



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

JEMNÉ ČÁSTICE EMITOVANÉ Z TEPELNÉHO ZDROJE DO VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

FINE PARTICLES EMITTED FROM A HEAT SOURCE INTO THE INDOOR ENVIRONMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Hájek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jiří Hájek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Jemné částice emitované z tepelného zdroje do vnitřního prostředí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou z aktuálně sledovaných forem znečištění vzduchu v našem okolí je znečištění jemnými částicemi. Významnými zdroji těchto částic jsou spalovací procesy. V rámci práce bude rešeršní formou představena problematika jemných částic. Významnou část práce bude představovat měření jemných částic ve vnitřním prostředí budovy, v místnosti s provozovaným spalovacím zařízením – krbem s ručním přikládáním paliva. Koncentrace částic bude měřena v různých částech místnosti v průběhu různých režimů přikládání paliva. Zohledněny budou i další provozní režimy místnosti, např. režim větrání. Vyhodnocení dat umožní vyjádření ke kolísání koncentrace částic v místnosti a rychlosti poklesu koncentrace. Na základě naměřených dat budou formulovány závěry a doporučení k provozu spalovacího zařízení v obytné místnosti.

Cíle bakalářské práce:

1. Zpracovat přehled problematiky jemných částic rozptýlených ve vzduchu se zaměřením na spalovací částice.
2. Stručně představit měřicí metody využívané při měření koncentrace jemných částic.
3. V místnosti se spalovacím zdrojem tepla (krbem) realizovat měření koncentrace jemných částic pro různé režimy příkládání paliva.
4. Vyhodnocení experimentálních dat s cílem kvantifikovat vliv spalovacího zařízení na kolísání koncentrace jemných částic v různých částech místnosti (včetně vyhodnocení rychlosti depozice částic, vlivu intenzity větrání, atd.)

Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

KANTOR, R., Částice v ovzduší a možnosti jejich měření, 2017. Bakalářská práce VUT FSI.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá jemnými částicemi emitovanými z krbových kamen do vnitřního prostředí. Ze začátku se práce věnuje popisu biomasy a jejímu spalování. Následuje část, která se zaměřuje na škodliviny, vznikající při spalování biomasy, a v neposlední řadě je pozornost věnována i aktuální kvalitě ovzduší v České republice, metodám měření tuhých znečišťujících látek a popisu měřicí aparatury. V experimentální části je popsán výpočet koncentrace a následně jsou prezentována data, která byla naměřena při různých režimech provozu krbových kamen.

Klíčová slova

biomasa, jemné částice, tuhé znečišťující látky, spalovací zařízení, krbová kamna, OPS

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with fine particles emitted to indoor space during combustion in fireplace stoves. The beginning of work is focused on the description of biomass and its combustion. In the following part the pollutants, which are produced by combustion of biomass are mentioned, and last but not least is attention focused on current air quality in Czech Republic methods of measure of solid pollutants and measuring equipment. Calculation of concentration is closely described in the experimental part, and then the data, which was measured on different modes of operations of fireplace stoves, is presented.

Key words

biomass, fine particles, solid pollutants, combustion device, fireplace stoves, OPS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÁJEK, Jiří. *Jemné částice emitované z tepelného zdroje do vnitřního prostředí*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132238>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Jemné částice emitované z tepelného zdroje do vnitřního prostředí vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Díky patří také rodině za podporu během celého studia a Tadeáši Mímovi za výpomoc s opravou gramatických a stylistických chyb.

OBSAH

1	ÚVOD.....	11
2	Biomasa.....	12
	2.1 Chemické složení.....	12
	2.2 Spalování.....	12
3	Emise při spalování biomasy.....	14
	3.1 Plynné znečišťující látky.....	14
	3.1.1 Oxidy dusíku.....	14
	3.1.2 Oxidy síry.....	15
	3.1.3 Oxid uhelnatý.....	15
	3.1.4 Přízemní ozon.....	15
	3.1.5 Polycyklické aromatické uhlovodíky.....	16
	3.2 Tuhé znečišťující látky.....	16
	3.2.1 Dělení TZL.....	17
	3.2.2 Dopady na životní prostředí.....	20
	3.2.3 Dopady na zdraví člověka.....	20
	3.3 Smog.....	20
	3.3.1 Redukční smog.....	21
	3.3.2 Oxidační smog.....	21
4	Aktuální situace v ČR.....	22
5	Metody měření TZL.....	23
	5.1 Gravimetrická metoda.....	23
	5.2 Radiometrická metoda.....	24
	5.3 Optická metoda.....	24
	5.3.1 Nefelometrické prachoměry.....	24
	5.3.2 Turbidimetrické (transmisní) prachoměry.....	25
	5.4 Metoda využívající triboelektrický jev.....	25
6	Použité zařízení a palivo.....	26
	6.1 Měřicí zařízení TSI OPS Model 3330.....	26
	6.2 Krbová kamna PRINC.....	27
	6.3 Měřicí místnost.....	27
	6.4 Palivo.....	28
7	Experimentální část.....	29
	7.1 Výpočet koncentrace.....	29
	7.2 Umístění měřicího přístroje.....	30
	7.2.1 Oblast 1.....	30
	7.2.2 Oblast 2.....	30
	7.3 Režimy topení.....	32
	7.3.1 Režim 1.....	33
	7.3.2 Režim 2.....	34
	7.3.3 Režim 3.....	36
	7.3.4 Režim 4.....	38

7.3.5	Režim 5	40
7.4	Kouř z cigarety	41
7.5	Počet částic	42
7.6	Rychlost poklesu koncentrace částic	44
8	Závěr	45
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
	SEZNAM OBRÁZKŮ	51
	SEZNAM TABULEK.....	52

1 ÚVOD

V posledních několika letech se mnohem více hovoří o kvalitě ovzduší a jeho vlivu na lidské zdraví. V ovzduší se nenachází pouze různé plyny, ale i kapičky či částice různého složení. Právě částice jsou jednou ze sledovaných škodlivin, které se v poslední době začala věnovat větší pozornost. Největší množství částic se do vzduchu dostane ve spalinách ze spalovacích procesů. Jelikož vdechování vysokých koncentrací částic má negativní vliv na lidské zdraví, je vyvinuta snaha o snižování množství částic vypuštěných do vzduchu. Hlavním nástrojem pro zlepšení ovzduší je legislativa, která omezuje vypouštění škodlivin nejen z velkých provozoven, ale také ze spalovacích zařízení malých výkonů pro domácí použití.

Většina studií spojených s částicemi vzniklých ve stacionárních spalovacích zařízeních se zaměřuje hlavně na částice, které jsou odváděny do komína. Což je naprosto pochopitelné, do komína jich jde nejvíce. Za komínem se však částice, při dobrých rozptylových podmínkách, mohou rozptýlit do velkého prostoru. Tato práce je naopak zaměřena na částice, které uniknou při spalovacím procesu do vnitřních prostor a přímo tak ovlivňují člověka v místnosti s topeništěm.

V dnešní době se krbové vložky, kachlová a krbová kamna těší velké oblibě díky jejich praktičnosti, designovému provedení a určitému vlivu na atmosféru v místnosti. Máloddo si však uvědomí, že i krásná tradiční krbová kamna mohou při topení zvyšovat koncentraci částic a škodlivin v místnosti a mít tak negativní vliv na lidské zdraví.

2 Biomasa

Biomasa je pojem, pod který se řadí veškerá organická hmota, rostlinného a živočišného původu. Energeticky se využívá nejvíce biomasa z rostlin (fytomasa), která při růstu vyrábí endotermickými procesy stavební látky (polymery), které pak lze opět rozložit na látky jednodušší a energii. Jelikož neustále bude nějaká produkce biomasy (odpad z lesnictví, sláma), řadí se mezi obnovitelné zdroje. Při procesu spalování biomasy je sice produkován CO₂, zároveň je ale z atmosféry odebírán při růstu nových rostlin. Díky tomu je biomasa zdroj energie, který je neutrální k produkci CO₂. V souvislosti s energetickým průmyslem ji lze rozdělit na biomasu pěstovanou pro energetické využití (záměrně pěstované dřeviny, řepka olejná, cukrová řepa) a odpadní biomasu (zemědělský a lesnický odpad, exkrementy hospodářských zvířat, biologicky rozložitelný komunální odpad). Nejběžnějším energetickým využitím biomasy je spalování, lze ji ale také zplyňovat či podrobit pyrolýze. K těmto procesům se využívá tzv. suchá biomasa (např. dřevo, piliny, suchý rostlinný odpad), jejíž vlhkost je menší než 50 %. Vlhká biomasa (exkrementy hospodářských zvířat, siláž), jejíž vlhkost je vyšší než 50 % a tedy nevhodná pro spalování, je přeměněna fermentací na etanol nebo anaerobním vyhníváním na bioplyn [1].

2.1 Chemické složení

Jelikož je biomasa široký pojem, její chemické složení je různé. Tato práce se zabývá dřevní biomasou (dendromasou), jejíž složení se může lišit jak podle typu stromu, tak i podle místa původu. Dřevo se skládá hlavně z organických látek, konkrétně z 49,5 % uhlíku, 44,2 % kyslíku, 6,3 % vodíku a 0,12 % dusíku [2]. Hlavní složkou dřeva jsou polymery (90–97 % hmoty dřeva), konkrétně celulóza (46–56 %), hemicelulóza (15–25 %) a lignin (25–35 %), které tvoří buněčné stěny [2]. Dále se ve dřevě vyskytuje i mnoho anorganických látek, jako například síra, chlór nebo soli vápníku, draslíku, sodíku, křemíku, železa či hliníku. Tyto anorganické látky často pochází ze znečištění biomasy při těžbě, dopravě nebo z okolního prostředí [3]. Jsou-li například v blízkosti lesů průmyslové oblasti, může dojít ke kontaminaci dřeva exhaláty. Právě anorganické látky jako chlór a síra pak mají nežádoucí korozivní účinky na povrchu kotle. Obsah anorganických látek (kromě síry a dusíku) se určuje po spálení paliva na popela [4].

2.2 Spalování

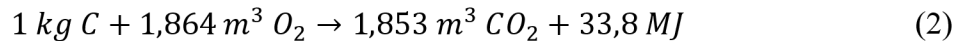
Spalování biomasy je nejstarší člověkem využívaný zdroj energie. Naši předci se naučili pracovat s ohněm již před 400 000 lety a od té doby až do 19. století se jako palivo využívalo výhradně dřevo, dokud ho nenahradila fosilní paliva [5]. V dnešní době se v energetice od fosilních paliv ustupuje a vrací se ke spalování biomasy, díky její neutrální produkci CO₂. Spalování dřevní biomasy je také vhodný způsob vytápění rodinných domů nebo chat, ať už je objekt vytápěn pomocí kotle, krbu či kamen [6].

Množství tepla uvolněného z biomasy při spalování velmi záleží na její vlhkosti. U dřevin se vlhkost po vytěžení pohybuje v rozmezí od 40 do 60 % [7]. Při samotném procesu spalování se nejdříve palivo zahřívá a současně se z něj odpařuje vlhkost, tento proces spotřebovává teplo. Čím větší bude vlhkost paliva, tím více tepla se spotřebuje na její odpaření. Proces spalování se tedy může zefektivnit vysušením biomasy. Samotné sušení pak lze rozdělit na aktivní a pasivní. U aktivního sušení je potřeba dodávat energii z vnějšího zdroje, což je ekonomicky i energeticky náročné, sušení je však poměrně rychlé a lze biomasu vysušit na požadovanou vlhkost. Pasivní sušení je naopak velmi jednoduché a ekonomicky nenáročné, stačí biomasu jen nechat pod přístřeškem na větraném místě. Zabere však mnohem více času a biomasu lze vysušit pouze částečně (vysušení dřeva z 50 % na 20 % vlhkosti může pod střechou a s provětráváním trvat 1–2 roky) [7].

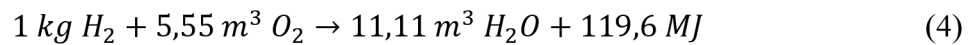
Procesu hoření se v biomase účastní prchavá hořlavina a samotný tuhý podíl. Prchavá hořlavina, která hoří dlouhým a svítivým plamenem, se začíná uvolňovat od 150 °C, intenzivně se pak uvolňuje od 200–250 °C [8]. Tuhý podíl, který hoří krátkým a průhledným modrým plamenem začíná hořet od 450 °C a hoří značnou dobu i po uvolnění veškeré prchavé hořlaviny [9]. Teplota na roštu se pohybuje od 1000 °C do 1300 °C [10].

Spalovací proces biomasy se skládá ze tří základních exotermních reakcí [11]:

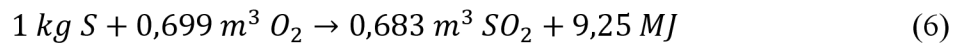
- Oxidace uhlíku na oxid uhličitý



- Oxidace vodíku na vodní páru

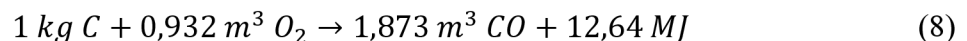


- Oxidace síry na oxid siřičitý



Množství síry v dřevní biomase je zanedbatelné, proto lze zanedbat i teplo uvolněné její oxidací. Výše uvedené reakce probíhají u dokonalého spalování, kde uhlík, síra i vodík mají vhodné podmínky pro úplnou oxidaci. Za nepříznivých podmínek (nízká teplota plamene, nedostatek kyslíku, krátký čas oxidace) dochází k nedokonalému spalování, při kterém klesá účinnost (do spalin odchází ještě nespálené hořlavé složky) a vzniká nebezpečný oxid uhelnatý [11]:

- Oxidace uhlíku na oxid uhelnatý



3 Emise při spalování biomasy

Slovo emise označuje vypouštění produktu do okolního prostředí. Tímto produktem mohou být hluk, světlo, elektrony, plyny atd. U spalovacích procesů jsou emise nejčastěji spojovány s produkcí látek znečišťující ovzduší. Tyto znečišťující látky se dělí na plynné znečišťující látky a tuhé znečišťující látky (TZL). Plynné i tuhé emise jsou limitovány Zákonem o ochraně ovzduší (201/2012 Sb.).

Při měření škodlivin v ovzduší se objevuje také pojem imise. Imise označuje množství produktu v místě měření a jsou důsledkem emisí.

3.1 Plynné znečišťující látky

Každý spalovací proces je spojen s produkcí spalin. Při dokonalém spalování paliva, které by se skládalo pouze z uhlíku a vodíku a oksyločvadlem by byl čistý kyslík, by spaliny obsahovaly pouze CO₂ a H₂O. V reálných podmínkách proces spalování produkuje mnohem více látek, které mohou mít negativní vliv na spalovací zařízení i životní prostředí.

3.1.1 Oxidy dusíku

Dusík jako biogenní prvek má kladný vliv na růst rostlin, při vyšších koncentracích jeho oxidů jsou vlivy negativní. Tvoří pět oxidů (N₂O, NO, N₂O₃, NO₂, N₂O₅). Při spalování se vytváří:

- Oxid dusný (N₂O) je bezbarvý plyn slabého zápachu, nazývaný také rajský plyn, je velice silný skleníkový plyn, jeho schopnost absorbovat infračervené záření je více než 200× vyšší než u oxidu uhličitého, ve vyšších vrstvách atmosféry může reagovat s kyslíkem a vznikají dvě molekuly NO [12].
- Oxid dusnatý (NO) je bezbarvý jedovatý plyn, bez zápachu, v atmosféře oxiduje na NO₂ [13].
- Oxid dusičitý (NO₂) je hnědočervený, silně jedovatý plyn s charakteristickým zápachem, který se snadno rozpouští ve vodě a mění se na kyselinu dusičnou, která je součástí kyselých dešťů, dále je hlavní složkou fotosmogu [14].

Oxidy dusíku vzniklé při spalování se rozlišují podle procesu jejich vzniku na tři skupiny [15]:

- Termické – při vysoké teplotě se molekula dusíku ze vzduchu rozštěpí a s přítomnými atomy kyslíku vytvoří oxid dusíku
- Palivové – dusík v palivu během hoření oxiduje a vytváří se oxidy dusíku
- Promptní – molekula dusíku je přes meziprodukty přeměněna radikálovými reakcemi na oxid dusíku

Termické a promptní oxidy dusíku vznikají ve větší míře až při vyšších teplotách (od 1200 °C). Vzhledem k teplotám, při kterých probíhá spalování biomasy na roštu, je produkce oxidů dusíku nejvíce závislá na obsahu dusíku v palivu [14].

Oxid dusičitý reaguje v atmosféře s vodou a dochází ke vzniku kyseliny dusičné, která je s kyselinou sírovou důvodem vzniku kyselých dešťů, které mohou způsobovat úhyn ryb nebo devastaci lesních porostů. Oxid dusičitý je toxický a dráždí dýchací cesty, při větších koncentracích může popálit sliznice dýchacích cest nebo oči [16]. Oxid dusnatý může způsobit vážné popáleniny kůže a rohovky, při delším vystavení nižším koncentracím může způsobit plicní edém [13]. Při reakci dvou molekul oxidu dusnatého a molekuly kyslíku, vznikají dvě molekuly oxidu dusičitého [15].

Užívání dusíkatých hnojiv a větší imise oxidů dusíku vedou ke zvýšené koncentraci dusíkatých iontů ve vodě, které podporují množení sinic a planktonu. Může docházet ke vzniku

vodního květu (tzv. eutrofizace vody) [15]. V souvislosti s emisemi se nejvíce hovoří o oxidu dusnatém a oxidu dusičitém, dohromady se nazývají NO_x [13].

Množství produkovaných oxidů dusíku je závislé na teplotě spalování, jejich množství tedy lze snížit zkrácením doby setrvání v oblastech vysokých teplot, snížením spalovací teploty nebo parciálního tlaku kyslíku [17].

3.1.2 Oxidy síry

Množství síry v biomase závisí na typu biomasy a oblasti, kde se biomasa pěstovala. Obecně se obsah síry v biomase pohybuje od 0,01 do 0,8 % hmotnosti sušiny (u uhlí, vytěženého v Česku je to 1–3 hmot. %) [18]. Při spalování oxiduje síra v palivu a vzniká oxid siřičitý SO_2 (až 95 % původní síry), který je ve spalinách částečně oxidován na oxid sírový SO_3 [19]. Oxid siřičitý je bezbarvý a jedovatý plyn se štiplavým zápachem, který je těžší než vzduch [20]. Při koncentracích od $0,1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ dráždí horní cesty dýchací a oči, koncentrace od $0,5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ vede k vzestupu úmrtnosti starých, chronicky nemocných lidí [19]. V atmosféře vlivem slunečního záření oxid siřičitý oxiduje na oxid sírový, který při reakci se vzdušnou vlhkostí vytváří kyselinu sírovou, která spolu s kyselinou dusičnou tvoří kyselé deště [19].

Emise oxidů síry lze snižovat používáním paliva s menším obsahem síry nebo následným odsířením spalin pomocí aditiva. Používají se tři metody [21]:

- Suchá aditivní vápencová metoda – nástřik suchého aditiva (CaCO_3 , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$, CaO) do ohniště nad plamen
- Polosuchá vápenná metoda – nástřik vodní suspenze $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na spaliny
- Mokrý vápencová vypírka – SO_2 se vypírá vodní suspenzí CaCO_3 nebo $\text{Ca}(\text{OH})_2$

3.1.3 Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý vzniká při nedokonalém spalování uhlíkatých paliv (za nízké teploty nebo při nedostatku kyslíku). Koncentraci CO v ovzduší výrazně ovlivňuje automobilová doprava. V místech s intenzivním automobilovým provozem, může koncentrace dosáhnout až $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, vystavení této koncentraci po delší dobu má citelné vlivy na lidský organismus [22]. Tento plyn je bezbarvý, bez zápachu, je hořlavý a jedovatý. Do organismu se dostává dýchacími cestami, z plicních sklípků difunduje do krve, kde se váže na hemoglobin silněji než kyslík. Funkcí hemoglobinu je dodávat kyslík tkáním a orgánům, které bez něj nemohou správně fungovat. Menší koncentrace oxidu uhelnatého, vyskytujících se například ve městech, mohou působit vážné zdravotní potíže lidem postiženým kardiovaskulárními poruchami [22]. Při vyšších koncentracích se mohou dostavit závratě, silné bolesti hlavy a poruchy vidění [23]. Dále má vliv na pracovní výkonnost, pozornost nebo schopnost vykonávat složitější úlohy. Oxid uhelnatý v atmosféře reaguje s radikálem hydroxyly a vzniká metan (velmi silný skleníkový plyn) a škodlivý přízemní ozon (fotosmog) [22].

Snížení emisí CO lze dosáhnout spalováním paliva při vysoké teplotě a s dostatek přiváděného vzduchu tak, aby měl veškerý CO dostatek času a kyslíku zoxidovat na CO_2 .

3.1.4 Přízemní ozon

Tříatomová molekula kyslíku, též nazývaná jako ozon, je velmi důležitým prvek v naší stratosféře (10–50 km nad mořem). V této vrstvě atmosféry slouží ozon jako filtr ultrafialového záření, který pohlcuje biologicky aktivní složku UV záření (o vlnové délce 280–320 nm). Toto záření, nazývané také UV-B je velice nebezpečné, protože dokáže rozkládat bílkoviny a další životně důležité sloučeniny, zvyšuje výskyt rakoviny, způsobuje zákal očí a poruchy imunitního systému [24].

Ozon v troposféře, tedy na povrchu země, je naopak považován za znečišťující látku a má nepříznivý vliv na lidské zdraví. Přízemní ozon nemá vlastní zdroj (je to tzv. sekundární polu-

tant), ale vzniká fotochemickými reakcemi oxidu dusičitého, který se rozpadá za působení slunečního záření ($h\nu$), o vlnové délce menší než 400 nm, na oxid dusnatý a atomární kyslík, který se pak váže na molekulu kyslíku, za přítomnosti katalyzátoru M (např. N_2), a vzniká O_3 , jak ukazují následující rovnice [25]:



Koncentrace přízemního ozonu se mění podle intenzity slunečního záření (při vyšší intenzitě roste i koncentrace), ročního období (v létě bývají koncentrace přízemního ozonu nejvyšší, tehdy se mluví o tzv. letním smogu), oblačnosti (při malé oblačnosti koncentrace roste) nebo nadmořské výšce (ve vyšších oblastech je koncentrace přízemního ozonu vyšší a stálější než ve městech, kde je během dne koncentrace proměnlivější) [25].

Zvýšená koncentrace přízemního ozonu vede k onemocnění dýchacích cest a silnému podráždění očních spojivek. Zákon pro ochranu ovzduší udává limitní imisní koncentraci $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ jako maximální denní osmihodinový klouzavý průměr, zdraví škodlivé však jsou už nižší koncentrace. Světová zdravotnická organizace (WHO) proto navrhla snížit tuto imisní limitní hodnotu na $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [26]. Již původní hodnota $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ je často překračována a hodnota navržená Světovou zdravotnickou organizací by byla velmi obtížně dosažitelná [27].

3.1.5 Polycyklické aromatické uhlovodíky

Pod pojem polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU/PAH) se řadí více jak sto látek tvořených uhlíkem a vodíkem, které ve své molekule obsahují kondenzovaná aromatická jádra. Takové látky jsou například naftalen, acenaften, antracen, fluoren, benzo(a)pyren, benzo(b)fluoranthén nebo benzo(k)fluoranthén. Čisté sloučeniny jsou krystalické látky bílé nebo nažloutlé barvy, málo rozpustné ve vodě ale snadno rozpustné v tucích a olejích [28].

PAU vznikají hlavně při nedokonalém spalování uhlíkatých paliv, dále pak z rafinérií, při výrobě hliníku, koksu, asfaltu a cementu nebo uvolňováním z látek, které PAU obsahují (silnice, asfaltové izolace) [28, 29].

Mnoho látek ze skupiny polycyklických aromatických uhlovodíků jsou karcinogenní a toxické látky. Jejich karcinogenita roste se vrůstajícím počtem kondenzovaných benzenových jader, největší je u uhlovodíků s pěti jádry, poté opět klesá [30]. Například benzo(a)pyren, který je součástí cigaretového kouře, může poškodit zdravý vývoj plodu a zvýšit riziko rakoviny. Velkým problémem je u PAU také velká schopnost odolávat přirozeným rozkladným procesům, díky tomu zůstávají dlouho v atmosféře a mohou se rozšířit i na velkou vzdálenost [28, 31].

Zjišťování koncentrace PAU je velice obtížné. Využívá se absorbování PAU absorben-tem a po extrahování požadovaných uhlovodíků a odstranění rušivých složek se provede analýza plynovou nebo kapalinovou chromatografií [28]. Nejvíce sledovaným polycyklickým aromatickým uhlovodíkem je benzo(a)pyren. Jeho limitní roční průměrné koncentrace ($1 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$) byly v roce 2017 překročeny na 25 z 38 (66 %) měřicích stanic v České republice, na některých místech i několikanásobně. V roce 2018 došlo k překročení na 22 z 39 (58 %) stanic a v roce 2019 na 19 z 46 (41 %) stanic [27]. Žádná jiná látka s platným imisním limitem nepřesahovala limitní hranici na tak velkém počtu stanic. Je také nutno dodat, že měření koncentrací benzo(a)pyren je ze všech aktivně sledovaných polutantů zatíženo největší chybou [27].

3.2 Tuhé znečišťující látky

Kvalitu ovzduší, kromě plyných znečišťujících látek, také ovlivňují částice, které se ve vzduchu vyskytují. Tuhé znečišťující látky je souhrnné označení pro částice menší než $10 \mu\text{m}$, které se volně pohybují v atmosféře [32]. Vznikají přirozenými nebo antropogenními procesy. Mezi přirozené patří vulkanická činnost, zvětrávání nebo odpařování (například odpařování mořské

hladiny znatelně zvyšuje koncentraci částic v přímořských oblastech). Mezi antropogenní procesy vytvářející tuhé částice patří hlavně spalování, průmyslová výroba a zemědělská činnost [33].

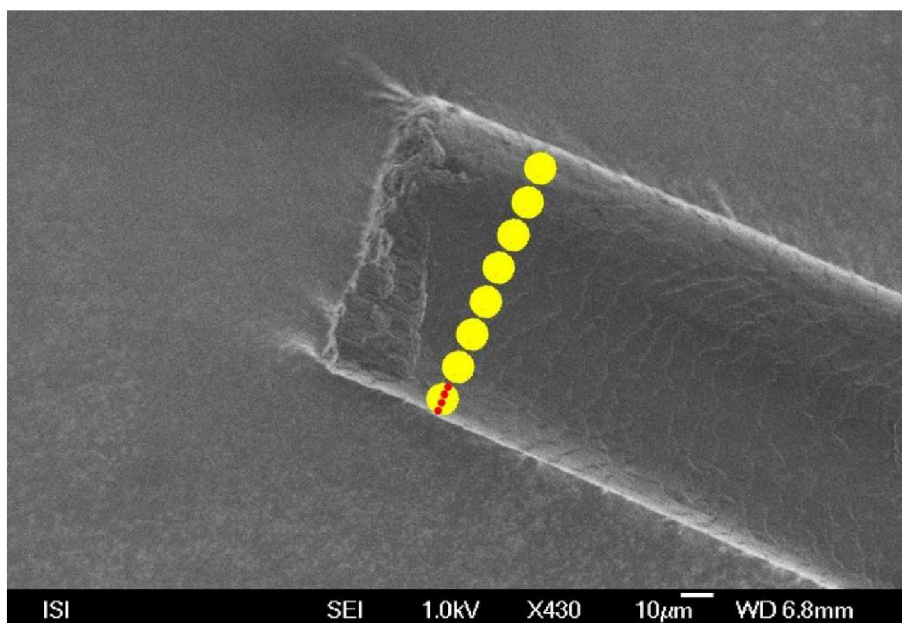
Částice rozptýlené v plynu se nazývají aerosoly, lze je dělit podle skupenství disperzního podílu (rozptýlených částic) na tuhé, kapalné nebo smíšené [34]:

- Tuhé aerosoly v atmosféře se dále člení na:
 - Prach – částice o velikosti 10 μm a více rozptýlené ve vzduchu, které vznikají při mechanickém zpracování pevných látek (vrtání, broušení, mletí atd.), erozí hornin nebo sopečnou činností
 - Dým – částice o velikosti 1 nm až 10 μm , vzniklé spalováním, rozptýlené spolu se spalinami ve vzduchu
- Kapalný aerosol v atmosféře je označován jako mlha, ve vzduchu jsou rozptýlené kapičky kapaliny o velikosti 10 nm až 10 μm .
- Ve smíšeném aerosolu jsou rozptýlené jak pevné částice, tak kapičky kapaliny. Dále se dělí na:
 - Kouř – vzniká při spalovacích procesech a obsahuje nejen popílek a saze, ale i kapičky vody nebo dehtu
 - (Redukční) Smog – vzniká při zvýšené vlhkosti a koncentraci pevných částic (často se zdrojem ve spalovacích procesech), když na povrchu částic začne kondenzovat vzdušná vlhkost spolu s dalšími oxidy (např. SO_2), viz kapitola 3.3.1

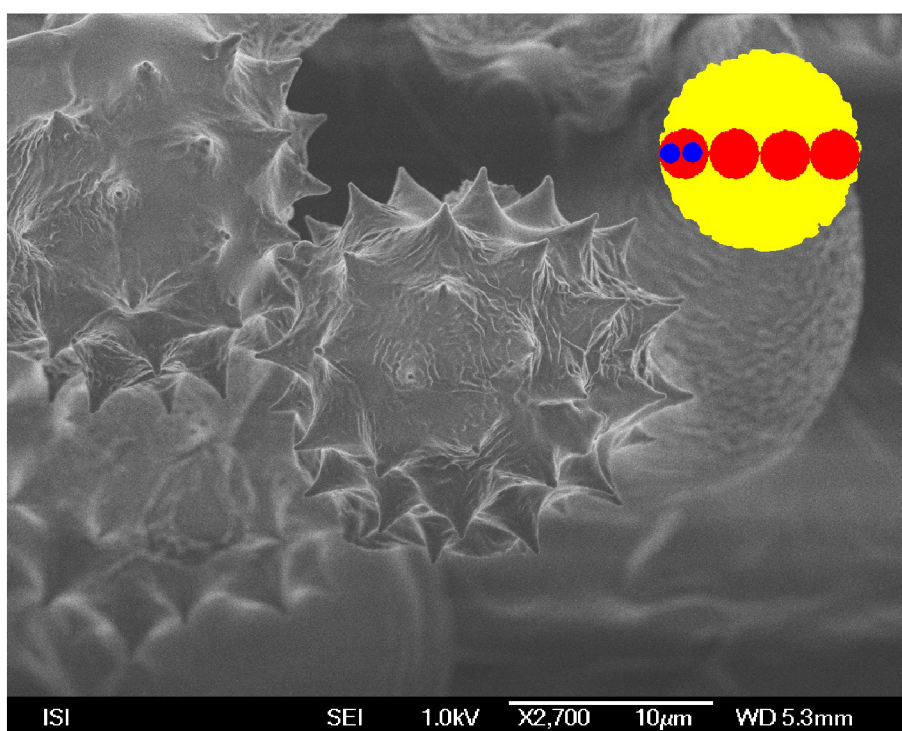
3.2.1 Dělení TZL

Základní dělení TZL je podle velikosti. Právě velikost částice ovlivňuje její škodlivost pro člověka a životní prostředí. Proto jsou tuhé znečišťující látky děleny podle zdravotního rizika na frakce PM_x (z anglického „*Particulate Matter*“), které obsahují 50 % částic s aerodynamickým průměrem menším než $x \mu\text{m}$ (PM_{10} , resp. $\text{PM}_{2,5}$ obsahuje částice s průměrem menším než 10 μm , resp. 2,5 μm) [33]. Pod pojmem aerodynamický průměr je myšlen průměr kulové částice o hustotě 1 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [35]. Nejčastěji je prováděno měření hmotnostní koncentrace PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$, zřídka i PM_1 . V některých případech se používá také označení hrubé (10–2,5 μm), jemné (2,5–1 μm) a ultrajemné (<1 μm) částice [36].

Pro lepší představu skutečné velikosti částic jsou na obrázcích 1 a 2 porovnány frakce PM_x s tloušťkou lidského vlasu a pilového zrna. Tyto obrázky byly pořízeny rastrovacím elektronovým mikroskopem JEOL JSM 6700F.



Obrázek 1. Porovnání průměrů vlasu a částic PM_{10} (žlutě) a $PM_{2,5}$ (červeně)



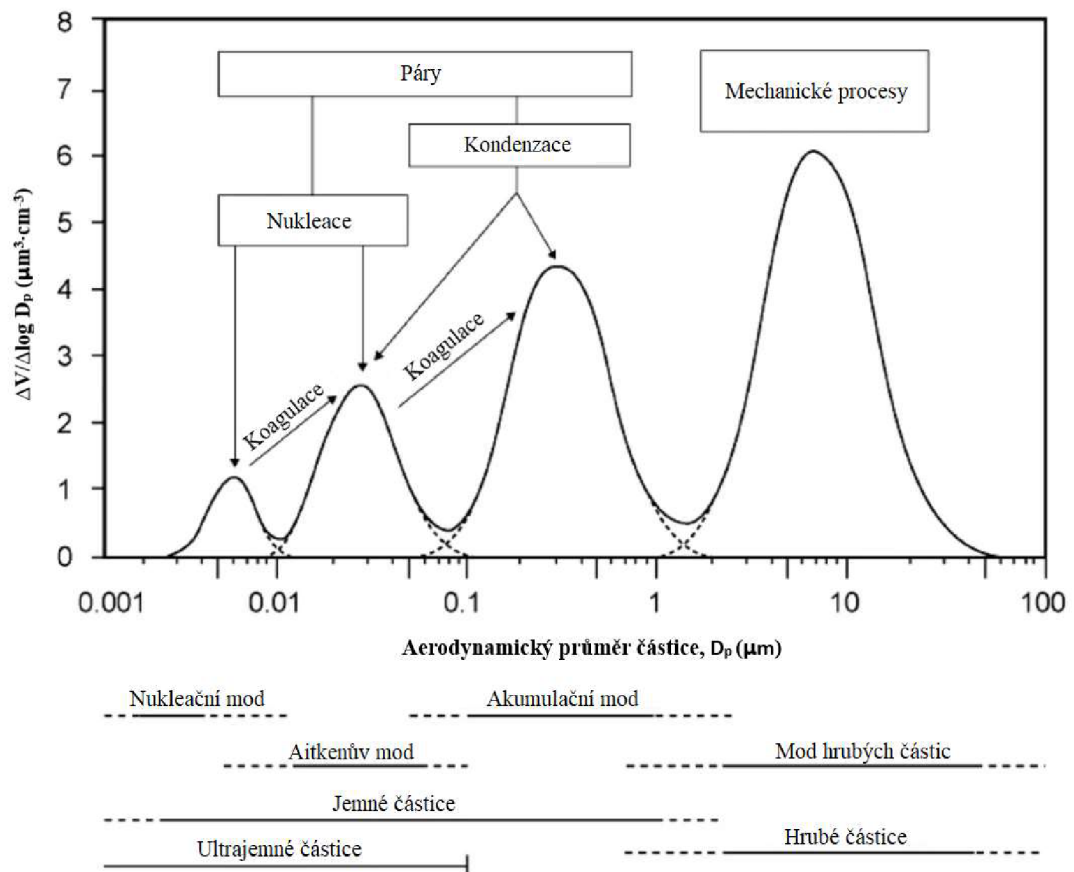
Obrázek 2. Porovnání velikosti pilového zrna a částic PM_{10} (žlutě), $PM_{2,5}$ (červeně) a PM_1 (modře)

Dalším možným rozdělením částic je na mody. Mod je definován jako maximum log-normální funkce z počtu nebo rozložení hmotnosti částic. Modální rozložení u mikročástic jako první použil Kenneth T. Whitby (1925–1983) v roce 1976, který měřil velikost částic v atmosférickém aerosolu, obsahující částice v rozmezí od 0,01 až 6 μm [36]. Výsledné rozložení počtu částic obsahovalo tři mody – mod nukleační (<0,1 μm), akumulární (0,1 až 2 μm) a hrubých

částic ($>2 \mu\text{m}$). Pozdější měření, technikou s větší rozlišovací schopností, zjistila, že v nukleačním modu se nachází dvě maxima log-normální funkce, mezi modem nukleačním a akumulacním byl proto vymezen ještě mod Aitkenův [36].

Částice v jednotlivých modech mají stejné formovací mechanismy, ale mohou pocházet z různých zdrojů nebo se lišit složením. Hrubá charakteristika modů je pak následovná [36]:

- Mod hrubých částic – částice s vrcholem distribuce kolem $5\text{--}30 \mu\text{m}$ a jsou tvořeny hlavně mechanickými procesy (prach vzniklý větrem, dopravou či stavební činností)
- Akumulační mod – částice ($0,15\text{--}0,5 \mu\text{m}$), které vznikají hlavně procesy koagulace (dvě částice se srazí do jedné) a kondenzace (plyny kondenzují na částicích)
- Aitkenův mod – částice ($0,01\text{--}0,1 \mu\text{m}$), které vznikají hlavně koagulací, kondenzací a spalovacími procesy lze pozorovat jejich zvýšenou koncentraci poblíž míst vytižených dopravou
- Nukleační mod – částice ($<10 \text{nm}$) jsou tvořeny hlavně vysokoteplotními procesy a kondenzací par



Obrázek 3. Idealizované rozdělení částic, které jsou produkovány v dopravě [36]

Částice Aitkenova i nukleačního modu podléhají koagulaci a kondenzaci, čímž zvětšují svůj objem. Čím větší jsou tím pomaleji procesy koagulace a kondenzace probíhají, protože rostou jen do velikosti akumulacního modu [36]. Právě velikost částic určuje dobu setrvání v atmosféře a tím i vzdálenost, kterou jsou částice schopny urazit od jejich zdroje. Hrubé frakce poměrně rychle sedimentují, částice o aerodynamickém průměru $10 \mu\text{m}$ klesne v klidném vzduchu o 1 metr za 6,1 minuty, částice o aerodynamické průměru $1 \mu\text{m}$ klesá stejnou vzdálenost

7,5 hodiny [35]. Sedimentační rychlost jemných částic je pak téměř zanedbatelná (částice o aerodynamickém průměru 0,1 μm klesají 1 metr 304 hodin) a z atmosféry jsou většinou odstraňovány srážkami [33, 35].

3.2.2 Dopady na životní prostředí

Částice o velikosti přes 10 μm působí na organismy hlavně mechanicky. Částice se z atmosféry dostávají suchou depozicí (sedimentací, absorpcí, adsorpcí) na povrch, kde pokrývají povrchy organismů. U rostlin způsobuje zaprášení zmenšení aktivní plochy listů, zahřívání listů, snížení efektivity fotosyntézy, redukci opylování, snížení množství plodů a celkového růstu rostliny. Většina prachových částic pouze stíní, některé ale mohou i chemicky působit (např. cementový prach rozpouští listová pletiva) [37].

Jemnější částice, které se skládají hlavně ze síranů, amonných solí, některých těžkých kovů a uhlíkatých sloučenin, působí spíše toxicky. Tyto částice se dostávají do vnitřních struktur živočichů a rostlin, kde díky jejich složení mohou negativně ovlivnit chemické procesy organismu. U rostlin může docházet k chloróze listů, zmenšení vzrůstu nebo oxidativnímu stresu, díky kterému může docházet k mutaci DNA [38].

Ovlivněna je i tvorba oblačnosti. Částice v atmosféře slouží jako kondenzační jádra, na kterých může kondenzovat vzdušná vlhkost a tvořit se tak oblaka. Ve spojení s vyšší koncentrací oxidu siřičitého může vést ke vzniku kyselých dešťů. Dále je ovlivněna také radiální bilance Země, částice rozptylují přichozí sluneční záření a množství oblačnosti [27].

3.2.3 Dopady na zdraví člověka

Škodlivost TZL na zdraví člověka závisí na době, po kterou bude člověk vystaven jejich působení, velikosti, složení a koncentraci samotných částic. Do těla se TZL dostávají hlavně při dýchání, jejich velikost pak určuje, jak daleko do organismu se dýchacími cestami dostanou. Částice větší než 5 μm se zachycují v horních cestách dýchacích (nos, dutina nosní a ústní, nosohltan), případně v dolních cestách dýchacích (hrtan, průdušnice, průdušky a plice). Ultrajemné částice (<1 μm) pronikají plicními sklípkami až do krevního oběhu, kde se projevuje chemické složení částic, často toxické a karcinogenní [27].

Tuhé znečišťující látky poškozují hlavně plicní a kardiovaskulární systém. Dráždí dýchací systém, přispívají ke vzniku infekcí a zánětlivých reakcí v plicních tkáních, přispívají k oxidačnímu stresu, což má za důsledek rozvoj aterosklerózy [27]. Práce v prašných prostředích často bývá důvodem pneumokoniózy, souboru zánětlivých onemocnění plic (silikóza, azbestóza) jako důsledek vdechování prachu minerálních látek [39]. Od roku 2013 jsou TZL klasifikovány jako lidské karcinogeny [40].

Negativní vlivy na zdraví má i krátkodobé zvýšení denních koncentrací, například u částic PM_{10} to mohou být problémy s dýcháním hlavně u astmatiků, nárůst počtu osob s onemocněním dýchacích cest, srdce a cév, zvýšení nemocnosti i úmrtnosti [27].

Dlouhodobé vystavení zvýšené koncentraci TZL může způsobit snížení plicních funkcí, zvýšit počet onemocnění dýchacího ústrojí a zkrátit délku života (hlavně kvůli vyšší úmrtnosti osob s rakovinou plic a starých a nemocných lidí, kteří více trpí na srdeční a cévní onemocnění) [27].

3.3 Smog

Smog je chemické znečištění atmosféry, které snižuje viditelnost a obsahuje mnoho škodlivin. Dlouhodobé vystavení smogu může mít fatální zdravotní dopady, proto Český hydrometeorologický ústav provozuje Smogový varovný a regulační systém (SVRS) a na jeho základě může Ministerstvo zdravotnictví, podle § 10 zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, vydat varování nebo vyhlásit smogovou situaci [41].

3.3.1 Redukční smog

Redukční (londýnský nebo zimní) smog vzniká hlavně v zimních měsících, při inverzních teplotách. Skládá se hlavně z oxidů dusíku, síry a PM_x a má silné redukční účinky. Dříve byl ve velkých městech následkem intenzivního spalování uhlí v průmyslu a při vytápění domů. Dnes je tvorba ovlivněna i dopravou.

S problémem smogu se během let setkávalo mnoho velkých měst, například v Londýně již v roce 1306 Edward I. omezil spalování uhlí kvůli špatné kvalitě ovzduší. Toto opatření ovšem nemělo dlouhého trvání [42]. Situace se stupňovala až v roce 1952, kdy došlo k tzv. Velkému londýnskému smogu, který byl příčinou více než 12 000 úmrtí [43].

3.3.2 Oxidační smog

Oxidační (losangeleský, letní nebo foto-) smog vzniká převážně v letních měsících. Skládá se hlavně z přízemního ozonu a má silně oxidační a dráždivé účinky. Objevuje se často na místech zatížených dopravou. Během 20. století bylo Los Angeles známé pro jeho špatnou kvalitu ovzduší. Kombinace rozvinutého automobilového průmyslu, frekventované dopravy a geografickému umístění zapříčinila, že se právě zde vyskytovaly vysoké koncentrace přízemního ozonu a docházelo tak k tvorbě fotosmogu [44].

4 Aktuální situace v ČR

Rok 2020 se v hodně ohledech lišil od dřívějších let a stejně tak tomu bylo u kvality ovzduší. Podle hodnocení založeného na indexu kvality ovzduší (IKO) byla kvalita ovzduší většinou dobrá nebo velmi dobrá. Za uplynulý rok byly koncentrace měřených látek znečišťujících ovzduší (PM_{10} , $PM_{2,5}$, přízemní ozon, oxid uhelnatý, oxid siřičitý a oxid dusičitý) nižší než za předchozí rok a zároveň dosáhly svých minim za celou dobu měření (2010 až 2020). Během roku nebyly ani vyhlášeny žádné smogové nebo regulační situace. Podíl na tom má teplá zima (menší emise při vytápění) a nadprůměrné množství srážek, které se podílely na vymývání polutantů z ovzduší [45].

Tabulka 1. Imisní limity polutantů a jejich překročení za rok 2020 [45]

Polutant	Délka průměrování	Povolený limit [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]	Povolený počet překročení	Počet stanic, které naměřily překročenou imisní hodnotu
PM_{10}	24 hodin	50	35× za rok	3 z 116 (3 %)
PM_{10}	1 rok	40	0	0 %
$PM_{2,5}$	1 rok	20	0	2 z 85 (2 %)
O_3	Denní maximum klouzaového 8hodinového průměru	120	25× za 3 roky v průměru	35 z 66 (56 %)
NO_2	1 rok	40	0	0 %
NO_2	1 hodina	200	18 za rok	0 %
SO_2	1 hodina	350	24 za rok	0 %
SO_2	1 den	125	3 za rok	0 %
CO	Maximální denní 8hodinový průměr	10 000	0	0 %

Měření z předchozích let (2009–2019) ukazuje, že imisní koncentrace znečišťujících látek sice klesá ale látky jako benzo(a)pyren, přízemní ozon a frakce PM_{10} a $PM_{2,5}$ navzdory klesajícímu trendu, stále na některých místech ČR překračovaly povolené denní imisní limity. Právě tyto látky jsou hlavním problémem kvality ovzduší v České republice [27].

Hlavním zdrojem TZL v ČR jsou lokální topeniště. V roce 2018 bylo zdrojem 58,7 % emisí frakce PM_{10} právě lokální vytápění domů, u frakce $PM_{2,5}$ tento podíl činil 73,9 %. Lokální topeniště se také výrazně podílejí na produkci plynných emisí. Ve stejném roce vyprodukovali 66,8 % oxidu uhelnatého a 98,8 % benzo(a)pyrenu [27].

Zatím nejsou uveřejněna data z roku 2019 a 2020, která udávají podíly emisí suspendovaných částic z různých zdrojů. Nejspíše však bude v roce 2020 poměr produkce částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ z lokálních topenišť, který zaujímal v předchozích letech nejvýraznější podíl, ještě větší než dříve. Hlavní příčinou byl nárůst lidí v domácnosti během nouzových stavů (první na jaře, kdy byl chladný březen a začátek dubna, druhý na podzim, kdy již začala topná sezóna). Vyšší počet lidí v domácnostech během chladného období znamená větší využití lokálních topenišť.

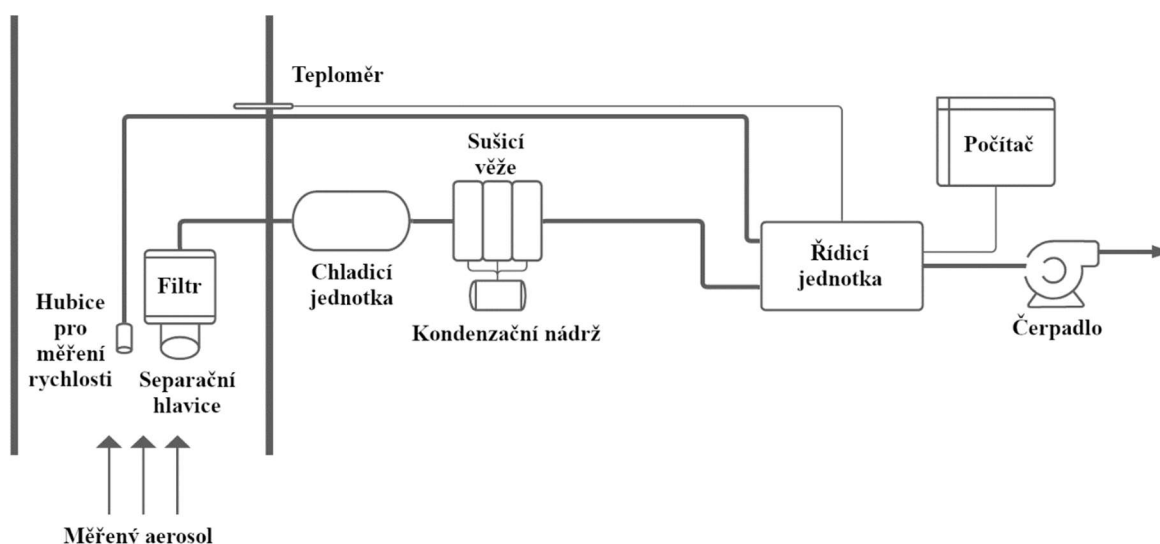
V budoucnu by měly emise TZL z vytápění domácností klesat, díky postupnému zakazování provozu kotlů, které nesplňují stanovené emisní limity a požadavkům na nové kotle. V České republice se kotle dělí do pěti emisních tříd, které určují množství a složení emisí (čím nižší třída, tím větší emise). Kotle první, druhé a třetí emisní třídy se již nesmí prodávat a od 1. 9. 2022 začne platit zákaz provozu kotlů prvních dvou tříd. Podle nařízení Evropské unie 2015/1189 se od 1. 1. 2020 mohou prodávat pouze kotle, které splňují požadavky na Ekodesign. Tato norma pro nízkoemisní provoz kotlů udává navíc, oproti emisní třídám, i sezónní hodnoty emisí a účinnosti a je více zaměřená na celosezónní provoz [46].

5 Metody měření TZL

Měření tuhých znečišťujících látek je proces, který vyžaduje složitá a přesná zařízení. Základním měřítkem pro hodnocení kvality ovzduší je hmotnostní koncentrace PM_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Metody měření emisních i imisních koncentrací jsou téměř totožné. Emisní koncentrace budou řádově větší než imisní. Metody jsou buď manuální (gravimetrická) nebo automatické (radiometrická, optická a využívající triboelektrický jev). Při automatických metodách je měření kontinuální a lze tedy získat hodnoty koncentrací v reálném čase.

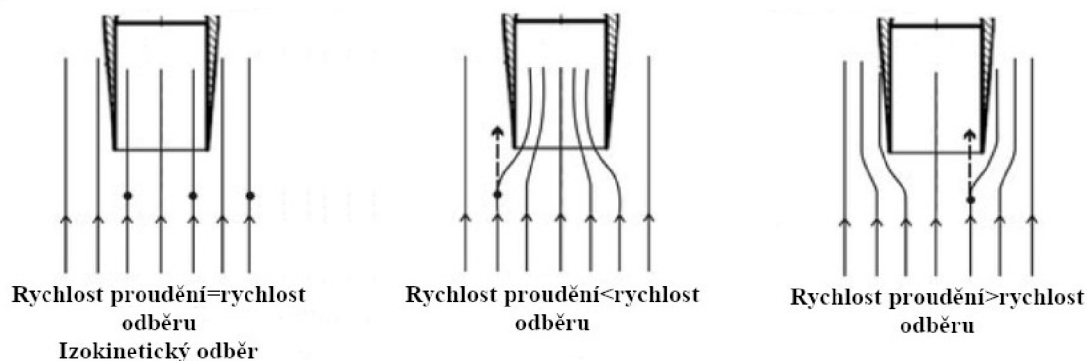
5.1 Gravimetrická metoda

Tato metoda je považována za referenční metodu pro měření PM_x [47]. Základem této metody je váhový rozdíl filtru před a po měření. Filtr se před měřením zváží v laboratoři, poté se umístí do měřicího zařízení, kde je přes něj nasáván plyn s částicemi (většinou po dobu 24 hodin). Aby se na filtr nezachytávaly větší částice, než které jsou měřeny, je před něj instalována separační hlavice, která propouští pouze částice určité velikosti (PM_{10} či $PM_{2,5}$). Vzorkovací trati před filtrem (separační hlavici a přenosové potrubí) je potřeba vyhřívat, aby nedošlo ke kondenzaci par a tím k zanášení sondy. Schéma odběrové trati je zobrazeno na obrázku 4. Po skončení měření je filtr opět zvážen v laboratoři. Výsledná hmotnostní koncentrace se pak určí z objemového průtoku nasátého plynu a rozdílu hmotností filtru [48].



Obrázek 4. Schéma gravimetrického zařízení pro měření částic

U proudícího aerosolu je důležité, aby bylo odebírání měřeného aerosolu isokinetické, tedy rychlost a směr odebíraného aerosolu vstupujícího do separační hlavice byly stejné jako rychlost a směr původního proudění [49]. Vedle odběrové sondy je hubice pro měření rychlosti proudění (např. Prandtlova trubice) [50]. Řídicí jednotka vyhodnotí data o rychlosti proudění a na jejich základě upraví výkon čerpadla a tím i rychlost odběru. Při nezachování isokinetického odběru může docházet k velké chybě. Když je rychlost odebírání větší než rychlost proudění, měřená koncentrace je menší než skutečná. Částice totiž nestihne změnit směr stejně rychle jako plyn a pokračuje původním směrem, jak je ukázáno na obrázku 5, případ b). Je-li rychlost odebírání menší než rychlost proudění, koncentrace je větší než skutečná [49].



Obrázek 5. Vliv rychlosti odběru na částice [49]

Tato metoda je nejpřesnější a podle gravimetrických zařízení se kalibrují přístroje využívající jiné metody měření. Nevýhodou této metody je poměrně malé časové rozlišení, nemožnost kontinuálního měření a problematické měření velmi nízkých koncentrací [48].

5.2 Radiometrická metoda

Podobně jako u gravimetrické, tak i u této metody dochází k využití filtru, který je ale na místo vážení vystaven β -záření. Filtr je tvořen páskou ze skelné tkaniny. Měření probíhá ve třech fázích. Nejdříve se změří absorpce β -záření čisté filtrační pásky, poté je po určitý časový okamžik (od 1 minuty až po 24 hodin) filtr vystaven proudu měřeného aerosolu a nakonec probíhá opět měření absorpce β -záření teď už zaneseným filtrem. Z rozdílu intenzity záření, které dopadne na detektor za filtrem, se určí hmotnostní koncentrace částic na filtru [48]. Tento vztah popisuje Lambertův-Beerův zákon, který udává souvislost mezi absorpcí β -záření a plošnou hmotností absorbentu [48].

Výhodou této metody je možnost měření široké škály koncentrace částic v aerosolu. Nevýhodou je práce s radioaktivními prvky emitujícími β -záření (např. krypton ^{86}Kr) [48].

5.3 Optická metoda

Nejpoužívanější metodou pro kontinuální měření je využití interakce částic se světelným paprskem. Část světla je částicemi absorbována, část rozptýlena a zbytek světla aerosolem projde. Optické prachoměry se dají rozdělit na zařízení využívající metodu nefelometrie (rozptylu světla) a turbidimetrie (transmise světla).

Výhodou optických metod je, že lze měřit několik velikostních frakcí najednou. Nevýhodou je, že optické prachoměry se musí kalibrovat pomocí gravimetrické metody, často se proto používají zařízení, které kombinují optickou i gravimetrickou metodu (částice projdou optickou soustavou a jsou zachycovány na vyjímatelný filtr) [48].

5.3.1 Nefelometrické prachoměry

Nefelometrii je metoda, která měří intenzitu rozptýleného světla, které vychází z koloidního roztoku pod určitým úhlem ke světlu do něj vstupujícímu [47]. Koloid je označení pro látku, která v sobě obsahuje částice o velikosti od 1 nm až po 1 μm (nelze je vidět ve světelném mikroskopu) [51]. Na velmi malých částicích, které se v koloidech nachází dochází k rozptylu světla. Úhel rozptylu je úměrný velikosti částice, čehož využívají nefelometrické prachoměry. Tato vlastnost je pro částice o velikosti menší než 1/10 vlnové délky světla popsána Rayleighovou teorií a obecně i pro větší částice popsána Mieovou teorií rozptylu světla [52, 53].

Samotné měření pak sestává z prosvícení aerosolu světelným paprskem (např. LED, laser), při kterém na částicích dochází k rozptylu světla, a detekci rozptýleného světla [54]. Podle úhlu rozptylu lze určit velikost částic a podle počtu impulzů i počet částic. Nefelometrické pra-

choměry jsou vhodné pro měření koncentrací od $0,1$ do $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ [54]. Při vyšších koncentracích dochází k překrývání impulzů od částic a zkreslení jejich počtu. Podrobnější popis prachoměru využívajícího rozptylu světla je v kapitole 6.1.

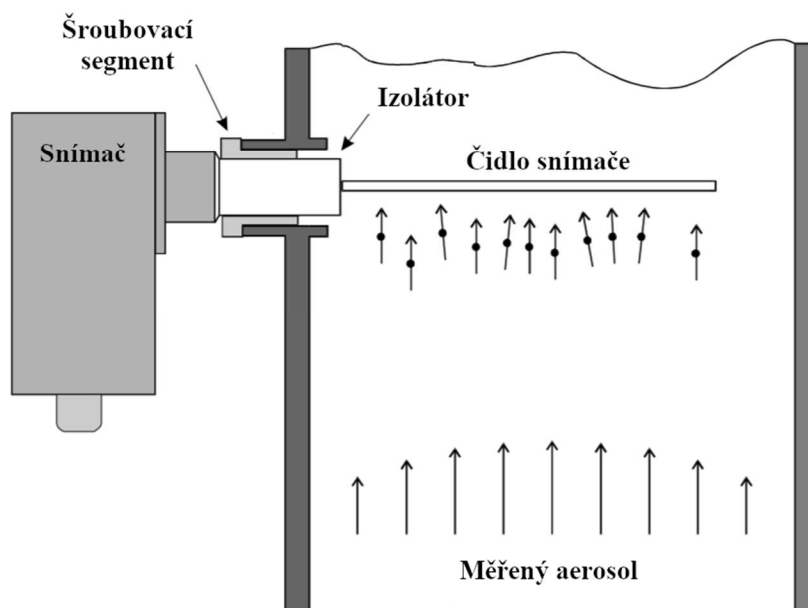
5.3.2 Turbidimetrické (transmisní) prachoměry

Turbidimetrie je metoda, která měří intenzitu světla v původním směru po průchodu vzorkem. Jelikož na částicích dochází k rozptylu a absorpci světla, intenzita paprsku se zmenšuje [55]. Množství částic v plynu je pak přímo úměrné rozdílu intenzit paprsku vyslaného a přijatého detektorem. Transmisní prachoměry se využívají pro střední a vyšší koncentrace. U koncentrací pod $10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ jejich přesnost rychle klesá [54].

5.4 Metoda využívající triboelektrický jev

Tato metoda se využívá při kontinuálním měření počtu částic přímo v potrubí měřeného aerosolu, tzv. in-suit měření. Triboelektrický jev je proces, ke kterému dochází při tření dvou určitých materiálů a jeden z nich získává náboj. Částice v plynu se třou o kovovou vodivou sondu a tím se na ní mění elektrický náboj [56]. Ze změny elektrického náboje je v řídicí jednotce vyhodnocena koncentrace částic. Tato metoda měří pouze změnu koncentrace, pro zjištění absolutní koncentrace je třeba zařízení kalibrovat gravimetrickou metodou a určit referenční hodnotu koncentrace [56].

Zařízení, která využívají tuto metodu jsou cenově dostupná, téměř bezúdržbová a bezporuchová, s okamžitou odezvou a velmi jednoduchým ovládním. Částečnou nevýhodou je, že výstup z této metody není absolutní koncentrace, což u některých typů použití ani není potřeba (např. čidla opotřebení nebo protržení filtrů) [56].



Obrázek 6. Schéma triboelektrického zařízení na měření částic [57]

6 Použité zařízení a palivo

Kvůli situaci, která panovala v roce 2020, bylo téma práce lehce upraveno, aby se měření dalo realizovat v domácích podmínkách. Experiment probíhal v méně využívané místnosti rodinného domu, ve které se nacházela krbová kamna. Při měření bylo využito měřicího zařízení zapůjčeného z Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

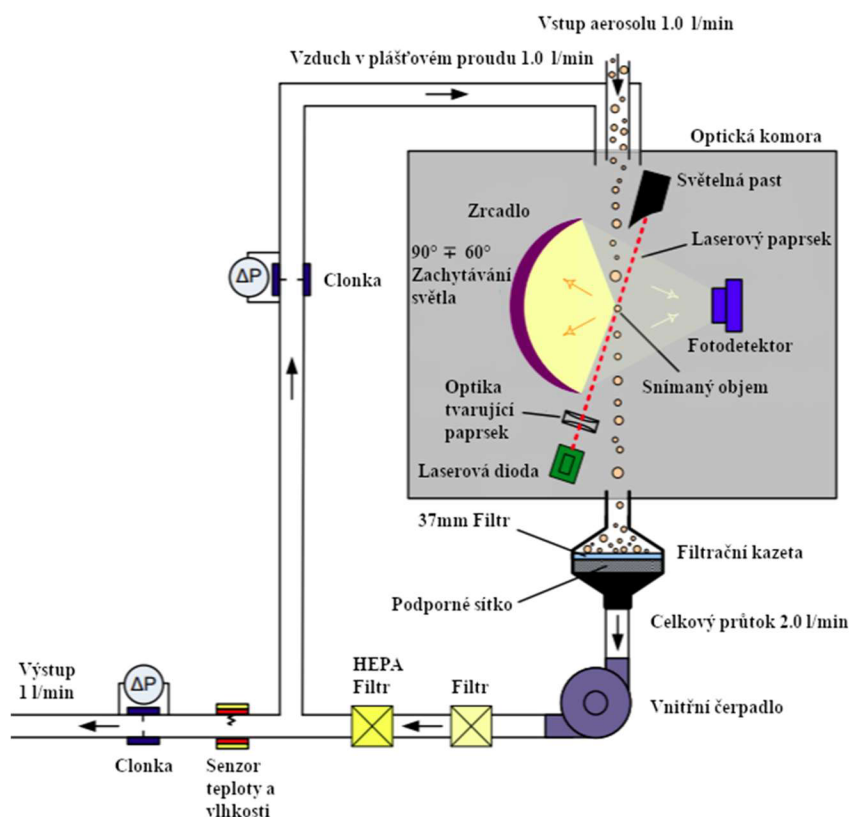
6.1 Měřicí zařízení TSI OPS Model 3330

Při měření byl použit optický spektrometr na měření počtu a velikosti částic Model 3330 (OPS). Pracuje na principu počítání částic optickou metodou, konkrétně využívá rozptylu světla.

Zařízení nasává aerosol z prostředí objemovým průtokem 1 litr za minutu. Tento proud je obklopen plášťovým proudem a spolu s ním zaváděn do optické komory. Plášťový proud, který má také objemový průtok roven 1 litru za minutu, je přiváděn z čerpadla a interně cirkuluje v zařízení, slouží ke stabilizaci částic ve vstupním proudu aerosolu a zabraňuje kontaminaci optiky. Laser z laserové diody prochází optikou, která jej tvaruje na tenký paprsek s maximální možnou intenzitou [58]. Při kontaktu laserového paprsku a proudu částic dochází k rozptylu světla na povrchu částic. Rozptýlené světlo, dopadá na eliptické zrcadlo, které jej odráží do fotodetektoru. Laser dále pokračuje do světelné pasti. Proud z optické komory vstupuje do filtrační kazety, kde jsou částice zachyceny na gravimetrickém filtru. Filtr je vyjímatelný, což umožňuje poslat měřené částice na chemickou analýzu. Poté následuje vnitřní čerpadlo, které zajišťuje průtok aerosolu zařízením. Po čerpadlu je proud přiváděn do filtru na hrubší částice a HEPA filtru, což je vysoce efektivní filtr vzduchových částic (z anglického „*High Efficiency Particulate Air*“). Po průchodu filtry je z aerosolu odstraněna drtivá většina částic, proud, který je téměř čistý plyn, se rozděluje na plášťový a výstupní. Plášťový se vrací zpět ke vstupu, kde je smíchán se vstupním aerosolem, a výstupní se vypouští přes senzor teploty a vlhkosti přes clonku do prostředí [58]. Celé schéma je zobrazeno na obrázku 7.

Regulace průtoku je zajištěna měřením poklesu tlaku na dvou clonkách (v plášťovém a výstupním proudu). Velikost vstupujícího proudu je nastavitelná, velikost plášťového proudu ne [58].

Výstupem z měření přístrojem TSI OPS Model 3330 je soubor obsahující počty částic v jednotlivých velikostních třídách naměřené za určitý časový interval. Délka intervalů, ve kterých se budou částice počítat, lze nastavit.



Obrázek 7. Schéma měřicího zařízení TSI OPS Model 3330 [58]

6.2 Krbová kamna PRINC

Zařízení je určeno k lokálnímu vytápění obytných místností, chat a chalup. Jedná se o svařenec ze dvou částí. Vnitřní část tvoří krbová vložka, která slouží jako samostatné topidlo. Ta se dále dělí na samotnou spalovací komoru vyloženou šamotovými tvarovkami, rošt a dvířka na přikládání s žáruvzdorným sklem. Ve dvířkách se také nachází regulační otvory pro přívod sekundárního a terciálního vzduchu. Spaliny z ohniště jsou přes difuzor odváděny do komína. Pod roštem se nachází zasouvací popelník, který kromě shromažďování popela slouží také k regulaci primárního vzduchu. Vnější část tvoří opláštění krbové vložky. Díky průduchům ve spodní části a hornímu víku pak při topení vzniká ve vnějším plášti komínový efekt, který napomáhá cirkulaci ohřivaného vzduchu [59].

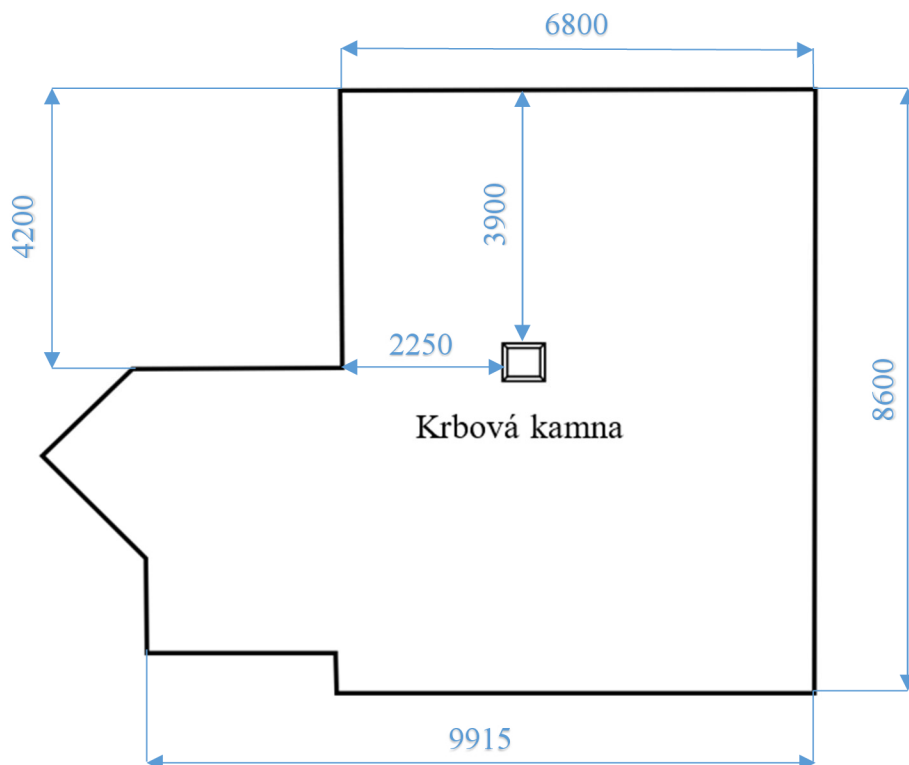
Tabulka 2. Technické údaje krbových kamen PRINC udávané výrobcem [59]

Tepelný výkon	14,3 kW
Účinnost	76,1 %
Hmotnostní průtok spalin	13,7 g·s ⁻¹
Průměrná teplota spalin	280 °C
Průměrná spotřeba paliva	4,2 kg·hod ⁻¹

6.3 Měřicí místnost

Místnost s krbovými kamny, kde byl prováděn experiment, se nachází v prvním patře obytného domu. Nosné zdi jsou postaveny z ručně dělaných škvárobetonových tvárnic a příčky oddělující místnosti spolu s obložením stropu jsou ze sádkokartonu. V místnosti jsou instalována tři plastová svíslá okna, tři dřevěná střešní okna a není zde žádné zařízení pro nucenou výměnu nebo

čištění vzduchu. Celková plocha místnosti je 75 m². Náčrt půdorysu místnosti je zobrazen na obrázku 8.



Obrázek 8. Půdorys měřicí místnosti

6.4 Palivo

Jako palivo pro hlavní část měření bylo použito dřevo smrku ztepilého (*Picea abies*) z lesa napadeného kůrovcem. Dřevo bylo vytěženo začátkem roku 2018 v oblasti Tišnovska. Po těžbě bylo nařezáno na metrové kuláče a následně naštípáno. Naštípané dřevo bylo uloženo v nezastřešeném rázu na otevřeném prostranství, kde vysychalo. Na konci září 2020 bylo nařezáno na polena o délce cca 40 cm a uloženo do větraného sklepa. Takto zpracované dřevo by mělo mít vlhkost kolem 20 až 25 %. Palivo použité při měření neobsahovalo téměř žádnou kůru, což byl následek napadení stromu kůrovcem. Výhřevnost paliva se odhadem pohyboval okolo 13,5 MJ·kg⁻¹.

Pro porovnání bylo provedeno i jedno měření, kde bylo topeno dřevem z dubu zimního (*Quercus petraea*), které také pocházelo z lesa v oblasti Tišnovska. Dřevo bylo více jak pět let naskládáno v rázu bez zastřešení. Jednalo se o přibližně 30centimetrová polena, na kterých se místy objevovaly houby a plísně. Toto dřevo bylo kvůli počasí před topením navlhle a rozhodně nemělo ideální vlastnosti pro spalování. Výhřevnost tohoto paliva se odhadem pohybovala kolem 9 MJ·kg⁻¹.

7 Experimentální část

V domácích podmínkách bylo s přístrojem pro účely bakalářské práce provedeno dohromady deset měření. Hlavní část měření tvořilo monitorování koncentrace u krbových kamen při topení vyschlým smrkovým dřevem (režim 1–4). Koncentrace částic byla měřena ve dvou různých polohách a jelikož k dispozici bylo pouze jedno měřicí zařízení, bylo nutno měření jednotlivých režimů přikládání vždy provést dvakrát. Dále byly pro porovnání měřeny průběhy koncentrací při topení mokřím dřevem (režim 5), ale pouze v jedné oblasti, a průběhy koncentrací v místnosti, kde je vykouřena cigareta.

7.1 Výpočet koncentrace

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.1, výstupem z měření je soubor obsahující počet částic v jednotlivých velikostních třídách během určitého časového intervalu. Délka intervalu byla při měření nastavena na 1 minutu a maximální počet těchto intervalů byl nastaven na 1 000. Z počtu částic, délky měření a objemu nasátého vzduchu lze vypočítat početní koncentraci. Avšak v souvislosti s částicemi a jejich negativním vlivem na lidské zdraví se nejvíce hovoří o hmotnostní koncentraci, a ne početní.

V kapitole 5.3 bylo uvedeno, že nevýhodou optické metody je zkreslení počtu částic. Naměřené koncentrace se musí korigovat tzv. mrtvým časem. Mrtvý čas je doba, kdy je ve snímaném objemu částice. Není možné snímat žádnou další částici, dokud částice neopustí snímaný objem. Přístroj automaticky odečítá mrtvý čas od doby měření a zaznamenává tak skutečnou dobu měření. Tato skutečná doba se pak použije v rovnici pro výpočet koncentrace [58].

Výpočet hmotnostní koncentrace z naměřených dat, včetně korekce mrtvým časem, byl proveden podle rovnice (11):

$$C_{hmot.,i} = \frac{N_i \cdot \frac{\pi}{6} \cdot D_i^3 \cdot \rho}{Q \cdot (t_s - DTC \cdot t_d)} \quad (11)$$

$C_{hmot.,i}$	hmotnostní koncentrace velikostní třídy i naměřená za jeden intervalu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
N_i	počet impulzů ve velikostní třídě i v jednom intervalu [-]
D_i	velikostní třída [m]
ρ	hustota částic, uvažováno $2,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) [60]
Q	vstupní objemový průtok měřeného aerosolu, ($1,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
t_s	délka jednoho intervalu [s^{-1}]
t_d	mrtvý čas [s^{-1}]
DTC	faktor korekce mrtvého času [-] (u všech měření 1)

Při vyšších koncentracích narůstá i délka mrtvého času, tím se zvětšuje i chyba. Výstraha vysoké koncentrace se spouští, když chyba koncentrace přesáhne 10 %. U větších částic dochází k širším impulzům. Na detektor pak dopadají nerovnoměrné impulzy, které mohou způsobit chybu až 15 % v celkové koncentraci [58].

7.2 Umístění měřicího přístroje

Koncentrace částic může být v různých částech místnosti rozdílná (např. z důvodu průvanu zpod dveří). Měřicí přístroj byl tedy umístěn na dvě místa, kde se s největší pravděpodobností bude pohybovat osoba využívající místnost.

7.2.1 Oblast 1

Nejdříve byla měřena koncentrace částic nad stolem, který je před sedací soupravou. Měřicí přístroj se tak nacházel ve výšce 60 cm nad podlahou a cca 210 cm od dvířek krbových kamen (viz obrázek 9). Toto umístění odpovídá prostoru, kde se nachází hlava, při sezení na pohovce. Naměřené údaje z této oblasti tedy odpovídají koncentraci, které je člověk vystaven po delší časový interval (několik desítek minut až jednotky hodin). Toto umístění bude dále označováno jako „oblast 1“.



Obrázek 9. Umístění měřicího zařízení v oblasti 1

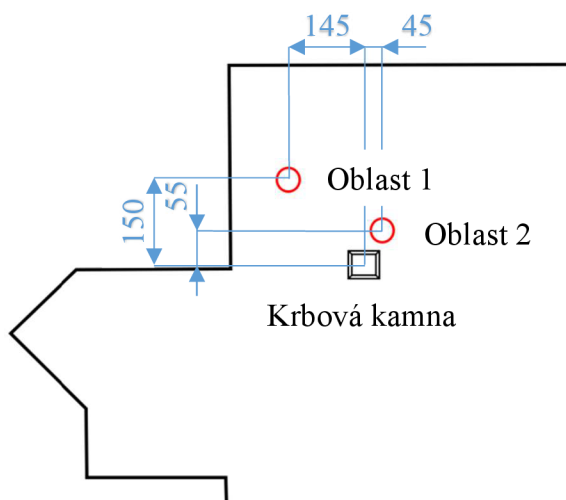
7.2.2 Oblast 2

Po změření všech režimů přikládání byl měřicí přístroj umístěn na štafle nad příkladací dvířka. Nacházel se tak 145 cm nad podlahou a cca 70 cm od příkladacích dvířek (viz obrázek 10). V této oblasti měla být měřena koncentrace částic, se kterou se dostane do kontaktu člověk, který přikládá. Kvůli obavám z poškození přístroje teplem bylo zařízení umístěno výše nad dvířka. V této pozici, dále označované jako „oblast 2“, byly opět měřeny všechny režimy přikládání.



Obrázek 10. Umístění měřicího zařízení v oblasti 2

Obě oblasti měření jsou vyznačena také v náčrtu půdorysu místnosti na obrázku 11.



Obrázek 11. Půdorys měřicí místnosti s vyznačenými oblastmi měření

Je důležité si uvědomit, že měření počtu nebo hmotnostní koncentrace částic u procesu, jako je spalování, bude mít vždy jiné výstupní hodnoty. Při stejných počátečních podmínkách budou výstupem vždy jiné výsledky a při měření v domácích podmínkách jsou rozdíly mezi výsledky ještě větší. Nelze totiž vždy zajistit např. stejný časový interval, po který budou otevřeny příkladací dvířka, totožná velikost příkládaného polena nebo úprava ohniště vždy stejným způsobem.

I při snaze o zachování shodných počátečních podmínek a příkládání ve stejný čas byly počty částic v místnosti při jednotlivých měřeních různé.

7.3 Režimy topení

Koncentrace byla měřena pro několik režimů topení, tak aby byla zjištěna změna koncentrace částic v místnosti při nejběžnějších způsobech používání krbových kamen. Sledovány byly hlavně změny koncentrace při přikládání a úpravě ohniště. Při těchto činnostech jsou dvířka nebo regulační otvory otevřeny a do interiéru se dostává mnohem více částic. Všechny úkony během měření jsou vyznačeny v průbězích koncentrací písmeny „Z“ pro zážeh, „P“ pro přiložení a „U“ pro úpravu (případně „U+P“ pro úpravu a následné přiložení).

Před každým měřením byl ze spalovací komory vymeten popel. Při tomto úkonu nebyl vždy měřicí přístroj zapnut a nebyla tak zaznamenána změna koncentrace. Po vyčištění ohniště následovala příprava na podpal, tedy umístění papíru, třísek a menších polen do ohniště. Když bylo vše připraveno, byl proveden zážeh.

Topivo bylo do krbových kamen přikládáno ve dvou fázích hoření. Buď na hořící tuhý podíl (žhnoucí uhlíky) bez plamene nebo na palivo, ze kterého se ještě uvolňovala prchavá hořlavina a hořelo dlouhým plamenem. Obě fáze jsou znázorněny na obrázcích 12 a 13.



Obrázek 12. Hořící tuhý podíl



Obrázek 13. Vysoký plamen hořící prchavé hořlaviny

Postup při přikládání se lehce lišil podle režimu topení. V režimech s otevřeným popelníkem se před přiložením popelník zavřel a pomalu se otevřela dvířka, byla přiložena 2–3 polena a po zavření dvířek byl popelník opět otevřen. U režimu se zavřeným popelníkem se s ním během přikládání nijak nemanipulovalo.

Úpravy ohniště probíhaly buď při přikládání, kdy se před vložením nového paliva upravilo palivo na roštu pohrabáčem, nebo bez otevření dvířek pouze regulačními otvory, do kterých lze zasunout železnou tyč a s ní pak palivo na roštu upravit.

7.3.1 Režim 1

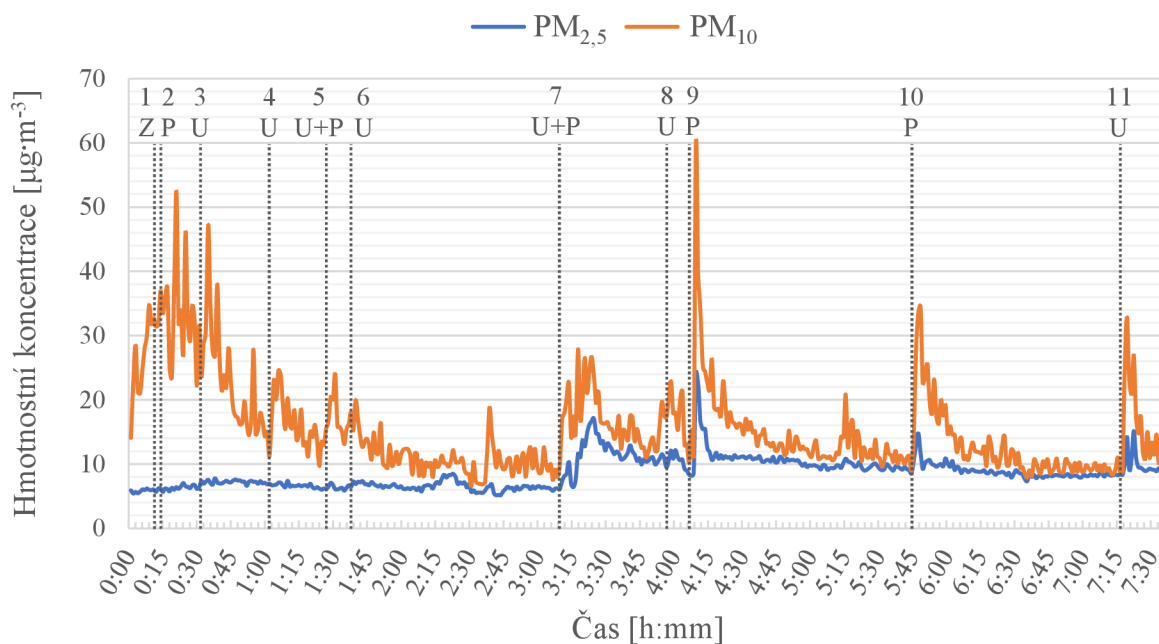
V prvním režimu byla krbová kamna provozována na plný výkon, tedy popelník byl povytažený přibližně o 1 cm a pod rošt proudil primární vzduch s přebytkem. Palivo bylo přikládáno na žhnoucí uhlíky bez plamene.

Průběhy hmotnostních koncentrací v obou oblastech jsou znázorněny na obrázcích 14 a 15. U obou grafů jsou průběhy velice podobné. Hmotnostní koncentrace PM_{10} na začátku roste a po pár desítkách minut klesá na ustálenou hodnotu. Nárůst je zapříčiněn zvýšeným pohybem kolem měřicího zařízení, při kterém je vířen prach a částčky popele. Měřicí zařízení v oblasti 2 bylo spuštěno o pár minut dřív a byl tak zaznamenán nárůst koncentrace hrubé frakce při vymetání popela ze spalovací komory.

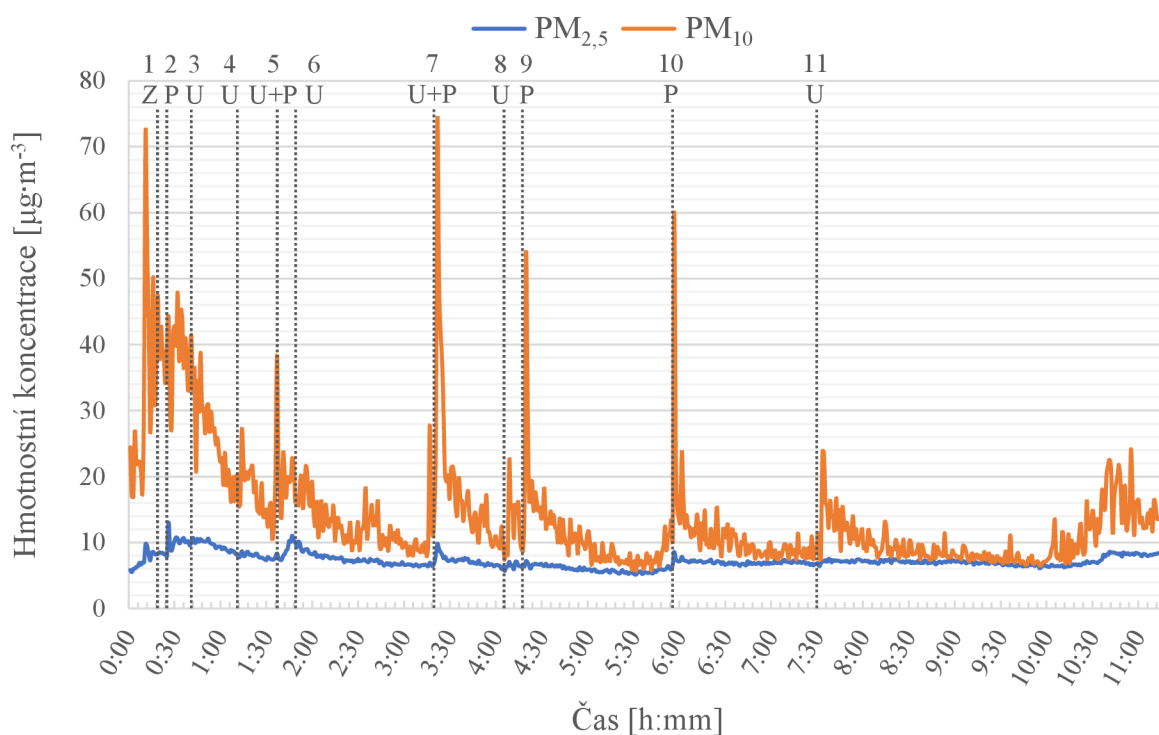
Průběhy jsou pak několikrát přerušeny prudkými nárůsty koncentrací při úpravách ohniště nebo přikládání. Po těchto nárůstech následuje podobně strmý pokles. Hmotnostní koncentrace $PM_{2,5}$ je mnohem stabilnější, přesto lze v několika okamžicích pozorovat její zvýšení a následný pokles. Na konci měření v oblasti 2 lze pozorovat větší výkyvy hmotnostní koncentrace hlavně hrubé frakce. Tyto výkyvy nebyly způsobeny krbovými kamny, jelikož se objevují 4 hodiny po posledním přiložení (10), takže ve spalovací komoře je již všechno palivo spáleno a topeniště chladne. Příčina těchto výkyvů není přesně jasná, ale ve světě mikročástic stačí pouze malý závan vzduchu, který unese pár smítek prachu, a i to stačí na změnu hmotnostní koncentrace v nějakém menším objemu v místnosti. Potenciálních příčin tak může být mnoho (závan zpod dveří, nepatrný proud vzduchu způsobený chladnutím místnosti, sedimentace částic vynesných teplým vzduchem do větší výšky atd.). Ze stejných důvodů mohl být způsoben i poměrně velký výkyv mezi úpravou (6) a úpravou a přiložením (7) v oblasti 1.

Nejvyšší koncentrace v oblasti 1 byla pro PM_{10} $59,9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a $PM_{2,5}$ $24,2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ naměřeny při přikládání (9). Důvodem takto vysokých koncentrací byla pravděpodobně delší doba, po kterou byla otevřena přikládací dvířka. V oblasti 2 byla nejvyšší koncentrace PM_{10} $74,0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ při úpravě a přiložení (7), opět z důvodu delší doby otevřených dvířek. Nejvyšší koncentrace $PM_{2,5}$ v oblasti 2 byla naměřena $13,1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ při přiložení (2). Příčina tohoto maxima je stejná jako u předchozích maxim.

Z obrázku 14 lze určit, že ustálená hodnota hmotnostní koncentrace v oblasti 1 pro PM_{10} byla přibližně $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro $PM_{2,5}$ cca $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ale po úpravě a přiložení (7) koncentrace narostla a před poslední úpravou (11) se ustálila kolem $8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Z obrázku 15 je patrné, že v oblasti 2 ustálená hodnota pro hrubou frakci byla cca $8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro jemnou frakci přibližně $7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. V oblasti 2 byly průběhy stabilnější, lépe je to vidět u jemnější frakce. Byl to nejspíše důsledek konstantního proudění horkého vzduchu podél kamen a kolem měřicího přístroje. Částice se tak neshromažďovaly kolem zařízení, ale pouze prolétly.



Obrázek 14. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 1 v oblasti 1



Obrázek 15. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 1 v oblasti 2

7.3.2 Režim 2

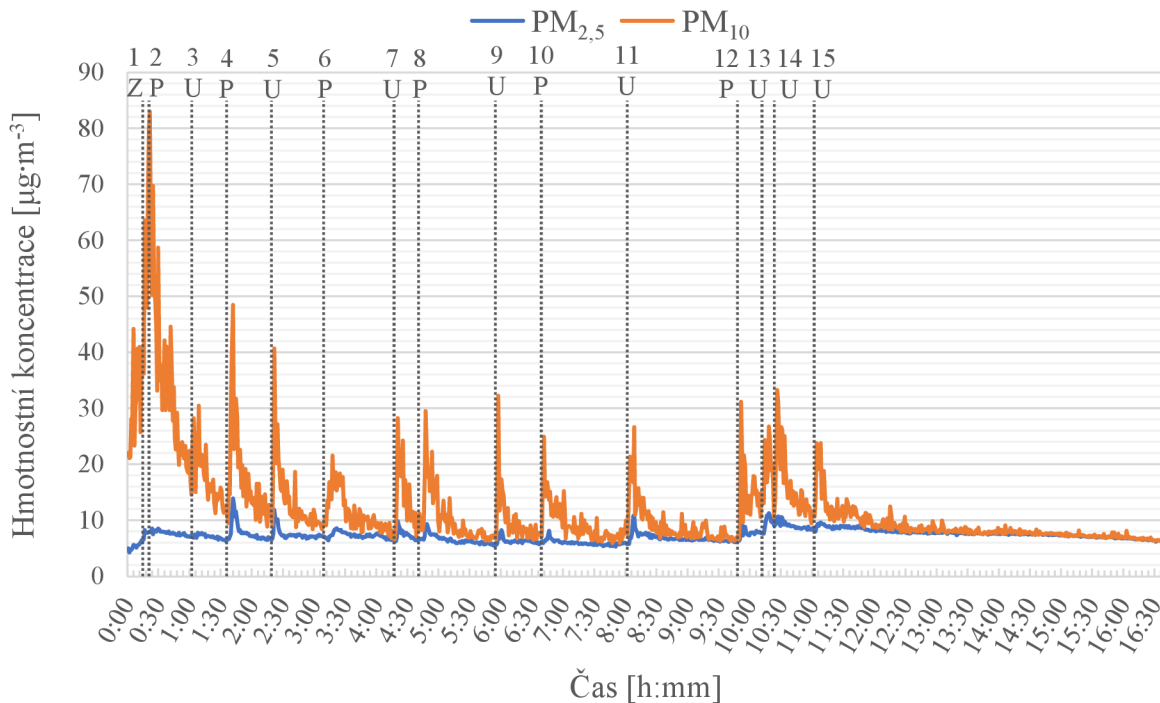
Ve druhém režimu nebyla krbová kamna provozována na plný výkon. Popelník byl dovřen a pod rošt se tak dostával primární vzduch pouze netěsnostmi. Palivo bylo přikládáno na vysoký plamen.

Průběhy hmotnostních koncentrací jsou zobrazeny na obrázcích 16 a 17. Oba grafy mají podobný charakter jako grafy v režimu 1, ale hmotnostní koncentrace PM_{10} v oblasti 2 extrémně vzrostla před začátkem topení a pro lepší čitelnost dat bylo zvoleno na ose hmotnostní koncentrace logaritmické měřítko.

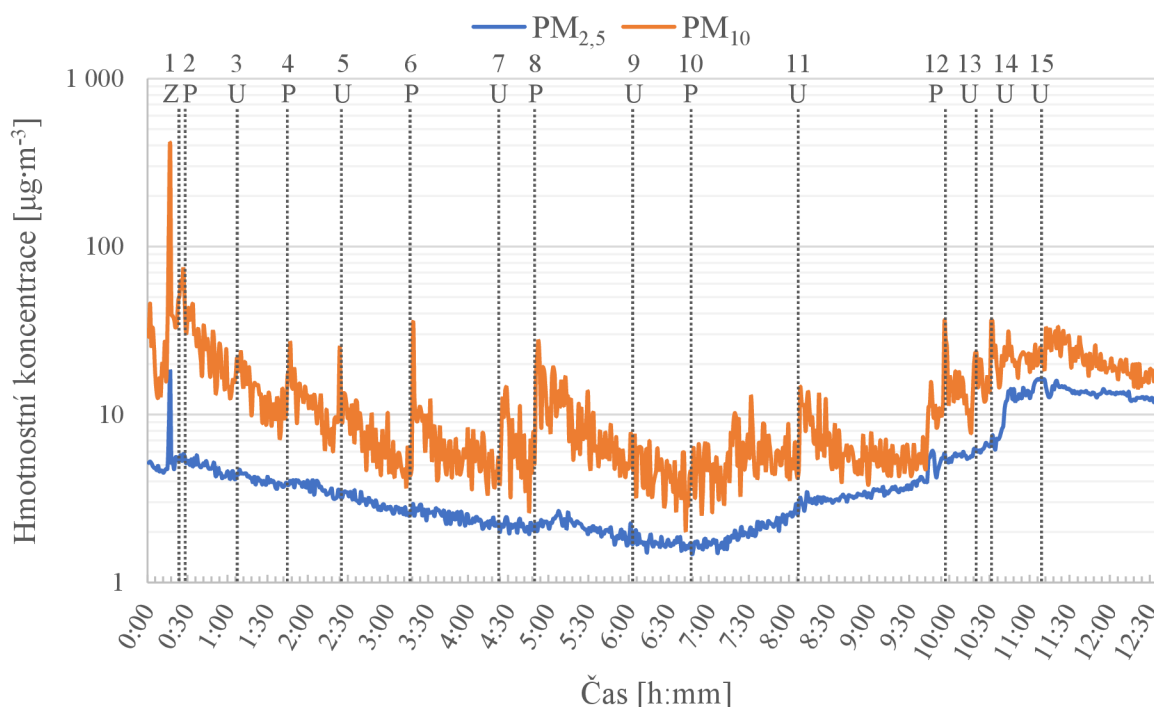
V oblasti 1 byla nejvyšší koncentrace PM_{10} naměřena po první úpravě (2), kdy koncentrace dosáhla $82,9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Tento nárůst byl nejspíše způsoben chytáním paliva na rošt a vířením popela. Ve stejnou dobu byl zaznamenán nárůst i jemnější frakce, ta ale svého maxima dosáhla až po přiložení (3), konkrétně $14,0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. V oblasti 2 dosáhla hrubší i jemnější frakce maxima ve stejný moment, ještě před zážehem. Frakce PM_{10} dosáhla maxima $409,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a frakce $PM_{2,5}$ $18,4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Tento prudký nárůst byl opět způsoben přípravou ohniště a vířením popela.

Zatímco v oblasti 1 se obě frakce držely na svých ustálených hodnotách a při úpravách nebo přiloženích prudce vzrůstaly, v oblasti 2 koncentrace jemné frakce postupně klesala až pod $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a přibližně po 15 minutách po předposledním přiložení (10) začala pozvolna narůstat. Příčina pozvolného poklesu je nejspíše sedimentace rozvířených částic popela po čištění, ovšem příčina následného mírného nárůstu není přesně jasná. Tento nárůst mohl být způsoben změnou proudění vzduchu z důvodu kumulace tepla u stropu a postupného prohřívání vzduchu směrem k podlaze, externím činitelem nebo neznámým procesem v topeništi. Pro přesné stanovení příčiny tohoto nárůstu by bylo nutné provést další výzkum.

Ustálené koncentrace se nedají přesně určit. Na obrázku 16 lze vidět, že koncentrace PM_{10} i $PM_{2,5}$ i po několika hodinách stále klesá. Během topení se hrubá frakce ustalovala kolem $7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a jemná kolem $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. U průběhů na obrázku 17 je určování ustálené koncentrace obtížnější. Stejně lze určit ustálenou koncentraci pro hrubou frakci na cca $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro jemnou frakci ji nelze určit vůbec.



Obrázek 16. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 2 v oblasti 1



Obrázek 17. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 2 v oblasti 2

7.3.3 Režim 3

Stejně jako u režimu 2 bylo i v tomto režimu přikládáno na vysoký plamen. U 3. režimu krbová kamna byla provozována na plný výkon, stejně jako u režimu 1. Tedy popelník byl povytažen cca o 1 cm a pod rošt proudil primární vzduch s přebytkem. Při topení s otevřeným popelníkem je palivo spalováno mnohem rychleji a prchavá hořlavina se uvolní a shoří mnohem dříve. Proto pro zajištění přikládání na vysoký plamen bylo přikládáno v kratších časových intervalech.

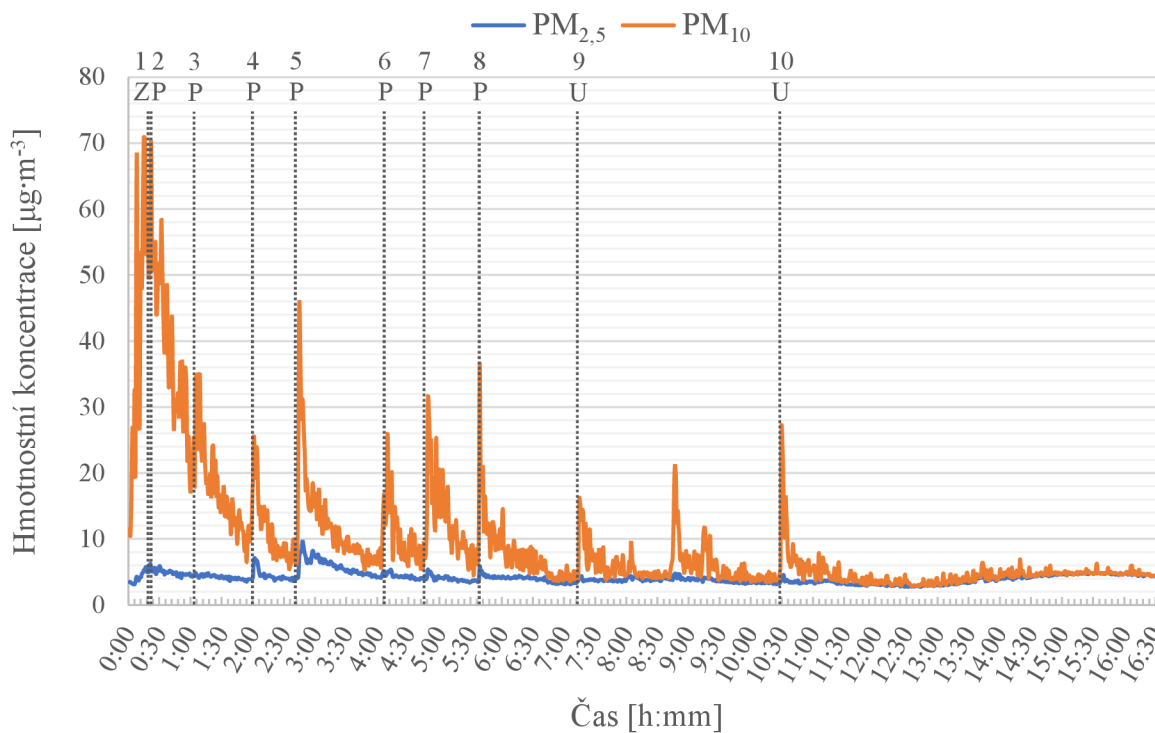
Na obrázcích 18 a 19 je vidět, že průběhy hmotnostních koncentrací mají podobný charakter jako u předchozích režimů topení.

Pro hrubou frakci byla nejvyšší koncentrace v oblasti 1 naměřena těsně před zážehem, a to $70,9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, nejspíše z důvodu víření popela při přípravě ohniště před topením. Pro jemnou frakci bylo maximum v této oblasti $9,7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, které bylo naměřeno po přiložení (5), pravděpodobně z důvodu delšího otevření příkladacích dvířek. V oblasti 2 byla maxima pro obě frakce ve stejnou chvíli, a to při čištění ohniště, pro PM_{10} $680,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro $\text{PM}_{2,5}$ $37,8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, což jsou zároveň i absolutní maxima ze všech měření.

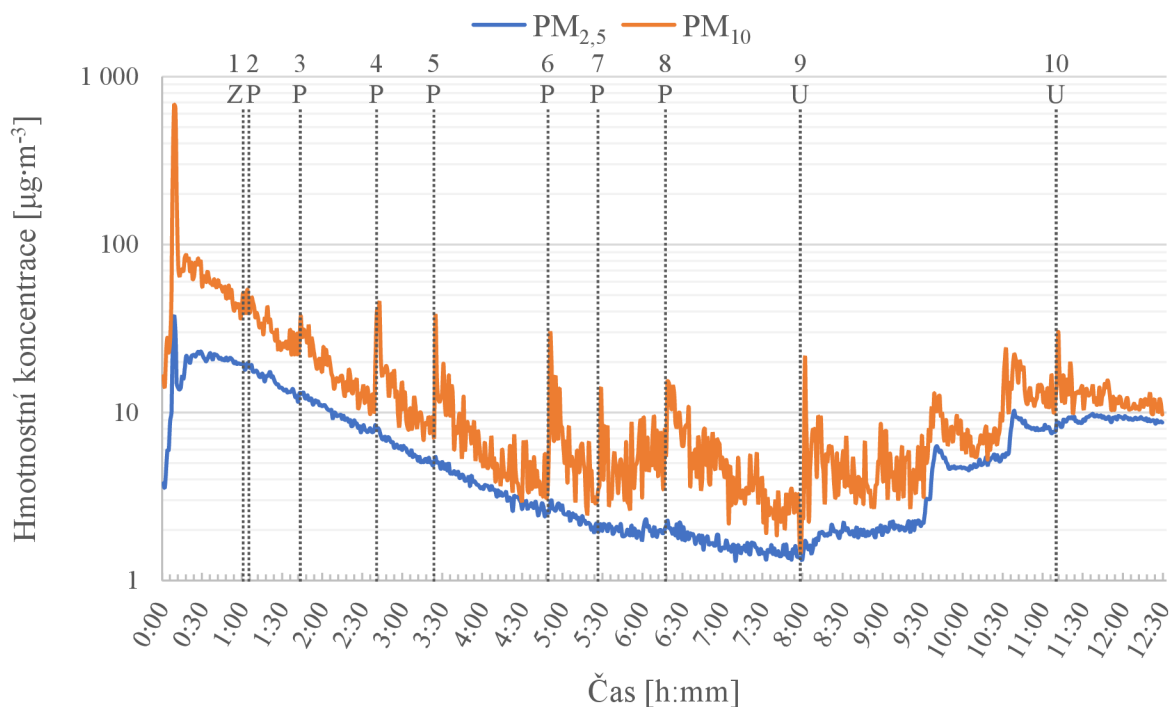
Průběhy v oblasti 1 byly opět podobné jako v předchozích režimech, ovšem mezi posledními úpravami (9 a 10) došlo k prudšímu nárůstu hrubé frakce. Stejně jako v režimu 1 v oblasti 1 není příčina tohoto nárůstu přesně jasná, mohl jí být závan vzduchu z pode dveří, který rozvířil prach nebo průchod některého obyvatele domu, který porušil zákaz chodit do místnosti, když se v ní měří. Na obrázku 18 lze pozorovat, jak oba průběhy v oblasti 1 mírně narůstají cca 8 hodin od poslední přiložení (8) a 3 hodiny po poslední úpravě (10). Tento mírný nárůst není způsoben krbovými kamny, protože ta už jsou téměř vychladlá ale spíš přirozenou změnou koncentrace v místnosti, stejně jakou u režimu 1 v oblasti 2. Průběhy v oblasti 2 jsou velmi podobné jako u režimu 2 v oblasti 2, tedy průběhy obou koncentrací mají klesavý charakter a v určitý moment začnou narůstat. Opět je to více zřetelné na průběhu hmotnostní koncentrace $\text{PM}_{2,5}$, která přestává klesat při koncentraci $1,3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, těsně před předposlední úpravou (9), poté mírně narůstá a dokud neprijdou dva prudké nárůsty, první přibližně 1 hodinu a 35 minut

a druhý 2 hodiny a 30 minut po úpravě (9). Stejně jako u režimu 2 nelze přesně určit příčiny nárůstu po předposlední úpravě (9).

Ustálená koncentrace se v oblasti 1 pohybuje pro hrubou frakci kolem $4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro jemnou frakci kolem $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. V oblasti 2 je ustálená koncentrace pro PM_{10} přibližně $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro $\text{PM}_{2,5}$ se nedá přesněji určit.



Obrázek 18. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 3 v oblasti 1



Obrázek 19. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 3 v oblasti 2

7.3.4 Režim 4

Při tomto režimu topení bylo přikládáno s oknem otevřeným na ventilaci. Otevření okna by mělo podpořit tah komína a snížit množství spalin s částicemi, které vniknou do místnosti. Topeniště nebylo provozováno na plný výkon, popelník byl zavřený a palivo bylo přikládáno na žhnoucí uhlíky bez plamene.

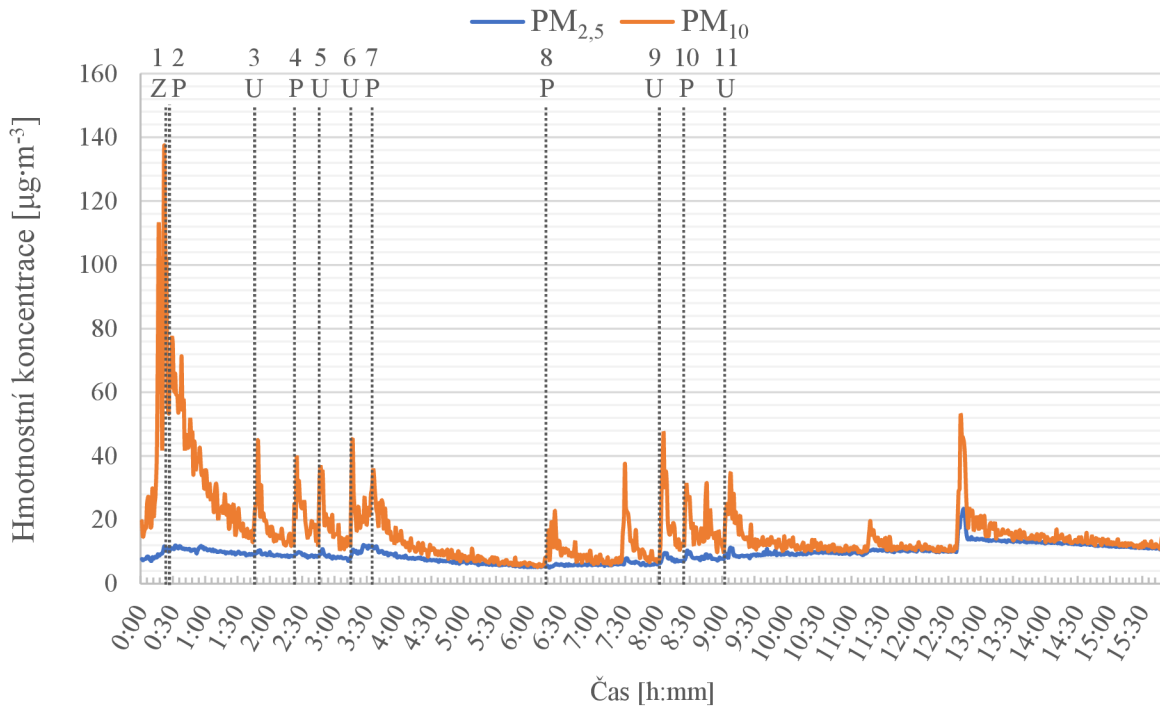
I u režimu 4 jsou průběhy hmotnostních koncentrací, které jsou znázorněny na obrázcích 20 a 21, podobné jako průběhy u předchozích režimů.

V oblasti 1 bylo pro hrubou frakci naměřeno maximum před zážehem, konkrétně $137,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, opět z důvodů chystání dřeva na zápal, stejně jako u předchozích režimů. Maximum pro jemnou frakci bylo $23,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a bylo zaznamenáno 3 hodiny po poslední úpravě (11), kdy by všechno palivo mělo být vyhořelé. Z jakého důvodu tedy nastal tento nárůst, není jasné. V oblasti 2 byla naměřena maximální hodnota PM_{10} $675,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a $\text{PM}_{2,5}$ $22,3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ před zážehem, kdy probíhala příprava paliva.

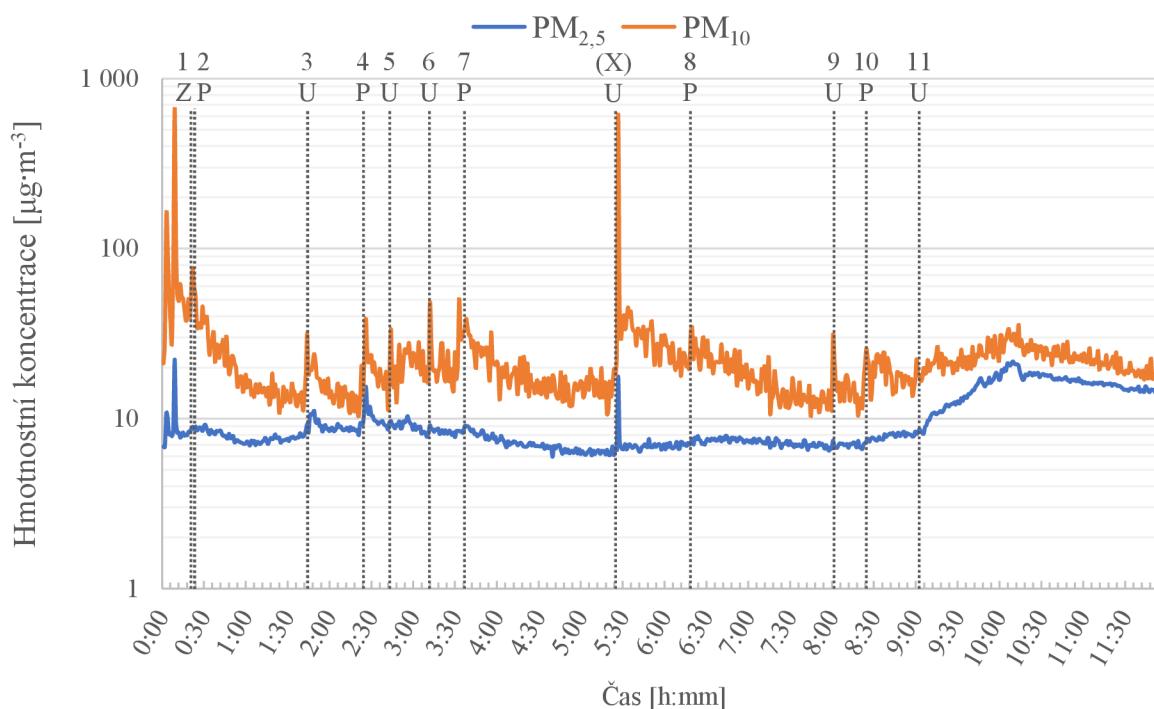
Průběhy na obrázku 20 mají podobný charakter jako ostatní průběhy v oblasti 1, objevují se tu však jeden menší a dva větší nárůsty spíše hrubé frakce bez zjevné příčiny, kdy jeden z větších nárůstů dokonce převyšuje nárůsty spojené s úpravou či přikládáním. Příčina těchto nárůstů, stejně jako u režimu 1 a 3, nelze přesně určit. U jemné frakce lze opět pozorovat mírný pokles, dokud nedosáhla svého minima (v tomto případě $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) a následný mírný nárůst, stejně jako tomu bylo v 2. oblasti u 2. a 3. režimu topení. Obrázek 21 má také podobný charakter jako ostatní průběhy v oblasti 2, je zde ovšem velice prudký nárůst obou frakcí při úpravě (X). Tato úprava nebyla provedena při měření v oblasti 1, proto není označena číselně. Tento velký nárůst byl způsoben nejspíše dlouhým nebo prudkým otevřením příkladacích dvířek. Lze pozorovat, že i po poslední úpravě (11) obě koncentrace stále mírně narůstají, zřetelněji je to vidět u jemné frakce, a poté začínají opět klesat. Nárůst $\text{PM}_{2,5}$ na konci topení je pozorován i u předchozích průběhů. Nárůst hrubé frakce je nejspíše spojen pouze s nárůstem frakce jemné (hmotnostní koncentrace částic ve frakci $\text{PM}_{2,5}$ je zahrnuta i v hmotnostní koncentraci PM_{10}). Obecně je ale průběh jemné frakce mnohem stabilnější než u předchozích režimů.

Nárůsty koncentrací při manipulaci s topeništěm při otevřeném oknu se nijak viditelně nesnížily v porovnání s jinými režimy topení. V oblasti 2 lze pozorovat stabilnější průběhy koncentrací (hlavně $PM_{2,5}$) oproti ostatním režimům.

Hmotnostní koncentrace PM_{10} se v oblasti 1 ustalovala kolem $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, ale po poslední úpravě (11) se ustálila přibližně kolem $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro jemnou frakci ustálená hodnota kvůli jejímu průběhu nelze určit. V oblasti 2 se ustálená koncentrace pro hrubou frakci pohybuje lehc nad $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Jemná frakce se v této oblasti pohybovala velmi stabilně (samozřejmě s několika prudkými výkyvy při manipulaci s topeništěm), do posledního přiložení (10) mezi 5 až $6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.



Obrázek 20. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 4 v oblasti 1



Obrázek 21. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 4 v oblasti 2

7.3.5 Režim 5

V posledním režimu topení bylo topeno vlhkým, málo kvalitním dřevem. Příkládáno bylo na vysoký plamen a popelník byl zavřen.

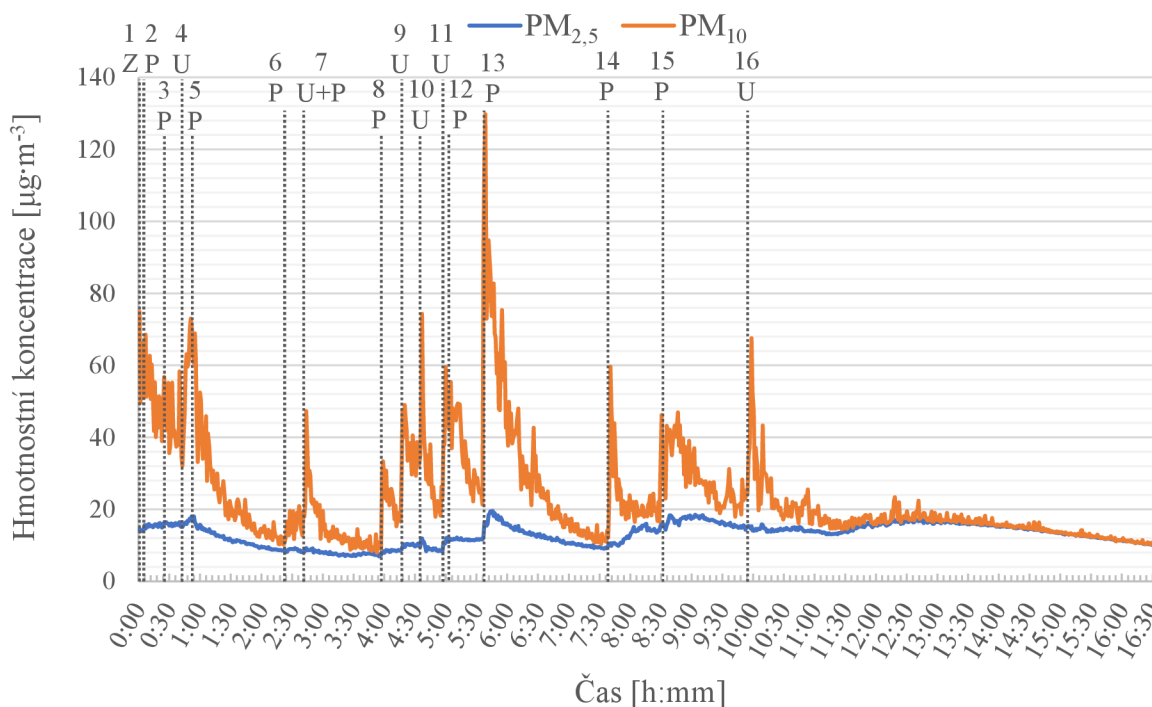
Měření probíhalo pouze v oblasti 1, jelikož palivo bylo natolik různorodé, že při opakovaní měření by nebylo možné zachovat stejné nebo podobné vlastnosti paliva jako při původním měření.

Průběhy hmotnostních koncentrací na obrázku 22 mají opět podobný charakter jako průběhy v předchozích režimech topení.

Měření bylo spuštěno těsně před zážehem, ovšem hmotnostní koncentrace (hlavně hrubé frakce) již měla poměrně vysokou počáteční hodnotu, z důvodu víření popele a prachu při přípravě topeniště (stejně jako u předchozích režimů). Obě frakce dosáhly svých maxim až při jednom z posledních přiložení (13). Frakce PM_{10} dosáhla $129,8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a frakce $PM_{2,5}$ $19,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Obě maxima byla zapříčiněna nejspíše delší dobou otevření příkladacích dveří.

Na rozdíl od režimů, ve kterých se topilo vyschlým smrkovým dřevem, dosahují výkyvy v tomto režimu při příkládání nebo úpravách vyšších hodnot. Průběhy hrubé frakce u přechodných režimů překračovaly hodnotu $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pouze v maximech, zatímco u režimu 5 byla tato hodnota překročena hned 5krát (včetně maxima). Příčinou vyšších hodnot koncentrací při manipulaci s krbovými kamny bylo horší spalování, způsobené nekvalitním palivem. Z paliva se muselo odpařit mnohem více vody, teplota v ohništi tak byla nižší a spalování méně dokonalé. Po skončení topení, cca 1 hodinu a 30 minut po poslední úpravě (16), byl naměřen, stejně jako u předchozích režimů, mírný nárůst hmotnostních koncentrací a poté mírný pokles, kdy křivka hrubé frakce téměř splývá s křivkou jemné. Počet větších částic byl tedy velice malý a v místnosti byly převážně částice $PM_{2,5}$.

I ustálené koncentrace nabývají vyšších hodnot než při topení suchým dřevem. Během topení se hrubá frakce ustalovala kolem $11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a jemná kolem $8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Vyšší hodnoty ustálených koncentrací akorát poukazují na to, že proces spalování v topeništi byl horší než u předchozích režimů topení.



Obrázek 22. Průběh hmotnostních koncentrací při topení v režimu 5 v oblasti 1

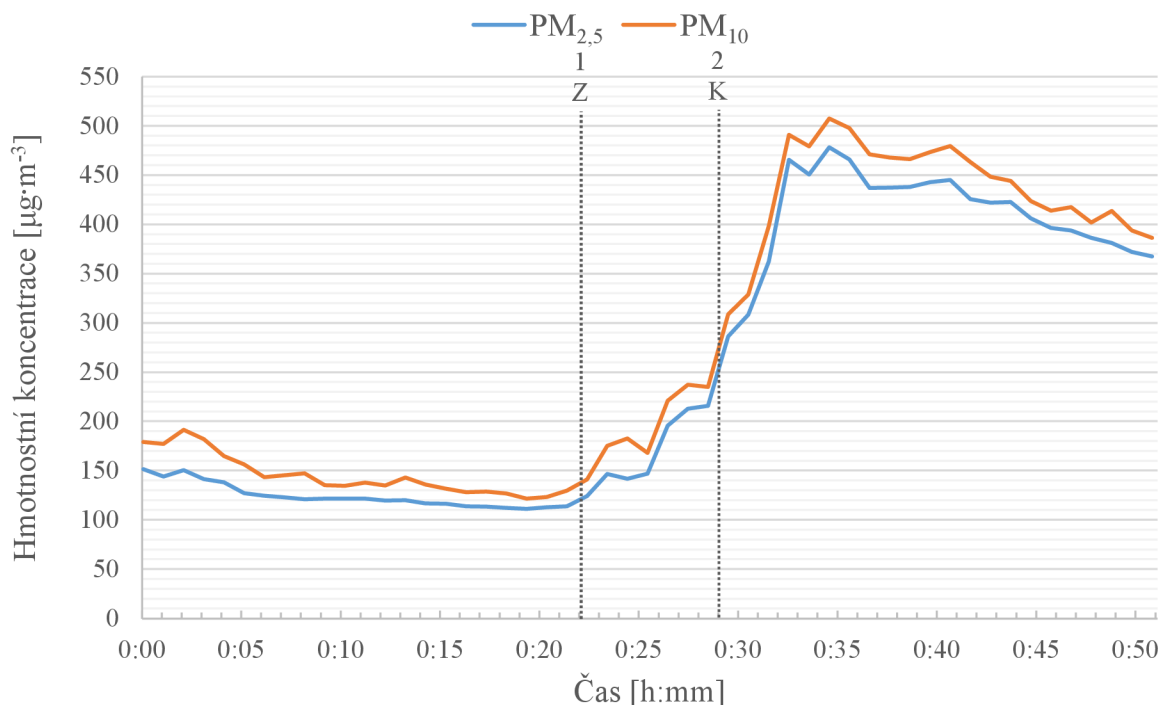
7.4 Kouř z cigarety

Pro zajímavost a porovnání bylo provedeno měření koncentrace částic v místnosti, kde byla vykouřena jedna celá cigareta. Místnost obdélníkového tvaru o rozměrech $2,5 \times 5,5$ metru je využívána jako chodba u vchodových dveří a je v ní kouřeno minimálně 4krát denně. V místnosti není žádné okno, a větrání je proto zajištěno pouze vchodovými dveřmi, které se málo používají (maximálně 2krát denně).

Vykouření cigarety trvalo 7 minut, na obrázku 23 je vyznačen zápal cigarety jako „Z“ a konec hoření cigarety jako „K“.

I ustálené koncentrace obou frakcí jsou velmi vysoké. Důvodem je nejspíše každodenní kouření v místnosti a téměř žádné větrání. Nezanedbatelný vliv bude mít i to, že v místnosti bylo kouřeno přibližně 2 hodiny před měřením. Po zapálení cigarety začala koncentrace rychle narůstat a narůstala dál i po skončení kouření, jelikož částice potřebovaly určitý čas na rozptýlení po místnosti. Po dosažení maxima, které bylo pro PM_{10} $507,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a pro $PM_{2,5}$ $478,3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ koncentrace začaly pomalu klesat.

Při topení měla hrubá frakce výrazně vyšší výkyvy a maxima, zde mají obě frakce velmi podobný průběh i maximum. Důvodem tohoto chování je, že při manipulaci s krbovými kamny se uvolňovaly i větší částice (o aerodynamickém průměru 2,5 až $10 \mu\text{m}$), které výrazně ovlivní hmotnostní koncentraci, viz následující kapitola 7.5. Zatímco při kouření se uvolňovaly hlavně menší částice (frakce $PM_{2,5}$) a téměř žádné větší částice.



Obrázek 23. Průběh hmotnostních koncentrací v místnosti se zapálenou cigaretou

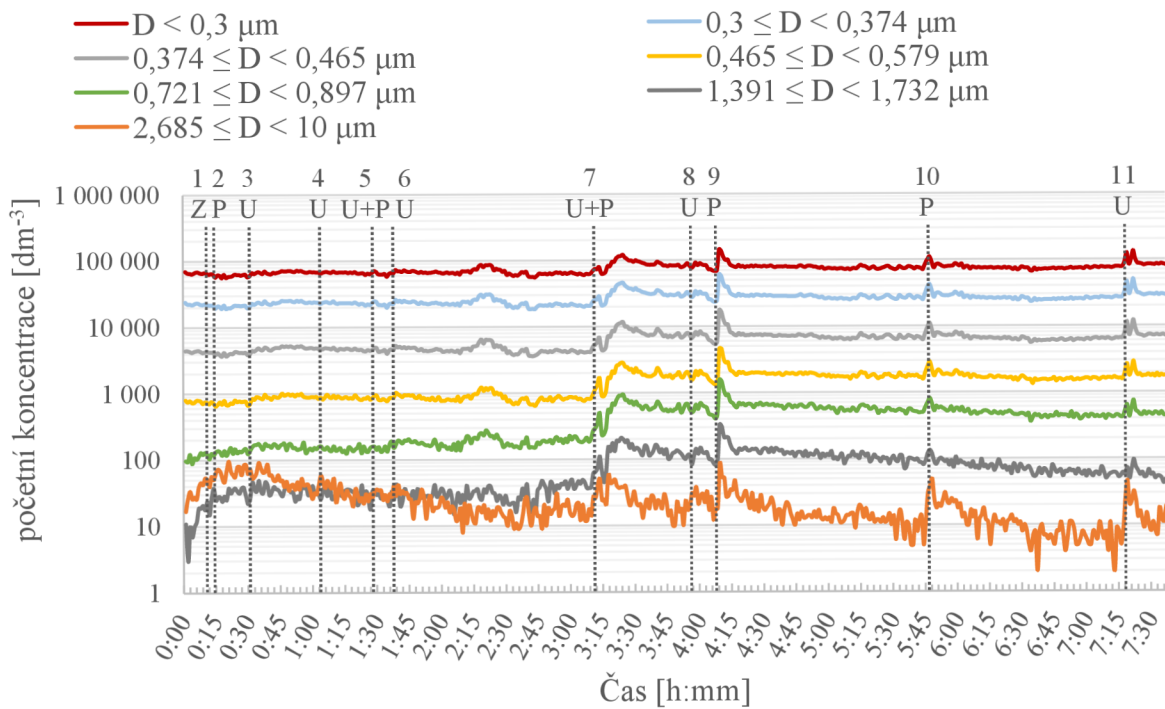
7.5 Počet částic

Navzdory tomu, že hmotnostní koncentrace u částic PM₁₀ je vyšší než PM_{2,5} a při měření režimů topení měla výrazně vyšší výkyvy než u frakce PM_{2,5}, početní koncentrace se se snižujícím se aerodynamickým průměrem řádově zvyšuje. Názorně je to vidět na obrázku 24.

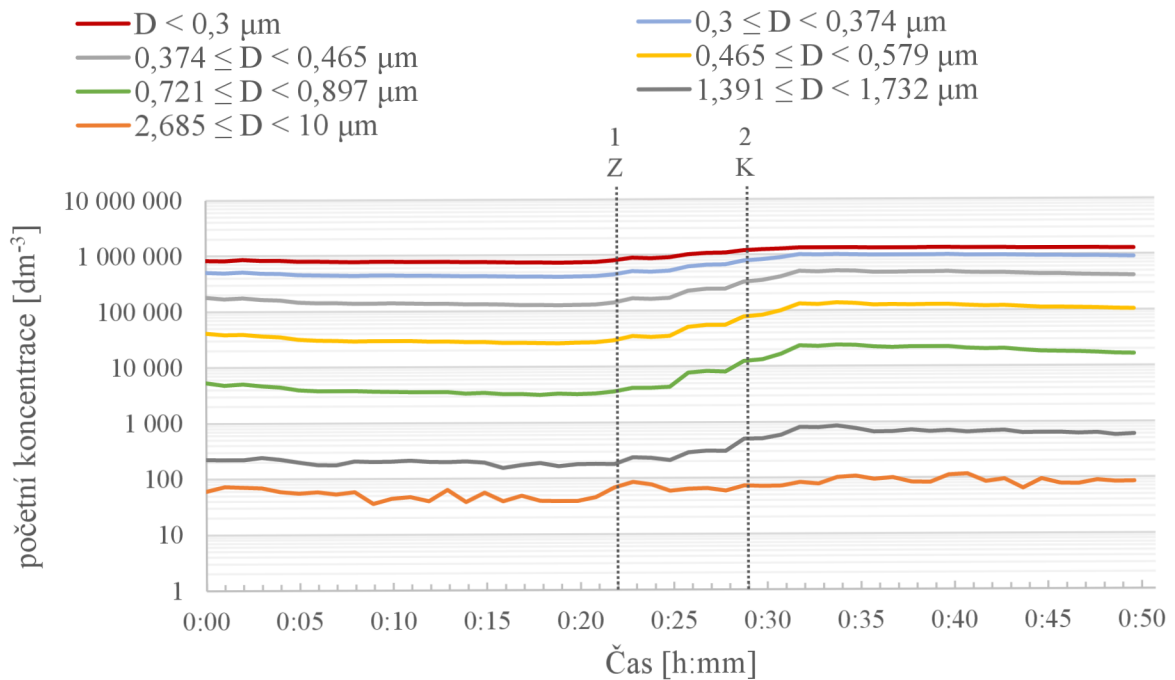
Ze zdravotního hlediska nezávisí pouze na velikosti hmotnostní koncentrace, ale také na velikosti částic, jelikož pár smítek prachu se hmotností rovná několika tisícům jemných částic. Pro organismus je mnohem větší zátěž několik tisíc malých částic s velkým měrným povrchem, které se dostanou hlouběji do organismu, než pár jednotek nebo desítek hrubých částic.

Jak již bylo zmíněno, při topení byla hmotnostní koncentrace hrubé frakce výrazně vyšší než hmotnostní koncentrace jemné frakce. Ovšem u kouření byly průběhy hmotnostních koncentrací jemné i hrubé frakce velmi podobné. Důvodem bylo, že při kouření se uvolňuje mnohem více jemných částic v poměru k hrubým částicím, než je tomu při topení v krbových kamnech. Z obrázku 24 lze vyčíst, že při kouření cigarety se koncentrace nejmenších měřených částic zvedla cca o 500 000 částic na dm³, což je v porovnání s množstvím částic v místnosti, kde se nekouří, obrovský nárůst.

Při porovnání obrázků 24 a 25 je zjevné, že v místnosti, kde se kouří a málo větrá, je početní koncentrace částic s aerodynamickým průměrem pod 0,3 µm asi 10krát větší než v místnosti, kde se nekouří.



Obrázek 24. Průběhy početních koncentrací vybraných velikostních tříd v režimu 1 v oblasti 1



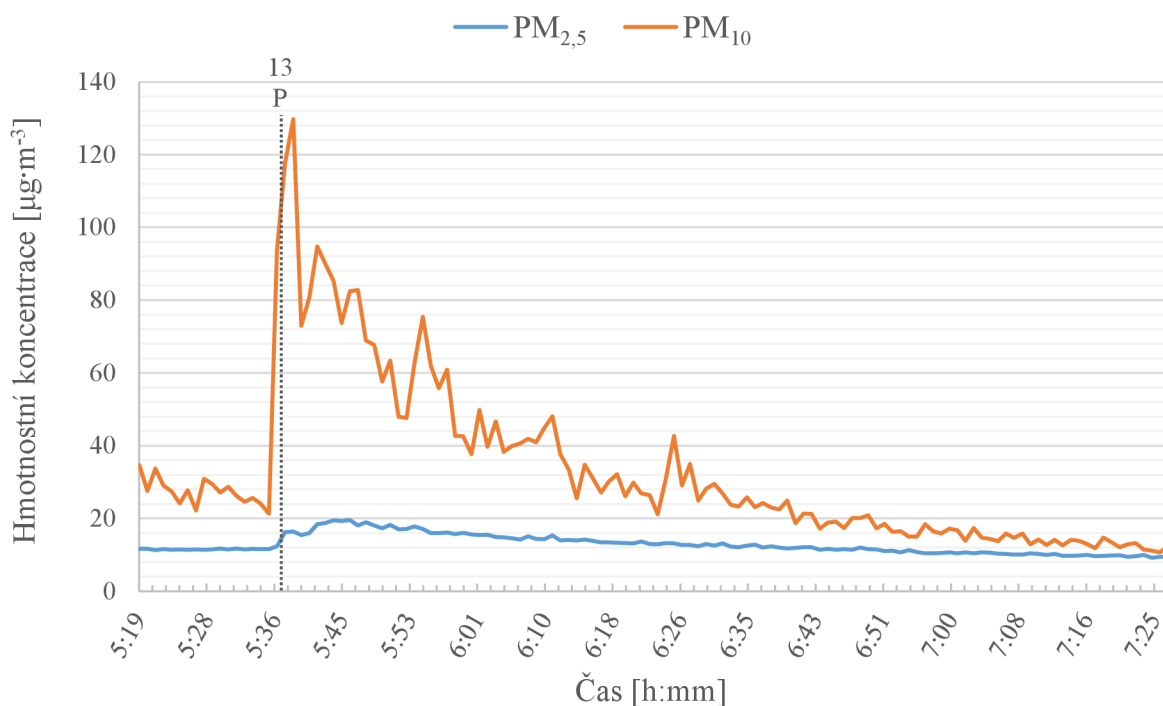
Obrázek 25. Průběhy početních koncentrací vybraných velikostních tříd při kouření

7.6 Rychlost poklesu koncentrace částic

Ve všech průbězích, které zde byly doposud uvedeny, vždy po prudkém nárůstu následoval prudký pokles, který se postupně zmírňoval. Jelikož do hrubé frakce byly započítávány i částice jemné frakce, pak doba, za kterou se oba průběhy po výkyvu vrátily na ustálené hodnoty, byla stejná. Průběhy jemné i hrubé frakce se tak ustalovaly přibližně 2 hodiny po výkyvu, viz obrázek 26.

Je potřeba zdůraznit, že výkyvy hrubé frakce byly několikanásobně větší než výkyvy jemné frakce, takže rychlost poklesu koncentrace u částic PM_{10} byla mnohem větší než u $PM_{2,5}$. Toto odpovídá tvrzení, že větší částice oproti menším částicím rychleji sedimentují.

Při měření byly zaznamenány i nárůsty, po nichž následoval takřka okamžitý pokles. Nejvýraznější z nich byl zaznamenán při topení v režimu 4 v oblasti 2 (obrázek 19), při úpravě (X). Tento prudký pokles mohl být zapříčiněn proudem vzduchu, který část částic rychle odvanul do jiné části místnosti.



Obrázek 26. Část průběhů hmotnostních koncentrací při topení v režimu 5 v oblasti 1

8 Závěr

Množství škodlivých látek v ovzduší za posledních několik let klesá. Mohou za to stále přísnější emisní limity. Některé škodliviny však stále na některých místech ČR překročí povolené imisní limity i několikrát ročně. Mezi tyto škodliviny se řadí benzo(a)pyren, přízemní ozon a frakce PM₁₀ a PM_{2,5}. Producentem velké části benzo(a)pyrenu a frakcí PM_x jsou lokální topeniště, jelikož jsou zde často spalována tuhá paliva a nedochází zde k žádnému čištění spalin. Spaliny, a s nimi i škodliviny, však nejdou jen do komína, ale také do místnosti (např. při přikládání nebo úpravě ohniště), ve které se lokální topeniště nachází. Právě množství škodlivin, konkrétně množství frakce PM₁₀ a PM_{2,5}, které se do místnosti při topení v lokálním topeništi dostane, bylo tématem této práce. Měření bylo prováděno v domácích podmínkách v místnosti s krbovými kamny. Jako hlavní palivo bylo použito vyschlé dřevo ze smrku ztepilého (*Picea albie*). Pro lepší představu bylo provedeno i měření při topení méně kvalitním dřevem z dubu zimního (*Quercus petraea*) a při kouření v místnosti.

K měření byl použit přístroj na počítání částic optickou metodou, který byl umístěn na dvou místech v místnosti (na stole před sedací soupravou – oblast 1 a u dvířek krbových kamen – oblast 2). Bylo provedeno 10 měření, při kterých byly sledovány průběhy počtu částic u 5 režimů topení a jednomu kouření cigarety. U 4 režimů topení bylo použito smrkové dřevo a měnila se obsluha topeniště. Bylo přikládáno na plamen nebo na uhlíky, s otevřeným nebo zavřeným popelníkem a s otevřeným oknem. Pro lepší znázornění výsledků byla naměřená data přepočtena na hmotnostní koncentrace a prezentována jako průběhy hrubé (PM₁₀) a jemné (PM_{2,5}) frakce.

Při všech režimech topení měly průběhy podobný charakter. Na začátku byla hmotnostní koncentrace (hlavně hrubé frakce) zvýšená z důvodu přípravy topeniště na provoz. Příprava spočívala ve vymetení popele ze spalovací komory a vložení paliva na podpal, což rozvířilo částičky popela, které mají rozměry odpovídající přibližně frakci PM₁₀. Průběhy po tomto počátečním nárůstu klesaly na ustálenou hodnotu. Přiložení a úpravy způsobily prudké nárůsty hrubé frakce a menší nárůsty jemné frakce. Tyto výkyvy vždy klesaly, ze začátku rychle a následně pomaleji, dokud neklesly na ustálenou hodnotu. Objevovaly se však i prudké výkyvy, ve chvílích, kdy se s krbovými kamny nijak nemanipulovalo a ani nikdo nebyl v měřicí místnosti. Příčiny těchto výkyvů nebyly objasněny.

Ve všech režimech topení byl vždy alespoň v jedné oblasti pozorován pozvolný nárůst hlavně jemné frakce, který začal po několika hodinách topení. Příčina tohoto mírného nárůstu není jasná a pro její zjištění by bylo zapotřebí dalších studií.

Při porovnání dat z oblasti u sedací soupravy a nad dvířkami krbových kamen lze zjistit, že v režimu s otevřeným popelníkem a přikládáním na uhlíky (1), zavřeným popelníkem a přikládáním na plamen (2) a otevřeným popelníkem a přikládáním na plamen (3) byly nad přikládacími dvířky zaznamenávány vyšší nárůsty hmotnostních koncentrací při přikládání a úpravách. V režimu s otevřeným oknem při úpravách a přikládání, zavřeným popelníkem a přikládáním na uhlíky (4) tomu bylo naopak. Režimy 1 až 4 však mají společné, že v oblasti nad přikládacími dvířkami jsou zaznamenány výrazně vyšší nárůsty koncentrací na začátku měření při čištění topeniště než v oblasti sedací soupravy.

Nejvyšší naměřená hodnota hmotnostní koncentrace při režimech topení byla naměřena v režimu s otevřeným popelníkem a přikládáním na plamen (3) v oblasti nad dvířky pro obě frakce ve stejnou chvíli. Pro PM₁₀ to bylo 680,5 μg·m⁻³ a pro PM_{2,5} 37,8 μg·m⁻³. Tato maxima však nebyla naměřena při topení, ale při vymetání popele před začátkem topení.

Nejnižší ustálené hodnoty hmotnostních koncentrací byly v obou oblastech naměřeny také pro topení v režimu s otevřeným popelníkem a přikládáním na plamen (3). Pro oblast sedací soupravy byla ustálená hodnota hrubé frakce přibližně 4 μg·m⁻³ a pro jemné frakce

cca $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Pro oblast nad příkládacími dvířky byla určena pouze ustálená hodnota hrubé frakce, a to $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Při topení v režimu 4, kdy bylo příkládáno s otevřeným oknem pro podporu tahu komína, nebylo pozorováno žádné zmenšení ustálených koncentrací nebo nárůstů při manipulaci s topeništěm.

Během topení vlhkým dřevem (režim 5) dosahovaly nárůsty hrubé frakce vyšších hodnot než při ostatních režimech topení. Bylo to způsobeno sníženou kvalitou spalování.

Doba, za kterou se koncentrace hrubé i jemné frakce ustálily byla přibližně 2 hodiny. Hrubá frakce měla mnohem vyšší nárůsty oproti jemné frakci. Rychlost poklesu koncentrace u PM_{10} proto byla výrazně vyšší než u $\text{PM}_{2,5}$.

Obecně se dá tvrdit, že při topení s otevřeným popelníkem a příkládáním na plamen (3) do místnosti vnikne nejméně částic, naopak nejvíce při topení vlhkým dřevem (5). Mezi režimy topení suchým dřevem nejsou žádné markantní rozdíly. Při topení vlhkým dřevem je již rozdíl lehce znatelný. Avšak v porovnání s množstvím částic, které se do místnosti uvolní při kouření cigarety, je množství částic, které do místnosti uniklo z lokálního topeniště, zanedbatelné. Je tedy velmi málo pravděpodobné, že topení v krbových kamnech má nějaký dopad na zdraví člověka, který toto zařízení obsluhuje a setrvává s ním v jedné místnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Energie z biomasy. *Svaz podnikatelů pro využití energetických zdrojů*, z. s. [online]. [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: <http://www.spvez.cz/pages/OZE/biomasa.htm>
- [2] Chemické složení dřeva a submikroskopická stavba. In: *Fakulta lesnická a dřevařská ČZU v Praze* [online]. [cit. 2020-10-22]. Dostupné z: <https://www.fld.czu.cz/dl/81759?lang=cs>
- [3] VOLÁKOVÁ, Pavlína. Prvkové složení biomasy. *Biom.cz* [online]. 2010-09-08 [cit. 2020-11-02]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/prv-kove-slozeni-biomasy>
- [4] WOFFOVÁ, Helena. *Teplotní degradace dřeva s aplikací retardérů hoření* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/83387>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Ladislav Šnajdárek.
- [5] BOWMAN, D. M. J. S., J. K. BALCH, P. ARTAXO, et al. Fire in the Earth System. *Science*. 2009, 324(5926), 481-484. ISSN 0036-8075. Dostupné z: <https://www.sciencemag.org/lookup/doi/10.1126/science.1163886>
- [6] VOBOŘIL, David. Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *Oenergetice.cz* [online]. 2017-02-06 [cit. 2020-11-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevychody>
- [7] JANKOVSKÝ, Miroslav, Ludmila STASZKOVÁ a Jaromír LACHMAN. *Chemie dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita, 1999. 211 s. ISBN 80-213-0559-2.
- [8] TOMAN, Zdeněk: Mechanismus a podmínky dokonalého spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 7. 2. 2011 [cit. 2020-11-04]. ISSN: 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy>
- [9] SITEK, Tomáš. *Ultrajemné částice generované spalovacím procesem* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/82424>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.
- [10] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle – 2. část. *Tzbinfo* [online]. 2012-04-02 [cit. 2020-11-26]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kam-nakrby/8438-kotle-2-cast>
- [11] BALÁŠ, Marek. Statika spalování. In: *Vutbr.cz* [online]. 10. 8. 2020 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/resource/view.php?id=168233>
- [12] LALÍK, Vladimír. *Emisie znečišťujících látok zo spaľovacích procesov pre neenergetické účely*. Poniky: Partner, 2010. 151 s. ISBN 978-80-89183-67-8.
- [13] Bezpečnostní list: Oxid dusnatý. In: *Siad.com* [online]. 20. 8. 2015, s. 4 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.siad.cz/documents/261220/0/oxid+dusnaty.pdf/5cfff377-e651-3714-0c50-7e19213d0fe4>
- [14] ŠPILÁČEK, Michal. *Efektivní a ekologické spalování biomasy* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/137333>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Zdeněk Skála.
- [15] Oxidy dusíku (NOx/NO2). In: *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: https://irz.cz/repository/látky/oxidy_dusiku.pdf
- [16] HAVEL, Milan, Vít VEBR a Petr VÁLEK. Oxidy dusíku. *Arnika* [online]. [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: <https://arnika.org/oxidy-dusiku>

- [17] VOHLÍDAL, Jiří; ŠTULÍK, Karel; JULÁK, Alois. *Chemické a analytické tabulky*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1999. ISBN 80-7169-855-5.
- [18] OCHODEK, Tadeáš, Jan KOLONIČNÝ a Pavel JANÁSEK. *Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy* [online]. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/prirucka1.pdf>. VŠB – Technická univerzita Ostrava.
- [19] Oxidy síry. In: *Integrovaný registr znečišťování* [online]. s. 4-5 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: https://irz.cz/repository/latky/oxidy_siry.pdf
- [20] HARTMAN, Miroslav, Karel SVOBODA, Otakar TRNKA a Václav VESELÝ. Síra při zplyňování uhlí. In: *Chemické listy* [online]. 1998 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7697648-Sira-pri-zplynovani-uhli.html>
- [21] *Odsiřování* [online]. Praha, 2011 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: <https://users.fs.cvut.cz/~vybirpav/Ochrana%20ovzduši/Odsirovani.pdf>. ČVUT.
- [22] Oxid uhelnatý. *Integrovaný registr znečišťování* [online]. s. 2-3 [cit. 2020-12-06]. Dostupné z: https://irz.cz/repository/latky/oxid_uhelnaty.pdf
- [23] Oxid uhelnatý. *Státní zdravotní ústav* [online]. [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/zivotni-prostredi/oxid-uhelnaty>
- [24] BRZEZINA, Jáchym. Není ozon, jako ozon. *ČHMÚ Brno* [online]. 2018, 1. 8. 2018 [cit. 2020-12-13]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/08/01/neni-ozon-jako-ozon/>
- [25] HŮNOVÁ, Eva. Přízemní ozon. *Chemické listy* [online]. Praha, 2018, 22. 2. 2018, 2018(112), 598-604 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/download/3175/3152/>
- [26] *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005* [online]. Geneva, 2006 [cit. 2021-5-16]. ISBN 92 890 2192 6. Dostupné z: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/107823>
- [27] *Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2019* [online]. Praha, 2020 [cit. 2020-12-15]. ISBN 978-80-7653-009-6. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/19groc/gr19cz/19_rocenka_UKO_web_tisk_up1.pdf
- [28] Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU). *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: https://irz.cz/repository/latky/polycyklicke_aromaticke_uhlovodiky.pdf
- [29] BRZEZINA, Jáchym. Benzo[a]pyren – mýty a fakta. *ČHMÚ Brno* [online]. 2018, 27. 12. 2018 [cit. 2020-12-15]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/12/27/benzo-a-pyren-popis-zdroje-dopady-aktualni-stav/>
- [30] HAVEL, Milan a Petr VÁLEK. Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAHs). *Arnika* [online]. [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <https://arnika.org/polycyklicke-aromaticke-uhlovodiky-pahs>
- [31] STRNAD, Ondřej. *Emise tuhých znečišťujících látek* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-12-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/83295>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.
- [32] GERJŠL, Milan, Eva KRČÁLOVÁ, Jan MAREČEK a Martin ŠOTNAR. *ZJIŠTĚNÍ HODNOT KONCENTRACÍ ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK (TZL) U VYBRANÝCH ZAŘÍZENÍ A PODKLADY K NÁVRHU ZÁVĚRŮ O BAT FDM BREF* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/609905/Zjisteni_hodnot_koncentraci_znecestujicich_latek_TZL_u_vybranych_zarizeni_a_podklady_k_navrhu_zaveru_o_BAT_FDM_BREF.pdf. Závěrečná zpráva. Mendelova univerzita v Brně.
- [33] Polévatý prach (PM10). *Integrovaný registr znečišťování* [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://irz.cz/node/85>

- [34] Aerosol. *Centrum informačních služeb VŠCHT Praha* [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: https://vydavatelstvi-old.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/aerosol.html
- [35] Souborné stanovisko Společnosti pro výzkum aerosolů (Gesellschaft für Aerosolforschung): k porozumění významu aerosolů při šíření infekce SARS-CoV-2. *GAeF* [online]. 25. 2. 2021, s. 10-12 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://cas.icpf.cas.cz/download/aerosol-covid-preklad.pdf>
- [36] *Air Quality Criteria for Particulate Matter: Volume I* [online]. Washington, DC. [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEA&dirEntryId=87903
- [37] ENDLEROVÁ, Šárka. *Prachové částice v životním prostředí a jejich vliv na rostliny: možnosti využití pro fytoremediace* [online]. Praha, 2011 [cit. 2021-01-10]. Dostupné z: <https://dspace.cuni.cz/handle/20.500.11956/51090>. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Petr Soudek
- [38] CLEMENS, S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie* [online]. 2006, 88(11), 1707-1719 [cit. 2021-01-10]. ISSN 03009084. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300908406001428>
- [39] Pneumokoniózy. *WikiSkripta* [online]. 13. 03. 2019 [cit. 2021-01-11]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Pneumokoni%C3%B3zy&oldid=422879>
- [40] *Outdoor air pollution* [online]. Volume 109. Lyon, 2016 [cit. 2021-01-13]. ISBN 978-92-832-0175-5. 1017-1606. Dostupné z: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Outdoor-Air-Pollution-2015>
- [41] Pravidla fungování smogového varovného a regulačního systému. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/smog/SVRS_pravidla-fungovani.pdf
- [42] CHRIS. *Environmentalism in 1306* [online]. 23. 1. 2008 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20080725090103/http://www.environmental-graffiti.com/offbeat-news/environmentalism-in-1306/725>
- [43] BELL, Michelle L, Devra L DAVIS a Tony FLETCHER. A retrospective assessment of mortality from the London smog episode of 1952: the role of influenza and pollution. *Environmental Health Perspectives* [online]. 2004, 112(1), 6-8 [cit. 2021-01-18]. ISSN 0091-6765. Dostupné z: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.6539>
- [44] MCNALLY, JESS. July 26, 1943: L.A. Gets First Big Smog. *Wired* [online]. 26. 7. 2010 [cit. 2021-01-18]. Dostupné z: <https://www.wired.com/2010/07/0726la-first-big-smog/>
- [45] ŠKÁCHOVÁ, Hana, Leona VLASÁKOVÁ, Markéta SCHREIBEROVÁ, Jáchym BRZEZINA a Klára SEDLÁKOVÁ. KVALITA OVZDUŠÍ NA ÚZEMÍ ČESKÉ REPUBLIKY V ROCE 2020: Předběžné zhodnocení. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 18. 1. 2021 [cit. 2021-01-25]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/mes_zpravy/Rocni_zprava_2020.pdf
- [46] *Co je to Ekodesign kotlů?* [online]. [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/uspورا-energie/-a162005--PaOOLB8x/file>
- [47] ENVITECH BOHEMIA. Metody měření – měřicí přístroje [online]. [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: <http://www.virtualnicentrum.cz/vzdelavaci-moduly/modul-ovzdusi/zneisteni-ovzdusi/prach/metody-mereni/>
- [48] KADLEC, Karel a Tomáš BARTOVSKÝ. Měření pevných částic v plynu. *Automa* [online]. 2018(12), 36-37 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/uspورا-energie/-a162005--PaOOLB8x/file>

- [49] KUBESA, Petr, Jiří HORÁK, Kamil KRPEC, František HOPAN, Zuzana JANKOVSKÁ a Lubomír MARTINÍK. Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení. *Tzbinfo* [online]. 4. 2. 2013, 2013 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>
- [50] KUBESA, Petr. *Návrh zařízení pro izokinetický odběr TZL z malých spalovacích zařízení* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/88124/KUB785_FS_N2301_2302T006_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Jiří Horák.
- [51] PETRÁNEK, Jan. Koloid. *Geologické encyklopedie on-line* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?koloid>
- [52] MAŇÁK, Roman. Rayleighův a Mieův rozptyl. *Optické úkazy v atmosféře* [online]. 24. 4. 2012 [cit. 2021-02-15]. Dostupné z: <http://ukazy.astro.cz/Rayleighuv-a-Mieuv-rozptyl.php>
- [53] NAVE, R. Blue Sky. *HyperPhysics* [online]. Georgia [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html#c3>
- [54] Laserový prachoměr s kombinovaným měřením. *Automa* [online]. 2006(4) [cit. 2021-02-16]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/laserovy-prachomer-s-kombinovanym-merenim-2006_04_31078_2393/
- [55] *Turbidimetrie a nefelometrie* [online]. Olomouc [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: [http://biofyzika.upol.cz/userfiles/file/8_Turbidimetrie%20a%20Nefelometrie\(1\).pdf](http://biofyzika.upol.cz/userfiles/file/8_Turbidimetrie%20a%20Nefelometrie(1).pdf). Univerzita Palackého v Olomouci.
- [56] PFM 92 C. *Level Instruments CZ* [online]. [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.levelexpert.cz/cz/nabidka/mereni-koncentrace-prachu/mereni-koncentrace-prachu/5-pfm-92-c.html>
- [57] Přístroj pro kontrolu filtrů PFM 92 C: Návod k instalaci a seřízení. In: *Level Instruments CZ* [online]. s. 4-6 [cit. 2021-02-20]. Dostupné z: https://www.levelexpert.cz/soubory-zbozi_old/Manual_PFM92C_CZ_a.pdf
- [58] OPTICAL PARTICLE SIZER SPECTROMETER MODEL 3330: OPERATION AND SERVICE MANUAL. In: *Kenelec scientific: measuring up* [online]. 10. 2013, s. 73-77 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: https://www.kenelec.com.au/wp-content/uploads/2016/06/TSI_3330_Optical_Particle_Sizer_Manual.pdf
- [59] KLAMOVA HUŤ S.R.O. *Horkovzdušná krbová kamna na dřevo: Typ PRINC*. Blansko [cit. 2021-03-07].
- [60] LAUTENBACH, M., Kunde ROBERT a M. GADERER. *Calculation of Particle Density of Aerosol from Wood Combustion* [online]. Salzburg, 2007 [cit. 2021-04-02]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/242169503_Calculation_of_Particle_Density_of_Aerosol_from_Wood_Combustion

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Porovnání průměrů vlasu a částic PM ₁₀ (žlutě) a PM _{2,5} (červeně)	18
Obrázek 2. Porovnání velikosti pilového zrna a částic PM ₁₀ (žlutě), PM _{2,5} (červeně) a PM ₁ (modře)	18
Obrázek 3. Idealizované rozdělení částic, které jsou produkovány v dopravě [36]	19
Obrázek 4. Schéma gravimetrického zařízení pro měření částic	23
Obrázek 5. Vliv rychlosti odběru na částice [49]	24
Obrázek 6. Schéma triboelektrického zařízení na měření částic [57]	25
Obrázek 7. Schéma měřicího zařízení TSI OPS Model 3330 [58]	27
Obrázek 8. Půdorys měřicí místnosti	28
Obrázek 9. Umístění měřicího zařízení v oblasti 1	30
Obrázek 10. Umístění měřicího zařízení v oblasti 2	31
Obrázek 11. Půdorys měřicí místnosti s vyznačenými oblastmi měření	31
Obrázek 12. Hořící tuhý podíl	32
Obrázek 13. Vysoký plamen hořící prchavé hořlaviny	32
Obrázek 14. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 1 v oblasti 1	34
Obrázek 15. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 1 v oblasti 2	34
Obrázek 16. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 2 v oblasti 1	35
Obrázek 17. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 2 v oblasti 2	36
Obrázek 18. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 3 v oblasti 1	37
Obrázek 19. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 3 v oblasti 2	38
Obrázek 20. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 4 v oblasti 1	39
Obrázek 21. Průběhy hmotnostních koncentrací při topení v režimu 4 v oblasti 2	40
Obrázek 22. Průběh hmotnostních koncentrací při topení v režimu 5 v oblasti 1	41
Obrázek 23. Průběh hmotnostních koncentrací v místnosti se zapálenou cigaretou	42
Obrázek 24. Průběhy početních koncentrací vybraných velikostních tříd v režimu 1 v oblasti 1	43
Obrázek 25. Průběhy početních koncentrací vybraných velikostních tříd při kouření	43
Obrázek 26. Část průběhů hmotnostních koncentrací při topení v režimu 5 v oblasti 1	44

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Imisní limity polutantů a jejich překročení za rok 2020 [45]	22
Tabulka 2. Technické údaje krbových kamen PRINC udávané výrobcem [59].....	27