

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2024

Vendula Sojková

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Těkavé organické látky ve vnitřním prostředí a možnosti jejich stanovení
Bakalářská práce

2024

Vendula Sojková

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Vendula Sojková**
Osobní číslo: **C21129**
Studijní program: **B0588A130001 Chemie a technologie ochrany životního prostředí**
Téma práce: **Těkavé organické látky ve vnitřním prostředí a možnosti jejich stanovení**
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši týkající se znečištění a kvality vnitřního prostředí se zaměřením na těkavé organické látky (VOC). Stručně definujte hlavní polutanty a jejich dopady na lidské zdraví. Pozornost zaměřte na možnosti stanovení VOC. Proveďte kritické zhodnocení a srovnání jednotlivých analytických metod.
2. V rámci experimentální části proveďte měření obsahu VOC ve vybraných vnitřních prostorech zvolenou technikou či technikami a zpracujte získaná data.
3. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 7/2019 "Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací" v platném znění.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Janíková, Ph.D.**
Ústav environmentálního a chemického inženýrství

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Max Fraenkl, Ph.D.**
Centrum materiálů a nanotechnologií

Datum zadání bakalářské práce: **26. ledna 2024**
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. července 2024**

L.S.

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Anna Krejčová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 26. ledna 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem *Těkavé organické látky ve vnitřním prostředí a možnosti jejich stanovení* jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 27. 6. 2024

Vendula Sojková v. r.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěla bych poděkovat své vedoucí práce Ing. Lence Janíkové, Ph.D. za odbornou pomoc a ochotu při zpracování bakalářské práce a svému konzultantovi práce Ing. Maxovi Fraenklovi, Ph.D. za vedení při vypracování experimentální části práce. Zároveň bych chtěla poděkovat Ing. Pavlovi Rozsivalovi za sestavení přenosného PID detektoru používaného pro měření v této práci a doc. Ing. Tomášovi Bajerovi, Ph.D. za provedení analýzy. Také bych chtěla poděkovat Ing. Petrovi Martincovi, MBA a Ing. Michalovi Pavlatovi, DiS. ze společnosti Siemens za podporu a možnost používat senzory kvality vzduchu IAQ Siemens. Dále děkuji Ing. Zdeňkovi Němcovi, Ph.D. a Bc. Lence Tobiškové z FEI UPCE za možnost provádět měření v učebnách na FEI UPCE. Poděkování patří i mé rodině a přátelům za podporu během celé doby studia.

ANOTACE

Bakalářská práce se zaměřuje na těkavé organické látky a jejich vliv na kvalitu vzduchu ve vnitřním prostředí. Popisuje polutanty, které ovlivňují prostředí uvnitř budov a mohou mít dopady na lidské zdraví. Dále se zabývá metodami pro stanovení těchto látek. Převážná část práce se věnuje terénnímu měření těkavých organických látek v reálných podmínkách vnitřního prostředí a hodnocení kvality vzduchu.

KLÍČOVÁ SLOVA

těkavé organické látky, vnitřní prostředí, kvalita vzduchu, fotoionizační detektor

TITLE

Volatile organic compounds in the indoor environment and methods for their determination

ANNOTATION

The bachelor thesis focuses on volatile organic compounds and their impact on indoor air quality. It describes pollutants that affect the indoor environment and may impact human health. It also deals with methods for analyzing these substances. The majority of this thesis is dedicated to field measurements of volatile organic compounds in real indoor environment conditions and the evaluation of air quality.

KEYWORDS

Volatile organic compounds, indoor environment, air quality, photoionization detector

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK	10
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	11
ÚVOD	12
1 Teoretická část	13
1.1 Znečištění vnitřního prostředí	13
1.1.1 Syndrom nemocných/nezdravých budov	14
1.1.2 Hlavní polutanty vnitřního prostředí	16
1.1.3 Hlavní plynné anorganické polutanty vnitřního prostředí	16
1.1.3.1 Oxid uhličitý	16
1.1.3.2 Oxidy dusíku	17
1.1.3.3 Oxid uhelnatý	18
1.1.3.4 Ozon	18
1.1.3.5 Oxid siřičitý	19
1.1.4 Hlavní plynné organické polutanty vnitřního prostředí - těkavé organické látky	20
1.1.4.1 Formaldehyd	21
1.1.4.2 Benzen	21
1.1.4.3 Toluén	22
1.1.4.4 Ethylbenzen	22
1.1.4.5 Xyleny	23
1.1.4.6 Ethanol	23
1.1.4.7 Hexan	23
1.1.4.8 Dichlormethan	24
1.1.4.9 Aceton	24
1.1.4.10 Hexanal	24

1.1.4.11	Aditiva do plastů.....	25
1.1.5	Celkové těkavé organické látky.....	26
1.1.6	Index kvality vnitřního vzduchu.....	26
1.1.7	Opatření pro zvyšování kvality vnitřního prostředí.....	27
1.2	Metody odběru a stanovení VOC ve vnitřním prostředí.....	27
1.2.1	Sorpční trubičky	28
1.2.2	SPME vlákno.....	28
1.2.3	Plynová chromatografie.....	28
1.2.4	Přenosné plynové chromatografy	29
1.2.5	Plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií.....	29
1.2.6	Fotoionizační detektor	29
2	Experimentální část	31
2.1	Použité chemikálie a materiály	31
2.2	Přístrojové vybavení	31
2.3	Popis prostředí měření	33
2.3.1	Učebny na Fakultě chemicko-technologické Univerzity Pardubice	33
2.3.2	Učebny s instalovanými čidly Siemens.....	33
2.3.3	Pracovní prostory.....	34
2.3.4	Domácnosti.....	34
2.3.5	Veřejné prostory	35
2.4	Pracovní postupy.....	35
3	Výsledky a diskuze.....	36
3.1	Měření TVOC při běžných aktivitách	36
3.1.1	Měření koncentrace TVOC ve školních prostorech	36
3.1.2	Měření TVOC v pracovních prostorech	37
3.1.3	Měření TVOC v domácnostech.....	38
3.1.4	Měření TVOC ve veřejných prostorech	40

3.2	Porovnání použitých detektorů	41
3.3	Měření indexu kvality vnitřního ovzduší v průběhu přednášky	42
3.3.1	Kvalitativní měření těkavých organických látek	46
	Závěr	47
	Použitá literatura	48

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 - Komerčně dodávaný detektor PID AY (A) a zkonstruovaný přenosný PID detektor používaný v této bakalářské práci (B)	31
Obrázek 2 - Používaná čidla Siemens pro monitorování koncentrace TVOC a kvality vnitřního ovzduší v učebnách na FEI – (A) IAQ Multi Sensor - QNA28280D a (B) IAQ-MONITOR-10A823.....	32
Obrázek 3 - Aparatura pro SPME použitá během přednášky v učebně na FEI.....	33
Obrázek 4 - Měření změn koncentrace TVOC během vaření	39
Obrázek 5 - Měření změn koncentrace TVOC v průběhu hoření vonné svíčky.....	40
Obrázek 6 - Porovnání PID detektorů použitých v bakalářské práci.....	41
Obrázek 7 - Změny v koncentraci TVOC v průběhu přednášky	43
Obrázek 8 - Změny koncentrace CO ₂ v průběhu přednášky	43
Obrázek 9 - Změny teploty v průběhu přednášky.....	44
Obrázek 10 - Změny relativní vlhkosti v průběhu přednášky	45
Obrázek 11 - Změny koncentrace aerosolů v průběhu přednášky.....	45
Tabulka 1 - Projevy SBS	15
Tabulka 2 - Účinky CO ₂ na lidské zdraví	17
Tabulka 3 - Účinky NO _x na lidské zdraví.....	17
Tabulka 4 - Účinky CO na lidské zdraví	18
Tabulka 5 - Účinky O ₃ na lidské zdraví.....	19
Tabulka 6 - Účinky SO ₂ na lidské zdraví	19
Tabulka 7 - Klasifikace VOC dle WHO	20
Tabulka 8 - Výsledky měření koncentrace TVOC ve školních prostorech	36
Tabulka 9 - Výsledky měření koncentrace TVOC v pracovních prostorech.....	37
Tabulka 10 - Výsledky měření koncentrace TVOC v domácnostech	38
Tabulka 11 - Výsledky měření koncentrace TVOC ve veřejných prostorech	40
Tabulka 12 - Události v průběhu přednášky.....	42
Tabulka 13 - Identifikované těkavé organické látky a jejich relativní koncentrace ve vzorku	46

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

AQI	Index kvality vzduchu (Air Quality Index)
BFR	Bromované zpomalovače hoření (Brominated Flame Retardants)
BPA	Bisfenol A
BTEX	Benzen, toluen, ethylbenzen, xyleny
DEHA	(2-ethylhexyl)adipát
DEHP	Di(2-ethylhexyl)ftalát
DIBP	Diisobutylftalát
DINP	Diisononylftalát
FEI	Fakulta elektrotechniky a informatiky
FchT	Fakulta chemicko-technologická
GC	Plynová chromatografie (Gas Chromatography)
GC-MS	Plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií (Gas Chromatography-Mass Spectrometry)
IAQ	Kvalita vnitřního vzduchu (Indoor Air Quality)
IAQI	Index kvality vnitřního vzduchu (Indoor Air Quality Index)
PDMS	Polydimethylsiloxan
PID	Fotoionizační detektor (Photoionization Detector)
POC	Organofosfáty (Phosphate Organic Compound)
ppb	Počet částic na miliardu částic (parts per billion)
ppm	Počet částic na milion částic (parts per milion)
PVC	Polyvinylchlorid
SBS	Syndrom nemocných/nezdravých budov (Sick building syndrome)
SPME	Mikroextrakce na tuhou fázi (Solid Phase Microextraction)
SVOC	Polotěkavé organické látky (Semi-volatile Organic Compounds)
TCEP	Tris(2-chlorethyl)fosfát
TVOC	Celkové množství těkavých organických látek (Total Volatile Organic Coumpound)
UPCE	Univerzita Pardubice
UV	Ultrafialové (Ultraviolet) záření
VOC	Těkavá organická látka (Volatile Organic Compound)
VOCs	Těkavé organické látky (Volatile Organic Compounds)
VVOC	Velmi těkavé organické látky (Very Volatile Organic Compounds)
WHO	Světová zdravotnická organizace (World Health Organization)

ÚVOD

Těkavé organické látky (VOC) jsou jedním z významných faktorů ovlivňujících kvalitu vzduchu ve vnitřním prostředí, která je v současné době diskutovaným tématem, jelikož moderní člověk tráví čím dál více času uvnitř budov. VOC představují skupinu chemických sloučenin, které se snadno vypařují při normální teplotě a tlaku a mohou mít negativní dopad na lidské zdraví.

V literární rešerši se práce zabývá kvalitou vzduchu ve vnitřním prostředí, popisuje nejvýznamnější polutanty vnitřního vzduchu, přičemž zvláštní pozornost je věnována VOC a jejich možným dopadům na zdraví člověka. Dále se zabývá možnými metodami stanovení VOC.

V experimentální části je práce zaměřena na sledování koncentrace celkových těkavých organických látek (TVOC) v různých typech vnitřního prostředí a při různých běžných aktivitách. Také je zkoumána celková kvalita vzduchu na základě indexu kvality vzduchu. Tento index zahrnuje nejen koncentraci VOC, ale i další faktory ovlivňující kvalitu vzduchu, aby poskytl přehled o celkovém stavu ve vnitřním prostředí. Dále se práce zabývá také stanovením kvalitativního zastoupení VOC ve vnitřním prostředí.

Cílem práce je poskytnout komplexní pohled na problematiku VOC ve vnitřním prostředí, navrhnout možná opatření pro zlepšení kvality vzduchu, identifikovat možné zdroje vyšších koncentrací VOC a zhodnotit celkovou kvalitu vzduchu v interiérech.

1 Teoretická část

1.1 Znečištění vnitřního prostředí

Vnitřním prostředím se rozumí životní prostředí primárně v interiérech budov. V každém vnitřním prostředí panují určité podmínky, které ovlivňují zdraví, pohodu a výkon obyvatel. Tyto podmínky zahrnují faktory jako je kvalita vzduchu, teplota, vlhkost, osvětlení a akustika. Moderní člověk tráví až 90 % času uvnitř budov. Je tedy důležité věnovat se otázkám kvality vnitřního prostředí [1]. Vnitřní prostředí můžeme základně rozdělit na prostory soukromé a veřejné. Mezi soukromé prostředí se řadí především obytné místnosti. Veřejné prostory lze dělit na prostory pracovní, školské, nemocniční, duchovní, historické, rekreační, na úložné prostory (sklady apod.) a vnitřní prostory dopravních prostředků [2].

Moderní člověk se původně vyvinul v tropických oblastech, ale se začátkem využívání ohně, oblečení a také díky započatí staveb prvních obydlí se lidé začali přesunovat i do chladnějších klimatických podmínek. První lidská obydlí byla stavěna z přírodních materiálů, převážně ze dřeva a kamení. V období středověku již existovaly vnitřní prostory, které byly trvale zabydlené, lze říci, že v této době začal výrazněji vzrůstat vliv vnitřního prostředí na zdraví a psychiku lidí. V období průmyslové revoluce začalo docházet k většímu využívání oceli v konstrukcích a od 19. století patří mezi jeden z hlavních stavebních materiálů také beton. V průběhu 20. století začalo být ve stavebnictví široce využíváno PVC (polyvinylchlorid), které se stalo běžným materiálem pro výrobu trubek, okenních profilů a podlahových krytin. Použití PVC ale může být spojeno s uvolňováním chemických látek použitých jako aditiva nebo při zpracování tohoto materiálu. Dalšími moderními materiály jsou izolační materiály jako polyuretan a polystyrenové pěny, které obsahují látky, jež se mohou uvolňovat do vzduchu a negativně ovlivňovat kvalitu vnitřního prostředí. Kromě toho může použití chemických barev, laků a umělých textilií ve vnitřních prostorách přispívat k uvolňování těkavých organických látek neboli VOC (Volatile Organic Compounds). V minulosti byl běžně používaným materiálem také azbest, oblíbený pro svou odolnost vůči teple, ohni a chemikáliím. Byl používán v různých stavebních materiálech a bylo jej možné nalézt ve většině budov postavených před rokem 1975. Nicméně, později bylo zjištěno, že expozice azbestu může způsobit vážné respirační problémy, a dokonce i rakovinu plic a další závažná onemocnění. Kvůli těmto zdravotním rizikům bylo ve většině zemí omezeno nebo zcela zakázáno používání azbestu a likvidace materiálů obsahujících azbest stále představuje velkou výzvu [3, 4, 5].

V průběhu historie se neustále zvyšovalo množství času, které trávili lidé uvnitř budov. Povědomí o vlivu vnitřního prostředí a kvality vzduchu na lidské zdraví začalo však narůstat až s rozvojem technologie a urbanizace ve 20. století, kdy se objevily také nové výzvy pro kvalitu vnitřního prostředí, spojené zejména s nárůstem využívání vytápění, chlazení a moderních stavebních materiálů [3]. Aktuální situace ohledně vnitřního prostředí a jeho vlivu na zdraví se výrazně liší mezi jednotlivými regiony světa a významnými faktory jsou: míra urbanizace, kvalita vnějšího prostředí, materiál a vlastnosti budov nebo přístup k bezpečným technologiím (otevřená topeniště vs. bezpečné vařiče). Celosvětově dnes situace odráží historii všech lidských interakcí, které měly s podmínkami panujícím ve vnitřním prostředí jakoukoli souvislost. Znečištění ovzduší, jež pochází z intenzivních lidských aktivit během urbanizačních procesů, silně ovlivňuje kvalitu vzduchu ve vnitřním prostředí. V současné době mnoho zemí celosvětově monitoruje kvalitu ovzduší a přijímá opatření ke snížení znečištění ovzduší, a přesto pouze 12 % světové populace žije ve městech, která splňují standardy kvality ovzduší Světové zdravotnické organizace (WHO) [3, 6]. Závěrem lze tedy říci, že kvalita vnitřního prostředí je ovlivněna celou řadou faktorů a jejich vzájemnou kombinací. Následující kapitoly přinášejí stručný přehled možných polutantů vnitřního prostředí a dopadů jejich působení na lidské zdraví.

1.1.1 Syndrom nemocných/nezdravých budov

Syndrom nemocných/nezdravých budov někdy také označovaný jako syndrom nemoci z budov (SBS, Sick Building Syndrome) představuje zdravotní stav, při kterém lidé uvnitř budovy trpí symptomy nemoci nebo se cítí špatně bez zjevného důvodu. SBS se nejčastěji používá k popisu situace, kdy lidé uvnitř budovy vnímají akutní negativní pocity související se zdravím nebo pohodlím, které se zdají být přímo spojeny s časem stráveným v budově, případně i pouze v některé místnosti nebo části budovy. Nelze identifikovat žádné konkrétní onemocnění nebo příčinu, příznaky bývají často nespecifické [7]. Ohniska SBS si poprvé získala pozornost v 70. letech 20. století s vývojem energeticky účinnějších budov, které jsou závislé na systémech mechanické ventilace pro cirkulaci čerstvého vzduchu a také pro regulaci teploty a někdy i vlhkosti [8].

V současné době nebyl stanoven žádný environmentální faktor nebo skupina faktorů jako jediná a jasná příčina SBS. Mezi faktory, kterými může být SBS ovlivněn, se řadí:

- chemické kontaminanty pocházející jak z vnitřního (např. složky lepidel) tak z vnějšího prostředí (např. výfukové plyny);

- biologické kontaminanty, mezi něž patří pyl, bakterie a plísně;
- nedostatečné větrání, které je v moderních budovách často způsobováno jejich přílišnou vzduchotěsností související s vyšší energetickou účinností;
- elektromagnetické záření z počítačů, mikrovlnek a dalších elektronických zařízení;
- nevhodné osvětlení, případně absence slunečního světla;
- psychologické faktory, včetně nadměrného pracovního stresu, nespokojenosti a špatných mezilidských vztahů [7, 8].

Projevy SBS bývají obvykle nespécifického rázu, častěji se objevují u žen. Prvním a hlavním příznakem bývá zpravidla únava. Při častějším, případně dlouhodobějším pobytu v podmínkách vyvolávajících SBS začíná obvykle docházet k bolestem hlavy, obtížím s usínáním a ke zhoršené schopnosti koncentrace. V moderních klimatizovaných a nedostatečně větraných budovách se SBS projevuje potížemi se sliznicemi, tedy nejčastěji pocitů pálení, svědění nebo suchostí, což může vést k záchvatům kašle. Často uvedené projevy pomínou následně po opuštění budovy, při závažnějších onemocněních mohou mít uvedené příznaky až chronickou formu. Nejvíce ohroženými skupinami jsou lidé s chronickým onemocněním (např. astmatici), lidé vyššího věku nebo těhotné ženy [1, 8, 9]. Známé potíže spojené s SBS jsou shrnuty v tabulce 1 [7].

Tabulka 1 - Projevy SBS

Celkové projevy	Bolesti hlavy, únava, nesoustředěnost
Respirační projevy	Dráždění nosní sliznice, rýma, pocit obstrukce nosu, pocit tíhy na prsou, zhoršení alergických obtíží, dráždění ke kašli atd.
Oční projevy	Pocit suchosti, dráždění spojivek
Kožní projevy	Suchost, podráždění kůže, alergické projevy

1.1.2 Hlavní polutanty vnitřního prostředí

Polutanty ve vnitřním prostředí představují důležitý faktor ovlivňující lidské zdraví a pohodu. Největší skupinou jsou polutanty plynné, ale důležité jsou i znečišťující aerosoly (prachové částice, mikroplasty, aerosoly pesticidů apod.) nebo biologické kontaminanty (pyly, zvířecí alergeny, plísně, viry apod.). Vzhledem k zaměření této bakalářské práce bude tato a následující kapitola zaměřena pouze na nejběžnější anorganické a organické plynné polutanty vnitřního prostředí. Tyto látky jsou často přítomny ve vzduchu vnitřních prostor budov a mohou mít škodlivé účinky na jejich obyvatele. Kvalita vnitřního ovzduší (IAQ, indoor air quality) může mít dopad na celou řadu zdravotních aspektů, včetně respiračních a kardiovaskulárních onemocnění, alergických reakcí, rakoviny a předčasné úmrtnosti. S rostoucím povědomím o vlivu IAQ na lidské zdraví a pohodu se stává stále důležitější monitorovat a regulovat plynné polutanty ve vnitřních prostorech [10]. Mezi hlavní plynné polutanty ve vnitřním prostředí patří z anorganických látek oxid uhličitý (CO_2), oxidy dusíku (NO_x), oxid uhelnatý (CO), ozon (O_3), oxid siřičitý (SO_2) a z těch organických se obvykle hovoří o jejich sumě a sleduje se pak skupina těkavých organických sloučenin (VOCs). Tyto látky pocházejí z různých zdrojů, včetně lidských aktivit, produktů metabolismu, stavebních materiálů, spotřebičů a čisticích prostředků. Identifikace a sledování těchto plynných polutantů jsou nezbytné pro ochranu lidského zdraví a zlepšení IAQ. Důkladné pochopení zdrojů znečištění a faktorů, které ovlivňují jejich distribuci, je klíčové pro účinnou implementaci opatření zaměřených na zlepšení IAQ [11, 12]. V následujících kapitolách budou stručně popsány hlavní plynné polutanty vnitřního prostředí a jejich dopady na lidské zdraví.

1.1.3 Hlavní plynné anorganické polutanty vnitřního prostředí

Ačkoli se tato práce zabývá primárně organickými látkami nelze vynechat ani anorganické plynné polutanty, jelikož významně ovlivňují kvalitu vnitřního prostředí. V následujících podkapitolách jsou uvedeny nejběžnější anorganické znečišťující plyny, které se ve vnitřním prostředí mohou běžně vyskytovat.

1.1.3.1 Oxid uhličitý

CO_2 je bezbarvý plyn bez zápachu, který je přirozeným produktem mnoha procesů, včetně dýchání organismů, fermentace a spalování organických materiálů. Aktuální venkovní koncentrace CO_2 se pohybují kolem 400 ppm. Ve vnitřních prostorech se koncentrace mohou lišit v závislosti na počtu osob v místnosti, úrovni ventilace a aktivitách vyvolávajících emise

CO₂ [13, 14]. V obytných místnostech je, v závislosti na počtu osob, běžně dosahováno úrovní 400-1000 ppm, což může představovat zejména riziko zvýšené únavy a zhoršené schopnosti koncentrace. Jednoduše lze tomuto jevu předcházet pravidelným větráním nebo kvalitním systémem vzduchotechniky [1, 13, 14]. Tabulka 2 přináší shrnutí účinků CO₂ o různých koncentracích na lidské zdraví [13, 14].

Tabulka 2 - Účinky CO₂ na lidské zdraví

Koncentrace CO₂ (ppm)	Účinky na lidské zdraví
Do 400	Běžná úroveň ve vzduchu, bez účinků
400–1000	Lehce zvýšená úroveň, mírná únava
1000–2000	Zvýšená úroveň, bolesti hlavy, zhoršení konc.
2000–5000	Vysoká úroveň, bolesti hlavy, zmatenost
Nad 5000	Extrémně vysoká úroveň, vážné zdravotní riziko

1.1.3.2 Oxidy dusíku

Hlavním zdrojem NO_x jsou plynové spotřebiče určené k vaření a vytápění, které jsou běžně využívány v domácnostech. Zásadní je i koncentrace NO_x venkovního prostředí, kde je hlavním zdrojem automobilová doprava. Rozhoduje tedy i to, zda se sledované prostředí vyskytuje v urbanizovaných nebo venkovských podmínkách, kde jsou obvykle koncentrace NO_x v důsledku nižší intenzity dopravy nižší. Průměrné koncentrace NO_x ve vnitřním prostředí se pohybují v rozmezí 100-500 ppb [12, 14, 15]. V posledních letech byla prokázána spojitost mezi zvýšeným výskytem respiračních onemocnění u dětí v domácnostech s plynovými spotřebiči [16]. Pro předcházení důsledků nadměrné koncentrace NO_x je opět nutné zvolit vhodné metody větrání či vzduchotechniku, případně omezit používání plynových spotřebičů. Dopady na lidské zdraví vyvolané skupinou oxidů dusíku jsou shrnuty v tabulce 3 [12, 14, 15].

Tabulka 3 - Účinky NO_x na lidské zdraví

Koncentrace NO_x (ppb)	Účinky na lidské zdraví
Do 100	Běžná úroveň, bez účinků
100–200	Mírné účinky, podráždění dýchacích cest u citlivých jedinců
200–400	Zvýšené riziko respiračních potíží
400–1000	Závažné účinky, bolesti hlavy, zhoršené dýchání
Nad 1000	Extrémně vysoká úroveň, plicní edém, ohrožení života

1.1.3.3 Oxid uhelnatý

CO je bezbarvý plyn bez zápachu, který vzniká při nedokonalém spalování organických materiálů. Mezi jeho hlavní vnitřní zdroje patří zejména kouření a používání plynových spotřebičů a z venkovních je to opět doprava. Běžná a bezpečná koncentrace CO ve vnitřním prostředí se pohybuje od 0,5 do 5 ppm. Během vaření na plynových sporácích, ale může dojít ke zvýšení až na 12 ppm [14, 15]. Vysoká koncentrace CO může způsobit otravu organismu. CO se váže na hemoglobin s mnohem větší afinitou než kyslík, čímž vytváří karboxyhemoglobin. Tento proces snižuje přenos kyslíku a způsobuje ischemii vitálních tkání. Ischemie může postihnout různé orgány a tkáně, což může mít vážné následky na zdraví a funkci organismu [17]. Tabulka 4 shrnuje hlavní účinky CO na různých koncentračních úrovních [14, 15].

Tabulka 4 - Účinky CO na lidské zdraví

Koncentrace CO (ppm)	Účinky na lidské zdraví
Do 9	Běžná úroveň ve vzduchu, bez účinků
10–35	Mírná únava, zhoršená koncentrace
35–200	Zvýšené riziko zdravotních problémů, bolesti hlavy, potíže s koncentrací
200–400	Vážné riziko, nevolnost
400–800	Extrémně vysoké riziko, ztráta vědomí
Nad 800	Život ohrožující stav

1.1.3.4 Ozon

O₃ je plyn, jehož hlavním zdrojem je fotochemická reakce mezi oxidy dusíku a organickými sloučeninami za přítomnosti slunečního záření. Jedná se tedy o sekundární polutant, který není obvykle emitován ze zdroje, ale vzniká za určitých podmínek v daném prostředí. Z venkovních zdrojů je tedy opět největším problémem doprava, potažmo produkce přízemního ozonu, který vzniká primárně v letních měsících při epizodách tzv. letního smogu [18]. Ve vnitřním prostředí budov jsou zdrojem ozonu některé čističky vzduchu, které jsou navrženy k odstraňování škodlivých látek z ovzduší. Tato zařízení mohou využívat různé technologie, jako jsou elektrické ozonátory a negativní iontové generátory. Běžná úroveň O₃ ve vzduchu je v rozmezí 0-50 ppb [12, 15, 19]. Dalšími zdroji v prostředí jsou například kopírky a tiskárny [20]. V tomto případě jsou účinky O₃ ohroženi primárně pracovníci kopírovacích a tiskařských center, běžné domácí přístroje představují obvykle minimální

riziko. Hlavními účinky doprovázejícími zvýšenou koncentrací tohoto plynu v prostředí jsou respirační obtíže nebo podráždění sliznic (tabulka 5) [15, 19]. Ochranou před účinky ozonu je opět vhodné větrání (nutná obezřetnost v letních měsících v oblastech s vysokou intenzitou dopravy) a vyvarování se zařízením generujícím ozon.

Tabulka 5 - Účinky O₃ na lidské zdraví

Koncentrace ozonu (ppb)	Účinky na lidské zdraví
Do 50	Běžná úroveň ve vzduchu, bez účinků
50–100	Možné podráždění dýchacích cest u citlivých jedinců
100–200	Potíže s dýcháním a zhoršení respiračních obtíží
200–300	Bolesti hrudníku a zhoršení plicních funkcí
300–800	Závažné zdravotní problémy, zmatenost, nevolnost
Nad 800	Život ohrožující, extrémní riziko pro zdraví

1.1.3.5 Oxid siřičitý

SO₂ je bezbarvý, štiplavě páchnoucí plyn, jehož hlavními zdroji jsou spalování fosilních paliv obsahujících síru, jako je uhlí a ropa, a výroba chemických látek. Dále vzniká při používání plynových spotřebičů v domácnostech a také se uvolňuje při sopečných erupcích. SO₂ se v atmosféře oxiduje a přeměňuje na kyselinu sírovou, která je hlavní složkou kyselých dešťů [21]. Expozice SO₂ může mít škodlivé účinky na lidský organismus, dopady na lidské zdraví jsou shrnuty v tabulce 6 [15, 22, 23]. Aby se minimalizovaly negativní účinky SO₂ na lidský organismus, je vhodné provádět dostatečnou ventilaci vnitřních prostor a snižovat používání fosilních paliv a průmyslových procesů, které produkují oxid siřičitý [15, 23].

Tabulka 6 - Účinky SO₂ na lidské zdraví

Koncentrace SO ₂ (ppb)	Účinky na lidské zdraví
Pod 10	Běžná úroveň ve vzduchu, bez účinků
10–40	Zvýšená úroveň, podráždění dýchacích cest, kašel
40–100	Vyšší úroveň, zhoršení respiračních potíží, dušnost
100–160	Vysoká úroveň, závažné dýchací potíže, zhoršení astmatu
Nad 160	Extrémně vysoká úroveň, vážné ohrožení zdraví, úmrtí

1.1.4 Hlavní plynné organické polutanty vnitřního prostředí - těkavé organické látky

Podle definice ze zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší: „Těkavou organickou látkou (VOC) je jakákoli organická sloučenina nebo směs organických sloučenin, s výjimkou methanu, která při teplotě 20 °C má tlak par 0,01 kPa nebo více nebo má odpovídající těkavost za konkrétních podmínek jejího použití.“ [24]. Obecně jsou VOC organické látky, které se uvolňují jako plyny z kapalin nebo pevných látek při pokojové teplotě a normálním tlaku. Zdroje VOC jsou přirozené i antropogenní. Přírodní zdroje ve vnitřním prostředí zahrnují zejména emise z rostlin a emise produkované lidským metabolismem [25]. Mezi antropogenní zdroje se řadí zejména VOC uvolňované z vybavení interiéru, nátěrů, rozpouštědel, čistících přípravků a kosmetiky. Dalšími významnými zdroji jsou kouření a spalování. VOC byly posuzovány WHO, která prokázala nepříznivé zdravotní účinky na člověka, jako je syndrom nemocných budov, dýchací potíže, alergie, selhání plic nebo dokonce rakovina, u mnoha z těchto látek. Povaha a dopad účinků na zdraví závisí na jejich složení, koncentraci a době expozice [26].

Těkavé organické sloučeniny mohou být klasifikovány různými způsoby, např. dle jejich fyzikálních charakteristik (molekulová hmotnost a bod varu), podle chemické reaktivity, zdrojů původu apod. Některé z těchto látek jsou těkavější než jiné. Látky, které se odpařují rychleji, jsou nebezpečnější a představují vyšší riziko pro životní prostředí a člověka. Klasifikace dle WHO je založená na těkavosti VOC a umožňuje rozdělit těkavé organické látky nacházející se ve vnitřním vzduchu do tří tříd, které jsou uvedeny v tabulce 7 [26, 27].

Tabulka 7 - Klasifikace VOC dle WHO

Třída	Příklady sloučenin	Rozsah bodu varu [°C]
Velmi těkavé organické sloučeniny (VVOC)	propan, methylchlorid	0 až 50–100
Těkavé organické sloučeniny (VOC)	formaldehyd, toluen, aceton	50–100 až 240–260
Polotěkavé organické sloučeniny (SVOC)	pesticidy (chlordan), změkčovadla (ftaláty)	240–260 až 380–400

Nejběžnějšími VOC jsou aromatické uhlovodíky, zejména benzen, toluen, ethylbenzen a xyleny, často označované zkratkou BTEX. Dalšími často se vyskytujícími se látkami jsou alkany, formaldehyd, halogenované uhlovodíky, pesticidy, změkčovadla a zpomalovače hoření [11, 26]. V následujícím textu jsou uvedeny těkavé organické látky, které jsou významné z hlediska jejich zastoupení a koncentrace ve vnitřním prostředí a jejich dopadů na lidské zdraví.

1.1.4.1 Formaldehyd

Formaldehyd, CH_2O , což je bezbarvý plyn s charakteristickým ostrým zápachem, je jednou z nejčastěji se vyskytujících VOC ve vnitřním prostředí. Vyskytuje se v malých množstvích přirozeně v prostředí, ale je také produktem lidských činností a průmyslových procesů. Mezi zdroje formaldehydu ve vnitřním prostředí patří zejména stavební materiály, izolační pěny a nátěry, dále čisticí a dezinfekční prostředky, kosmetika, textilie, některé druhy nábytku a kouření tabáku. Koncentrace ve vnitřním prostředí budov se obvykle pohybuje v rozmezí 20-30 ppb. Při vdechování formaldehydu může dojít k podráždění dýchacích cest, bolestem hlavy a zvýšené citlivosti na alergenů. Přímý kontakt může způsobit podráždění a svědění kůže, dermatitidu a ekzémy. Dlouhodobá expozice formaldehydu může být spojena s rizikem vzniku chronických onemocnění, jako jsou například respirační problémy, astma, alergie, a dokonce i rakovina nosohltanu a leukémie. Negativní účinky formaldehydu na lidské zdraví byly prokázány při expozicích, kdy byla jeho koncentrace v místnosti vyšší než 100 ppb [9, 10, 11, 28]. Vzhledem k rostoucímu používání stavebních materiálů a nábytku, ze kterého je formaldehyd uvolňován, je eliminace formaldehydu z vnitřního prostředí aktuálním tématem. Jednou z moderních metod je například použití čističek vzduchu s filtry ošetřenými chitosanem, což je přírodní aminopolysacharid, který má schopnost adsorbovat formaldehyd a tím výrazně snižovat jeho koncentraci. Dalším příkladem je využití elektrotermální uhlíkové membrány, která v kombinaci s katalyzátorem MnO_2 dokáže formaldehyd rozkládat na méně škodlivé látky a současně využívá teplo k podpoře cirkulace vzduchu, což snižuje potřebu ventilátorů v budovách [29, 30].

1.1.4.2 Benzen

Benzen je základní monocyklická aromatická sloučenina. Jedná se o čirou, bezbarvou, těkavou a výbušnou kapalinu s charakteristickým zápachem. Jeho zdroji jsou materiály používané ve stavebnictví, některé nábytkářské materiály, kancelářské vybavení, polymerní materiály, jako je PVC a nylonové koberce, barvy a lepicí hmoty. Dalším z jeho hlavních zdrojů je kouření tabáku. Průměrné vnitřní koncentrace benzenu v domácnostech se pohybují

v hodnotách nižších než 5 ppb. Vnitřní koncentrace benzenu v kancelářích jsou obvykle vyšší než ty naměřené v domácnostech, kvůli přítomnosti zdrojů, jako jsou kopírky a tiskárny. Krátkodobá expozice může způsobit podráždění očí, kůže a dýchacích cest, zatímco dlouhodobá expozice může vést k závažnějším potížím, jako je astma, poškození jater, ledvin a nervového systému. Benzen je také klasifikován jako karcinogen a dlouhodobá expozice může zvýšit riziko vzniku leukémie a dalších typů rakoviny [10, 11, 31]. Pro odstranění benzenu z vnitřního ovzduší lze využít například zeolitové membrány s MFI strukturou, které se vyrábějí hydrotermální syntézou. Tyto membrány umožňují separaci benzenu díky své vysoké propustnosti pro organické sloučeniny, při které zároveň poskytují vysokou selektivitu pro benzen. Další efektivní metodou je použití aktivního uhlí pro adsorpci benzenu. Kombinace aktivního uhlí s katalytickými materiály, jako jsou TiO_2 nebo MnO_2 , může zvýšit účinnost odstranění benzenu ze vzduchu tím, že kombinuje adsorpci s katalytickým rozkladem. Tato kombinace umožňuje nejen zachytit benzen na povrchu aktivního uhlí, ale také urychlit jeho chemickou přeměnu či rozklad, čímž se zvyšuje celková účinnost procesu čištění vnitřního ovzduší [32, 33].

1.1.4.3 Toluén

Toluén je aromatická sloučenina se sumárním vzorcem C_7H_8 . Je často používán jako rozpouštědlo v barvách, lacích, lepidlech a čisticích prostředcích, které představují jeho zdroje. Krátkodobá expozice může způsobit podráždění očí, dýchacích cest a kůže. Dlouhodobá expozice může vést k neurologickým problémům, jako jsou závratě, bolesti hlavy a únava. Navíc je toluén klasifikován jako potenciální karcinogen a dlouhodobá expozice může zvýšit riziko vzniku rakoviny [10, 26]. Toluén lze z vnitřního ovzduší odstranit například využitím fotokatalýzy. Fotokatalyzátory na bázi oxidu titaničitého (TiO_2) působí pomocí ultrafialového (UV) záření, zejména UV-A, které aktivuje chemické reakce vedoucí k tvorbě silně oxidačních radikálů. Tyto radikály rozkládají nejen toluén, ale i další VOC. Úroveň odstranění toluenu se může lišit v závislosti na intenzitě UV-A záření a vzdálenosti mezi fotokatalytickou vrstvou a zdrojem UV záření. Během tohoto procesu však mohou vznikat vedlejší produkty, jako je benzen a butadien [31, 34].

1.1.4.4 Ethylbenzen

Ethylbenzen je aromatická sloučenina se sumárním vzorcem C_8H_{10} . Je to čirá, hořlavá kapalina, která má charakteristický zápach podobný benzínu. Často se používá jako surovina při výrobě plastů, pryskyřic, laků a lepidel. Hlavními zdroji ethylbenzenu ve vnitřním prostředí jsou domácí chemikálie (čisticí prostředky, barvy, lepidla) a stavební materiály.

Krátkodobá expozice může způsobit podráždění očí a dýchacích cest. Dlouhodobá expozice může vést k chronickým poruchám dýchání a poškození jater. Ethylbenzen je považován za potenciální karcinogen a dlouhodobá expozice může zvýšit riziko vzniku rakoviny [10, 11, 26].

1.1.4.5 Xyleny

Xyleny jsou skupinou VOCs a jsou to aromatické sloučeniny se sumárním vzorcem C_8H_{10} . Do této skupiny se řadí tři izomery: o-, m- a p-xylen. Hlavními zdroji xylenů ve vnitřním prostředí jsou čisticí a dezinfekční prostředky. Účinky na lidský organismus jsou téměř totožné jako účinky toluenu. Krátkodobá expozice vede k podráždění očí, nosu a krku, dlouhodobá expozice může vést k neurologickým problémům, jako jsou závratě, bolesti hlavy a ztráta paměti. Xyleny jsou také považovány za potenciální karcinogeny a dlouhodobá expozice může zvýšit riziko vzniku rakoviny [10, 11, 26].

1.1.4.6 Ethanol

Ethanol je organická sloučenina se vzorcem C_2H_5OH . Je to čirá, hořlavá kapalina s charakteristickým ostrým zápachem. Ethanol se používá v různých průmyslových odvětvích, například jako rozpouštědlo, palivo, dezinfekční prostředek a přísada do některých chemických výrobků. Ve vnitřním prostředí můžeme ethanol nalézat zejména v čisticích prostředcích, dezinfekčních přípravcích, kosmetických produktech a osvěžovačích vzduchu. Použití ethanolu jako dezinfekčního prostředku se významně zvýšilo během pandemie COVID-19, kdy byl používán k inaktivaci viru SARS-CoV-2. Dezinfekční prostředky na bázi ethanolu se staly běžnými v domácnostech, kancelářích a dalších vnitřních prostorech, což vedlo k nárůstu jeho koncentrace ve vzduchu. Používání dezinfekčních prostředků na bázi ethanolu může uvolňovat do ovzduší také další škodlivé VOC. Při použití těchto dezinfekčních prostředků je důležité dbát na dostatečné větrání a vyvarovat se nadměrnému používání. Inhalační expozice ethanolu v prostředí může způsobit podráždění očí, nosu a krku, a při vyšších koncentracích může způsobit závratě nebo bolesti hlavy. Dlouhodobá expozice je spojena s vážnějšími zdravotními riziky, včetně poškození jater a zvýšeného rizika rakoviny. Ethanol je považován za potenciální karcinogen, a proto je důležité minimalizovat expozici ve vnitřním prostředí [35, 36].

1.1.4.7 Hexan

Hexan je organická sloučenina s chemickým vzorcem C_6H_{14} , která patří do skupiny alkanů. Je to čirá, hořlavá kapalina s charakteristickým sladkým zápachem. Hexan je běžně

používán v průmyslu jako rozpouštědlo, zejména při extrakci olejů z rostlin, v barvách a lacích, a v některých lepidlech a čisticích prostředcích. V interiérech se může vyskytovat v souvislosti s používáním výrobků obsahujících hexanová rozpouštědla, jako jsou některé čisticí prostředky, odmašťovací produkty a především lepidla. Hexan je využíván také v potravinářském průmyslu, zejména při extrakci olejů z rostlin, a jeho přítomnost byla potvrzena v některých zpracovaných potravinách. Krátkodobá expozice hexanu může způsobit podráždění dýchacích cest. Při vyšších koncentracích může ovlivnit nervový systém, což může vést k neuropatii, což je špatně léčitelné poškození nervů, které se projevuje necitlivostí, brněním slabostí nebo bolestí končetin. Těmito účinky jsou ohroženi především pracovníci v průmyslové výrobě lepidel [37].

1.1.4.8 Dichlormethan

Dichlormethan, také známý jako methylenchlorid, je organická sloučenina s chemickým vzorcem CH_2Cl_2 . Je to bezbarvá, vysoce těkavá kapalina s výrazným sladkým zápachem. Je to dobré rozpouštědlo s nízkou teplotou varu. Nachází se v odstraňovačích barev a laků, ve sprejích na leštění bot a lepidlech. Krátkodobá expozice dichlormethanu může způsobit podráždění očí, nosu a dýchacích cest, a při vyšších koncentracích může vést k bolestem hlavy, závratím nebo nevolnosti. Dichlormethan je také považován za potenciální karcinogen [38].

1.1.4.9 Aceton

Aceton je jednoduchá sloučenina obsahující ketonovou skupinu s chemickým vzorcem $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$, která má charakteristický zápach a je běžně používána v průmyslu a v domácnostech. Často se používá jako rozpouštědlo v lakovnách, lepidlech, čisticích prostředcích, odstraňovačích nátěrů a v odlakovačích nehtů. Je přítomen v některých kosmetických výrobcích a léčivech. Může být také produkován lidským tělem jako vedlejší produkt metabolismu tuků a bílkovin. V běžných situacích je však množství acetonu produkovaného lidským tělem nevýznamné. Aceton je z těla vylučován výdechem nebo močí. Krátkodobá expozice může způsobit podráždění očí a dýchacích cest. Dlouhodobá expozice může vést k neurologickým problémům [25, 26, 39].

1.1.4.10 Hexanal

Hexanal je organická sloučenina s chemickým vzorcem $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}$, která patří do skupiny aldehydů. Je to čirá kapalina s výrazným zápachem připomínajícím posekanou travu. Společně s formaldehydem se řadí mezi nejhojnější znečišťující látky v domácnostech

a školách. Vyskytuje se přirozeně v rostlinách. Využívá se hlavně jako vonná složka v parfémtech a aromatech, v potravinářském průmyslu jako zpomalovač zrání ovoce a zeleniny. V analytické chemii se využívá při hodnocení čerstvosti potravin. V interiérech může být přítomen jako součást osvěžovačů vzduchu nebo kosmetických přípravků. Při krátkodobé expozici nízké koncentrace nedochází k významným zdravotním problémům, vyšší koncentrace mohou dráždit oči a dýchací cesty [30, 31, 40, 41].

1.1.4.11 Aditiva do plastů

Plasty jsou dnes již nezbytnou součástí moderního života. Používají se ve velkém množství výrobků, jako jsou obaly potravin, textil, zdravotnické pomůcky, elektronika, nábytek, stavební materiály a automobilové součástky. Jedná se o materiály, které jsou tvořeny syntetickými nebo přírodními makromolekulárními organickými sloučeninami. Aby bylo dosaženo jejich požadovaných vlastností, jako jsou pevnost, pružnost, barva a odolnost proti požáru, přidává se k základnímu materiálu plastů široká škála látek nazývaných aditiva, z nichž každá má specifickou funkci a účel. Z hlediska problematiky uvolňování VOC patří mezi nejvýznamnější aditiva chemická změkčovadla a zpomalovače hoření [42].

- **Chemická změkčovadla**

Chemická změkčovadla se přidávají do plastů za účelem zvýšení jejich pružnosti a ohebnosti. Tyto látky nejsou pevně vázány k plastovému materiálu, což znamená, že mohou být postupně uvolňovány do okolního prostředí procesem zvaným volatilizace, a to jak během používání výrobků, tak během jejich likvidace. Často se využívají ve výrobcích z PVC, jako jsou podlahové krytiny, kabelové izolace, hračky a různé druhy fólií. Mezi nejběžnější změkčovadla patří ftaláty, adipáty a bisfenol A (BPA). V devadesátých letech minulého století patřily mezi hojně používaná ftalátová změkčovadla zejména di(2-ethylhexyl)ftaláty (DEHP) a diisobutylftaláty (DIBP), které se řadí mezi prokázané endokrinní disruptory. DEHP se řadí i mezi potenciální karcinogeny. V současnosti je DEHP obvykle nahrazován diisononylftalátem (DINP), který nabízí podobné změkčovací vlastnosti a současně je méně toxický [42, 43]. Mezi adipáty se řadí zejména di(2-ethylhexyl)adipát (DEHA), který rovněž při vyšších koncentracích může zejména při inhalaci narušovat endokrinní systém [44]. V roce 2006 byla v Severní Kalifornii provedena studie výskytu změkčovadel ve vnitřním a venkovním vzduchu, při které byly DIBP a DEHA detekovány ve všech ze zkoumaných domácností [45].

- **Zpomalovače hoření**

Zpomalovače hoření slouží k zajištění nehořlavosti materiálů, a to zejména plastů, ale také dřeva a textilií. Mezi významné zpomalovače hoření se řadí organofosfáty (POC), které jsou klasifikovány jako SVOC. Jsou součástí zejména stavebních výrobků a elektronických zařízení. Například tris(2-chlorethyl)fosfát (TCEP) je jedním z běžných retardérů hoření. Poté co bylo prokázáno, že bromované zpomalovače hoření (BFR) představují vážná environmentální rizika s ohledem na jejich perzistenci a bioakumulaci, se TCEP začal hojně využívat jako jejich náhrada. Můžeme ho nalézt například v polyuretanové pěně a nábytku. TCEP je však také potenciálně toxický pro lidské zdraví [42, 46].

1.1.5 Celkové těkavé organické látky

Celkové těkavé organické látky (TVOC) jsou směsí různých těkavých organických látek přítomných ve vzduchu. Koncentrace TVOC je jedním z ukazatelů kvality vnitřního ovzduší. Podle německé spolkové agentury pro životní prostředí (Umweltbundesamt) se koncentrace TVOC ve vnitřních prostorách běžně pohybují v rozmezí 70 až 300 ppb. Vyšší koncentrace mohou mít potenciální negativní dopady na lidské zdraví. Nicméně ani při vysokých koncentracích TVOC nemusí vždy dojít k negativním zdravotním účinkům, pokud se jedná o látky, které nejsou toxické nebo jsou škodlivé pouze při mnohem vyšších koncentracích. Naopak, i velmi nízké koncentrace některých škodlivých látek mohou způsobit zdravotní problémy, tudíž samotná hodnota TVOC nemusí vždy přesně odrážet riziko pro zdraví [47].

1.1.6 Index kvality vnitřního vzduchu

Index kvality vnitřního vzduchu (Indoor Air Quality Index, IAQI) je nástrojem pro měření a hodnocení úrovně kvality ovzduší ve vnitřních prostorách. Označení index kvality vzduchu (Air Quality Index, AQI) se častěji používá pro měření kvality venkovního vzduchu. Pomocí senzorů jsou v interiérech měřeny různé faktory, na jejichž základě je stanovena hodnota IAQI. Tyto faktory se liší pro různé typy vyráběných senzorů, patří mezi ně především koncentrace CO₂, koncentrace TVOC, teplota, relativní vlhkost, koncentrace aerosolů PM_{2,5} a PM₁₀ a někdy také další parametry, jako je hluk a osvětlení. Každý z těchto faktorů má stanovené rozsahy hodnot, které definují, kdy je úroveň znečištění považována za bezpečnou, a kdy začíná být problematická. Vypočítaná hodnota IAQI se získává kombinací jednotlivých výsledků měření. Tento výpočet zohledňuje váhu a význam každého

faktoru, čímž vytváří komplexní hodnocení kvality vzduchu ve vnitřním prostředí. Celková hodnota IAQI se obvykle pohybuje v rozsahu 0 až 100. Vyšší hodnoty IAQI indikují lepší kvalitu vzduchu, zatímco nižší hodnoty poukazují na zvýšenou úroveň znečištění a potenciální zdravotní rizika. Monitorování IAQI je vhodné pro pochopení kvality vnitřního vzduchu a pro identifikaci potenciálních zdravotních rizik. Pravidelné sledování IAQI umožňuje zjistit, zda je kvalita vzduchu ve vnitřním prostředí bezpečná, nebo zda je třeba podniknout opatření k jejímu zlepšení [48, 49].

1.1.7 Opatření pro zvyšování kvality vnitřního prostředí

Vzhledem ke zdravotním rizikům zapříčiněným nízkou kvalitou vnitřního ovzduší, která byla popsána v předchozích kapitolách, je vhodné zavádět opatření zvyšující kvalitu vzduchu v interiérech. Hlavním opatřením je zajištění ventilace. Dostatečná výměna vzduchu pomáhá snižovat koncentraci VOC, CO₂ a dalších škodlivých látek. Toho lze dosáhnout otevíráním oken, využíváním mechanických ventilačních systémů nebo instalací vzduchových filtrů. Pro odstranění některých škodlivých látek, například formaldehydu, je možné použití ionizátoru, který je kombinován s ventilátory. Další možné opatření je výběr nízkoemisních stavebních materiálů a výrobků pro domácnost. Produkty jako barvy, laky, lepidla a nábytek z lisovaného dřeva mohou emitovat škodlivé VOC, zdroje jednotlivých významných VOC jsou uvedeny v předchozí kapitole 1.1.3. Při renovacích a nákupu nového nábytku by proto měly být upřednostňovány výrobky s nízkými emisemi VOC. Dalším účinným způsobem, jak snížit koncentraci VOC v interiérech je omezení aktivit, které vedou k jejich šíření. Mezi tyto aktivity se řadí zejména kouření cigaret, používání otevřených ohňů, plynových ohřívačů a nadbytečné přetápění místností, protože vyšší teplota způsobuje zvýšené odpařování VOC z materiálů. Dalším opatřením je zamezení skladování chemikálií, jako jsou barvy, rozpouštědla nebo benzín, v obytných prostorech. Tyto chemikálie by měly být skladovány například v garážích nebo sklepích. Zavedení těchto opatření může výrazně přispět ke zlepšení kvality vnitřního ovzduší a snížení zdravotních rizik spojených s těkavými organickými sloučeninami [1, 2, 11].

1.2 Metody odběru a stanovení VOC ve vnitřním prostředí

Pro stanovení VOC ve vnitřním prostředí lze využívat různé metody umožňující detekci a kvantitativní i kvalitativní hodnocení těchto látek. Existují dva hlavní postupy pro detekci a analýzu VOC, kterými jsou odběr vzorků s následnou laboratorní analýzou a přímé měření

pomocí detektorů, které vyhodnocují koncentrace TVOC přímo na místě [27]. V následujících podkapitolách bude oběma těmito typům, vzhledem k zaměření experimentální části této bakalářské práce, věnováno více prostoru.

1.2.1 Sorpční trubičky

Při odběru vzorků pomocí sorpčních trubiček se využívají trubičky naplněné sorbentem, který adsorbuje VOC z okolního vzduchu. Po odběru jsou VOC desorbovány a analyzovány v laboratoři. Sorpční trubičky lze použít jak pro aktivní, tak pro pasivní odběr vzorků. Pro aktivní odběry se využívají pumpy, nebo čerpadla k nasávání vzduchu přes trubičku. Tato metoda umožňuje kontrolovat objem vzduchu procházejícího sorbentem, což zvyšuje přesnost analýzy. Při pasivním odběru se spoléhá na přirozenou difuzi VOC k sorbentu. Pasivní vzorkovače mají obecně snazší použití, nevyžadují napájení a mohou být levnější, ale obvykle mají delší dobu odběru vzorků. K výhodám využití sorpčních trubiček patří vysoká citlivost metody, schopnost zachytit nízké koncentrace VOC, a možnost výběru ze široké škály sorbentů, které umožňují cílené zachycení různých typů VOC. Nevýhodou je časová a instrumentální náročnost z důvodu nezbytnosti následné laboratorní analýzy [27, 50].

1.2.2 SPME vlákno

Další metodou pro záchyt VOC ve vnitřním prostředí je použití SPME (Solid Phase Microextraction) vláken. Při použití SPME se analytické vlákno, pokryté absorpční vrstvou z materiálů jako je například polydimethylsiloxan (PDMS), vystaví vzorku po určitou dobu, během níž se analyty zachytávají na toto vlákno. Vlákno je poté obvykle umístěno do plynového chromatografu s hmotností spektrometrií, kde dochází k vyhodnocení výsledků. Při použití SPME není zapotřebí rozpouštědlo, což činí tuto metodu šetrnou k životnímu prostředí a snadnou na použití. Vlákna mohou být vybrána podle specifických analytických potřeb, což zajišťuje vysokou selektivitu a citlivost pro různé typy VOC. Výhody použití SPME vláken dále zahrnují také rychlost a jednoduchost odběru vzorků. Jeho nevýhodami jsou omezená kapacita sorbentu, což může omezit schopnost detekce velmi nízkých koncentrací VOC, a potenciální konkurence mezi různými VOC o sorpční místa na vlákne [27, 51].

1.2.3 Plynová chromatografie

Plynová chromatografie (GC) je analytická metoda používaná pro separaci a analýzu VOC. GC je vysoce účinná metoda umožňující identifikaci a kvantifikaci jednotlivých složek ve směsi VOC. GC funguje na principu separace směsi látek na základě jejich různých

fyzikálních a chemických vlastností. Směs VOC je převedena do plynné fáze a transportována nosným plynem přes chromatografickou kolonu, která obsahuje stacionární fázi. Různé složky vzorku interagují se stacionární fází odlišně, což vede k jejich separaci. Po separaci v koloně se jednotlivé složky směsi dostávají k detektoru, který zaznamená jejich přítomnost a vytváří odpovídající signál. Tento signál je poté analyzován a interpretován, což umožňuje identifikaci a kvantifikaci jednotlivých látek ve vzorku. VOCs mohou být před samotnou GC analýzou zachyceny například pomocí sorpčních trubiček nebo SPME vlákna, které byly popsány výše. Mezi výhody GC se řadí její vysoká citlivost, selektivita a široká aplikovatelnost pro různé typy VOC. Nevýhody zahrnují čas náročnost, potřebu specializovaného laboratorního vybavení a složitost přípravy vzorků [27, 52].

1.2.4 Přenosné plynové chromatografy

V současnosti je možné využívat také přenosné plynové chromatografy, které představují technologii pro analýzu VOC přímo v terénu. Všechny nezbytné komponenty, jako jsou vzorkovací jednotka, chromatografická kolona, detektor a nosný plyn, jsou obsaženy v jednom přenosném zařízení. Díky integrovaným technologiím, jako jsou přednastavené metody a databáze chemických sloučenin, dokážou tyto přístroje rychle identifikovat a kvantifikovat různé VOC. To je zvláště užitečné při situacích, které vyžadují rychlou a přesnou detekci VOC přímo na místě, například při ochraně bezpečnosti [53].

1.2.5 Plynová chromatografie s hmotnostní spektrometrií

Plynová chromatografie s hmotnostní detekcí GC-MS kombinuje plynovou chromatografii s hmotnostní spektrometrií. Po separaci složek v chromatografické koloně jsou tyto složky analyzovány hmotnostním spektrometrem, který měří hmotnostní spektra jednotlivých molekul, což umožňuje získání přesnějších kvantitativních i kvalitativních informací o složení vzorku oproti GC. Nevýhodami této metody je nákladné přístrojové vybavení, složitost obsluhy a časová náročnost [27, 54].

1.2.6 Fotoionizační detektor

Fotoionizační detektory (PID) jsou často používány ke stanovení koncentrace TVOC. Princip jejich fungování spočívá ve fotoionizaci molekul VOC pomocí ultrafialového (UV) záření. Když jsou molekuly VOC vystaveny UV záření, ionizují se a vytvářejí kladně nabitě ionty a elektrony. Vložené napětí na elektrodách generuje iontový proud, který je přímo úměrný koncentraci měřené těkavé látky. Proud je převeden na napětí, které je výstupní měřenou veličinou. Přenosné PID jsou přístroje navrženy pro rychlé měření koncentrace

TVOC přímo na místě. Tyto detektory jsou využívány v oblastech, kde je potřeba získat okamžité informace o přítomnosti TVOC, jako jsou průmyslové závody, laboratoře, hasičské záchranné zásahy, monitorování kvality ovzduší a další aplikace v oblasti ochrany životního prostředí a/nebo zdraví. Některé PID jsou naopak navrženy k trvalému umístění v místnostech, laboratořích, průmyslových zařízeních a jiných prostorech s cílem kontinuálně monitorovat koncentraci TVOC. Tyto detektory poskytují neustálý přehled o kvalitě ovzduší a umožňují okamžitou identifikaci znečištění. PID mají rychlou odezvu, široký rozsah detekce, jednoduchou obsluhu, u některých z nich existuje možnost datového záznamu. Samostatný PID však dokáže změřit pouze celkovou koncentraci TVOC v prostředí, která je orientační a sama o sobě není spolehlivým indikátorem kvality vzduchu. Vzhledem k tomu, že různé látky mají různou ionizační energii, PID detektory mohou mít odlišnou citlivost na různé látky. Některé škodlivé těkavé látky mohou mít slabou odezvu na PID detektoru a mohou být detektorem přehlédnuty [55, 56].

2 Experimentální část

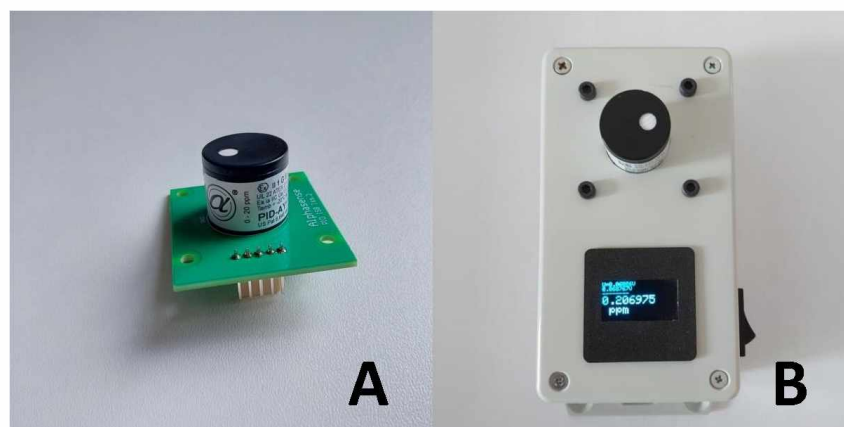
2.1 Použité chemikálie a materiály

Pro měření TVOC byl využíván přenosný PID, který je potřeba pravidelně kalibrovat. Před počátkem měření byl přístroj kalibrován. Kalibračním standardem byl čistý vzduch s isobutanem (Linde Gas, Česká republika) o koncentraci 20 ppm. Nulování přístroje bylo provedeno čistým syntetickým vzduchem čistoty 5N (Air Products, Německo).

Pro kvalitativní měření VOC bylo použito SPME vlákno o tloušťce 85 μm , jehož materiál byl Carboxen/Polydimethylsiloxilan (Sigma-Aldrich, Praha, Česká republika). Pro vytvoření potřebných podmínek při experimentu byla použita svíčka ze sójového vosku a vonných olejů (vanilka, bílá bavlna) a také vonné tyčinky běžně dostupné v prodejnách s domácími potřebami a dekoracemi.

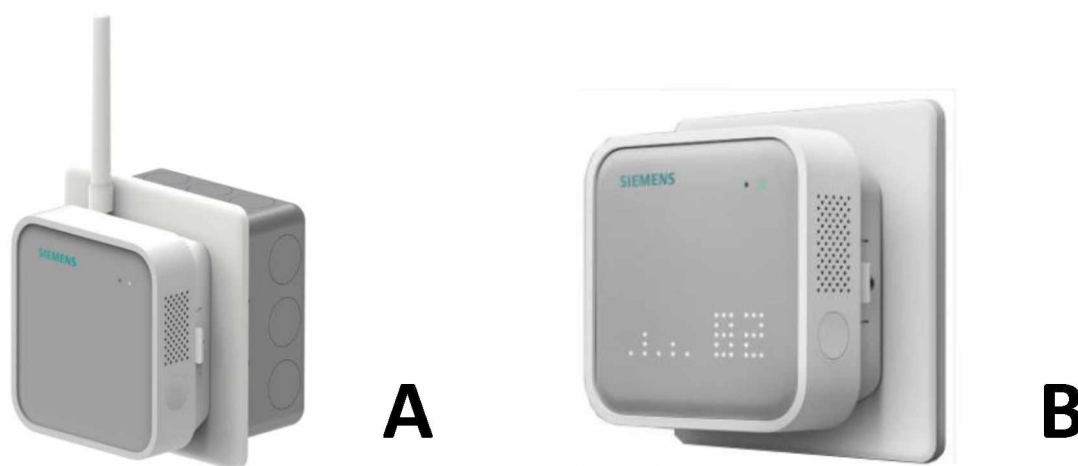
2.2 Přístrojové vybavení

Pro měření TVOC v různých prostorech byl používán přenosný PID, který byl zkonstruován na Fakultě elektrotechniky a informatiky (FEI) Univerzity Pardubice (UPCE). Základem je komerčně dodávaný PID AY (Alphasense, Velká Británie, Obrázek 1A), který byl umístěn do plastového obalu, kde je připojen k vnitřní elektronice, která zajišťuje měření a zobrazení hodnot. Aktuální hodnoty napětí ve voltech a koncentrace TVOC v ppm se zobrazují na displeji, jak lze vidět na fotografii spuštěného detektoru (Obrázek 1B). Přístroj má dva sloty: nabíjecí slot a slot pro vložení SD karty. Při vložení SD karty se po zapnutí přístroje každou minutu zaznamenávají aktuální napětí a koncentrace TVOC na tuto kartu. Rozsah měření detektoru je 0 – 20 ppm.



Obrázek 1 - Komerčně dodávaný detektor PID AY (A) a zkonstruovaný přenosný PID detektor používaný v této bakalářské práci (B)

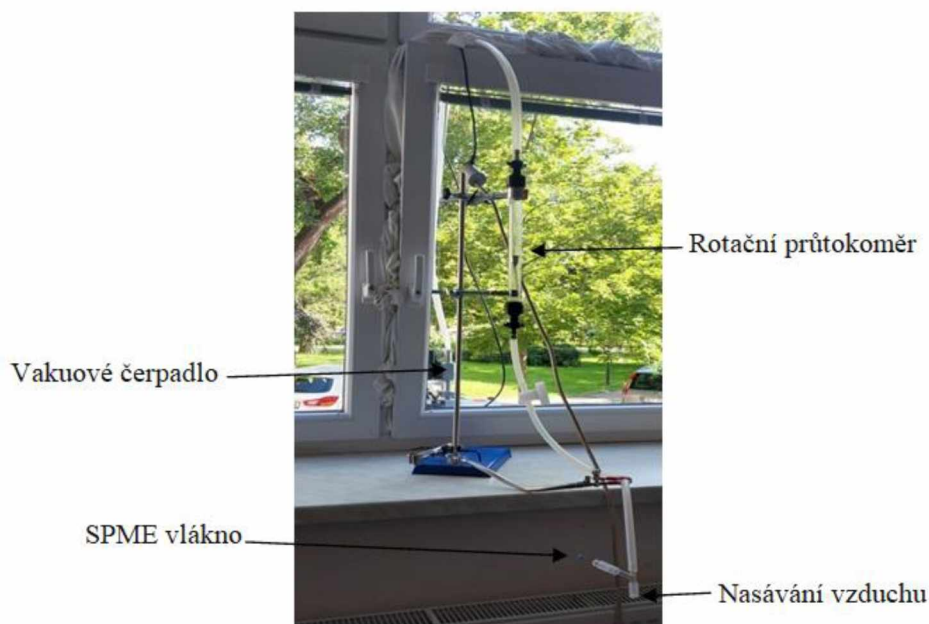
Dalšími použitými detektory byly dvě kombinovaná čidla firmy Siemens. Tato čidla jsou na pevně umístěna v učebnách na FEI Univerzity Pardubice. Prvním z nich je čidlo umístěné v učebně PC101 (IAQ Multi Sensor - QNA28280D), je zobrazeno na Obrázku 3. Na Obrázku 4 lze vidět druhé čidlo (IAQ-MONITOR-10A823), které je umístěno v učebně PC102. Tato čidla měří teplotu, relativní vlhkost, koncentraci CO₂, TVOC, aerosolů a dále také intenzitu okolního hluku a osvětlení. Tyto parametry lze sledovat online a také zpětně dohledat naměřená data. Na základě těchto dat je také pomocí matematických modelů stanoven index kvality vnitřního prostředí.



Obrázek 2 - Používaná čidla Siemens pro monitorování koncentrace TVOC a kvality vnitřního ovzduší v učebnách na FEI – (A) IAQ Multi Sensor - QNA28280D a (B) IAQ-MONITOR-10A823

Pro analýzu SPME vlákna, která byla provedena na Katedře analytické chemie FchT UPCE doc. Ing. Tomášem Bajerem, Ph.D., byl používán plynový chromatograf (GC 2010, Shimadzu, Kyoto, Japonsko), hmotnostní spektrometr (QP 2010 Plus, Shimadzu, Kyoto, Japonsko) a Combi Pal autosampler (CTC Analytics, AC, Zwingen, Švýcarsko). Při analýze byla použita separační kolona: SLB-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm) (Supelco, Bellefonte, PA, USA).

Při mikroextrakci na tuhou fázi byla použita aparatura obsahující vakuové čerpadlo DUO 6 (Vacuubrand, Německo) a rotační průtokoměr RHEOTEST (Medingen GmbH, Německo). Vakuové čerpadlo bylo během experimentu umístěno za oknem, aby nerušilo hlukem při probíhající přednášce. Okno bylo pečlivě utěsněno. Aparatura je vyobrazena na Obrázku 3.



Obrázek 3 - Aparatura pro SPME použitá během přednášky v učebně na FEI

2.3 Popis prostředí měření

Měření koncentrace TVOC a někdy také dalších parametrů ovlivňujících kvalitu vnitřního prostředí bylo prováděno v různých vnitřních prostorech. Následující podkapitoly obsahují podrobný popis těchto prostor.

2.3.1 Učebny na Fakultě chemicko-technologické Univerzity Pardubice

Na FchT UPCE bylo měření prováděno v pěti učebnách. Učebny jsou v práci uvedeny pod čísly 1 – 5. Všechny učebny jsou vybaveny stoly a židlemi, jejichž počty se odvíjejí dle velikosti učebny, dále počítačem, projektorem, projekčním plátnem a tabulí. Ve všech učebnách je zavedena vzduchotechnika. Učebna č. 1 má vnitřní objem 427 m³. Jako jediná z učeben je vybavena kobercem, a to na celé ploše podlahy, učebna má dvoje dveře na protilehlých stěnách a žádná okna. Objem učebny č. 2 je 211 m³, jako jediná z těchto zkoumaných učeben má možnost větrání okny, celá jedna stěna je prosklená, ale otevíratelná je pouze menší část oken v horní části. Učebny č. 3, 4 a 5 mají vnitřní objem 274 m³ a jsou bez oken s jedněmi vstupními dveřmi.

2.3.2 Učebny s instalovanými čidly Siemens

Čidla Siemens jsou umístěna v učebnách PC101 a PC102 na FEI UPCE. Tyto učebny mají rozměry 12×6×3 m a objem i s výklenky 250 m³, mají možnost větrání okny. Učebna PC102 je vybavena filtrem sloužícím pro záchyt aerosolů. Jedná se o počítačové učebny

s kapacitou 20 míst pro studenty a jedno místo pro vyučujícího. Jsou tedy vybaveny odpovídajícím počtem počítačů, stolů a židlí.

2.3.3 Pracovní prostory

Pro posouzení koncentrace TVOC v pracovních prostorech byla vybrána administrativní budova, kde bylo měření prováděno ve čtyřech totožných kancelářích, v místnosti dispečinku, kde je nepřetržitý provoz, ve dvou zasedacích místnostech a v technické místnosti. Všechny tyto pracovní prostory mají možnost větrání okny. Kanceláře jsou dále označeny čísly 1 až 4, jejich rozměry jsou $2,7 \times 5,7 \times 2,6$ m, vnitřní objem je 40 m^3 . Kanceláře mají kapacitu pro 2 osoby, jsou vybaveny běžným kancelářským nábytkem, kobercem a klimatizací. Dále bylo měření provedeno ve velké a malé zasedací místnosti, tyto místnosti jsou vybaveny koberci, projekčním zařízením a stoly a židlemi a rovněž je v nich možnost spuštění klimatizace. Rozměry malé zasedací místnosti jsou $5,5 \times 5,7 \times 2,6$ m, objem je 82 m^3 . Velká zasedací místnost má rozměry $5,5 \times 11,5 \times 2,6$ m, vnitřní objem je 164 m^3 . Technická místnost má rozměry $4,2 \times 3,1 \times 3,6$ m, objem místnosti je 47 m^3 . Kapacita místnosti je 1 osoba. V místnosti je kancelářské vybavení a dále v ní byly v době měření umístěny barvy, laky a nářadí. Posledním zkoumaným pracovním prostorem byla místnost dispečinku, která má kapacitu 2 osoby a probíhá v ní nepřetržitý provoz. Její rozměry jsou $7,7 \times 7,8 \times 2,6$ m, objem místnosti je 156 m^3 . Je vybavena běžným kancelářským nábytkem, nástroji pro provoz dispečinku, kobercem, čističkou vzduchu a klimatizací.

2.3.4 Domácnosti

V domácnostech byla koncentrace měřena ve čtyřech obývacích pokojích, kuchyni a ložnici, dále ve dvou pokojích univerzitních kolejí a také je zde zařazeno měření ve dvou garážích. Všechny tyto prostory mají možnost větrání okny. Kuchyň má rozměry $3 \times 4,5 \times 2,5$ m, její objem je 34 m^3 . Je vybavena plynovým sporákem, lednicí a dalšími běžnými kuchyňskými potřebami. Ložnice má rozměry $4,6 \times 3,6 \times 2,4$ m, její objem je 40 m^3 . Je vybavena dvěma postelemi, skříněmi a kobercem. Dva obývací pokoje jsou samostatné místnosti, zatímco další dva jsou součástí bytů s otevřenými prostory a jsou tedy propojeny s kuchyní a jídelnou. Obývací pokoje jsou označeny čísly 1 až 4. Všechny jsou zařízeny vybavením obvyklým pro obývací pokoje. Rozměry těchto obývacích pokojů jsou $5,3 \times 3,6 \times 2,4$ m, $4 \times 3,8 \times 2,6$ m, $5,6 \times 11,3 \times 2,5$ m, $5,3 \times 11,6 \times 2,6$ m, jejich vnitřní objemy jsou 46 m^3 , 40 m^3 , 158 m^3 a 160 m^3 .

Dále měření probíhalo ve dvou pokojích typu KLASIC s lednicí na univerzitních kolejích. Pokoje mají kapacitu 2 osoby a jsou vybaveny postelemi, stoly a vestavěnými skříněmi. Jejich rozměry jsou $14\text{ m}^2 \times 2,6\text{ m}$, objem je 36 m^3 .

Měření probíhalo také ve dvou garážích. Rozměry první garáže jsou $6,8 \times 4,3 \times 2,4\text{ m}$, její objem je 70 m^3 . Druhá garáž má rozměry $6,7 \times 5,2 \times 2,6\text{ m}$, její objem je 91 m^3 . Obě garáže jsou postaveny u rodinných domů a kromě automobilu, který zde byl v době měření zaparkován, se v nich nachází také různé prostředky pro údržbu domu a zahrady, jako jsou barvy, laky, benzín, nářadí, sekačka na trávu a další.

2.3.5 Veřejné prostory

Měření bylo prováděno také ve veřejných prostorech, a to v obchodním centru v Pardubicích. Měření probíhalo v obchodech, jídelní zóně, kavárně a v podzemních garážích. Přesné údaje o rozměrech daných prostor nebylo možné pro účely této práce získat.

2.4 Pracovní postupy

Při měření s přenosným PID bylo postupováno následujícím způsobem. Detektor byl umístěn do zkoumaného prostoru. V učebnách, kancelářích i domácnostech byl detektor položen při měření na stole ve výšce přibližně $0,7\text{ m}$. Při měření ve veřejných prostorech byl detektor během měření držen v rukou. Do detektoru byla vždy umístěna SD karta a poté byl detektor spuštěn. Minimální doba měření byla 10 minut.

Při mikroextrakci na tuhou fázi, byla sestavena aparatura, do které bylo umístěno SPME vlákno. Měření bylo zahájeno spuštěním vakuového čerpadla a nastavením průtokoměru na průtok vzduchu 3200 l/h a probíhalo po dobu 35 minut. Poté bylo SPME vlákno z aparatury odebráno a umístěno do lednice. Analýza SPME vlákna na GC-MS detektoru byla provedena na Katedře analytické chemie FchT UPCE doc. Ing. Tomášem Bajerem, Ph.D.

3 Výsledky a diskuze

3.1 Měření TVOC při běžných aktivitách

Měření koncentrace TVOC zpracované v této kapitole bylo prováděno přenosným PID. Bylo sledováno, jaké vlivy působí na koncentraci TVOC ve vnitřních prostorech při běžném provozu ve školních, pracovních a veřejných prostorech a při běžných aktivitách prováděných v domácnostech. Minimální doba měření v jednotlivých prostorech byla stanovena na 10 minut. Pokud v průběhu měření nedocházelo ke změnám koncentrace TVOC, tedy nedocházelo k významnému poklesu nebo nárůstu koncentrace, byl z naměřených hodnot vypočítán průměr koncentrace TVOC v měřeném období. Pokud ke změnám v koncentraci docházelo, byl vytvořen graf znázorňující průběh měření.

3.1.1 Měření koncentrace TVOC ve školních prostorech

Měření probíhalo ve vybraných učebnách na FchT UPCE během výuky a pro porovnání vlivu obsazenosti učebny na koncentraci TVOC také v prázdných učebnách. Přesný popis učeben je uveden v kapitole 2.3.1. Detektor byl při měření umístěn v prostoru učebny na stole ve výšce 0,8 m a ponechán na stejném místě po celou dobu měření. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8 - Výsledky měření koncentrace TVOC ve školních prostorech

<i>Číslo učebny</i>	<i>Datum měření</i>	<i>Doba měření [min]</i>	<i>Objem místnosti [m³]</i>	<i>Možnost větrání okny</i>	<i>Počet lidí</i>	<i>Napětí [V]</i>	<i>Koncentrace TVOC [ppb]</i>
1	09. 04. 2024	95	427	Ne	83	0,08	370
	14. 05. 2024	13	427	Ne	0	0,06	140
2	16. 04. 2024	80	211	Ano	36	0,07	220
	14. 05. 2024	17	211	Ano	0	0,06	140
3	18. 04. 2024	85	211	Ne	14	0,06	110
	18. 04. 2024	18	211	Ne	0	0,06	110
4	10. 04. 2024	30	274	Ne	5	0,07	210
5	10. 04. 2024	30	274	Ne	5	0,07	200

Ve vybraných učebnách byla při měření poměrně stálá úroveň koncentrace TVOC, která v čase nenarůstala. Celkově byla koncentrace TVOC v učebnách nízká, na běžné úrovni.

V učebně číslo 1 a 2 však byla prokázána závislost průměrné koncentrace TVOC na zaplněnosti učeben, při větším počtu lidí v učebně byla hodnota koncentrace vyšší. Udržení stálé koncentrace TVOC v učebnách při jejich vysokém obsazení lze vysvětlit používáním vzduchotechniky v budově. Místnosti číslo 4 a 5 byly vybrány, protože se jedná o totožné učebny se stejným vybavením. Měření v nich probíhalo při stejném počtu lidí a délce měření. Bylo ověřeno, že koncentrace TVOC je ve dvou různých učebnách za vytvoření takto identických podmínek téměř totožná.

3.1.2 Měření TVOC v pracovních prostorech

Měření probíhalo ve vybraných místnostech v administrativní budově dne 19. 4. 2024 v pracovní době. Detektor byl při měření umístěn v prostoru místnosti na stole ve výšce 0,7 m a ponechán na stejném místě po celou dobu měření. Doba měření byla v každé místnosti 10 minut. Přesný popis administrativních prostor je uveden v kapitole 2.3.3. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9 - Výsledky měření koncentrace TVOC v pracovních prostorech

<i>Označení místnosti</i>	<i>Doba měření [min]</i>	<i>Objem místnosti [m³]</i>	<i>Počet lidí</i>	<i>Klimatizace spuštěna</i>	<i>Okno otevřeno</i>	<i>Napětí [V]</i>	<i>Koncentrace TVOC [ppb]</i>
Kanc1	10	40	2	Ne	Ano	0,07	170
Kanc2	10	40	1	Ano	Ne	0,06	130
Kanc3	10	40	1	Ano	Ne	0,7	250
Kanc4	10	40	2	Ano	Ano	0,06	110
VZM	10	164	0	Ne	Ano	0,06	120
MZM	10	82	0	Ne	Ano	0,06	130
Disp	10	156	3	Ano	Ne	0,07	170
TchM	10	47	2	-	Ne	0,07	220

Poznámka: Kanc(1-4) – Kanceláře, VZM – velká zasedací místnost, MZM – malá zasedací místnost, Disp – místnost dispečinku, TchM – Technická místnost

Ve všech zkoumaných místnostech v administrativní budově byla koncentrace TVOC na běžné úrovni. Měření proběhlo ve 4 kancelářích o stejné velikosti a velmi podobném vybavení. Nejvyšší koncentrace TVOC byla naměřena v Kanceláři č. 3, ve které se jako

v jediné nacházel aromatický difuzér. Dále bylo provedeno měření ve velké a malé zasedací místnosti a v místnosti dispečinku s nepřetržitým provozem, kde byly koncentrace TVOC také na běžné úrovni. V technické místnosti byly naměřeny mírně vyšší koncentrace TVOC než v ostatních zkoumaných prostorech, což pravděpodobně souvisí se skladovanými technickými prostředky.

3.1.3 Měření TVOC v domácnostech

Měření probíhalo v místnostech ve čtyřech různých bytových jednotkách, dvou pokojích na univerzitních kolejích a ve dvou garážích. Podrobný popis těchto prostor je uveden v kapitole 2.3.4. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 10. Také byla měřena koncentrace TVOC při vaření a zapálení vonné svíčky, tato měření proběhla dne 14. 04. 2024.

Tabulka 10 - Výsledky měření koncentrace TVOC v domácnostech

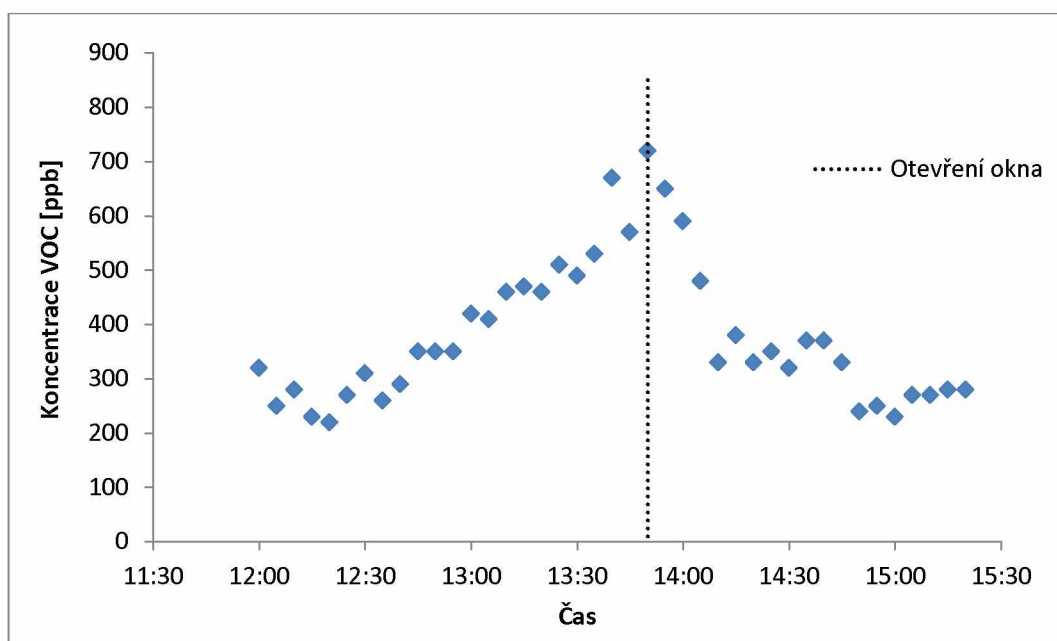
<i>Označení místnosti</i>	<i>Datum měření</i>	<i>Doba měření [min]</i>	<i>Objem místnosti [m³]</i>	<i>Počet lidí</i>	<i>Okno otevřeno</i>	<i>Napětí [V]</i>	<i>Koncentrace TVOC [ppb]</i>
OP1	13. 04. 2024	60	46	3	Ne	0,07	200
OP2	03. 05. 2024	60	40	1	Ne	0,07	180
OP3	27. 04. 2024	60	158	2	Ne	0,08	290
OP4	25. 04. 2024	60	160	2	Ne	0,08	330
Lož	13. 04. 2024	30	40	1	Ne	0,07	160
Kuch	13. 04. 2024	30	34	1	Ne	0,07	210
Kol1	24. 04. 2024	30	36	2	Ano	0,08	320
Kol2	24. 04. 2024	30	36	2	Ano	0,07	260
G1	02. 06. 2024	10	70	1	Ne	0,12	810
G2	02. 06. 2024	10	91	1	Ne	0,10	620

Poznámka: OP(1-4) – Obývací pokoje, Lož – Ložnice, Kuch – Kuchyně, Kol(1,2) – pokoj na univerzitní koleji, G(1,2) - garáže

Naměřené hodnoty koncentrace TVOC byly vyšší v obývacích pokojích, které jsou součástí otevřených prostor propojených s kuchyní (OP3 a OP4), než v samostatných obývacích pokojích (OP1 a OP2). V pokojích na univerzitních kolejích se hodnoty koncentrace TVOC pohybují na úrovni srovnatelné s otevřenými obývacími pokoji. Poměrně vysoké koncentrace TVOC byly naměřeny v obou garážích, což bylo způsobeno uskladněním

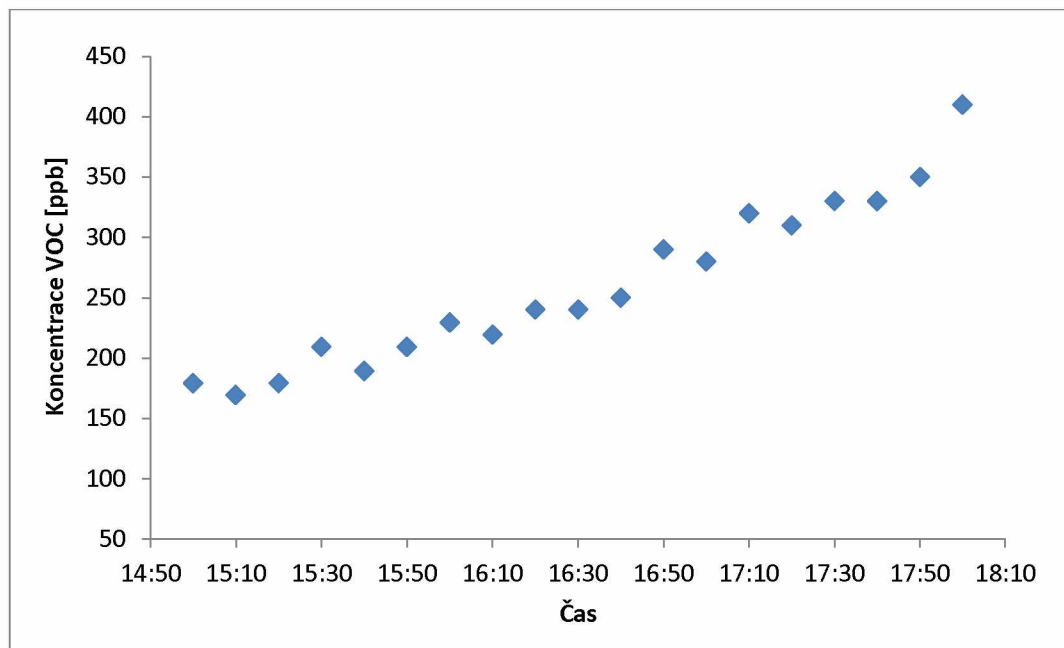
různých potřeb pro zahradu, domácnost a automobil, jako jsou rozpouštědla, nádrže s benzínem, motorové oleje a čisticí prostředky.

Během vaření byl sledován průběh změn koncentrace TVOC v čase. Kuchyně byla před začátkem měření uzavřena a v místnosti se v měřeném období nacházely dvě osoby. Záznam z průběhu měření koncentrace TVOC znázorňuje graf na obrázku 4. Měření bylo zahájeno společně se začátkem vaření na plynovém sporáku v 12:00. Koncentrace TVOC začala narůstat a rostla až do ukončení vaření a současného otevření okna v 13:50. V 15:00 skončil pokles koncentrace TVOC a došlo k ustálení. V 15:20 bylo měření ukončeno.



Obrázek 4 - Měření změn koncentrace TVOC během vaření

Dalším provedeným experimentem byl vliv zapálené svíčky na změny koncentrace TVOC. Výsledky jsou shrnuty na obrázku 5. Vonná svíčka byla zapálena v obývacím pokoji (OP1) v 15:00, koncentrace TVOC začala postupně mírně narůstat a rostla po celou dobu hoření svíčky. V 18:00 byla svíčka zhasnuta a měření bylo současně ukončeno.



Obrázek 5 - Měření změn koncentrace TVOC v průběhu hoření vonné svíčky

3.1.4 Měření TVOC ve veřejných prostorech

Kromě obytných prostor byl sledován obsah TVOC v prostorách veřejných. Měření probíhalo v obchodním centru v Pardubicích dne 17. 04. 2024. Výsledky měření v jednotlivých prostorech obchodního centra jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 - Výsledky měření koncentrace TVOC ve veřejných prostorech

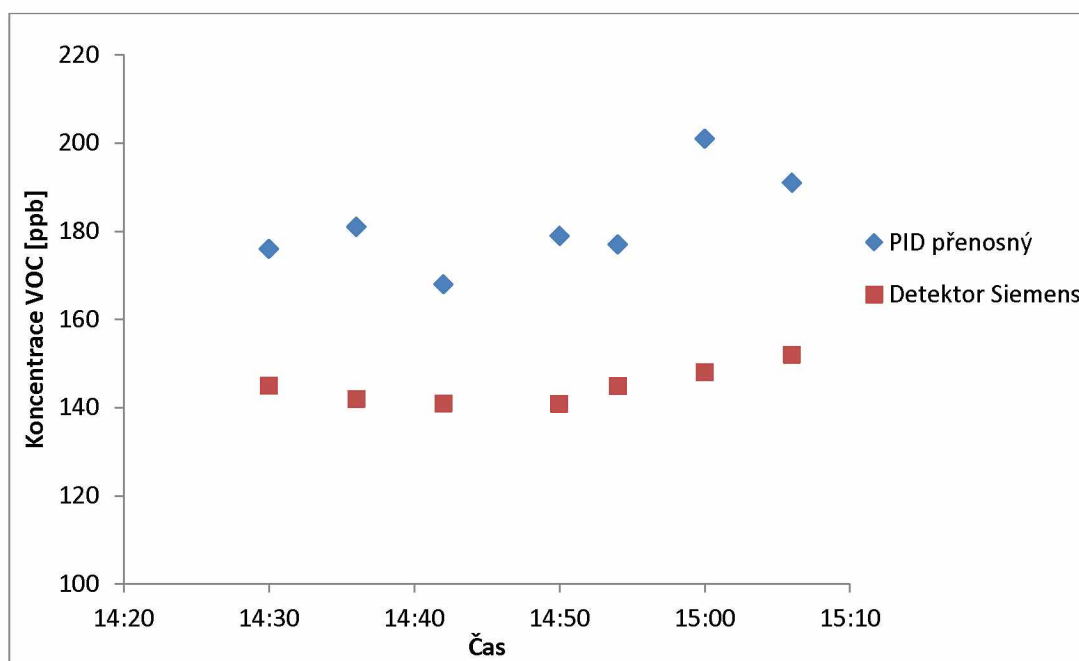
<i>Zkoumaný prostor</i>	<i>Doba měření [min]</i>	<i>Zaplněnost prostoru</i>	<i>Napětí [V]</i>	<i>Koncentrace TVOC [ppb]</i>
Hračkářství	10	Mírná	0,06	150
Kavárna	10	Střední	0,06	130
Prodejna knih	10	Mírná	0,07	190
Zverimex	10	Mírná	0,07	160
Podzemní garáže	10	Mírná	0,08	330
Drogerie	10	Mírná	0,06	130
Prodejna obuvi	10	Střední	0,07	240
Jídelní zóna	10	Vysoká	0,07	250

Koncentrace TVOC byla téměř ve všech ve vybraných veřejných prostorech na běžné úrovni. Stále na běžné úrovni, ale vyšší, než v dalších prostorech, byla koncentrace v prodejně

obuvi, možnou příčinou by mohly být výpary z materiálů používaných při výrobě obuvi, a v jídelní zóně, pravděpodobně kvůli výparům z přípravy jídel. Vyšší koncentrace TVOC byla naměřena pouze v podzemních garážích, což lze přisoudit výfukovým plynům z automobilů.

3.2 Porovnání použitých detektorů

V této bakalářské práci byly pro měření koncentrace TVOC používány dva různé PID, prvních z nich byl přenosný PID a druhým PID, který je součástí kombinovaných čidel Siemens umístěných v učebnách PC101 a PC102 na FEI UPCE. Dne 07. 05. 2024 bylo v učebně PC101 provedeno porovnání těchto detektorů. Přenosný PID byl umístěn v učebně na stole ve výšce 0,7 m, který byl situován nejbližší k umístěnému čidlu Siemens. Hodnoty koncentrace TVOC měřené čidlem Siemens byly sledovány online jako živá data. Hodnoty měřené oběma detektory byly současně zaznamenávány a poté byla z těchto dat vytvořena grafická závislost na obrázku 6.



Obrázek 6 - Porovnání PID detektorů použitých v bakalářské práci

V učebně PC101 byla během měření zaznamenána relativně stabilní úroveň koncentrace TVOC. Hodnoty naměřené pomocí přenosného PID detektoru byly mírně vyšší (okolo 20 %) než ty získané čidlem Siemens. Průběh koncentrace VOC z přenosného PID koreloval s výsledky získanými z čidla Siemens. Čidla Siemens byla zapůjčena od společnosti Siemens. Před použitím byla čidla kalibrována, nicméně je možné, že s časem se jejich přesnost mírně snížila. Navíc, různí výrobci detektorů mohou poskytovat zařízení s odlišnými technickými

parametry, jako je citlivost na určité typy látek, rozsah měření a rychlost odezvy, což může přispět k určitým rozdílům v naměřených hodnotách.

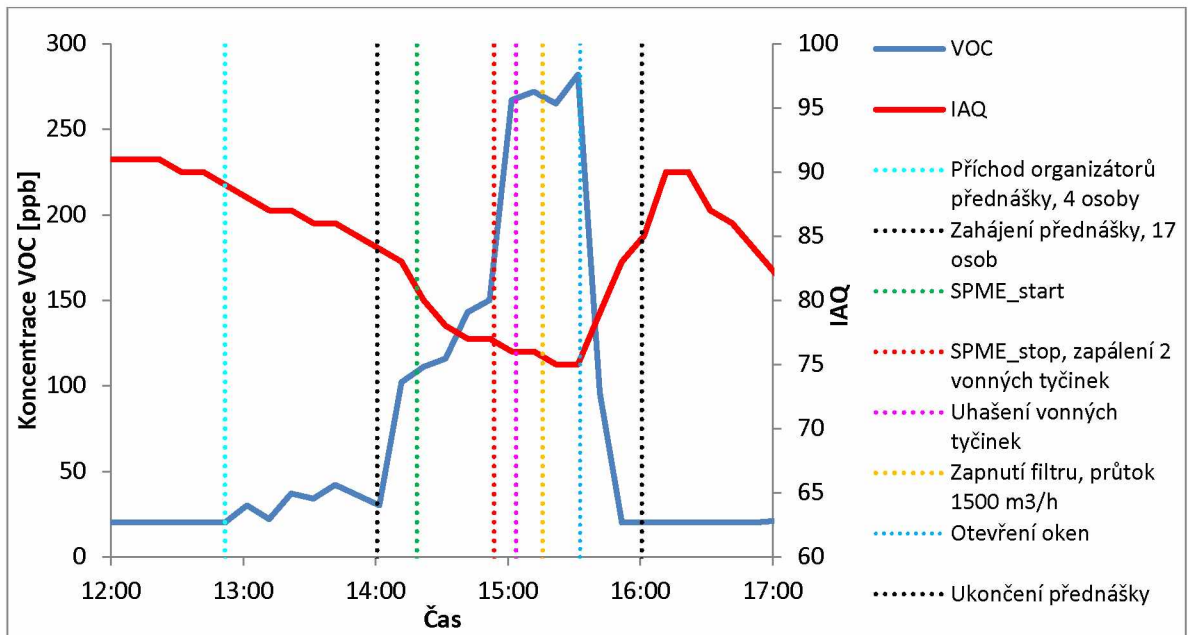
3.3 Měření indexu kvality vnitřního ovzduší v průběhu přednášky

Dne 25. 3. 2024 proběhla na FEI UPCE v učebně PC102 vzdělávací přednáška pro studenty během které bylo provedeno měření koncentrace TVOC a také dalších parametrů pomocí čidla Siemens instalovaného v učebně. Na základě těchto parametrů je počítačem automaticky pomocí matematických modelů vyhodnocován index kvality vzduchu. Výsledky měření byly zpracovány do grafických závislostí (Obrázky 7-11), které porovnávají jednotlivé parametry s indexem IAQI. Před zahájením přednášky byla učebna pečlivě vyvětrána, poté byla místnost uzavřena a okna byla opět otevřena až v pozdějším průběhu přednášky. Během přednášky byla provedena adsorpce na SPME vlákno, aby bylo možné analyzovat kvalitativní složení VOC v učebně. Po ukončení adsorpce byly zapáleny dvě vonné tyčinky, aby se porovnal jejich vliv na jednotlivé parametry. Po jejich uhašení byl zapnut filtr aerosolů. Po ukončení přednášky byla okna uzavřena a v učebně začala probíhat výuka dle rozvrhu. Jednotlivé události včetně přesných časů jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12 - Události v průběhu přednášky

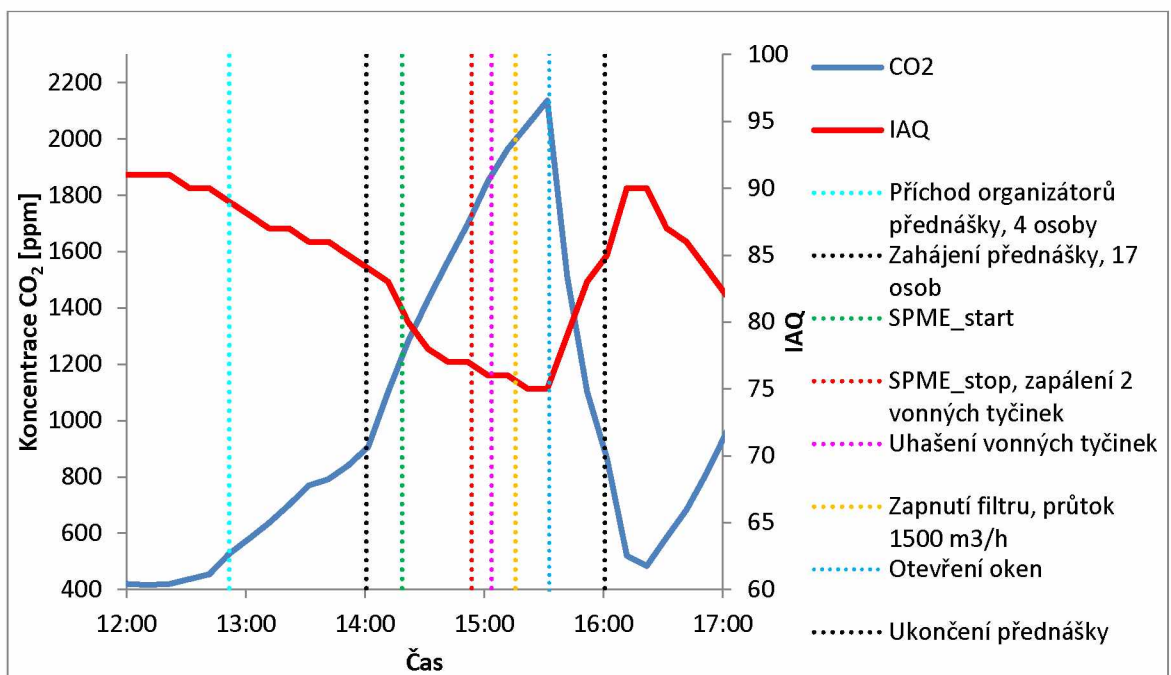
Čas	Událost
12:50	Příchod organizátorů přednášky (4 osoby)
14:00	Zahájení přednášky (17 osob)
14:18	Prosávání vzduchu přes SPME vlákno zahájeno
14:53	Prosávání vzduchu přes SPME vlákno ukončeno
14:53	Zapálení 2 vonných tyčinek
15:03	Uhašení vonných tyčinek
15:15	Zapnutí filtru, průtok 1500 m ³ /h
15:32	Otevření oken
16:00	Ukončení přednášky

Koncentrace TVOC po uzavření učebny a příchodu lidí postupně rostla. Prudký nárůst byl zaznamenán po zapálení vonných tyčinek. Po otevření oken došlo k jejímu rychlému poklesu. Po celou dobu měření byla koncentrace TVOC na běžné úrovni, pohybovala se v rozmezí 20 až 300 ppb. Průběh měření je znázorněn na obrázku 7.



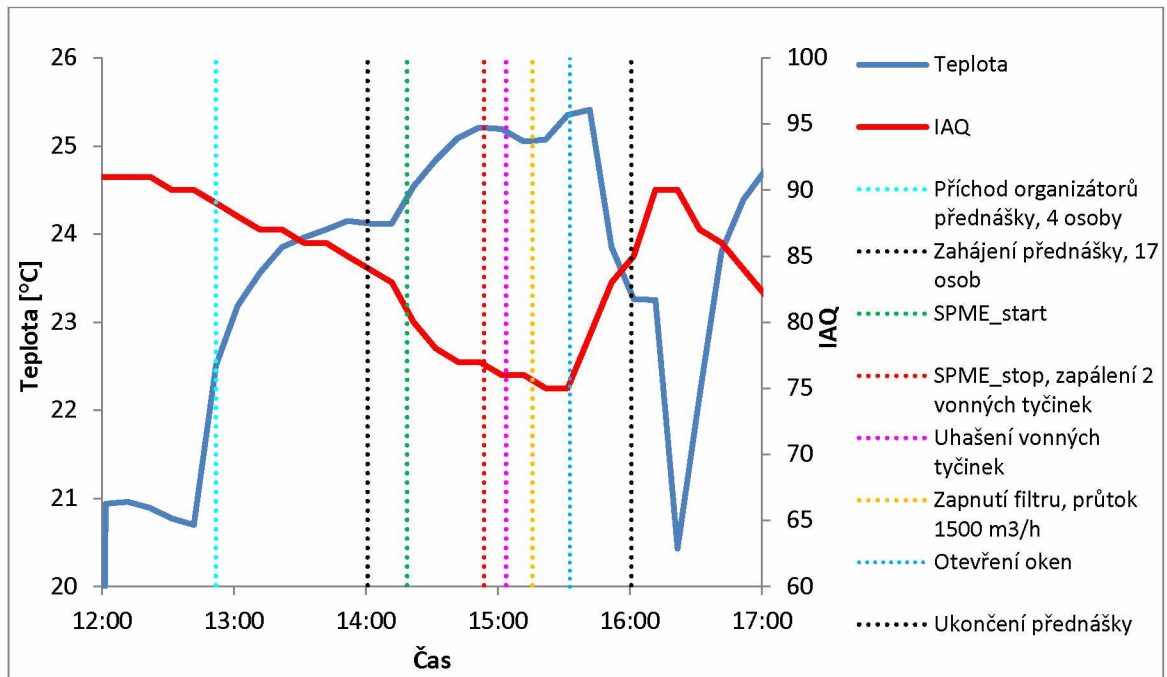
Obrázek 7 - Změny v koncentraci TVOC v průběhu přednášky

Koncentrace CO₂, stejně jako koncentrace TVOC, po uzavření učebny narůstala, rychlost nárůstu odpovídala příbytku počtu osob v učebně. Maximálně dosáhla koncentrace CO₂ hodnot nad 2000 ppm, což je vysoká úroveň, která může vést ke zdravotním potížím. Výsledky v grafech naznačují, že koncentrace CO₂ má pravděpodobně nejvýraznější vliv na IAQI ve srovnání s ostatními sledovanými parametry. Průběh koncentrace CO₂ a IAQ je znázorněn na obrázku 8.



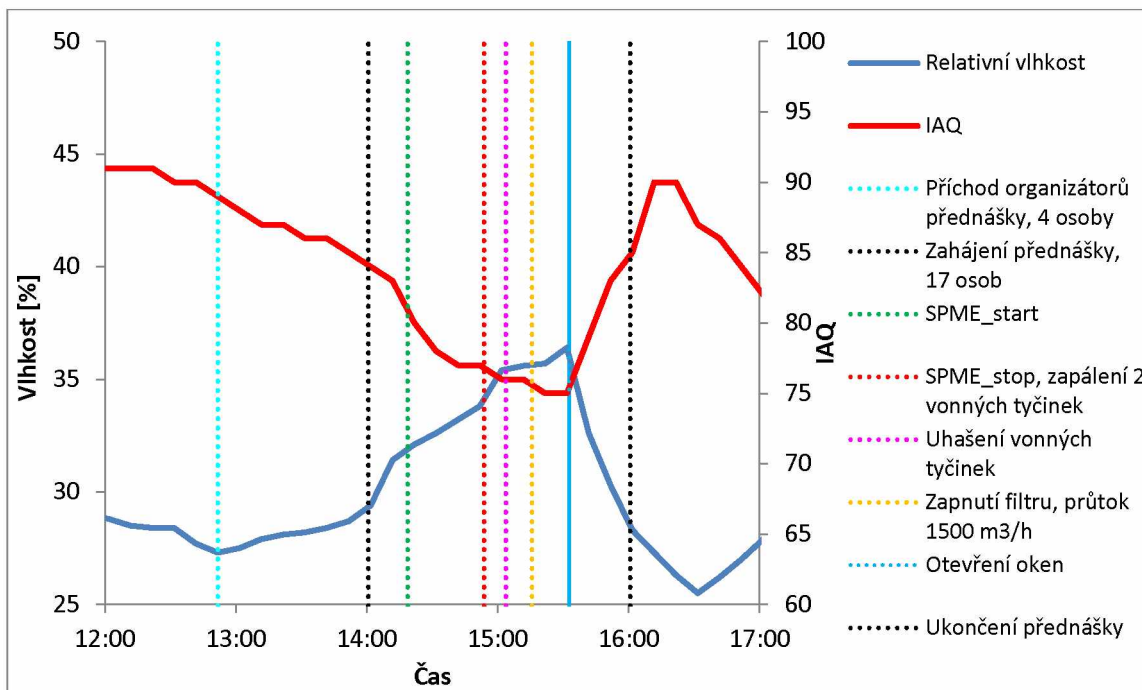
Obrázek 8 - Změny koncentrace CO₂ v průběhu přednášky

Počet osob v učebně ovlivnil také teplotu vzduchu, která během přednášky stoupala. Vyšší teplota může zvyšovat uvolňování VOC z materiálů a povrchů. Tento trend je patrný ze závislosti na obrázku 9.



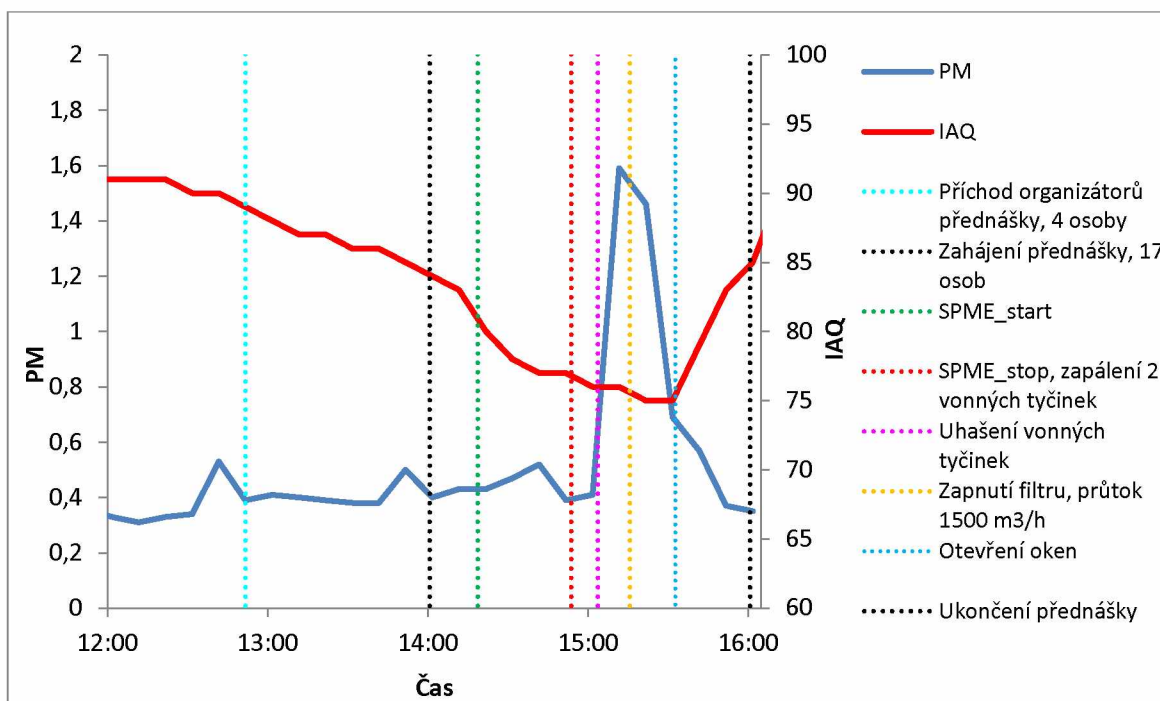
Obrázek 9 - Změny teploty v průběhu přednášky

Relativní vlhkost vzduchu se rovněž měnila v závislosti na počtu osob. Naměřené hodnoty se pohybovaly mezi 25 a 40 %. Nízká vlhkost může vést ke zdravotním potížím. Kromě toho může přispívat k vyššímu uvolňování některých VOC z materiálů. Ideální relativní vlhkost v učebně by měla být mezi 40-60 %. Získané výsledky jsou shrnuty v podobě grafické závislosti na obrázku 10.



Obrázek 10 - Změny relativní vlhkosti v průběhu přednášky

Koncentrace aerosolů se z důvodu vyššího počtu lidí příliš neměnila, ale prudce narostla po zapálení vonných tyčinek a klesala po spuštění filtru instalovaného v učebně, což je patrné z vynesené závislosti na obrázku 11.



Obrázek 11 - Změny koncentrace aerosolů v průběhu přednášky

3.3.1 Kvalitativní měření těkavých organických látek

Pro kvalitativní měření VOC bylo použito SPME vlákno. Toto vlákno bylo umístěno do aparatury (obrázek 3) a vystaveno vzduchu v učebně po dobu 35 minut během přednášky. Po uplynutí této doby bylo vlákno z aparatury odebráno a umístěno do lednice. Následně byla provedena analýza zachycených látek pomocí GC-MS. V tabulce 13 jsou zaznamenány identifikované VOC a jejich relativní množství v extraktu.

Získané procentuální koncentrace VOC v extraktu nedosahují v součtu 100 %, jelikož některé látky nebyly během analýzy identifikovány.

Tabulka 13 - Identifikované těkavé organické látky a jejich relativní koncentrace ve vzorku

VOC	Množství v extraktu [%]
Hexan	54,2
Butan	5,8
Tetrahydrofuran	5,4
Toluen	4,0
Ethanol	2,8

Zastoupení VOC v učebně PC102 odpovídá datům z dostupné literatury, která studovala přítomnost VOC na amerických školách, kde bylo naměřeno vysoké zastoupení hexanu, přítomnost toluenu a v některých učebnách také tetrahydrofuran [57]. Dále byl detekován ethanol, který je produktem lidského metabolismu [25].

Závěr

Bakalářská práce se zabývala těkavými organickými látkami ve vnitřním prostředí. První část práce se soustředila na terénní měření pomocí sestaveného přenosného měřicího zařízení TVOC vybaveného komerčním PID. Byly proměřeny místnosti s rozdílným způsobem užívání (učebna, byt, garáž, atd.) a s rozdílnou mírou obsazenosti. Ve většině sledování byla hodnota koncentrace TVOC pod 300 ppb, což je horní hranice běžné koncentrace v interiérech (doporučení Umweltbundesamt). Výjimkou byly silně obsazené učebny s koncentrací TVOC vyšší než 300 ppb a garáže s koncentrací vyšší než 600 ppb. Měření koncentrace TVOC je vhodný parametr pro monitorování, ale nelze z něj odhadnout toxicitu.

Druhá část práce se zabývala rozbořem kvality vzduchu v obsazené učebně po dobu vzdělávací přednášky. Kvalita vzduchu byla odvozena z měření teploty, koncentrace CO₂, koncentrace TVOC, koncentrace prachových částic a vlhkosti. Během přednášky byla uzavřena okna a index kvality vzduchu měřený IAQ čidlem Siemens poklesl z 95 na 75, přičemž ideální hodnota je 100. Po otevření oken se index kvality vrátil na původní hodnoty. Zároveň byl odebrán během přednášky vzorek těkavých látek, který byl kvalitativně vyhodnocen pomocí GC-MS. Převážně byl ve vzorku zastoupen hexan, dále butan, tetrahydrofuran, toluen a ethanol. Tento výsledek dobře koreluje s výsledky souhrnné studie prováděné na 37 amerických školách.

Výsledky práce jsou v souladu s obecným doporučením pro snižování koncentrace VOC v interiérech, jako je vhodné větrání a omezení činností přispívající k tvorbě VOC.

Použitá literatura

- [1] JOKL, Miloslav. *Zdravé obytné a pracovní prostředí*. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0928-0.
- [2] ŚMIEŁOWSKA, Monika, Mariusz MARĆ a Bożena ZABIEGAŁA. Indoor air quality in public utility environments—a review. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2017, **24**(12), 11166-11176 [cit. 2023-11-28]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-017-8567-7
- [3] SUNDELL, J. On the history of indoor air quality and health. *Indoor Air* [online]. 2004, **14**(s7), 51-58 [cit. 2023-11-28]. ISSN 0905-6947. Dostupné z: doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x
- [4] PETROVIĆ, Emina a Lydia HAMER. Improving the Healthiness of Sustainable Construction: Example of Polyvinyl Chloride (PVC). *Buildings* [online]. 2018, **8**(2) [cit. 2024-02-11]. ISSN 2075-5309. Dostupné z: doi:10.3390/buildings8020028
- [5] LEE, R.J. a D.R. VAN ORDEN. Airborne asbestos in buildings. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* [online]. 2008, **50**(2), 218-225 [cit. 2024-02-11]. ISSN 02732300. Dostupné z: doi:10.1016/j.yrtph.2007.10.005
- [6] ZHANG, Xiaoyan, Lijian HAN, Haiyan WEI, Xiaonui TAN, Weiqi ZHOU, Weifen LI a Yuguo QIAN. Linking urbanization and air quality together: A review and a perspective on the future sustainable urban development. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2022, **346** [cit. 2023-11-28]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2022.130988
- [7] JOSHI, Sumedha M. The sick building syndrome. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine* [online]. 2008, **12**(2) [cit. 2023-11-28]. ISSN 0973-2284. Dostupné z: doi:10.4103/0019-5278.43262
- [8] REDLICH, Carrie A, Judy SPARER a Mark R CULLEN. Sick-building syndrome. *The Lancet* [online]. 1997, **349**(9057), 1013-1016 [cit. 2023-11-28]. ISSN 01406736. Dostupné z: doi:10.1016/S0140-6736(96)07220-0
- [9] BENCKO, Vladimír. *Hygiena: učební texty k seminářům a praktickým cvičením*. 2. přeprac. vyd. Praha: Karolinum, 1998. s. 46. ISBN 80-7184-551-5.
- [10] World Health Organization. *WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants*; World Health Organization Regional Office for Europe: Copenhagen, Denmark [online]. 2010; [cit. 2024-02-08] Dostupné z: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf
- [11] VARDOULAKIS, Sotiris, Evanthia GIAGLOGLOU, Susanne STEINLE, Alice DAVIS, Anne SLEEUWENHOEK, Karen S. GALEA, Ken DIXON a Joanne O. CRAWFORD. Indoor Exposure to Selected Air Pollutants in the Home Environment: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2020, **17**(23) [cit. 2024-02-10]. ISSN 1660-4601. Dostupné z: doi:10.3390/ijerph17238972
- [12] BERNSTEIN, Jonathan A., Neil ALEXIS, Hyacinth BACCHUS, et al. The health effects of nonindustrial indoor air pollution. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* [online]. 2008, **121**(3), 585-591 [cit. 2024-02-11]. ISSN 00916749. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaci.2007.10.045
- [13] LÓPEZ, L.R., P. DESSÌ, A. CABRERA-CODONY, L. ROCHA-MELOGNO, B. KRAAKMAN, V. NADDEO, M.D. BALAGUER a S. PUIG. CO₂ in indoor environments: From environmental and health risk to potential renewable carbon source. *Science of The Total Environment* [online]. 2023, **856** [cit. 2024-02-11]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.159088

- [14] ALBERTS, W. Michael. Indoor air pollution: NO, NO₂, CO, and CO₂. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* [online]. 1994, **94**(2), 289-295 [cit. 2024-02-11]. ISSN 00916749. Dostupné z: doi:10.1053/ai.1994.v94.a56007
- [15] FERRIS, Benjamin G. Health Effects of Exposure to Low Levels of Regulated Air Pollutants. *Journal of the Air Pollution Control Association* [online]. 1978, **28**(5), 482-497 [cit. 2024-02-12]. ISSN 0002-2470. Dostupné z: doi:10.1080/00022470.1978.10470621
- [16] BELANGER, Kathleen, Janneane F. GENT, Elizabeth W. TRICHE, Michael B. BRACKEN a Brian P. LEADERER. Association of Indoor Nitrogen Dioxide Exposure with Respiratory Symptoms in Children with Asthma. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* [online]. 2006, 2006-02-01, **173**(3), 297-303 [cit. 2024-02-19]. ISSN 1073-449X. Dostupné z: doi:10.1164/rccm.200408-1123OC
- [17] VEIRIAH, Aravindan. Carbon monoxide poisoning. *Medicine* [online]. 2020, **48**(3), 197-198 [cit. 2024-02-20]. ISSN 13573039. Dostupné z: doi:10.1016/j.mpmed.2019.12.013
- [18] SILLMAN, S. Tropospheric Ozone and Photochemical Smog. In: *Treatise on Geochemistry* [online]. Elsevier, 2003, s. 407-431 [cit. 2024-02-20]. ISBN 9780080437514. Dostupné z: doi:10.1016/B0-08-043751-6/09053-8
- [19] NAZAROFF, William W a Charles J. WESCHLER. Indoor ozone: Concentrations and influencing factors. *Indoor Air* [online]. 2022, **32**(1) [cit. 2024-04-14]. ISSN 0905-6947. Dostupné z: doi:10.1111/ina.12942
- [20] VASILIAUSKIENĖ, Vaida a Aidias VASILIS VASILIAUSKAS. A Case Study on the Assessment of Chemical and Physical Pollution Levels during the Copying Process. *Sustainability* [online]. 2022, **14**(3) [cit. 2024-02-20]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su14031287
- [21] PÉNARD-MORAND, C. a I. ANNESI-MAESANO. Air pollution: from sources of emissions to health effects. *Breathe* [online]. 2004, 2004-12-01, **1**(2), 108-119 [cit. 2024-02-20]. ISSN 1810-6838. Dostupné z: doi:10.1183/18106838.0102.108
- [22] WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. *Prevention Web* [online]. 2006, s. 18-19 [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://www.preventionweb.net/quick/78500>
- [23] VAN THRIEL, Christoph, Michael SCHÄPER, Stefan KLEINBECK, et al. Sensory and pulmonary effects of acute exposure to sulfur dioxide (SO₂). *Toxicology Letters* [online]. 2010, **196**(1), 42-50 [cit. 2024-04-24]. ISSN 03784274. Dostupné z: doi:10.1016/j.toxlet.2010.03.013
- [24] Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, část první, § 2. In: *Zákony pro lidi* [online]. AION CS, [cit. 2024-04-24]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201#p2>
- [25] TANG, Xiaochen, Pawel K. MISZTAL, William W NAZAROFF a Allen H. GOLDSTEIN. Volatile Organic Compound Emissions from Humans Indoors. *Environmental Science & Technology* [online]. 2016, 2016-12-06, **50**(23), 12686-12694 [cit. 2024-04-05]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/acs.est.6b04415
- [26] DAVID, Elena a Violeta-Carolina NICULESCU. Volatile Organic Compounds (VOCs) as Environmental Pollutants: Occurrence and Mitigation Using Nanomaterials. *International Journal of*

- Environmental Research and Public Health* [online]. 2021, **18**(24) [cit. 2024-04-05]. ISSN 1660-4601. Dostupné z: doi:10.3390/ijerph182413147
- [27] VERA, Teresa, F. VILLANUEVA, L. WIMMEROVÁ a E. I. TOLIS. An overview of methodologies for the determination of volatile organic compounds in indoor air. *Applied Spectroscopy Reviews* [online]. 2022, 2022-09-14, **57**(8), 625-674 [cit. 2024-04-05]. ISSN 0570-4928. Dostupné z: doi:10.1080/05704928.2022.2085735
- [28] LIU, Ningrui, Lin FANG, Wei LIU, et al. Health effects of exposure to indoor formaldehyde in civil buildings: A systematic review and meta-analysis on the literature in the past 40 years. *Building and Environment* [online]. 2023, **233** [cit. 2024-06-10]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2023.110080
- [29] SHAO, Wen-Cheng, Haoyang WU, Angus SHIUE, Chao-Heng TSENG, Yu-Wen WANG, Chen-Fu HSU a Graham LEGGETT. Chitosan-dosed adsorptive filter media for removal of formaldehyde from indoor air – Performance and cancer risk assessment. *Chemical Physics Letters* [online]. 2021, **779** [cit. 2024-05-06]. ISSN 00092614. Dostupné z: doi:10.1016/j.cplett.2021.138836
- [30] XIA, Yitian, Jinlong WANG, Chuanqi GU, Yong LING a Zhongming GAO. MnO₂/Al foil decorated air cleaner with self-driven property for the abatement of indoor formaldehyde. *Chemical Engineering Journal* [online]. 2020, **382** [cit. 2024-05-06]. ISSN 13858947. Dostupné z: doi:10.1016/j.cej.2019.122872
- [31] WANG, Juan, Christer JANSON, Thorarinn GISLASON, Maria GUNNBJÖRNSDOTTIR, Rain JOGI, Hans ORRU a Dan NORBÄCK. Volatile organic compounds (VOC) in homes associated with asthma and lung function among adults in Northern Europe. *Environmental Pollution* [online]. 2023, **321** [cit. 2024-05-17]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2023.121103
- [32] AGUADO, S. Removal of pollutants from indoor air using zeolite membranes. *Journal of Membrane Science* [online]. 2004, **240**(1-2), 159-166 [cit. 2024-05-06]. ISSN 03767388. Dostupné z: doi:10.1016/j.memsci.2004.05.004
- [33] YUE, Xiaochen, Nyuk Ling MA, Christian SONNE, et al. Mitigation of indoor air pollution: A review of recent advances in adsorption materials and catalytic oxidation. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2021, **405** [cit. 2024-05-06]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2020.124138
- [34] SONG, Yong-Woo, Seong-Eun KIM, Min-Sang YOO a Jin-Chul PARK. Indoor Air Pollutant (Toluene) Reduction Based on Ultraviolet-A Irradiance and Changes in the Reactor Volume in a TiO₂ Photocatalyst Reactor. *Materials* [online]. 2023, **16**(19) [cit. 2024-05-06]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma16196399
- [35] BEVAN, Ruth J., Rebecca J. SLACK, Philip HOLMES a Leonard S. LEVY. An Assessment of Potential Cancer Risk Following Occupational Exposure to Ethanol. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B* [online]. 2009, 2009-05-29, **12**(3), 188-205 [cit. 2024-05-09]. ISSN 1093-7404. Dostupné z: doi:10.1080/10937400902894160
- [36] JIANG, Jinglin, Xiaosu DING, Kristofer P. ISAACSON, Antonios TASOGLU, Heinz HUBER, Amisha D. SHAH, Nusrat JUNG a Brandon E. BOOR. Ethanol-based disinfectant sprays drive rapid changes in the chemical composition of indoor air in residential buildings. *Journal of Hazardous*

- Materials Letters* [online]. 2021, **2** [cit. 2024-06-24]. ISSN 26669110. Dostupné z: doi:10.1016/j.hazl.2021.100042
- [37] CRAVOTTO, Christian, Anne-Sylvie FABIANO-TIXIER, Ombéline CLAUX, Maryline ABERT-VIAN, Silvia TABASSO, Giancarlo CRAVOTTO a Farid CHEMAT. Towards Substitution of Hexane as Extraction Solvent of Food Products and Ingredients with No Regrets. *Foods* [online]. 2022, **11**(21) [cit. 2024-05-09]. ISSN 2304-8158. Dostupné z: doi:10.3390/foods11213412
- [38] SCHLOSSER, Paul M., Ambuja S. BALE, Catherine F. GIBBONS, Amina WILKINS a Glinda S. COOPER. Human Health Effects of Dichloromethane: Key Findings and Scientific Issues. *Environmental Health Perspectives* [online]. 2015, **123**(2), 114-119 [cit. 2024-05-09]. ISSN 0091-6765. Dostupné z: doi:10.1289/ehp.1308030
- [39] OWEN O. E., TRAPP V. E., SKUTCHES C. L., MOZZOLI M. A., HOELDTKE R. D., BODEN G. a REICHARD G. A. Acetone Metabolism During Diabetic Ketoacidosis. *Diabetes* [online]. 1982, 1982-03-01, **31**(3), 242-248 [cit. 2024-04-05]. ISSN 0012-1797. Dostupné z: doi:10.2337/diab.31.3.242
- [40] LEHTONEN, Mari, Sonja KEKÄLÄINEN, Ida NIKKILÄ, Petri KILPELÄINEN, Maija TENKANEN a Kirsi S. MIKKONEN. Active food packaging through controlled in situ production and release of hexanal. *Food Chemistry: X* [online]. 2020, **5** [cit. 2024-05-17]. ISSN 25901575. Dostupné z: doi:10.1016/j.fochx.2019.100074
- [41] LEE, KaYoun, JuYoung SHIN, Myung Suk AHN, Se Jin KIM, HyeRyun AN, Yae Jin KIM, O Hyeon KWON a SuYoung LEE. Callus Derived from Petals of the Rosa hybrida Breeding Line 15R-12-2 as New Material Useful for Fragrance Production. *Plants* [online]. 2023, **12**(16) [cit. 2024-05-17]. ISSN 2223-7747. Dostupné z: doi:10.3390/plants12162986
- [42] WENSING, M., E. UHDE a T. SALTHAMMER. Plastics additives in the indoor environment—flameretardants and plasticizers. *Science of The Total Environment* [online]. 2005, **339**(1-3), 19-40 [cit. 2024-05-17]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2004.10.028
- [43] GUERRANTI, Cristiana, Tania MARTELLINI, Alessia FORTUNATI, Roberto SCODELLINI a Alessandra CINCINELLI. Environmental pollution from plasticiser compounds: Do we know enough about atmospheric levels and their contribution to human exposure in Europe? *Current Opinion in Environmental Science & Health* [online]. 2019, **8**, 1-5 [cit. 2024-05-17]. ISSN 24685844. Dostupné z: doi:10.1016/j.coesh.2018.10.004
- [44] ARGAMINO, Cristian Ryan A., Bruna G. SEBBEN, Gabriela DA COSTA, Sam TOWERS, Anna BOGUSH, Svetlana STEVANOVIC, Ricardo H. M. GODOI a Ivan KOURTCHEV. Development and validation of a GC Orbitrap-MS method for the analysis of phthalateesters (PAE) and bis(2-ethylhexyl)adipate (DEHA) in atmospheric particles and its application for screening PM 2.5 from Curitiba, Brazil. *Analytical Methods* [online]. 2024, **16**(11), 1579-1592 [cit. 2024-05-17]. ISSN 1759-9660. Dostupné z: doi:10.1039/D3AY02197A
- [45] RUDEL, Ruthann A., Robin E. DODSON, Laura J. PEROVICH, et al. Semivolatile Endocrine - Disrupting Compounds in Paired Indoor and Outdoor Air in Two Northern California Communities. *Environmental Science & Technology* [online]. 2010, **44**(17), 6583-6590 [cit. 2024-05-17]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es100159c

- [46] MADDELA, Naga Raju, Kadiyala VENKATESWARLU a Mallavarapu MEGHARAJ. Tris(2-chloroethyl) phosphate, a pervasive flame retardant: critical perspective on its emissions into the environment and human toxicity. *Environmental Science: Processes & Impacts* [online]. 2020, **22**(9), 1809-1827 [cit. 2024-05-17]. ISSN 2050-7887. Dostupné z: doi:10.1039/D0EM00222D
- [47] SALTHAMMER, Tunga. TVOC - Revisited. *Environment International* [online]. 2022, **167** [cit. 2024-06-24]. ISSN 01604120. Dostupné z: doi:10.1016/j.envint.2022.107440
- [48] SAAD, S. M., A. Y. M. SHAKAFF, A. R. M. SAAD, A. M. YUSOF, A. M. ANDREW, A. ZAKARIA a A. H. ADOM. *Development of indoor environmental index: Air quality index and thermal comfort index* [online]. In: . 2017, 020043- [cit. 2024-06-24]. Dostupné z: doi:10.1063/1.4975276
- [49] WEI, Wenjuan, Olivier RAMALHO, Mickaël DERBEZ, Jacques RIBÉRON, Séverine KIRCHNER a Corinne MANDIN. Applicability and relevance of six indoor air quality indexes. *Building and Environment* [online]. 2016, **109**, 42-49 [cit. 2024-05-09]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2016.09.008
- [50] FIROZ KHAN, Md, Mazrura SAHANI, Mohd SHAHRUL MOHD NADZIR, et al. Volatile Organic Compound Analysis by Sorbent Tube - Thermal Desorption - Gas Chromatography: A Review. *International Journal of Engineering & Technology* [online]. 2018, 2018-07-25, **7**(3.14), 165-175 [cit. 2024-05-20]. ISSN 2227-524X. Dostupné z: doi:10.14419/ijet.v7i3.14.16878
- [51] LARROQUE, Virginie, Valérie DESAUZIERS a Pierre MOCHO. Development of a solid phase microextraction (SPME) method for the sampling of VOC traces in indoor air. *J. Environ. Monit* [online]. 2006, **8**(1), 106-111 [cit. 2024-05-20]. ISSN 1464-0325. Dostupné z: doi:10.1039/B511201J
- [52] AL-BUKHAITI, Wedad Q., Anwar NOMAN, AseelaSaeed QASIM a Ammar AL-FARGA. Gas Chromatography: Principles, Advantages and Applications in Food Analysis. *International Journal of Agriculture Innovations and Research* [online]. 2017, **6**(1), 123-128 [cit. 2024-05-20]. ISSN 2319-1473. Dostupné z: https://ijair.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJAIR_2467_FINAL.pdf
- [53] NANOVA Environmental, Inc. An Improved Compact GC For Field Testing: NovaTest P300 Integrated Compact Gas Chromatograph [online]. Columbia, MO: Nanova Environmental, Inc., 2019 [cit. 2024-05-21]. Dostupné z: <http://www.nanovaenv.com>
- [54] SANTOS, F. J. a M. T. GALCERAN. Modern developments in gas chromatography–mass spectrometry-based environmental analysis. *Journal of Chromatography A* [online]. 2003, **1000**(1-2), 125-151 [cit. 2024-05-21]. ISSN 00219673. Dostupné z: doi:10.1016/S0021-9673(03)00305-4
- [55] WANG, Liang, Ying CHENG, Saianand GOPALAN, et al. Review and Perspective: Gas Separation and Discrimination Technologies for Current Gas Sensors in Environmental Applications. *ACS Sensors* [online]. 2023, 2023-04-28, **8**(4), 1373-1390 [cit. 2024-05-21]. ISSN 2379-3694. Dostupné z: doi:10.1021/acssensors.2c02810
- [56] BÍLEK, Jiří, Petr MARŠOLEK, Ondřej BÍLEK a Pavel BUČEK. Field Test of Mini Photoionization Detector-Based Sensors—Monitoring of Volatile Organic Pollutants in Ambient Air. *Environments* [online]. 2022, **9**(4) [cit. 2024-05-21]. ISSN 2076-3298. Dostupné z: doi:10.3390/environments9040049

[57] ZHONG, Lexuan, Feng-Chiao SU a Stuart BATTERMAN. Volatile Organic Compounds (VOCs) in Conventional and High Performance School Buildings in the U.S. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2017, **14**(1) [cit. 2024-06-25]. ISSN 1660-4601. Dostupné z: doi:10.3390/ijerph14010100