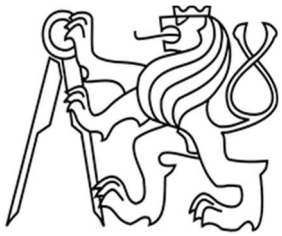
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Integrální bezpečnost staveb

Diplomová práce

TOXICKÉ ZPLODINY HOŘENÍ PŘI NEDOSTATEČNÉM PŘÍSUNU VZDUCHU

TOXIC FIRE EFFLUENTS IN UNDERVENTILATED CONDITIONS

Bc. Lenka Hadingerová

vedoucí práce: doc. Ing. Vladimír Mózer, Ph.D.

2023

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hadingerová Jméno: Lenka Osobní číslo: 477132

Zadávající katedra: Katedra konstrukcí pozemních staveb

Studijní program: Integrální bezpečnost staveb

Studijní obor/specializace: -

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Toxické zplodiny hoření při nedostatečném přísunu vzduchu

Název diplomové práce anglicky: Toxic fire effluents in underventilated conditions

Pokyny pro vypracování:
1/ Rozbor současného stavu problematiky v oblasti zplodin hoření a jejich toxických efektů
2/ Identifikace materiálové skladby relevantních zařizovacích předmětů ve stavbách
3/ Návrh a konstrukce zažízení pro simulaci podmínek hoření při nedostatečném přísunu vzduchu
4/ Realizace experimentů, analýza naměřených dat a vyvození závěrů
5/ Doporučení pro navazující výzkum

Seznam doporučené literatury:
Harper, C. Handbook of Building Materials for Fire Protection
Troitzch, J. Plastics Flammability Handbook
Apte, V. Flammability Testing of Materials Used in Construction, Transport and Mining
Hull, R., Stec, A. Fire Toxicity

Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Vladimír Mózer, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 26.9.2022 Termín odevzdání DP v IS KOS: 9.1.2023
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Lenka Hadingerová

Název diplomové práce: Toxické zplodiny hoření při nedostatečném přísunu vzduchu

Základní část: K124 podíl: 100 %

Formulace úkolů:

1/ Rozbor současného stavu problematiky v oblasti zplodin hoření a jejich toxických efektů
2/ Identifikace materiálové skladby relevantních zařizovacích předmětů v stavbách
3/ Návrh a konstrukce zařízení pro simulaci podmínek hoření při nedostatečném přísunu vzduchu
4/ Realizace experimentů, analýza naměřených dat a vyvození závěrů
5/ Doporučení pro navazující výzkum

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

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

2. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

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

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

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

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

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

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

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci na téma „Toxické zplodiny hoření při nedostatečném přísunu vzduchu“ vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a za pomoci odborných konzultací s doc. Ing. Vladimírem Mózerem, Ph.D.

V Praze dne ----------

Bc. Lenka Hadingerová

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vladimíru Mózerovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a cenné připomínky při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat mé rodině a nejbližším za podporu po celou dobu studia.

Obsah

Obsah **7**
Seznam obrázků **9**
Seznam tabulek **11**
Abstrakt **12**
Abstract **12**
Seznam použitých zkratek **13**
1 Úvod **15**
1.1 Motivace 15
1.2 Stanovení výzkumné otázky 15
1.3 Cíle práce 15
2 Materiály **16**
2.1 Plasty 16
2.1.1 Polyuretan (PU) 17
2.1.2 Polyethylen (PE) 20
2.1.2.2 Hoření, zplodiny hoření 20
2.1.3 Polypropylen (PP) 21
2.1.4 Akrylonitril-butadien-styren (ABS) 22
2.1.5 Polyvinylchlorid (PVC) 22
2.2 Dřevo a kompozity na bázi dřeva 23
2.2.1 Chemické a fyzikální vlastnosti 25
2.2.2 Tepelný rozklad a pyrolýza 26
2.2.3 Hoření, zplodiny hoření 27
3 Toxicita **28**
3.1 Úvod 28
3.2 Skupiny toxických zplodin 29
3.2.1 Dusivé plyny 30
3.2.2 Dráždivé plyny 31
3.3 Metody pro určení toxicity z pohledu smrtelnosti a nezpůsobilosti evakuace 33
3.3.1 Střední smrtelná koncentrace – lethal concentration (LC_{50}) 33
3.3.2 Dílčí efektivní dávka – fractional effective dose (FED) 33
3.3.3 Koncentrace způsobující 50% pokles frekvence dýchání – respiratory rate depression (RD_{50}) 35
3.3.4 Podobnosti a rozdíly mezi zvířecími modely a lidmi 35
3.4 Efekt toxických látek na různé části lidského organismu a jeho chování 36
3.4.1 Působení dráždivých zplodin na různé části očí a dýchacích cest 36
3.4.2 Působení strachu, pohybu a inhalace zplodin hoření na výměnu plynu v plicích 37
3.5 Dávka a koncentrace toxických látek 38

4 Praktická část – Smokebox 42
4.1 Představení experimentu a konstrukce Smokeboxu 42
4.2 První sada experimentů 45
4.2.1 První experiment 45
4.2.2 Druhý experiment 51
4.3 Druhá sada experimentů 56
4.3.1 Třetí experiment 57
4.3.2 Čtvrtý experiment 62
4.3.3 Pátý experiment 67
4.4 Diskuze a vyhodnocení 72
4.4.1 První sada experimentů 72
4.4.2 Druhá sada experimentů 76
5 Závěr 81
5.1 Doporučení pro navazující výzkum 81
Literatura 82

Seznam obrázků

Obrázek 2-1 Reakce mezi toulendiisokyanátem a polyolem [5] 17
Obrázek 2-2 Uretanová funkční skupina [6] 18
Obrázek 2-3 Pětistupňový mechanismus rozkladu flexibilní polyuretanové pěny [11, 12] 19
Obrázek 2-4 Zobecněný rozkladový mechanismus polyuretanové pěny[12] 19
Obrázek 4-1 Schématické znázornění experimentu 42
Obrázek 4-2 Zjednodušené axonometrické zobrazení Smokeboxu 43
Obrázek 4-3 Smokebox 43
Obrázek 4-4 Vnitřek Smokeboxu 44
Obrázek 4-5 Části Smokeboxu 44
Obrázek 4-6 Detaily konstrukce Smokeboxu 45
Obrázek 4-7 Matrace použitá pro první experiment 46
Obrázek 4-8 Skladba materiálů ve Smokeboxu při prvním experimentu 46
Obrázek 4-9 Experiment před zapálením – experiment 1 47
Obrázek 4-10 Pozorován průběhu hoření přes žáruvzdorné sklo – experiment 1 47
Obrázek 4-11 Vývoj kouře přibližně dvě minuty po zapálení – experiment 1 48
Obrázek 4-12 Vývoj hoření v sedmé minutě od zapálení – experiment 1 48
Obrázek 4-13 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhelnatého – experiment 1 49
Obrázek 4-14 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého – experiment 1 49
Obrázek 4-15 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 1 49
Obrázek 4-16 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 1 50
Obrázek 4-17 Graf znázorňující rychlost uvolňování tepla – experiment 1 50
Obrázek 4-18 Počáteční sestava – experiment 2 51
Obrázek 4-19 Rozvoj během první minuty po zapálení – experiment 2 51
Obrázek 4-20 Rozvoj kouře 1 minutu po zapálení – experiment 2 52
Obrázek 4-21 Rozvoj hoření v 5. minuté po zapálení – experiment 2 52
Obrázek 4-22 Rozvoj hoření v 11. minuté pozapálení – experiment 2 53
Obrázek 4-23 Graf znázorňující koncentraci oxidu uhelnatého – experiment 2 53
Obrázek 4-24 Graf znázorňující průběh koncentrací oxidu uhličitého – experiment 2 54
Obrázek 4-25 Graf znázorňující koncentraci kyanovodíku – experiment 2 54
Obrázek 4-26 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 2 54
Obrázek 4-27 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 2 55
Obrázek 4-28 Graf znázorňující křivku rychlosti uvolňování tepla – experiment 2 55
Obrázek 4-29 Matrace použité pro experimenty 3–5 56
Obrázek 4-30 Umístění termočlánků – experimenty 3, 4, 5 56
Obrázek 4-31 Průběh hoření v čase t ≤5 min po zapálení – experiment 3 57
Obrázek 4-32 Vývoj kouře a hoření v čase t=12 min – experiment 3 57
Obrázek 4-33 Vývoj kouře a hoření v čase t=16 min – experiment 3 58
Obrázek 4-34 Zbytky paliva po sundání boční stěny SB – experiment 3 58
Obrázek 4-35 Graf znázorňující průběh koncentrací oxidu uhelnatého – experiment 3 59

Obrázek 4-36 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého – experiment 3 59
Obrázek 4-37 Graf znázorňující průběh koncentrace kyanovodíku – experiment 3 60
Obrázek 4-38 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 3 60
Obrázek 4-39 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 3 60
Obrázek 4-40 Rychlost uvolňování tepla – experiment 3 61
Obrázek 4-41 Graf znázorňující průběh teplot na osazených termočláncích – experiment 3 61
Obrázek 4-42 Příprava Smokeboxu před zapálením – experiment 4 62
Obrázek 4-43 Průběh hoření během druhé minuty po zapálení 62
Obrázek 4-44 Průběh hoření – experiment 4 63
Obrázek 4-45 Zbytky paliva po sundání boční stěny – experiment 4 63
Obrázek 4-46 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhelnatého – experiment 4 64
Obrázek 4-47 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého – experiment 4 64
Obrázek 4-48 Graf znázorňující průběh koncentrace kyanovodíku – experiment 4 64
Obrázek 4-49 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 4 65
Obrázek 4-50 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 4 65
Obrázek 4-51 Graf rychlosti uvolňování tepla – experiment 4 66
Obrázek 4-52 Graf znázorňující průběh teplot zaznamenaný pomocí termočlánků – experiment 4 66
Obrázek 4-53 Příprava experiment 5 67
Obrázek 4-54 Rozvoj hoření t <1 min od zapálení – experiment 5 67
Obrázek 4-55 Průběh požáru ve 4. minutě po zapálení – experiment 5 68
Obrázek 4-56 Průběh hoření v dalších minutách – experiment 5 68
Obrázek 4-57 Průběh hoření v 9. minutě po zapálení – experiment 5 68
Obrázek 4-58 Stav po ukončeni 5. experimentu 69
Obrázek 4-59 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhelnatého – experiment 5 69
Obrázek 4-60 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého – experiment 5 70
Obrázek 4-61 Graf znázorňující průběh koncentrace kyanovodíku – experiment 5 70
Obrázek 4-62 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 5 70
Obrázek 4-63 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 5 71
Obrázek 4-64 Graf znázorňující průběch rychlosti uvolňování tepla – experiment 5 71
Obrázek 4-65 Graf znázorňující průběhy teplot na termočláncích – experiment 5 72
Obrázek 4-66 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu uhelnatého – experiment 1 73
Obrázek 4-67 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu dusného – experiment 1 73
Obrázek 4-68 Graf znázorňující celkové uvolněné množství amoniaku – experiment 1 73
Obrázek 4-69 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu uhelnatého – experiment 2 74
Obrázek 4-70 Graf znázorňující celkové uvolněné množství kyanovodíku – experiment 2 74
Obrázek 4-71 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu dusného – experiment 2 75
Obrázek 4-72 Graf znázorňující celkové uvolněné množství amoniaku – experiment 2 75
Obrázek 4-73 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhelnatého při 2. sadě experimentů 76

Obrázek 4-74 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu uhelnatého při 2. sadě experimentů 76
Obrázek 4-75 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého při 2. sadě experimentů .. 77
Obrázek 4-76 Graf znázorňující průběh koncentrace kyanovodíku při 2. sadě experimentů 78
Obrázek 4-77 Graf znázorňující celkové uvolněné množství kyanovodíku při 2. sadě experimentů 78
Obrázek 4-78 Graf znázorňující průběhy koncentrace oxidu dusného při 2. sadě experimentů .. 79
Obrázek 4-79 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu dusného při 2. sadě experimentů 79
Obrázek 4-80 Graf znázorňující průběhy koncentrace amoniaku při 2. sadě experimentů 80
Obrázek 4-81 Graf znázorňující celkové uvolněné množství amoniaku při 2. sadě experimentů 80

Seznam tabulek

Tabulka 2-1 Typické vlastnosti polyuretanu[4, 6–8] 18
Tabulka 2-2 Produkty rozkladu flexibilní polyuretanové pěny v závislosti na stupních rozkladu viz. Obrázek 2-3 [11] 19
Tabulka 2-3 Porovnání empiricky odvozených středních letálních koncentrací u myší, vystavených čichání zplodin hoření po dobu 30 minut dle bio analytické metody z DIN 53 436. Množství toxických látek bylo stanoveno v peci dle DIN 53 436 [13] 20
Tabulka 2-4 Typické vlastnosti polyethylenu [2, 3, 6, 7, 13] 20
Tabulka 2-5 Typické vlastnosti polypropylenu [2, 3, 6, 7] 21
Tabulka 2-6 Typické vlastnosti ABS [2, 3, 6] 22
Tabulka 2-7 Typické vlastnosti PVC [2, 3, 6] 23
Tabulka 2-8 Hustota zuhelnatělého dřeva [3] 26
Tabulka 2-9Typický vrchol rychlosti uvolňování tepla pro dřevěné produkty [3] 26
Tabulka 3-1 Hlavní toxické plyny v zplodinách [13, 18] 29
Tabulka 3-2 Nejčastější sledované složky zplodin hoření[13] 30
Tabulka 3-3 Běžné dráždivé organické látky vyskytující se při hoření s hodnotami IDLH[13] 32
Tabulka 3-4 Koncentrace toxických plynů vedoucí ke smrti (ISO 13344) a koncentrace znemožňující únik (ISO 13571) pro dobu expozice 30 minut [13, 19, 20] 34
Tabulka 3-5 Efekty strachu, pohybu a vdechnutých zplodin hoření na výměnu plynu v plicích [13] 38
Tabulka 3-6 Smyslové a plicní podráždění způsobené zplodinami hoření [7] 40
Tabulka 3-7 Porovnání smrtelného toxického vlivu možných zplodin hoření (při 30 minutové expozici) pro různé druhy zvířat[13, 21] 40
Tabulka 3-8 Koncentrace a dávky zhoršující podmínky úniku, způsobující neschopnost pohybu a smrtelné poškození plic [7, 13] 41
Tabulka 3-9 V současné době přijatelné hodnoty koncentrace LC_{50} pro plyny běžné ve zplodinách hoření 41

Abstrakt

Tato diplomová práce se skládá z dvou částí – teoretické a praktické. Teoretická část obsahuje literární rešerši shrnující současný stav poznání z hlediska vybraných materiálů, používaných v budovách pro bydlení, a z hlediska toxicity chemických látek, vyskytujících se ve zplodinách hoření. Jako zástupci materiálů vyskytujících se v budovách pro bydlení byli vybráni polyuretan, polyethylen, polypropylen, akrylonitril-butadien-styren, polyvinylchlorid a materiály na bázi dřeva. Pro každý z materiálů bylo vypracováno shrnutí jeho fyzikálních a chemických vlastností, problematiky hoření a zplodin hoření. Část představující toxicitu popisuje druhy toxických látek, hodnoty RD_{50}, LC_{50} a FED a jejich zjišťování, vliv toxických látek na člověka a koncentrace chemických látek. V rámci praktické části této diplomové práce bylo v zařízení Smokebox provedeno celkem pět experimentů. Při experimentech bylo sledováno hoření matrací z polyuretanové pěny za různých podmínek odvětrání. Motivací této diplomové práce je zlepšit povědomí o toxických a iritačních zplodinách, vznikajících při hoření v budovách pro bydlení a poukázat na vliv odvětrání.

Klíčová slova

Toxicita; Polyuretan; Polyethylen; Polypropylen; Polyvinylchlorid; ABS; Materiály na bázi dřeva; Zplodiny hoření; Smokebox;

Abstract

This diploma thesis consists of two parts – theoretical and experimental. Theoretical part includes a literary review summarizing the current state of knowledge in terms of selected materials used in buildings for housing, and in terms of the toxicity of chemicals in combustion products. Polyurethane, polyethylene, polypropylene, acrylonitil-butadiene-styrene, poly-vinylchloride, wood and wood-based materials were selected as representatives of materials used in residential buildings. For each of the materials, a summary of its physical and chemical properties, as well as the issue of comustion products, was prepared. The toxicity section describes the types of toxic substances, RD_{50}, LC_{50} a FED levels and their detection, the effects of toxic substances on humans and the concentration of the chemic substances. In the experimental part the Smokebox was used for five experiments. In those experiments combustion under different ventilation condicions was investigated. The motivation behind this s work is to raise awarness of the toxic and irritating fumes arising in residental buildings fires and to point out the ventilation effects on combustion and fire effluents.

Keywords

Toxicity; Polyurethane; Polyethylene; Polypropylene; Polyvinyl chloride; ABS; Wood based materials; Combustion products; Smokebox

Seznam použitých zkratek

PU	polyuretan
PUF	polyuretanová pěna
PAHs	polycyklické aromatické uhlovodíky
H_2O	voda
CO	oxid uhelnatý
CO_2	oxid uhličitý
HCl	chlorovodík
HBr	bromovodík
HCN	kyanovodík
CH_4	metan
HCHO	formadehyd
NO_x	oxidy dusíku
N_2O	oxid dusný
NO	oxid dusnatý
NO_2	oxid dusičitý
PE	polyethylen
LDPE	nízko hustotní polyethylen
HDPE	vysoko hustotní polyethylen
PP	polypropylen
ABS	akrylonitril-butadien-styren
SAN	styren-akrylonitril polymer
PVC	polyvinylchlorid
ASET	Čas dostupný pro evakuaci
RSET	Čas potřebný k evakuaci
SO_x	oxidy síry
H_2S	sulfan

SO_2	oxid siřičitý
$C_6H_5CH=CH_2$	styren
NH_3	amoniak
ppm	parts per milion
HF	fluorovodík
FED	dílčí efektivní dávka
LC_{50}	smrtelná koncentrace ovlivňující 50 % populace
IC_{50}	dráždivá (inhibující) koncentrace ovlivňující 50 % populace
RD_{50}	koncentrace způsobující 50 % pokles frekvence dýchání
LD_{50}	smrtelná dávka ovlivňující 50 % populace
RCT	Room corner test
HRR	rychlost uvolňování tepla
SB	Smokebox

1 Úvod

Tématem diplomové práce je toxicita zplodin hoření při nedostatečném přísunu vzduchu. Konkrétně je práce zaměřena na toxicitu zplodin hoření v budovách pro bydlení a ubytování, neboť právě v nich dochází nejčastěji ke vzniku požáru. Z výsledků statistické ročenky Hasičského záchranného sboru České republiky za rok 2021 vyplývá, že v budovách pro bydlení a ubytování za rok 2021 vzniklo 3469 požárů. Při nich bylo zraněno 649 osob a z toho v přímé souvislosti zemřelo 51 osob.[1]

Práce je dále rozdělena do dvou částí – teoretické a experimentální. Teoretická část představuje literární rešerši, ve které je zahrnut popis vybraných materiálů užívaných v budovách pro bydlení a ubytování. Dále je v rámci teoretické části představena problematika toxicity zplodin hoření. Experimentální část je věnována představení nového experimentálního zařízení Smokebox a realizovaným pěti experimentům.

1.1 Motivace

Motivací této diplomové práce je zlepšit povědomí o toxických a iritačních zplodinách, vyskytujících se v budovách pro bydlení a ubytování při požáru. A pomocí experimentů se pokusit zohlednit vliv odvětrání na průběh hoření a množství toxických zplodin.

1.2 Stanovení výzkumné otázky

V případě této diplomové práce lze za výzkumnou otázku považovat zjištění chemických látek ve zplodinách hoření, pokusit se vyhodnotit jejich množství a vliv faktoru odvětrání na množství toxických látek.

1.3 Cíle práce

Hlavním cílem práce je poskytnout podklady pro zjišťování příčin požárů a vyšetřování požárů z pohledu toxicity zplodin hoření v různých fázích probíhajícího požáru a možné ohrožení zasahujících i nezasahujících osob. Důležitým faktorem při zjišťování toxických produktů hoření bude přísun vzduchu.

1. Dílčí cíl jedna – Vytvořit přehled nejvíce používaných materiálů v zařizovacích předmětech budov pro bydlení a ubytování včetně jejich chemických a fyzikálních vlastností.
2. Dílčí cíl dva – Shrnutí problematiky o toxicitě a vlivu jednotlivých látek na člověka.
3. Dílčí cíl tři – Představení mezních koncentrací dusivých a dráždivých chemických látek.
4. Dílčí cíl čtyři – Představení konstrukce Smokeboxu a provedení experimentálních měření
5. Dílčí cíl pět – Vyhodnocení dat získaných experimenty

2 Materiály

Množství hořlavých materiálů v budovách se za posledních několik desetiletí výrazně zvýšilo. Hořlavé materiály lze najít například v nábytku a dalším bytovém zařízení. Nábytek a zařízení v budovách mohou představovat velké nebezpečí při požáru. Přestože stavební předpisy jsou ve většině zemí přísné, protipožární požadavky na obsah budov mohou být minimální. Výsledkem může být, že nebezpečí vznícení nábytku je mnohem větší než nebezpečí vznícení stavebních materiálů. Bytové zařízení zahrnuje všechny pohyblivé věci, jako například kuchyňské skříňky, šatní skříně, komody, stoly, gauče, židle a tak dále. Za ostatní zařízení lze považovat bytový textil nebo podlahové krytiny. Čalouněný nábytek byl identifikován jako jeden z nejvíce nebezpečných zařizovacích předmětů, a to díky snadnému vznícení a rychlému růstu požáru. Riziko, které bytové zařízení představuje je závislé na prostředí, ve kterém je umístěné. Rozhodujícími faktory ovlivňující riziko požáru jsou typ místnosti (soukromá domácnost nebo veřejný prostor), velikost prostoru (rodinný dům nebo vícepatrový bytový dům) a účel (nemocnice s nemocnými pacienty nebo kasárny s vycvičenými vojáky), ale i míra požárního zatížení. [2]

Náplň této kapitoly bude představovat přehled vybraných materiálů vyskytujících se v zařizovacích předmětech v budovách pro bydlení a ubytování. Dále pak budou řešeny fyzikální i chemické vlastnosti jednotlivých materiálů a bude nastíněna problematika hoření.

2.1 Plasty

Plasty představují velkou a rostoucí část požárního zatížení ve veřejném prostoru a v budovách pro bydlení a ubytování. Mezi nejrozšířenější plasty lze zařadit ty s nejnižší pořizovací hodnotou, které bývají velice hořlavé. [3]

Plasty a elastomery jsou komerční produkty na bázi polymerů vytvářené tak, aby získaly specifické vlastnosti pro konkrétní použití. Polymery mohou být smíchány dohromady a/nebo smíchány s přísadami, plnivy nebo výztuhami, za účelem snížení nákladů, zlepšení teplené a světelné odolnosti, zpomalení hoření, vyšší tuhosti, vyšší houževnatosti a zlepšením dalších chemických, fyzikálních či estetických vlastností. [3]

Na základě tepelné odezvy lze rozlišit tři třídy polymerů:

1. Polymery, u kterých při přetržení hlavního řetězce dojde k úplnému rozkladu (tavící se nebo termoplastické polymery)
2. Polymery, u kterých dochází k odtržení bočních fragmentů za vzniku těkavých látek a zuhelnatění
3. Zesíťované polymery, jejichž hlavním produktem rozkladu je zuhelnatění

Tepelná degradace pevných látek je prvním krokem při iniciaci a růstu požáru. Systematické studie degradace při vysokých teplotách jsou velice důležité pro předpovídání reakce stavebních výrobků a pro syntézu méně hořlavých polymerů. [2]

Hořlavost polymerů je definována na základě několika procesů a parametrů, jako například rychlost hoření (rychlost degradace pevných látek a rychlost uvolňování tepla), rychlost šíření (plamen, pyrolýza, dohoření, doutnání), charakteristiky vznícení (teplota vznícení, kritický tepelný tok pro vznícení), distribuce produktu (zejména emise toxických látek), produkce kouře apod. [2]

Spalovací procesy zuhelnatělých polymerů, vystavených v prostředí s oxidačním prouděním, mohou postupovat dvěma alternativními procesy zahrnujícími plamenné spalování a doutnání (nebo žhnoucí) spalování. Podmínky hoření plamenem jsou dosaženy, když teplo uvolňované plynnou fází spalování těkavých produktů poskytuje dostatečný tepelný tok potřebný pro degradaci

pevného paliva a šíření plamene. Když teplota nebo intenzita tepelného toku nedosahuje určité úrovně, může oxidace zuhelnatělých produktů vyústit v doutnající spalování. V případě porézních materiálů může vzduch proniknout do pevné hmoty a způsobovat pomalou oxidaci: nízká rychlost uvolňování tepla, absence významných ztrát, poskytnutí dostatečného tepelného toku potřebného pro další zuhelnatění a šíření doutnajícího hoření. V případě termoplastů jsou procesy v pevné fázi poněkud zjednodušeny, protože odpařovaní a pyrolýza jsou omezeny na tenkou vrstvu vzorku na rozhraní kondenzované fáze a plynné fáze, která kontinuálně ustupuje. [2]

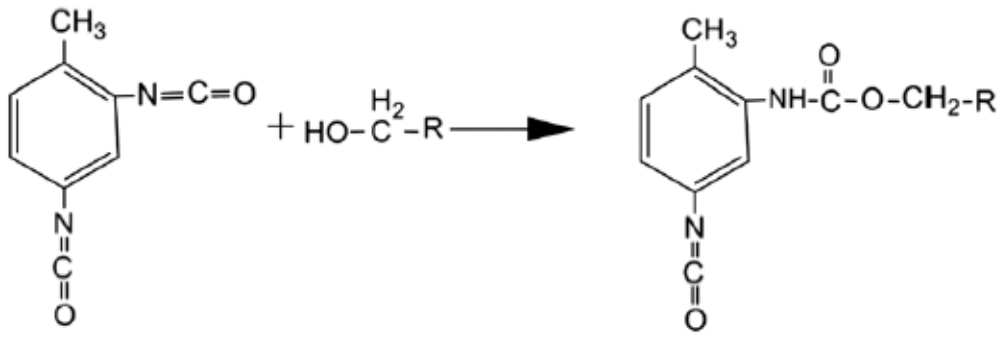
2.1.1 Polyuretan (PU)

Polyuretan lze zařadit mezi jeden z nejvýznamnějších druhů polymerů. Polyuretan je možno nalézt v řadě komerčních aplikací. Pro účely této práce bude zkoumáno jeho zastoupení v zařizovacích předmětech budov pro bydlení a ubytování. [4]

V budovách pro bydlení a ubytování převažuje polyuretan zejména v podobě flexibilně tvarovatelné pěny a pružných desek. Konkrétně je využíván v matracích, lůžkovinách, lednicích, pohovkách a v částech dalšího nábytku. [4, 5]

2.1.1.1 Chemické a fyzikální vlastnosti

Polyuretan vzniká reakcí di- nebo polyisokyanátu s materiálem s hydroxylovou skupinou. Tímto materiálem může být například polyol. Jako zástupce isokyanátů lze uvažovat například toulen diisokyanát. [2]

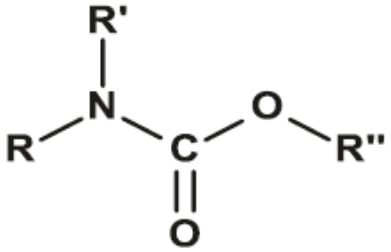


Obrázek 2-1 Reakce mezi toulendiisokyanátem a polyolem [5]

Na obrázku 2-1 je znázorněn příklad reakce mezi mezi toulen diisokyanátem a polyolem za vzniku uretanové vazby.

Polyuretan může mít chemickou strukturu termoplastů nebo termosetických polymerů. Z pohledu fyzikální struktury se může jednat o pevnou látku, elastomer nebo pěnu. Chemické složení polyuretanu může být velice rozmanité, záleží na konkrétních druzích isokyanátů a polyolů vstupujících do reakce. Díky různým chemickým i fyzikálním strukturám má polyuretan různorodé a široké použití. [4, 5]

Mezi významné benefity, které polyuretan může nabídnout, patří vysoká rázová houževnatost za nízkých teplot, snadná napěnitelnost a jeho odolnost proti odření, vzniku trhlin, oxidaci, plísním a vlhkosti. Nejvyšší udávaná doporučená teplota pro termoplastický polyuretan je přibližně 104 °C, z toho vyplývá, že polyuretan je nevhodný pro většinu aplikací za vyšších teplot.



Obrázek 2-2 Uretanová funkční skupina [6]

Tabulka 2-1 Typické vlastnosti polyuretanu[4, 6–8]

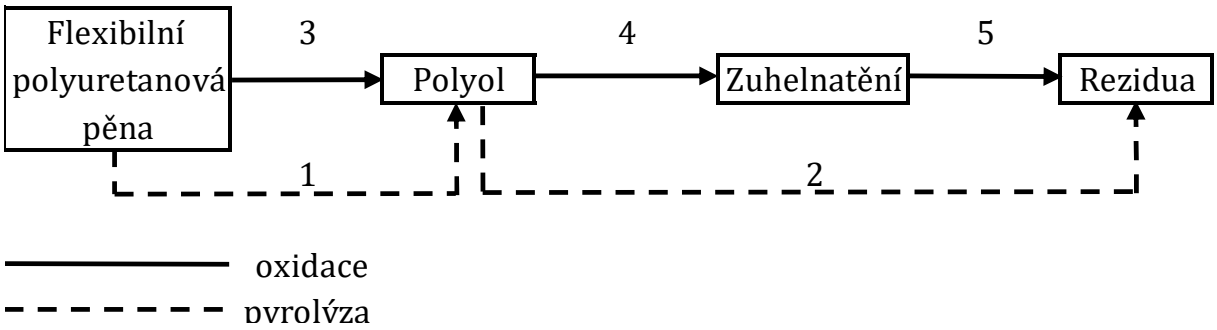
	Jednotka
Sumární vzorec	$C_{6,3}H_{7,1}NO_{2,1}$
Objemová hmotnost	0,08 $g.cm^{-3}$ (PUF)
Tepelná vodivost	0,25-0,33 $W.m^{-1}.K^{-1}$
Rozmezí teploty tání	85°-121°C
Teplota vznícení	416°C
Teplota vzplanutí	310°C
Měrná tepelná kapacita	1674,7-1884,1 $J.kg^{-1}.°C^{-1}$
Spalné teplo	21 300-26 900 kJ/kg (PUF)
Max. HRR/jednotka plochy	56,8 – 94,6 $kW.m^{-2}$

2.1.1.2 Hoření, zplodiny hoření

Největší zastoupení v zařizovacích předmětech má polyuretan ve formě flexibilní pěny.

Zplodiny hoření představují směs produktů plně zoxidovaných (CO_2), částečně zoxidovaných (CO) a aldehydů, paliva a produktů vzniklých degradací paliva, například alifatických uhlovodíků, aromatických uhlovodíků a dalších molekul plynu. Mezi molekuly plynu můžeme zařadit například halogenvodíky (HCl, HBr) a kyanovodík (HCN). [9]

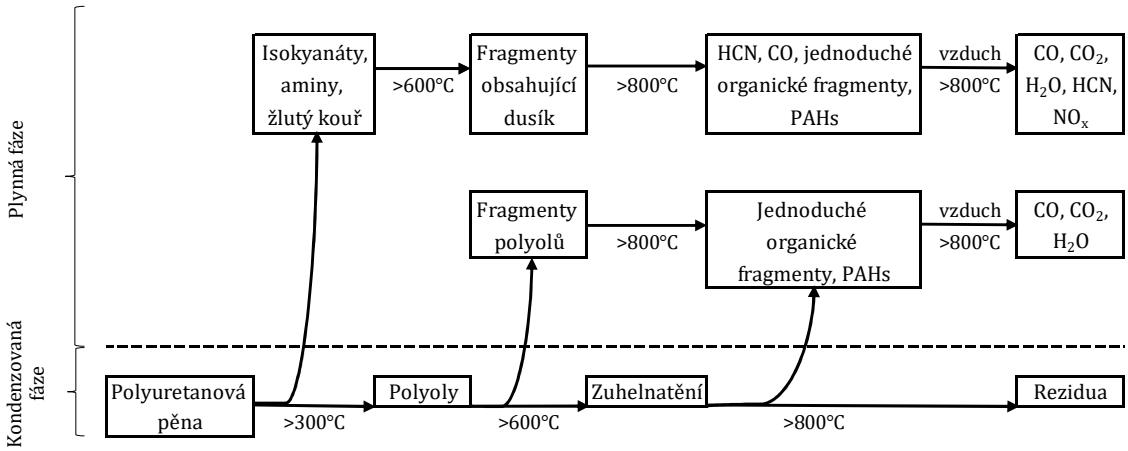
Toxické zplodiny hoření mohou být rozděleny do dvou hlavních skupin dusivé plyny a dráždivé plyny. Dusivé plyny způsobují nemožnost buněk přijímat kyslík, člověk se dostává do bezvědomí a poté umírá. Pobyt v prostředí, kde se nacházejí dráždivé plyny způsobuje neschopnost pohybu. Může docházet zejména k zasažení očí a horních dýchacích cest, při dlouhodobějšímu vystavení může dojít i k poškození plic. V obou případech se následky vystavení dusivým i dráždivým plynům odvíjí od koncentrace a době pobytu v nebezpečném prostředí. [10]



Obrázek 2-3 Pětistupňový mechanismus rozkladu flexibilní polyuretanové pěny [11, 12]

Tabulka 2-2 Produkty rozkladu flexibilní polyuretanové pěny v závislosti na stupních rozkladu viz. Obrázek 2-3 [11]

Stupeň rozkladu	Produkty plynné fáze	Produkty kondenzované fáze
1	Isokyanáty	Polyoly
2	Polyol, CH_2O, H_2O, HCN a CH_4	Pevná rezidua
3	Isokyanáty, Polyoly, HCN a CO_2	Směs polyolů a polyolových částí
4	CO, CO_2, H_2O, Polyol, CH_2O, HCN a CH_4	Zuhelnatěný zbytek
5	CO, CO_2, H_2O, HCHO, HCN, CH_4 a v malém množství Polyol	Rezidua



PAHs - polycyklické aromatické uhlovodíky

Obrázek 2-4 Zobecněný rozkladový mechanismus polyuretanové pěny[12]

V průběhu pětistupňového rozkladu se ve dvou fázích (kondenzované a plynné) uvolňují různé produkty ve zplodinách hoření. Dusivé a dráždivé plyny se uvolňují zejména v plynné fázi. Postupně se uvolňují isokyanáty, aminy, fragmenty obsahující dusík, kyanovodík, oxid uhelnatý a polycyklické aromatické uhlovodíky. Jako koncové produkty se za teplot vyšších než 800 °C uvolňují oxid uhelnatý, oxid uhličitý, vodní pára, kyanovodík a oxidy dusíku. [12]

Tabulka 2-3 Porovnání empiricky odvozených středních letálních koncentrací u myší, vystavených čichání zplodin hoření po dobu 30 minut dle bio analytické metody z DIN 53 436. Množství toxických látek bylo stanoveno v peci dle DIN 53 436 [13]

Materiál	**LC_{50} (mg/l)**			**Klíčový toxin a klíčový mechanismus**
	Empirický[1]	Vše dohromady[2]	N-plyn[3]	
Polyuretanová pěna	19	18,2	18,7	CO - asfyxie

Poznámky:
Koncentrace se vztahují k množství paliva umístěného do pece.
[1] LC_{50} vypočteno dle Rosiella [14]
[2] Hodnoty LC_{50} určeny dle ostatních publikací
[3] N-gas model publikován Levinem [15]

2.1.2 Polyethylen (PE)

Polyethylen představuje jeden z nejdůležitějších druhů polyolefinů, který je široce používán v mnohých odvětvích průmyslu. Například v součástkách používaných v televizích, elektrických konvicích a textiliích. [16]

Polyethylen lze obecně rozdělit na dva typy. První typ představuje nízko hustotní polyethylen (LDPE), mezi který se řadí vysokotlaký polyethylen, a proto se nízko hustotnímu polyethylenu také občas říká vysokotlaký polyethylen. Za druhý typ lze označit vysoko hustotní polyethylen (HDPE), který se také nazývá nízkotlaký polyethylen. [6]

2.1.2.1 Chemické a fyzikální vlastnosti

Polyethylen je termoplastický homopolymer (plastomer), který se vyrábí polymerací plynného ethylenu. Plynný ethylen lze, stejně jako kaučuky, přeměnit na elastomerní materiál přeměnou řetězce polymeru pomocí činidla. Činidlo obvykle představují organické peroxidy nebo elektronové paprsky. [2]

Tabulka 2-4 Typické vlastnosti polyethylenu [2, 3, 6, 7, 13]

	Jednotka
Sumární vzorec	C_2H_4
Teplota rozkladu	355-450 °C
Objemová hmotnost	0,91 $g.cm^{-3}$ (LDPE), 0,96 $g.cm^{-3}$(HDPE)
Tepelná vodivost	0,33 $W.m^{-1}.K^{-1}$ (LDPE), 0,45-0,52 $W.m^{-1}.K^{-1}$ (HDPE)
Rozmezí teploty tání	105-110 °C (LDPE), 130-135°C (HDPE)
Teplota vznícení	349°C
Teplota vzplanutí	341-357°C
Měrná tepelná kapacita	1550 $J.kg^{-1}.°C^{-1}$
Spalné teplo	48 000 kJ/kg (LDPE), 46 000 kJ/kg (HDPE)
Max. HRR/jednotka plochy	800 $kW.m^{-2}$ (LDPE), 1400 $kW.m^{-2}$ (HDPE)

2.1.2.2 Hoření, zplodiny hoření

Polyethylen je hořlavý, a proto vyžaduje použití retardérů hoření. Postupy, které jsou používány zahrnují například: halogenaci polymeru (chlorovaný polyethylen), přidání sloučenin obsahujících halogeny – například chlorované parafiny, použití boritanu zinečnatého. Polyetylen má tendenci při hoření produkovat poměrně málo kouře, ale některé retardéry hoření mohou způsobit větší produkci kouře. [6]

Zplodiny hoření vznikající při hoření uhlovodíkových elastomerů jsou uhlík, oxid uhelnatý, oxid uhličitý a voda. [2]

Tepelný rozklad polyethylenu probíhá náhodným štěpením řetězce, které se skládá z několika kroků. Zvýšení teploty způsobuje náhodné štěpení páteře polymeru, což vede k tvorbě a uvolňování velkého množství menších molekul a radikálů. Při vyšších teplotách dochází k tvorbě cyklických uhlovodíků. Obsah aromatických látek se zvyšuje s rostoucí teplotou. Tepelným rozkladem na vzduchu vznikají uhlovodíky a aromatické sloučeniny, částečně okysličené produkty (například aldehydy a ketony) a také hlavní produkty spalování (oxid uhelnatý, oxid uhličitý, voda apod.). [13]

2.1.3 Polypropylen (PP)

2.1.3.1 Chemické a fyzikální vlastnosti

Polypropylen je komerčně vyráběn z propylenového monomeru, buď samostatně za účelem produkce homopolymerních jakostí, anebo v kombinaci s komonomery (např. ethylen) k výrobě kopolymerních jakostí. Polypropylen má nejnižší hustotu v porovnání s ostatními hlavními komerčně dostupnými termoplasty. Dále se polypropylen vyznačuje vysokou mezí kluzu, tuhostí, výjimečnou životností v ohybu, dobrou povrchovou tvrdostí, odolností vůči většině chemických látek a vynikajícími dielektrickými vlastnostmi.[6]

Existují tři formy polypropylenu: izotaktický, syndiotaktický a ataktický. Z nichž izotaktický polypropylen je využíván pro komerční účely. Použití polypropylenu je velice široké. V případě budov pro bydlení a ubytování jej například můžeme nalézt v kobercích, nábytku, domácích potřebách, zavazadlech nebo v tvořítkách na led. [6]

Tabulka 2-5 Typické vlastnosti polypropylenu [2, 3, 6, 7]

	Jednotka
Sumární vzorec	C_3H_6
Teplota rozkladu	330-410 °C
Objemová hmotnost	0,91 $g.cm^{-3}$
Tepelná vodivost	0,10-0,22 $W.m^{-1}.K^{-1}$
Rozmezí teploty tání	160-165°C
Teplota vznícení	390°C – 410°C
Teplota vzplanutí	350°C -370°C
Měrná tepelná kapacita	1920 $J.kg^{-1}.°C^{-1}$
Spalné teplo	44 000 kJ/kg
Max. HRR/jednotka plochy*	416,13 $kW.m^{-2}$
*pro desku tl. 0,31 cm	

2.1.3.2 Hoření, zplodiny hoření

Polypropylen je hořlavý a vyžaduje úpravu retardanty hoření za účelem zpomalení hoření. Mezi používané přístupy lze zařadit: přidání sloučenin obsahujících halogen (např. chlorované parafiny), použití oxidu antimonu nebo fosforu pro zvýšení účinnosti halogenu. Použití samotného fosforu vyžaduje vysoké koncentrace. Z toho důvodu se používá v kombinaci s bromem nebo chlorem. [6]

Při hoření polypropylenu vzniká poměrně malé množství kouře, ale při použití retardantů hoření může docházet k zvýšení produkce kouře. [6]

Při rozkladu polypropylenu za přítomnosti dusíku v atmosféře bohaté na organické látky, které neobsahují kyslík, nevzniká prostředí s dráždivými zplodinami. Oproti tomu při bezplamenném oxidačním rozkladu na vzduchu, kde se vyskytují organické látky obsahující i neobsahující kyslík, vzniká značně dráždivé prostředí. Při vyšších teplotách a plamenném hoření dochází ke vzniku čistší atmosféry a menšího množství kouře. Většina uhlíku je vylučována jak oxidy uhlíku. Vzniklá atmosféra neobsahuje dráždivé zplodiny, ale díky přítomnosti oxidu uhelnatého způsobuje asfyxii. [13]

2.1.4 Akrylonitril-butadien-styren (ABS)

2.1.4.1 Chemické a fyzikální vlastnosti

Kopolymery ABS se vyrábějí ze základních stavebních bloků styrenu, akrylonitrilu a polybutadienu. ABS nepředstavuje náhodný terpolymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu, ale představuje směs kopolymeru styrenu a akrylonitrilu (SAN) s polybutadienovým kaučukem roubovaným SAN. ABS je považován za jednu z prvních komerčně úspěšných polymerních slitin. Změnou složení a procesu polymerizace lze získat širokou škálu výkonnostních a zpracovatelských charakteristik. [6]

S ABS se můžeme v budovách pro bydlení a ubytování setkat například v pouzdrech pro spotřebiče, ve dveřích, ve vnitřních vložkách ledniček a v zavazadlech. [6]

Tabulka 2-6 Typické vlastnosti ABS [2, 3, 6]

	Jednotka
Sumární vzorec	$C_{15}H_{17}N$
Teplota rozkladu	390 °C
Objemová hmotnost	1,04 $g.cm^{-3}$
Tepelná vodivost	0,14-0,21 $W.m^{-1}.K^{-1}$
Teplota tání	200°C
Teplota vznícení	400°C
Teplota vzplanutí	390°C
Měrná tepelná kapacita	1600-2130 $J.kg^{-1}.°C^{-1}$
Spalné teplo	35 000 kJ/kg
Max. HRR/jednotka plochy	340,47 $kW.m^{-2}$

2.1.4.2 Hoření, zplodiny hoření

ABS je hořlavý, a proto vyžaduje úpravu za účelem zpomalení hoření. K tomu je využíváno následujících postupů: přidání halogenových sloučenin, terpolymerizace s monomery obsahujícími halogen. [6]

Při hoření má ABS tendenci produkovat relativně velké množství kouře. Z tohoto důvodu může být vyžadována úprava pro zpomalení tvorby kouře.[6]

2.1.5 Polyvinylchlorid (PVC)

2.1.5.1 Chemické a fyzikální vlastnosti

Polyvinylchlorid je na třetím místě za polyethylenem a polypropylenem z hlediska celosvětové spotřeby polymerů, lze jej označit za nejuniverzálnější druh ze všech plastů, zejména díky své chemické odolnosti schopnosti mísit se s různými plastifikátory a jinými materiály. Jako syntetický materiál se PVC vyrábí polymerací vinylu chloridu. Má řetězovou strukturu jako polyethylen, ale

atom vodíku na ethenovou jednotku byl nahrazen atomem chloru. Více než 90 % PVC pryskyřic představují suspenzní pryskyřice, 5-7 % představují disperzní pryskyřice. V rámci budov pro bydlení a ubytování můžeme polyvinylchlorid najít například v podlahových lištách, sprchových závěsech, kuchyňském nádobí, podlahách a hračkách. [6, 13]

Tabulka 2-7 Typické vlastnosti PVC [2, 3, 6]

	Jednotka
Sumární vzorec	C_2H_3Cl
Teplota rozkladu	200-300°C
Objemová hmotnost	1,40 $g.cm^{-3}$
Tepelná vodivost	0,17-0,19 $W.m^{-1}.K^{-1}$
Teplota tání	189°C
Teplota vznícení	455°C
Teplota vzplanutí	390°C
Měrná tepelná kapacita	980 - 1380 $J.kg^{-1}.°C^{-1}$
Spalné teplo	18 000 kJ/kg
Max. HRR/jednotka plochy	94,57 $kW.m^{-2}$

2.1.5.2 Hoření, zplodiny hoření

Polyvinylchlorid je jako čistý polymer přirozeně samozhášivý, neboť obsahuje přibližně 56 % chlóru. V případě různých aplikací PVC je vyžadováno použití změkčovadel pro dosažení požadovaného stupně flexibility. Mnoho změkčovadel, jako například ftaláty, zvyšuje hořlavost zředěním polymeru s vysokým obsahem chlóru hořlavým materiálem. K zpomalení hoření lze využít následujících postupů: použití fosfátových změkčovadel jako primárních změkčovadel, použití sekundárních změkčovadel (např. halogenové parafíny, bifenyly a estery mastných kyselin), použití oxidu antimonu v plastifikovaných formulacích, použití boritanu zinečnatého, použití oxidu cíničitého, použití molybdenanu zinečnatého, použití hydroxidu hořečnatého. [6]

V určitých mezích složení a za určitých podmínek má polyvinylchlorid při hoření tendenci produkovat relativně velké množství kouře. Z tohoto důvodu může být vyžadována úprava pro zpomalení tvorby kouře. Tyto přístupy obecně používají přísady ke zředění obsahu polymeru, zvýšení odvodu tepla a podpoře zadržování materiálu v zuhelnatělé části. [6]

Při zvýšených teplotách PVC podléhá dehydrochlorační reakci, uvolňuje chlorovodík a utváří konjugovaný polyen, u kterého při vyšších teplotách dochází k přeskupování a eliminaci produktu až dochází k vzniku komplexní struktury s aromatickými látkami. [13]

Při teplotách v rozmezí mezi 200–300 °C je 80–95 % chloru obsaženého v pevném PVC uvolněno ve formě chlorovodíku, 70 % během jedné minuty při teplotě 300 °C. Za podmínek spalování při 650 °C dojde k obnovení 75–90 % chloru ve formě chlorovodíku. [13]

Hořící PVC má nízkou rychlost uvolňování tepla, protože halogenové atomy ve struktuře uvolňují chlorovodík, který pak zabraňuje přeměně oxidu uhelnatého na oxid uhličitý. Při tomto kroku spalování polymeru je uvolněno nejvíce tepla.[13]

2.2 Dřevo a kompozity na bázi dřeva

Dřevo je jedním z nejstarších a nejvíce používaných materiálů na světě. Jako stavební materiál má mnoho výhod. Dřevo je přírodní, získávané z obnovitelných zdrojů, recyklovatelné, snadno zpracovatelné, lehké a silné. Většinu dřev lze snadno upevnit pomocí hřebíků, lepidla a jiných

spojovacích prostředků a rovněž je možné jej ošetřit konzervačními prostředky. Výroba dřevěných výrobků vyžaduje méně energie na zpracování ve srovnání s jinými materiály. [3]

Dřevo a kompozity na bázi dřeva jsou klíčové konstrukční materiály, které lze úspěšně navrhnout a vyrobit s předem stanovenými vlastnostmi, což je předurčuje k široké škále aplikací a konečných použití. Zejména kompozitní materiály na bázi dřeva lze navrhnout tak, aby splňovaly specifické požadavky na užitné vlastnosti, což z nich činí udržitelné řešení pro snížení používání masivního dřeva. [17]

Kromě konstrukčních prvků se dřevo a materiály na bázi dřeva využívají i pro nekonstrukční účely jako například podlahy, obložení, dveře a různé druhy nábytku. Dřevo a kompozitní deskové materiály představují podstatnou část paliva v mnohých požárech budov. [3, 17]

Velké množství desek na bázi dřeva je vyráběno pro různé aplikace. Kompozitní deskové materiály jsou důležitými dřevěnými produkty. Jejich produkce zahrnuje využití dřeva nižších jakostních tříd a bezpečně chemicky recyklovaného k výrobě materiálu se zlepšenými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi oproti surovému dřevu. [3, 17]

Desky lze rozdělit do nejméně dvou hlavních skupin:

1. Dřevěné desky určené pro konstrukce: Výrobky jsou složeny z tenkých dřevěných vrstev, které jsou umisťovány křížem, aby bylo dosaženo pevnosti a rozměrové stability v obou směrech. Vrstvy jsou lepeny voděodolnými lepidly. Mezi zástupce této skupiny lze zařadit kompozitní panely, OSB desky a překližky.

   Kompozitní panely jsou složené z dřevěných dýh a materiálů na bázi dřeva, za účelem optimalizovat technické vlastnosti pro konkrétní aplikace. Tyto panely obvykle obsahují pět vrstev dřevěné dýhy umístěných při vnějších površích a rekonstituované dřevo ve středu.

   OSB desky jsou složené z tenkých obdélníkových dřevěných vláken uspořádaných v příčně vyrovnaných vrstvách, přičemž povrchové vrstvy jsou obvykle uspořádány v delším směru. Pro OSB desky jsou charakteristické zřetelné slepené třísky, objevující se na plochách desek. OSB desky jsou důležitým vstupním materiálem ve výrobě nábytku a ve stavebnictví.

   Překližkové desky se skládají z tenkých dřevěných dýh uspořádaných v křížově uložených vrstvách. Obvykle se jedná o tři, pět nebo sedm dýh slepených dohromady.

2. Desky z dřevěných částí: Desky na bázi dřeva vyráběné z třísek různých velikostí a tvarů, lepených a lisovaných do pevných desek, které lze souhrnně označit jako dřevotřískové desky. Vlákna jsou používána k výrobě dřevovláknitých desek s různou hustotou. Výrobek běžně označovaný jako dřevotřísková deska se vyrábí z částí o velikosti max. 10 mm. Za dřevovláknité desky se označují konstrukční a dekorativní desky vyrobené ze dřevěných nebo třtinových celulózových vláken vzájemně pospojovaných a následně konsolidovaných za tepla a tlaku. Dřevovláknité desky lze použít ve střechách a stěnách za účelem snížení hlučnosti, zvýšení energetické účinnosti a ke zpevnění rohů. K vláknům mohu být přidány další materiály, kterými může dojít ke zlepšení některých vlastností desek, jako např. zvýšení odolnosti proti vodě a pevnosti.

   Sololitové desky jsou nejčastěji používány pro obklady. Sololitové desky jsou složeny z propletených lignocelulózových dřevěných vláken, která jsou konsolidována za tepla a tlaku na minimální hustotou. Ke zlepšení fyzikálních vlastností lze do směsi přidat další látky. Do směsi mohou být přidány další látky ovlivňující fyzikální vlastnosti, jako například tuhost, tvrdost, konečnou úpravu, odolnost proti oděru, ochranu proti vlhkosti a odolnost. Mezi nejběžnější aplikace patří obklady a skříně.

Dřevotřískové desky jsou desky složené z malých dřevěných částí, které jsou obvykle spojeny formaldehydovou pryskyřicí. Typická použití zahrnují vnější konstrukce a vyráběné terasy u rodinných domů. [3, 17]

2.2.1 Chemické a fyzikální vlastnosti

Stromy lze obecně rozdělit do dvou botanických kategorií: jehličnaté stromy a listnaté stromy. Jehličnaté stromy se vyznačují jehličím a běžně jsou označovány za stálezelené. Listnaté stromy mají velké listy, které na podzim mění barvu a opadávají. Struktura a chemické složení těchto dvou kategorií se významně liší. Tudíž botanická kategorie dřeva ovlivňuje jeho chování při požáru. Dřevo z jehličnatých stromů je převážně používáno pro konstrukční aplikace. Dřevo z listnatých stromů se využívá pro vnitřní úpravy, jako je například obložení a nábytek. [3]

Makroskopická struktura kmenů listnatých a jehličnatých stromů je velmi podobná. Jádro kmenů je tvořeno dřevem, které je pokryto ochrannou vrstvou kůry. Jádro se skládá z dlouhých vláken, která jsou orientována přednostně vertikálním směrem. Voda, minerály a živiny jsou přijímány pomocí kořenů a dále transportovány ve formě mízy vnějšími částmi jádra do zbytku stromu až k listům. Fotosyntéza v listech využívá vodu a oxid uhličitý z atmosféry k tvorbě různých cukrů. Roztok cukrů s vodou se označuje jako míza a je transportován do různých částí stromu vnitřní vrstvou kůry. Dřevo v jádře je označováno jako jádrové dřevo. Zbývající dřevo mimo jádro je nazýváno dřevem bělovým. Komerčně používané dřevo se obvykle skládá primárně z jádrového dřeva. Mechanické vlastnosti jádrového a bělového dřeva ze stejného kmene jsou velmi podobné. Avšak jádrové dřevo je často hustší než bělové dřevo. Kromě toho jádrové dřevo obsahuje řadu produktů rozkladů cukru, které lze odstranit chemickými extrakčními procesy, a proto se označují jako extraktivní látky. Tyto látky ucpávají drobné průchody v buněčných stěnách. V důsledku toho významně snižují propustnost dřeva. Chemické složení některý extraktivních látek se velmi liší od základních složek dřeva: celulózy, hemicelulózy a ligninu. Z důvodů výše uvedených se tedy v závislosti na fyzikálních a chemických jevech spojených s extraktivními látkami může lišit chování jádrového dřeva při požáru od chování bělového dřeva při požáru. [3]

Suché dřevo se skládá z následujících prvků: 50 % uhlík, 6 % vodík, 44 % kyslík, malé množství dusíku a anorganických sloučenin. Hlavní složky jsou spojeny do řady přírodních polymerů: celulóza, hemicelulóza a lignin. [3]

Celulóza se skládá z velkého množství glukózových molekul uspořádaných do polymeru tvořícího řetězec. Glukóza ($C_6H_{12}O_6$) je hlavním cukrem generovaným fotosyntézou. Různé další v listech vyrobené cukry jsou spojeny do polymerů s rozvětveným řetězcem, nazývaných hemicelulózy. Lignin je stabilní vysokomolekulární polymer fenolické povahy. Působí jako pojivo uvnitř a mezi buněčnými stěnami. Obsah ligninu je obecně vyšší u jehličnatého dřeva. [3]

Reakce dřevěné desky vystavené ohni z hlediska toho, kdy se vznítí a jak rychle bude následně hořet je řízena především rychlostí přenosu tepla do pevného tělesa. Významnou část dopadajícího tepelného toku za požáru obvykle tvoří záření. Absorpční a emisní schopnost povrchu určuje jaká část dopadajícího záření je skutečně absorbována. Základními vlastnostmi materiálu, které ovlivňují přenos tepla vedením jsou hustota, měrné teplo, tepelná vodivost dřeva, částečně zuhelnatělého a zuhelnatělého dřeva, teplo při pyrolýze dřeva a výparné teplo vody. [3]

Hustota je poměr hmotnosti k objemu a mění se v závislosti na tom, jak dřevo vysychá a při přeměně zuhelnatění dřeva. Objem se rovněž mění při smršťování dřeva v důsledku ztráty vlhkosti a při zuhelnatění. [3]

Při zuhelnatění dřeva zůstává jeho struktura z velké části zachována až do okamžiku vzniku velkých trhlin v důsledku tepelného namáhání. Proto lze tepelnou vodivost zuhelnatělého dřeva

modelovat stejným způsobem jako u suchého dřeva. Nicméně hustotu i tepelnou vodivost je třeba upravit. [3]

Tabulka 2-8 Hustota zuhelnatělého dřeva [3]

Teplota (°C)	ρ_s jehličnaté stromy (kg/m^3)	ρ_s listnaté stromy (kg/m^3)
200	1460	1460
250	1445	1445
300	1420	1405
350	1368	1340
400	1355	1320
600	1305	1270

Rychlost uvolňování tepla je jednou z nejdůležitějších proměnných při požáru. Rychlost uvolňování tepla pro různé tepelné toky lze měřit ve stolním kalorimetru. Rychlost zuhelnatění úzce souvisí s rychlostí uvolňování tepla. Rychlost zuhelnatění určuje, jak rychle se nosná část dřevěných konstrukčních prvků smršťí na kritickou úroveň. Při standartních podmínkách požáru lze rychlost zuhelnatění měřit v peci používané pro testování požární odolnosti. [3]

Krátce po zapálení, rychlost uvolňování tepla prudce stoupá až do prvního vrcholu. Vzniká ochranná vrstva zuhelnatělého dřeva, která se rozšiřuje s postupem pyrolýzy směrem do vnitřku prvku. Vrstva zuhelnatění utváří rostoucí tepelný odpor mezi exponovaným povrchem a přední částí pyrolýzy, což má za následek postupné snižování rychlosti uvolňování tepla po prvním vrcholu. V určitém okamžiku povrch ustupuje přibližně stejně rychle jako přední část pyrolýzy a rychlost uvolňování tepla se ustálí. K opětovnému nárůstu dochází až v momentě, kdy pyrolýza dosáhne zadního povrchu. Po druhém vrcholu HRR prudce klesá, neboť hoření ustává a zuhelnatělé zbytky doutnají. [3]

Tabulka 2-9Typický vrchol rychlosti uvolňování tepla pro dřevěné produkty [3]

Materiál	Tepelný tok			
	25 kW/m^2	35 kW/m^2	50 kW/m^2	65 kW/m^2
Borovice montereyská	140	158	179	205
Douglaska tisolistá	155	192	207	223
Douglaska tisolistá – překližka	170	180	197	215
Deska s orientovanými vlákny	177	168	198	224
Borovice kadidlová – překližka	156	156	203	246
Dřevotříska	-	191	222	264
Překližka s retardéry hoření	-	62	81	101

Maximální hodnoty při 50 kW/m^2 se u neošetřených dřevěných výrobků dosahují přibližně 230 kW/m^2. Dřevo může být ošetřeno retardéry hoření, což sníží hodnoty pod 100 kW/m^2.

2.2.2 Tepelný rozklad a pyrolýza

Tři základní složky dřeva mají rozdílné charakteristiky tepelného rozkladu. Složky se začínají rozkládat v různých teplotních rozsazích, typicky:

1. Celulóza 240 °C–350 °C
2. Hemicelulóza 200 °C–260 °C
3. Lignin 280 °C–500 °C

V důsledku výše zmíněného se charakteristiky tepelné degradace posouvají směrem k vyšším teplotám při vyšším obsahu ligninu ve dřevě. To vysvětluje, proč je povrchová teplota při vznícení výrazně vyšší pro jehličnaté dřevo než pro listnaté dřevo. Rychlost zuhelnatění dřeva je velmi citlivá na přítomnost neorganických nečistot, jako například retardérů hoření. [3]

Pyrolýza pórovitých pevných látek, jako je dřevo, vystavených působení ohně je velmi složitý proces. Při použití v praxi obsahují dřevěné výrobky vždy určité procento vlhkosti. Za požáru se teplota dřeva zvyšuje až do bodu, kdy se vlhkost začne vypařovat. Teplota suchého dřeva dál roste, dokud se vlákna nezačnou rozpadat. Tepelná degradace začíná kolem 200 °C až 250 °C.[3]

2.2.3 Hoření, zplodiny hoření

Pokud je hořlavý materiál vystaven konstantnímu vnějšímu tepelnému toku (od sálání nebo od proudění nebo kombinace) začne jeho povrchová teplota stoupat. Teplota uvnitř materiálu rovněž stoupá, ale pomalejším tempem. Při dostatečném tepelném toku dosáhne nakonec povrchová teplota bodu, při kterém začne pyrolýza. Vzniklé palivové páry vystupují přes povrch a mísí se. ve vzduchu v mezní vrstvě. Za určitých podmínek směs překročí spodní mez hořlavosti a vznítí se. Toto je označováno za plamenné zapálení. U některých materiálů nebo za určitých podmínek neprobíhá v plynné fázi ale ve fázi pevné. V takových případech není možné pozorovat plamen, ale povrch září. Tento zcela odlišný jev je nazýván žhnoucí zapálení. [3]

Existují dva režimy ohřívání v závislosti na čase:

1. Krátký interval (minuty), vystavení vysokým tepelným tokům (≥ 10 kW/m^2)
2. Dlouhý interval (hodiny), vystavení nízkým tepelným tokům (≤ 10 kW/m^2)

Doutnající spalování je pomalá exotermická reakce mezi pevnou částí paliva a kyslíkem ve vzduchu. Kyslík je potřebný pro podporu doutnajícího hoření, ale je spotřebováván mnohem pomaleji než při plamenném hoření. Doutnající hoření má nízkou rychlost ztráty hmoty za jednotku času, ale větší podíl ztrát hmoty oproti plamennému hoření se uvolňuje v produktech nedokonalého spalování, zejména se jedná o oxid uhelnatý. K doutnání může docházet u porézních celulózových materiálů jako jsou například dřevovláknité desky. [3]

Míra produkce kouře od dřevěných produktů je ve srovnání s plasty poměrně malá.

Primárním toxickým plynem vznikajícím při hoření dřeva je oxid uhelnatý. V dobře větraném prostoru jsou koncentrace oxidu uhelnatého velmi nízké (řádově 100 ppm). Dramaticky se zvyšují, když je přívod vzduchu stechiometrický, ačkoliv za těchto podmínek se koncentrace zdá býti nezávislá na palivu. [3]

Plameny se mohou po pevném povrchu šířit dvěma způsoby:

1. První způsob je označován jako šíření pomocí větru. V tomto režimu se plameny šíří ve směru proudění okolního vzduchu. Typickými příklady je šíření plamene vzhůru po svislé stěně a šíření plamene po stropě. Oblast před čelní částí pyrolýzy je ohřívána primárně plamenem hořící části paliva. V důsledku toho je mechanismus tepelné zpětné vazby u šíření pomocí větru extrémně rychlý (obvykle 0,1 až 1 m/s). Proto je tendence k šíření plamene za pomoci větru klíčovým faktorem při celkovém hodnocení nebezpečí požáru obkladového materiálu.
2. Druhý způsob šíření plamene se označuje jako šíření plamene opačným prouděním, k němuž dochází, když se plameny šíří v opačném směru než okolní proudění vzduchu nebo proti gravitaci. Přenos tepla z plamene původního paliva je významný pouze v malé oblasti u paty plamene. V důsledku toho je protiproudé šíření plamene mnohem pomalejší než šíření pomocí větru (obvykle 0,1 až 1 mm/s).

Dřevo a materiály na bázi dřeva mohou podléhat hoření, a proto je výzkumu snižování jejich hořlavosti věnována dlouhodobá pozornost. Často ošetřovány chemickými látkami zpomalujícími hoření, aby se dosáhlo vyšší požární odolnosti a byly splněny specifické požadavky stavebních předpisů pro vnitřní povrchové materiály a konstrukční prvky zajišťující stabilitu. [3, 17]

Pokud hovoříme o ochraně materiálů na bázi dřeva lze do této oblasti jednoznačně zařadit desky s orientovanými vlákny (OSB). Experimentální studie vznícení OSB desek při vystavení sálání zkoumala schopnost materiálů vznítit se při zahřátí na zvýšenou teplotu. Tato schopnost závisí na mnoha faktorech jako jsou tepelné vlastnosti materiálů, například teplota vznícení/vzplanutí, kritický tepelný tok a okolní prostředí. Pro experimentální studii byly použity OSB desky bez jakékoliv povrchové úpravy. Vzorky byly postupně vystaveny tepelnému toku. Doba vznícení byla bez ohledu na tloušťku u všech vzorků podobná. [17]

3 Toxicita

3.1 Úvod

Za hlavní rizikové faktory spojené s požárem a neschopností osob se evakuovat můžeme považovat teplo, kouř a toxické zplodiny hoření. Analýza nebezpečí při požáru zahrnuje výpočet času dostupného pro evakuaci (ASET) a výpočet času potřebného pro evakuaci (RSET). Čas dostupný pro evakuaci představuje interval mezi časem vzniku požáru a časem, kdy osoby nejsou nadále schopny samostatného úniku. Neschopnost osob se bez asistence evakuovat může být způsobena působením tepla, zhoršenou viditelností z důvodu rozšíření kouře, inhalací dusivých plynů a v neposlední řadě působením dráždivých zplodin hoření. Čas potřebný k evakuaci přestavuje čas než se osoby dostanou na bezpečné místo.[13]

Toxické zplodiny hoření představují hlavní příčinu smrti či zranění v důsledku požáru. Toxické plyny vznikající za požáru obsahují dusivé látky – oxid uhelnatý (CO) a kyanovodík (HCN), dráždivé látky jako například chlorovodík a bromovodík a organodráždivé látky, do kterých můžeme zahrnout akrolein, formaldehyd, oxidy dusíku (NO_x) a oxidy síry (SO_x). [13, 18]

Toxicita zplodin hoření závisí na třech hlavních faktorech:

1. Na rychlosti hoření
2. Na materiálech, které hoří
3. Na podmínkách hoření

V tabulce 3-1 jsou představeny typické produkty vznikající při hoření materiálů, které můžeme běžně najít i v budovách pro bydlení a ubytování.

Tabulka 3-1 Hlavní toxické plyny v zplodinách [13, 18]

Toxický plyn	Zdroj
oxid uhelnatý (CO) oxid uhličitý (CO_2)	Většina hořlavých materiálů
akrolein (CH_2=CHCHO)	Materiály obsahující celulózu, polyethylen (PE), polypropylen (PP), dřevo, bavlna, papír, akrylonitril-butadien-styren (ABS), polystyreny
formaldehyd (HCHO)	Polyoxymethylen, polypropyleny
kyanovodík (HCN) oxid dusičitý (NO_2) amoniak (NH_3)	Polymery obsahující dusík, vlna, hedvábí, polyakrylonitril (PAN), ABS, nylony, polyuretany
chlorovodík (HCl) bromovodík (HBr)	Polyvinylchlorid (PVC) a materiály obsahující halogenové retardéry hoření
fluorovodík (HF)	Polytetrafluorethylen (PTFE), polyvinylfluorid (PVF) a jiné sloučeniny a přísady obsahující fluor
oxid siřičitý (SO_2) sulfan (H_2S)	Materiály obsahující síru, vlna, vulkanizované kaučuky
styren ($C_6H_5CH=CH_2$)	Polystyreny, ABS

Téměř všechny zplodiny hoření obsahují oxid uhelnatý a oxid uhličitý, ale jejich koncentrace nemusí být toxikologicky významná. Kyanovodík představuje větší toxikant než oxid uhelnatý, ale vyskytuje se pouze při spalování materiálů obsahujících dusík. Chlorovodík a bromovodík zhoršují dusivé a dráždivé působení kouře. Ve zplodinách se vyskytují pouze v případě, že je v palivu přítomen organický chlor nebo brom. Chlorovodík se rovněž velmi snadno spojuje s vodou za produkce hustého bílého kouře, který má schopnost významně snížit viditelnost ještě před tím, než v prostoru dojde k nárůstu teploty a vzniku nebezpečných koncentrací oxidu uhelnatého, kyanovodíku a dalších toxických látek. [13]

Kouř s dráždivými zplodinami představuje významné riziko pro osoby v průběhu brzkých stádií požáru, ale i několik hodin poté, kdy osoby byly vystaveny účinku zplodin hoření. Přestože kouř není při požáru přímo život ohrožující, jeho přítomnost může významně ovlivnit behaviorální a fyziologické chování osob a tím znemožnit schopnost úniku. Tato neschopnost většinou zpozdí nebo znemožní únik až do té doby, než se podmínky v okolí stanou smrtícími v důsledku dusivých plynů nebo tepla. Kouř ovlivňuje chování osob při evakuaci a schopnost se evakuovat. Důležitým faktorem je pokles viditelnosti a snížení rychlosti evakuace. To je způsobeno narůstajícím množstvím dráždivých zplodin v kouři, které způsobují bolest v očích nebo v dýchacích cestách, což je doprovázeno zavřením očí a těžkostí dýchání. V důsledku delší expozice dochází k inhalaci většího množství dráždivých zplodin, což může mít za následek poranění plic. Obvykle několik hodin po expozici může dojít u plicního poranění k rozvoji otoku a zánětu. Závažnost plicního poranění a pravděpodobnost smrti vzrůstá s mírou dávky dráždivých zplodin, které byly osoby vystaveny.[13]

3.2 Skupiny toxických zplodin

Toxické zplodiny hoření mohou být rozděleny na sedm skupin. Hlavní dvě skupiny pro tuto diplomovou práci přestavují na dusivé plyny a dráždivé plyny, které budou představeny v rámci dalších dílčích podkapitol. Avšak v rámci této podkapitoly budou stručně představeny i ostatní skupiny. [13]

Dusivé plyny způsobují nemožnost buněk přijímat kyslík, člověk se dostává do bezvědomí a poté umírá. Dusivé látky přestavují inertní prvky, které v dostatečném množství dokážou vyloučit kyslík z těla a způsobit jeho vyčerpání. Za dusivé látky můžeme označit CO, HCN a nepřímo CO_2. Inhalace oxidu uhličitého stimuluje dýchání, zvyšuje frekvenci a dechový objem a způsobuje zvýšení kyselosti krve. Výsledkem je zvýšení inhalace kyslíku, ale i toxických plynů produkovaných hořením. [13]

Druhou skupinu představují dráždivé látky. Pobyt v prostředí, kde se nacházejí způsobuje neschopnost pohybu. Může docházet zejména k zasažení oči a horních dýchacích cest, při dlouhodobějším vystavení může dojít i k poškození plic. V případě zasažení očí a poškození plic se následky vystavení dusivým i dráždivým plynům odvíjí od koncentrace a době pobytu v nebezpečném prostředí. V případě horních dýchacích cest existuje předpoklad, že poškození závisí pouze na koncentraci dráždivé látky. Mezi dráždivé látky můžeme zařadit HCl, HF, HBr, NO_2, H_2S.[13]

Další skupinu představují látky, které způsobují poškození krve. Jejich působení má za následek rozpad červených krvinek nebo chemické ovlivnění hemoglobinu v krvi. Mezi zástupce této skupiny patří Benzen (C_6H_6), pyridin (C_6H_7N). [13]

Anestetika jsou čtvrtou skupinou. Potlačují funkce centrální nervové soustavy. Za zástupce anestetik jsou považovány acetylenové uhlovodíky, parafinové uhlovodíky a alifatické ketony. [13]

Pátá skupina je tvořena neurotoxickými látkami, které způsobují poškození nervového systému, a to vede ke ztrátě smyslů a paralýze. Jejich zástupce představují organofosfáty. [13]

Šestou skupinu představují hepatotoxické látky, které znemožňují normální funkčnost jater. Mezi hepatotoxické látky patří například tetrachlormetan (CCl_4) a tetrachloretan ($C_2H_4Cl_4$). [13]

Poslední, sedmou, skupinu tvoří nefrotoxické látky, jejichž působení má za následek poškození funkce ledvin. Jejich zástupcem jsou například halogenové uhlovodíky. [13]

Tabulka 3-2 Nejčastější sledované složky zplodin hoření[13]

Dusivé plyny		**Dráždivé plyny**		**Ostatní složky, které by měly být sledovány**	
oxid uhelnatý	(CO)	fluorovodík	(HF)	kyslík	(O_2)
kyanovodík	(HCN)	chlorovodík	(HCl)	oxid uhličitý	(CO_2)
		bromovodík	(HBr)		
		oxid dusičitý	(NO_2)		
		oxid siřičitý	(SO_2)		
		organické iritanty			

3.2.1 Dusivé plyny

Dusivé nebo narkotické plyny způsobují pokles dodávky kyslíku do tělesných tkání, což vede ke krizi centrálního nervového systému, ke ztrátě vědomí a bez pomoci záchranných složek k následné smrti. Závažnost následků je závislá na dávce dusivých plynů.

Za nejhlavnější a nejvíce prostudované dusivé plyny jsou považovány oxid uhelnatý a kyanovodík. [13]

Oxid uhelnatý – CO

Oxid uhelnatý je bezbarvý, toxický, hořlavý plyn bez zápachu, který je velmi rychle absorbován dýchacími cestami. Efekt intoxikace oxidem uhelnatým je charakteristický tím, že způsobuje pokles transportní kapacity pro kyslík v krvi. Oxid uhelnatý se váže na hemoglobin v červených

krvinkách a utváří karboxyhemoglobin (COHb), jehož stabilita je 200krát větší než stabilita oxyhemoglobinu, což brání transportu kyslíku z plic do ostatních buněk v těle. To má za následek zhoršení duševní a svalové výkonnosti. Oxid uhelnatý se rovněž spojuje s myoglobinem ve svalových buňkách a tím zhoršuje difúzi kyslíků do srdečních a kosterních svalů. Oxid uhelnatý má kumulativní účinek, tudíž lidskému tělu trvá delší dobu, než se zotaví. Přibližně 50 % CO v krvi je eliminováno během první hodiny, zatímco kompletní eliminace trvá několik hodin až několik dní. Při vdechování, CO zhoršuje schopnost jednotlivce unikat. Při vystavení oxidu uhelnatému o koncentraci 10 ppm po krátký časový interval, dochází k poškození úsudku a zrakového vnímání. Při vystavení 100 ppm způsobuje závratě, bolesti hlavy a únavu. Když koncentrace dosáhne 250 ppm tak dochází ke ztrátě vědomí a inhalace 1000 ppm má za následek rychlou smrt. V případě chronických dlouhodobých expozic nízkým hladinám může, CO způsobovat poruchy dýchání a srdeční činnosti. [13, 18]

Kyanovodík – HCN

Kyanovodík je ve vysokých koncentracích produkován, když hoří materiály obsahujících dusík za podmínek typických pro požáry v domácnostech. Koncentrace vyskytující se v ovzduší při raných fázích požáru, kde se nacházejí předměty jako čalouněný nábytek a lůžkoviny, často překračují koncentrace způsobující neschopnost uniknout během několika minut. V porovnání s oxidem uhelnatým je kyanovodík díky tvorbě kyanidového iontu při hydrolýze v krvi přibližně 25krát více toxický. Oproti CO, který zůstává ve formě karboxyhemoglobinu primárně v krvi, je kyanidový iont distribuován v extracelulární tekutině tkání a orgánů. Jedna z reakcí souvisejících s toxickými účinky kyanidu má za následek krátkou stimulaci, po které následuje rapidní pokles frekvence dýchání, hladovění těla po kyslíku a tím způsobené křeče, zástavu dechu a následnou smrt. Kyanovodík rovněž významně ovlivňuje schopnost úniku a poté společně s CO přispívá ke smrti udušením. Příjem, distribuce, metabolismus a vylučování kyanidu je mnohem složitější než v případě oxidu uhelnatého. Vyčíslení kyanidového iontu (CN^-) u osob vystavených požáru je dražší a není prováděno běžně. Z tohoto důvodu je obtížné stanovit příspěvek kyanovodíku k úmrtím při požáru. Analýza kyanidového iontu se provádí pouze v případech, kde se nevyskytují smrtelné koncentrace oxidu uhelnatého. [13]

3.2.2 Dráždivé plyny

Oproti dobře definovaným účinkům dusivých plynů je problematika účinků dráždivých látek mnohem složitější. Většina dráždivých látek ve zplodinách hoření se vyznačuje podrážděním smyslů, horních dýchacích cest a plic. Podráždění smyslů a horních dýchacích cest stimuluje receptory trojklanného a bloudivého nervu v očích, nose, krku a v horních dýchacích cestách. To způsobuje zprvu nepohodlí a poté silnou bolest. Dráždivé látky mohou způsobovat slzení a reflexivní mrkání, bolest v nosu, bolest krku a hrudníku, zadržování dechu, kašel, nadměrnou sekreci hlenu až bronchokonstrikce a laryngeální křeče.[13]

Halogenovodíky

Chlorovodík (HCl) a bromovodík (HBr) lze zařadit mezi silné kyseliny, které se zcela oddělují ve vodě. Oba mohou být přítomni v zplodinách hoření například při požáru polyvinylchloridu (PVC). Fluorovodík (HF) je silně dráždivý, korozivní plyn. Reakce s vodou je bouřlivá za produkce tepla a kyseliny fluorovodíkové. Nicméně kyselina fluorovodíková je řazena mezi slabé kyseliny, tudíž její toxicita nevyplývá z její kyselosti. Fluorovodík silně dráždí oči, kůži a nosní cesty. Při vysoké koncentraci může proniknout do plic, což vede k otoku a krvácení.

Chlorovodík je kyselý plyn, což způsobuje silné dráždivé efekty při nízkých koncentracích (přibližně 100 ppm), ale smrtelně nebezpečný je pouze při velmi vysokých koncentracích (u myší 2600 ppm a u krys 4700 ppm při expozici trvající 30 minut).

Existuje zpráva zaznamenávající účinky chlorovodíku na lidi v důsledku požáru. Jejím výstupem bylo, že lidé dokáží tolerovat vystavení HCl o koncentraci 10 ppm, při 70 ppm a 100 ppm museli lidé opustit místnost v důsledku silného podráždění, kašle a bolesti na hrudi. Z toho vyplývá, že koncentrace 100 ppm je pro lidský organismus netolerovatelná. Tato data vedla k utvoření pomocných hranic, kde tolerovatelná koncentrace po dobu 1 hodiny se pohybuje mezi 50 ppm a 100 ppm. Hodnoty od 1000 ppm do 2000 ppm jsou považovány za nebezpečné i v případě krátkodobé expozice. Tyto hodnoty byly ověřeny pomocí zvířecího modelu.[13]

Oxidy dusíku

Oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO_2) jsou nehořlavé plyny přítomné ve zplodinách hoření. Při vysokých koncentracích oxidu dusnatého dochází ve vzduchu k rychlé oxidaci a vzniká oxid dusičitý. Avšak při koncentracích, které se běžně vyskytují při požáru zůstává většina oxidu dusnatého. Oxid uhličitý se ve vodě rychle rozpouští za vzniku kyseliny dusičné a dusité. Při vysokých koncentracích mohou tyto kyseliny způsobovat plicní otok a smrt. Oxid dusnatý se v krvi spojuje s oxyhemoglobinem za vzniku methemoglobinu, 5 až 20krát rychleji než kyslík, což způsobuje zpomalení rozkladu, a to má za následek symptom připomínající hypoxii. Tvoří se dusičnany a pokud je koncentrace kyslíku v krvi nízká, může se kombinovat s hemoglobinem za vzniku nitrosohemoglobinu. Bylo prokázáno, že nadměrná hladina oxidu dusnatého v krvi způsobuje nízký krevní tlak. [13]

Organické dráždivé látky

Velké množství známých dráždivých chemických látek bylo nalezeno v ovzduší při požáru. Chemické dráždivé látky vznikají při pyrolýze a částečné oxidaci materiálů. Nicméně v případě mnohých organických materiálů a zejména jednoduchých uhlovodíkových polymerů, jako například polypropylenu nebo polyethylenu, jsou hlavní produkty pyrolýzy neškodné. Tedy když dochází k pyrolýze polypropylenu v dusíku za vzniku ethylenu, ethanu, propenu, cyklopropanu, formaldehydu, butanu, acetaldehydu, toluenu a styrenu, bylo zjištěno, že vzniklá atmosféra nemá na primáty žádný vliv. Když však tyto produkty zoxidují během neplamenného rozkladu ve vzduchu, některé se přemění ve vysoce dráždivé produkty. Vzniklé podmínky v ovzduší byly shledány velice dráždivými pro myši i primáty.

Tabulka 3-3představuje výčet některých víc toxických organických látek běžně se vyskytujících při hoření. Společně s toxickými látkami je v tabulce 3-3 uvedena i koncentrace bezprostředně nebezpečná pro zdraví nebo život (IDLH), která byla stanovena Národním institutem pro bezpečnost a ochranu zdraví na pracovišti (NIOSH).[13]

Tabulka 3-3 Běžné dráždivé organické látky vyskytující se při hoření s hodnotami IDLH[13]

Látka	Hodnota IDLH (ppm)
acetaldehyd	2000
akrolein	2
benzen	500
krotonaldehyd	50
formaldehyd	20
fenol	250
toluen	500

3.3 Metody pro určení toxicity z pohledu smrtelnosti a nezpůsobilosti evakuace

Obecným přístupem je generování údajů o toxické účinnosti z chemické analýzy za účelem získání povědomí o chování jednotlivých toxických látek a vyjádření jejich smrtelné koncentrace pro 50 % populace při vystavení jejich účinkům po dobu 30 minut (LC_{50}). Shrnutím těchto poznatků vzniká dílčí efektivní dávka (FED). Pokud je hodnota FED rovna jedné, znamená to, že koncentrace jednotlivých látek bude smrtelná pro 50 % populace při expozici trvající déle než 30 minut. [13]

3.3.1 Střední smrtelná koncentrace – lethal concentration (LC_{50})

Termín střední smrtelná koncentrace zahrnuje hodnotu akutního smrtelného vlivu pro dýchací cesty. Hodnota LC_{50} je definována jako koncentrace, která způsobí úhyn poloviny množství zvířat, která byla vystavena účinkům toxického prostřední po určitý časový interval, obvykle 30 minut. [13]

3.3.2 Dílčí efektivní dávka – fractional effective dose (FED)

Některé toxické efekty způsobené působením zplodin hoření se objeví téměř ihned po expozici a jejich závažnost závisí na koncentraci látky a jejím vlivu. Toto platí zejména pro bolestivý efekt přicházející při vystavení dráždivým zplodinám. Například dráždivý kouř způsobí okamžitou bolest očí a dýchacích cest, reflexivně pak dojde k zavření očí a k zhoršení dýchání. [13]

V případě dusivých plynů závisí efekt na vdechnutém množství. Důsledky expozice se mohou projevit až za nějaký časový interval a jejich vážnost je závislá na koncentraci vdechnuté látky a době, po kterou byla látka vdechována. Oproti důsledkům vystavení dráždivým plynům trvají důsledky vystavení dusivým plynům delší dobu.[13]

Dílčí efektivní dávka FED vzniká součtem příspěvků jednotlivých látek. Pokud je FED rovno jedné, znamená to, že koncentrace jednotlivých látek budou smrtelné pro polovinu testované populace při expozici trvající 30 minut (LC_{50}). [13]

Pro určení dílčí efektivní dávky (FED) byly stanoveny dvě rovnice- (3-1) a (3-2), které vycházejí z chemického složení prostředí fyzikálního modelu požáru založeném na stejném souboru dat o úmrtnosti. Obě tyto rovnice byly převzaty z ISO 13344 a využívají hodnoty LC_{50} pro poskytnutí referenčních údajů pro jednotlivé plyny k výpočtu toxických účinností, na základě experimentů s krysami, které byly vystaveny toxickým látkám po dobu 30 minut. [13]

N-gas model předpokládá, že pouze účinek hlavního toxikantu, oxidu uhelnatého, je zesílený zvýšenou dechovou frekvencí způsobenou koncentrací oxidu uhličitého (vyjádřenou s jednou doplňkovou funkcí s hodnotou *m* a *b* pro hodnoty koncentrace oxidu uhličitého pod a druhou pro hodnoty nad 5 %):

$$\mathrm{FED} = \frac{m[\mathrm{CO}]}{[\mathrm{CO_2}] - \mathrm{b}} + \frac{21 - [\mathrm{O_2}]}{21 - LC_{50,O_2}} + \frac{[\mathrm{HCN}]}{LC_{50,HCN}} + \frac{[\mathrm{HCl}]}{LC_{50,HCl}} + \frac{[\mathrm{HBr}]}{LC_{50,HBr}} + \cdots \qquad (3\text{-}1)$$

Pruserův model používá V_{CO_2}, což je násobící – faktor zohledňující hyperventilaci způsobenou oxidem uhličitým, čímž se zvyšuje FED příspěvek od všech toxických látek. Také zahrnuje faktor acidózy (A) pro zohlednění toxicity oxidu uhličitého jako takového.

$$FED = \left\{ \frac{[\mathrm{CO}]}{LC_{50,CO}} + \frac{[\mathrm{HCN}]}{LC_{50,HCN}} + \frac{[\mathrm{AGI}]}{LC_{50,AGI}} + \frac{[\mathrm{OI}]}{LC_{50,OI}} + \cdots \right\} \cdot V_{CO_2} + A + \frac{21 - [\mathrm{O_2}]}{21 - 5{,}4} \qquad (3\text{-}2)$$

$$V_{CO_2} = 1 + \frac{\exp(0{,}14[\mathrm{CO_2}]) - 1}{2} \tag{3-3}$$

$[AGI]$ představuje koncentraci kyselých dráždivých plynů, [OI] koncentraci organických dráždivých látek a A je faktor acidózy, který je rovný $[\mathrm{CO_2}] \cdot 0{,}05$.

Obě rovnice se týkají pouze smrtelnosti nebo příčiny smrti. Nicméně mnoho osob nedokáže uniknout z prostoru zasaženého požárem kvůli účinku kouře, který zapříčiňuje neschopnost uniknout (zhoršení viditelnosti) a kvůli jeho dráždivým složkám, které způsobují bolest, zabraňují dýchání, což má za následek neschopnost úniku a následnou smrt. [13]

Norma ISO 13571 rozlišuje čtyři hlavní nebezpečí způsobené vzniklým požárem, které mohou ovlivnit a zabránit úniku. Mezi tyto faktory lze zařadit toxické plyny, dráždivé plyny, teplo a zastínění kouřem. Následující dvě rovnice byly převzaty z normy ISO 13571. Zahrnují výpočet FED pro dusivé látky (CO, HCN), ale bez uvážení vyčerpání kyslíku nebo oxidem uhličitým řízené hyperventilace, a dílčí efektivní koncentrace (FEC) smyslových dráždivých látek, které mohou limitovat únik, ve zplodinách hoření:

$$FED = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{[\mathrm{CO}]}{35000} \cdot \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\exp\left(\frac{[\mathrm{HCN}]}{43}\right)}{220} \cdot \Delta t \tag{3-4}$$

$$FEC = \frac{[\mathrm{HCl}]}{IC_{50,HCl}} + \frac{[\mathrm{HBr}]}{IC_{50,HBr}} + \frac{[\mathrm{HF}]}{IC_{50,HF}} + \frac{[\mathrm{SO_2}]}{IC_{50,SO2}} + \frac{[\mathrm{NO_2}]}{IC_{50,N02}} + \frac{[\text{akrolein}]}{IC_{50,akrolein}} + \frac{[\text{formaldehyd}]}{IC_{50,formaldehyd}} + \sum \frac{[\text{dráždivé látky}]}{IC_{50,\text{dráždivé látky}}} \tag{3-5}$$

kde IC_{50} představuje dráždivou (nebo inhibující) koncentraci, která ovlivní 50 % populace.[13, 19]

Rovnice (3-4) popisuje obecně uznávaný případ, že jsou pouze dva hlavní dusivé plyny vznikající za požáru, oxid uhelnatý a kyanovodík. Hodnota FED je vypočtena za použití vztahu exponované dávky pro oxid uhelnatý. [13, 19]

Tabulka 3-4 Koncentrace toxických plynů vedoucí ke smrti (ISO 13344) a koncentrace znemožňující únik (ISO 13571) pro dobu expozice 30 minut [13, 19, 20]

	Koncentrace vedoucí ke smrti, FED = 1, použití rovnic dle ISO 13344 (ppm)	**Koncentrace vedoucí k neschopnosti úniku, FEC/FED=1, použití rovnic dle ISO 13571 (ppm)**
CO	5700	1170
HCN	165	100
HCl	3800	1000
NO_2	170	250

Za účelem vztažení toxicity zplodin hoření k maximálnímu přípustnému množství materiálu například v místnosti, je možné FED vztáhnout k množství materiálu v objemu, které by způsobilo

smrt 50% populace při daných podmínkách hoření. Toxicitu zplodin hoření lze tedy vyjádřit jako LC_{50}, což v tomto případě představuje hmotnost vzorku hořícího polymerního materiálu (M), která by v objemu 1 m^3 způsobila, že hodnota FED bude rovna jedné. Vztah vyplývající z N-gas modelu je uveden v rovnici (3-6):

$$LC_{50} = \frac{M}{FED \cdot V} \tag{3-6}$$

kde V představuje celkový objem zředěných zplodin hoření v m^3 při standartním tlaku a teplotě.[13]

3.3.3 Koncentrace způsobující 50% pokles frekvence dýchání – respiratory rate depression (RD_{50})

Nejpoužívanější metodou pro přímé měření dráždivého vlivu na smysly, způsobeného jednotlivými chemikáliemi v plynné fázi, je test poklesu rychlosti dýchání u myší (RD_{50}). Tato metoda je používána u malorozměrových testů toxicity pro řadu materiálů. Test využívá reflexu poklesu rychlosti dýchání při vystavení prostředí s iritačními zplodinami. Tento reflex je běžný u lidí a hlodavců. Hlodavci, zejména myši, mají výše zmíněný reflex obzvláště dobře vyvinutý a stabilní, tak, že procentuální pokles rychlosti dýchání je úměrný vdechnuté koncentraci.[13]

Test RD_{50} funguje jako užitečná kvantitativní metoda pro srovnání případných dráždivých vlivů jednotlivých chemických látek a směsí ve zplodinách hoření. Přestože základní efekt vlivu dráždivých látek i reflexy jsou u lidí velmi podobné těm pozorovaným u myší, testovací metoda nespoléhá na to, že reakce lidí a myší jsou identické. Avšak intenzitu odezvy myší je možné použít jako prediktivní scénář pro závažnost účinků u lidí. Bylo prokázáno, že většina jednotlivých chemikálií je vysoce dráždivá pro lidi při koncentraci RD_{50} zkoumané u myší. Z toho vyplývá, že tato metoda, ve spojení s dalšími dostupnými daty, může být používána k odhadu koncentrací jednotlivých dráždivých látek nebo směsí dráždivých zplodin hoření při požáru, které by mohly významně ovlivnit evakuaci. [13]

3.3.4 Podobnosti a rozdíly mezi zvířecími modely a lidmi

Pro účely toxikologické analýzy je využíváno mnoho zvířecích druhů. Tato analýza zahrnuje různé metody měření toxických koncových bodů a jejich různé praktické aplikace pro hodnocení toxicity pro lidi. Obecně lze konstatovat, že orgány savců jsou lidským orgánům velmi podobné strukturně i funkčně. [13]

Mezi hlavní akutní fyziologické a patologické účinky sledované u lidských obětí požáru i u studií na zvířatech patří:

- dusivé účinky na kardiovaskulární a nervový systém vedoucí ke kolapsu a ztrátě vědomí
- akutní smyslové podráždění očí a dýchacích cest
- akutní zánět a otok plic po vystavení dráždivým zplodinám hoření. [13]

Za hlavní problémy při extrapolaci z modelů se zvířaty jsou považovány:

- omezení měřitelných parametrů
- velikostní rozdíly
- odlišnosti v struktuře těla
- biochemické a fyziologické rozdíly. [13]

Praktické potíže při používání malých zvířat, jako jsou myši a krysy, představuje omezení rozsahu fyziologických proměnných, které mohou být snadno měřeny. Většina studií vlivu zplodin hoření s hlodavci byla omezena na měření smrtelné koncentrace nebo dávky (LC_{50} nebo LD_{50}) nebo sledování smyslového podráždění (RD_{50}).

3.4 Efekt toxických látek na různé části lidského organismu a jeho chování

3.4.1 Působení dráždivých zplodin na různé části očí a dýchacích cest

V případě očí bývá nejčastěji zasažena rohovka. Dráždivé zplodiny způsobují stimulaci receptorů bolesti trojklaného nervu, doprovázenou korozivním porušením epitelu rohovky. Zasažení výše zmíněných způsobuje:

1. Pocity mírného podráždění až intenzivní bolest
2. Nedobrovolné zavření očí způsobené reflexy
3. Slzení
4. Obtíže s viděním
5. Oční neprůhlednost a vznik vředů

U bodů 1.-4. se jedná spíše o obtíže závislé na koncentraci, které se objevují téměř ihned po expozici vysoké koncentraci iritačních látek. U bodu 5. dochází k pomalejšímu rozvoji symptomů závislém hlavně na dávce, které byli osoby vystaveny. K rozvoji může dojít v řádu několika minut, ale i hodin. [13]

U horních dýchacích cest dochází k postižení zejména řasinkového respiračního a čichového epitelu. Podobně jako u očí dochází ke stimulaci receptorů trojklaného nervu, doprovázenou korozivním porušením epitelů, avšak u řasinkového respiračního epitelů může dojít ke stázi a ztrátě řasinek. V případě zasažení výše zmíněných částí dochází k:

1. Pocitům mírného podráždění až k intenzivnímu pálení
2. Reflexu zpomalení dýchání s pauzou na konci vdechnutí (krátké zadržení dechu)
3. Rozvoji kašle
4. Sekreci hlenu
5. Zánětu a citlivosti

V případě symptomů zahrnutých v bodech 1.-2. se jedná spíše o symptomy závislé na koncentraci a k jejich rozvoji dochází téměř okamžitě v případě vysoké koncentrace. U bodů 3. a 4. se počítá s projevením do jedné minuty, ale závažnost závisí na délce expozice. [13]

U hlavních dýchacích cest, průdušnice a průdušek v závislosti na vystavení dráždivým zplodinám dochází k zasažení sloupcového řasinkového epitelu. Dráždivé zplodiny zapříčiní stimulaci bloudivého nervu, stimulaci submukózních žláz a pohárkových buněk s následkem korozivního poškození epitelu a ztrátou řasinek. To může mít za následek:

1. Pocity mírného podráždění až pocity dosahující intenzivního pálení v oblasti hrudi
2. Dušnost a obtíže s dýcháním
3. Vznik zrychleného dýchání (po fázi pomalého dýchání) po přibližně několika sekundách až minutách
4. Akutní bronchitida a zápal plic

U symptomů zahrnutých v bodech 1. – 3. dochází k jejich rozvoji v čase menším než 1 minuta a jejich závažnost se odvíjí od doby expozice. Příznaky z bodu 4. se mohou projevit po delší době, až v řádech dnů, a jejich závažnost závisí na inhalované dávce. [13]

V případě plicních sklípků dochází k zasažení tenkého respiračního epitelu, pneumocytů typu 1 a 2, Clarových buněk. Dráždivé zplodiny způsobí korozivní poškození, které začíná otokem, ten je následován zánětem. Zasažení výše zmíněných částí má za následek:

1. Otok
2. Zánět
3. Ucpání plicních sklípků
4. Zápal plic

K rozvoji otoku dochází v rámci několika hodin a jeho rozvoj je závislý na dávce, které byl člověk vystaven. U bodů 2.-4. dochází k postupnému rozvoji dalších příznaků během několika dnů nebo hodin. Stejně jako u otoku je jejich závažnost závislá na dávce. [13]

Koncentrace způsobující vážné smyslové podráždění se pohybují v rozmezí již od 0,1 do 1 ppm pro nejvíce toxické látky, až po 5000 – 15 000 ppm pro aceton a ethanol. Formaldehyd a chlor působí silně dráždivě při koncentracích 1–10 ppm a kyselé plyny (oxid siřičitý, halogenovodíky a oxid dusičitý) při koncentraci o rozsahu 100–1000 ppm. Vztah mezi koncentrací konkrétní dráždivé chemické látky, která způsobuje závažné smyslové podráždění, a expoziční dávkou, způsobující fatální zápal plic, se u krys značně liší.

3.4.2 Působení strachu, pohybu a inhalace zplodin hoření na výměnu plynu v plicích

V následující tabulce jsou představeny účinky dusivých plynů, rozvoj hypoxie, účinky ovlivňující fungování plic a dýchání, zejména účinky na minutový objem vdechovaného vzduchu. Cokoli, co má tendenci zvětšovat objem vdechovaného vzduchu během požáru zároveň zvyšuje i rychlost absorpce všech přítomných dusivých plynů a dochází ke zkrácení času způsobilosti pro únik. [13]

Tabulka 3-5 Efekty strachu, pohybu a vdechnutých zplodin hoření na výměnu plynu v plicích [13]

	Základní efekt	Následek	Efekt na příjem kyslíku v plicích
Strach/úzkost	Zvýšení minutového objemu vdechovaného vzduchu	Zvýšení příjmu všech plynů	Zlepšení příjmu kyslíku
Pohyb	Zvýšení minutového objemu vdechovaného vzduchu	Zvýšení příjmu všech plynů	Zlepšení příjmu kyslíku
Vdechnutí CO_2	Zvýšení minutového objemu vdechovaného vzduchu	Zvýšení příjmu všech plynů	CO_2 vytěsňuje kyslík ze všech plynů, snižuje parciální tlak kyslíku, ale v důsledku hyperventilace zlepšuje příjem kyslíku
Snížená koncentrace kyslíku ve vdechovaném vzduchu	Částečné zvýšení minutového objemu vdechovaného vzduchu	Zvýšení příjmu všech plynů	Snížení příjmu kyslíku, okamžitá hypoxie, expozice velmi nízkým hladinám vlastně způsobuje odstranění kyslíku z krve v žilách
Vdechnutí CO	Žádný okamžitý efekt	Příjem CO závislý na minutovém objemu vdechovaného vzduchu, CO ppm a procentu karboxyhemoglobinu	Žadný efekt dokud nedojde ke ztrátě vědomí, která je způsobená poklesem minutového objemu vdechovaného vzduchu
Vdechnutí HCN	Po několika v závislosti na vdechnuté koncentraci způsobuje zvýšení minutového objemu vdechovaného vzduchu	Příjem HCN závisí na minutovém objemu vdechovaného vzduchu a koncentraci HCN	Prvotní nárůst, potom pokles
Vdechnutí NO	Žádný okamžitý efekt	Příjem závisí na minutovém objemu vdechovaného vzduchu a koncentraci NO	Žádný významný efekt; při nízkých hladinách otevírá dýchací cesty

3.5 Dávka a koncentrace toxických látek

Před zvážením konkrétních účinků jednotlivých toxických zplodin je nutné určit základní parametry potřebné pro kvantifikaci expozice. Nakonec je určen stupeň toxicity, který je určen faktory jako koncentrace toxické látky v cílovém orgánu lidského těla a časovým intervalem, po který je toxická koncentrace zachována. Pro dusivé látky je nejdůležitějším kritériem koncentrace v prokrvení mozku nebo uvnitř mozkových buněk. Zatímco v případě dráždivých látek je nejdůležitější koncentrace ve sliznici nosu, krku nebo plicích. V případě oxidu uhelnatého to není koncentrace v kouři, která by určila, jak bude člověk zasažen, ale koncentrace nahromaděná v krvi ve formě karboxyhemoglobinu. [7]

Přestože parametry jako dýchání a velikost částic aerosolů jsou důležité, nejzákladnějšími nahlášenými parametry jsou koncentrace toxinu a trvání expozice, což umožňuje základní odhad dávky. Pro obecné hodnocení bezpečnosti nových chemických látek pro akutní expozici je používána standartní jednorázová čtyřhodinová expozice a toxicita se vyjadřuje jako koncentrace způsobující smrt 50 % zvířat během expozice nebo do čtrnácti dní po expozici. [7]

Některé toxické účinky nejsou závislé na dávce, ale jsou závislé na koncentraci. Tedy například dráždivé působení kouře na oči a horní dýchací cesty se objevuje bezprostředně po expozici a

vážnost podráždění je závislá na koncentraci toxických látek v prostoru. Ve skutečnosti se efekty s pokračující expozicí nezhoršují, ale naopak zmírňují, neboť subjekt se bolestivému přizpůsobí, přestože se dávka zvyšuje. [7]

Další případy, u kterých je koncentrace i délka expozice důležitým faktorem, jsou dusivé efekty při nedostatku kyslíku a vysoké koncentrace oxidu uhličitého. Pokud je subjekt náhle vystaven prostředí s nízkou koncentrací kyslíku, je potřeba určitý čas, aby se vzduch v plicích a plyny v krvi vyrovnali s novými podmínkami. Z tohoto důvodu dochází do jisté míry k hypoxii během určité doby.[7]

Toxicita látka závisí na tom, kolik je jí pro daný účinek potřeba. Čím menší množství je zapotřebí, tím je látka toxičtější. Například při požárech je kyanovodík 20 až 40krát více toxický než oxid uhelnatý, protože množství, které je třeba vdechnout pro ztrátu vědomí, je mnohem menší než pro oxid uhelnatý. Nebezpečí při požáru způsobené toxicitou závisí na tom, které toxické produkty během požárního scénáře představují nebezpečí pro obyvatele budov. Zjednodušeně řečeno, nebezpečí je závislé na tom, jak rychle a kolik toxických zplodin je produkováno a jak moc toxické jsou.

Toxicita může být zvažována z hlediska:

1. Samotný toxický plyn (např. oxid uhelnatý nebo kyanovodík)
2. Směs toxických zplodin (např. dusivý efekt směsi oxidu uhelnatého a kyanovodíku nebo dráždivý efekt směsi kyselin a plynů)
3. Směs toxických látek vzniklých tepelným rozkladem konkrétního materiálu za určitých podmínek (např. dřevo nebo polyethylen)

Při rozkladu jednotlivých materiálů při požáru nebo během testů toxicity zplodin hoření jsou produkovány řady dráždivých a dusivých toxických produktů. Celková toxicita vzniklé směsi bude záviset na množství toxických látek a míře jejich toxicity. Pro konkrétní materiál bude míra toxických produktů závislá na podmínkách tepelného rozkladu (bezplamenné oxidační hoření, dobře odvětrávané hoření, nedokonalé hoření). Obecně materiály produkují větší množství toxických zplodin při bezplamenném a nedokonalém hoření a nižší množství při plamenném hoření s dostatečným přísunem vzduchu.

Tabulka 3-6 znázorňuje příklady smyslově dráždivých účinků zplodin hoření materiálů. Hodnota RD_{50} v tabulce představuje koncentraci, která způsobí 50 % pokles frekvence dýchání u myší při krátkodobě expozici. Z této koncentrace byla stanovena koncentrace, která způsobuje silné podráždění u lidí.

Tabulka 3-6 Smyslové a plicní podráždění způsobené zplodinami hoření [7]

Dráždivá látka	RD_{50} – myši (ppm)	Těžké smyslové podráždění u lidí (ppm)	30 minut LC_{50} – savci (ppm)	LC_{50}/RD_{50}
toulendiisokyanát	0,20	1	100	500
o-chlorbenzylidenmalono-nitril	0,52	0,5	150-400	529
chlóracetonfenon	0,96	6-50	300-400	365
akrolein	1,70	1-5,5	140-170	91
formadehyd	3,10	5-10	700-800	242
chlór	9,30	9-20	100	11
oxid siřičitý	117	5-100	300-500	3
amoniak	303	700-1700	1400-8000	16
fluorovodík		120	900-3600	
chlorovodík	309	100	1600-6000	12
bromovodík		100	1600-6000	
oxid dusičitý	349	80	60-250	0,4
styren	980	>700	10 000 – 80 000	46
acetaldehyd	4946	>1500	20 000-128 000	15
ethanol	27 314	>5000	400 000	15
aceton	77 516	>12 000	128 000-250 000	2

Hodnoty smrtelně nebezpečných koncentrací možných zplodin hoření (CO, HCN, HCl apod.) pro různé druhy zvířat pro expozici trvající 30 minut byly určeny na základě experimentů. Z tabulky 3-7 je možno vypozorovat, že v případě chlorovodíku a kyanovodíku zvládnou primáti odolat až 1,3krát větší koncentraci než krysy. Oproti tomu krysy zvládnout odolávat až 1,6krát vyšší koncentraci oxidu uhelnatého. [13, 21]

Tabulka 3-7 Porovnání smrtelného toxického vlivu možných zplodin hoření (při 30 minutové expozici) pro různé druhy zvířat[13, 21]

Chemická látka	Myši	Krysy	Morčata	Primáti/lidé
oxid uhelnatý (ppm)	3500	5000-6600	17500	2500-4000
kyanovodík (ppm)	-	110-220	201	170-230
chlorovodík (ppm)	2644	3800	1350	5000
nízký obsah kyslíku (%)	6,7	5,4	-	6-7

Navrhované meze udržitelnosti nemohou být nikdy přesně ověřeny, neboť potřebné experimenty na lidech nelze provádět, rovněž možné určit spodní hranici bezpečnostních limitů. Z tohoto důvodu představují nejlepší vodítka mohou poskytnou pouze znalí toxikologové se základními údaji o lidech a zvířatech. Existují obavy, že navrhované limitní hodnoty jsou příliš nízké pro využití v praxi požárně bezpečnostního inženýrství a představují příliš široký interval pro bezpečnostní limit. V této souvislosti je důležité zvážit skutečnost, že navrhované meze udržitelnosti byly určeny k tomu, aby byly aplikovány v dýchací zóně potenciálního uživatele budovy, a ne v přímé blízkosti zdroje požáru. V případě vzniku požáru je pravděpodobné, že od momentu zapálení do překročení limitních hodnot v dýchací zóně uběhne nějaký čas a obyvatel budovy bude v určité vzdálenosti od zdroje požáru. Skutečně použité limity byly vybrány s přihlédnutím na únik a přežití v nouzové situace a značně překračují limity určující hygienickou úroveň. [7]

V tabulce 3-8 jsou uvedeny prahové koncentrace pro nejběžnější látky, vyskytující se ve zplodinách hoření. Jedná se o látky, které mohou významně ovlivnit schopnost uniknout u většiny osob. S přihlédnutím na více citlivé jedince se doporučuje, aby návrhové prahové koncentrace byly 0,3násobkem hodnot uvedených v tabulce. [13]

Tabulka 3-8 Koncentrace a dávky zhoršující podmínky úniku, způsobující neschopnost pohybu a smrtelné poškození plic [7, 13]

Plyn	Předpokládaná koncentrace ovlivňující únik u běžného člověka (ppm)	Předpokládaná koncentrace způsobující neschopnost pohybu u běžného člověka (ppm)	Předpokládaná dávka, která je při expozici smrtelná pro polovinu populace (ppm min)
chlorovodík (HCl)	200	900	114 000
bromovodík (HBr)	200	900	114 000
fluorovodík (HF)	200	900	87 000
oxid siřičitý (SO_2)	24	120	12 000
oxid dusičitý (NO_2)	70	350	1900
oxid dusnatý (NO)	-	>1000	~30 000
akrolein (CH_2CHO)	4	20	4500
formaldehyd (HCHO)	6	30	22 500

U plicního podráždění závisí efekt na dávce, která se hromadí po celou dobu expozice. Aby bylo možné tento efekt vypočítat, je pracováno s dílčí smrtelnou dávkou (fractional lethal dose – FLD). Jedná se o poddruh FED pracující se smrtelností. Pro každou dráždivou chemickou látku je počítána v krátkých časových intervalech, například každých 10 sekund. Rovnice FLD pro smrtící efekt inhalovaných dráždivých látek:

$$FLD_{irr} = FLD_{HCl} + FLD_{HBr} + FLD_{HF} + FLD_{SO_2} + FLD_{NO_2} + FLD_{CH_2CHO} + FLD_{HCHO} + \sum FLD_x \quad (3\text{-}7)$$

Pokud FLD=1 znamená to, že subjekt vdechl dostatečnou dávku dráždivých látek, která může vést k smrti způsobené zápalem plic několik hodin po expozici.

FLD nepočítá s nejistotami souvisejícími s dostupnými údaji nebo s mezidruhovými rozdíly. Zároveň nepřipouští možnost vážného subletálního poškození plic. [13]

V tabulce 3-9 jsou představeny hodnoty koncentrace LC_{50} plynů běžných ve zplodinách hoření, které jsou v současné době akceptované.

Tabulka 3-9 V současné době přijatelné hodnoty koncentrace LC_{50} pro plyny běžné ve zplodinách hoření

Plyn	Koncentrace (ppm)
CO	5700
HCN	165
HBr	3800
HF	2900
SO_2	400-1400
NO_2	170

4 Praktická část – Smokebox

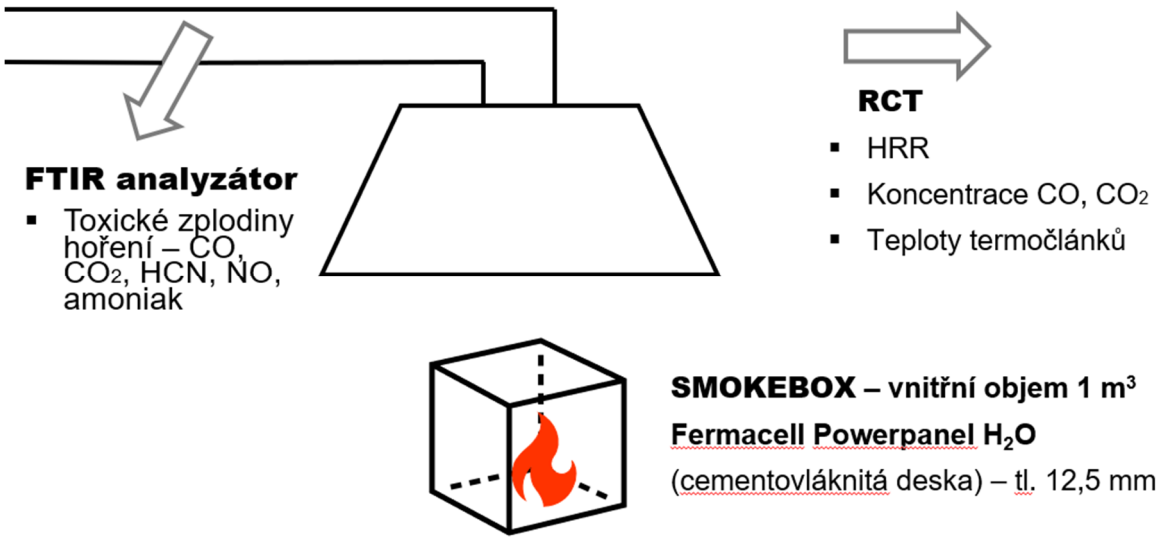
4.1 Představení experimentu a konstrukce Smokeboxu

Pro experimentální část této diplomové práce byl na základě vypracované výkresové dokumentace experimentální pomůcky Smokebox. Toto zařízení bylo použito k pálení vzorků materiálů za různých podmínek odvětrání. Celkem byly provedeny dvě sady měření. První byla složena z dvou experimentů, druhá ze tří.

Zplodiny hoření byly analyzovány pomocí FTIR analyzátoru. Předmětem měření bylo vypozorovat jaké chemické látky se ve zplodinách hoření nacházejí a zjistit jejich koncentrace. Výsledné koncentrace jednotlivých látek byly převedeny na hmotnost a porovnány mezi sebou.

Dále byly pomocí Room Corner Testu (RCT) sledovány křivky rychlosti uvolňování tepla (HRR) a u druhé sady experimentů i teploty zaznamenané pomocí pěti osazených termočlánků.

Na obrázku 4-1je experiment schematicky znázorněn – místo spalování vzorku experimentální pomůcka Smokebox, odsávací zvon s VZT vedením a vzorkováním do FTIR analyzátoru a RCT. Pomocí FTIR analyzátoru byly zjišťovány koncentrace oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého, oxidu dusného, kyanovodíku a amoniaku. Z výsledků RCT byla pro účely této diplomové práce analyzována primárně rychlost uvolňování tepla, koncentrace oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. Při druhé sadě experimentů byly pomocí RCT zaznamenávány i teploty na pěti osazených termočláncích.



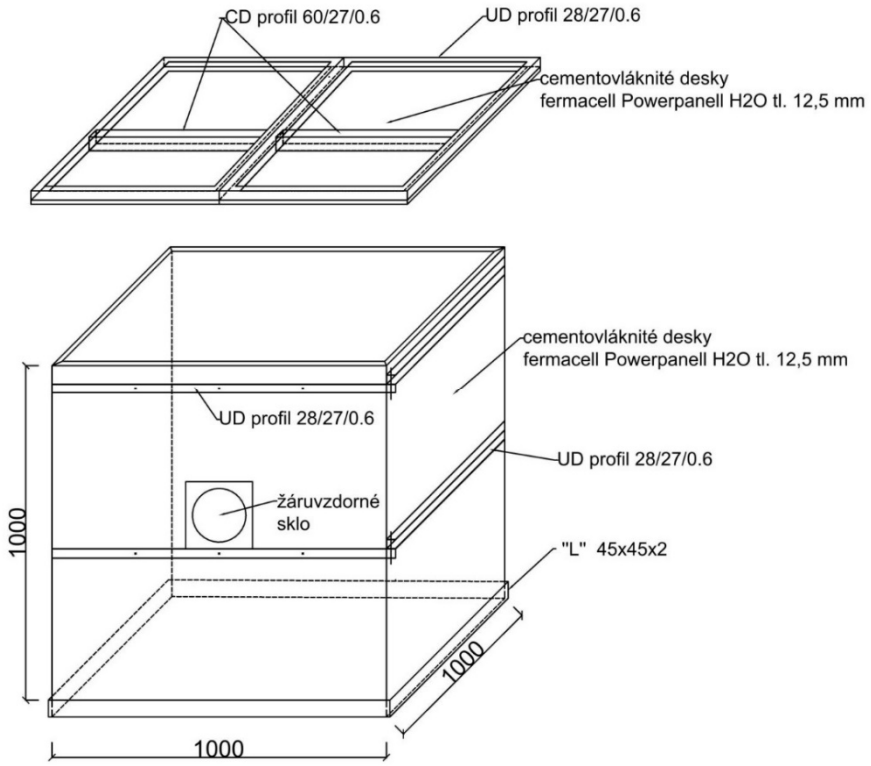
Obrázek 4-1 Schématické znázornění experimentu

Vnitřní rozměry měřícího prostoru byly 1000 mm × 1000 mm × 1000 mm. Smokebox byl vyroben z cementovláknitých desek fermacell Powerpanell H_2O tloušťky 12,5 mm. Vyztužení boxu bylo řešeno pomocí UD profilů, CD profilů a ve spodní části pomocí L profilu.

Boční stěny jsou tvořeny cementovláknitými deskami fermacell Powerpanell H_2O o rozměrech 1000 mm × 1045 mm. Každá stěna bude po své výšce vyztužena dvěma UD profily 28/27/0,6, které od sebe budou vzdálené přibližně 456 mm. UD profily dvou sousedících stěn byly rozmístěny po výšce tak, aby bylo možné je vzájemně spojit pomocí závlaček. V jedné z bočních stěn byl vytvořen otvor, který z vnější strany chránilo žáruvzdorné sklo. Otvor sloužil pro kontrolu a pozorování dění uvnitř Smokeboxu.

Konstrukce dna byla vytvořena z L profilů 45 mm × 45 mm × 2 mm, které byly svařeny tak, aby vytvořily čtverec o rozměrech 1036 mm × 1036 mm. K L profilům byly po celém obvodě pomocí vrutů přivrtány UD profily 28/27/0,6. Konstrukce podlahy byla dále vyztužena třemi CD profily 60/27/0,6, které byly vsazeny do UD profilů a pomocí vrutů přivrtány. Na takto připravenou konstrukci byla připevněna deska fermacell Powerpanell H_2O o rozměrech 1000 mm × 1000 mm.

Smokebox byl opatřen dvoudílným víkem z desek fermacell Powerpanell H_2O o celkových rozměrech 1126 mm × 1126 mm. Rozměry jednoho dílu jsou přibližně 563 mm × 1126 mm. Oba díly byly po svém obvodě vyztuženy UD profily 28/27/0,6. Za účelem dosažení větší tuhosti obou dílů byl v polovině delší strany umístěn CD profil 60/27/0,6 v horizontálním směru.



Obrázek 4-2 Zjednodušené axonometrické zobrazení Smokeboxu

a) Smokebox bez víka

b) Smokebox s víkem

Obrázek 4-3 Smokebox

Obrázek 4-4 Vnitřek Smokeboxu

a) Otvor s žáruvzdorným sklem

b) Horní část Smokeboxu

Obrázek 4-5 Části Smokeboxu

a) Detail spoje bočních stěn

b) Detail usazení bočních stěn do konstrukce dna

Obrázek 4-6 Detaily konstrukce Smokeboxu

4.2 První sada experimentů

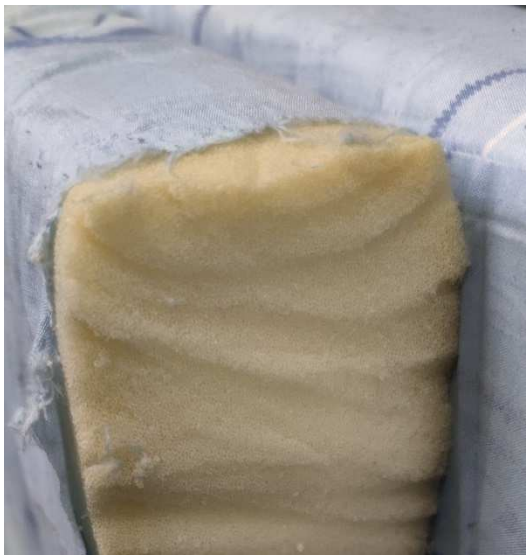
V rámci experimentální části této diplomové práce bylo celkem provedeno pět experimentů. Při experimentech byla využita konstrukce Smokeboxu, do které byl vždy vložen materiál. Vzdálenost polovin vík byla při každém experimentu upravena, což zajistilo různé podmínky odvětrání u jednotlivých experimentů. Prezentované hodnoty byly synchronizovány k nule při zapálení. Záznam pomocí FTIR analyzátoru i RCT probíhal již dobu před zapálením.

První sada experimentů sloužila zejména pro ověření funkčnosti FTIR analyzátoru, RCT a pro stanovení optimálních poměrů materiálů vložených do Smokeboxu.

4.2.1 První experiment

V rámci prvního experimentu byla do Smokeboxu vložena polyuretanová matrace. Rozměry matrace byly 900 mm × 2000 mm × 70 mm. Její hmotnost byla 3,4 kg. Za účelem umístění do Smokeboxu byla matrace rozpůlena.

a) Tloušťka matrace



b) Detail řezu matrace

Obrázek 4-7 Matrace použitá pro první experiment

Společně s matrací bylo v rámci prvního experimentu do Smokeboxu vloženo dřevo. Hmotnost dřeva byla přibližně rovna hmotnosti matrace. Celková hmotnost vložených materiálů byla 7,06 kg. Nejprve bylo do Smokeboxu vloženo dřevo, které bylo naskládáno na sebe. Na dřevo byla poté položena první polovina matrace a přímo na ni byla položena polovina druhá.

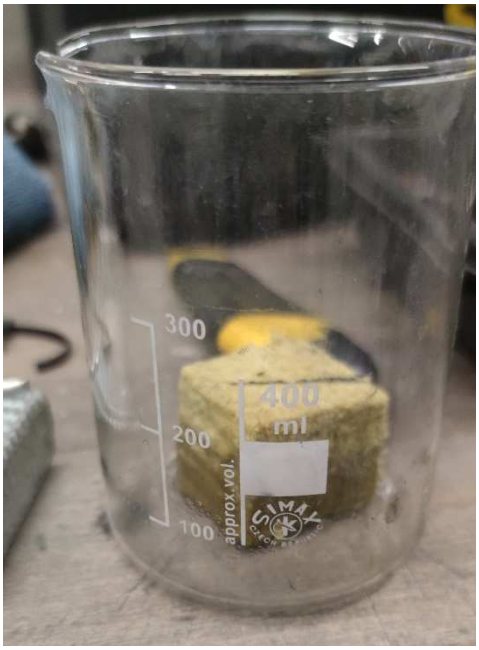
a) Dřevo vložené do Smokeboxu

b) Matrace položená na dřevo ve SB

Obrázek 4-8 Skladba materiálů ve Smokeboxu při prvním experimentu

Poté byla uříznuta krychle z minerální vaty, která byla následně namočena cca do 50 ml Izopropanolu. Po nasáknutí Izopropanolem byla krychle položena na matraci.

U prvního experimentu bylo víko otevřeno na 25 %.



a) Krychle z minerální vaty nasáklá Izopropanolem

b) Umístění částí víka na Smokebox

Obrázek 4-9 Experiment před zapálením – experiment 1

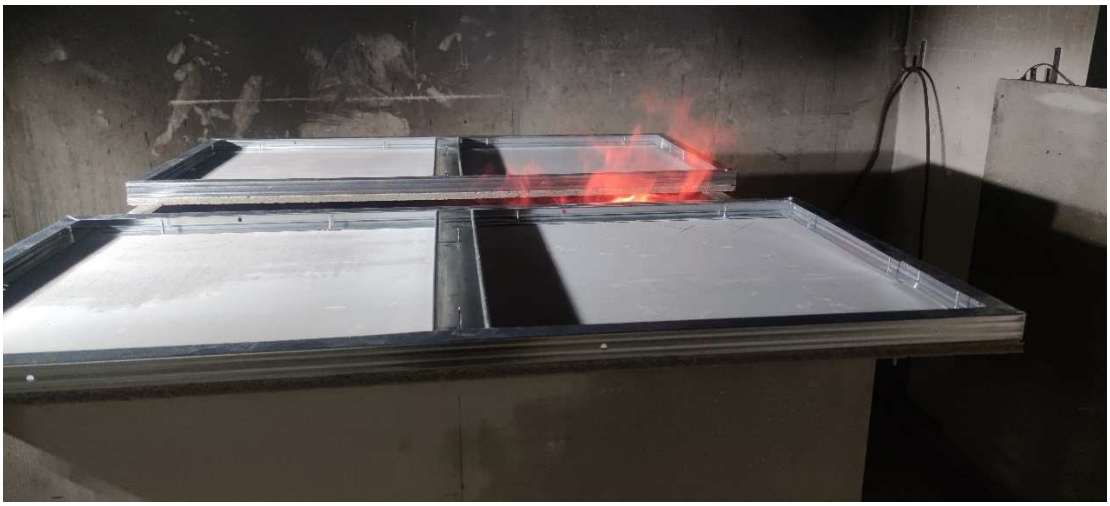
Po usazení částí víka byl pomocí zapalovače zapálen Izopropanol nasáklý v minerální vatě. Plamen se velmi rychle začal šířit po potahu matrace a pomalu začala hořet i samotná polyuretanová pěna v jádru matrace. Hoření polyuretanové pěny postupovalo velmi rychle.

a) Přibližně 1 minutu po zapálení

b) Přibližně 6 minut od zapálení

Obrázek 4-10 Pozorován průběhu hoření přes žáruvzdorné sklo – experiment 1

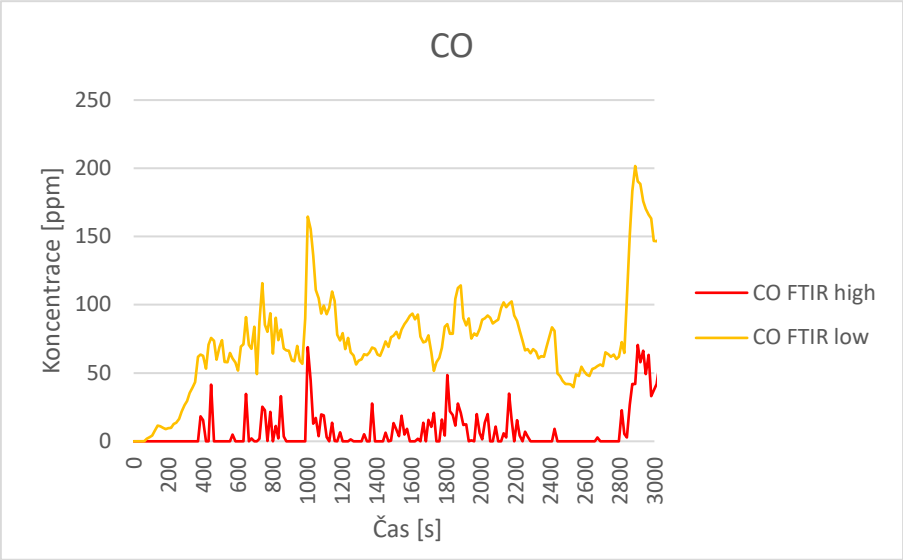
Obrázek 4-11 Vývoj kouře přibližně dvě minuty po zapálení – experiment 1



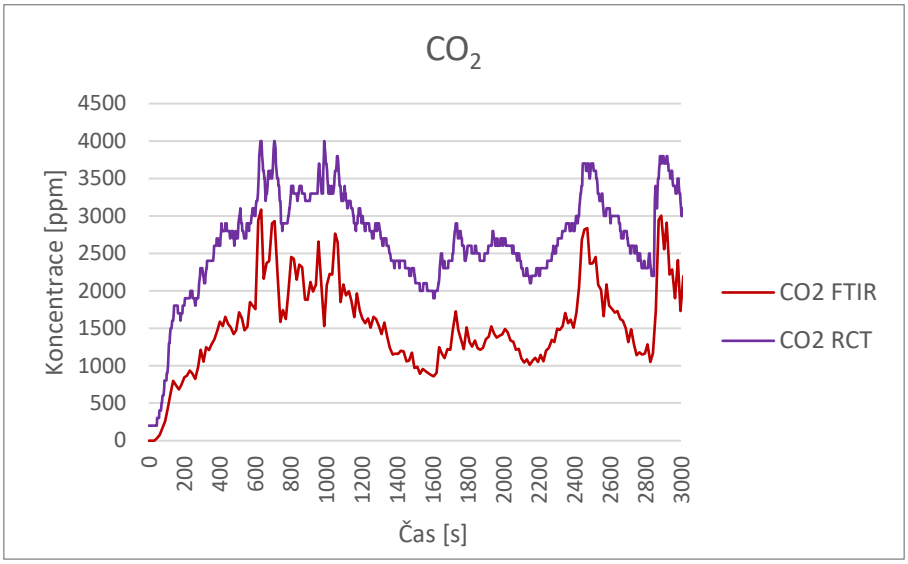
Obrázek 4-12 Vývoj hoření v sedmé minutě od zapálení – experiment 1

4.2.1.1 Analýza výsledků

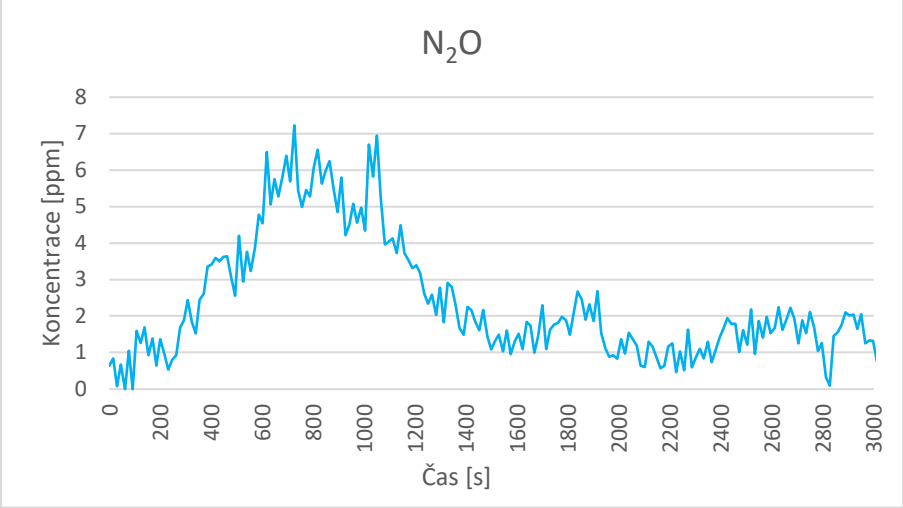
Na následujících obrázcích (4-13 až 4-16) jsou prezentovány výsledky pilotního experimentu. Představeny budou průběhy koncentrací oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého, oxidu dusného a amoniaku. Dále bude prezentována křivka rychlosti uvolňování tepla.



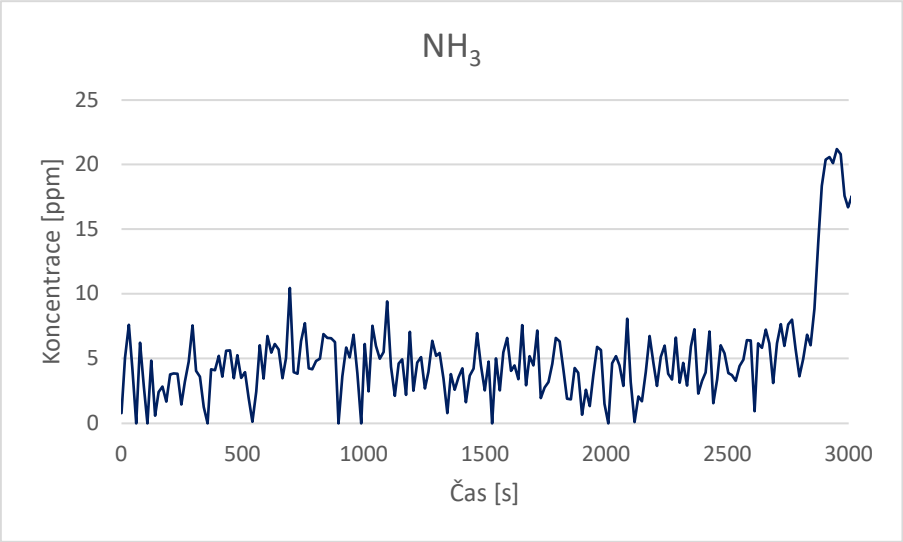
Obrázek 4-13 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhelnatého – experiment 1



Obrázek 4-14 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého – experiment 1



Obrázek 4-15 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 1



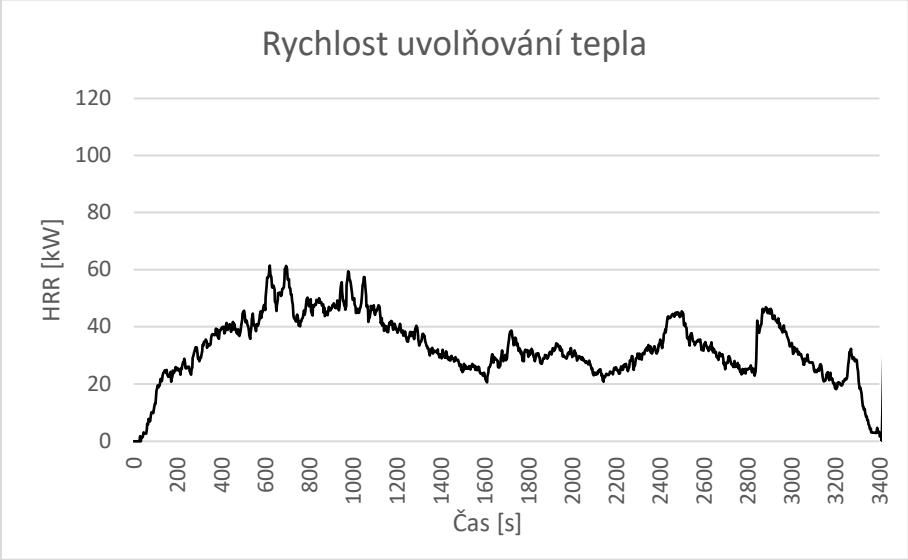
Obrázek 4-16 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 1

Odvětrání RCT bylo u prvního experimentu nastaveno na 30 %. Za těchto podmínek experiment probíhal 3421 sekund. Poté bylo zapnuto intenzivnější odvětrání.

U průběhu koncentrací můžeme oxidu uhličitého a oxidu dusného můžeme pozorovat, že křivky mají velmi podobný rostoucí trend. Koncentrace oxidu uhličitého dosáhla mnohonásobně vyšších hodnot oproti koncentraci oxidu dusného.

U oxidu uhelnatého můžeme u obou křivek pozorovat pozvolnější nárůst. Maximum, 201,69 ppm, bylo dosaženo v 2890. sekundě.

Koncentrace amoniaku kolísala po celou dobu experimentu mezi hodnotami 0-10 ppm. Významnější nárůst nastal až v 2897. sekundě, kdy pravděpodobně došlo ke kolapsu zbývajícího paliva ve SB.



Obrázek 4-17 Graf znázorňující rychlost uvolňování tepla – experiment 1

Obrázek 4-17 zobrazuje rychlost uvolňování tepla v průběhu prvního experimentu. Křivka dosahuje maxima 61,39 kW v 622. sekundě.

4.2.2 Druhý experiment

V druhém experimentu byla do Smokeboxu vložena matrace z polyuretanové pěny bez potahu. Rozměry matrace byly 900 mm × 2000 mm × 100 mm. Hmotnost matrace byla 5 kg. Do Smokeboxu nebylo u druhého, třetího, čtvrtého a pátého experimentu vloženo dřevo. Jediným palivem byla tedy vložená matrace.

V případě druhého experimentu bylo otevřeno na 33 %. Pro zapálení byla rovněž použita krychle z minerální vaty napuštěná Izopropanolem.

Obrázek 4-18 Počáteční sestava – experiment 2

Obrázek 4-19 Rozvoj během první minuty po zapálení – experiment 2

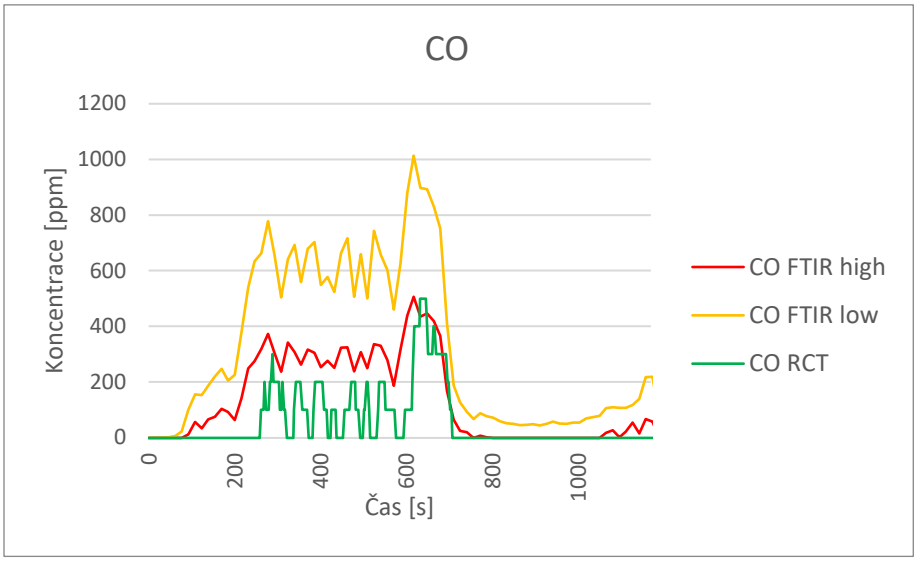
Obrázek 4-20 Rozvoj kouře 1 minutu po zapálení – experiment 2

Obrázek 4-21 Rozvoj hoření v 5. minutě po zapálení – experiment 2

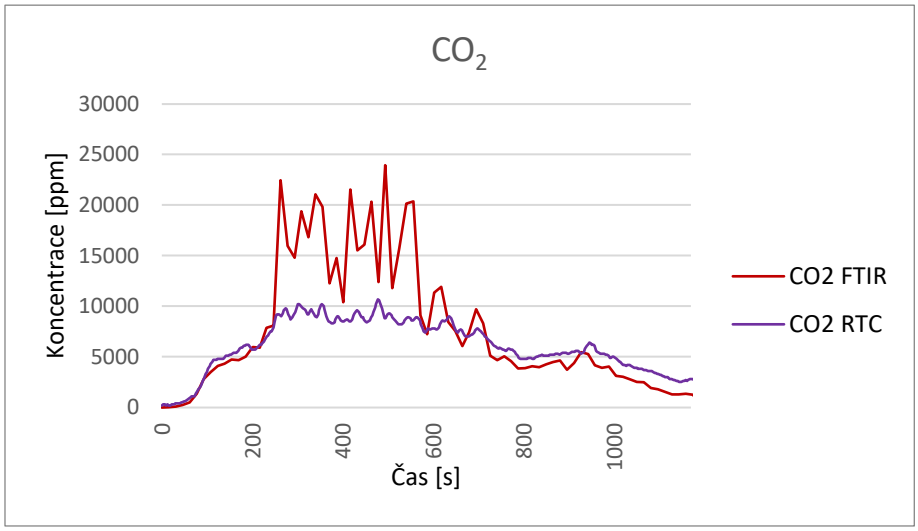
Obrázek 4-22 Rozvoj hoření v 11. minutě pozapálení – experiment 2

4.2.2.1 Analýza výsledků

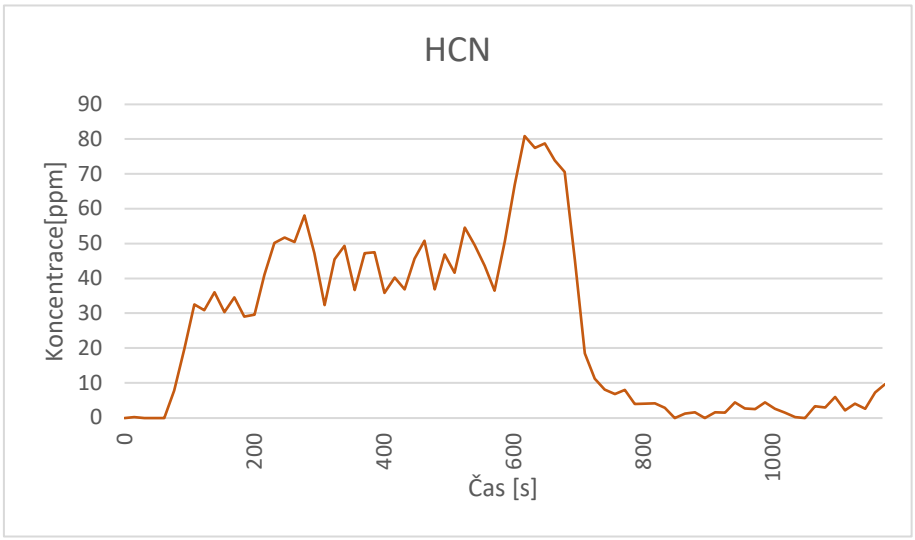
Následující obrázky (4-23 až 4-27) prezentují získané výsledky pomocí FTIR analyzátoru a RCT během druhého experimentu.



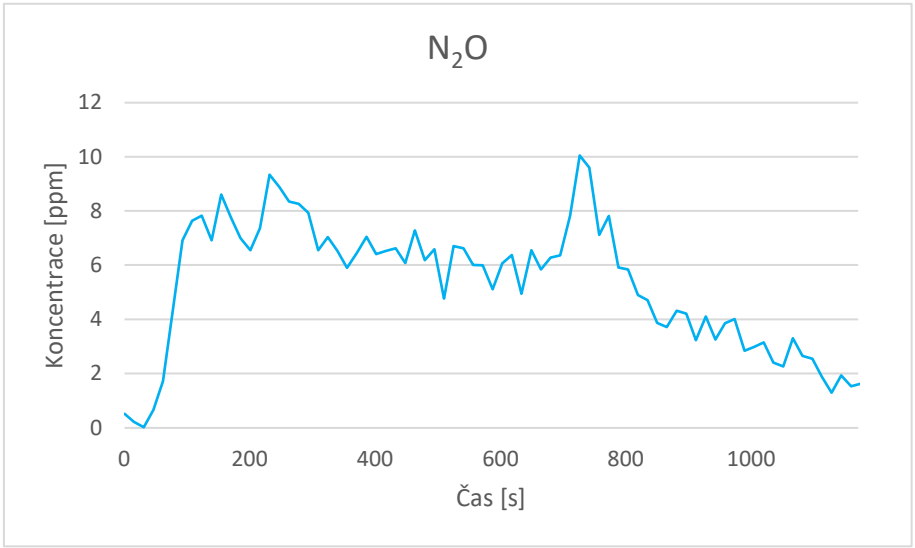
Obrázek 4-23 Graf znázorňující koncentraci oxidu uhelnatého – experiment 2



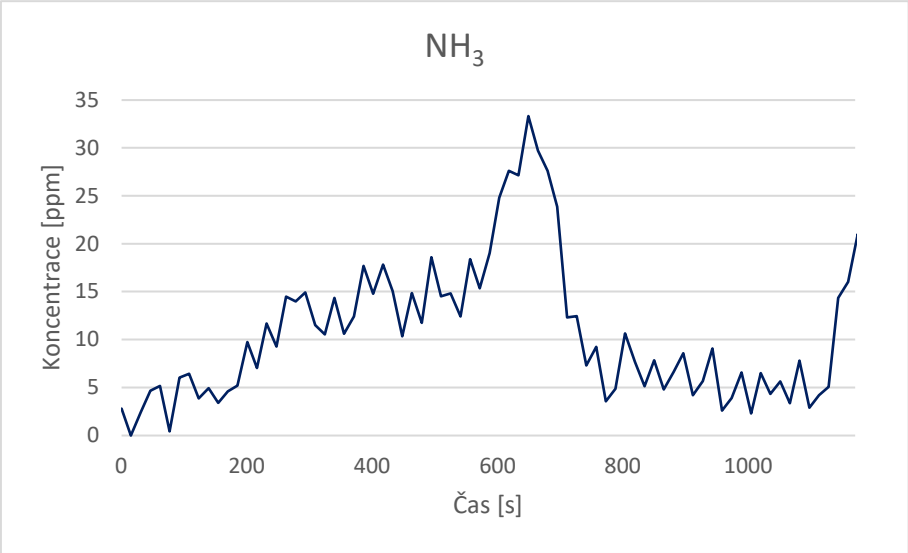
Obrázek 4-24 Graf znázorňující průběh koncentrací oxidu uhličitého – experiment 2



Obrázek 4-25 Graf znázorňující koncentraci kyanovodíku – experiment 2



Obrázek 4-26 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 2



Obrázek 4-27 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 2

Odvětrání RCT bylo pro účely experimentu nastaveno na 30 %. Za těchto podmínek experiment probíhal 1170 sekund. Poté bylo odvětrání zvýšeno na 80 %.

Na obrázcích 4-23 až 4-27 jsou zaznamenány průběhy koncentrací po dobu 1170 sekund.

Maximálních hodnot koncentrace dosáhly všechny chemické látky v intervalu od 494,5 s do 726,31 s. Maximální koncentrace oxidu uhelnatého a kyanovodíku byly naměřeny ve stejný čas, a to v čase 618,12 s.

Nejvyšších hodnot dosáhl oxid uhličitý. Jeho nejvyšší naměřená koncentrace byla 23940,25 ppm v čase 495, 5 s.

Obrázek 4-28 Graf znázorňující křivku rychlosti uvolňování tepla – experiment 2

Oproti prvnímu experimentu můžeme u křivky rychlosti uvolňování tepla pozorovat, že dosahuje více než dvojnásobných hodnot. Maximum, 156,98 kW, bylo pomocí RCT naměřeno v 466 sekundě.

4.3 Druhá sada experimentů

Druhá sada byla složena ze tří experimentů. Při zmíněných experimentech bylo použito stejné palivo. Lišilo se pouze procento otevření víka.

Pro všechny tři následující experimenty byl použit totožný druh matrace. Rozměry a hmotnost matrace byly 900 mm × 2000 mm × 100 mm a 5 kg. Matrace byla vždy před vložením do Smokeboxu rozdělena na poloviny.

Materiálové složení matrace: sypkovina – 100 % polyester, výplň – 100 % polyester, sypkovina spodní strana – polypropylen, pohodlná výplň – polyuretanová pěna.

Obrázek 4-29 Matrace použité pro experimenty 3–5

Pro tyto tři experimenty byl Smokebox dovybaven o pět termočlánků. Čtyři byly umístěny v rozích Smokeboxu a pátý byl umístěn do poloviny otvoru mezi částmi víka.

a) Termočlánky v rozích b) Termočlánek v otvoru mezi částmi víka

Obrázek 4-30 Umístění termočlánků – experimenty 3, 4, 5

Zapálení proběhlo, rovněž jako u první sady experimentů, za pomoci krychle z minerální vaty namočené v Izopropanolu.

4.3.1 Třetí experiment

V případě třetího experimentu byly poloviny víka umístěny tak, aby víko bylo otevřeno na 20 %.

Obrázek 4-31 Průběh hoření v čase t ≤5 min po zapálení – experiment 3

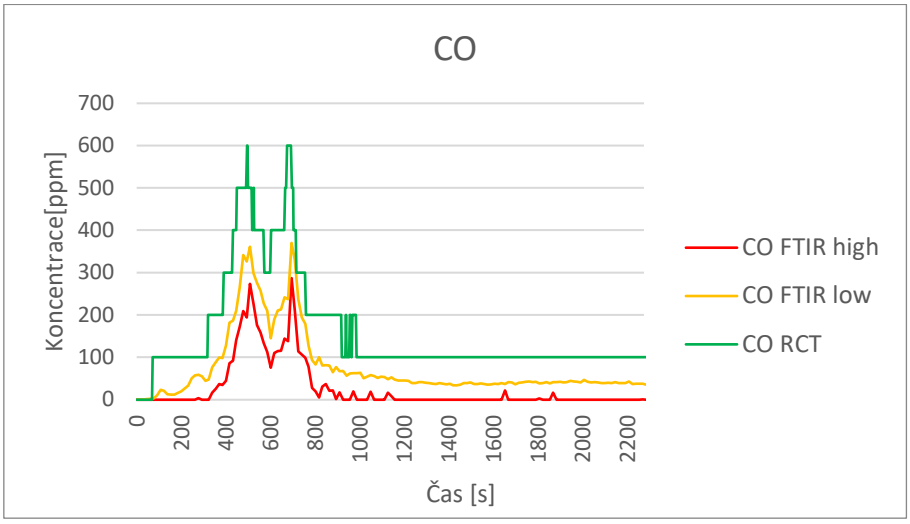
Obrázek 4-32 Vývoj kouře a hoření v čase t=12 min – experiment 3

Obrázek 4-33 Vývoj kouře a hoření v čase t=16 min – experiment 3

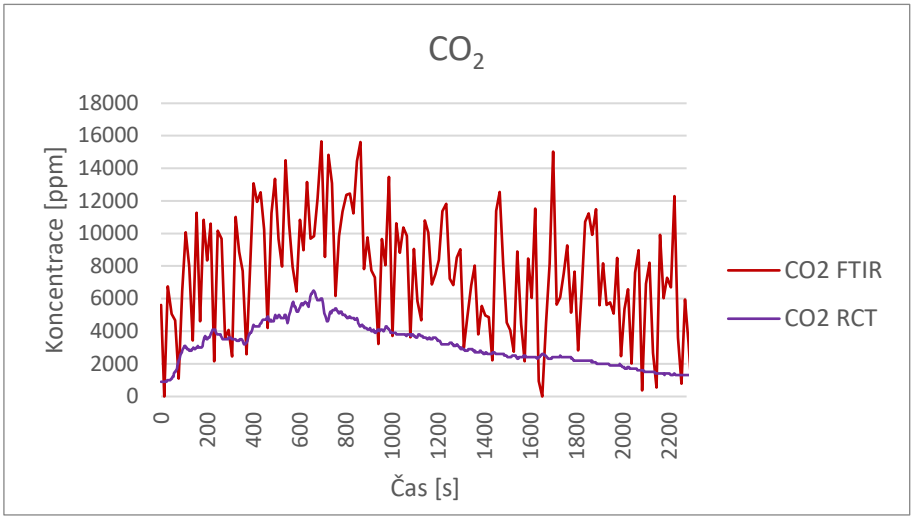
Obrázek 4-34 Zbytky paliva po sundání boční stěny SB – experiment 3

4.3.1.1 Analýza výsledků

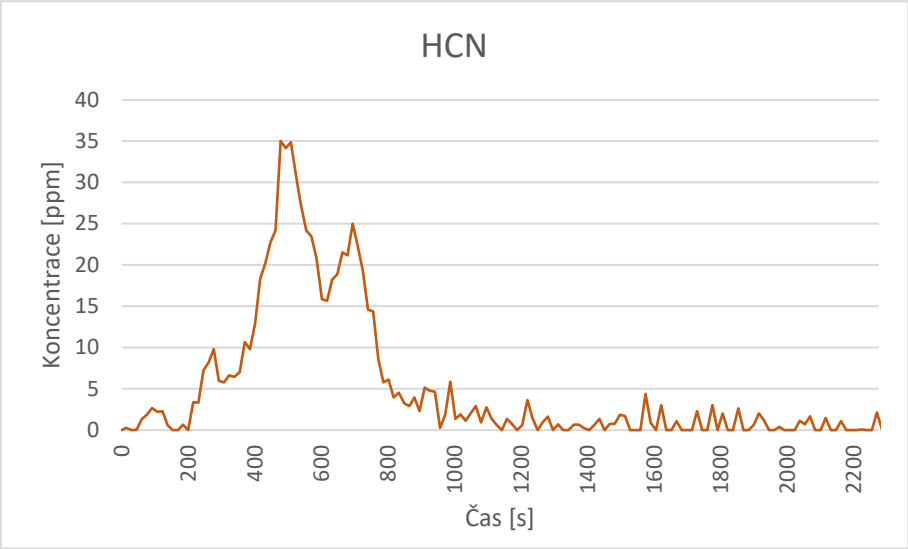
V této podkapitole jsou prezentovány průběhy koncentrací, rychlost uvolňování tepla a teplota dosažená na termočláncích během třetího experimentu.



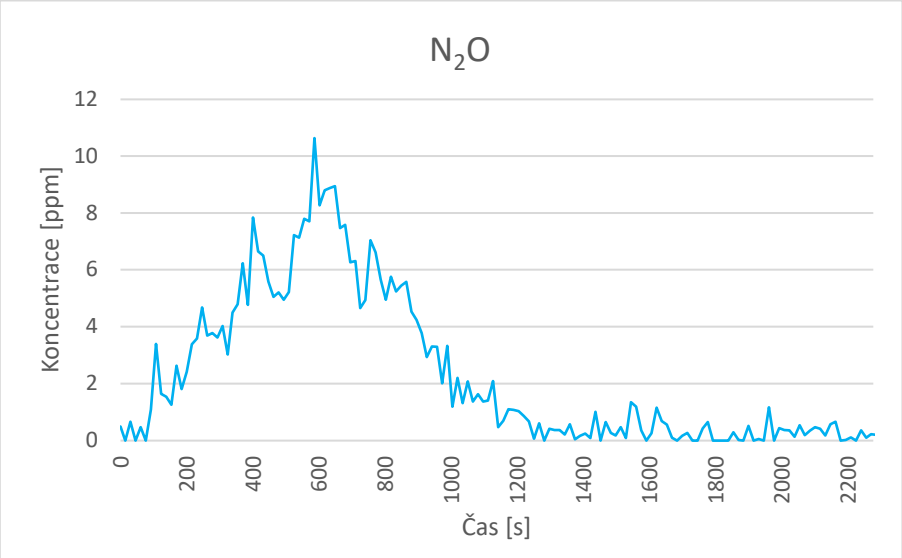
Obrázek 4-35 Graf znázorňující průběh koncentrací oxidu uhelnatého – experiment 3



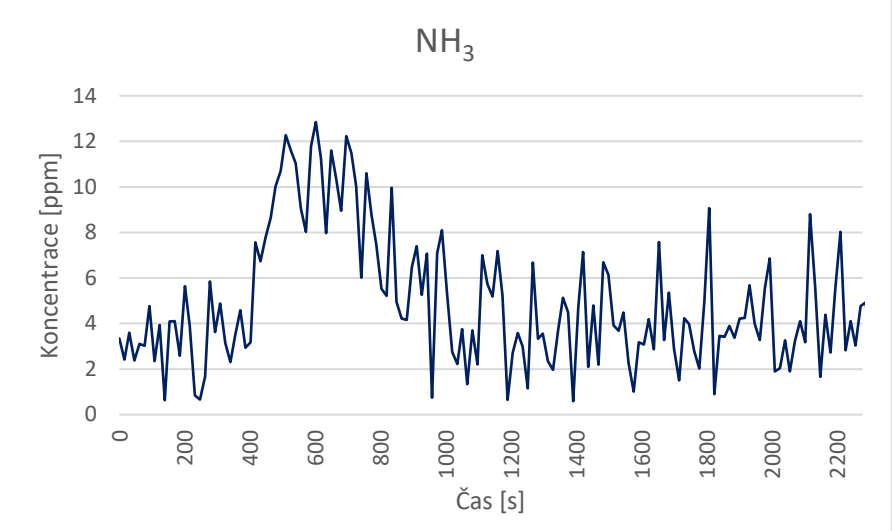
Obrázek 4-36 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého – experiment 3



Obrázek 4-37 Graf znázorňující průběh koncentrace kyanovodíku – experiment 3



Obrázek 4-38 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 3



Obrázek 4-39 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 3

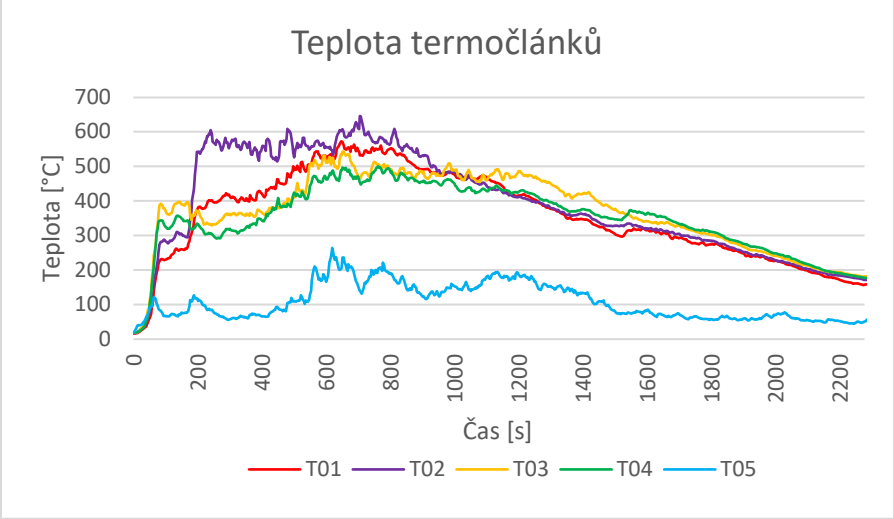
Na obrázcích 4-35 až 4-39 je možné pozorovat koncentrace vybraných chemických látek. Jedná se o oxid uhelnatý, oxid uhličitý, kyanovodík, oxid dusný a amoniak.

Průběh experimentu byl zaznamenáván 2379 sekund. Odvětrání RCT bylo v průběhu experimentu nastaveno v rozmezí 20–30 %. Za těchto podmínek experiment probíhal 2277 s. Poté bylo odvětrání zvýšeno na 50 %.

U všech grafů je patrný přibližně stejný rostoucí trend. K dramatičtějšímu nárůstu docházelo přibližně v 200. sekundě po zapálení. Nejvyšších hodnot koncentrací chemických sloučenin bylo dosaženo v časovém intervalu od 495. sekundy do 695. sekundy.

Obrázek 4-40 Rychlost uvolňování tepla – experiment 3

Na obrázku 4-40 je znázorněna křivka rychlosti uvolňování tepla. Maximální hodnoty 73,79 kW bylo dosaženo v čase 682 sekund.



Obrázek 4-41 Graf znázorňující průběh teplot na osazených termočláncích – experiment 3

Před začátkem experimentu bylo osazeno pět termočlánků T01 – T05. Termočlánky T01 až T04 byly osazeny do rohů Smokeboxu. Pátý termočlánek T05 byl připevněn na železnou tyč, která byla umístěna doprostřed otvoru mezi částmi víka. Toto rozmístění zůstalo totožné i u experimentu 4 a 5.

Maximální teploty dosáhl termočlánek T02, který byl umístěn v pravém předním rohu. Maximální hodnoty teploty 645,3 °C bylo dosaženo v 708. sekundě.

U termočlánku T05 můžeme pozorovat, že nárůst teploty je značně menší oproti ostatním termočlánkům. Tento jev byl způsoben tím, že hoření při 20 % otevření víka bylo velmi pozvolné a nedocházelo k prošlehávání plamene v okolí termočlánku.

4.3.2 Čtvrtý experiment

Při čtvrtém experimentu bylo víko otevřeno na 33 %.

a) Umístění krychle z minerální vaty b) Pohled na Smokebox

Obrázek 4-42 Příprava Smokeboxu před zapálením – experiment 4

Obrázek 4-43 Průběh hoření během druhé minuty po zapálení

a) Průběh v čase t=7 min

b) Průběh v čase t=12 min

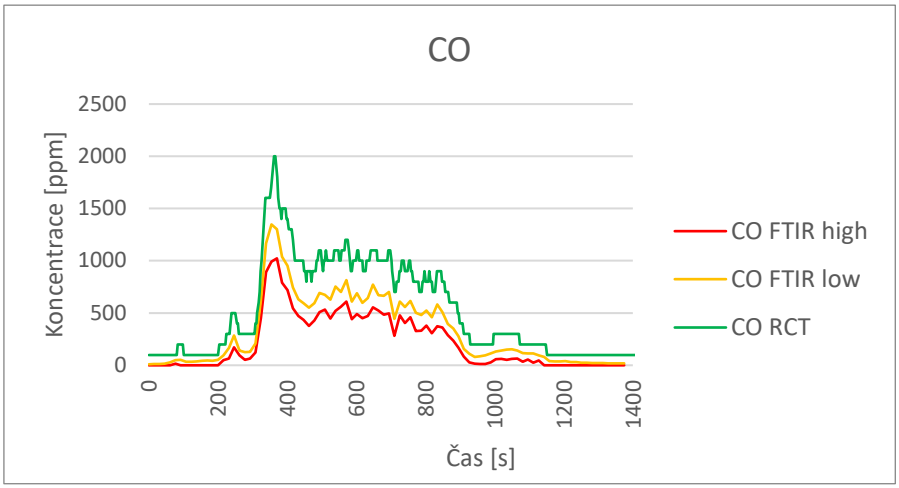
c) Průběh v čase t =17 min

Obrázek 4-44 Průběh hoření – experiment 4

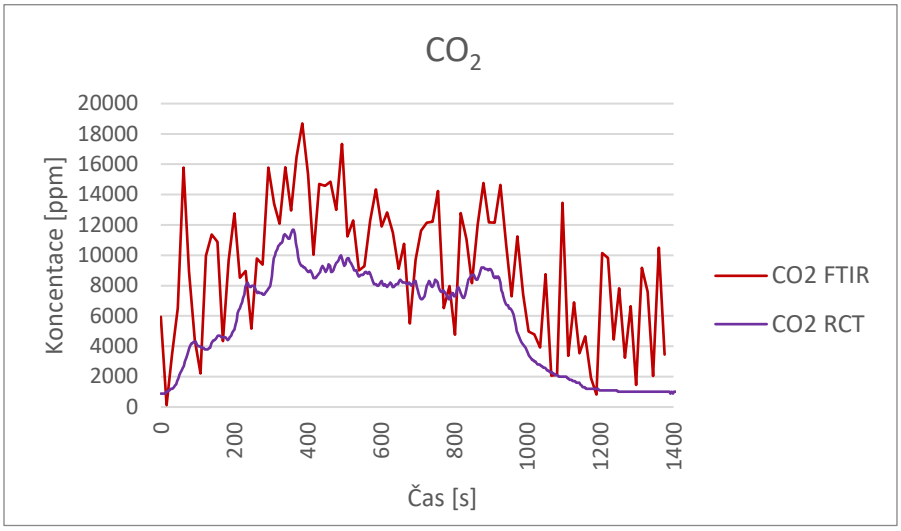
Obrázek 4-45 Zbytky paliva po sundání boční stěny – experiment 4

4.3.2.1 Analýza výsledků

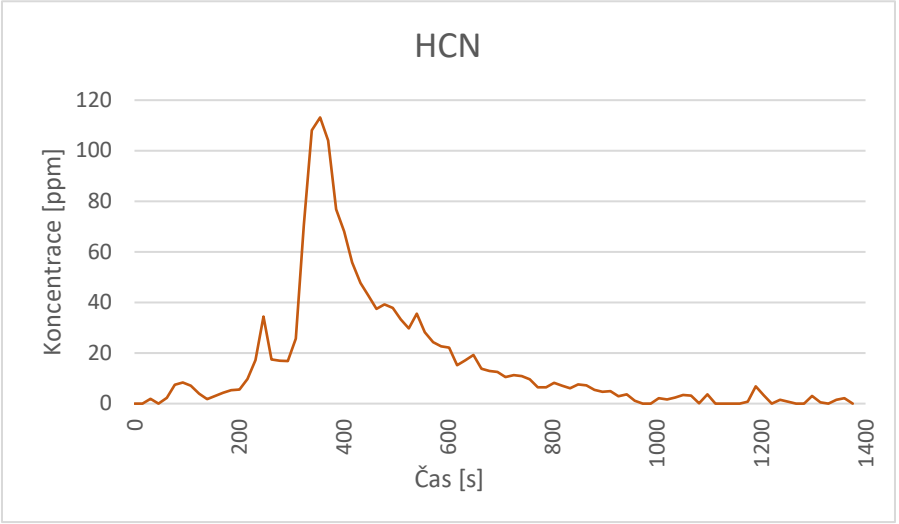
Na následujících obrázcích (4-46 až 4-50) jsou prezentovány výsledky získané při čtvrtém provedeném experimentu.



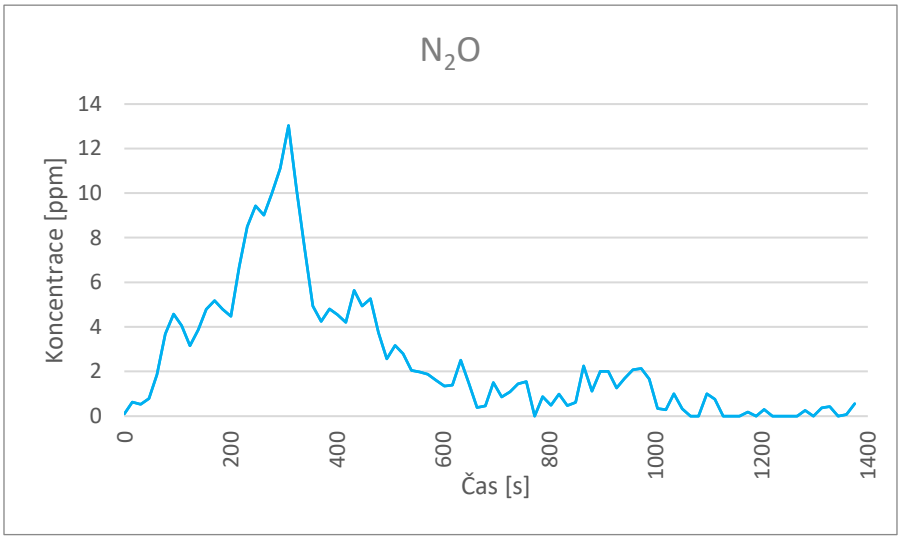
Obrázek 4-46 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhelnatého – experiment 4



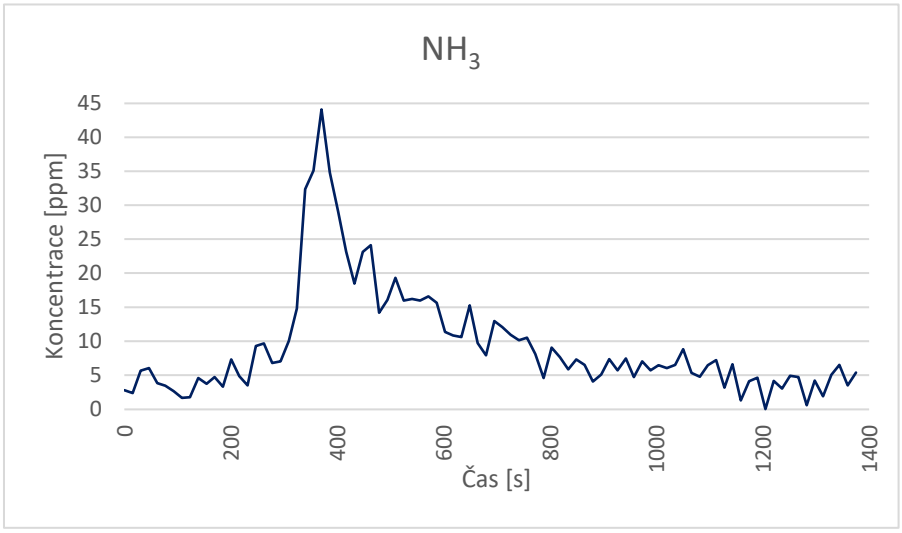
Obrázek 4-47 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého – experiment 4



Obrázek 4-48 Graf znázorňující průběh koncentrace kyanovodíku – experiment 4



Obrázek 4-49 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 4



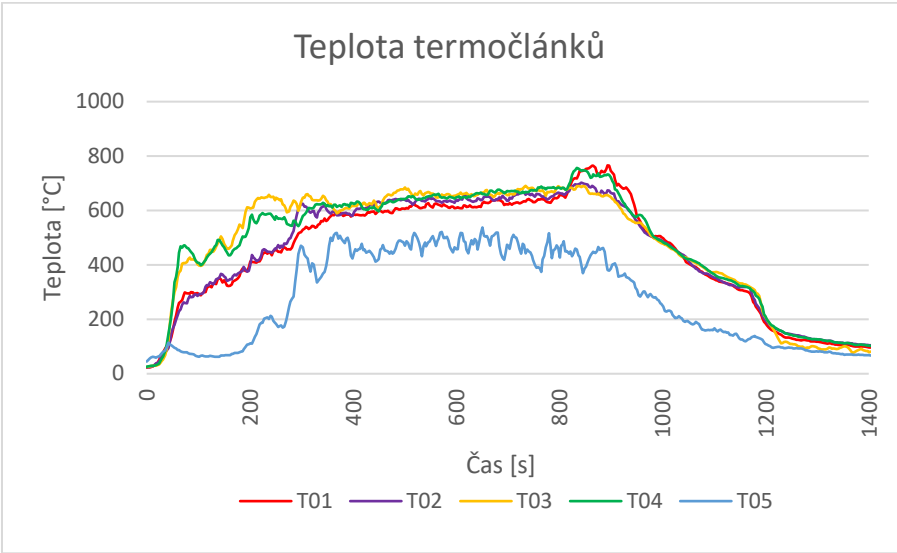
Obrázek 4-50 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 4

Experiment byl zaznamenáván po dobu 1640 sekund. Odvětrání RCT během čtvrtého experimentu bylo nastaveno na 30 %. Za těchto podmínek experiment probíhal přibližně 1119 sekund. Poté bylo odvětrání navýšeno na 80 % a postupně snižováno.

Na obrázcích 4-46 až 4-50 je zobrazen průběh koncentrací toxických látek. Opět se zde vyskytuje u všech grafů stejný rostoucí trend jako u grafů třetího experimentu. Hlavní nárůst nastal přibližně po dosažení času 200 s. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo u všech toxických látek v intervalu od 309 do 386 s.

Obrázek 4-51 Graf rychlosti uvolňování tepla – experiment 4

Obrázek 4-51 znázorňuje křivku rychlosti uvolňování tepla. HRR byla zaznamenávána pomocí RCT přibližně 1100 sekund. Maximální hodnoty 167,65 kW bylo dosaženo v 351. sekundě.



Obrázek 4-52 Graf znázorňující průběh teplot zaznamenaný pomocí termočlánků – experiment 4

Průběhy teplot zaznamenaných pomocí termočlánků T01 až T04 zobrazené na obrázku 4-52 ukazují velmi podobný průběh teplot. Maximální teploty 766,7 °C dosáhl termočlánek T01 v čase t=894 s.

Termočlánek T05, rovněž jako u třetího experimentu, naměřil nejnižší teploty. Jeho maximální teplota, 538 °C, byla naměřena v čase 651 sekund.

4.3.3 Pátý experiment

V případě pátého experimentu bylo víko otevřeno na 50 %. Aby nedošlo k pádu částí víka, bylo víko dodatečně zatíženo.

a) Detail zatížení víka b) Smokebox zepředu s termočlánky

Obrázek 4-53 Příprava experiment 5

Obrázek 4-54 Rozvoj hoření t <1 min od zapálení – experiment 5

Obrázek 4-55 Průběh požáru ve 4. minutě po zapálení – experiment 5

a) t=5 min b) t=6 min

Obrázek 4-56 Průběh hoření v dalších minutách – experiment 5

Obrázek 4-57 Průběh hoření v 9. minutě po zapálení – experiment 5

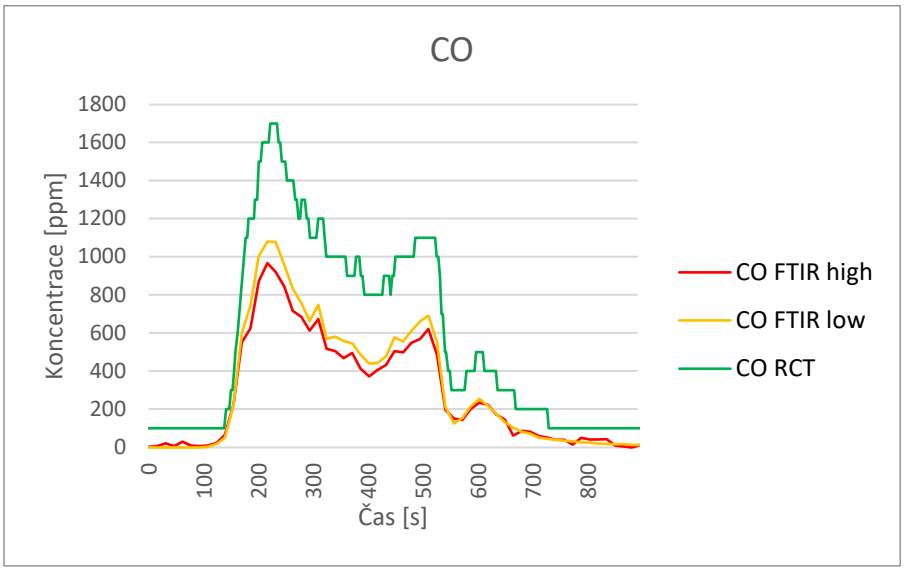
a) Zbytky paliva po odstranění boční stěny

b) Očištěné dno po ukončení experimentů

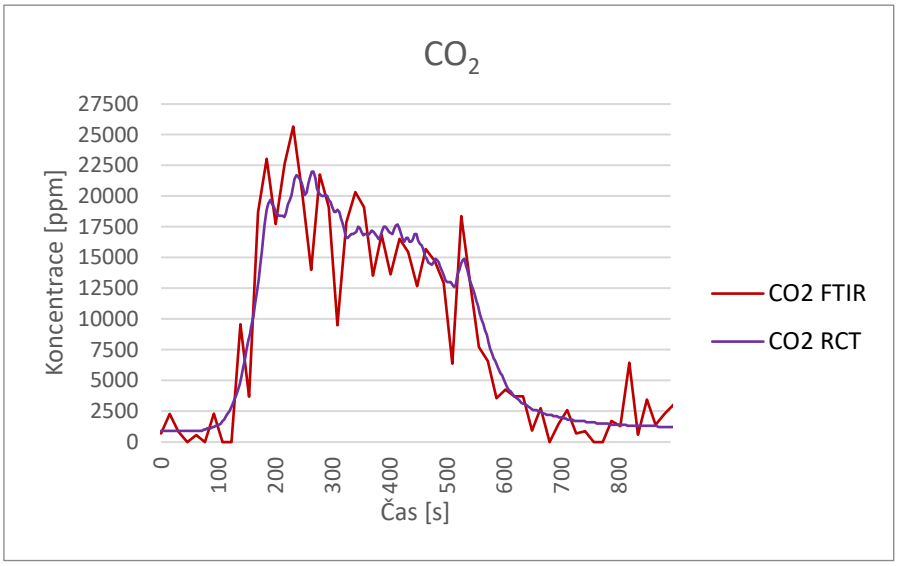
Obrázek 4-58 Stav po ukončeni 5. experimentu

4.3.3.1 Analýza výsledků

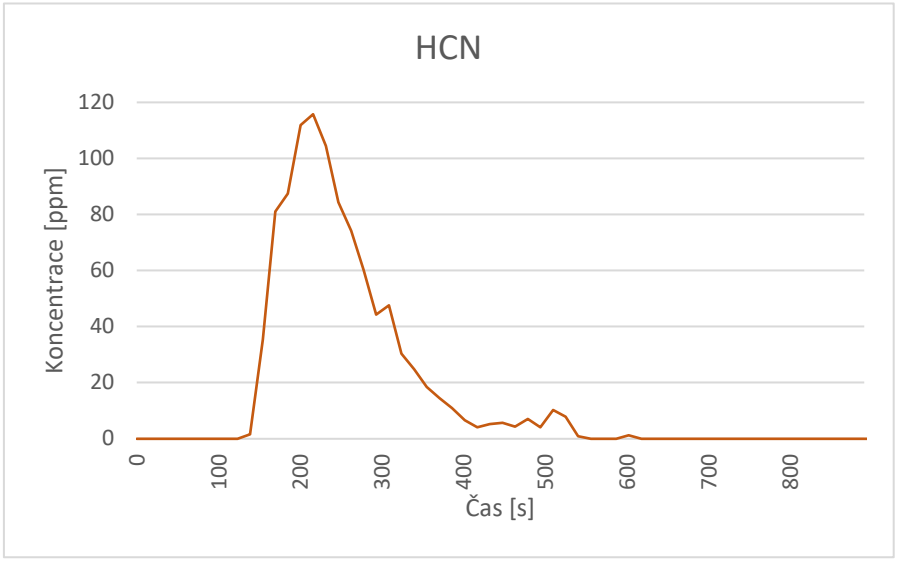
V této podkapitole jsou prezentovány výsledky úplně posledního, pátého, experimentu.



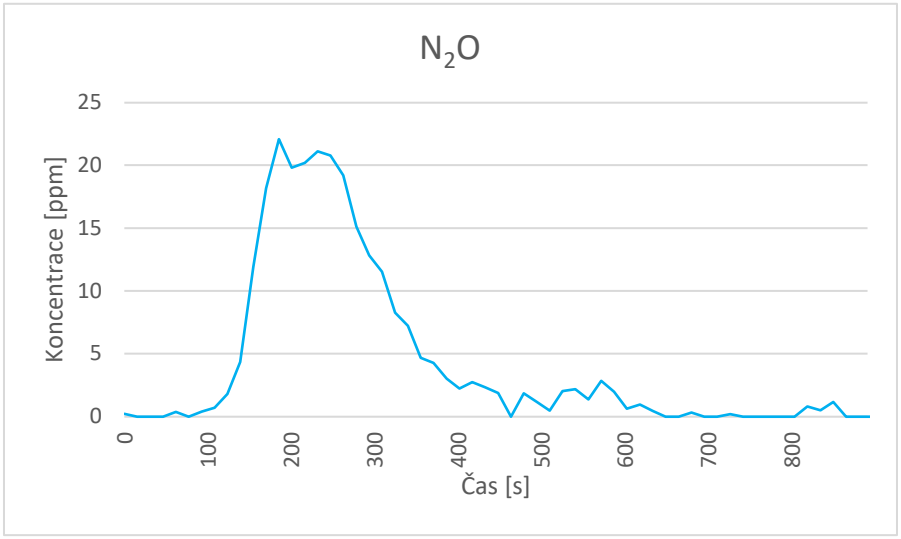
Obrázek 4-59 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhelnatého – experiment 5



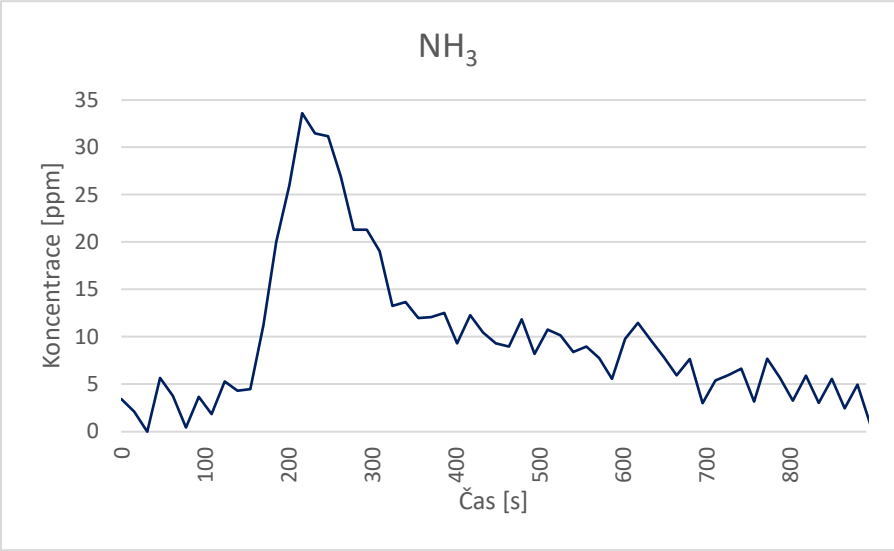
Obrázek 4-60 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého – experiment 5



Obrázek 4-61 Graf znázorňující průběh koncentrace kyanovodíku – experiment 5



Obrázek 4-62 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu dusného – experiment 5

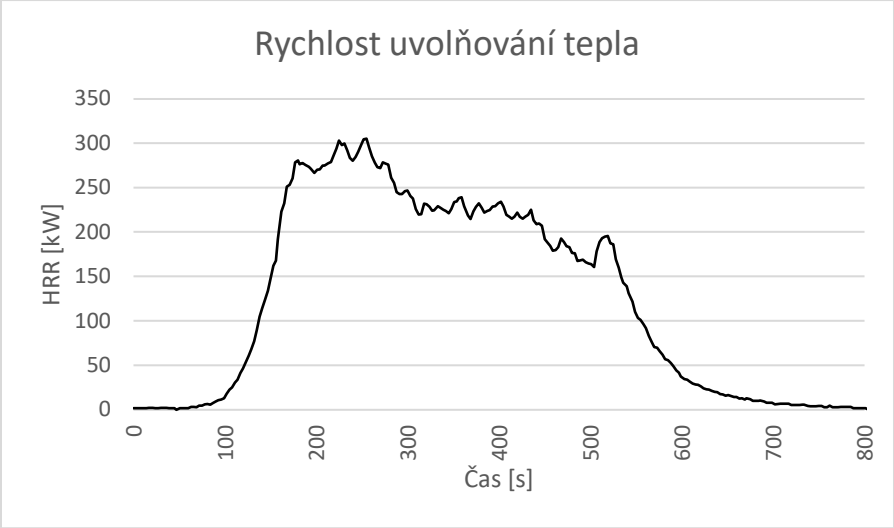


Obrázek 4-63 Graf znázorňující průběh koncentrace amoniaku – experiment 5

Obrázky 4-59 až 4-63 znázorňují průběh koncentrací chemických sloučenin při pátém experimentu. Průběh byl zaznamenávám po dobu 1098 sekund. Při experimentu bylo odvětrání RCT nastaveno na 30 % po dobu 891 sekund. Poté bylo odvětrání navýšeno na 80 % a experiment byl ukončen.

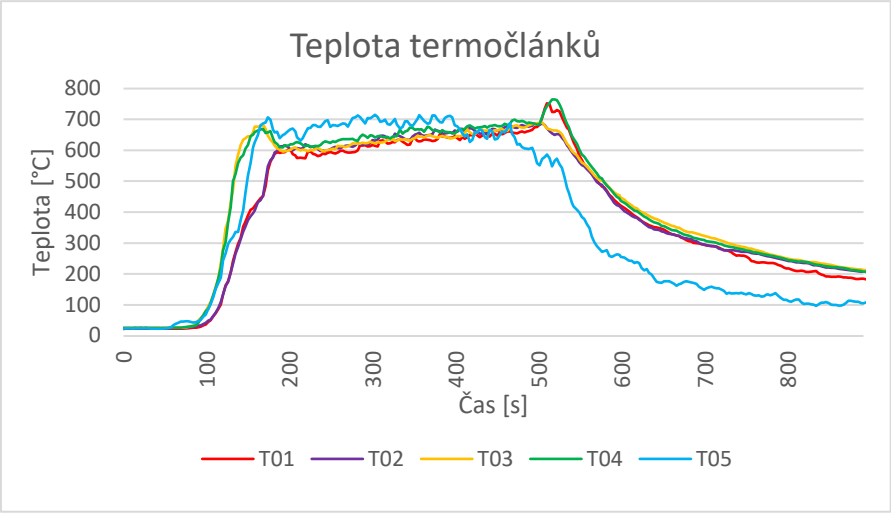
U grafů můžeme pozorovat téměř stejný rostoucí trend jako u experimentů 3 a 4. Rozdílem je, že k významnějšímu nárůstu dochází dříve, a to přibližně v 139. sekundě.

Maximálních hodnot dosahují koncentrace v časovém intervalu od 185,44 do 231,81 s. Koncentrace kyanovodíku, oxidu uhelnatého a amoniaku dosahují maximálních hodnot ve stejném okamžiku, ve 217. sekundě. Jednoznačně nejvyšších hodnot koncentrace dosáhl oxid uhličitý.



Obrázek 4-64 Graf znázorňující průběch rychlosti uvolňování tepla – experiment 5

Při porovnání třetího, čtvrtého a pátého experimentu, u kterých bylo použito stejné palivo a pouze jiné parametry odvětrání, můžeme pozorovat, že u pátého experimentu dosáhla křivka rychlosti uvolňování tepla nejvyšších hodnot. Maximální hodnota, 305,39 kW, byla naměřena v 255. sekundě.



Obrázek 4-65 Graf znázorňující průběhy teplot na termočláncích – experiment 5

Oproti třetímu a čtvrtému experimentu, můžeme u pátého experimentu pozorovat, že nevzniká velký rozdíl v teplotách jednotlivých termočlánků. Pátý termočlánek naměřil v určitých časech nejvyšší teploty ze všech termočlánků. Svého maxima, 715,3 °C, dosáhl v čase 303 sekund.

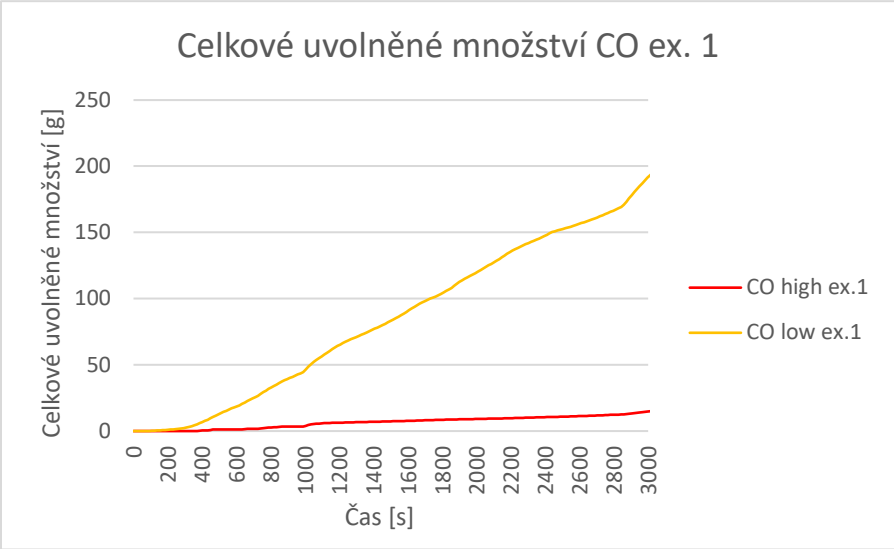
Nejvyšší teploty byly zaznamenány pomocí termočlánku T04 umístěného v levém zadním rohu. Teploty 765 °C dosáhl v 516. sekundě.

4.4 Diskuze a vyhodnocení

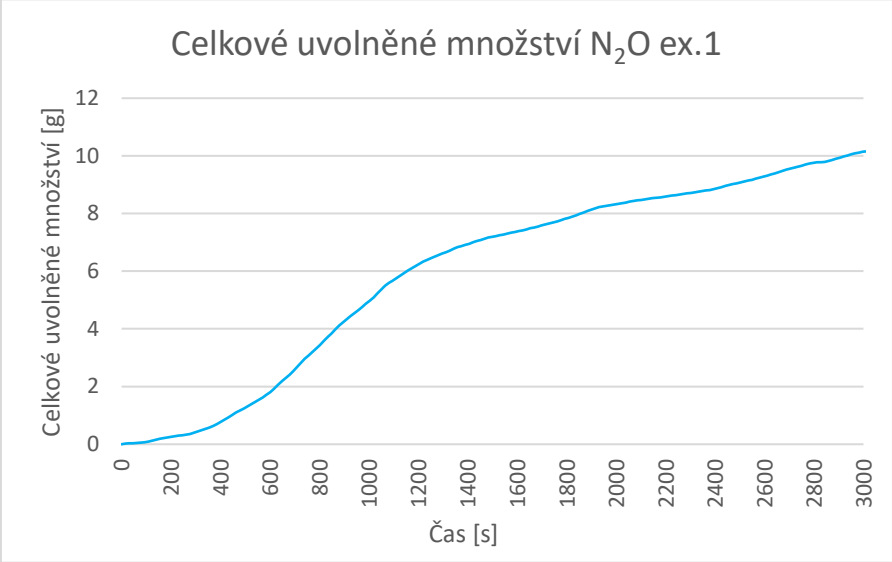
V závěrečné části této diplomové práce budou prezentovány výsledky přepočtu koncentrací chemických látek na celkové uvolněné množství. Přepočet byl proveden u hlavních toxických látek. Koncentrace CO_2 nebyla na celkové uvolněné množství přepočtena, neboť se nejedná o toxickou látku. Jeho přítomnost stimuluje dýchání, zvyšuje frekvenci a dechový objem a způsobuje zvýšení inhalace kyslíku, ale i toxických látek produkovaných hořením.

4.4.1 První sada experimentů

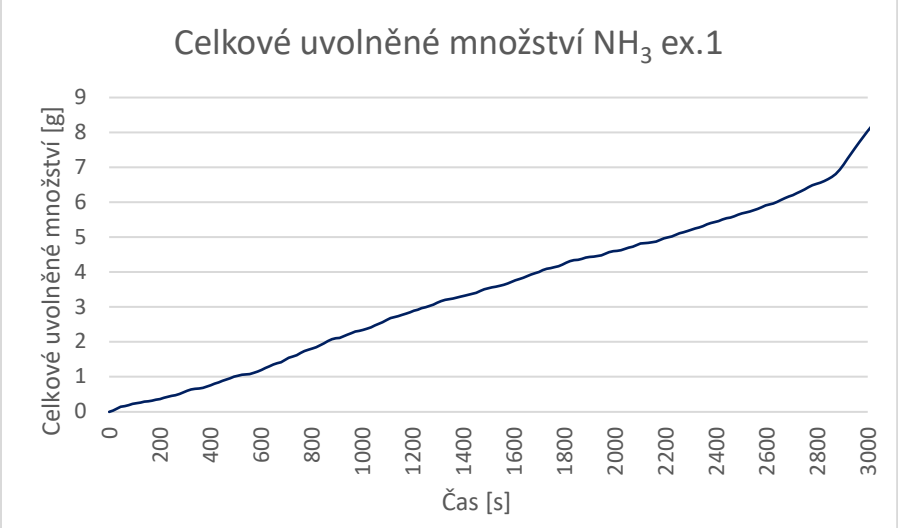
Na následujících třech grafech (4-66 až 4-68) jsou prezentována celková množství chemických látek uvolněná v průběhu prvního experimentu. U prvního experimentu byly použity dva druhy paliva – dřevo a matrace z polyuretanové pěny. Víko bylo otevřeno na 25 %.



Obrázek 4-66 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu uhelnatého – experiment 1



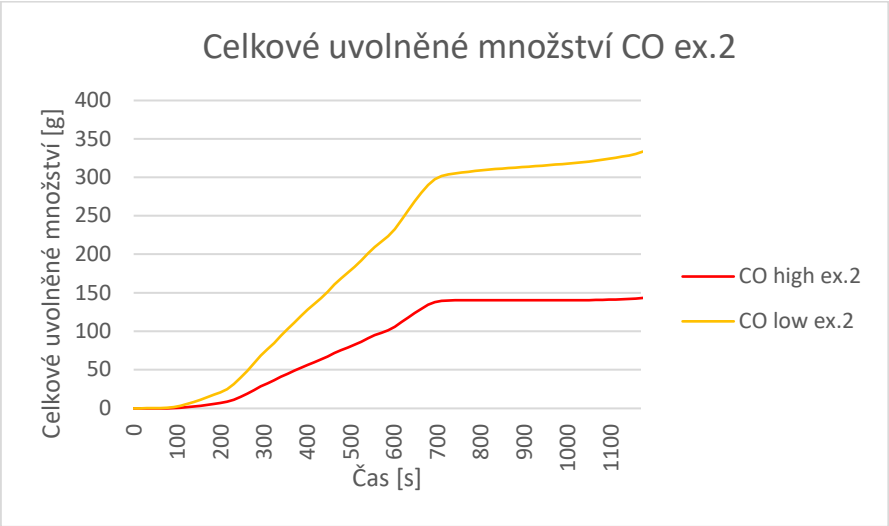
Obrázek 4-67 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu dusného – experiment 1



Obrázek 4-68 Graf znázorňující celkové uvolněné množství amoniaku – experiment 1

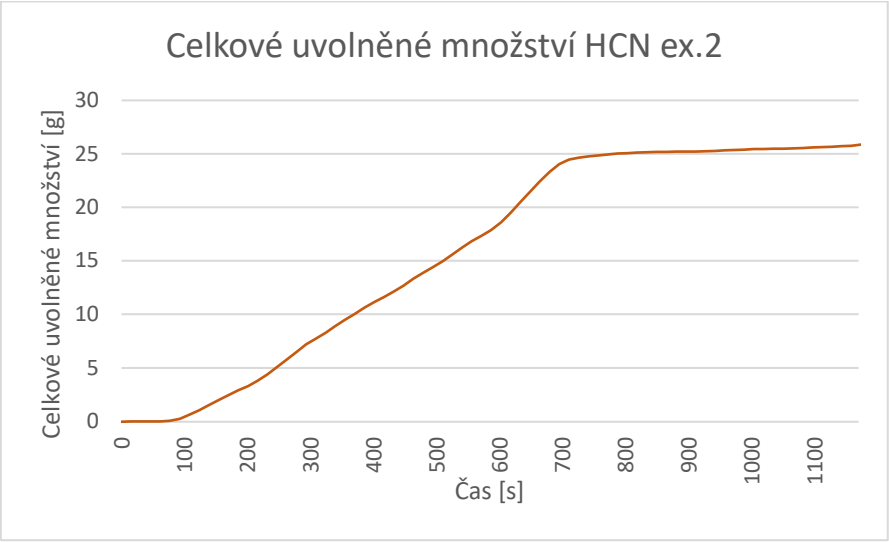
Z výše umístěných grafů je patrné, že nejvíce se uvolnilo oxidu uhelnatého. Celkové uvolněné množství této látky během prvního experimentu dosáhlo maxima přibližně 192 gramů. Množství ostatních látek bylo více než desetkrát menší. Nejnižší hodnoty byly dopočteny u amoniaku. Zde hodnota nepřesáhla 10 gramů.

Dále budou v této podkapitole prezentována celková uvolněná množství během druhého experimentu. Oproti prvnímu experimentu zde bylo víko otevřeno na 33 %.

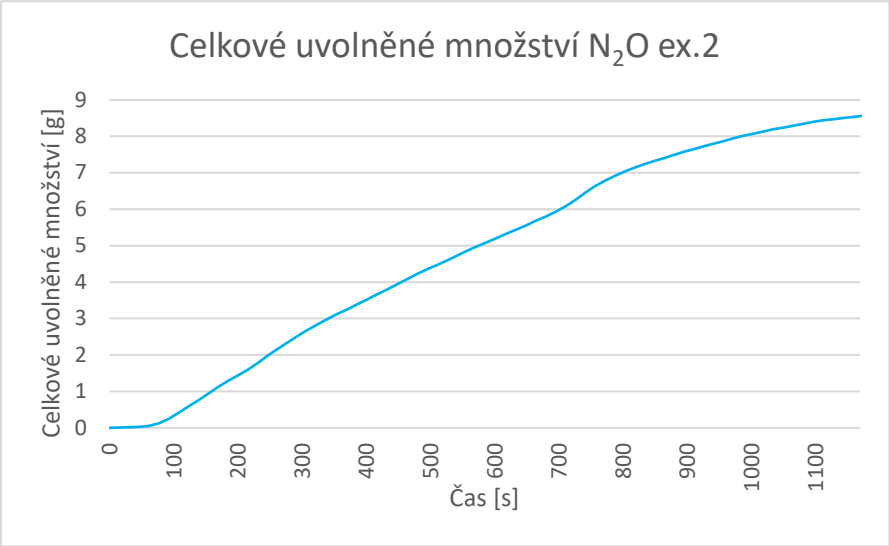


Obrázek 4-69 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu uhelnatého – experiment 2

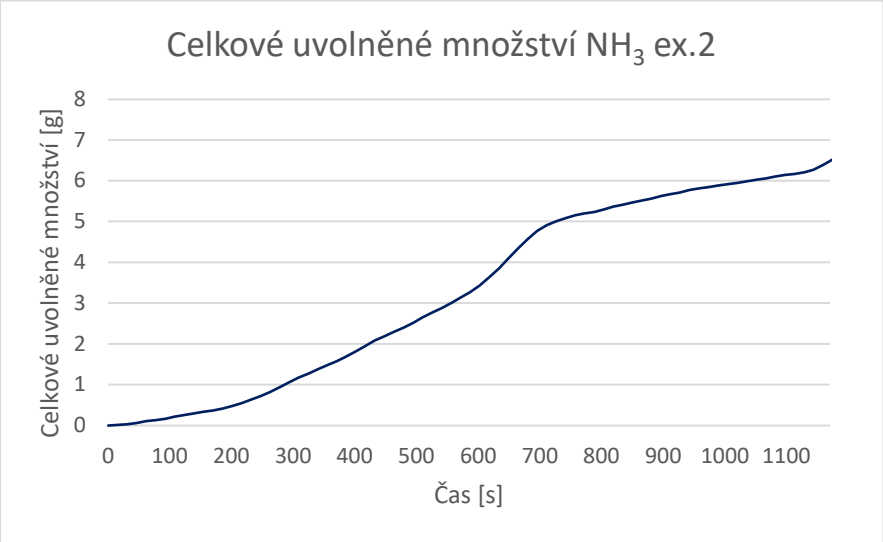
Na obrázku 4-69 můžeme pozorovat, že celkové uvolněné množství oxidu uhelnatého dosahuje i u druhého experimentu poměrně vysokých hodnot. Maximální uvolněné množství bylo přibližně 313 gramů. Tedy více než u prvního experimentu.



Obrázek 4-70 Graf znázorňující celkové uvolněné množství kyanovodíku – experiment 2



Obrázek 4-71 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu dusného – experiment 2

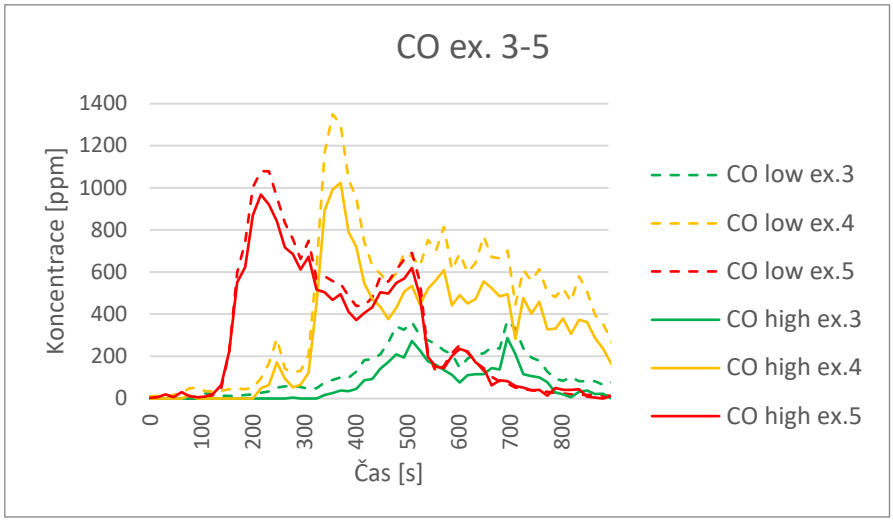


Obrázek 4-72 Graf znázorňující celkové uvolněné množství amoniaku – experiment 2

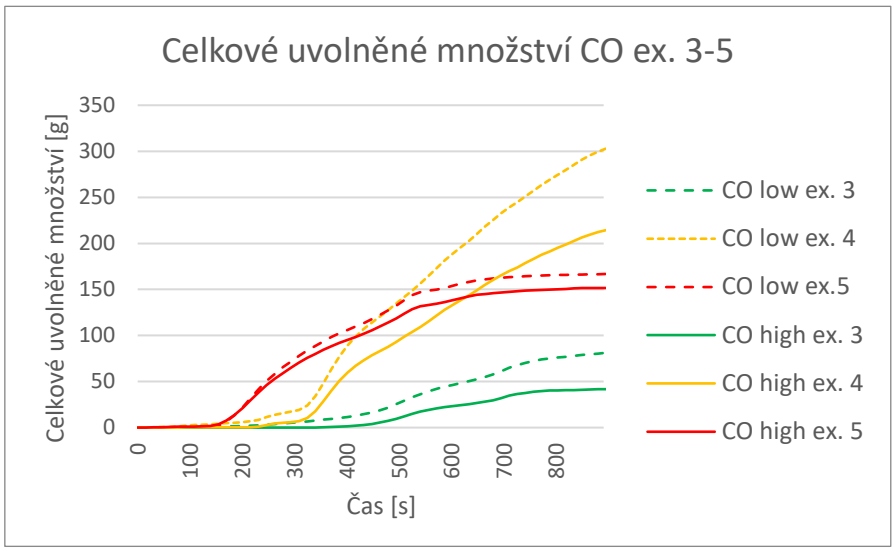
I u druhého experimentu můžeme pozorovat, že nejvíce bylo uvolněno oxidu uhelnatého. Nejnižších hodnot dosáhl amoniak, jehož množství nepřesáhlo 7 gramů.

4.4.2 Druhá sada experimentů

Závěrečná prezentace výsledků proběhne pro druhou sadu experimentů dohromady. V případě těchto experimentů bylo použito stejné palivo. Jediným rozdílem bylo procento otevřenosti víka. U třetího experimentu bylo víko otevřeno na 20 %, u čtvrtého na 33 %, u pátého na 50 %. Na dále uvedených grafech budou představeny průběhy jednotlivých koncentrací chemických látek v jednotce parts per milion a celkové množství uvolněné látky v gramech. Výsledky budou porovnávány v časovém intervalu od 0 do 891 sekund, což je časový interval, při kterém probíhal pátý experiment za stanovených podmínek odvětrání.

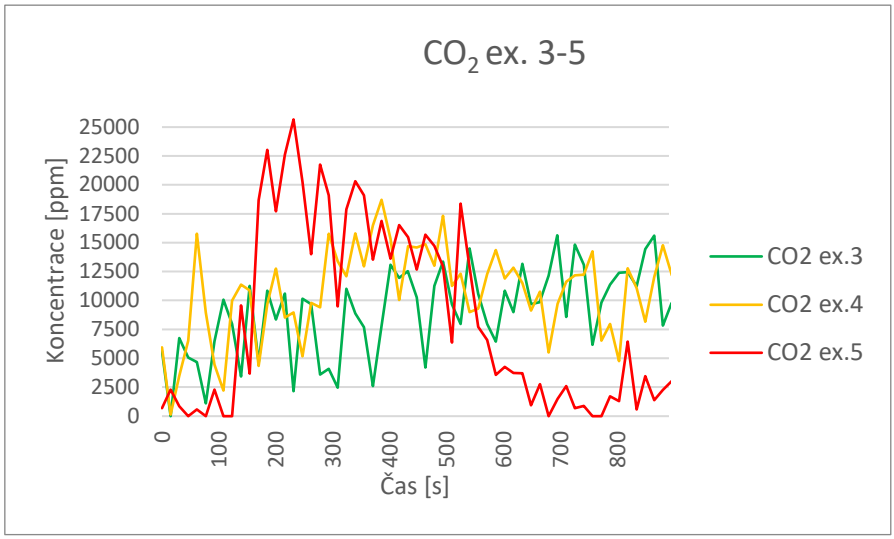


Obrázek 4-73 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhelnatého při 2. sadě experimentů



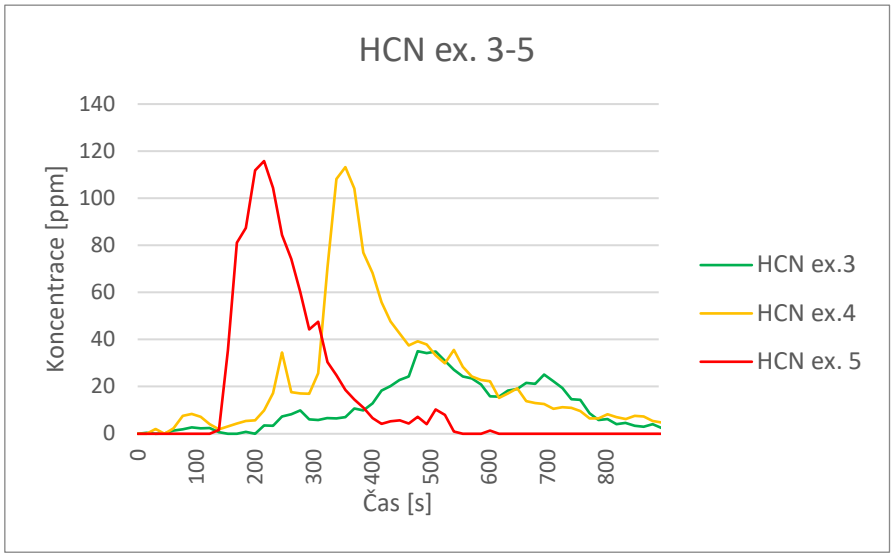
Obrázek 4-74 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu uhelnatého při 2. sadě experimentů

Nejvyšší koncentrace oxidu uhelnatého byla naměřena při čtvrtém experimentu. Koncentrace 1349 ppm bylo dosaženo v čase 355 sekund. Z grafu znázorněného na obrázku 4-74 je zřejmé, že nejvíce bylo oxidu uhelnatého uvolněno právě při čtvrtém experimentu. Hmotnost uvolněné látky přesáhla v řešeném časovém intervalu hranici 300 gramů.

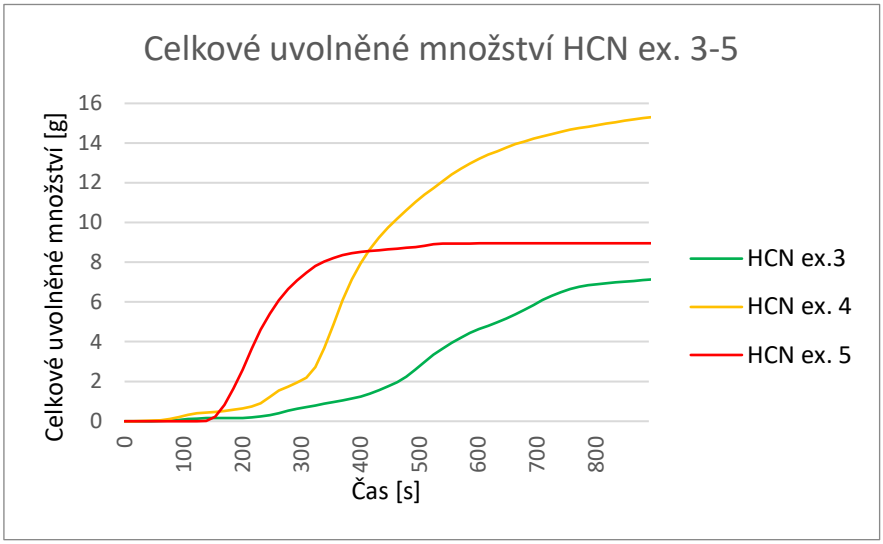


Obrázek 4-75 Graf znázorňující průběh koncentrace oxidu uhličitého při 2. sadě experimentů

Ze všech zkoumaných chemických látek dosáhl oxid uhličitý nejvyšších hodnot koncentrace. Maximální naměřená koncentrace byla zaznamenána u pátého experimentu. V 232. sekundě koncentrace dosáhla maximální hodnoty 25680 ppm.



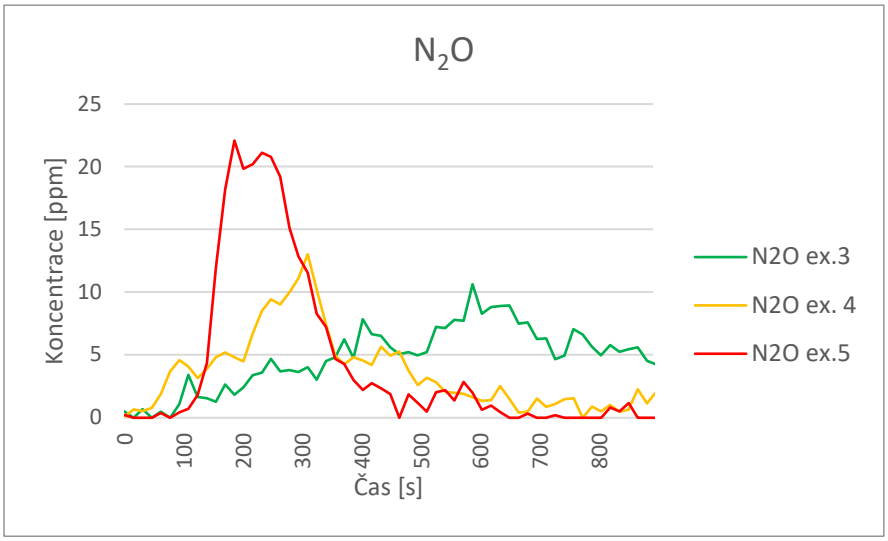
Obrázek 4-76 Graf znázorňující průběh koncentrace kyanovodíku při 2. sadě experimentů



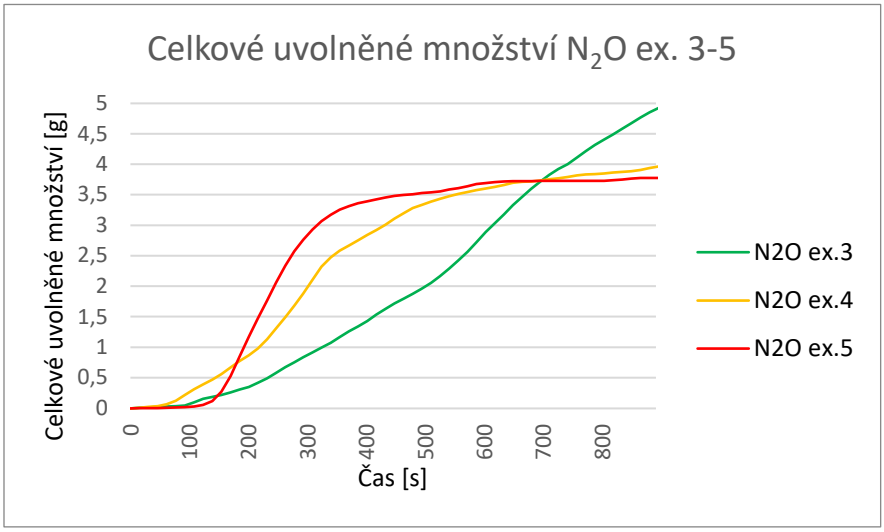
Obrázek 4-77 Graf znázorňující celkové uvolněné množství kyanovodíku při 2. sadě experimentů

Maximální koncentrace kyanovodíku bylo dosaženo při pátém experimentu. Maximum, 115,8 ppm, bylo naměřeno v 232. sekundě. U čtvrtého experimentu bylo maximum, 113,24 ppm, dosaženo později v 356. sekundě.

Nejvíce kyanovodíku bylo uvolněno v průběhu čtvrtého experimentu, což je patrné z grafu na obrázku 4-77. Oproti oxidu uhelnatému se celkové uvolněné množství pohybuje v desítkách gramů. Nejvyšší naměřená hodnota ve zkoumaném intervalu byla 15,2 gramů.



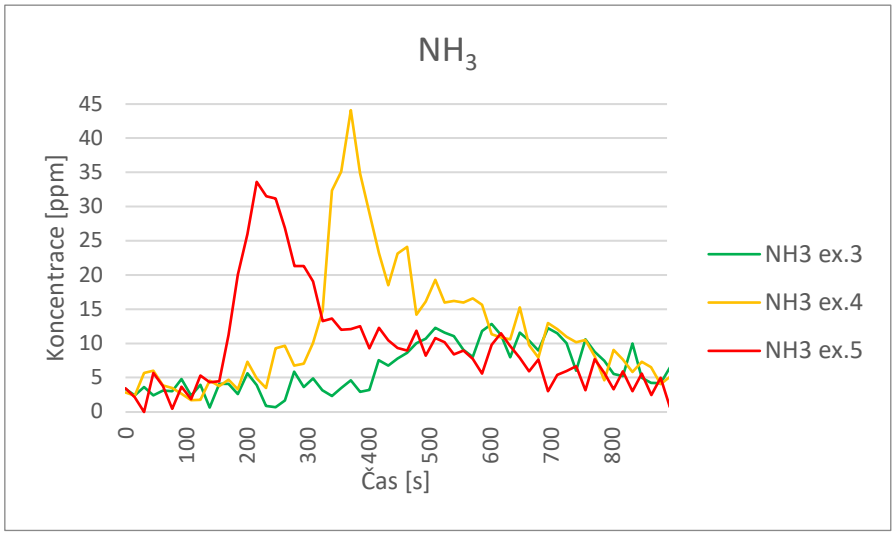
Obrázek 4-78 Graf znázorňující průběhy koncentrace oxidu dusného při 2. sadě experimentů



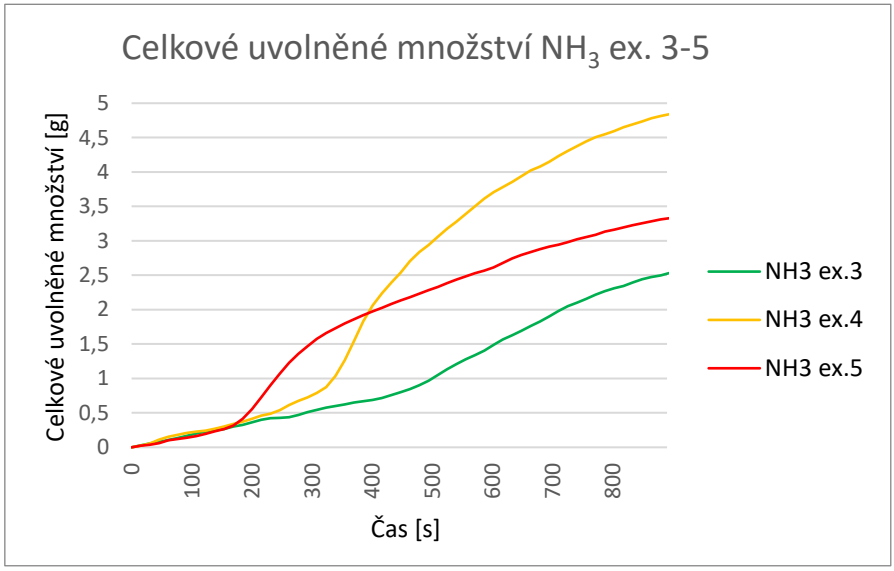
Obrázek 4-79 Graf znázorňující celkové uvolněné množství oxidu dusného při 2. sadě experimentů

Nejvyšší koncentrace oxidu dusného byla naměřena v průběhu pátého experimentu. Maximální hodnota, 22,1 ppm, byla dosažena v 186. sekundě.

Na konci zkoumaného intervalu bylo největší celkové množství oxidu dusného dopočteno u třetího experimentu. Na konci časového intervalu se ve spalinách vyskytovalo 4,8 gramu oxidu dusného.



Obrázek 4-80 Graf znázorňující průběhy koncentrace amoniaku při 2. sadě experimentů



Obrázek 4-81 Graf znázorňující celkové uvolněné množství amoniaku při 2. sadě experimentů

Amoniak byl ve spalinách zastoupen společně s oxidem dusným v nízkých koncentracích a v malém množství. Nejvyšší koncentrace, 44,12 ppm, bylo dosaženo při čtvrtém experimentu v 371. sekundě.

Nejvíce amoniaku bylo uvolněno rovněž při čtvrtém experimentu. Na konci zkoumaného intervalu se ve spalinách vyskytovalo necelých 5 gramů amoniaku.

Obecně u třetího experimentu, kdy byl otvor nejmenší, můžeme pozorovat pozvolnější průběhy koncentrací i celkového uvolněného množství. V průběhu experimentu se po celou dobu uvolňovalo určité množství chemické látky, nedocházelo k rapidnímu nárůstu a poté k poklesu.

Na grafech znázorňujících průběhy koncentrací chemických látek (obrázky 4-73, 4-75, 4-76, 4-78 a 4-80) u čtvrtého a pátého experimentu, kde byl otvor pro odvětrání větší, můžeme pozorovat rychlejší nárůst do maximální hodnoty a poté značný pokles. K dosažení nejvyššího celkového uvolněného množství chemické látky docházelo převážně u čtvrtého experimentu, což je patrné z grafů na obrázcích4-74, 4-77 a 4-81. Pouze u oxidu dusného bylo maxima dosaženo u třetího experimentu viz obrázek 4-79.

5 Závěr

Zjišťování příčin požáru a vyšetřování požáru je stále se rozvíjejícím odvětvím. Pro zajištění maximální bezpečnosti zasahujících hasičů a vyšetřovatelů, je nezbytné zabývat se i toxickými zplodinami hoření, které se během požáru uvolňují a za jakých podmínek. Získané poznatky jsou důležité pro vyhodnocení nutnosti ochranných pomůcek a případně pro vhodnou volbu těchto pomůcek.

V rámci této diplomové práce byla provedena rešerše materiálů, vyskytujících se v zařizovacích předmětech v budovách pro bydlení a ubytování. Z těchto materiálů bylo vybráno pět zástupců ze skupiny plastů, dřevo a kompozity na bázi dřeva. Jako zástupci plastů byli představeni polyuretan, polyethylen, polypropylen, akrylonitril-butadien-styren a polyvinylchlorid.

Praktickou část této diplomové práce představovalo uskutečnění pěti experimentů v nově postaveném zkušebním zařízení, Smokebox. Toto zařízení bylo zhotoveno primárně pro experimenty související s touto diplomovou prací. Při konstruování Smokeboxu byl hlavní důraz kladen na to, aby bylo umožněno regulovat odvětrání. Toho bylo docíleno rozdělením víka na dvě části, které bylo možné polohovat a tím zajistit různé procento otevřenosti při experimentech. Bylo provedeno celkem pět experimentů.

U všech experimentů byly, pomoci FTIR analyzátoru a RCT, zkoumány koncentrace uvolněných chemických látek a rychlost uvolňování tepla. U třetího, čtvrtého a pátého experimentu bylo navíc osazeno pět termočlánků snímajících teplotu uvnitř Smokeboxu.

Na základě prezentovaných výsledků v předchozí kapitole, je možné konstatovat, že při nižším procentu otevřenosti víka byl průběh koncentrací i celkového uvolněného množství pozvolný a nedocházelo k významným nárůstům a poklesům. U experimentů s vyšším procentem otevřenosti bylo možné pozorovat rapidní nárůst koncentrace téměř ihned po zapálení, dosažení maximální hodnoty a prudký pokles. Je zde patrný vliv odvětrání. Při vyšším procentu otevřenosti SB byl průběh hoření bouřlivější a rychlejší.

5.1 Doporučení pro navazující výzkum

Tato diplomová práce byla součástí úvodní fáze výzkumu pro projektu „BV IMPAKT 1 Inovace a rozvoj nástrojů v oblasti zjišťování příčin vzniku požárů VJ01010046“. V rámci této diplomové práce se podařilo identifikovat několik důležitých směrů, kterými lze výzkum ubírat. Bylo vybráno několik konkrétních zástupců materiálů, používaných v budovách pro bydlení a ubytování. Z výše zmíněných zástupců byl vybrán polyuretan, který byl použit jako palivo při experimentech.

V dalších fázích výzkumu bude možnost se zaměřit na například jiné materiály nebo kombinace materiálů.

Konstrukce Smokeboxu nebyla během experimentů znehodnocena, tudíž není vyloučeno její pozdější použití.

Literatura

[1] *Statistická ročenka Hasičského záchranného sboru České republiky 2021*. B.m.: Ministerstvo vnitra-generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. 2022

[2] TROITZSCH, Jürgen, Edith ANTONATUS a Mark SMITH. *Plastics flammability handbook: principles, regulations, testing, and approval*. 4th vyd. Cincinnati: Hanser Publications, 2021. ISBN 978-1-56990-762-7.

[3] HARPER, Charles A., ed. *Handbook of building materials for fire protection*. New York: McGraw-Hill, 2004. McGraw-Hill handbooks. ISBN 978-0-07-138891-7.

[4] SZYCHER, M a PROQUEST (FIRM). *Szycher's handbook of polyurethanes*. 2012.

[5] PITTS, William M. Role of two stage pyrolysis in fire growth on flexible polyurethane foam slabs: FIRE GROWTH ON FLEXIBLE POLYURETHANE FOAM SLABS. *Fire and Materials* [online]. 2014, **38**(3), 323–338. ISSN 03080501. Dostupné z: doi:10.1002/fam.2183

[6] HILADO, Carlos J. *Flammability handbook for plastics*. 5th ed. Lancaster, Pa: Technomic Pub. Co, 1998. ISBN 978-1-56676-651-7.

[7] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION a SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS, ed. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3rd ed. Quincy, Mass. : Bethesda, Md: National Fire Protection Association ; Society of Fire Protection Engineers, 2002. ISBN 978-0-87765-451-3.

[8] PAU, Dennis. *A Comparative Study on Combustion Behaviours of Polyurethane Foams with Numerical Simulations using Pyrolysis Models*. New Zealand, 2013. University of Canterbury.

[9] KAPLAN, H.L., A.F. GRAND a G.E. HARTZELL. Toxicity and the smoke problem. *Fire Safety Journal*. 1984, (7).

[10] PURSER, David. The application of exposure concentration and dose to evaluation of the effect of irritants as components of fire hazard. 2007.

[11] ROGAUME, Thomas, Lucas Bustamante VALENCIA, Eric GUILLAUME, Franck RICHARD, Jocelyn LUCHE, Guillermo REIN a Jose Luis TORERO. Development of the Thermal Decomposition Mechanism of Polyether Polyurethane Foam Using Both Condensed and Gas-Phase Release Data. *Combustion Science and Technology* [online]. 2011, **183**(7), 627–644. ISSN 0010-2202, 1563-521X. Dostupné z: doi:10.1080/00102202.2010.535574

[12] MCKENNA, Sean Thomas a Terence Richard HULL. The fire toxicity of polyurethane foams. *Fire Science Reviews* [online]. 2016, **5**(1), 3. ISSN 2193-0414. Dostupné z: doi:10.1186/s40038-016-0012-3

[13] STEC, Anna a Richard HULL, ed. *Fire toxicity*. Oxford: WP, Woodhead Publ, 2010. Woodhead Publishing in materials. ISBN 978-1-84569-807-2.

[14] ROSIELLO, AP, JM ESSIGMANN a GN WOGAN. Rapid and accurate determination of the median lethal dose (LD50) and its error with a small computer. *Journal of Toxicology and Environmental Health*. 1977, **3**(5–6), 797–809.

[15] LEVIN, B. Effects of exposure to single or multiple combinations of the predominant toxic gases and low oxygen atmospheres produced in fires*1, *2. *Fundamental and Applied*

Toxicology [online]. 1987, **9**(2), 236–250. ISSN 02720590. Dostupné z: doi:10.1016/0272-0590(87)90046-7

[16] LUCHE, Jocelyn, Etienne MATHIS, Thomas ROGAUME, Franck RICHARD a Eric GUILLAUME. High-density polyethylene thermal degradation and gaseous compound evolution in a cone calorimeter. *Fire Safety Journal*. 2012, **2012**, 24–35.

[17] RÉH, Roman, Ľuboš KRIŠŤÁK a Ivan KUBOVSKÝ. *New Challenges in Wood and Wood-Based Materials*. Basel, Switzerland: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. ISBN 978-3-0365-1792-6.

[18] SZOLLOSI-MOTA, Andrei. RESEARCH ON COMBUSTION PARAMETERS AND GASEOUS EFFLUENTS DEVELOPED IN FIRE PROCESSES. In: *18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2018* [online]. 2018 [vid. 2022-10-26]. Dostupné z: doi:10.5593/sgem2018/1.3/S03.096

[19] *ISO 13571:2012 Life-threatening components of fire - Guidelines for the estimation of time to compromised tenability in fires*

[20] *ISO 13344:2015 Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents*

[21] NELSON, Gordon L. a AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, ed. *Fire and polymers: hazards identification and prevention: developed from a symposium sponsored by the Macromolecular Secretariat at the 197th National Meeting of the American Chemical Society, Dallas, Texas, April 9-14, 1989*. Washington, DC: American Chemical Society, 1990. ACS symposium series, 425. ISBN 978-0-8412-1779-9.