranice	74
Obrázek 66 – a) Úplné rozhoření; b) Stav hoření před uhašením	75
Obrázek 67 – a) Stav RCT místnosti po uhašení; b) tvar nádrže druhý den po zkoušce	76
Obrázek 68 – Malé množství vody uvnitř nádrže	76
Obrázek 69 – Stav jednotlivých plášťů plastové nádrže	77

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Tabulka charakteristik topných olejů– tabulka převzata z ČSN 65 7991....	23
Tabulka 2 - Kategorie identifikací nebezpečnosti [30]	25
Tabulka 3 – Tabulka fyzikálních vlastností topného oleje [30]	25
Tabulka 4 – Tabulka doby hoření pro jednotlivé kapaliny [35].....	48
Tabulka 5 – Průměr naměřených hodnot [36].....	49
Tabulka 6 – Tabulka počtů buněk jednotlivých modelů nádrží s hořlavou kapalinou ...	57

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá modelováním požáru hořlavých kapalin, konkrétněji kapalných paliv. Cílem práce je stanovení výšky plamene hořící nádrže o různých velikostech a stanovení odstupové vzdálenosti v souvislosti s požárně nebezpečným prostorem dle normy.

V teoretické části jsou popsány hořlavé kapaliny a jejich vlastnosti při hoření nebo požáru, plošný požár, materiálová řešení nádrží na kapalná paliva, přístup norem ke skladování hořlavých kapalin v těchto nádržích a řešení odstupových vzdáleností od nádrží v zahraničí a v ČR. Dále se práce zabývá požárními zkouškami plastových nádrží a konkrétně dále extralehkým topným olejem, který je v plastových nádržích běžně uchováván.

V této diplomové práci je také rešerše dostupné literatury, zabývajících se problematikou výšky plamene při hoření plošného požáru. V praktické části, která na tuto rešerši navazuje je sestaven model požáru nádrží o různých velikostech a je zde zkoumána výška plamene. Dále jsou zde porovnávány odstupové vzdálenosti s normovými vypočtenými hodnotami a je zde také uvedeno působení větru na požárně nebezpečný prostor.

Dále byla provedena požární zkouška plastové nádrže na extralehký topný olej ve spolupráci s vysokoškolským ústavem UCEEB. Tato zkouška byla provedena z důvodu analýzy chování plastové dvouplášťové nádrže na topná paliva.

Klíčová slova

Hustota tepelného toku; integrovaná intenzita; hoření hořlavé kapaliny; odstupová vzdálenost; plošný požár; extralehký topný olej; nádrž na hořlavou kapalinu; uhlovodíkové bazény.

Abstract

The diploma thesis deals with modelling of fire of flammable liquids, more specifically liquid fuels. The aim of the thesis is to determine the flame height of a burning tank of different sizes and to determine the fire separation distance in relation to the fire hazardous area according to the standard.

The theoretical part describes flammable liquids and their properties during burning or fire, area fire, material solutions of liquid fuel tanks, the approach of standards to storage of flammable liquids in these tanks and the solution of fire separation distance from tanks abroad and in the Czech Republic. Furthermore, the thesis deals with fire tests of plastic tanks and specifically with extra-light heating oil, which is commonly stored in plastic tanks.

This thesis also includes an overview of available literature sources dealing with the issue of flame height in the burning of a surface fire. In the practical part, which follows this research, a model of tank fires of different sizes is constructed, and the flame height is investigated. Furthermore, the fire separation distances are compared with standard calculated values and the effect of wind on the fire hazard area is also presented.

In addition, a fire test of a plastic tank for extra-light fuel oil was carried out in collaboration with the UCEEB. This test was carried out to analyse the behaviour of a plastic double-walled tank for heating fuels.

Keywords

Heat flux density; integrated intensity; burning of a flammable liquid; fire separation distance; pool fire; extra-light heating oil; flammable liquid tank, hydrocarbon pools.

1 Úvod

Hořlavé kapaliny jsou běžnou součástí každodenního života. Jsou nezbytné pro mnoho průmyslových a domácích aplikací, včetně vytápění. Tyto kapaliny mohou být problematické a mohou představovat riziko požáru a výbuchu, pokud nejsou skladovány a používány správně. Tato diplomová práce se zaměřuje na popis vlastností hořlavých kapalin, včetně požárně technických charakteristik a na vlastnosti požáru způsobeném hořením těchto kapalin. Dále se zabývá riziky spojenými s používáním těchto kapalin, jako jsou požáry a výbuchy. Zaměřuje se také na to, jak jsou tyto kapaliny a jejich nádrže vnímány českými i zahraničními normami např. z hlediska materiálového řešení či odstupových vzdáleností.

1.1 Motivace

V závislosti na současném světovém dění se čím dál častěji začíná řešit otázka vytápění a využití alternativních zdrojů tepla. Mezi tyto alternativní zdroje patří fotovoltaika, solární panely, stlačený zemní plyn (CNG), tepelná čerpadla a jiné. K vytápění je možné také použít různé hořlavé kapaliny. Těmito hořlavými kapalinami může být např. zkapalněný zemní plyn (LNG), propan, bioplyn, dřevoplyn atd. Jednou z možností je také vytápění pomocí lehkých topných olejů/TOELů. Topné oleje jakožto hořlavé kapaliny je nutné skladovat v nádržích na hořlavé kapaliny. Nádrže se vyrábějí z různých materiálů a každý materiál má svoje výhody a nevýhody. Nicméně ne všechna materiálová řešení jsou detailně popsána v normách z hlediska požární bezpečnosti.

1.2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je popsat hořlavé kapaliny se zaměřením na topná paliva. Pro naplnění hlavního cíle práce byly stanoveny následující dílčí cíle:

1. Zpracování současného stavu poznání hořlavých kapalin a druhů nádrží na hořlavé kapaliny
2. Řešení odstupových vzdáleností a skladování hořlavých kapalin dle norem ČR a porovnání s řešením v zahraničí;
3. Popis průběhu hoření tzv. pool fire;
4. Numerické stanovení požárně nebezpečného prostoru od plošného požáru a výšky plamene pro vybraná kapalná paliva i při působení větru;
5. Požární zkouška plastové nádrže.

2 Současný stav poznání

V této části diplomové práce je provedena rešerše dané problematiky. Jsou zde vysvětleny charakteristiky požárů hořlavých kapalin a plošných požárů a s tím spjaté fyzikální děje a další.

2.1 Hořlavé kapaliny

Hořlavé kapaliny jsou chemické látky nebo jejich směsi s definovaným bodem vzplanutí, které jsou při teplotách výskytu kapalné a lze u nich stanovit bod hoření.[1]

Tyto kapaliny jsou hojně využívány v průmyslu a v každodenním životě, ale existuje zde nebezpečí, že mohou způsobit závažné požáry s ohrožením lidského zdraví a majetku. Jsou jedním z nejrizikovějších faktorů při vzniku požárů. V kontaktu těchto kapalin s plamenem se požáry mohou rychle rozšířit a způsobit velké škody. Chceme-li porozumět tomuto procesu, je nezbytné porozumět chování plamene a jeho interakci s hořlavými kapalinami.

Při manipulaci s kapalinami může dojít k jejich rozlití a následnému znečištění životního prostředí. Na hořlavé kapaliny se používají speciální nádrže na hořlavé kapaliny pro vnitřní i vnější skladování. Pro uchovávání hořlavých kapalin uvnitř i vně budov existují různé požadavky na nádrže např. na mezní množství uchovávané hořlavé kapaliny, odstupové vzdálenosti nádrže od zdroje tepla, popř. okolních budov apod.

2.1.1 Požárně technické charakteristiky hořlavých kapalin

Různé chemické složení kapalin může způsobit rozdílnou iniciaci procesu hoření. Hořlavé kapaliny se vypařují do okolí za každé teploty. Čím je teplota kapaliny vyšší, tím je vypařování rychlejší. Uvolněné páry kapaliny se mísí s okolním vzduchem a vzniká tzv. hořlavá směs. Tato směs může zahořet, pokud je vhodně iniciována.

Podle fyzikálně chemických vlastností jsou popisovány požárně technické charakteristiky (PTCH). Základními PTCH jsou teplota vzplanutí, teplota vznícení a oblast výbušnosti. Tyto charakteristiky budou popsány níže. PTCH se mění v čase a jsou stanovovány podle příslušných norem, experimentálně v akreditovaných zkušebnách.

PTCH jsou používány např. složkami IZS k vyhodnocování taktického postupu při hašení nebo k určení bezpečnostních vzdáleností či bezpečné manipulace s hořlavou kapalinou. [2, 3]

2.1.1.1 Oblast výbušnosti

Oblast výbušnosti je koncentrační rozmezí hořlavé směsi vypařující se nad hladinou kapaliny. Je schopno výbuchu při zapálení iniciačním zdrojem. Následně může dojít k dalšímu šíření požáru.

Dolní koncentrační mez výbušnosti je nejnižší koncentrace hořlavých par ve směsi s oxidačním prostředkem (vzduchem). Tato směs je při této koncentraci schopna šířit plamen, pokud dojde k iniciaci zápalným zdrojem. Horní koncentrační mez výbušnosti je nejvyšší koncentrace hořlavých par ve směsi

s oxidačním prostředkem (vzduchem), při které je ještě výbušná. Obě koncentrace těchto hořlavých par se udávají v objemových procentech.

Hranice dolních a horních koncentračních mezí jsou závislé na okrajových podmínkách. Především se jedná o počáteční teplotu a tlak vypařující se směsi. Při zvýšené teplotě a tlaku se sníží dolní mez výbušnosti a horní se naopak zvýší. To způsobí rozšíření výbuchové oblasti. Čím je toto rozmezí větší a čím vyšší je horní mez výbušnosti, tím je kapalina nebezpečnější. Naopak se snížením počátečního tlaku se zmenší riziko výbuchu až do úplného zamezení iniciace výbuchu směsi. Pro ochranu proti výbuchu je tedy možné použít podtlak. [4]

K zapálení směsi může dojít pouze uvnitř oblasti výbušnosti. Pakliže se koncentrace hořlavé směsi nachází pod dolní mezí výbušnosti, pak tato směs výbušná ani hořlavá není. Pokud koncentrace hořlavých směsí překročí horní mez výbušnosti, výbuch nenastane. Nicméně při odpovídajícím zředěním vzduchem se může stát opět výbušnou. [3]

2.2 Chování plamene

Šíření plamene při hoření hořlavých kapalin probíhá typicky dvěma hlavními způsoby. Jsou závislé na požárně technických charakteristikách hořlavé kapaliny a počáteční teplotě před vznícením. Můžeme tedy říct, že hlavními faktory v šíření plamene jsou bod vzplanutí kapalného paliva a teplota vznícení. Jejich definice jsou uvedeny níže.

Pokud dojde k zapálení par uvolňujících se z hořlavé kapaliny, spotřebovává se okolní vzduch a tvoří se difúzní plamen nad ložem kapalného paliva. Tento druh hoření může přerůst v plošný požár neboli „pool fire“. Tento jev bude blíže popsán v samostatné kapitole.



Obrázek 1 – Plošný požár neboli pool fire[5]

2.2.1 Teplota (bod) vzplanutí

Bod vzplanutí popisuje nejnižší teplotu kapaliny, při které se uvolňuje takové množství hořlavých par, že po smísení se vzduchem se vytvoří hořlavá směs. Takto vytvořená hořlavá směs při přiblížení zápalného iniciačního zdroje vzplane. Pakliže tato směs hoří alespoň 5s bez přerušení, pak se jev stává trvalým hořením.

Bod vzplanutí závisí na rychlosti odpařování hořlavé kapaliny. Odpařování je ovlivněno fyzikálními i chemickými vlastnostmi kapaliny. [2]

Dělení do teplotních tříd podle teploty vzplanutí [6, 7]:

I – teplota vzplanutí do 21 °C

II – teplota vzplanutí nad 21 °C do 55 °C

III – teplota vzplanutí nad 55 °C do 100 °C

IV – teplota vzplanutí nad 100 °C do 250 °C

2.2.2 Teplota vznícení

Teplota vznícení je závislá na nejnižší teplotě směsi okolního vzduchu a hořlavých par při vznícení. Vznícení je chemická reakce směsí plynů vypařujících se z hladiny hořlavé kapaliny a mísením s okolním vzduchem, za vzniku otevřeného plamene. Je využívána k zatřídění hořlavé kapaliny do teplotních tříd.

Dělení podle teploty vznícení do teplotních tříd [8]:

T1 – teplota vznícení nad 450 °C

T2 – teplota vznícení 300 až 450 °C

T3 – teplota vznícení 200 až 300 °C

T4 – teplota vznícení 135 až 200 °C

T5 – teplota vznícení 100 až 135 °C

T6 – teplota vznícení 85 až 100 °C

2.2.3 Teplota hoření

Teplota hoření je nejnižší teplota hořlavé látky, při které se tvoří dostatek hořlavých par, aby se tyto páry při přiblížení k otevřenému plaménku vznítily a samy dále hořeli. Při dosažení teploty hoření je rychlost odpařování hořlavé kapaliny nejméně tak velká, jako rychlost spalování. Páry se dále tvoří v dostatečném množství a spalování se bez další iniciace udržuje.

Teplota hoření je vyšší než teplota vzplanutí. Rozdíl mezi těmito teplotami je u nízkovroucích kapalin velmi nepatrný, avšak vzrůstá se snižující se těkavostí kapaliny. Nízkovroucí kapalina má při atmosférickém tlaku 101 kPa teplotu varu nižší než 50 °C. [8]

2.2.4 Teplota samovznícení

Teplota samovznícení je nejnižší teplota, při které začínají v látce bez vnější iniciace probíhat procesy, které vedou k samovznícení. Teplo, které je potřebné k zapálení látky vzniká z látky samotné důsledkem chemických, fyzikálních nebo biologických pochodů.

Za bezpečnou teplotu, na kterou může být látka zahřáta, se pokládá teplota, jejíž hodnota nepřekračuje 90 % hodnoty teploty samovznícení. [8]

2.2.5 Výhřevnost

Výhřevnost látky (v MJ/kg) je množství tepla, které vznikne při dokonalém spálení látky a které se při požáru může uvolnit. Čím je látka výhřevnější, tím více vody potřebujeme na její uhašení. [8]

2.2.6 Teplota varu

Tyto teploty (při tlaku 101,3 kPa) charakterizují fázovou přeměnu látky ze stavu kapalného do plynného (var). [8]

2.3 Plošný požár (Pool fire)

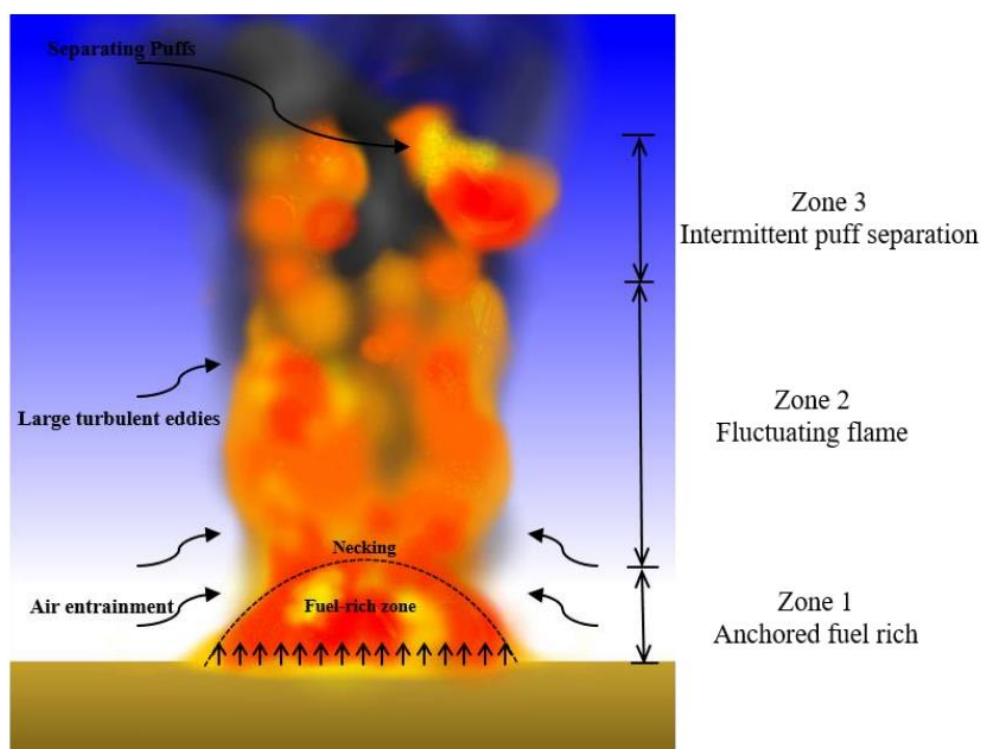
Plošný požár je turbulentní požár hořící nad prostorem s hořlavou kapalinou (např. otevřená nádrž nebo rozlitá hořlavá kapalina.). Požáry na volném prostranství jsou dobře odvětrávané (jsou tedy řízené palivem), ale požáry v uzavřených prostorách mohou být nedostatečně odvětrávané (řízené ventilací). Plošné požáry mohou být statické (např. v případě, že je nádrž uzavřena) nebo "postupující" (např. když je se tekoucí hořící kapalina šíří do okolního prostředí a dochází ke vzplanutí i jiných předmětů). Plošné požáry představují významný prvek rizika spojeného s velkými haváriemi na zařízeních na moři. Týkají se ale i požárů rozlitých hořlavých kapalin.[9]

Vliv velikosti plošných požárů, geometrii a radiaci požáru, zejména u velmi rozsáhlých požárů, a schopnost předpovědět celkové chování rozsáhlých požárů uhlovodíkových plošných požárů je stále nedostatečná. [10] Toto si můžeme všimnout např. při řešení těchto požárů dle českých norem (ČSN 650201, ČSN 73 0804), které při vysoké hustotě tepelného toku uvažují pro výpočet odstupových vzdáleností konstantní výšku plamene 6 m. Tato hodnota je nejvyšší, se kterou norma pro výpočet uvažuje. Výška plamene ale závisí také na druhu kapaliny, která hoří, což výše zmíněné normy neřeší, viz např. [2, 11]

2.3.1 Dynamika plošného požáru hořlavé kapaliny

Většina požárů hořlavých kapalin může být rozdělena na určité zóny. Zóna odhořívání kapalného paliva a palivových par vytváří konstantní kuželovitý tvar. Nad touto zónou je spalovací oblast, v níž dochází k pulzování plamene a je zde přítomné proudění vzniklé přísáváním vzduchu. V přerušované oblasti plamene se snižuje rychlost a teplota s výškovou polohou. [12]

Tyto jednotlivé zóny jsou popsány na další stránce:



Obrázek 2 - Zóny požáru[13]

2.3.2 Sálavý výkon plamene

Sálavý výkon plamene je veličina, která popisuje množství energie vyzařované z plamene za jednotku času. Obvykle se měří za pomoci spektrometrie. Její jednotkou je W/m^2 . [14]

2.3.3 Výška plamene

Na výšku plamene má vliv přístup vzduchu, který je dostupný ke spalování. Vzduch je nasáván z přímého okolí hořící kapalné látky a mísí se s palivem. Takto přisávaný vzduch podporuje hoření dané látky. Přisávaný vzduch se může do oblasti plamene přimístit dvěma způsoby. První z nich je při laminárním proudění, které je relativně pomalé. Druhým způsobem je turbulentní proudění, při němž dochází ke zvyšující se rychlosti odhořívání paliva, což zvyšuje i rychlost odpařování. [15]

Výška plamene při plošném požáru se obvykle vztahuje k velikosti ohraničené oblasti, ve které může dojít k hoření hořlavé kapaliny. Z různých experimentů je zřejmé, že výška plamene závisí zejména na velikosti ohraničené oblasti hoření a rychlosti uvolňování tepla hořlavé kapaliny. [16, 17]

2.3.4 Další parametry plošného požáru

Při řešení problematiky plošného požáru se setkáme s dalšími parametry jako je např. rychlost spalování, rychlost uvolňování tepla (HRR), hustota tepelného toku, chování kapalné fáze atd. Tyto parametry již byly např. popsány v diplomové práci [11] a dále pak např. v dalších publikacích [2, 16, 17].

2.4 Kapalná paliva

Kapalná paliva jsou hořlaviny vytvářející energii, která může být využita k vytváření jako pohon dopravních prostředků, ale např. i k vytápění. Většina široce používaných kapalných paliv z fosilních paliv. Fosilní paliva pocházejí z mrtvých živočichů a rostlin, které uhynuly před mnoha miliony let. [18, 19]

Nejfrekventovaněji používanými tekutými palivy jsou ropné produkty, což znamená směsi kapalných uhlovodíků. Začínaje lehkými benziny, přes kerosin a naftu, které jsou obvykle využívány v dopravních prostředcích, až po topné oleje a mazuty, které jsou častěji uplatňovány v průmyslu a energetice. Jako alternativa k fosilním tekutým palivům se objevují kapalná biopaliva, vytvořená z rostlinných surovin, například rostlinných olejů, metylesterů mastných kyselin, vedlejších produktů jejich výroby a bioetanolu či biolihi. [20]

2.4.1 Benzin

Benzin je nejrozšířenějším kapalným palivem. Benzin, je tvořen molekulami uhlovodíků. V benzínu se však přirozeně vyskytuje mnoho aromatických sloučenin, jako je benzen, které způsobují zdravotní rizika spojená s dlouhodobým působením tohoto paliva. Výroba benzínu probíhá destilací ropy. Žádoucí kapalina se od ropy odděluje v rafinériích.

Samotný benzin se ve skutečnosti při hoření nespaluje. Vznikající výpary se zapalují, což způsobuje odpařování zbývajících kapalin. Benzin je extrémně těkavý a snadno hoří. Proto je velmi nebezpečné, když dojde k úniku tohoto paliva.

Benzin, který se prodává ve většině zemí má oktanové číslo. Oktanové číslo je měřítkem odolnosti benzínu proti předčasnému hoření. Čím vyšší je oktanové číslo, tím hůře se palivo spaluje. [18, 20]

2.4.2 Petrolej

Dříve byl petrolej využíván jako palivo do lamp, které sloužili ke svícení. Nyní již takové využití má zřídka. Frakce petroleje se využívá k výrobě leteckého petroleje a motorové nafty. Letecký petrolej se využívá do proudových motorů. Petrolej zde splňuje požadavky na dokonalé spalování, malou tvorbu usazenin, stálost a krátkou délku plamene. [19, 21]

2.4.3 Diesel (Nafta)

Běžná motorová nafta je podobná benzínu, protože je směsí alifatických uhlovodíků získávaných z ropy. Cena motorové nafty může být vyšší nebo nižší než cena benzínu, ale její výroba je obecně levnější, protože používané extrakční procesy jsou jednodušší.

Diesel je např. v motorech stlačován, a tak je zapálen (při stlačení dojde k zvýšení teploty paliva). To je rozdílné od spalování benzínu, který je běžně zapálen vnějším zdrojem (zapalovací svíčkou). [18, 19]

2.4.4 Ethanol

Etanol, známý také jako obilný alkohol nebo etylalkohol, se nejčastěji používá v alkoholických nápojích. Může se však používat i jako palivo, nejčastěji v kombinaci s benzinem. Etanol pro použití v benzinu a pro průmyslové účely lze označit za fosilní palivo, protože se syntetizuje z ropného produktu ethylenu, který je levnější než výroba z kvašení obilí nebo cukrové třtiny. Může být i součástí motorové nafty. [18, 19]

2.4.5 Heptan

Heptan patří mezi uhlovodíky. Heptan je nejvíce používán jako rozpouštědlo, zejména v laboratorních a průmyslových zařízeních. Díky nízkému bodu varu a vysoké těkavosti je vhodný pro rozpouštění a extrakci mnoha látek. Kromě rozpouštědla se heptan používá jako obvyklé referenční palivo v automobilovém průmyslu. Používá se k testování a výzkumu motorů, protože má podobný výkon jako benzin. Zároveň se ale s benzinem i míchá.

Heptan má nízký bod varu a vysoké oktanové číslo. To pomáhá zlepšit celkový výkon a spalovací charakteristiky benzinu a zajišťuje hladký chod motoru. Smícháním heptanu s jinými uhlovodíky mohou výrobci benzinu dosáhnout požadovaného oktanového čísla, které je důležité pro efektivní výkon motoru.

V tepelném průmyslu má heptan významnou roli jako palivo pro spalovací procesy. Díky své vysoké hustotě energie a čistým hořlavým vlastnostem je vhodný pro různé aplikace, včetně topných systémů, kotlů a průmyslových pecí. Heptan je často využíván jako referenční palivo při výzkumu a testování spalování kvůli svým dobře definovaným charakteristikám. Jeho řízené spalování umožňuje přesné měření a porovnání účinnosti paliva a emisí v relevantních studiích. [22, 23]

2.4.6 Propan

Propan, známý také jako zkapalněný ropný plyn (LPG) nebo propanový autoplyn, je čistě spalující alternativní palivo, které se po desetiletí používá k pohonu lehkých, středně těžkých a těžkých propanových vozidel. Propan se skladuje pod tlakem uvnitř nádrže jako bezbarvá kapalina bez zápachu. Jak se uvolňuje tlak, kapalný propan se odpařuje a mění se na plyn, který se používá při spalování. Propan má vysoké oktanové číslo, takže je výborný pro zážehové spalovací motory. Pokud se vylíje nebo uvolní z vozidla, nepředstavuje žádnou hrozbu pro půdu, povrchové nebo podzemní vody. Propan vzniká jako vedlejší produkt při zpracování zemního plynu a rafinaci ropy.

Mezi hlavní využití propanu patří vytápění domácností a vody, vaření a chlazení potravin, sušení oděvů a napájení zemědělských a průmyslových zařízení. Chemický průmysl také používá propan jako surovinu pro výrobu plastů a dalších sloučenin. [23, 24, 25]

2.4.7 Topný olej

Topný olej se běžně využívá k vytápění. Dá se používat pro vytápění objektů nebo vytápění technologie. V dnešní době se jedná o jednu z nejvýhodnějších technologií pro vytápění, protože náklady na vytápění topným olejem jsou celkem nízké. Topný olej ale může jako hořlavá kapalina představovat určité riziko.

Pro chování topného oleje např. při požáru je nutné porozumět jeho složení a jeho vlastnostem. [19, 27]

Topné oleje se dle ČSN 65 7991 vyrábí mísením vhodných podílů získaných destilací ropy a frakcionací dalších ropných produktů. Podle složení se topné oleje dělí na topný olej lehký (TOL), topný olej těžký R2 (TOT R2), topný olej těžký R3 (TOT R3), topný olej zbytkový (TOZ). Dále se topné oleje mohou dělit z hlediska obsahu síry na malosirné (M) a vysokosirné (V).

Tabulka 1 - Tabulka charakteristik topných olejů – tabulka převzata z ČSN 65 7991

Charakteristika kvality	Topný olej			
	lehký TOL	těžký R2 TOT R2	těžký R3 TOT R3	zbytkový TOZ
Hustota při 15 °C, kg/m ³ max.	920	1000	inf.	inf.
Bod vzplanutí (PM), °C min.	66	85	75	70
Destilace, % (V/V): při 350 °C min.	20	-	-	-
Viskozita, mm ² /s: při 40 °C max.	20	-	-	-
při 100 °C	-	55	65	75
Bod tekutosti, °C max.		50	inf.	inf.
léto (1.04. až 30.09.)	+12			
zima (1.10. až 31.03.)	-3			
Karbonizační zbytek (CCT), % (m/m) max.	0,5	15	15	25
Obsah popela, % (m/m) max.	0,02	0,15	0,2	0,25
Úsady (mechanické nečistoty), % (m/m) max.	0,1	0,1	0,1	0,1
Výhřevnost, MJ/kg inf.	40	38	36	35
Obsah síry, % (m/m):				
malosirný M	≤ 1,0			
vysokosirný V	> 1,0			

Topné oleje jsou často tvořeny poměrně složitou směsí různých vakuových a atmosférických zbytkových frakcí. Tuto směs je potřeba vhodným způsobem upravit tak, aby splňovala normované či zákazníkem požadované parametry, jakými jsou především jeho hustota, viskozita, bod vzplanutí či celkový obsah síry. [28]

2.4.8 Extralehký topný olej

Pro vytápění domácností se využívá speciální varianta topného oleje, která je úředně označovaná jako topný olej extralehký (TOEL). Používají se ale i jiné obchodní názvy, např. ELTO, TOLEX. Od těžších variant topných olejů se liší zvýšenými nároky na snížený obsah nežádoucích prvků, snadnou využitelnost bez potřeby snižování viskozity ohřevem v zimních měsících a zvýšenou trvanlivostí. Pro rozlišení topného oleje od motorové nafty se do oleje míchá speciální barvivo. To je hlavně prováděno, aby nedocházelo k podvodům při dovážení motorové nafty. [29]

2.4.8.1 Informace z bezpečnostního listu extralehkého topného oleje

Extralehký topný olej má celou řadu používaných názvů. Jsou to třeba TOEL, ETO, Topná nafta nebo Velmi lehký topný olej. Užívá se především jako topné médium ve zvláště ekologicky zatížených a chráněných krajinných oblastech. Smí se používat pouze ve schváleném zařízení a v souladu s příslušnou provozní dokumentací a platnou legislativou. Nesmí se používat na jiné než topné účely.

Jedná se o hořlavou kapalinu třídy nebezpečnosti III., kategorie 3.

Kategorie identifikace nebezpečnosti pro chemické látky jsou stanoveny v rámci Globálně harmonizovaného systému (GHS), což je mezinárodní standard pro klasifikaci a označování nebezpečných chemických látek. GHS byl vytvořen za účelem sjednocení klasifikace nebezpečných látek a jejich označování na celosvětové úrovni.

GHS je implementován v různých zemích a regionech, včetně Evropské unie, Spojených států amerických, Kanady a dalších. V Evropské unii je GHS implementován v nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1272/2008, známém také jako nařízení CLP (Classification, Labelling and Packaging).

Kategorie identifikace nebezpečnosti podle GHS zahrnují:

Kategorie 1: používá se pro označení nejzávažnějších nebezpečí a znamená, že vystavení kapalině nebo páře může způsobit vážné zdravotní následky, a to i při krátkodobém vystavení nebo nízké koncentraci. Tento typ nebezpečí může například zahrnovat otravu dýchacích cest, poškození mozku nebo zraku, nebo dokonce smrt.

Kategorie 2: Nebezpečí, které může způsobit vážné následky při opakovaném nebo prodlouženém vystavení

Kategorie 3: Nebezpečí, které může způsobit mírné zdravotní problémy při krátkodobém nebo jednorázovém vystavení

Kategorie 4: Nebezpečí, které má mírné účinky na zdraví při vystavení na delší dobu

Zajímavé kategorie týkající se extralehkého topného oleje uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 2 - Kategorie identifikací nebezpečnosti [30]

Identifikace nebezpečnosti	Kategorie
Nebezpečnost při vdechnutí	1
Akutní toxicita	4
Žíravost/dráždivost na kůži	2
Karcinogenita	2
Toxicita pro cílové orgány, opak. expozice	2
Nebezpečný pro vodní prostředí	2

2.4.8.2 Hašení

Vhodná hasiva jsou vzduchová hasící pěna, hasící prášek, CO₂. Nevhodným hasivem je přímý vodní proud. Hašení malého požáru lze pomocí práškového nebo pěnového hasící přístroje, suchého písku nebo hasící pěny. Dále víme, že páry tohoto topného oleje jsou těžší než vzduch, proto se hromadí a šíří při zemi. Díky tomu mohou i ve větší vzdálenosti od zdroje úniku způsobit po iniciaci zpětný zážeh s následnou explozí a/nebo požárem. Toto riziko je významné zejména v prostorech pod úrovní terénu nebo v uzavřených prostorech. Při hoření topného oleje se mohou vytvářet toxické a dráždivé dýmy s obsahem oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků. [30]

2.4.8.3 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti topného oleje jsou popsány v následující tabulce:

Tabulka 3 – Tabulka fyzikálních vlastností topného oleje [30]

Vlastnost	Hodnota
Barva	bezbarvá, slabě nažloutlá až žlutá, případně s nazelenalou opalescencí
Zápach	typicky ropný
Bod tání	6 °C
Bod tuhnutí	40 °C
Počáteční bod varu a rozmezí bodu varu	141 - 462 °C
Horní mez výbušnosti	6,50%
Dolní mez výbušnosti	0,60%
Bod vzplanutí	<56 °C
Teplota samovznícení	>225 °C
Kinematická viskozita (při 40 °C)	≥ 1,5 mm ² ·s ⁻¹
Relativní hustota (voda=1 při 15 °C)	0,8 - 0,91
Tlak par (při 40 °C)	0,4 kPa

Vzhledem k vlastnostem moderních topných olejů je není třeba v zimě předeřhřívát, aby se snížila jejich viskozita. [31]

2.5 Nádrže na hořlavé kapaliny

Hořlavé kapaliny se běžně uchovávají v nádržích k tomuto účelu uzpůsobených. S nádržemi na hořlavé kapaliny se můžeme setkat v běžném životě. Při zmínce těchto nádrží se většinou vybaví čerpací stanice s podzemní (př. nadzemní) nádrží na pohonné hmoty nebo nádrže v dopravních prostředcích. V dnešní době se ale začínají používat hořlavé kapaliny (např. topné oleje) i na vytápění rodinných domků. [32] Umístění nádrží na hořlavé kapaliny v bezprostřední blízkosti lidských obydlí ale nabízí otázku týkající se jejich požární bezpečnosti, nutných odstupových vzdáleností, požárních odolností a dalších bezpečnostních opatření proti požáru. Proto nádrže na hořlavé kapaliny musí plnit určité požadavky stanovené v normách. Požadavky se mohou ale lišit v závislosti na jejich materiálovém provedení.

2.5.1 Materiálové řešení nádrží na hořlavé kapaliny

V dnešní době se nádrže na hořlavé kapaliny nevyrábějí pouze z železobetonu. Požadavky norem na nádrže splňuje více materiálů. Existují jednoplášťové a dvouplášťové nádrže. U jednoplášťových je mnohdy třeba mít záchytnou a havarijní jímku. [33] U dvouplášťových je toto vyřešeno pomocí druhého pláště, který je schopen pojmout objem nádrže obsažený ve vnitřním plášti. Tyto pláště mohou být ze stejných či z rozdílných materiálů. [34]

2.5.2 Dvouplášťové nádrže se shodným materiálovým provedením plášťů

2.5.2.1 Železobetonové nádrže

Železobeton je celosvětově využívaný stavební materiál. Mimo jiné se také používá ke konstrukcím nádrží na hořlavé kapaliny, kde může tvořit jak vnitřní, tak vnější plášť nádrže.



Obrázek 3 – Přenosná železobetonová nádrž na palivo [35]



Obrázek 4 – Železobetonová nádrž na palivo [36]

2.5.2.2 Celokovové nádrže z oceli

Ocel je drahý materiál, který je náročný na výrobu. Kromě použití pro potravinářské účely nabízí jen malé nebo žádné výhody. Na výrobu používá i měkká ocel. Tento materiál je používán výrobci vozidel, protože má dobré fyzikální vlastnosti. Je ale i cenově výhodný, snadno se s ním pracuje, je robustní a vhodný pro různé metody řezání a povrchové úpravy.

Ocelové nádrže jsou snadněji přizpůsobitelné a nabízejí řadu různých objemů, zatímco plastové rotačně tvarované nádrže mají pevně stanovený objem na základě lisovacích nástrojů a takovou flexibilitu neposkytují.

Ocel nabízí větší pevnost než plastové nádrže, ať už před nárazem nebo krádeží paliva. Na rozdíl od plastu je do oceli obtížné a časově náročné proniknout, a proto se jí dává přednost tam, kde je důležitá bezpečnost.

Nevýhodou ocelových nádrží je vyšší cena. [37, 38]



Obrázek 5 – Ocelové nádrže na palivo [39]

2.5.2.3 Celokovové nádrže z jiných kovů a slitin

Běžně se vyrábí např. hliníkové nádrže na palivo. Ty se většinou používají u větších vozidel jako jsou nákladní automobily a kamiony. Dále mohou sloužit k transportu např. jako cisterny. Využívány jsou hlavně díky malé hmotnosti hliníku a hliníkových slitin. Hliník také tvoří tenkou vrstvu oxidu na povrchu, která poskytuje ochranu před korozi. Je díky ní odolný vůči některým korozivním látkám, jako jsou například slané vody. Tato vlastnost může být klíčová pro nádrže, které jsou vystaveny agresivnímu prostředí např. silnice v zimním období. Hliník je plně recyklovatelný materiál. Je nutné ale pamatovat na to, že má dobré tepelné vlastnosti a může tedy efektivně přenášet teplo. Tato vlastnost je nebezpečná např. při dopravních nehodách, kdy dojde ke vznícení motoru vozidla v blízkosti hliníkové nádrže. [40]



Obrázek 6 – Hliníkové nádrže na palivo [40, 41]

Dalším kovem, ze kterého se vyrábějí nádrže na hořlavé kapaliny je titan. Titan má vynikající odolnost vůči korozivním procesům. To znamená, že titanové nádrže jsou vhodné pro prostředí, kde jsou hořlavé nebo agresivní kapaliny, které by mohly poškodit ocel. Titan je lehký kov s vysokou pevností. To umožňuje výrobu nádrží s vysokou odolností při nízké hmotnosti. Titan má vysokou teplotní odolnost a je chemicky stabilní. Díky své pevnosti a odolnosti tyto nádrže mohou nabízet dlouhou životnost. [42]



Obrázek 7 – Titanové nádrže na palivo [42]

Dále se vyrábí i nádrže ze slitiny niklu a mědi. Tato slitina se nazývá monel. Monel má vysokou odolnost vůči korozivním účinkům, což z něj činí vhodným materiálem pro nádrže, které jsou vystaveny agresivním chemikáliím nebo prostředím s vysokou vlhkostí. Dále je odolný vůči žíravým látkám, včetně

některých silných kyselin a alkalických látek. To může být důležité v průmyslových odvětvích, kde se manipuluje s agresivními chemikáliemi. Tato slitina má také vysokou pevnost, což přispívá ke schopnosti odolávat tlaku a vnějším nárazům. Tato vlastnost je důležitá zejména při výrobě tlakových nádob nebo nádrží. Monel je také teplotně odolný, což z něj dělá vhodný materiál pro nádrže, které jsou vystaveny vysokým nebo nízkým teplotám. Tento materiál má nízkou magnetickou permeabilitu, což znamená, že je minimálně ovlivňován magnetickými poli. [43, 44]



Obrázek 8 – Monelové nádrže[44]

Zajímavou slitinou využívanou na výrobu nádrží na hořlavé kapaliny je inconel. Inconel je speciální slitina niklu a chromu, s přidavky dalších prvků, jako jsou molybden, kobalt a niob. Inconel má vynikající odolnost vůči korozivním procesům. Dále zachovává svou pevnost a odolnost i při vysokých teplotách. To je klíčové pro aplikace, kde jsou nádrže vystaveny extrémním teplotním podmínkám, jako jsou procesy v průmyslové výrobě nebo chemickém inženýrství. Také má vynikající mechanické vlastnosti, včetně vysoké pevnosti a odolnosti vůči opakovaným zatížením. To umožňuje konstrukci nádrží s minimálním rizikem degradace materiálu v průběhu času. Tato slitina může úspěšně odolat extrémním podmínkám, jako jsou vysoké tlaky, agresivní chemická prostředí a vysoké teploty. [45, 46]



Obrázek 9 – Inconelové nádrže[46]

2.5.2.4 Celoplastové nádrže na hořlavé kapaliny

Plastové nádrže se dají vyrábět různými způsoby. Výroba pak ovlivňuje životnost a spolehlivost plastových nádrží.

První výrobní metoda tzv. rotomoulding, při které se polymer zahřívá ve formě a točením se rovnoměrně rozprostře po celé formě, načež se ochladí a přidají se do něj další komponenty. Rotační lití tvoří jeden celek beze švů a spojů. Švy a spoje vytváří slabá místa, zatímco tento výrobní postup eliminuje tato místa působení sil, tření nebo poruch, kterými mohou jiné výrobní procesy trpět.

Další metoda je svařování plastových nádrží plastem. Tato metoda je ale méně oblíbená (umožňuje větší nevhodnost).

Náklady na suroviny při výrobě plastových nádrží jsou výrazně nižší než náklady na ocel. Při výběru materiálu může hrát velkou roli chemická kompatibilita. Plasty používané při výrobě nádrží jsou odolné vůči většině chemikálií.

Plastové nádrže ale mnohdy nedosahují tak velkých velikostí jako ocelové nádrže. To je hlavně způsobeno potřebou velké formy na plastové nádrže. Výrobci tento nedostatek řeší propojením vícero plastových nádrží. [37]

Dvouplášťová plastová konstrukce při použití speciálních plastů odstranila dřívější nepříjemnou vlastnost jednoplášťových plastových nádrží. To byla nižší difúzní odolnost vůči pronikání zápachu ve srovnání s nádržemi z ocelového plechu. [31]

Plastové nádrže musí být certifikovány tak, aby splňovali příslušné normy. Konkrétně plastové nádrže na topný olej splňující evropské normy lze snadno identifikovat pomocí označení CE umístěného na nádrži. Pokud nádrž není opatřena tímto logem, nemusí být schválena pro instalaci ve Spojeném království, Irské republice nebo v jiné zemi EU. [47]



Obrázek 10 – Celoplastové nádrže[48]

2.5.2.5 Nádrže ze speciálního sklolaminátu

Takováto nádrž je vyrobena zpravidla ze skelného laminátu. [31] Skelný laminát je teplem tvrditelná pryskyřice obsahující vyztužující materiály. Sklolaminátové skladovací nádrže se v minulosti používaly v ropném průmyslu k bezpečnému skladování motorových paliv a jiných nebezpečných a hořlavých kapalin.

Nyní průmyslový trh používá širokou škálu chemických skladovacích nádrží, které vyžadují ochranu proti korozi a spolehlivost, kterou poskytuje právě sklolaminát. [49, 50]



Obrázek 11 – Sklolaminátové nádrže[50]

2.5.3 Dvouplášťové nádrže s rozdílným materiálovým provedením plášťů

2.5.3.1 Plastové nádrže s vnějším pláštěm z oceli

Tento typ nádrže se běžně využívá zejména pro naftu či olej. [51] Tato kombinace využívá výhod materiálů. Plastový vnitřní plášť chrání obsah nádrže před reakcemi s hořlavými kapalinami a minimalizuje riziko koroze. Plastový materiál je také lehký, což usnadňuje manipulaci a instalaci nádrže. Ocelový vnější plášť chrání nádrž před fyzickým poškozením a poskytuje dodatečnou vrstvu ochrany před vnějšími vlivy. [37]



Obrázek 12 – Nádrž s vnitřním pláštěm z HDPE a vnějším pláštěm z oceli [51]

2.6 Nehody nádrží na hořlavé kapaliny

Nádrže obsahující hořlavé kapaliny jsou běžné po celém světě. Pokud však dojde k úniku kapaliny z nádrže, tak může dojít k požáru. Požár může zahřívat nádrž a vyzářit do okolí obrovské sálavé toky. Zároveň je nutné porozumět jevům, které mohou při takovém požáru nastat.

V roce 1966 došlo ve Francii k výbuchu v důsledku úniku a hoření propanu z nádrže, který si vyžádal 18 mrtvých a 89 zraněných. Uvolněný propan dlouho hořel a zahříval nádrž, až nakonec došlo k výbuchu vroucí kapaliny s expandujícími parami (BLEVE) a následně k velké ohnivé kouli. Výsledky BLEVE z rychlého snížení tlaku horkých a nasycených kapalin ukázaly, že s největší pravděpodobností vede k domino nehodám s katastrofickými následky.

K úniku hořlavé kapaliny nemusí dojít pouze v oblasti statických nádrží na hořlavé kapaliny. Dopravní nehody mohou způsobit únik a hoření hořlavých kapalin ze silničních cisteren, což může vyvolat výskyt BLEVE. [52]

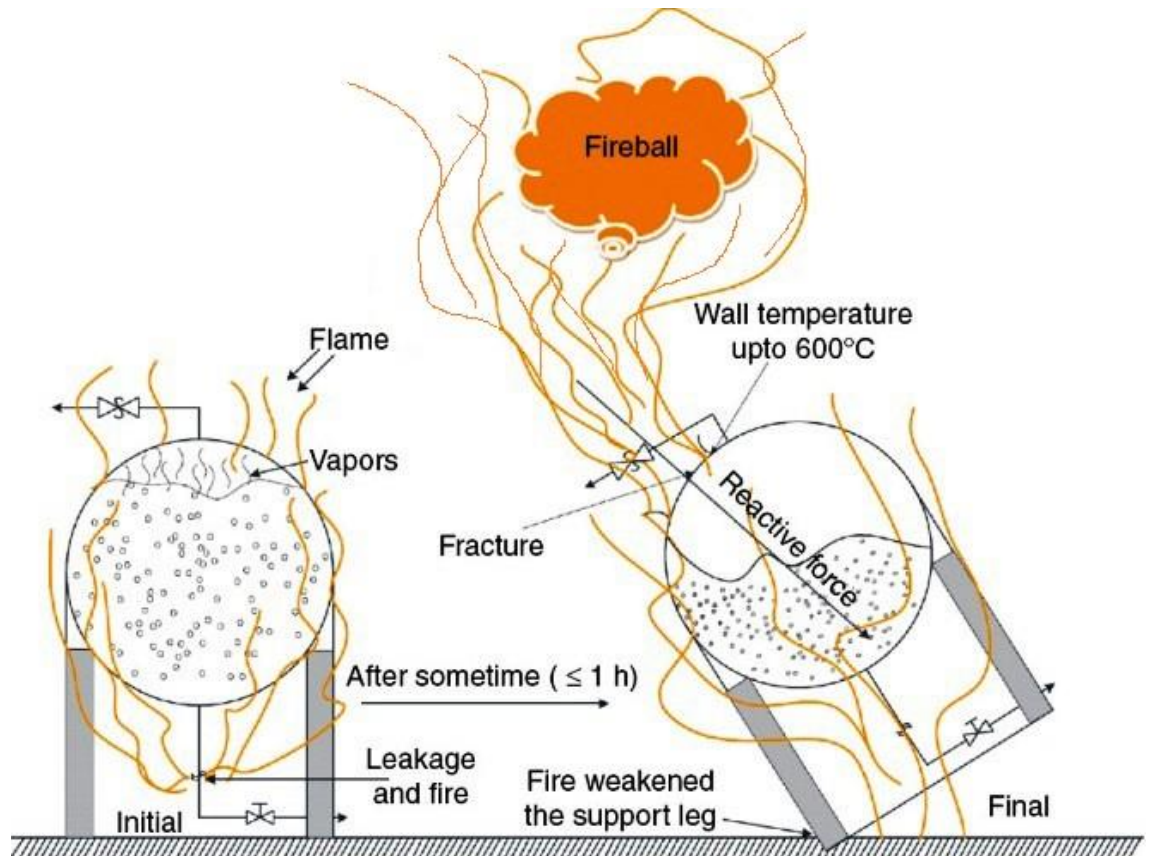
2.6.1 BLEVE

BLEVE je tzv. akronym anglických slov „Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion“. Patří do kategorie fyzikálních výbuchů a je to jeden z nejobávanějších rozvojevů nehod tlakových nádob, cisteren a zásobníků. Tento jev byl poprvé popsán v roce 1957 a je nadále zkoumán.

Víme, že BLEVE je procesem, který se podílí na náhlém roztržení nádoby obsahující kapalinu při teplotě významně vyšší, než je její bod varu za normálních (atmosférických) podmínek. Tento fyzikální projev může být doprovázen tlakovou vlnou generovanou expanzí par spolu s expanzí mžikově odpařených par, letícími fragmenty nádoby s podstatnou kinetickou energií a s tím spojenými škodami po zasažení okolí, včetně tzv. domino efektu a ohnivou kouli v případě okamžité iniciace hořlavého materiálu.

Pokaždé ale dochází k vytvoření oblaku par uniklého materiálu. Ten může být toxický, nebo hořlavý. Co se týče hořlavého oblaku par je okolí v případě opožděné iniciace ohroženo buď pouze uvolněnou tepelnou radiací při fyzikálním projevu „flash fire“, anebo tlakovou vlnou spolu s tepelnou radiací při urychlení plamene při fyzikálním projevu „flash fire“ až na hodnoty produkující tlakovou vlnu, a tedy výbuch oblaku par.

BLEVE je často nesprávně interpretováno a považováno za ohnivou kouli. Ohnivá koule může být pouze doprovázejícím fyzikálním projevem BLEVE. To se stane za podmínky, že dojde k roztržení nádoby s hořlavou látkou a okamžité iniciaci uniklého materiálu. Dále je možné se setkat s názorem, že tlaková vlna je generována až při reakci hořlavé látky se vzduchem po uvolnění z nádoby. Tento náhled na věc je však také nesprávný. Tlaková vlna je tvořena pouze expanzí stlačeného média, přičemž na energii tlakové vlny se může podílet jak pouze parní část z roztržené nádoby, tak za určitých podmínek i vnitřní energie obsažená v kapalné fázi. [53]



Obrázek 13 – Průběh BLEVE [54]

2.6.2 Požár uhlovodíků (Hydrocarbon pool)

Uhlovodíkové „rezervoáry“ jsou oblasti, kde se hromadí ropné látky a jiné uhlovodíkové sloučeniny nevhledě na jejich skupenství. K tomuto hromadění dochází zejména, pokud dojde k úniku těchto obvykle toxických a hořlavých látek. Termín uhlovodíkový „rezervoár“ (hydrocarbon pool) se používá nejen pro únik hořlavé kapaliny do kapaliny (obvykle vody), ale také pro únik hořlavé kapaliny např. do půdy.

Při vytvoření uhlovodíkového „rezervoáru“ může dojít zejména ke dvěma běžným typům požáru. Prvním je požár, ke kterému dochází, když hořlavá kapalina uniká z nádoby nebo potrubí a vytváří zásobník kapaliny, který se následně vznítí. Druhým a potenciálně nebezpečnějším typem je požár proudem, ke kterému může dojít po prasknutí tlakové nádoby a/nebo plynovodu.

Při požáru uhlovodíkového „rezervoáru“ vzniká teplota až $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ s tepelným tokem kolem 150 kW/m^2 . Při proudovém požáru dojde ke stejnému nárůstu teploty, ale tepelný tok může být dvakrát vyšší než při požáru v „rezervoáru“. [55]

Požáry uhlovodíkových „rezervoárů“ jsou terčem mnoha odborných článků. Historická analýza ukazuje, že požáry „rezervoáru“ jsou jednou z nejčastějších havárií ve zpracovatelském průmyslu a při přepravě nebezpečných látek. Obavy z možného nebezpečí tohoto typu havárií vedou k regulaci a zavádění zpráv o bezpečnostní analýze, havarijnímu plánování a kvantitativnímu hodnocení rizik. Podrobné posouzení bezpečnosti vyžaduje metody pro co nejpřesnější výpočet následků úniku. Určování účinků tepelného záření při požárech

uhlovodíkových „rezervoárů“ obvykle zahrnuje semiempirické metody, jako je například model plamene v pevném skupenství.

Znalost radiačních vlastností požárů je nezbytná pro vyhodnocení jejich tepelného nebezpečí. Běžně je zkoušeno chování uhlovodíkových „rezervoárů“ na hořlavých kapalinách typu benzin nebo nafta.

Existuje celkem rozsáhlá literatura popisující experimentální i teoretické studie tepelného vyzařování z plamenů. Většina studií se však zaměřuje na požáry v malých „rezervoárech“, které se výrazně liší od velkých turbulentních požárů. Předpovídání radiačních charakteristik velkých plamenů je stále zatíženo značnou nejistotou, protože některé parametry spojené s velkými turbulentními difuzními plameny nelze pro daný požár přesně určit. Při velkých požárech uhlovodíkových „rezervoárů“ vzniká velké množství kouře, který částečně obklopuje požár a snižuje tepelné vyzařování. Tento jev je znám jako „efekt blokování kouřem“. V současné době jsou výpočty a předpisy pro odstupové vzdálenosti požárů velmi konzervativní, protože neexistuje spolehlivá metoda, která by zohledňovala efekt blokování kouřem. Kromě toho je dobře znám významný vliv sazí na vyzařování z uhlovodíkových požárů. [56]

Výsledky studie zabývající se hořením benzinových a naftových „rezervoárů“ ukázaly, že maximální rychlost hoření byla vyšší, než udávaly jiné publikace. Záleželo vždy na těkavosti dané látky. Dále se zde zkoumal náklon plamene, který nebyl stálý v závislosti na působení větru. [56]

Analýza středního sálavého výkonu plamene ukázala nejvyšší hodnotu v blízkosti základny plamene. Zjištěné maximální hodnoty se značně liší od 80-100 kW/m² u „rezervoárů“ o průměru 1,5 m až po 120-160 kW/m² u větších průměrů. [56]

2.7 Bojový řád jednotek požární ochrany ČR

Informace o postupu při požáru hořlavých kapalin v nadzemních nádržích a při výše zmíněných nehodách lze nalézt i v taktických postupech Ministerstva vnitra – generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky.

Již v charakteristice tohoto bojového řádu ale narážíme na nepřesnost. Je zde řečeno, že „nadzemní nádrže pro skladování hořlavých kapalin jsou kovové nebo železobetonové konstrukce. Součástí nádrže je záchytná a havarijní jímka. Toto tvrzení již ale neplatí. Na českém trhu se nyní objevují např. i plastové nádrže na hořlavé kapaliny.

Stejně tak je nutné nová materiálová řešení zanést i do legislativy zabývající se touto tematikou. [33]

2.8 Přístup českých technických norem k nádržím na hořlavé kapaliny

Obecně dle ČSN 65 0201 musí být technologická zařízení, nádrže, kontejnery a přepravní obaly zhotoveny z materiálů odolných proti chemickým účinkům hořlavých kapalin, pro které jsou určeny.

Konkrétně skladovací nádrže musí být chráněny před korozí a vybaveny zařízením pro měření hladiny hořlavé kapaliny a ochranou proti přeplnění, včetně signalizace maximální povolené hladiny. Pokud jsou nádrže ohřívány nebo chlazeny, musí být vybaveny zařízením pro průběžné měření teploty a signalizací

maximální povolené teploty. Dvouplášťové a místně dvouplášťové nádrže nesmí mít spodní vypustní otvor a meziplášťový prostor těchto nádrží musí být nepropustný.

Pakliže jsou tyto nádrže nebo jejich požární úseky v podzemí bez možnosti přístupu, pak musí být opatřeny otvory pro případ potřeby zásahu požárních jednotek (alespoň 0,5 m x 0,5 m).

Dle ČSN 65 0201 přílohy B platící pro hořlavé kapaliny sloužící pro vytápění - III. a IV. třídy nebezpečnosti (např. TOEL) musí být prostory se zařízením určeným pro vytápění a ohřev teplé užitkové vody tvořit samostatné požární úseky.

Obecně je nutno rozlišit, zda se TOEL obsažený v nádržích používá k vytápění objektu (je tedy spalován v kotli) nebo se používá k vytápění technologie (probíhá technologický ohřev např. pecí). Toto použití má pak vliv na požadavky ČSN pro PBS. Tato práce s dále zabývá požadavky pro vytápění objektu. [7]

2.8.1 Skladování hořlavých kapalin

Požární ochrana obecně definuje skladování hořlavých a požárně nebezpečných látek ve vyhlášce č. 246/2001 Sb., v platném znění, § 44.

K ukládání hořlavých kapalin se využívají pouze obaly, nádrže nebo kontejnery, které jsou k tomu speciálně navrženy. Skladování speciálně hořlavých kapalin probíhá pouze v prostorech určených k tomuto účelu.

Ve společných nebo sklepních prostorech bytových domů nebo ubytovacích zařízení není dovoleno ukládat hořlavé kapaliny, s výjimkou hořlavých kapalin nezbytných k vytápění těchto objektů, a to v maximálním množství 40 litrů, a to pouze v nerozbitných přenosných obalech určených pro jeden tepelný spotřebič.

V každé jednotlivé a řadové garáži je možné skladovat maximálně 40 litrů pohonných hmot pro osobní automobily a 80 litrů pohonných hmot pro nákladní automobily v nerozbitných přenosných obalech, spolu s maximálně 20 litry olejů na jedno stání. V hromadných garážích není povoleno ukládat pohonné hmoty ani oleje, s výjimkou provozních náplní a záložního paliva, které jsou součástí vozidel. [57]

Sklady hořlavých kapalin navržené podle ČSN 65 0201 musí vždy tvořit samostatný PÚ. Pro hlavní sklad hořlavých kapalin se určuje objem nádrží podle třídy nebezpečnosti kapalin. Objemy skladované hořlavé látky se liší podle toho, v čem jsou skladovány. Např. pro skladování hořlavých kapalin ve skladovacích nádržích je objem hořlavé kapaliny s třídou nebezpečnosti I. 5 000 m³, zatímco pro třídu nebezpečnosti II. to je 20 000 m³ a pro III. a IV. třídu nebezpečnosti hořlavé kapaliny (TOEL) to je již neomezeno.

Hlavní sklady hořlavých kapalin nesmí být umístěny v nevýrobních objektech. Pokud chceme umístit provozní či příruční sklad hořlavých kapalin do nevýrobních objektů, musíme dodržet tyto požadavky další požadavky uvedené v normě ČSN 65 0201. Některými vybranými důležitými požadavky jsou např. nutnost zabránění nekontrolovatelnému rozlití kapaliny, umístění skladů vždy v 1. NP nebo 1. PP v budově s výškou $h \leq 22,5$ m. Pro hořlavé kapaliny třídy

nebezpečnosti III. a IV. jsou zde určeny možné skladované objemy v závislosti na výšce objektu h .

Skladování je také možné ve velkoobjemových nádržích. Velkoobjemové skladovací nádrže jsou nádrže, které přesahují určité limity objemu pro hořlavé kapaliny. Pro hořlavé kapaliny I. třídy nebezpečnosti jsou za velkoobjemové skladovací nádrže považovány nádrže o objemu větším než $5\,000\text{ m}^3$. Pro II. třídu nebezpečnosti je to $10\,000\text{ m}^3$ a pro III. třídu $20\,000\text{ m}^3$. Pro IV. třídu nebezpečnosti hořlavých kapalin je to $50\,000\text{ m}^3$.

2.8.2 Skladování hořlavých kapalin pro vytápění

Nádrže do objemu $2\,000\text{ l}$ mohou tvořit jeden požární úsek s kotlem. Tento požární úsek musí být dostatečně větrán a nesmí být používán k jiným účelům než k vytápění. Dále zde nemohou být umístěny jiné hořlavé látky nesusouvisející se způsobem vytápění.

Teplota na povrchu zdroje tepla, včetně jeho kouřovodu, musí být minimálně o 10 stupňů nižší než teplota vzplanutí hořlavé kapaliny, pokud by existovala možnost, že zdroj tepla přijde do kontaktu s touto kapalinou; přitom nesmí přesáhnout 100 stupňů. Minimální vzdálenost zdroje tepla a kouřovodu od nádrže musí být bez dalšího prokazování alespoň 1 metr, přičemž nádrže nesmí být vyhřívány. Zdroj tepla zároveň nesmí být v havarijní jímce nádrže (havarijní jímku nádrže běžně tvoří druhý plášť nádrže) a zároveň jímka musí pojmout veškerý objem nádrže. Dále je vhodné do tohoto PÚ osadit analyzátor hořlavých par.

Pokud je celkový objem nádrží na hořlavé kapaliny určených pro vytápění objektu větší než 2 m^3 , umísťují se tyto nádrže do samostatného požárního úseku.

Velikost těchto nádrží nesmí překročit:

- 75 m^3 v případě výrobního nebo skladovacího objektu nebo nevýrobního objektu do 30 m požární výšky.
- 50 m^3 v nevýrobním objektu do 30 m požární výšky s určitými provozy.
- 25 m^3 ve výrobním objektu, kde jsou prováděny činnosti zařazené do 6. nebo 7. skupiny výrob a provozů nebo kde jde o VI./VII. skupinu provozu skladů tvořících více než 50% půdorysné plochy objektu.

Objekty s těmito nádržemi musí být z nehořlavých konstrukčních systémů a samostatné PÚ s nádržemi na hořlavé kapaliny musí mít požárně bezpečnostní zařízení. Tyto PÚ musí být umístěny v 1.PP nebo 1.NP a zařazují se do VI. SPB. Prostor musí být dle normy dostatečně větrán.

Pokud nádrže překračují objem $2\,000\text{ l}$, pak již nesmí tvořit jeden požární úsek s kotlem bez ohledu na jeho výkon. [7]

2.9 Přístup německých norem k nádržím na hořlavé kapaliny

Požadavky na olejové vytápění a uskladnění topného oleje se řeší na úrovni jednotlivých spolkových zemí. Například v Bavorsku je olejové vytápění velmi rozšířené. Podíl tohoto vytápění tvoří více než 30% . Dále také v Sasku jsou podmínky pro vytápění a uskladnění topného oleje takřka totožné.

V jednom požárním úseku může být společně s tepelným spotřebičem (kotlem) s instalovaným výkonem < 100 kW uskladněno maximálně 5 000 litrů topného oleje.

Ve skladu topného oleje umístěného v samostatném požárním úseku (uvnitř objektu) lze skladovat 5 000 l až maximálně 100 000 litrů. Stěny a podpěry skladů paliv, jakož i stropy nad nimi nebo pod nimi musí být požárně odolné. Otvory ve stropěch a stěnách, pokud nevedou přímo ven, musí mít minimálně protipožární a samouzavírací uzávěry. Stropem a stěnami skladovacích místností s topným olejem nesmí být vedeny žádné kabely s výjimkou kabelů, které jsou nezbytné pro provoz těchto místností, dále potrubí topení, vodovodního potrubí a potrubí odpadních vod. Vchod do těchto místností musí být označen nápisem „SKLAD TOPNÉHO OLEJE“. [58, 59]

2.10 Porovnání

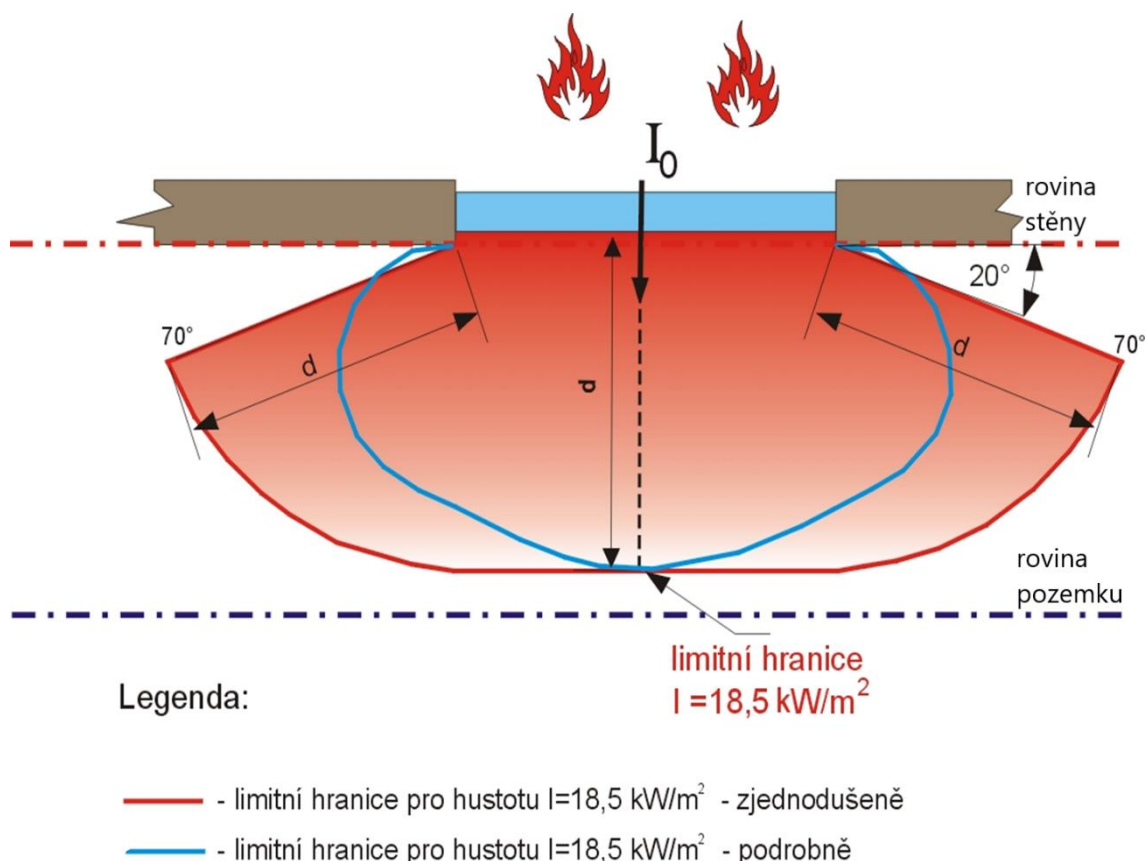
Z nalezených objemů hořlavých kapalin v českých a německých normách jasně vyplývá, že německé normy povolují uskladnění většího množství hořlavých kapalin. Zároveň lze v jednom požárním úseku s kotlem skladovat o 3000 litrů více, než je tomu v českých normách.

Nutno říci, že české normy neřeší materiálové řešení nádrží a maximální množství skladované kapaliny určuje dle typu nádrže z hlediska účelu (přepravní obaly, kontejnery a mobilní nádrže, skladovací nádrže). Možná toto by mohla být jedna cesta k tomu, jak zvětšit skladované objemy v jednom požárním úseku s kotlem. Norma by mohla umožnit větší množství skladované hořlavé kapaliny v závislosti na druhu materiálu, ze které je nádrž vyrobena. Různé materiály nádrží jsou více či méně odolné vůči teplotě při skladování, což bylo řečeno v kapitole 2.5.

2.11 Odstupová vzdálenost v České republice

Určování odstupových vzdáleností od nádrží na hořlavé kapaliny je nutné, pokud jsou umístěny vně i uvnitř objektu. Tento požadavek je uveden i v normě. Pro pochopení těchto požadavků z normy je nutné porozumět významu odstupových vzdáleností.

Odstupová vzdálenost představuje oblast, v níž hrozí přenos požáru na sousední objekt, konstrukci či požární úsek. Na hranici této oblasti je intenzita toku tepla dostatečně malá na to, aby se požár již déle nešířil. [60]



Obrázek 14 – Odstupová vzdálenost [61]

Odstupová vzdálenost je kolmá vzdálenost od požárně otevřené plochy až po její hranici. Hraniční hodnota intenzity tepelného toku je dle českých stavebních předpisů $18,5 \text{ kW/m}^2$. [62] Tato hodnota byla stanovena na základě experimentů vlivu sálavého tepla na dřevěné konstrukce. Při dlouhodobém působení sálavého tepla dochází k rozkladu dřeva a uvolňování různých plynů. [60] Vypočtená odstupová vzdálenost může mít jiný tvar, než odstupová vzdálenost určená dle tabulky uvedené v normě ČSN 73 0802. Tvar odstupové vzdálenosti dle normy je větší než tvar vypočtené odstupové vzdálenosti a je tak na straně bezpečné.

2.11.1 Odstupová vzdálenost od nádrží s hořlavou kapalinou

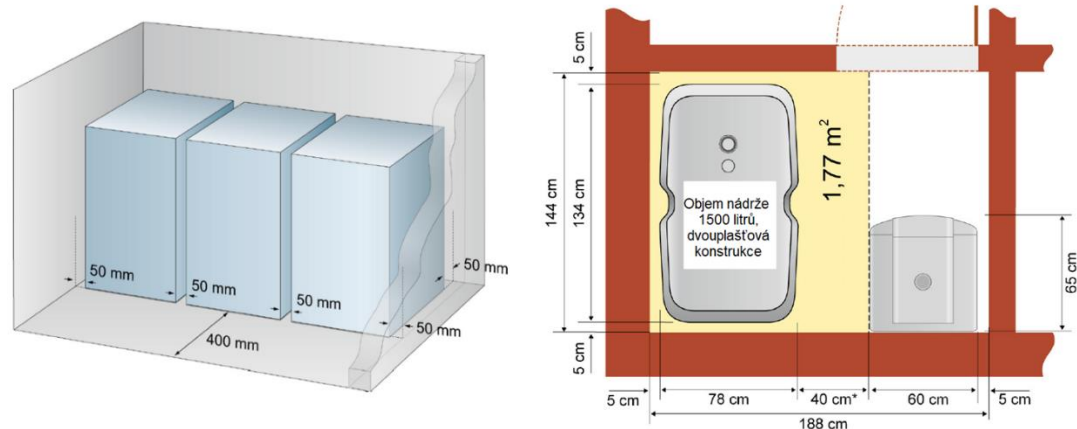
Dle ČSN 65 0201 se požárně nebezpečný prostor a odstupová vzdálenost nestanovuje u dvouplášťových nádrží a u podzemních nádrží. Dvouplášťové nádrže s vnitřním pláštěm z plastů se ale z hlediska odstupových vzdáleností považují za jednoplášťové, a tudíž se od nich odstupové vzdálenosti určovat musí. [7]

2.11.1.1 Umístění nádrže v budově z hlediska prostoru

Možnost umístit certifikované nádrže přímo vedle kotle lze snadno splnit, přičemž v jednom požárním úseku je povoleno instalovat nádrže s maximální kapacitou 2 000 litrů hořlavé kapaliny III. a IV. třídy nebezpečnosti určené pro vytápění (TOEL) společně s kotlem, a to nezávisle na charakter objektu. Nicméně

je nezbytné dodržet dostatečný odstup, a to minimálně 40 cm od pláště kotle, aby se zabránilo negativnímu vlivu sálavého tepla z pláště kotle na plášť nádrže.

Minimální vzdálenost nádrže od stěn nebo mezi nádržemi je 5 cm. To platí pro nejběžnější velikosti nádrží s konstrukční výškou do 1,5 metru. [7, 31]



Obrázek 15 - Příklad prostorových nároků úložiště TOELu složeného ze tří dvouplášťových plastových nádrží. [31]

Kotelna s kotlem na TOEL včetně úložiště oleje s objemem 1 500 litrů může vyžadovat jen 2,7 m² podlahové plochy, a to včetně ochranného odstupu mezi vnějším pláštěm nádrže a pláštěm kotle o šíři 40 cm.

2.12 Odstupová vzdálenost ve vybraných státech světa

2.12.1 Velká Británie

Odstupové vzdálenosti ve Velké Británii jsou stanoveny pomocí tzv. relevantní hranice. Tato hranice nelze požárně nebezpečným prostorem překročit a může být stanovena např. hranicí pozemku, centrální hranicí prostoru, kde není přípustný zásah požárně nebezpečného prostoru (dálnice, železniční trasa atd.) nebo minimální vzdáleností objektů (minimální vzdálenosti dle projektových norem Velké Británie).

Relevantní hranice se vztahuje k jednotlivým stěnám objektů a je s nimi rovnoběžná. Pokud je stěna pod úhlem k sousedící relevantní hranici, je brán sklon mezi posuzovanou stěnou a hranicí. Když je sklon do 80°, tak je tato hranice rozhodující při určování odstupové vzdálenosti posuzované stěny. Dále je požárně nebezpečný prostor závislý na tzv. nechráněných oblastech. Jsou to stěny s nižší požární odolností, než je požadována nebo s žádnou požární odolností. Pakliže mají stěny požární odolnost, ale mají upravený povrch materiálem s třídou reakce na oheň min. B-s3,d2 o tloušťce větší než 1 mm, pak jsou tyto stěny také brány jako nechráněné oblasti. Plocha takto upravených oblastí se dále nepočítá jako šířka × výška, ale 0,5 šířky × výška. Dále existují 2 zjednodušené metody pro určení přijatelné nechráněné plochy. Tyto plochy ve stěnách pak musí být vzdálené minimálně 1 m od relevantní hranice.

Tyto metody jsou zjednodušené a limitované z hlediska aplikace. V publikaci BR 187 jsou uvedeny další 2 metody (obdélníková metoda a úhломěrová metoda), které se užívají pro stanovení odstupových vzdáleností ve Velké Británii. V těchto náročnějších metodách je popisována např. i členitá fasáda. [28, 29, 30]

2.12.1.1 Odstupová vzdálenost nádrží

Vzdálenost mezi nádržemi na hořlavé kapaliny řeší normy BS 476 a BS 5410. BS 476 stanoví minimální vzdálenost mezi nádržemi na hořlavé kapaliny v nepřístupných místnostech, zatímco BS 5410 se zaměřuje na instalaci nádrží na hořlavé kapaliny a dalších zařízení pro skladování paliv v místech s rizikem výbuchu.

V Anglii se pro odstupové vzdálenosti plastových nádrží na hořlavé kapaliny používá norma BS 5410-2. Konkrétní požadavky závisí na objemu nádrže a typu hořlavé kapaliny. Obecně ale platí, že nádrže by měly být umístěny na odolné a stabilní základně a to minimálně 1 metr od jakýchkoli zdrojů zapálení nebo předmětů, které by mohly být požárem ohroženy. Pokud jsou nádrže uloženy v místnostech, kde jsou přítomny jiné zdroje hoření (kotle), musí být od sebe odděleny nejméně 760 mm. Pokud jsou nádrže umístěny na podstavci, musí být od podlahy odděleny nejméně 50 mm. Odstupové vzdálenosti se zvyšují s objemem nádrže. Například pro nádrže o objemu 2 500 litrů by měla být minimální odstupová vzdálenost 2 metry od jakéhokoli zdroje zapálení nebo ohně. Pro nádrže o objemu 10 000 litrů by měla být minimální odstupová vzdálenost 5 metrů.

2.12.2 Německo

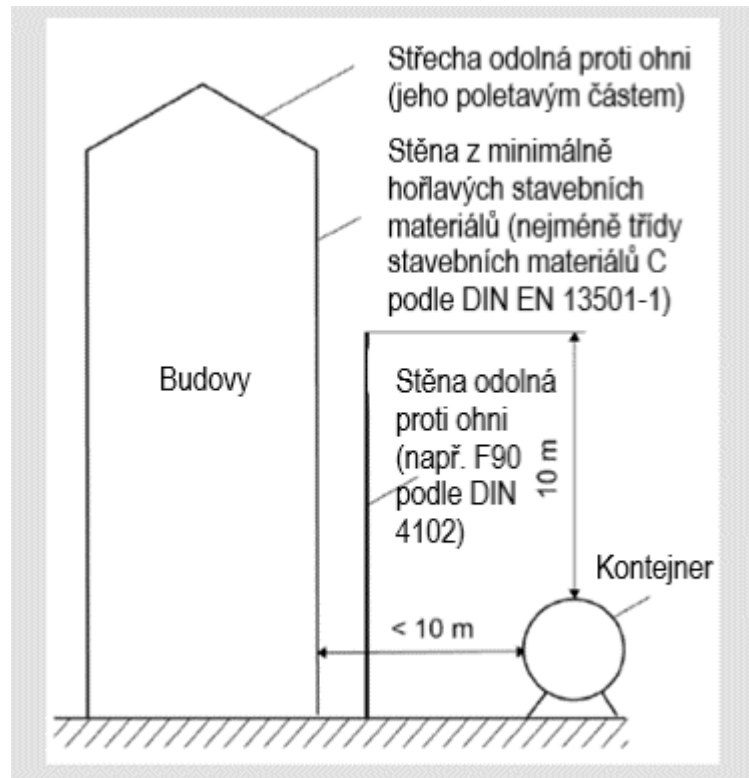
2.12.2.1 Odstupová vzdálenost nádrží

Vzdálenost tepelného spotřebiče od nádrží minimálně 1 m nebo 0,5 m při oddělení žáruvzdornou izolací nebo 0,1 m, když je povrchová teplota tepelného spotřebiče < 40 °C (což běžně dostupné kotle splňují). [58, 59]

Nadzemní nádrže ve venkovním prostředí musí být vzdáleny od budov nejméně 10 m. Venkovní plnicí místa musí být vzdálena nejméně 5 m od budov. Od těchto vzdáleností lze upustit, jestliže:

- vnější stěny budov směřující k nádržím mají požární odolnost do výšky 10 m nad horní hranou nádrže
- vnější stěny budov směřující k venkovnímu plnicímu místu mají požární odolnost do výšky 5 m na obě strany od okraje sběrného prostoru
- otvory uvnitř výše uvedené vnější stěny jsou chráněné proti požáru (doba požární odolnosti nejméně 90 min)
- plocha vnějších stěn budov, která je více než 10 m nad horní hranou nádrží, je zhotovena z nehořlavých stavebních materiálů (nejméně třída stavebních materiálů C podle DIN EN 13501-1)
- střešní krytiny jsou odolné proti odletujícím jiskrám a sálavému teplu nebo

- místo nehořlavé (doba požární odolnosti je nejméně 90 min) vnější stěny budov jsou mezi budovou a nádržemi umístěny nehořlavé prvky dostatečné výšky a šířky. [66]



Obrázek 16 – Vzdálenost plastové nádrže od budovy podle německé normy [58, 59]

2.13 Druhy požárních zkoušek plastových nádrží

Na plastových nádržích se provádí určité druhy požárních zkoušek. Tyto zkoušky slouží zejména pro certifikaci plastových nádrží. Mohou být také použity k posouzení a zlepšení platných norem a předpisů. V průběhu zkoušek se mohou objevit nedostatky v současných normách nebo návrhových metodách a tyto nedostatky mohou být použity k vylepšení příslušných standardů.

Zkoušky také mohou poskytnout nové informace o chování plastových nádrží v případě požáru, což může být použito pro vylepšení konstrukce a materiálů nádrží a pro zlepšení bezpečnosti skladování hořlavých kapalin. Konkrétněji jsou popsány níže.

2.13.1 Požární zkouška plamenem (Flame impingement test)

Nádrž je naplněna hořlavou kapalinou. Zdroj plamenu je umístěn pod nádrž tak aby plamen přicházel do styku s nejnižším místem nádrže. Nádrž se nechá hořet po určitou dobu a během hoření se sleduje teplota, tlak a množství uniklé kapaliny z nádrže. [67]

2.13.2 Flashover test

Ve stejné místnosti je umístěna nádrž s hořlavou kapalinou a zdroj hoření. V místnosti se vytvoří otevřený plamen, který postupně zvyšuje teplotu vzduchu v místnosti a má tak vytvořit podmínky pro vznik flashoveru. Nádrž se nechá hořet po určitou dobu a během hoření se sleduje teplota, tlak a množství uniklé kapaliny z nádrže.

2.13.3 Požární zkouška stability hoření (Burning behavior test)

Nádrž s hořlavou kapalinou je umístěna vedle zdroje plamene tak, aby nedošlo k přímému kontaktu nádrže s plamenem. Po zapálení nádrže se nechá ještě zdroj hoření zapálený po určitou dobu podle druhu hořlavé kapaliny. Poté se zdroj plamene uhasí a nechá se hořet jen nádrž. Během této doby se sleduje stabilita hoření nádrže. Hodnotí se, zda se nádrž deformovala, praskla nebo došlo k výbuchu nádrže. [68]

2.13.4 Požární zkouška pronikání tepla (Heat penetration test)

V nádrži s hořlavou kapalinou jsou umístěny senzory pro měření teploty. Nádrž je posléze vystavena zvyšující se teplotě. Během zkoušky se měří teplota kapaliny v nádrži, teplota stěn nádrže, případně další parametry jako je např. tlak uvnitř nádrže.

2.13.5 Požární zkouška tání (Melting test)

Nádrž s hořlavou kapalinou je vybavena senzory měření teploty. Nádrž se vystavuje vysoké teplotě, která se postupně zvyšuje a udržuje se po určitou dobu (ne ale tak dlouho aby došlo k flashoveru). Během zkoušky se sleduje, jak rychle a v jakém rozsahu dochází k tání stěn nádrže a jak deformace nádrže ovlivňuje její stabilitu (unikání kapaliny, tvorba trhlin atd.). [69, 70]

2.14 Související diplomové práce a odborné články

Cílem této kapitoly je představit vybrané diplomové práce a odborné články, které se blíže zabývaly rozléváním a hořením hořlavých kapalin. Analýza se zaměří na různé druhy zkoušených kapalin v závislosti na jejich objemu. U každé vybrané diplomové práce či odborného článku jsou vybrána důležitá data a poznatky pro tuto práci. Název kapitoly vždy nese název zkoumané diplomové práce.

2.14.1 Analýza sálavého toku při požáru hořlavých kapalin [11]

Tato diplomová práce se zaměřila v praktické části na numerické a analytické řešení hoření hořlavých kapalin. V první části byly zkoumány tři případy hoření. To probíhalo v nádržích s rozdílnou velikostí. První nádrž měla velikost 4x4 m, druhá 8x4 m a třetí 12x4 m. U nádrží se tedy měnil jen jeden parametr – délka

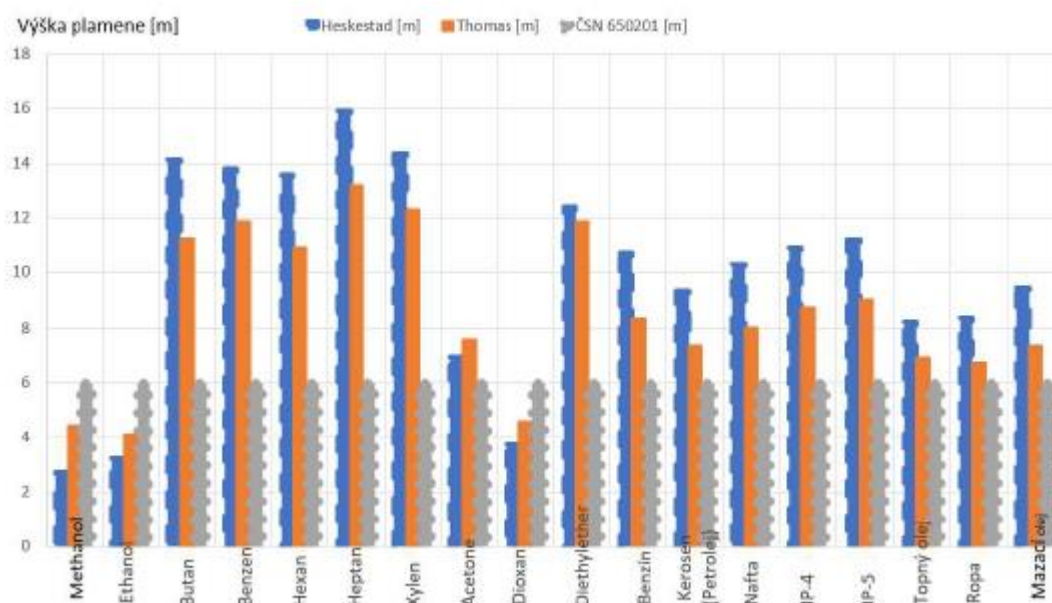
strany. Pro analytické řešení byli použity dvě výpočetní metody dle modelu Thomas a Heskestad.

Autor po provedení požárních scénářů dále zkoumal, jak se měnila charakteristika plamene a sledoval velikost odstupových vzdáleností v porovnání s normovým řešením.

Pro matematický model v programu FDS se autor zaměřil na dvě kapaliny, a to na heptan a etanol.

2.14.1.1 Výsledky analytického řešení

Výška plamene při hoření kapalin v nádobě 4x4 m byla uvedena v následujícím grafu:



Obrázek 17 – Graf porovnání metod výpočtu výšky plamene pro různé hořlavé kapaliny při požáru jímky 4x4 m [11]

Z grafu je patrné, že téměř pro všechny rozdílné hořlavé kapaliny je normově uvažovaná výška plamene 6 m nedostačující. V dalších uvedených grafech pro větší jímky se tento fakt nemění.

Dále byly v této práci využity tři křivky požáru pro analýzu velikosti požárně nebezpečného prostoru. Konkrétně se jednalo o křivku vnějšího požáru, uhlovodíkovou a normovou teplotní křivku. Při jejich porovnání se ukázalo, že normová a uhlovodíková teplotní křivka vykazuje podobné velikosti odstupových vzdáleností. Křivka vnějšího požáru potom mnohem menší.

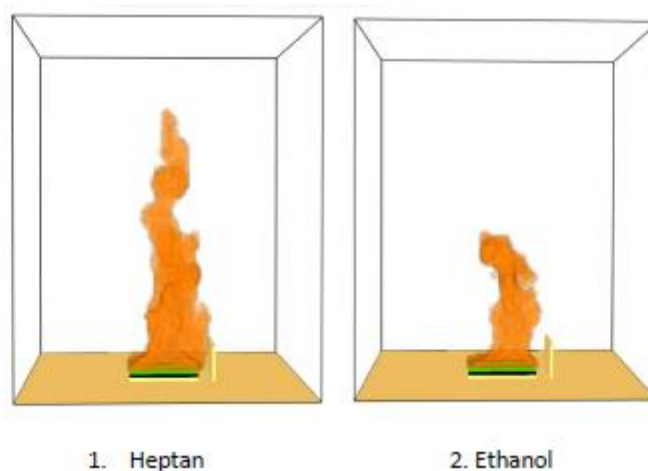


Obrázek 18 – Graf rozdílů velikosti odstupů vůči použité teplotní křivce při konstantní výšce plamene 6 m [11]

Autor při tomto porovnání poukazuje na nedostatky normy. Z grafu vyplívá logická úvaha, že se zvětšující šířkou požárně otevřené plochy by se zvětšovala i výška požárně otevřené plochy. S tímto se ale norma nezabývá.

2.14.1.2 Výsledky matematického modelu v FDS

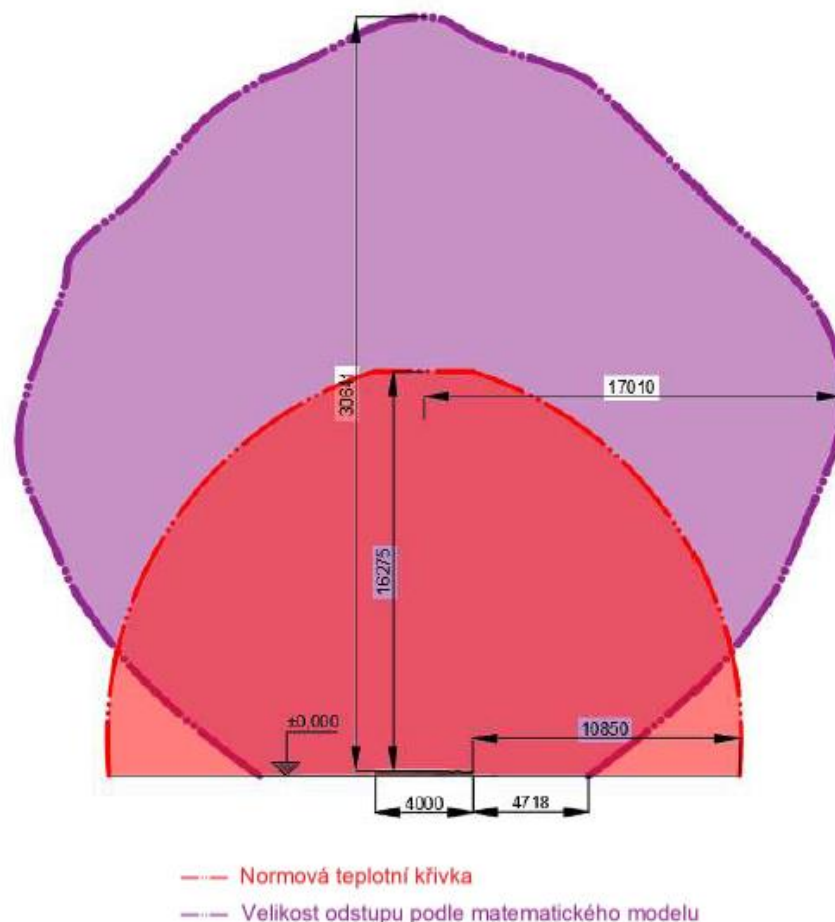
Autor nejprve zkoumal výšku plamene, která byla pro obě kapaliny rozdílná.



Obrázek 19 – Schéma vlivu velikosti plamene na použité hořlavé kapalině [11]

Rozdíl výšek plamene těchto kapalin byl téměř 9 m. To bylo způsobeno pomalejším odhoříváním ethanolu a menší produkcí energie než při hoření heptanu.

Dále autor porovnával velikosti a tvary požárně nebezpečného prostoru pro normovou teplotní křivku a výstup z matematického modelu.

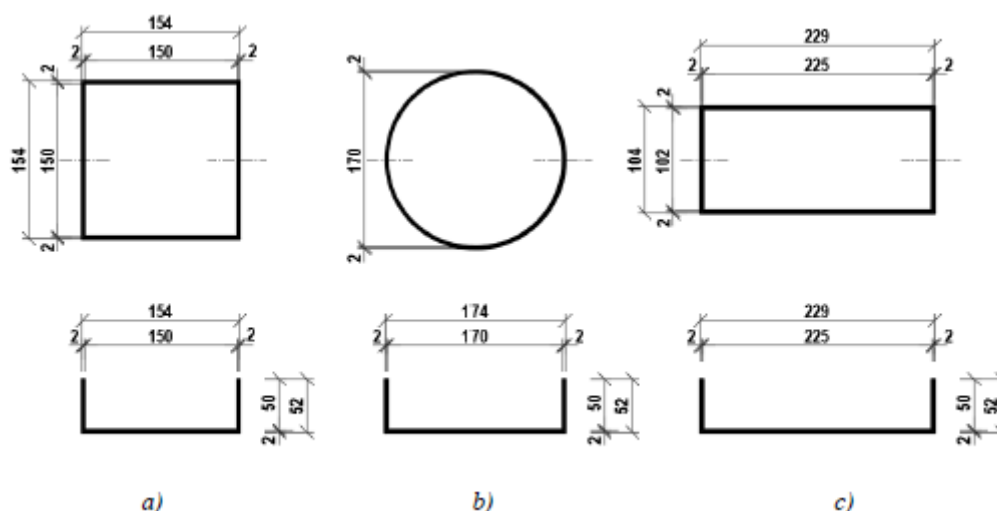


Obrázek 20 – Schéma porovnání velikosti a tvaru požárně nebezpečného prostoru pro hoření jímky o rozměrech 4x4 m [11]

Z obrázku je patrné, že půdorysná vzdálenost požárně nebezpečného prostoru se tolik neliší, jako vertikální velikost odstupu. Proto je vhodné vždy přehodnotit deterministicky stanovené hodnoty výšky plamene a provést detailnější analýzu a případně toto zapracovat do normy.

2.14.2 Charakteristika požáru hořlavých kapalin na ohraničené ploše [2]

Tato diplomová práce řešila v experimentální části vliv geometrie nádoby na parametry hoření dvou kapalin – methanolu a motorové nafty. Konkrétně první posuzovaná nádoba byla čtvercová, druhá kruhová a třetí obdélníková. Objem obsažené kapaliny byl 530 ml. Přesné rozměry jsou uvedeny na obrázku.



Obrázek 21 – Rozměry jednotlivých nádob: a) čtvercová nádoba; b) kruhová nádoba; c) obdélníková nádoba [2]

Celkem byli zkoumány tyto parametry – hmotnostní úbytek kapaliny, průběh HRR, doba trvání hoření, teplota a výška plamene. Předpokladem z charakteristiky hoření kapaliny bylo, že nejrychleji odhoří kapalina v kruhové nádobě.

2.14.2.1 Výsledky nádob s methanolem

Pro methanol byl nejvyšší hmotnostní úbytek ve čtvercové nádobě. Kapalina zde tedy odhořena nejdříve. Hodnoty HRR odpovídali hmotnostnímu úbytku. Teplota a výška plamene byly v čtvercové nádobě taktéž nejvyšší. Nejdále pak methanol odhořival z kruhové nádoby. Výška plamene pro kruhovou a obdélníkovou nádobu byla stejná. Předpoklad nejrychlejšího hoření v kruhové nádobě se tedy nepotvrdil.

2.14.2.2 Výsledky nádob s motorovou naftou

Motorová nafta odhořela jako první v kruhové nádobě dle předpokladu. Poslední odhořela v nádobě čtvercové. Dobám vyhoření odpovídají i ostatní charakteristiky. Nejvyšší plamen měla kruhová nádoba. Druhý nejvyšší plamen měla obdélníková nádoba.

Rozdílné hodnoty byly ale ve výsledku zanedbatelné. Pro celou práci bylo nakonec vyhodnoceno, že v rámci těchto provedených zkoušek se neprojevil zásadní vliv tvaru nádoby na parametry hoření těchto dvou hořlavých kapalin.

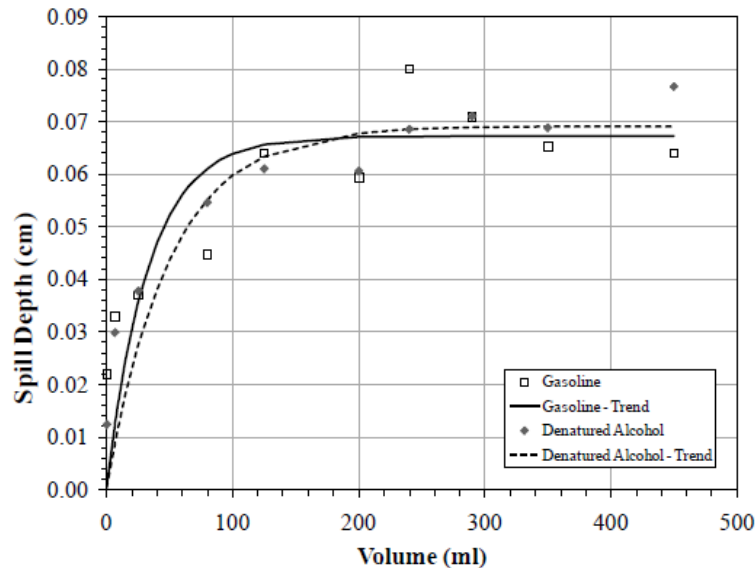
2.14.3 Spill and burning behavior of flammable liquids [71]

V této diplomové práci byla zkoumána hloubka rozlití neohraničené kapaliny, konkrétně dvě kapalná paliva (benzin, ethanol) a tři nehořlavé kapaliny. Kapaliny byly rozlévány na betonovou podložku v objemech od 0,2 ml po 450 ml. Dále se zkoumala průměrná rychlost hoření rozlitých hořlavých kapalin. Pro tuto práci autor vytvořil model tloušťky rozlité kapaliny, který porovnával s experimentálními údaji. Dále také vytvořil model rychlosti hoření rozlitých

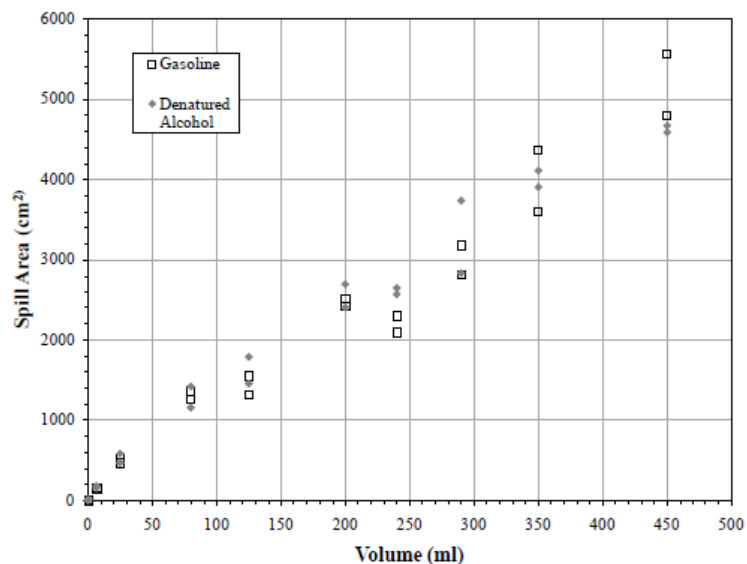
kapalin, který byl také porovnáván s experimentálními údaji. Dále byla také zkoumána výška plamene.

2.14.3.1 Rozlévání hořlavých kapalin

Celkem bylo pro tuto práci provedeno čtyřicet zkoušek rozlití kapaliny se dvěma palivy. Průměry jejich rozlití jsou znázorněny v grafu.



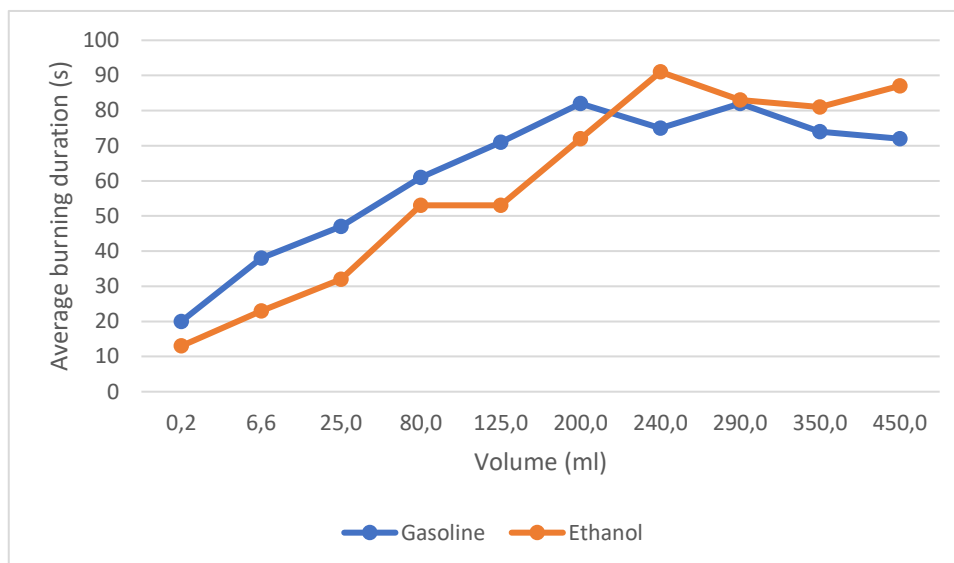
Obrázek 22 – Graf porovnání tloušťky rozlité hořlavé kapaliny a jejího objemu [34]



Obrázek 23 – Graf závislosti rozlité plochy na objemu pro všechny zkoušené hořlavé kapaliny [34]

Z grafu vyplývá, že plocha rozlití se zvětšuje téměř lineárně s rostoucím objemem rozlitého materiálu.

Aby bylo možné získat hrubý odhad chování rozlitých kapalin při hoření, byly pro každou zkoušku stanoveny průměrné rychlosti hoření vydělením hmotnosti paliva celkovou dobou hoření.



Obrázek 24 – Graf závislosti průměrné délky hoření na jejím objemu

Průměrná rychlost hoření u obou požárů rozlitych neohraničených kapalných paliv se lineárně zvyšovala s rostoucím rozlitym objemem.

Celkově byly hodnoty doby hoření a rychlosti hoření ethanolu a benzínu velmi podobné. To nebyl dle autora očekávaný výsledek, protože benzin má obecně výrazně vyšší rychlost hoření. Je však docela možné, že se jedná o důsledek časového průměrování použitého k výpočtu údajů. Ze zkušebních videí, která autor pořídil a v diplomové práci také popsal, bylo totiž patrné, že požáry benzínu měly tendenci ke krátkému trvání a větší maximální délce plamene. Zatímco na druhé straně většina požárů denaturovaného lihu měla kratší vrcholovou délku plamene.

2.14.4 Hašení požáru vybraných typů hořlavých kapalin vodní mlhou [72]

V této diplomové práci se autor zabýval hašením hořlavých kapalin vodní mlhou. Během pokusu byly zapáleny celkem čtyři hořlavé kapaliny – ethanol, technický benzin, motorová nafta a petrolej. Hořlavé kapaliny byly umístěny v plechové kruhové nádobě o průměru 165 mm a výšce 12 mm. Objemy zkoumaných kapalin byli stanoveny na 100 ml ethanolu/motorové nafty/petroleje a 150 ml technického benzínu. Doby hoření pro jednotlivé kapaliny jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 4 – Tabulka doby hoření pro jednotlivé kapaliny [35]

Hořlavá kapaliny	Doba rozhořívání (s)	Doba ustáleného hoření (s)	Celková doba hoření (s)
Technický benzin	90	100	216
Motorová nafta	180	140	495
Petrolej	50	105	244
Ethanol	90	85	328

Z tabulky je patrné, že nejdéle hořela motorová nafta. Při porovnání ale nesmíme zapomenout na fakt, že technického benzínu bylo při zkoušce o 50 ml více než ostatních kapalin. Při zohlednění objemu kapaliny i tabulkových hodnot můžeme říci, že technický benzin hořel nejrychleji.

V této diplomové práci se autor dále již zabývá hašením těchto požárů. Autor při pokusech neměřil výšku plamene, což je škoda.

2.14.5 Stanovení rychlosti uvolňování tepla u hořlavých kapalin [73]

V této diplomové práci autor porovnává rychlost uvolňování tepla u vybraných hořlavých kapalin. Autor ve své práci používá jak naměřené, tak i vypočtené hodnoty. Zkoušky jsou provedeny v kónickém kalorimetru. Autor také zkoumá tepelný tok kapalin.

Byly vyzkoušeny tyto hořlavé kapaliny – technický líh, N-heptan, Etylalkohol, aceton, petrolether a propanol. Zkoumané objemy kapalin se lišili takto – pro technický líh, Etylalkohol a propanol bylo zkoušeno 40 ml, pro ostatní kapaliny 20 ml. Tyto objemy byly stanoveny na základě rychlosti uvolňování tepla. První část měření proběhla bez využití tepelného toku, který by nahříval kapalinu. Následně byly všechny zkoušky opakované s hustotou tepelného toku, která byla $18,5 \text{ kW.m}^{-2}$ – hodnota využívána normou.

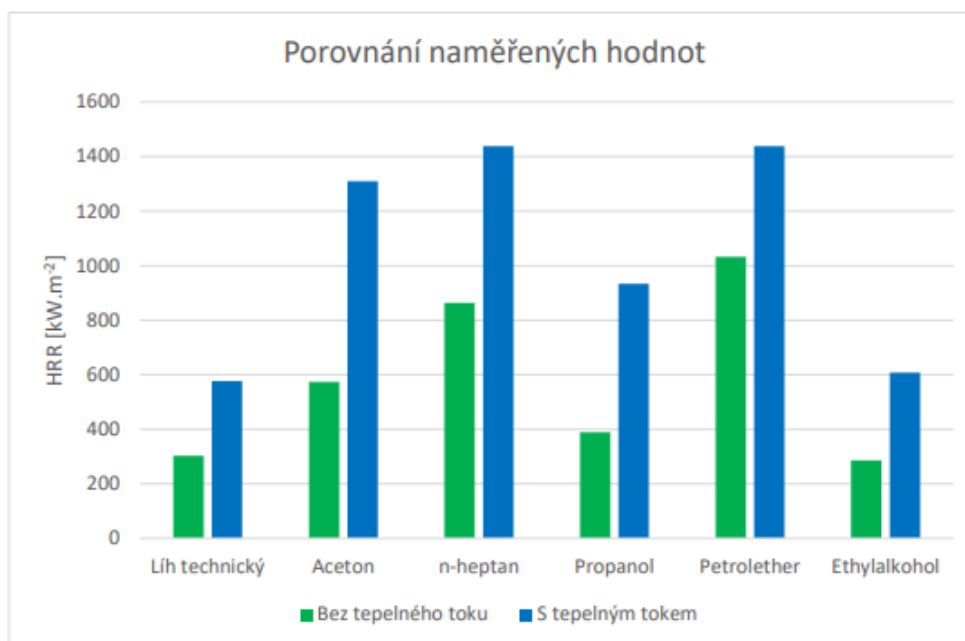
Celkové výsledky jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 5 – Průměr naměřených hodnot [36]

Látka	Max. HRR [kW.m ⁻²]	Střední HRR [kW.m ⁻²]	Max. HRR s tepelným tokem $18,5 \text{ kW.m}^{-2}$ [kW.m ⁻²]	Střední HRR s tepelným tokem $18,5 \text{ kW.m}^{-2}$ [kW.m ⁻²]
Lih technický	383,142	303,521	862,817	577,066
Aceton	792,541	573,741	2 206,036	1309,023
N-heptan	1 763,400	863,359	3 413,933*	1 437,977*
Propanol	581,346	388,500	1 460,899	933,810
Petrolether	1 829,371	1 032,049	4 131,800*	1 605,333*
Etylalkohol	365,189	285,901	888,228	607,804

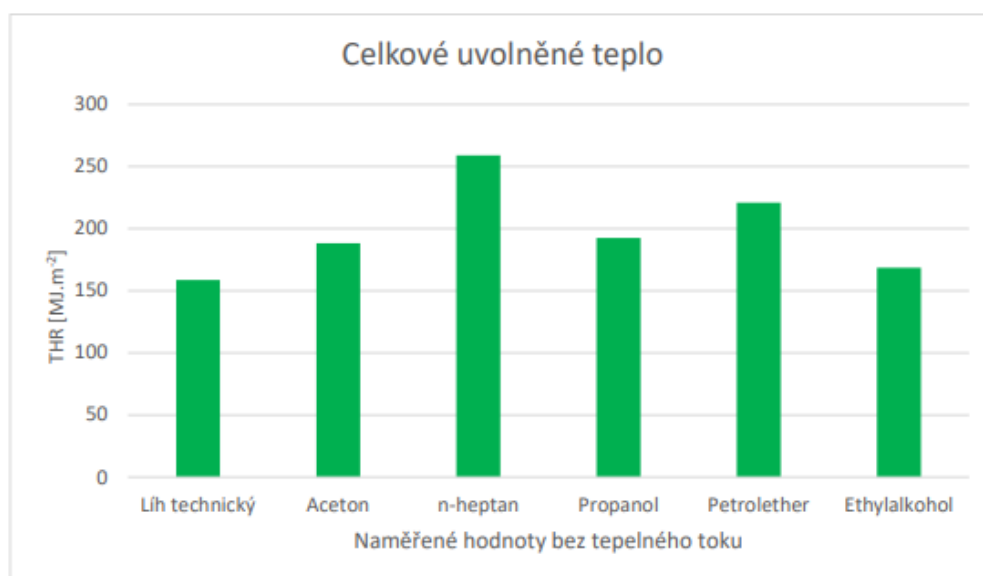
* zkouška látky proběhla s objemem 20 ml.

Druhá část měření, kdy byla kapalina zahřívána tepelným tokem $18,5 \text{ kW.m}^{-2}$ trvala kratší dobu než první zkouška. Rychlost uvolňování tepla musela být vždy větší než při původních zkouškách. Při použití tepelného toku byla hodnota rychlosti uvolňování tepla jasně větší než u vypočtených hodnot.



Obrázek 25 – Graf porovnání naměřených hodnot [36]

Z grafu je patrné, že pokud se do měření přidal tepelný tok, tak rychlost uvolňování tepla byla téměř u všech kapalin poloviční.



Obrázek 26 – Graf porovnání celkového uvolněného tepla [36]

Celkové uvolněné teplo bylo stanoveno pro N-heptan.

3 Praktická část

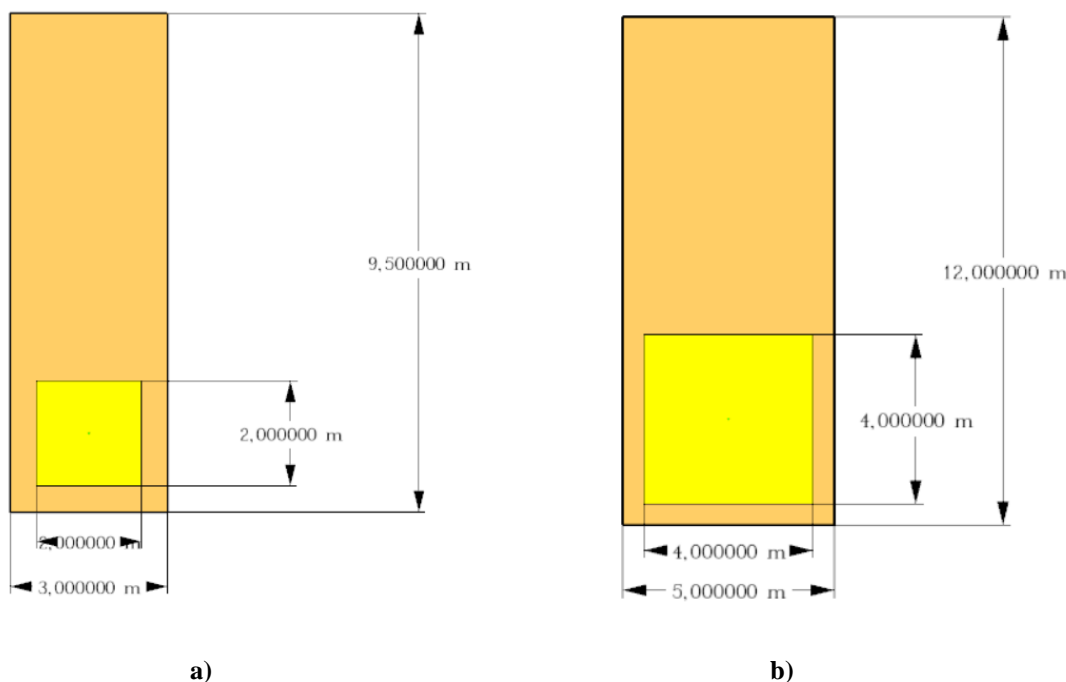
3.1 Numerické řešení nádrže na hořlavé kapaliny

Za účelem zjišťování požárně nebezpečného prostoru od plošného požáru a výšky plamene pro vybraná kapalná paliva byl vytvořen model postupně se třemi druhy hořlavé kapaliny. Požárně nebezpečný prostor v těchto modelech byl zkoumán v bezvětrí i s působením větru.

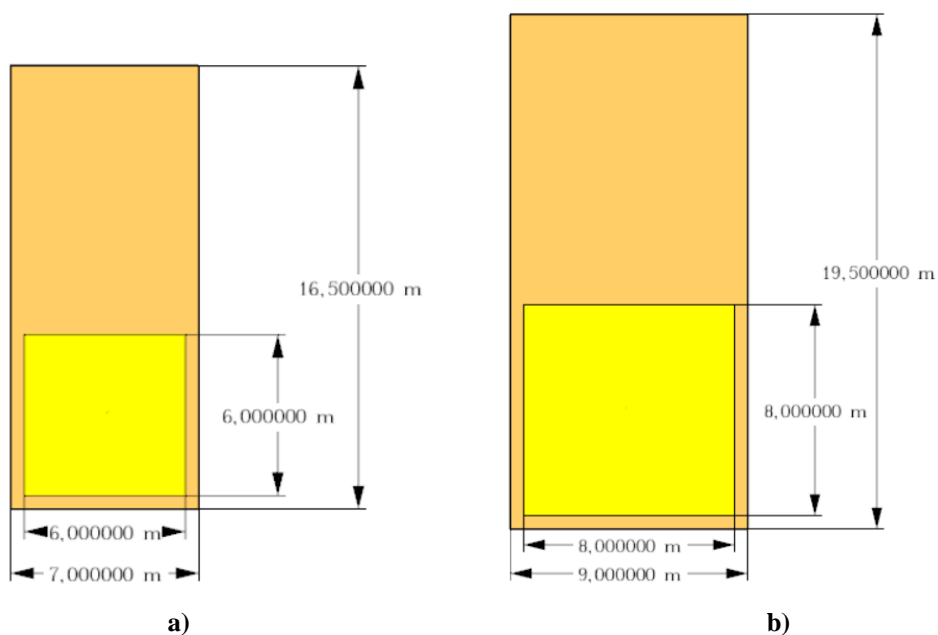
3.1.1 Požární scénáře

V rámci požárních scénářů byl vytvořen model požáru v programu PyroSim čtyř velikostně rozdílných čtvercových nádob s hořlavou kapalinou. Jako druh zkoumané kapaliny byl zvolen heptan, který se používá jako součást palivových směsí. Další zkoumané kapaliny byly propan a TOEL.

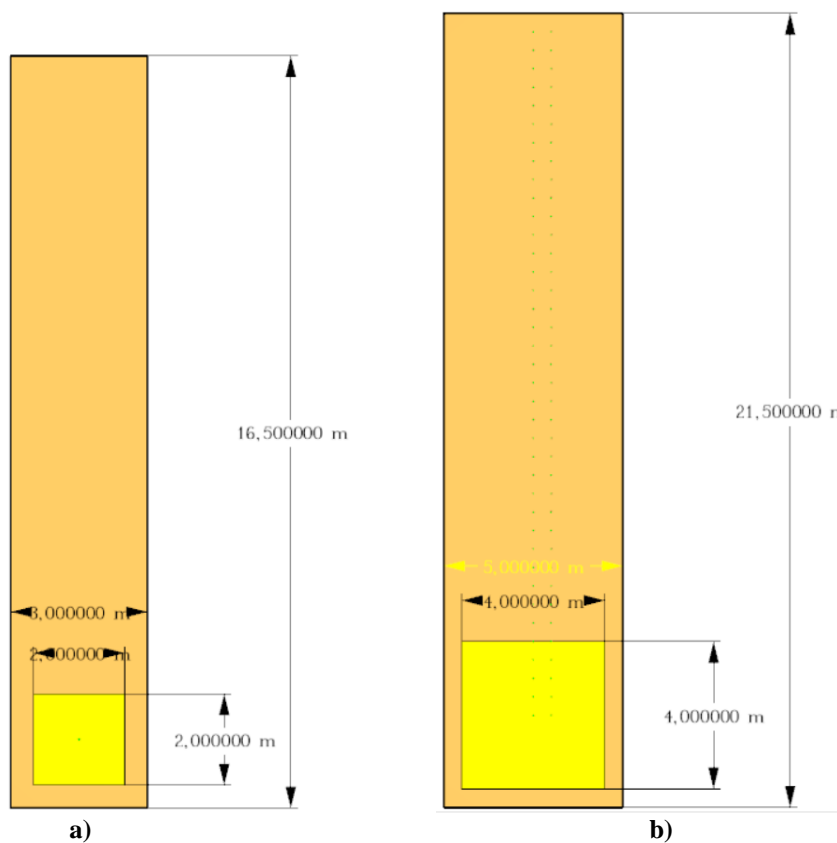
Ke zkrácení výpočetní doby byl model vytvořen pouze pro oblast obsahující nádrž s hořlavou kapalinou s místem pro zobrazení hustoty tepelného toku a výšky plamene. Toto místo bylo namodelováno počátečním odhadem velikosti plamene. Dále bylo v modelech obsahující vítr ponecháno místo před nádrží tak, aby zdroj větru nepůsobil rovnou na hořící nádrž, k čemuž by pravděpodobně nedocházelo ani v reálné situaci. Ohraničující stěny modelu byly vymodelovány jako zcela otevřené. Počáteční teplota výpočtu byla stanovena na pokojovou teplotu 20 °C. Na následujících obrázcích jsou půdorysy jednotlivých modelů.



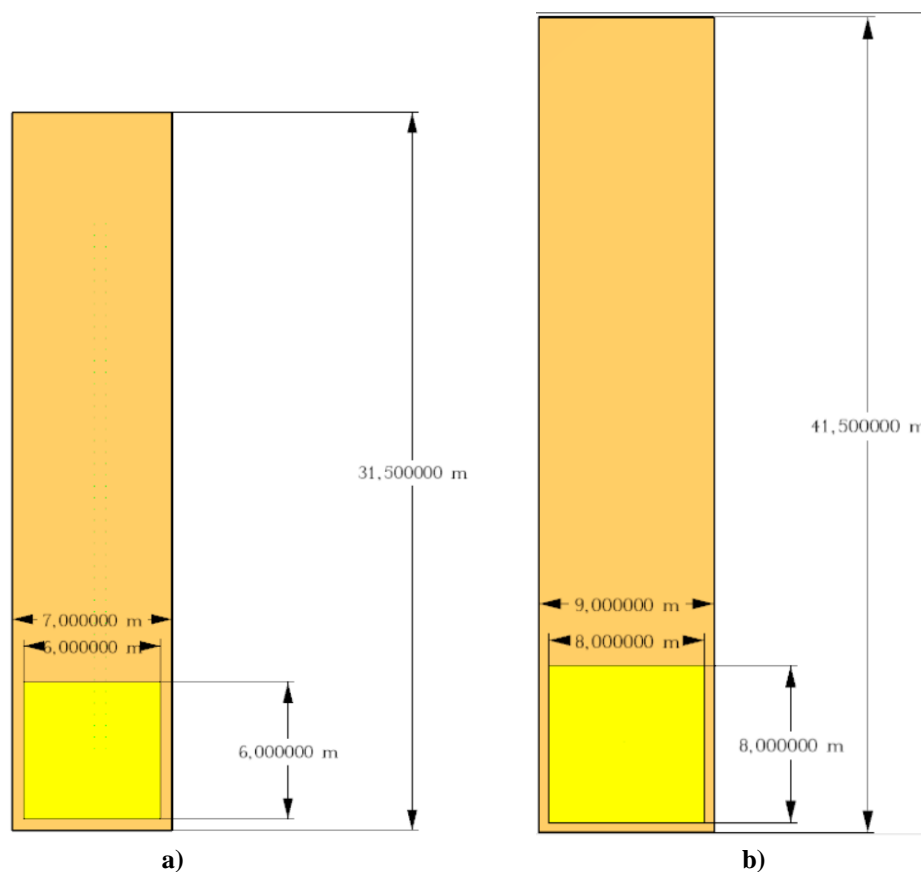
Obrázek 27 – Půdorysy modelů nádrží s heptanem bez působení větru a) 2x2 m; b) 4x4 m



Obrázek 28 – Půdorysy modelů nádrží s heptanem bez působení větru a) 6x6 m; b) 8x8 m

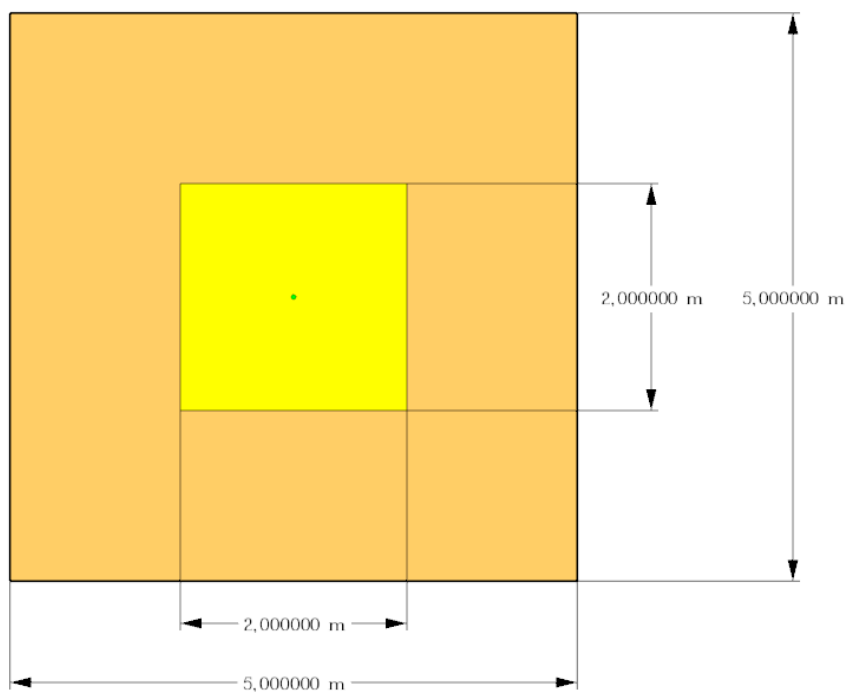


Obrázek 29 – Půdorysy modelů nádrží s heptanem za působení větru a) 2x2 m; b) 4x4 m

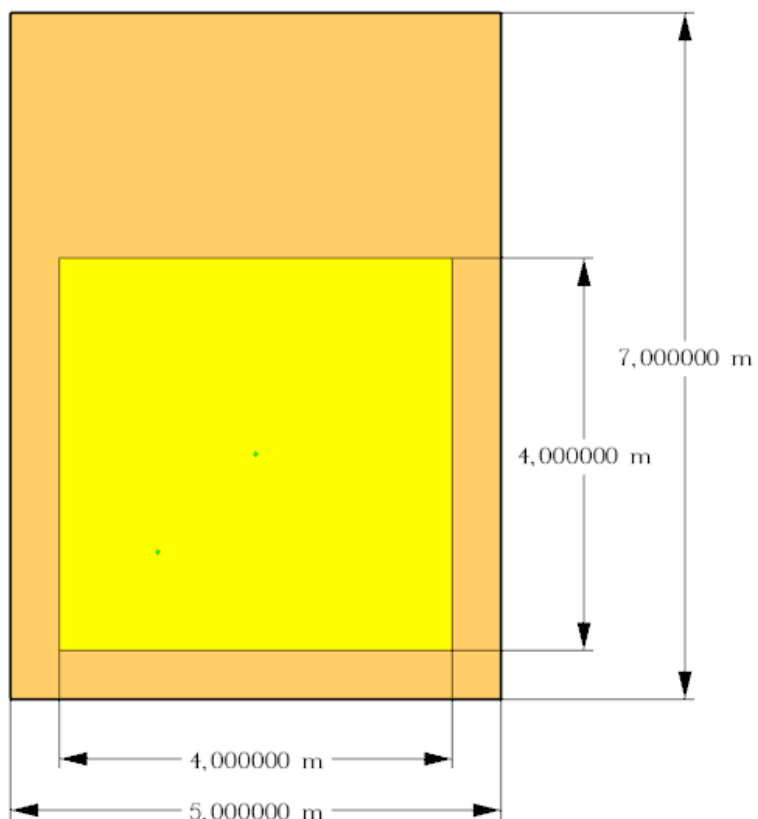


Obrázek 30 – Půdorysy modelů nádrží s heptanem za působení větru a) 6x6 m; b) 8x8 m

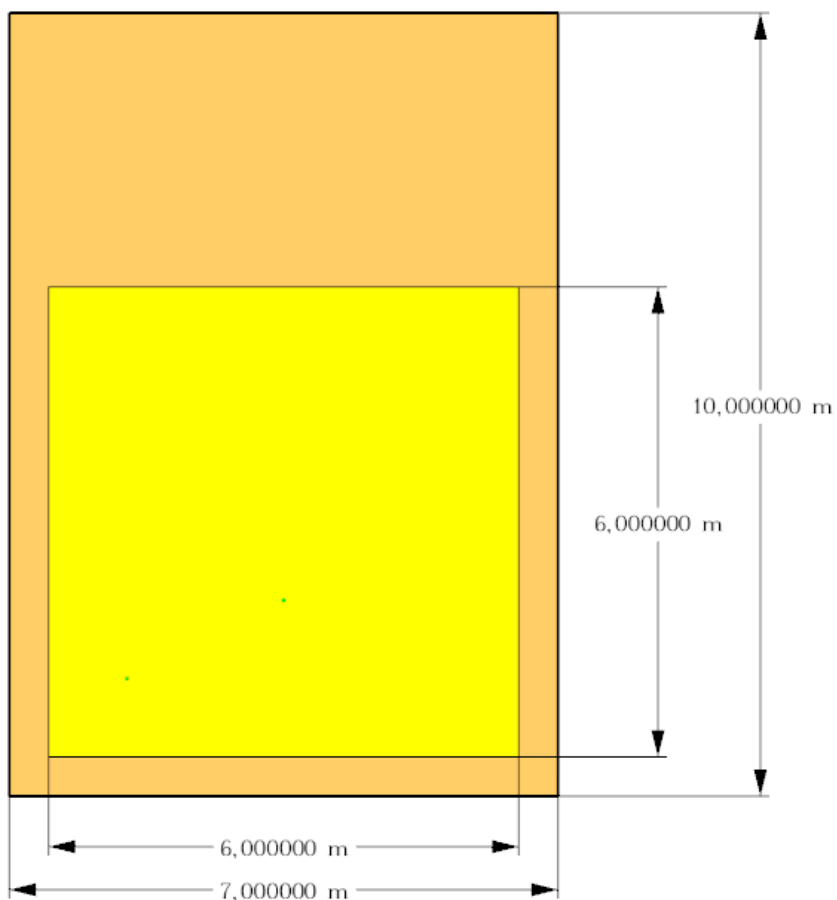
Modely nádrží na TOEL byly vytvořeny podobně jako modely nádrží s heptanem, protože hořely podobně rychle s podobně vysokými plameny oproti hoření nádrže s propanem.



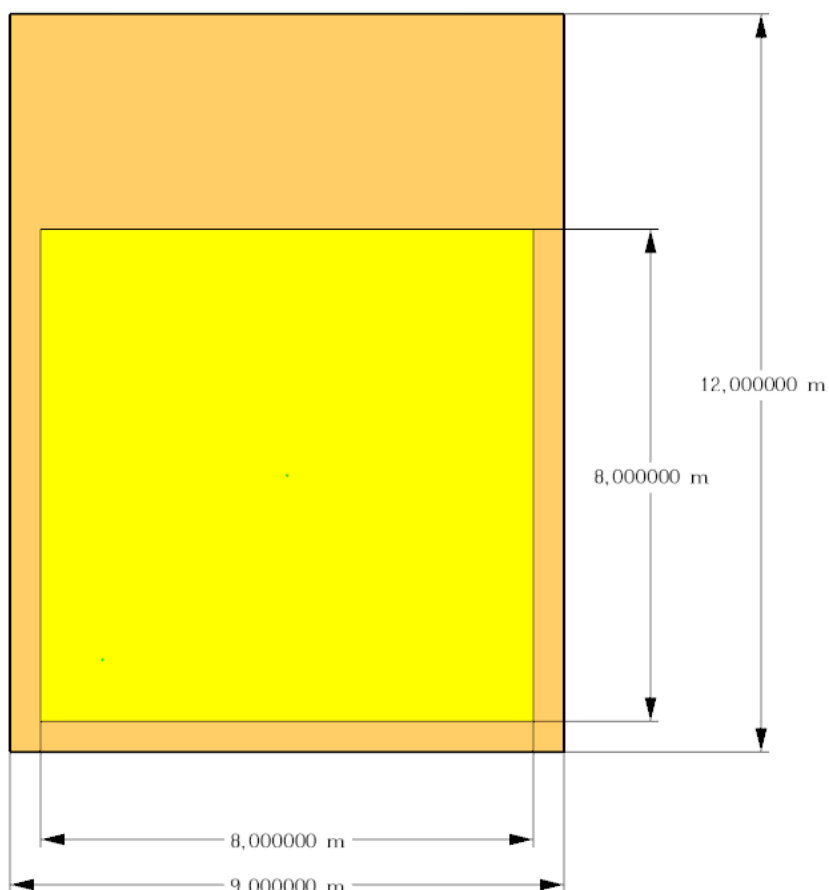
Obrázek 31 – Půdorys model nádrže 2x2 s propanem bez působení větru



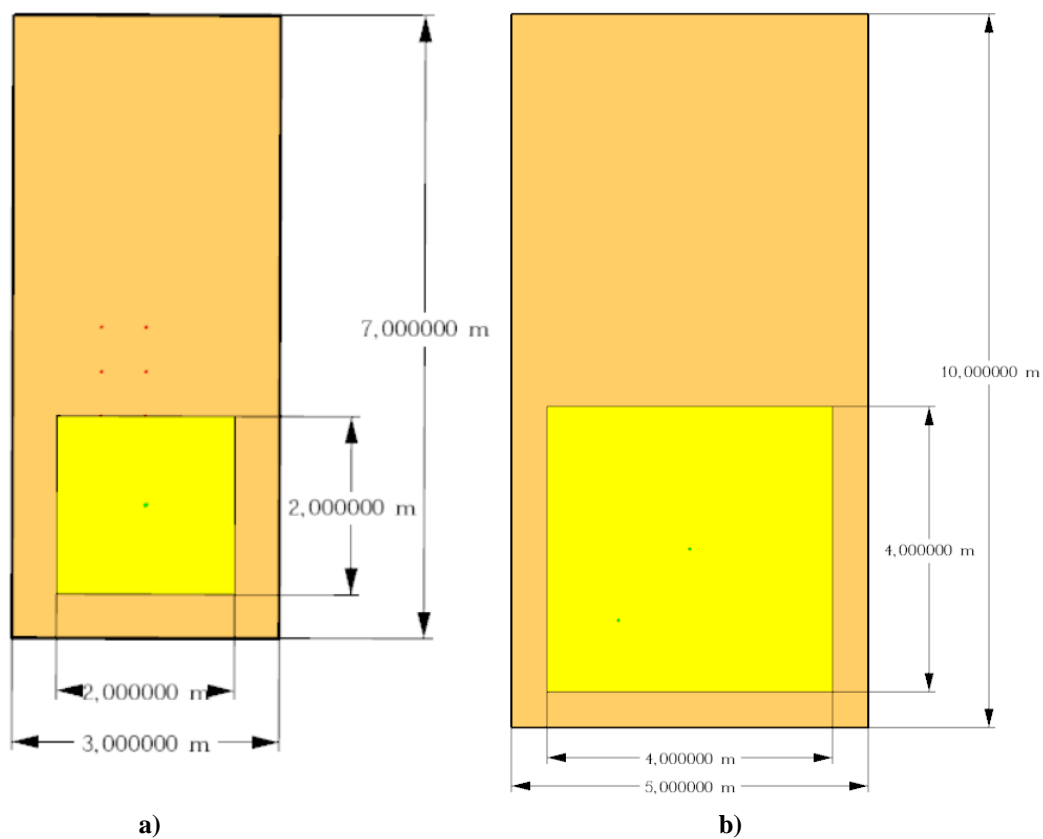
Obrázek 32 – Půdorys model nádrže 4x4 s propanem bez působení větru



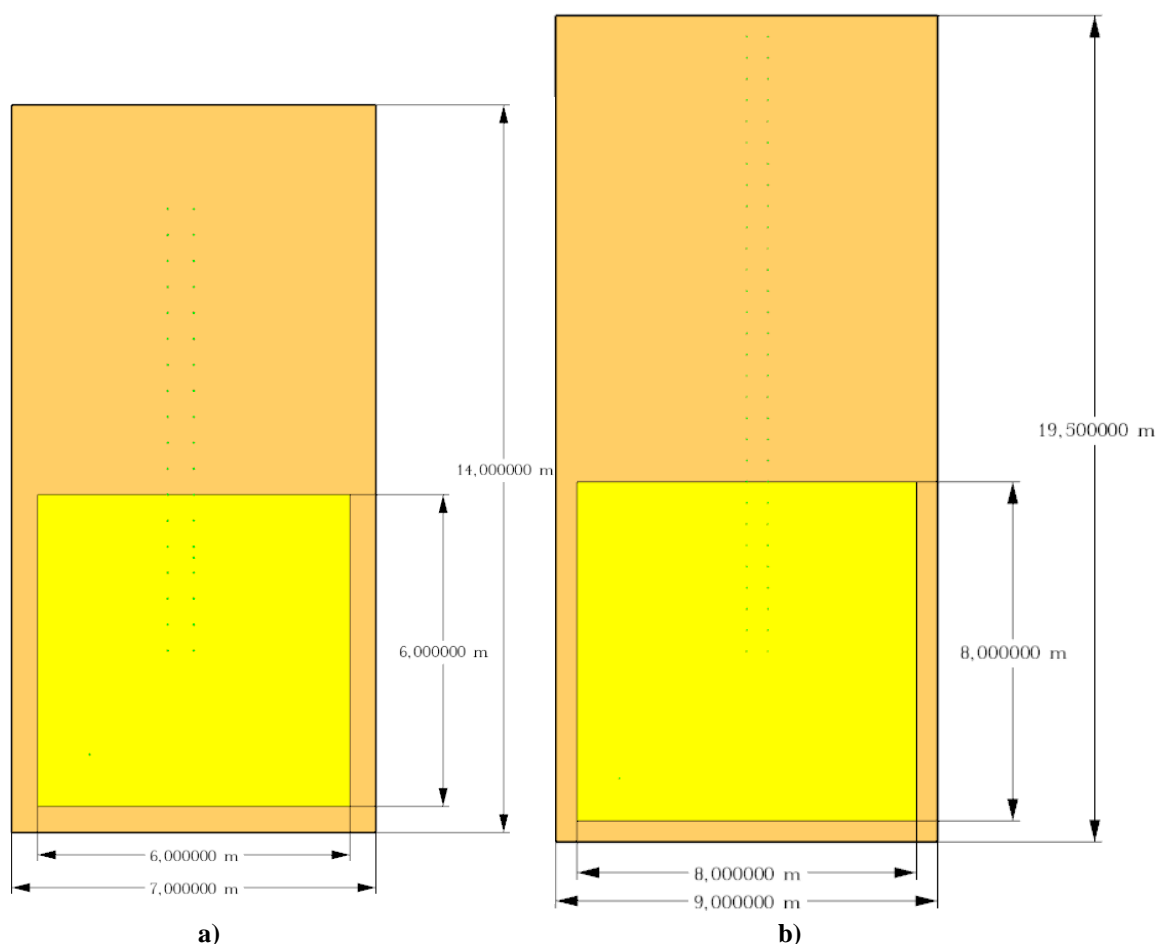
Obrázek 33 – Půdorys model nádrže 6x6 s propanem bez působení větru



Obrázek 34 – Půdorys model nádrže 8x8 s propanem bez působení větru



Obrázek 35 – Půdorysy modelů nádrží s propanem za působení větru a) 2x2 m; b) 4x4 m



Obrázek 36 – Půdorysy modelů nádrží s propanem za působení větru a) 6x6 m; b) 8x8 m

Výšky jednotlivých modelů byly zvoleny podle velikostí jednotlivých nádrží. U nádrží bez působení větru o velikosti 2x2 m byla zvolena výška 10 m. Výška modelů se s postupným zvětšováním nádrží také zvětšovala, např. u nádrže 4x4 m byla výška 15 m, u nádrže 6x6 m byla výška 25 m a u nádrže 8x8 m 35 m. U nádrží za působení větru se výška již tolik neměnila. Zde byla spíše více měněná délka modelu. Výška modelů za působení větru se pohybovala mezi 5 – 15 m.

U požáru těchto nádrží byla zkoumána výška plamene při bezvětří a při působení větru. Dále byla zkoumána hodnota hustoty tepelného toku $18,5 \text{ kW/m}^2$ a také její dosah při působení větru. Hodnota rychlosti větru byla určena dle portálu Českého hydrometeorologického ústavu a dat posbíraných na větrné mapě ČR. Průměrná rychlost větru v ČR je se pohybuje kolem 3-4,5 m/s nad povrchem. Pro výpočty v programu PyroSim byla použita hodnota 3,75 m/s. [74, 75]

3.1.2 Software

Program PyroSim byl navržen tak, aby tvořil grafické uživatelské rozhraní pro Fire Dynamics Simulator (FDS) a doplňoval ho tak. FDS je výkonný požární simulátor, který byl vyvinut v National Institute of Standards and Technology (NIST). FDS simuluje scénáře požáru pomocí výpočetní dynamiky tekutin (CFD) optimalizované pro nízkorychlostní, tepelně řízené proudění. Tento přístup je velmi flexibilní a lze jej použít pro požáry od sporáků po nádrže na skladování oleje. FDS je úzce integrován do PyroSim. Modely FDS mohou předpovídat kouř, teplotu, oxid uhelnatý a další látky během požárů. Výsledky těchto simulací slouží

k zajištění bezpečnosti objektů před výstavbou, vyhodnocení bezpečnostních možností stávajících objektů, rekonstrukcí požárů pro pohavarijní vyšetřování a asistenci při výcviku hasičů. Program také dokáže modelovat situace, které nezahrnují požár, jako je ventilace v budovách. Celkově je FDS pro dnešní svět motorem pohánějícím požární simulace. PyroSim umožňuje více inženýrům využívat tuto technologii a poskytuje okamžitou vstupní zpětnou vazbu. [76]

3.1.3 Výpočetní síť modelu

Pro různé velikosti nádrží a kapalin byla vytvořena jedna výpočetní síť s ohledem na výšku plamene a dosah plamene ke hranici modelu jednotlivých kapalin. Velikost výpočetní sítě byla stanovena na 0,2x0,2x0,2 m. Počty počítaných buněk se měnily v závislosti na velikosti nádrže a místa ponechaného k měření hustoty tepelného toku a výšky plamene. Počty buněk pro jednotlivé modely jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 6 – Tabulka počtů buněk jednotlivých modelů nádrží s hořlavou kapalinou

Druh kapaliny	Velikost nádrže	Počet buněk v modelu bez větru	Počet buněk v modelu s působením větru
Heptan	2x2	70 500	49 200
	4x4	150 000	100 000
	6x6	328 125	105 000
	8x8	654 750	125 400
Propan	2x2	15 625	13 125
	4x4	43 750	31 250
	6x6	87 500	61 250
	8x8	135 000	112 500
TOEL	2x2	101 250	112 500
	4x4	103 125	281 250
	6x6	415 625	343 750

Celkem bylo vytvořeno tak 24 modelů s kapalinou. Od každé kapaliny se vždy modelovaly 4 rozdílně velké nádrže a výpočet se poté opakoval s působením větru. Tedy pro každou kapalinu bylo napočítáno 8 modelů. Celkově byl každý model vypočten pro dobu 100 s hoření kapaliny. Tento čas byl určen podle ustálení hoření zkoumaných nádrží.

3.1.4 Sledované veličiny

V rámci výpočtu modelů různých kapalin v programu PyroSim byly sledovány různé veličiny. Pro určení odstupové vzdálenosti od zdroje hoření bylo nutné změřit hustotu tepelného toku. Hustota tepelného toku je množství tepla, které prochází jednotkovou plochou za jednotkový čas. Při běžných požárních zkouškách se k měření odstupových vzdáleností používají radiometry. V programu PyroSim šly tyto radiometry využít také, nicméně nebyly vhodné pro měření kritické hodnoty tepelného sálavého toku. Pro tuto hodnotu byl využit 2D slice Integrated Intensity (integrováná intenzita).

3.1.4.1 Radiometry v programu PyroSim

Radiometr měří radiativní (sálavý) tepelný tok, což je tepelný tok způsobený elektromagnetickým zářením. Udává množství tepla, které se přenáší elektromagnetickým zářením za jednotkový čas a jednotkovou plochu.

3.1.4.2 Integrovaná intenzita v programu PyroSim

Integrovaná intenzita (neboli celkový tepelný tok) je celkové množství tepla, které prochází plochou, když hustota tepelného toku není konstantní, ale mění se na určité ploše. Integrace se používá, když hustota tepelného toku není konstantní přes celou plochu, a tím se získá celkové množství přeneseného tepla. Tato integrace bere v úvahu změny hustoty tepelného toku na různých částech plochy.

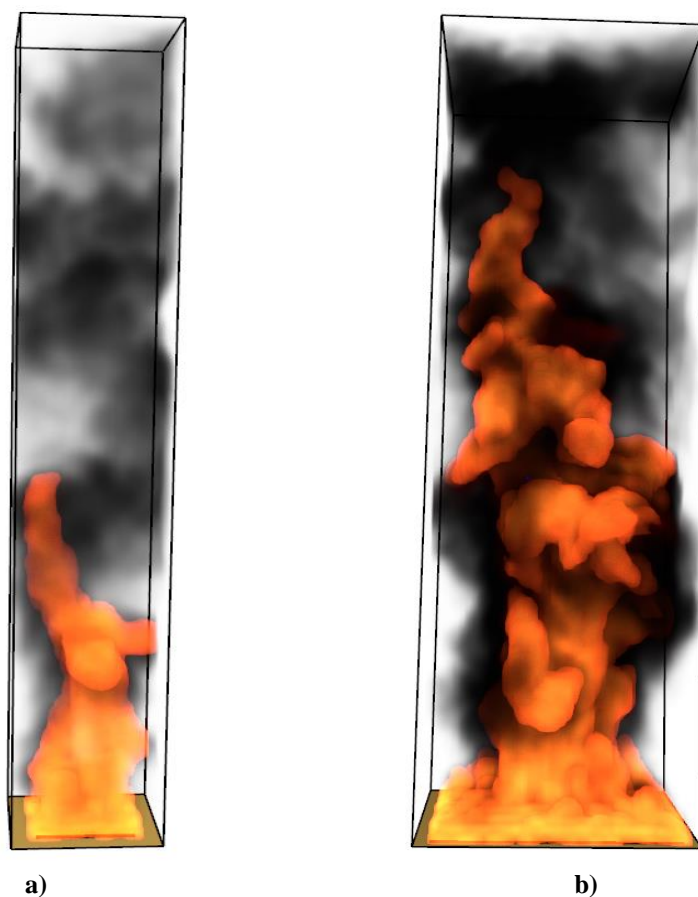
3.1.4.3 Porovnání radiometrů a integrované intenzity v programu PyroSim

Při měření a porovnávání hodnot z radiometru a integrované intenzity vznikl rozdíl hodnot. Rozdíl byl způsoben faktem, že měření radiativního (sálavého) tepelného toku je zaměřené na okamžité množství tepla přenášeného elektromagnetickým zářením, zatímco integrováná intenzita může zahrnovat celkové množství tepla přeneseného v průběhu času. V rámci měření odstupových vzdáleností neměříme elektromagnetické záření, ale hustotu tepelného toku, což je integrováná intenzita.[14, 77]

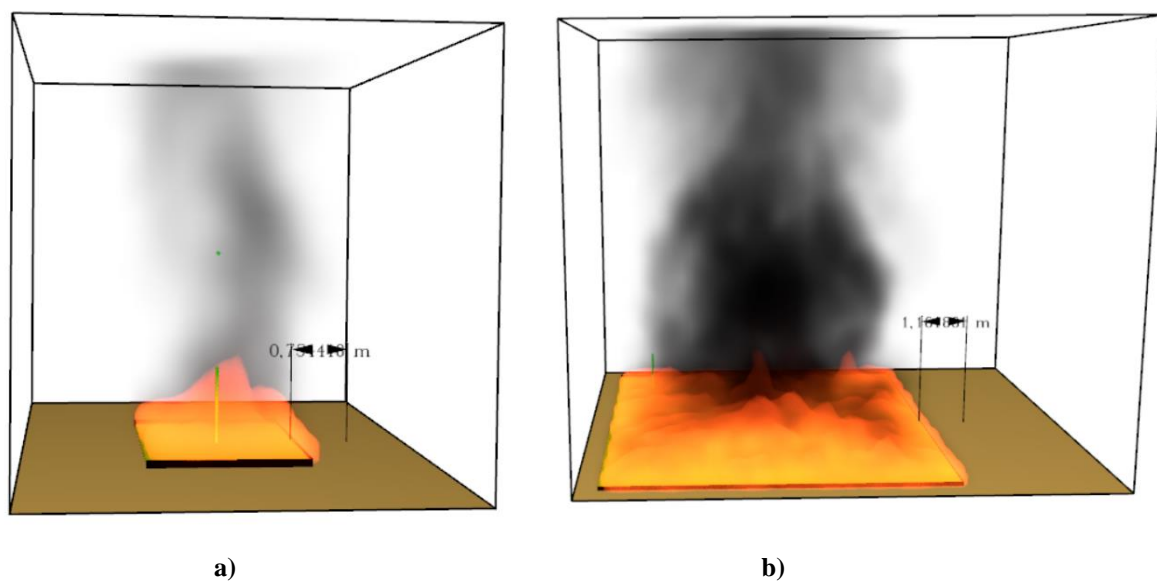
3.1.5 Výška plamene hořlavých kapalin bez působení větru

Při výpočtu velikosti odstupových vzdáleností je třeba do výpočtu zahrnout i výšku plamene kapaliny. Výška je dle normy určena dle hustoty tepelného toku. Pro nízkou hustotu tepelného toku se udává průměrná výška plamenů 3 m, pro střední hodnotu tepelného toku je to 4,5 m a pro vysokou hodnotu je to 6 m. Do výpočtů odstupové vzdálenosti, které jsou srovnávány s hodnotami naměřenými dle výpočtu v modelu, byla vždy uvažována vysoká hodnota hustoty tepelného toku. Bylo tedy počítáno s nejvyšší hodnotou plamenů, kterou uvádí norma. [78]

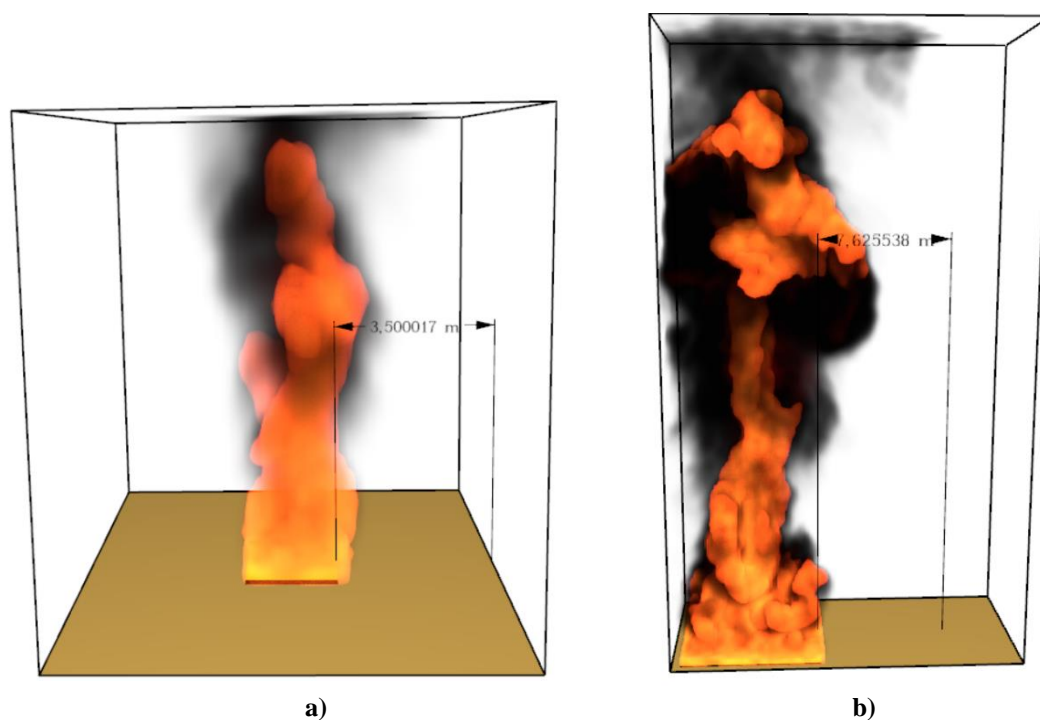
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny požáry jednotlivých kapalin, a to vždy nejmenší a největší nádrže. Přidružené kóty byly využity k určení odstupové vzdálenosti, což je popsáno v dalších kapitolách.



Obrázek 37 – a) Požár nádrže s heptanem o velikosti 2x2 m; b) Požár nádrže s heptanem o velikosti 8x8 m



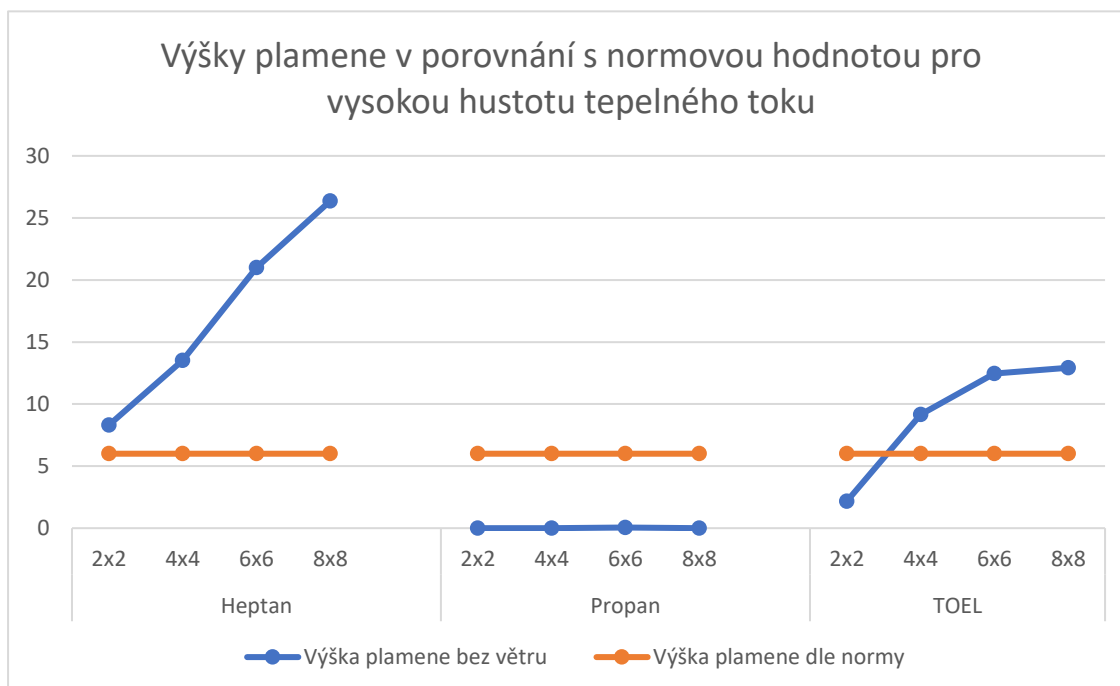
Obrázek 38 – a) Požár nádrže s propanem o velikosti 2x2 m; b) Požár nádrže s propanem o velikosti 8x8 m



Obrázek 39 – a) Požár nádrže s TOELEM o velikosti 2x2 m; b) Požár nádrže s TOELEM o velikosti 8x8 m

Z obrázků je možné vidět, jak jednotlivé kapaliny hořely. Nejméně hořel propan, nejvíce potom heptan, což dále můžeme pozorovat i na výškách plamenů.

Pro každou nádrž bylo uvažováno s třiceti nejvyššími hodnotami výšky plamene, které byly naměřeny. Tyto hodnoty byly zprůměrovány do následujícího grafu a byly porovnány s normovou hodnotou výšky plamene pro vysokou hustotu tepelného toku. Použité hodnoty pro tvorbu grafu jsou uvedeny v Příloze 1.



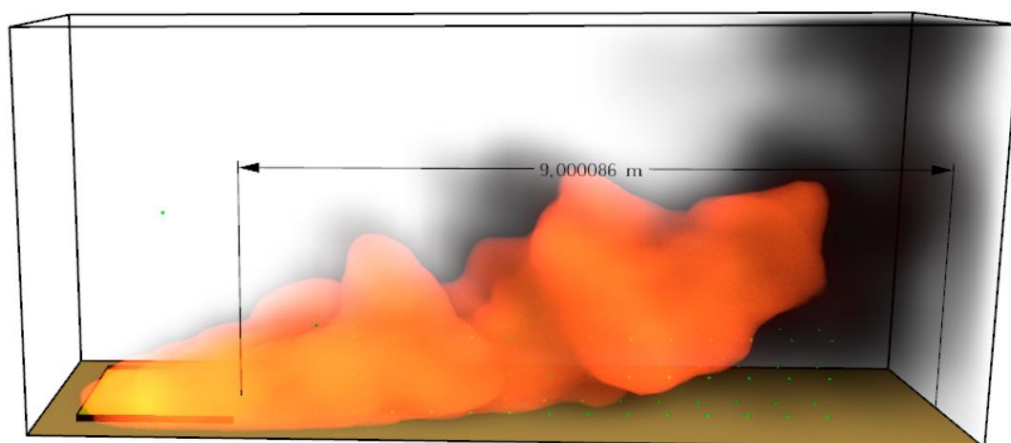
Obrázek 40 – Graf výšky plamene v porovnání s normovou hodnotou pro vysokou hustotu tepelného toku

Z grafu můžeme vidět, že výška plamene se zvyšuje současně se zvětšujícími se nádržemi. Společně s rozdílnými výškami plamenů bude také rozdílná velikost odstupových vzdáleností. Tento fakt ale normové řešení nezahrnuje ve výpočtu a uvažuje výšku plamene neměnnou i pro rozdílně velké nádrže.

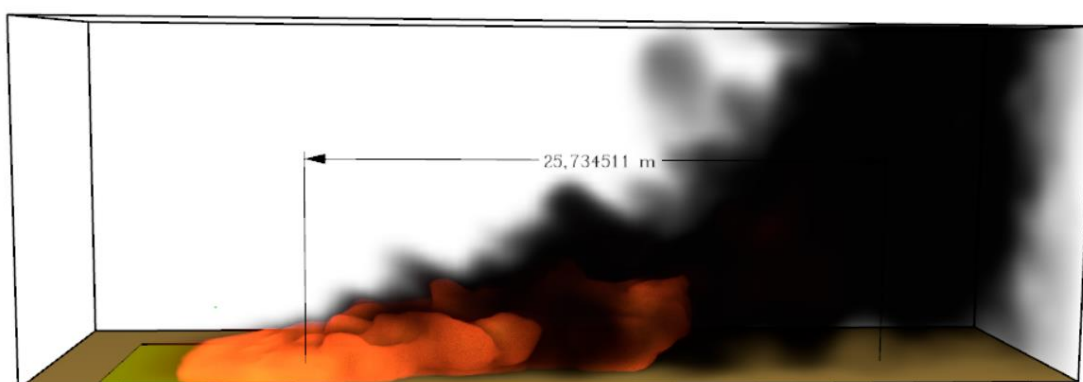
Podle grafu na obrázku č. 30 si všimněme heptanu a TOELu, kde se při zvětšování nádrží tvoří vysoký plamen, který roste úměrně k velikosti nádrže. Na druhou stranu u propanu nedochází k tvorbě vysokého plamene a kapalina hoří pouze na povrchu.

3.1.6 Výška plamene hořlavých kapalin za působení větru

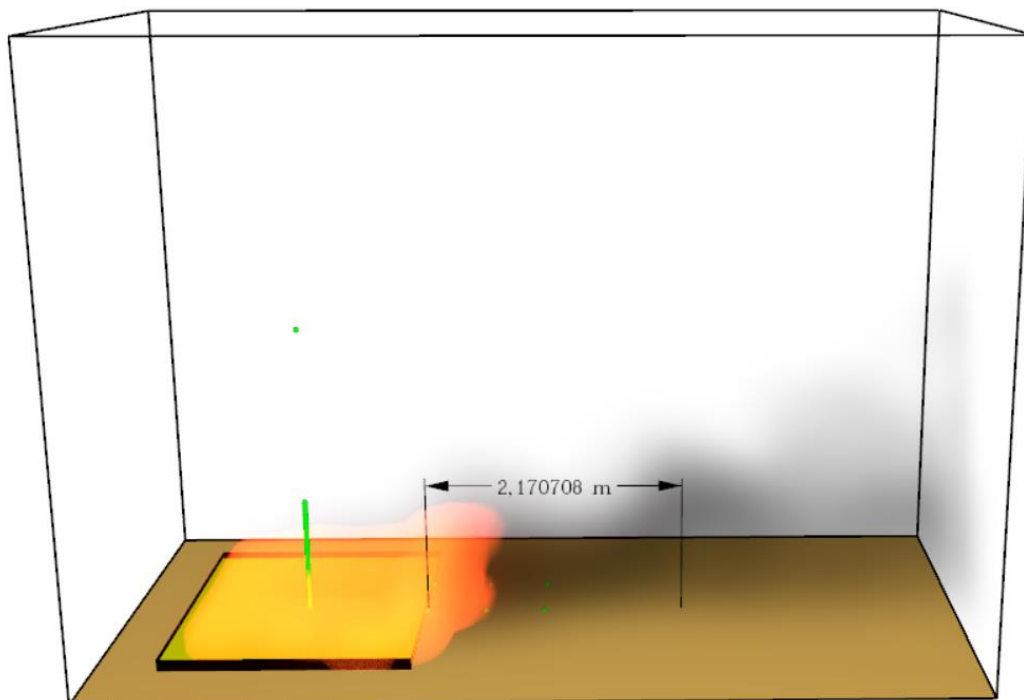
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny požáry jednotlivých kapalin za působení větru, a to vždy nejmenší a největší nádrže. Přidružené kóty byly využity k určení odstupové vzdálenosti, což je rozebráno v dalších kapitolách.



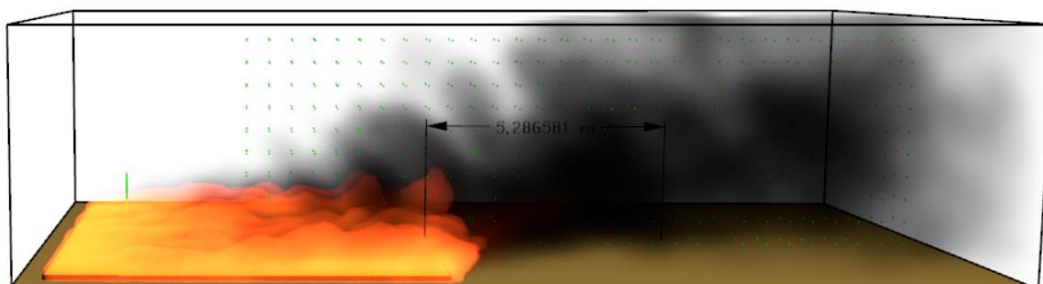
Obrázek 41 – Požár nádrže s heptanem o velikosti 2x2 m



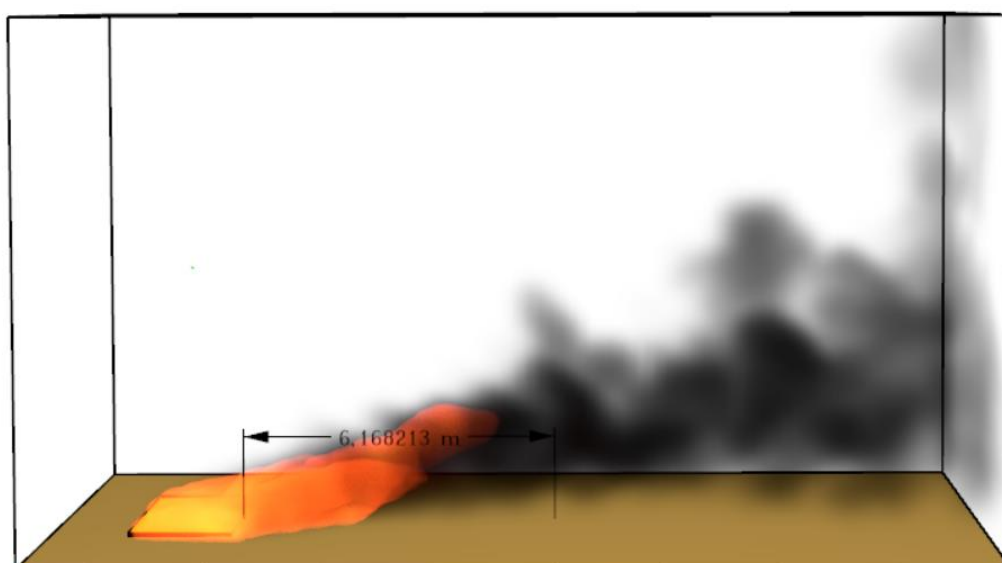
Obrázek 42 – Požár nádrže s heptanem o velikosti 8x8 m



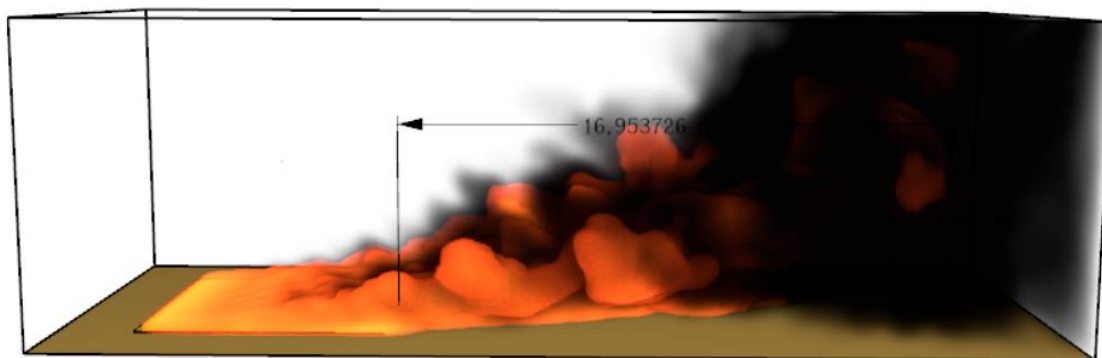
Obrázek 43 – Požár nádrže s propanem o velikosti 2x2 m



Obrázek 44 – Požár nádrže s propanem o velikosti 8x8 m

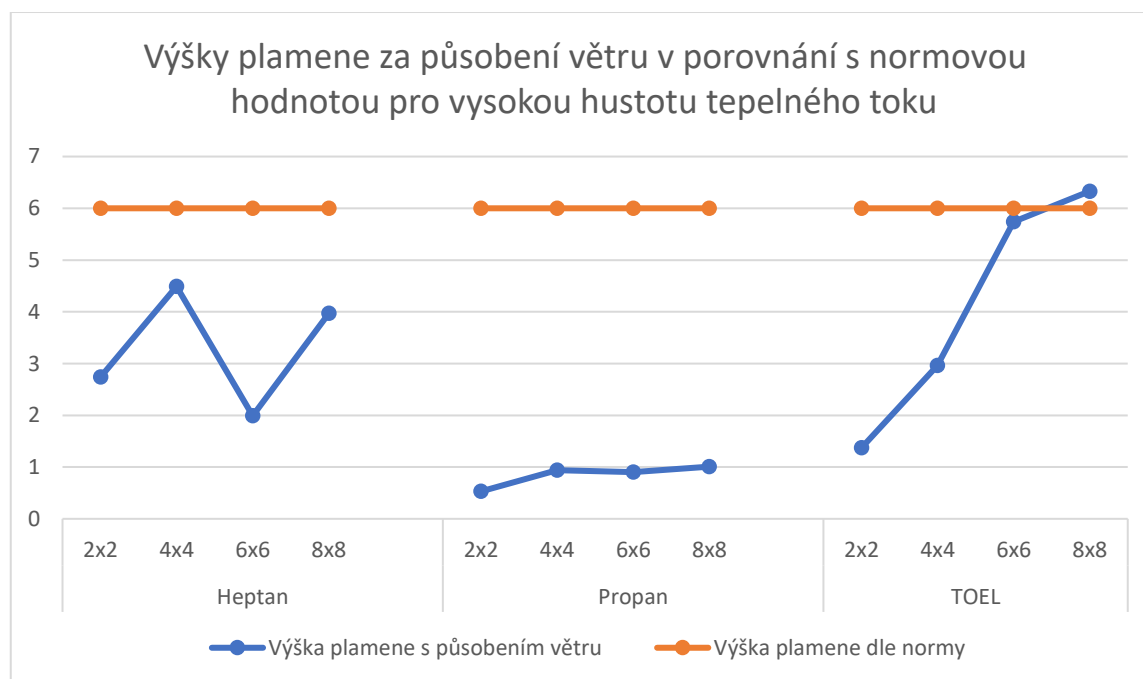


Obrázek 45 – Požár nádrže s TOELem o velikosti 2x2 m



Obrázek 46 – Požár nádrže s TOELEM o velikosti 8x8 m

Z obrázků je možné vidět, jak kapaliny za působení větru hořely. Opět nejméně hořel propan, ale na rozdíl od výpočtů, které nezahrnovaly vítr, zde plameny díky působení větru nabyly na výšce. Heptan a TOEL naproti tomu hořeli opět velmi dobře. Nejvyšší výšku plamenů měl ale tentokrát TOEL. Pro znázornění porovnání s normovou hodnotou výšky plamene pro vysokou hustotu tepelného toku byl vytvořen následující graf.

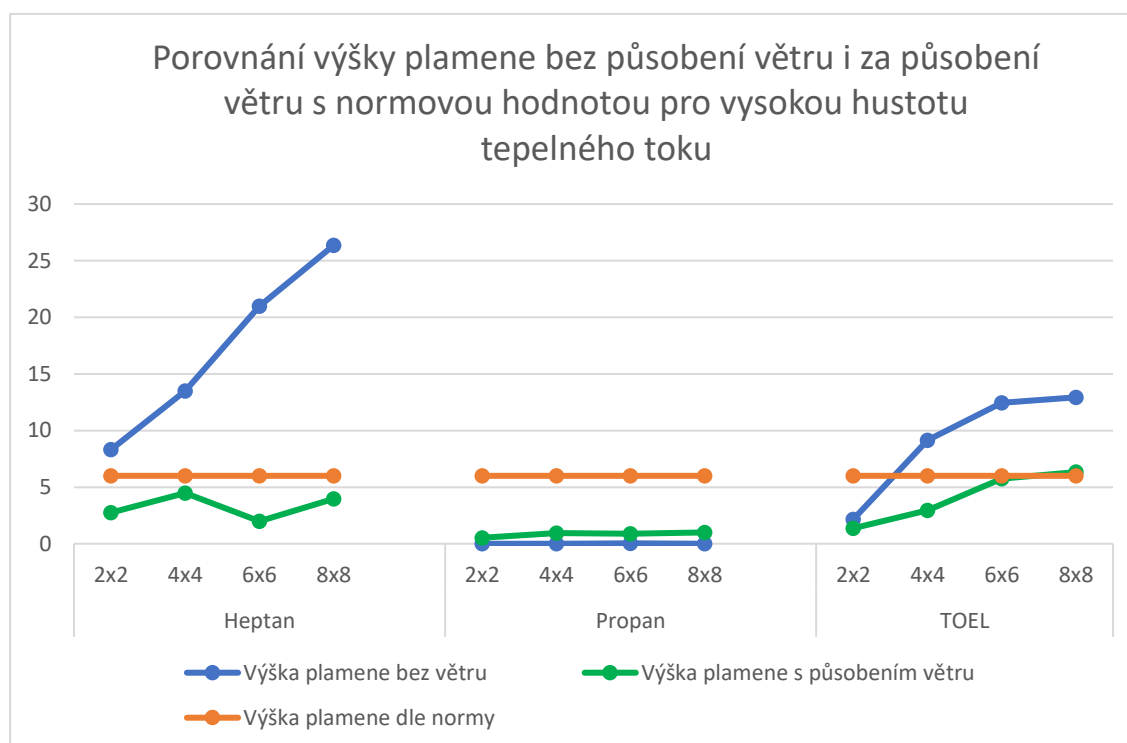


Obrázek 47 – Graf výšky plamene za působení větru v porovnání s normovou hodnotou pro vysokou hustotu tepelného toku

Výšku 6 m určenou normou v tomto případě překročil pouze TOEL, a to v modelu s největší nádrží 8x8 m. Použité hodnoty pro tvorbu grafu jsou uvedeny v Příloze 1.

3.1.7 Vyhodnocení výšky plamene v souvislosti s normovou hodnotou pro vysokou hodnotu hustoty tepelného toku

Pokud z výsledných výšek plamene ať už normových či naměřených v modelu bez i za působení větru vytvoříme graf, můžeme si všimnout, že s působením větru došlo k snížení výšky plamene u heptanu a TOELu. U propanu došlo naopak k nárůstu výšky plamene, což se dá vysvětlit tím, že požár propanu byl rozfoukáván větrem a vytvořily se tak vyšší plameny. Použité hodnoty pro tvorbu grafu jsou uvedeny v Příloze 1.



Obrázek 48 – Graf porovnání výšky plamene bez působení větru i za působení větru v porovnání s normovou hodnotou pro vysokou hustotu tepelného toku

3.1.8 Požárně nebezpečný prostor od modelovaných hořlavých kapalin

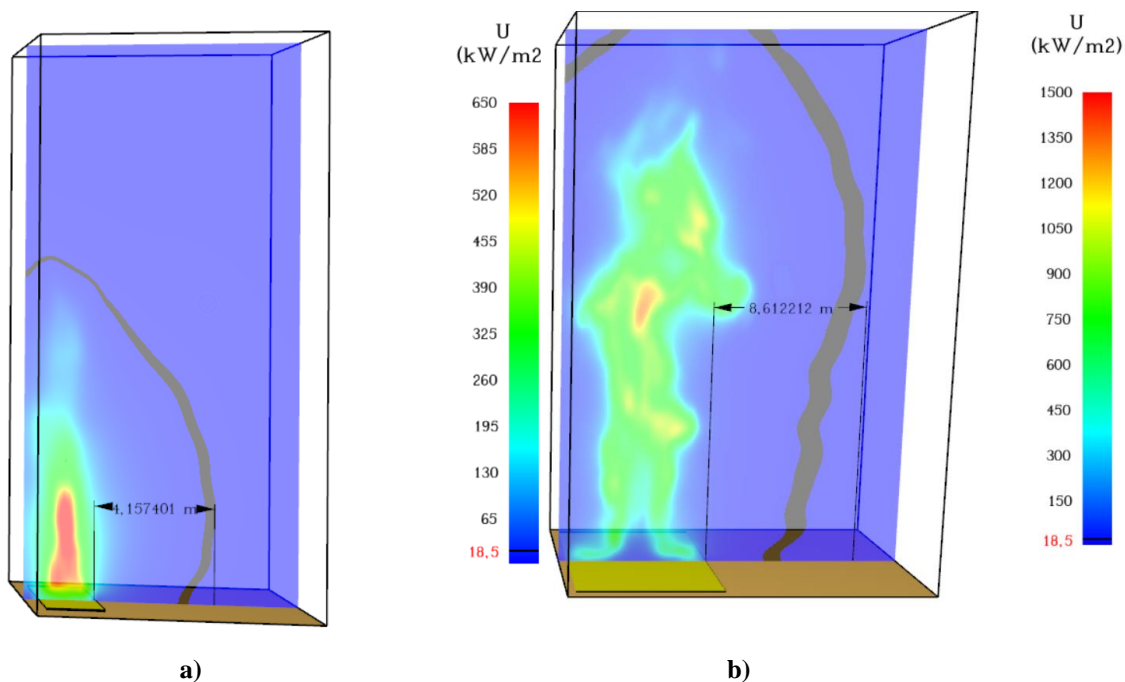
Požárně nebezpečný prostor je oblast, kde existuje riziko přenosu požáru na sousední objekt, konstrukci nebo požární úsek. Tyto vzdálenosti vymezují oblast, kde je intenzita tepelného toku na hranici natolik malá, že nedochází k šíření požáru.

Tento prostor, resp. hustota tepelného sálavého toku, přesněji její kritická hodnota $18,5 \text{ kW/m}^2$, byla sledována v jednotlivých požárních scénářích. V rámci výpočtu byl zkoumán tvar ohraničení touto hodnotou a vzdálenost od zkoušené nádrže.

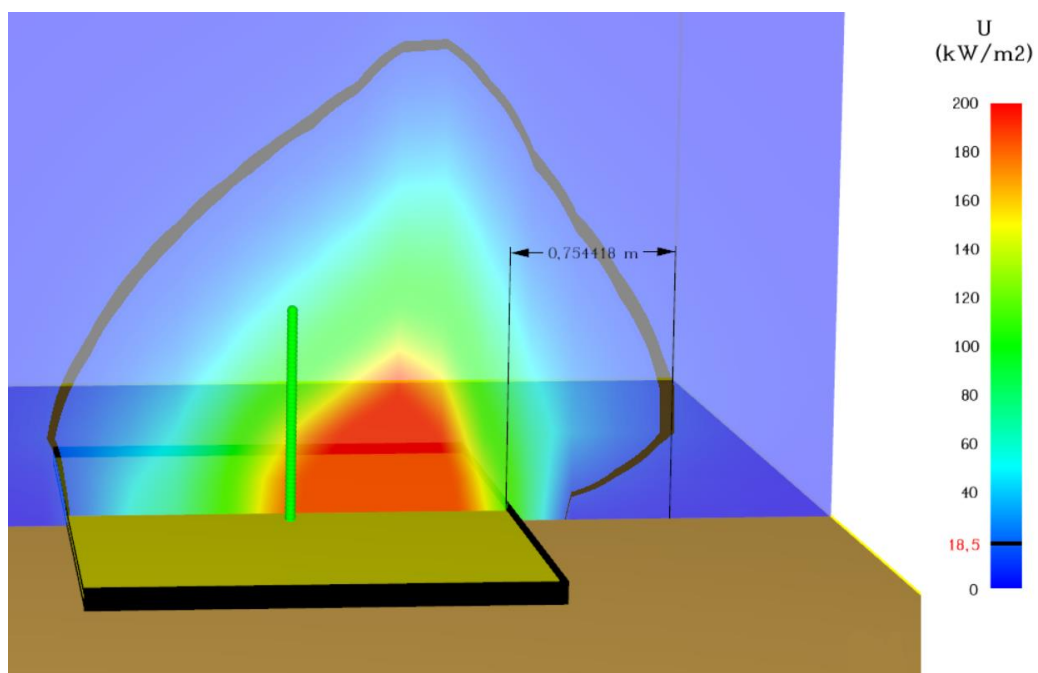
Opět byly zkoumány čtyři nádrže o rozměrech 2x2, 4x4, 6x6 a 8x8 m. V těchto nádržích byly postupně zkoumány požáry čtyř kapalin. K porovnání délky odstupové vzdálenosti byl použit program VOV – výpočet odstupových vzdáleností od sálavé plochy. [79]

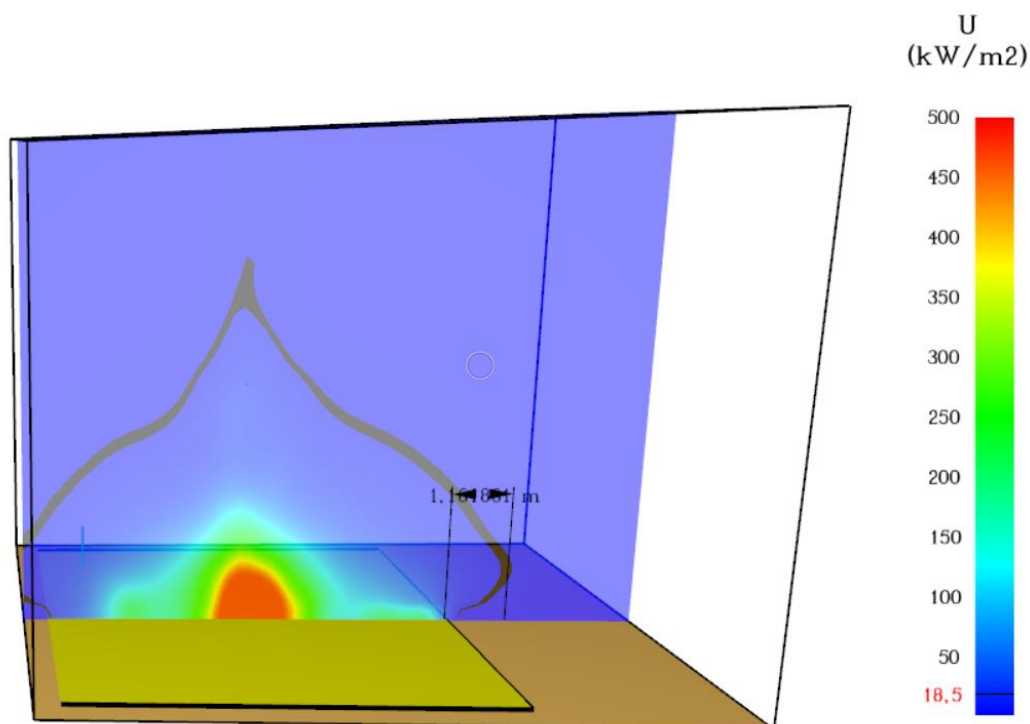
3.1.8.1 Vyhodnocení požárně nebezpečného prostoru v závislosti na české normě

Pomocí výpočtového programu PyroSim byla sledována hodnota hustoty tepelného toku $18,5 \text{ kW/m}^2$. Tato hodnota byla odměřena z výpočtového modelu a uvažovalo se s nejdelší vypočítanou a naměřenou hodnotou od zapálené nádrže. Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny některé vybrané délky požárních odstupů od jednotlivých zkoušených kapalin.



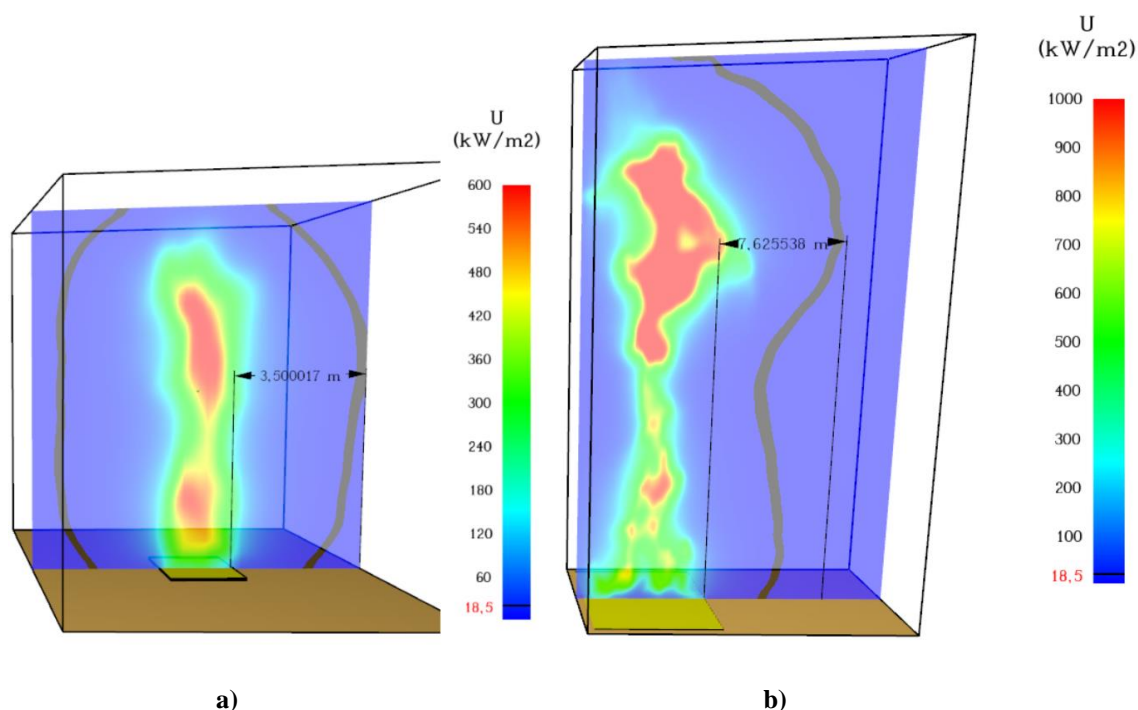
Obrázek 49 – a) Hustota tepelného toku nádrže s heptanem o velikosti 2x2 m; b) Hustota tepelného toku nádrže s heptanem o velikosti 8x8 m





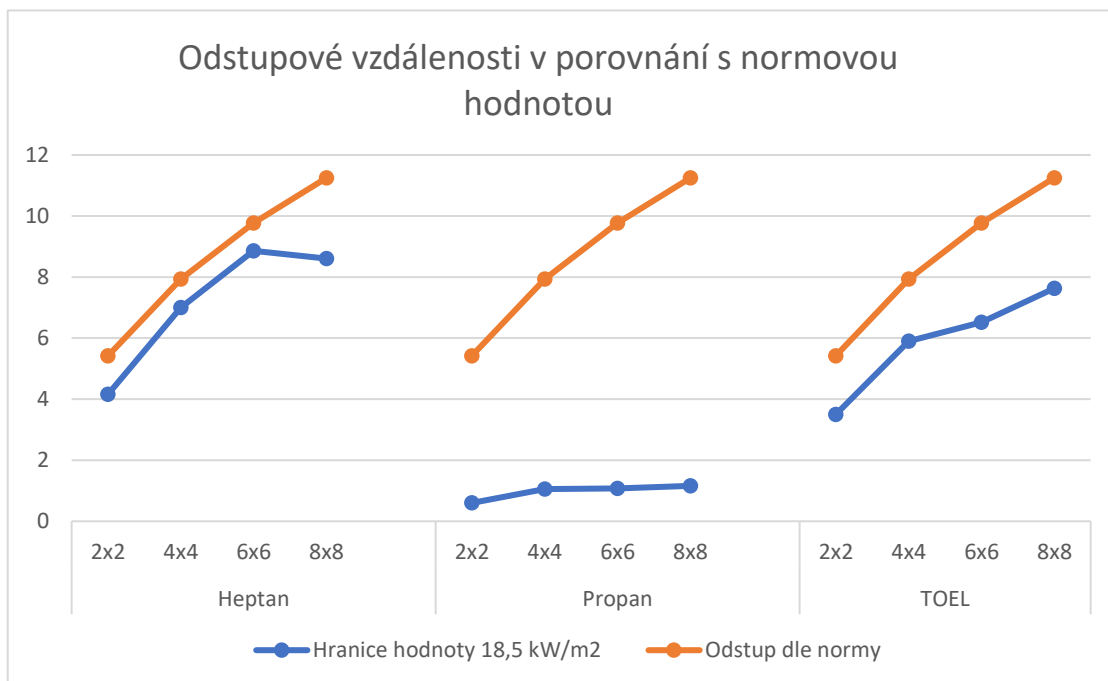
Obrázek 51 – Hustota tepelného toku nádrže s propanem o velikosti 8x8 m

Při zkoumání obrázků si můžeme všimnout rozdílné maximální hodnoty hustoty tepelného toku. Obecně platí, že menší nádrže dosahují menší maximální hustoty tepelného toku než větší nádrže.



Obrázek 52 – a) Hustota tepelného toku nádrže s TOELEM o velikosti 2x2 m; b) Hustota tepelného toku nádrže s TOELEM o velikosti 8x8 m

V následujícím grafu jsou zobrazeny nejvyšší naměřené vzdálenosti, v nichž byla naměřena kritická hodnota $18,5 \text{ kW/m}^2$ hustoty tepelného toku. Použité hodnoty pro tvorbu grafu jsou uvedeny v Příloze 1.



Obrázek 53 – Graf odstupové vzdálenosti v porovnání s normovou hodnotou

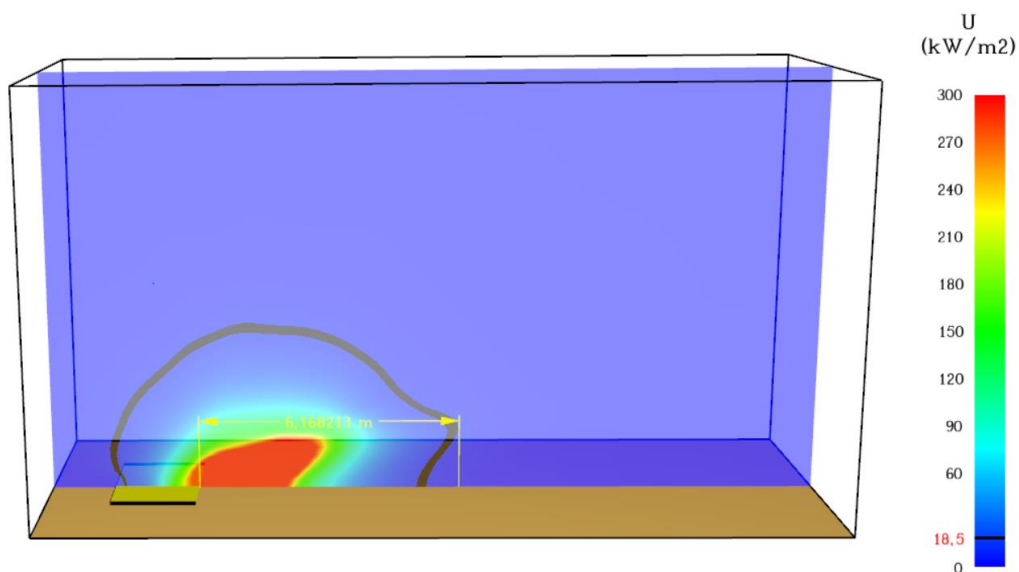
Z grafu lze vidět, že i přestože norma nezahrnuje ve výpočtu rozdílné výšky plamenů v závislosti na velikosti nádrže a uvažuje výšku plamene neměnnou, tak je výpočtová hodnota odstupové vzdálenosti na straně bezpečné. Alespoň tedy pro nádrže velikosti 2x2 m až 8x8 m s kapalinami jako jsou heptan, propan a TOEL.

3.1.9 Požárně nebezpečný prostor od modelovaných hořlavých kapalin s působením větru

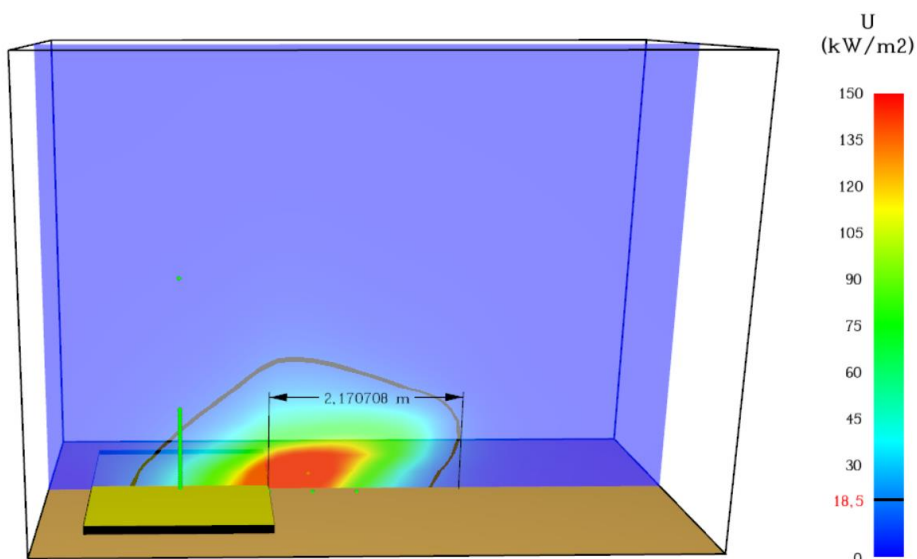
V rámci výpočtů modelů tří kapalin bylo uvažováno i s možným působením větru. Rychlost větru byla $3,75 \text{ m/s}$. Opět byla sledována hustota tepelného sálavého toku, přesněji hodnota $18,5 \text{ kW/m}^2$. Postupně byly pro vybrané kapaliny vypočítány čtyři různě velké nádrže. K porovnání délky odstupové vzdálenosti byl znovu použit program VOV – výpočet odstupových vzdáleností od sálavé plochy. [79]

3.1.9.1 Vyhodnocení požárně nebezpečného prostoru v závislosti na české normě

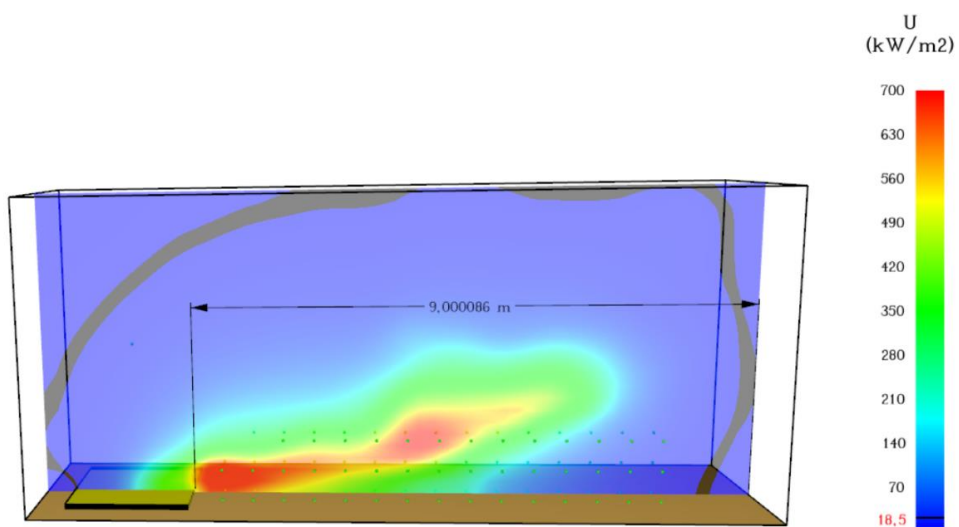
Pomocí výpočtového programu PyroSim byla sledována hodnota hustoty tepelného toku $18,5 \text{ kW/m}^2$ i s působením větru. Tato hodnota byla odměřena z výpočtového modelu a uvažovalo se s nejdelší vypočítanou a naměřenou hodnotou od zapálené nádrže. Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny některé vybrané délky požárních odstupů od jednotlivých zkoušených kapalin



Obrázek 54 – Hustota tepelného toku nádrže s heptanem o velikosti 2x2 m



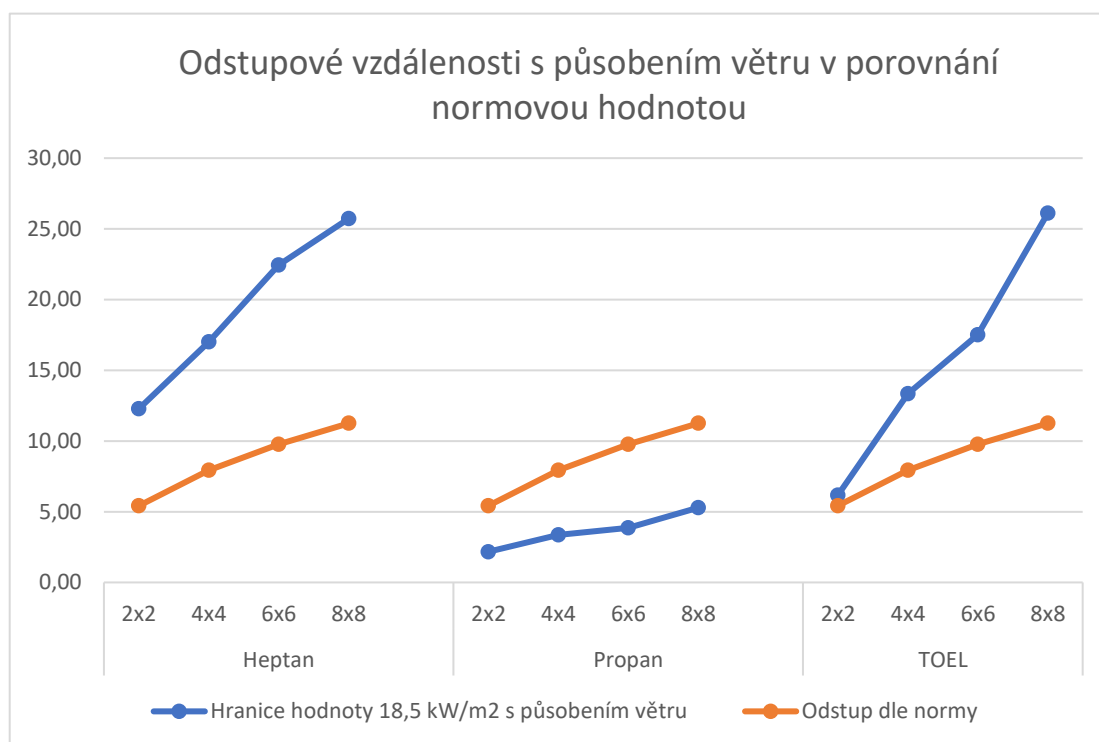
Obrázek 55 – Hustota tepelného toku nádrže s propanem o velikosti 2x2 m



Obrázek 56 – Hustota tepelného toku nádrže s TOELem o velikosti 2x2 m

Opět si můžeme z obrázků všimnout, že dochází k rozdílným maximálním hodnotám hustoty tepelného toku. To je zapříčiněno různými druhy kapalin.

V následujícím grafu můžeme vidět, jak na odstupové vzdálenosti zapůsobil vítr. Použité hodnoty pro tvorbu grafu jsou uvedeny v Příloze 1.

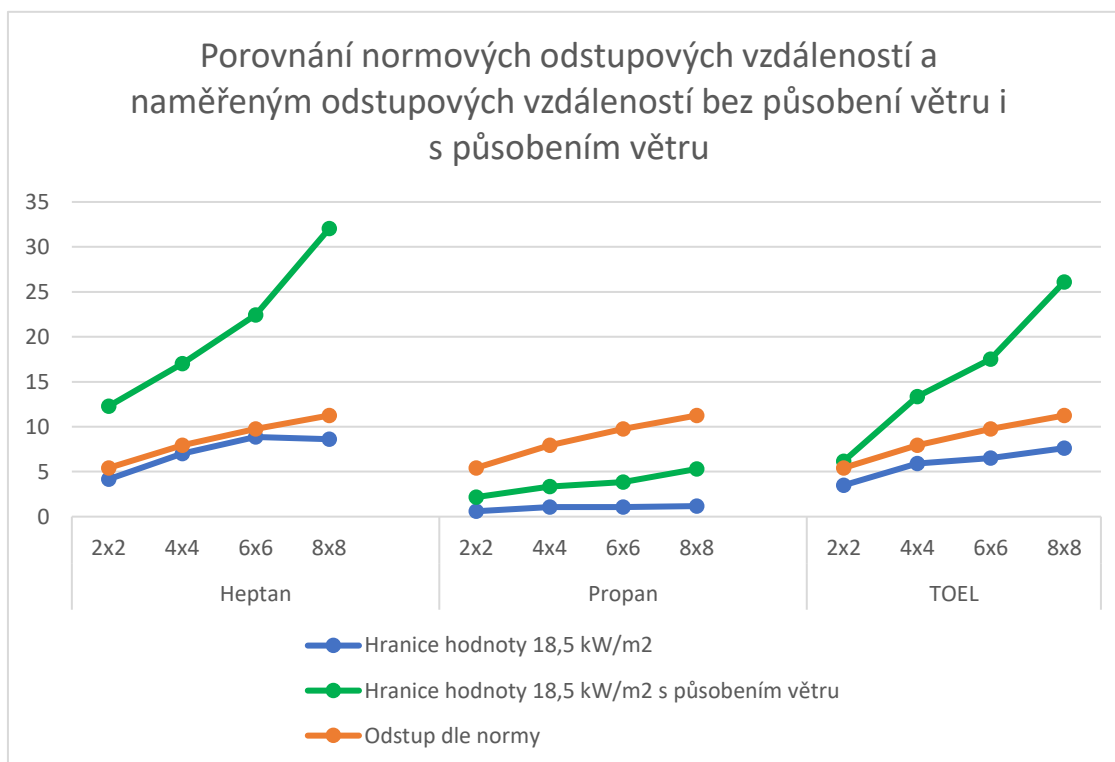


Obrázek 57 – Graf odstupové vzdálenosti v porovnání s normovou hodnotou s působení větru

Z grafu je patrné, že kromě propanu, který v porovnání s ostatními kapalinami hořel málo, se odstupová vzdálenost zvětšila a vyrostla i nad normově stanovenou hodnotu odstupu.

3.1.9.2 Vyhodnocení požárně nebezpečného prostoru v souvislosti s působením větru

Pokud z výsledných odstupových vzdáleností ať už normových či vypočtených v modelu bez i za působení větru vytvoříme graf, můžeme si všimnout, že s působením větru došlo k velkému prodloužení odstupové vzdálenosti ve směru působení větru. Největší prodloužení odstupových vzdáleností zaznamenal heptan, který také měl nejvyšší maximální hustotu tepelného toku. Při porovnání naměřené odstupové vzdálenosti s vypočtenou hodnotou dle normy vidíme, že norma již na straně bezpečné není. Použité hodnoty pro tvorbu grafu jsou uvedeny v Příloze 1.



Obrázek 58 – Graf odstupové vzdálenosti v porovnání s normovou hodnotou bez působením větru i s působením větru

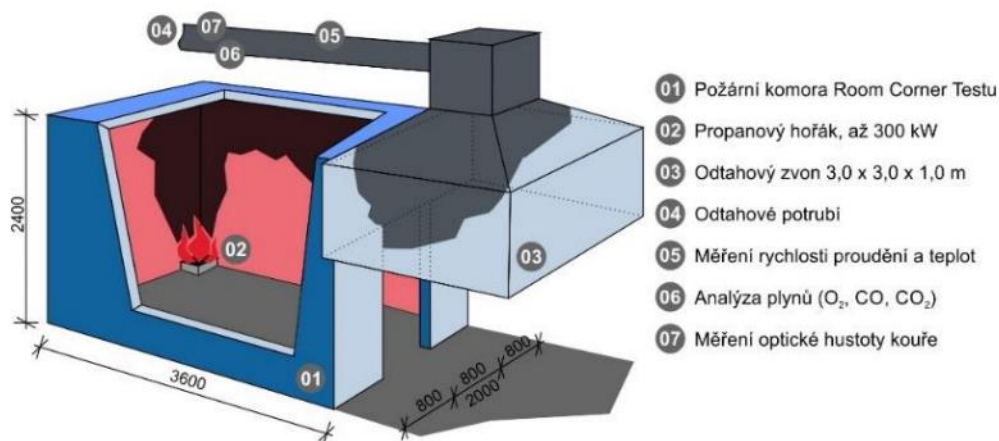
3.2 Požární zkouška

Dle konzultace s výrobcem zkoušené nádrže byla vytvořena požární zkouška odolnosti dvouplášťové plastové nádrže. Ve spolupráci s UCEEB byla použita požární zkušebna RCT.

3.2.1 Room Corner Test (RCT)

RCT je obecný termín pro postup testování chování povrchových úprav (výrobků) ve skutečném měřítku - lze vyzkoušet vzorek o ploše až 32 m². Touto metodou je možné zjistit třídu reakce na oheň zkušební vzorku. Celkově existuje několik konkrétních testovacích metodik, přičemž RCT v UCEEB splňuje svými vlastnostmi normu ISO 9705 a ČSN EN 14390. Zkušební místnost je postavena z pórobetonových prvků. Má obdélníkový půdorys o rozměrech 2,4 m x 3,6 m a výšku 2,4 m. V čelní stěně je umístěn otvor pro dveře o rozměrech 0,8 m x 2 m.

Univerzitní zařízení RCT umožňuje předpovídat náchylnost předmětů k rozvoji požáru, flashoveru a dokáže určit rychlost uvolňování tepla v čase (angl. HRR – Heat Release Rate) včetně analýzy zplodin hoření. S využitím znalosti uvolněného tepla lze stanovit např. třídu reakce na oheň zkoušeného vzorku. [80]



Obrázek 59 – Dispozice zkoušky RCT [80]

Běžně se pro zkoušky RCT používá hořící propanový hořák o výkonu až 300 kW. Tento hořák je umístěn pravém zadním rohu místnosti. V RCT místnosti na UCEEB je potom umístěn tzv. termostrom (více termočlánků rozmístěných od podlahy místnosti až po strop) v levém předním rohu místnosti – tedy úhlopříčně od propanového hořáku.

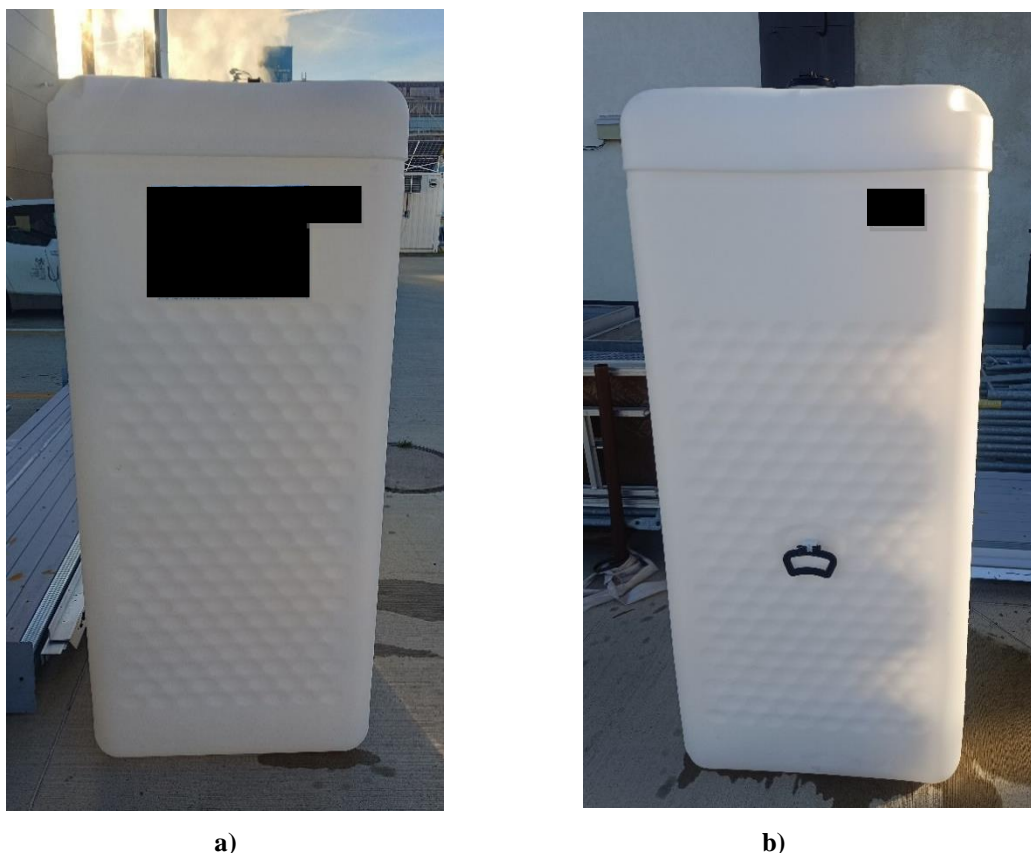
V RCT se nejčastěji pracuje s prostorovým vzplanutím místnosti neboli flashover. Tento jev v takto částečně uzavřené místnosti znamená obvykle rychlý přechod z fáze lokálního požáru do fáze plně rozvinutého požáru. Při flashoveru se tvoří tzv. akumulací vrstva zplodin, kde se hromadí zplodiny hoření. Tato vrstva zplodin je velmi horká a při jejím rozšiřování postupně dochází i k nahřívání předmětů, ke kterým tato vrstva postupně dosahuje. Povrch hořlavých předmětů se postupně dostává na zápalnou teplotu a posléze začínají hořet. Dosažení flashoveru zkouška v RCT končí.

Během flashoveru dosahuje teplota akumulací vrstvy 500 až 600 °C a její sálavý tepelný tok na podlahu je kolem 20 kW/m². Dále dochází k prošlehávání plamenů

z otvorů místnosti a hodnota rychlosti uvolňování tepla (HRR) dosahuje hodnot nad 1MW. [80]

3.2.2 Příprava požární zkoušky dvouplášťové nádrže

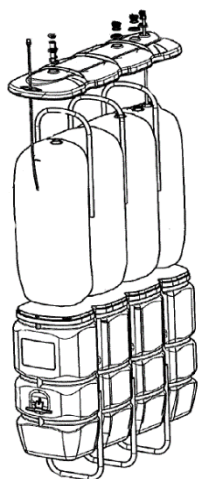
Předmětem požární zkoušky byla dvouplášťová nádrž na topný olej o velikosti 750 l. Nádrž byla vyrobena z UV-stabilního HDPE (polyethylen s vysokou hustotou). Tato nádrž byla rozložitelná pomocí víka nádrže, které bylo demontovatelné. Nádrž se tedy skládala z vnitřního pláště nádrže se čtyřmi otvory, vnějšího pláště nádrže (který sloužil jako záchytná jímka), víka a uzávěrů na otvory, kde by byly připojeny při používání armatury. Prázdná vnitřní nádoba vážila téměř 21,9 kg a tloušťka její stěny se pohybovala mezi 2,9-4 mm. Rozdílné tloušťky plastu byly způsobeny ztužením rohů a spodní podstavy nádrže. Vnější část nádrže vážila 16 kg a tloušťka plastu se pohybovala mezi 2,1-3,7 mm.



Obrázek 60 – a) Zkoušená plastová nádrž – čelní strana; b) Zkoušená plastová nádrž – boční strana



Obrázek 61 – Otvory nádrže ve vrchní části nádoby



Obrázek 62 – Rozložitelnost nádrže: a) nádrž o větší kapacitě než 750l [81], b) víko zkoušené nádrže

Nádrž byla umístěna uprostřed místnosti (viz schéma Příloha 2). Před nádrž ve vzdálenosti 10 cm byla umístěna dřevěná hranice, která sloužila jako palivo pro tuto zkoušku. Hranici tvořili dřevěné hranoly o velikostech 0,04x0,04x1,0 m a 0,04x0,04x0,25 m. Tyto hranoly byly naskládány postupně ve dvanácti vrstvách, kde se vždy střídaly tři dlouhé hranoly a jedenáct krátkých hranolů. Byly poskládány tak, aby od sebe dodržovaly stejný odstup. Celkem bylo použito 25 kg dřeva.



a)

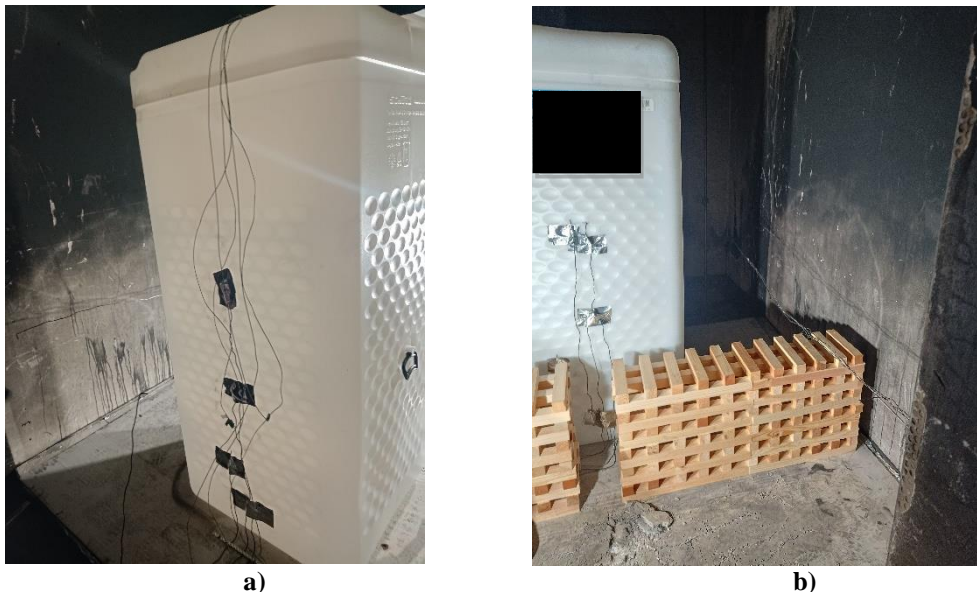


b)

Obrázek 63 – a) Zkoušená plastová nádrž – umístění v místnosti RCT; b) Umístění termočlánků na přední straně nádrže

Do nádrže a kolem nádrže bylo umístěno celkem 20 termočlánků. Dále byla využita data z termostromu, který měl termočlánky umístěny v pravém horním rohu místnosti a na stropě (viz schéma Příloha 3).

Nádrž o velikosti 750 l byla během zkoušky naplněna do poloviny vodou. Zapálení dřevěné hranice proběhlo pomocí čtyř izolačních pásů z měkkých vláken napuštěných každý 10 ml petroleje.



Obrázek 64 – a) Umístění termočlánků na zadní straně nádrže; b) Umístění dřevěné hranice

3.2.3 Průběh požární zkoušky

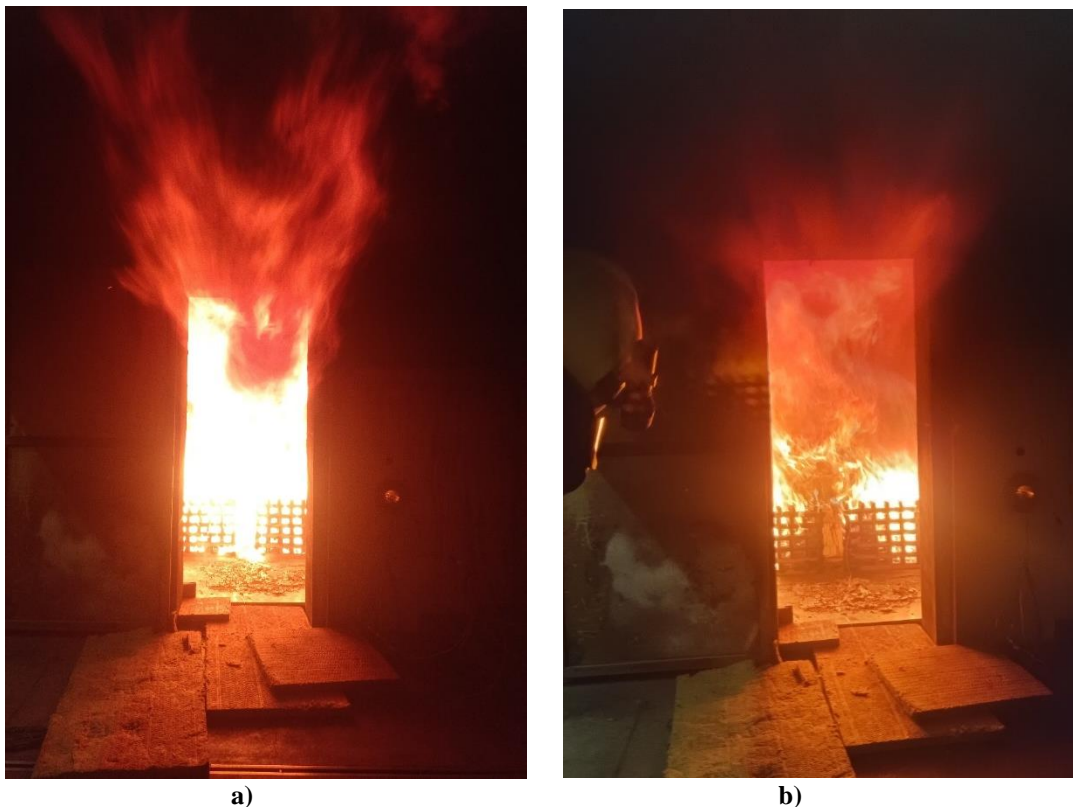
Dne 10.11.2023 byla provedena požární zkouška plastové nádrže. Po celou dobu požární zkoušky byla zaznamenávána teplota pomocí dvaceti termočlánků a termostromu. Po zapálení čtyř izolačních pásků došlo k úplnému rozhoření dřevěných hranic až v 9. minutě zkoušky. Ve dvanácté minutě byla zkouška ukončena z důvodu nárůstu teplot a téměř kompletního roztavení plastové nádrže.



Obrázek 65 – Zapálení dřevěné hranice

Nejvyšší naměřené teploty zaznamenal termočlánek č. 17, který byl umístěn v přední straně nádrže mezi dřevěnými hranicemi. Tato teplota dosahovala 880,7 °C a byla naměřena těsně před koncem požární zkoušky v 683 s.

Druhý termočlánek, který naměřil podobně vysokou teplotu byl termočlánek č. 4. Tento termočlánek naměřil hodnotu 767,7 °C v 953 s. Termočlánek č. 4 byl umístěn uvnitř nádrže pod hladinou vody. Je tedy pravděpodobné, že v době, kdy byla již zkouška ukončena a docházelo k postupnému hašení požáru, nebyl ještě ochlazen dopadající vodou.



Obrázek 66 – a) Úplné rozhoření; b) Stav hoření před uhašením

Obecně termočláanky umístěné uvnitř nádrže v prostoru se vzduchem naměřili hodnotu 100 °C v 714 s, kdy došlo k roztavení a zborcení vrchní části nádrže. Termočláanky umístěné ve vodě dosáhli 100 °C v čase 738 s. Nutno říci, že po zborcení vrchní části plastové nádrže není jasné, kde se termočláanky nadále nacházely. Před začátkem zkoušky byly totiž připevněny za vrchní část nádrže. Je možné, že teploty naměřené po zborcení vrchní části nádrže již nejsou relevantní. Termočláanky se mohli dostat mimo vodní hladinu a měřit např. teplotu roztaveného plastu.

Teplota vody před zborcením vrchní části nádrže dosahovala v průměru 30,5 °C za předpokladu, že zůstaly termočláanky č. 4 a 5 stále ponořeny.

Po zborcení nádrže začala z RCT místnosti proudit do okolí voda, která vytékala z plastové nádrže. Část vytékající vody se začala vypařovat a při kontaktu vody s plameny a rozžhaveným dřevem docházelo k výbuchům páry. Požární zkouška byla ukončena ještě před vyhořením dřevěných hranic z důvodu velmi vysokých teplot vzniklých v RCT místnosti.



Obrázek 67 – a) Stav RCT místnosti po uhašení; b) tvar nádrže druhý den po zkoušce

Po ukončení požární zkoušky se nádrž nechala vychladnout v RCT místnosti a byla odstraňována až následující den. Nádrž i přes vysokou teplotu vzniklou při požární zkoušce a přes vytékání vody při zborcení nádrže obsahovala i druhý den malé množství vody.



Obrázek 68 – Malé množství vody uvnitř nádrže

Nádrž se zmenšila vlivem teploty na třetinovou velikost. Z následující fotografie je patrné, že spodní část nádrže nebyla ohněm tolik ovlivněna. Na vrchní části nádrže je vidět, že docházelo k úplnému roztavení HDPE a následnému tečení. Vnější plášť nádrže se zcela roztavil a zůstal jen vnitřní plášť. Tato skutečnost mohla být zapříčiněna kromě přímého vlivu plamenů také větší tloušťkou vnitřního pláště.



Obrázek 69 – Stav jednotlivých plášťů plastové nádrže

3.2.4 Vyhodnocení požární zkoušky

Požární zkouška plastové nádrže dopadla dle očekávání. Část HDPE nádrže se vlivem vysokých teplot roztavila, zatímco část vnitřní nádrže ale zůstala neporušena. V době, kdy měla celá RCT místnost již pokojovou teplotu, stále obsahovala určité množství vody.

V rámci rostoucího zájmu firem a spotřebitelů o recyklovatelnost a využitelnost alternativních materiálů je možné, že se na trhu pravděpodobně objeví větší zástup nádrží z materiálů jako je HDPE. Proto je třeba těmto druhům materiálů věnovat dostatečnou pozornost a provádět další požární experimenty

4 Závěr a doporučení

Diplomová práce se zabývá modelováním hořlavých kapalin se zaměřením na kapalná paliva a obsahuje dvě hlavní kapitoly „Současný stav poznání“ a „Praktická část“.

V kapitole „Současný stav poznání“ je provedena rešerše problematiky hořlavých kapalin. Jsou zde osvětleny parametry, které ovlivňují hoření kapalin a požární technické charakteristiky hořlavých kapalin. Také je zde vysvětlen pojem plošný požár. Dále se kapitola zabývá kapalnými palivy a jejich konkrétními druhy. Dostává se také k tématu nádrží na hořlavé kapaliny a k jejich různému materiálovému řešení. V neposlední řadě jsou zde zmíněny jevy, které doprovázejí havárie nádrží na kapalná paliva jako je BLEVE a požáry uhlovodíků.

„Současný stav poznání“ se také zabývá přístupem českých technických norem k nádržím na hořlavé kapaliny a porovnává je s německými normami týkající se konkrétně skladování topného oleje pro vytápění. Dalším tématem, které je obsahem této kapitoly je téma odstupových vzdáleností v České republice a v dalších státech se zaměřením na nádrže s hořlavou kapalinou.

Kapitola „Současný stav poznání“ je zakončena druhy požárních zkoušek plastových nádrží na hořlavé kapaliny a rešerší souvisejících diplomových prací a odborných článků, které se zabývají rozléváním a hořením hořlavých kapalin.

Na tuto kapitolu navazuje kapitola „Praktická část“, která má dvě hlavní části. V první části je popisováno numerické řešení nádrže na hořlavé kapaliny. V rámci tohoto numerického řešení byly vytvořeny různé požární scénáře. Uvažovalo se se čtyřmi rozdílně velikými nádobami, které postupně obsahovaly tři kapaliny, konkrétně heptan, propan a TOEL. Pomocí programu PyroSim byl namodelován požár těchto kapalin v různě velikých nádržích a zkoumala se zde výška plamenů jednotlivých kapalin, požárně nebezpečný prostor od požáru těchto kapalin s působením i bez působení větru. Bylo zjištěno, že výšky plamenů heptanu a TOELu převyšovaly výšku plamenů uvažovanou v normě ČSN 73 0804 pro vysokou hustotu tepelného toku, která se využívá pro výpočet odstupových vzdáleností. Např. pro nádrž s heptanem o velikosti 8x8 m byla naměřena výška plamene 26,36 m. V souvislosti s tímto faktem byly vypočteny normové hodnoty odstupových vzdáleností pro jednotlivé kapaliny s konstantní hodnotou výšky plamene 6 m. Tyto hodnoty byly porovnány s naměřenými hodnotami odstupových vzdáleností dle výpočtových modelů bez působení větru. Bylo zjištěno, že pro zkoušené kapaliny byly vypočtené hodnoty odstupových vzdáleností, i přes rozdílnou výšku plamene oproti normě, na straně bezpečné. Tento fakt se ale nepotvrdil při porovnání odstupových vzdáleností vypočtených dle normy a naměřených hodnot z modelu při působení větru. Při působení větru docházelo k naklonění plamenu hořící kapaliny a prodloužení odstupové vzdálenosti ve směru větru. Tyto odstupové vzdálenosti u heptanu a TOELu byly vyšší než normově vypočtené hodnoty odstupových vzdáleností. Např. pro nádrž s heptanem o velikosti 8x8 m za působení větru byla odstupová vzdálenost naměřena na 32,03 m, což je o 20,78 m více, než je vypočtená normová hodnota.

V rámci předpokladu, že nádrže na hořlavé kapaliny nemusí být vždy umístěny v závětrí a při jejich požáru může docházet k ovlivnění délky odstupové vzdálenosti povětrnostními podmínkami, by bylo dobré s touto variantou počítat i v normovém výpočtu. Pro ověření by bylo nutné udělat analýzu dalších druhů různých nádrží a dalších druhů kapalin.

V kapitole „Praktická část“ byla také popsána požární zkouška, která byla provedena ve spolupráci s vysokoškolským ústavem UCEEB a firmami Euroheat s.r.o. a NRG GROUP a.s. Předmětem požární zkoušky byla dvouplášťová nádrž na topný olej z HDPE a v rámci této zkoušky byla provedena analýza jejího chování za požáru. Požární zkouška trvala celkem dvanáct minut a dopadla dle očekávání, kdy se plastová nádrž postupně vlivem okolního hoření částečně roztavila. Nejvíce postižený byl vnější plášť, u kterého došla téměř ke kompletnímu roztavení. Vnitřní plášť, který obsahoval do poloviny objemu vodu, zůstal částečně neroztavený. Zajímavé bylo, že i přes působení vysokých teplot v RCT místnosti a postupné unikání vody z nádrže při jejím zborcení, zůstala na dně nádrže zbytková voda. Nádrž tedy nebyla celkově porušena a došlo pouze k roztavení vnějšího pláště a části vnitřního pláště plastové nádrže.

Doporučením do praxe je prakticky přezkoumat stanovenou hodnotu výšky plamene v normě i v závislosti na působení větru a provést detailní analýzu pro případné zapracování této analýzy do normy.

Na diplomovou práci lze navázat například dalšími požárními zkouškami materiálů různých nádrží na hořlavé kapaliny.

Literatura

- [1] FOJTÍK, Roman. *Hořlavé kapaliny - provozovny a sklady, plnění a stáčení, výdejní čerpací stanice* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://pozarniochrana.netstranky.cz/temata/35-horlave-kapaliny-provozovny-a.html>
- [2] DIVIŠOVÁ, Bc Daniela. *CHARAKTERISTIKA POŽÁRU HOŘLAVÝCH KAPALIN NA OHRANIČENÉ PLOŠE*. Praha, 2018. České vysoké učení technické v Praze.
- [3] DOLEŽAL, Zdeněk. *Preventivní opatření proti nebezpečným vlastnostem hořlavých kapalin*. 1964. vyd. Praha: Československý svaz požární ochrany, nedatováno.
- [4] KVARČÁK, Miloš. *Základy požární ochrany*. 2005. vyd. nedatováno. ISBN 80-86634-76-0.
- [5] NAKOS, James. *Description of heat flux measurement methods used in hydrocarbon and propellant fuel fires at Sandia*. [online]. SAND2010-7062, 1005030. 2010 [vid. 2023-12-19]. Dostupné z: doi:10.2172/1005030
- [6] *Hořlavé a vysoce hořlavé látky. Rozdíly, bod vzplanutí a vznícení | CRDR* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.bozp.cz/aktuality/horlave-a-vysoce-horlave-latky/>
- [7] *ČSN 65 0201 - Hořlavé kapaliny - Prostory pro výrobu, skladování a manipulaci*. B.m.: Český normalizační institut. 2003
- [8] RŮŽIČKA, František. *Požární taktika - Základy požární taktiky - Rozdělení hořlavých látek a jejich požárně technické charakteristiky*. B.m.: MV-ŘEDITELSTVÍ HASIČSKÉHO ZÁCHRANNÉHO SBORU ČR
- [9] KARLSSON, Björn a James G. QUINTIERE. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2000. Environmental and energy engineering series. ISBN 978-0-8493-1300-4.
- [10] *HSE Offshore: Fire and Explosion Strategy - Pool Fires* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.hse.gov.uk/offshore/strategy/pool.htm>
- [11] BŮŽEK, Bc Tomáš. *ANALÝZA SÁLAVÉHO TOKU PŘI POŽÁRU HOŘLAVÝCH KAPALIN*. Praha, 2020. České vysoké učení technické v Praze.
- [12] VALI, Alireza, David NOBES a Larry KOSTIUK. Transport phenomena within the liquid phase of a laboratory-scale circular methanol pool fire. *Combustion and Flame* [online]. 2014, **161**, 1076–1084. Dostupné z: doi:10.1016/j.combustflame.2013.09.028
- [13] DUSHYANT MADHAV CHAUDHARI. *APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) TO STUDY LIQUEFIED NATURAL GAS (LNG) POOL FIRES*. Texas, 2016. Texas A&M University.

- [14] INCROPERA, Frank P., David P. DEWITT, Theodore L. BERGMAN a Adrienne S. LAVINE, ed. *Fundamentals of heat and mass transfer*. 6. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2007. ISBN 978-0-471-45728-2.
- [15] DRYSDALE, Dougal. *An introduction to fire dynamics*. 3rd ed. Chichester, West Sussex: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-31903-1.
- [16] CHEN, Yuhang, Jun FANG, Xiaolei ZHANG, Yanli MIAO, Yujie LIN, Ran TU a Longhua HU. Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2023, **95**, 101070. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2022.101070
- [17] RAJ, Phani K. Large hydrocarbon fuel pool fires: Physical characteristics and thermal emission variations with height. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2007, **140**(1–2), 280–292. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2006.08.057
- [18] *Liquid_fuels* [online]. [vid. 2023-12-29]. Dostupné z: https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Liquid_fuels.html
- [19] BLAŽEK, Josef. *Základy zpracování a využití ropy*. B.m.: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 978-80-7080-619-7.
- [20] NEJEZCHLEB, Radek. *SPALOVÁNÍ KAPALNÝCH PALIV Z OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ*. Brno, 2011. Vysoké učení technické v Brně.
- [21] SAJDL, Ing Jan a PH.D. Letecký petrolej. *autolexicon.net* [online]. 14. duben 2011 [vid. 2023-12-29]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/letecky-petrolej/>
- [22] Čína *N-heptan 99 procent farmaceutické kvality Výrobci, dodavatelé, továrna – levná cena N-heptan 99 procent farmaceutická kvalita – Sirloong Chemical* [online]. [vid. 2023-12-29]. Dostupné z: <https://cz.sirloonggroup.com/alkane/heptane/n-heptane-99-pharmaceutical-grade.html>
- [23] *Bezpečnostní list n-Heptan* [online]. B.m.: Carl Roth. 2016. Dostupné z: <https://www.carlroth.com/medias/SDB-T174-CZ-CS.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0c3wzMTE3MzN8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oYmEvaGE5LzkwNjEyOTE2ODc5NjYucGRmDAyMmZmNjNiY2U0M2ZmMjZkNTUyYzgwZmVlMTE3NGY3ZWRjMDE2ZTkyNGlZnzc1OTcwMzg5YTg2NWNhYjMyZDM>
- [24] *Alternative Fuels Data Center: Propane Basics* [online]. [vid. 2023-12-29]. Dostupné z: https://afdc.energy.gov/fuels/propane_basics.html
- [25] DEAGAN, Tim. *Make: Fire: The Art and Science of Working with Propane*. B.m.: Maker Media, Inc., 2016. ISBN 978-1-68045-083-5.
- [26] Zkapalněný propan jako zdroj tepelné energie pro vytápění a přípravu teplé vody a jeho uhlíková stopa. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-12-29]. Dostupné

- z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-plynem/21043-zkapalneny-propan-jako-zdroj-tepelne-energie-pro-vytapani-a-pripravu-teple-vody-a-jeho-uhlikova-stopa>
- [27] Vytápíme kapalnými palivy. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-12-29]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-kapalnymi-palivy>
- [28] VRÁBLÍK, Aleš, Nikola BRINGLEROVÁ, Jose M. HIDALGO a Radek ČERNÝ. Aktuální využití a hodnocení topných olejů. 2016, **2016**(110).
- [29] [HTTPS://WWW.FACEBOOK.COM/TZBINFO](https://www.facebook.com/tzbinfo). Vytápění domácností topným olejem jako příležitost ke zvýšení ochrany životního prostředí. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/21415-vytapani-domacnosti-topnym-olejem-jako-prilezitost-ke-zvyseni-ochrany-zivotniho-prostredi>
- [30] *ORLEN Unipetrol RPA* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.orlenunipetrolrpa.cz/CS/NabidkaProduktu/rafinerske-produkty/PohonneHmoty/Jine/Stranky/TOEL-ETO.aspx>
- [31] [HTTPS://WWW.FACEBOOK.COM/TZBINFO](https://www.facebook.com/tzbinfo). Vytápění extralehkým topným olejem (I) - bezpečné uskladnění paliva. *TZB-info* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-kapalnymi-palivy/22680-vytapani-extralehkym-topnym-olejem-i-bezpecne-uskladneni-paliva>
- [32] Vytápění topným olejem | silmetoil.cz. *Silmet | automatické a bezpečné vytápění a ohřev teplé vody*. [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.silmetvytapani.cz/>
- [33] MINISTERSTVO VNITRA – GENERÁLNÍ ŘEDITELSTVÍ HASIČSKÉHO ZÁCHRANNÉHO SBORU ČESKÉ REPUBLIKY. *Bojový řád jednotek požární ochrany - taktické postupy zásahu: Požáry hořlavých kapalin v nadzemních nádržích*. B.m.: Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. 30. listopad 2017
- [34] WEISEROVÁ, Helena a Martin BENÝŠEK. Modelování požáru hořlavých kapalin se zaměřením na kapalná paliva. In: *Recenzovaný sborník abstraktů*. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s., nedatováno, s. 87–89. ISBN 978-80-7385-267-2.
- [35] Fuel Containment Vessels. *Del Zotto Precast Concrete* [online]. [vid. 2023-12-26]. Dostupné z: <https://delzottoprecastconcrete.com/product/fuel-containment-vessels/>
- [36] CONVAULT. *ConVault - Above Ground Liquid Storage Solutions* [online]. B.m.: Oldcastle Precast. Dostupné z: <http://convault.com/content/pdfs/convault-brochure-v91913.pdf>
- [37] Steel Tanks vs. Plastic Tanks. *Tuffa Tanks* [online]. 7. prosinec 2022 [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.tuffa.co.uk/steel-tanks-vs-plastic-tanks/>
- [38] VLNWFLOGIN. The Ultimate Guide To Domestic Oil Tanks. *NWF Fuels* [online]. 8. listopad 2022 [vid. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://www.nwffuels.co.uk/the-ultimate-guide-to-oil-tanks/>

- [39] *DENIOS: Vše pro skladování nebezpečných látek* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.denios.cz/>
- [40] *Hliníkové palivové nádrže - JS-truckparts.cz* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.js-truckparts.cz/hlinikove-nadrze/>
- [41] *Aluminium Transport Diesel Tanks: Aluminium Transport Diesel Tank 333 Liters* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.eurodieseltank.com/products/transport-diesel-tanks/aluminium-transport-diesel-tanks/aluminium-transport-diesel-tank-333-liters-detail.html>
- [42] *Titanium & Zirconium Tank and Drum Fabrication / Titanium Fabrication Corp.* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.tifab.com/fabricated-products/pressure-vessels/tanks-and-drums/>
- [43] *Technické informace monel* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.heyman.cz/monel-informace>
- [44] *Monel Storage Tank Manufacturer in Mumbai, India* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.tinita.in/monel-alloy-400-k500-storage-tank-manufacturer-exporters.html>
- [45] *Inconel* [online]. 2023 [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inconel&oldid=1186978188>
- [46] *Inconel Storage Tank Manufacturer in Mumbai, India* [online]. [vid. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://www.tinita.in/inconel-alloy-600-601-625-800-825-storage-tank-manufacturer-exporters.html>
- [47] *Heating oil tanks approvals testing* [online]. [vid. 2023-04-03]. Dostupné z: <https://fueltank.store/heating-oil-tanks-approvals-testing>
- [48] *Nádrže SCHÜTZ* [online]. [vid. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://www.horaky-gfe.cz/produkty/nadrze-schutz>
- [49] *TLAKinfo: TECHNICKÉ POŽADAVKY NA VÝROBU PLASTOVÝCH NÁDRŽÍ A NÁDOB* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.tlakinfor.com/t.py?t=2&i=1953>
- [50] *Fiberglass Tanks* [online]. [vid. 2023-12-28]. Dostupné z: <https://www.protank.com/fiberglass-tanks>
- [51] *Nádrž na naftu. OlioBest.cz* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: https://www.oliobest.cz/nadrze-na-naftu/71-nadrz-na-naftu-a-olej-1000-l.html?gclid=CjwKCAjwzuqgBhAcEiwAdj5dRjx6j7zE8egcNKXXXGcepVxARoaeYst6SbuM_jUNU7QpYraCVt0CtRoCkZ0QAvD_BwE
- [52] WANG, Jiyun, Mingyan WANG, Xiaoyang YU, Ruowen ZONG a Shouxiang LU. Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. 2022, **159**, 1203–1214. ISSN 09575820. Dostupné z: doi:10.1016/j.psep.2022.01.047

- [53] TOPIN. BLEVE – výbuch expandujících par vroucí kapaliny. *TOPIN* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <http://www.topin.cz//clanky/bleve-vybuch-expandujicich-par-vrouci-kapaliny-detail-10784>
- [54] Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion| Industrial safety review. *INDUSTRIAL SAFETY REVIEW | Fire Industry Magazine | Safety Magazine India | Security Magazine India | Life Safety Magazine | Occupational Health Safety Magazine* [online]. 11. leden 2020 [vid. 2023-12-29]. Dostupné z: <https://www.isrmag.com/understanding-managing-boiling-liquid-expanding-vapour-explosion/>
- [55] Hydrocarbon. *EAPFP* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://eapfp.com/hydrocarbon/>
- [56] MUNOZ, M, J ARNALDOS, J CASAL a E PLANAS. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. *Combustion and Flame* [online]. 2004, **139**(3), 263–277. ISSN 00102180. Dostupné z: [doi:10.1016/j.combustflame.2004.09.001](https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2004.09.001)
- [57] INFO@AION.CZ, AION CS-. 246/2001 Sb. Vyhláška o požární prevenci. *Zákony pro lidi* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-246>
- [58] *REVOsax Landesrecht Sachsen - Sächsische Feuerungsverordnung – SächsFeuVO* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.revosax.sachsen.de/vorschrift/9613-Saechsische-Feuerungsverordnung#p11>
- [59] *FeuV: Feuerungsverordnung (FeuV) Vom 11. November 2007 (GVBl. S. 800) BayRS 2132-1-3-B (§§ 1–15) - Bürgerservice* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayFeuV2008>
- [60] REICHEL, Vladimír. *Navrhování požární bezpečnosti výrobních objektů - Zabraňujeme škodám*. 17. vyd. Praha: Česká státní pojišťovna, nedatováno.
- [61] HOŠEK, Zdeněk. Požární bezpečnost ve výstavbě. In: . Ministerstvo vnitra - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR. 2007.
- [62] ČSN 73 0802 - *Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2020
- [63] READ, R. E. H. *External fire spread: building separation and boundary distances*. B.m.: Fire Research Station, Building Research Establishment, 1991. ISBN 978-0-85125-465-4.
- [64] GREAT BRITAIN, BUILDING REGULATIONS 2010, GREAT BRITAIN A DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT. *Building regulations 2010. Approved document B. Approved document B.* [online]. 2019. vyd. nedatováno. ISBN 978-1-85946-915-6. Dostupné z: <https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/atta>

chment_data/file/832631/Approved_Document_B__fire_safety__volume_1_-_2019_edition.pdf

- [65] CARLSSON, Emil. *EXTERNAL FIRE SPREAD TO ADJOINING BUILDINGS - A review of fire safety design guidance and related research*. 1999. vyd. B.m.: Lund: Brandteknik, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, nedatováno.
- [66] Technische Regeln für Gefahrstoffe Lagern von flüssigen und festen Gefahrstoffe... | Schriften. *arbeitssicherheit.de* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.arbeitssicherheit.de/schriften/dokument/0%3A7240935%2C10.html>
- [67] PÖTZSCH, Sina, Simone KRÜGER, Christian SKLORZ, Jörg BORCH, Thilo HILSE a Frank OTREMBA. The fire resistance of lightweight composite tanks depending on fire protection systems. *Fire Safety Journal* [online]. 2018, **100**, 118–127. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:10.1016/j.firesaf.2018.08.007
- [68] UNITED NATIONS. *Agreement Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions* [online]. B.m.: UNITED NATIONS. 2012. Dostupné z: <https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/2013/R034r2e.pdf>
- [69] *ISO 10093:2020(en), Plastics — Fire tests — Standard ignition sources* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:10093:ed-3:v1:en>
- [70] *ISO 10840:2008(en), Plastics — Guidance for the use of standard fire tests* [online]. [vid. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10840:ed-2:v1:en>
- [71] BENFER, Matthew E, John L Bryan PROFESSOR a James G QUINTIERE. *SPILL AND BURNING BEHAVIOR OF FLAMMABLE LIQUIDS*. nedatováno.
- [72] ONDRUŠÍK, Bc Daniel. *Hašení požáru vybraných typů hořlavých kapalin vodní mlhou*. Ostrava, 2018. Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava.
- [73] HUMLÍČEK, Bc Aleš. *Stanovení rychlosti uvolňování tepla u hořlavých kapalin*. Ostrava, 2020. Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava.
- [74] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Grafy s průběhem průměrné rychlosti větru na AKS ČHMÚ* [online]. [vid. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/PR/grafy/vitr-lnk.html>
- [75] ÚSTAV FYZIKY ATMOSFÉRY AV ČR, V. V. I. (ÚFA). *Větrné podmínky ve výšce 10 m, podmínky pro malé větrné elektrárny* [online]. [vid. 2023-12-11]. Dostupné z: <http://vitr.ufa.cas.cz/male-vte/>
- [76] PYROSIM. *PyroSim User Manual* [online]. [vid. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2023-2/user-manual/>

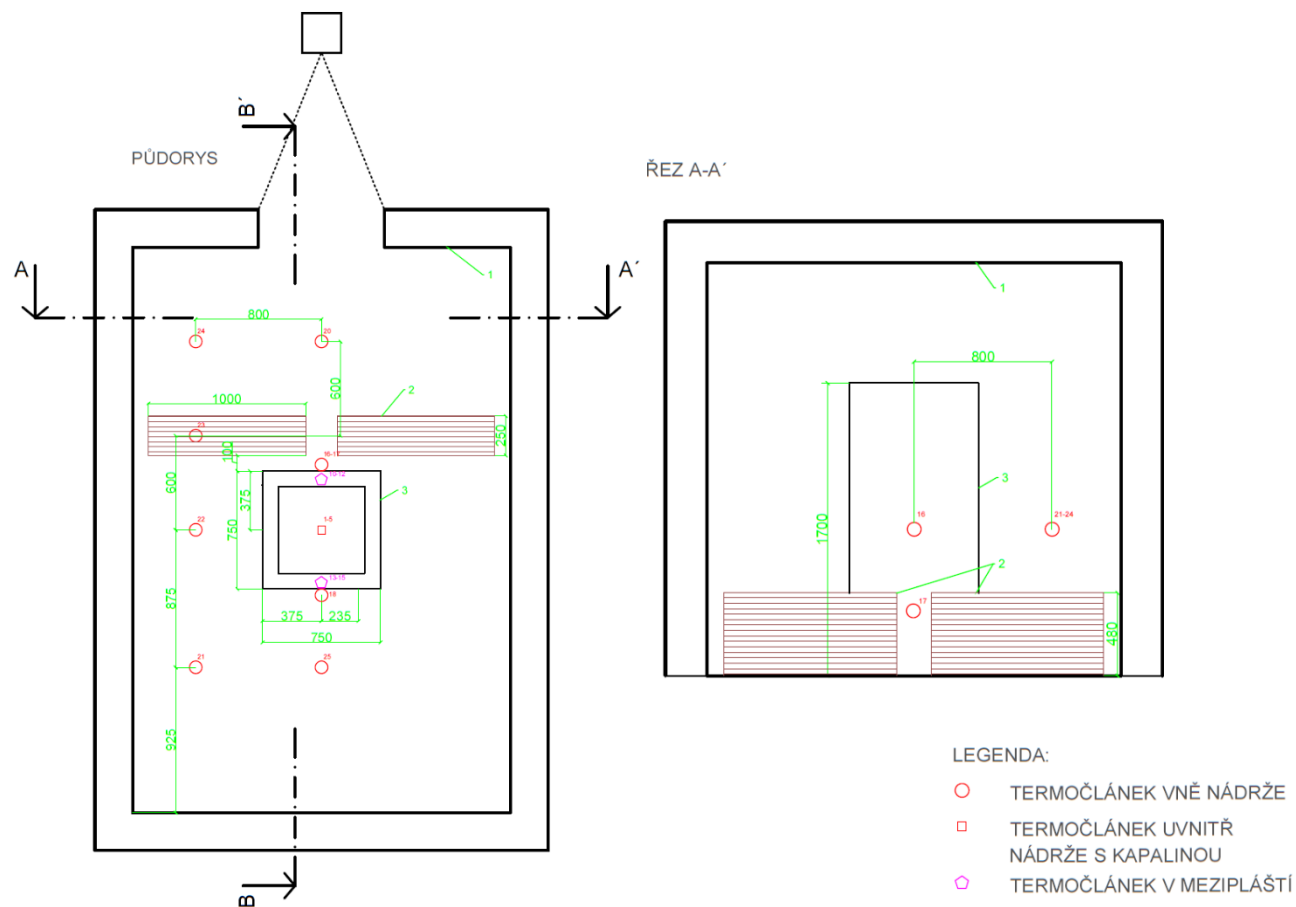
- [77] BOLES, Michael A. a Yunus A. Cengel DR. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. B.m.: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-339817-4.
- [78] ČSN 73 0804 - *Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty*. B.m.: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2023
- [79] ŠREFAN, Radek a Martin BENÝŠEK. *VOV - Výpočet odstupových vzdáleností* [online]. [vid. 2023-12-11]. Dostupné z: <https://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/vov/vov.cz.html>
- [80] POKORNÝ, Marek, Petr HEJTMÁNEK a Hana NAJMANOVÁ. VIRTUÁLNÍ CFD MODEL PRO ROOM CORNER TEST. In: *Architektura a interakce budov s životním prostředím, UCEEB, ČVUT, Buštěhrad*. 2015.
- [81] DEUTCHES INSTITUT FÜR BAUTECHNIK. *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung*. B.m.: DIBt. 2020

Příloha 1 – Tabulkové hodnoty odstupových vzdáleností a výšek plamenů

Druh kapaliny	Velikost nádrže [m]	Hranice hodnoty 18,5 kW/m ² [m]	Odstup dle normy [m]	Hranice hodnoty 18,5 kW/m ² s působením větru [m]	Odstup dle normy [m]	Výška plamene bez větru [m]	Výška plamene dle normy [m]	Výška plamene s působením větru [m]
Heptan	2x2	4,16	5,42	12,29	5,42	8,31	6	2,74
	4x4	7,00	7,94	17,00	7,94	13,51	6	4,49
	6x6	8,86	9,77	22,44	9,77	20,99	6	1,99
	8x8	8,61	11,25	32,03	11,25	26,36	6	3,97
Propan	2x2	0,6	5,42	2,17	5,42	0	6	0,53
	4x4	1,05	7,94	3,35	7,94	0	6	0,94
	6x6	1,08	9,77	3,85	9,77	0,04	6	0,9
	8x8	1,16	11,25	5,29	11,25	0	6	1,01
TOEL	2x2	3,5	5,42	6,17	5,42	2,16	6	1,37
	4x4	5,9	7,94	13,35	7,94	9,15	6	2,96
	6x6	6,52	9,77	17,5	9,77	12,45	6	5,74
	8x8	7,63	11,25	26,1	11,25	12,93	6	6,33

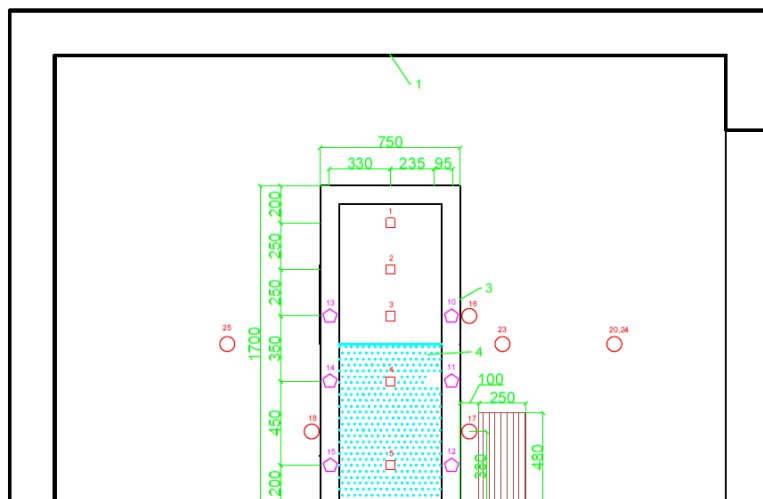
Příloha 2 – Schéma požární zkoušky

SCHÉMA POŽÁRNÍ ZKOUŠKY



POZN.: PRO ZAPÁLENÍ POUŽITY ČTYŘI IZOLAČNÍ PÁSY Z MĚKKÝCH VLÁKEN, KAŽDÝ NAPUŠTĚNÝ 10 ml PETROLEJE UMÍSTĚNÉ V PROTILEHLÝCH MÍSTĚCH HRANICE.

ŘEZ B-B'

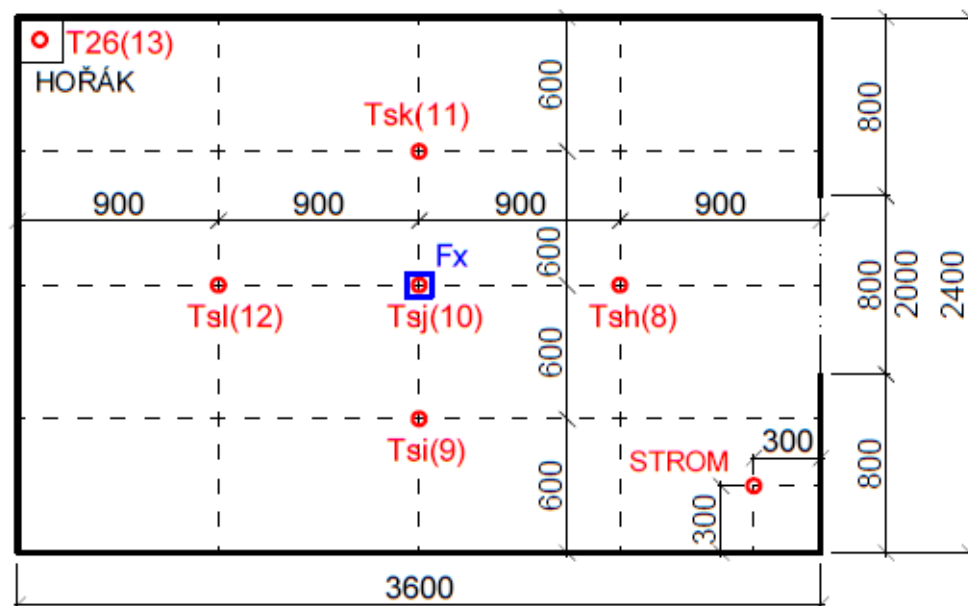


- KAMERA/TERMOKAMERA
- 1 MÍSTNOST RCT
- 2 HRANICE Z KLIMATIZOVANÉHO SMRKOVÉHO DŘEVA (PRŮŘEZ 4x4 cm), 25 kg
- 3 PLASTOVÁ NÁDRŽ SCHÜTZ O OBJEMU 750 l
- 4 VODA POKOJOVÉ TEPLoty

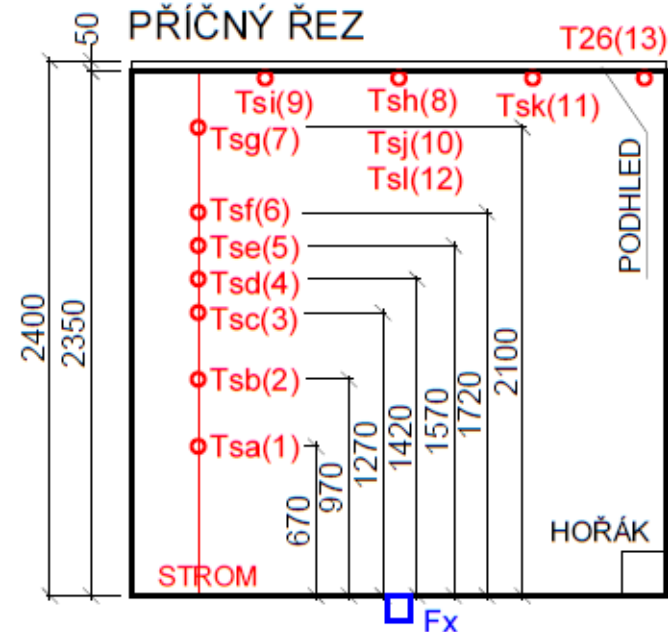
Příloha 3 – Umístění termostromu v místnosti RCT

UMÍSTĚNÍ TERMoeLEKTRICKÝCH ČLÁNKŮ A RADIOMETRU DLE ISO 9705-1:2016

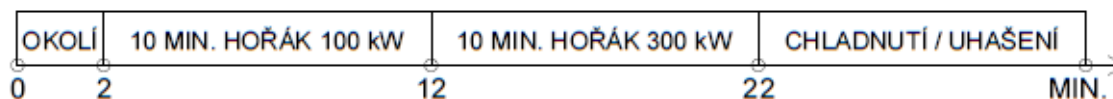
PŮDORYS



PŘÍČNÝ ŘEZ



ČASOVÁ OSA POŽÁRNÍ ZKOUŠKY



LEGENDA

T = TERMoeLEKTRICKÝ ČLÁNEK
 Tsa-Tsl, T26 = OZNAČENÍ NA ÚSTŘEDNĚ
 (1)-(13) = OZNAČENÍ VE SVORKOVNICI
 Fx = RADIOMETR