

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE FRAKCE
PM10, PM2,5 A PM1**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krýslová** Jméno: **Barbora** Osobní číslo: **439004**
 Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
 Zadávací katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
 Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
 Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Suspendované částice frakce PM10, PM2,5 a PM1

Název bakalářské práce anglicky:

PM10, PM2.5 and PM1 Fraction of Particulate Matter

Pokyny pro vypracování:

Popište frakce PM10, PM2,5 a PM1 suspendovaných částic v ovzduší. Zhodnoťte jejich zdravotní účinky. Popište legislativu a zhodnoťte situaci z hlediska znečišťování a znečištění v této oblasti v ČR. Popište způsoby měření frakcí PMx a základní způsoby snižování emisí tuhých znečišťujících látek.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Hemerka J., Vybíral P.: Ochrana ovzduší, ČVUT v Praze, 2010.
- 2) ročenky Českého hydrometeorologického ústavu
- 3) zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Vybíral, Ph.D., ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.10.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **08.01.2021**

Platnost zadání bakalářské práce:

Ing. Pavel Vybíral, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

4.1.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Anotace

Práce se zabývá teorií frakcí PM₁₀, PM_{2,5} a PM₁ suspendovaných znečišťujících částic v ovzduší, zaměřuje se na jejich vliv na životní prostředí a zdravotní rizika pro člověka. Popisuje způsoby měření frakcí PM_x a popisuje základní způsoby snižování emisí tuhých znečišťujících látek. Popisuje platnou současnou legislativu a vyhodnocuje situaci z hlediska znečišťování a znečištění v této oblasti v České republice.

Klíčová slova

Frakce PM, suspendované částice, zdravotní účinky, legislativa, tuhé znečišťující látky, snižování emisí

Abstrakt

The bachelor thesis deals with the theory of fractions PM₁₀, PM_{2,5} and PM₁ of suspended pollutants in the air, focuses on their impact on the environment and health risks for humans. The work describes methods for measuring PM_x fractions and describes basic methods for reducing emission of solid pollutants. It describes the current legislation and evaluates the situation in terms of pollution in this area in the Czech Republic.

Keywords

PM fraction, suspended particles, health effects, legislation, solid pollutants, emission reduction

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Suspendované částice frakce PM10, PM2,5 a PM1“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Pavla Vybírala, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 08.01.2021

Barbora Krýslová

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Pavlu Vybíralovi, Ph.D. za ochotnou pomoc při vypracování bakalářské práce, za cenné rady, za trpělivost a vstřícnost při konzultacích.

Obsah

Úvod	8
1. Základní pojmy	9
1.1 Ochrana ovzduší	9
1.2 Emise	9
1.3 Imise	9
1.4 Základní znečišťující látky	10
2. Legislativa ochrany ovzduší v České republice	12
2.1 Imisní a emisní limity	13
2.1.1 Imisní limity	13
2.1.2 Emisní limity	16
2.2 Smogová situace	18
2.3 Niskoemisní zóny	18
3. Suspendované částice frakce PM _x	19
3.1 Účinky částic na zdraví obyvatel a životní prostředí	19
3.2 Měření částic frakcí PM _x	21
4. Situace v České republice	22
4.1 Vývoj kvality ovzduší v ČR	22
4.2 Kvalita ovzduší v ČR	23
4.3 Znečištění ovzduší suspendovanými částicemi	23
5. Technologie ke snižování emisí tuhých znečišťujících látek	30
5.1 Odlučovací principy	30
5.1.1 Gravitační princip	31
5.1.2 Setrvačný princip	31
5.1.3 Odstředivý princip	32
5.1.4 Elektrický princip	32
5.1.5 Difúzní princip	32
5.1.6 Intercepční princip	32
5.2 Odlučovače	33
5.2.1 Filtry	34
5.2.2 Elektrické odlučovače	35
5.2.3 Suché mechanické odlučovače	35
5.2.4 Mokrý mechanické odlučovače	35

6. Závěr	37
Seznam použitých literatury.....	38

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou emisí tuhých znečišťujících látek, které jsou nedílnou součástí znečištění ovzduší v České republice. Základním pojmem této problematiky je ochrana ovzduší, která sehrává důležitou roli v znečištění a znečišťování ovzduší v České republice. Současná legislativa stanovuje emisní a imisní limity pro tuhé znečišťující látky, ačkoliv se stav ovzduší v české republice v poslední době zlepšuje, stále dochází k překračování imisním limitů a to zejména na území aglomerace Ostrava – Karviná – Frýdek-Místek.

Cílem této práce je popsat suspendované částice frakce PM_x tuhých znečišťujících látek, principy jejich měření a základní způsoby snižování emisí tuhých znečišťujících látek, dále pak zhodnotit jejich zdravotní účinky a vliv na životní prostředí a zhodnotit situaci z hlediska znečišťování a znečištění, vývoj a kvalitu ovzduší v České republice.

1. Základní pojmy

1.1. Ochrana ovzduší

Pro člověka je ovzduší jednou z nejdůležitějších složek životního prostředí, proto se kvalitě ovzduší věnuje nemalá pozornost na celosvětové úrovni. Dle § 1 zákona 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší je ochrana ovzduší definována jako „předcházení znečišťování ovzduší a snižování úrovně znečišťování tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší.”[1]

1.2. Emise

Emise neboli znečišťování ovzduší je proces vypouštění a úniku znečišťujících látek do atmosféry, těmito látkami je následně způsobeno znečištění ovzduší. Zdroje emisí lze rozčlenit podle jejich původu na přírodní, mezi které patří například sopečná činnost nebo znečišťující látky produkované rostlinami a antropogenní, způsobené člověkem. Hlavními zdroji emisí jsou velké zdroje jako elektrárny, teplárny, průmysl a dále “doprava”, vytápění domácností a zemědělství. V ČR posuzuje úroveň znečištění Český hydrometeorologický ústav, který vyhodnocuje především znečišťující látky antropogenního původu a skleníkové plyny [3][4].

Mezi nejrozšířenější emise patří především: oxid siřičitý (SO_2), oxidy dusíku (NO_x), tuhé znečišťující látky (TZL), oxid uhelnatý a uhličitý a organické látky. [4]

1.3. Imise

Imise neboli znečištění je koncentrace znečišťující látky ve venkovním ovzduší, tedy množství znečišťující látky, která se dostala do styku s ovzduším v takovém množství a po takovou dobu, že je zřejmý negativní vliv na životní prostředí. Znečišťující látky (emise) po úniku procházejí fyzickou a chemickou přeměnou a změřené množství látky po této přeměně v určitém místě je nazýváno imisí.

1.4. Základní znečišťující látky

Za znečišťující látky jsou označovány chemické nebo jiné látky, které svou přítomností v prostředí mají škodlivý vliv na lidské zdraví nebo životní prostředí. Znečišťující látky se rozdělují podle chemického složení, skupenství nebo vlivu na životní prostředí. [1]

Tuhé znečišťující látky

Tuhé znečišťující látky (TZL) a jejich frakce patří mezi nejvýznamnější znečišťující látky a významně se podílejí na kvalitě ovzduší v ČR.

Do ovzduší se dostávají různými procesy, které mohou být přírodní jako je například vulkanická činnost, odpařování, zvětrávání nebo antropogenní (způsobené činností člověka), což jsou např. spalovací procesy nebo průmyslová a zemědělská činnost.

Pod pojem TZL spadají obecně všechny formy výskytu těchto částic v imisích i emisích. Vyskytují se pod různými názvy podle vzniku nebo jejich shodných vlastností, např. při mechanických operacích, erozích hornin nebo sopečnou činností vznikají částice označovány jako prach. Tento pojem lze použít obecně pro všechny formy výskytu tuhých částic, v případě, že není potřeba zdůraznit způsob vzniku. Částice produkované spalováním pevných paliv jsou nazývány popílkem, částice vznikající kondenzací a tuhnutím par látek jsou nazývány dým, zpravidla se jedná o jemné tuhé i kapalné částice. Kouřem jsou nazývány částice vznikající spalováním organických látek obsahujících převážně uhlík. [2]

Důležitý pojem je aerosol, který popisuje jemné tuhé i kapalné částice v ovzduší setrvávající ve stavu vznosu. Jemné částice atmosférického prachu, které setrvávají delší dobu ve stavu vznosu a mají předpoklady pro dálkový přenos jsou nazývány suspendovanými částicemi. [2]

Oxid siřičitý

Oxid siřičitý (SO_2) je bezbarvý, štiplavě zapáchající, hořlavý plyn, který se dobře rozpouští ve vodě za vzniku kyselého roztoku. Spalování fosilních paliv, výroba

kyseliny sírové a zpracování rud s obsahem síry jsou hlavními antropogenními zdroji SO_2 . V nevětraných oblastech se v podzimních a zimních měsících hromadí škodliviny ze spalovacích procesů apři styku s mlhou nebo zvýšenou vzdušnou vlhkostí vytvářejí kyselý aerosol, který poškozujje sliznice a dýchací cesty. [5]

Oxid dusíku

Oxidy dusíku (NO_x) jsou přirozenou součástí životního prostředí, mezi nejčastější patří např. oxid dusičitý (NO_2) a oxid dusnatý (NO). Vznikají při spalování fosilních paliv za vysokých teplot, během bouřek a podílejí se na vzniku kyselých dešťů a přízemního ozonu. Podíl na emisích oxidů dusíku má kromě přírodních procesů i člověk, hlavními zdroji jsou chemický průmysl, doprava a v podstatě veškeré spalovací procesy, do kterých vstupují materiály obsahující dusík. [6]

Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý (CO) vzniká nedokonalým spalováním (spalování s nedostatkem kyslíku) materiálů obsahujících uhlík. Jedná se o jedovatý, bezbarvý plyn bez zápachu, který se váže na hemoglobin v krvi a snižuje transportní kapacitu kyslíku v těle. Hlavním zdrojem emisí CO jsou průmyslové spalovací procesy, vytápění domů a doprava. [7]

Oxid uhličitý

Oxid uhličitý (CO_2) je stejně jako CO bezbarvý plyn bez zápachu, avšak není jedovatý, a je běžnou součástí zemské atmosféry. Jakékoliv spalování uhlikatých látek od dopravy, průmysl, až k domácím topeništím patří mezi nejvýznamnější zdroje oxidu uhličitého, který je finální a stabilní sloučeninou oxidace uhlíku. Běžné koncentrace tohoto plynu jsou pro člověka neškodné, ovšem vyšší koncentrace mohou vést až ke smrti, jelikož oxid uhličitý je nedýchatelný plyn s výrazně vyšší hustotou než kyslík, tudíž se hromadí u země a vytlačuje dýchatelný kyslík.[8]

Oxid uhličitý je v zásadě jediným přirozeným zdrojem uhlíku pro život, používá se k nejrůznějším průmyslovým účelům např. jako chladící médium, v chemickém průmyslu, jako ochranný plyn při svařování, v hasicích přístrojích, při sycení nápojů i v zemědělství. [8]

Přízemní ozon

Přízemní neboli troposférický ozon může být antropogenního i přírodního původu, avšak antropogenní převažuje, ačkoliv žádné významné přímé zdroje antropogenního zdroje ozonu neexistují. Jako typická sekundární znečišťující látka, je ozon v atmosféře tvořen slunečním zářením na oxidy dusíku v přítomnosti těkavých organických látek. [9]

Polycyklické aromatické uhlovodíky

Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU) se vyznačují tím, že jejich molekuly nenesou žádné heteroatomy ani substituenty a obsahují kondenzovaná aromatická jádra. Jedná se zpravidla okrytalické látky bílé nebo nažloutlé barvy. Snadno se rozpouštějí v tučích nebo olejích, ale jsou velmi málo rozpustné ve vodě. Vznikají při spalování téměř všech druhů uhlíkatých paliv a jsou obsaženy v celé řadě běžných produktů průmyslu. Běžnými produkty, kde jsou PAU jako skupina obecně obsaženy jsou motorová nafta, asfalt a materiály používané při stavbě silnic nebo pokrývání střech nebo výrobky z černouhelného dehtu. [10]

2. Legislativa ochrany ovzduší v České republice

Legislativu o ochraně ovzduší v ČR ustanovuje zákon č. 201/2012 Sb. O ochraně ovzduší, který je platný od května roku 2012. Tento zákon definuje pojmy znečištění a znečišťování v ČR, určuje způsoby vyhodnocování úrovně znečištění, definuje smogovou situaci v ČR, emisní a imisní limity a určuje povinnosti provozovatelů zdrojů znečišťování ovzduší a sazby poplatků za znečištění. Dále obsahuje popis výkonu státní správy a postup kontrolních orgánů. Představuje Národní program snižování emisí České republiky obsahující kromě cíle snižování emisí a imisí, další potřebná opatření za účelem snižování úrovně znečištění ovzduší.

Legislativa dále zaštiťuje nařízení vlády č. 56/2013 o stanovení pravidel pro zařazení silničních motorových vozidel do emisních kategorií a o emisních plaketách, č. 189/2018 Sb. o kritériích udržitelnosti biopaliv a vyhlášky č. 312/2012 Sb. stanovení požadavků na kvalitu paliv používaných pro vnitrozemská a námořní plavidla z hlediska

ochrany ovzduší, č. 330/2012 Sb. o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích, č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. [11]

2.1. Imisní a emisní limity

Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší o přípustných úrovních znečištění a znečišťování týkající se zejména emisní a imisních limitů.

2.1.1. Imisní limity

Imisní limit je hodnota nejvýše přípustné úrovně znečištění ovzduší vyjádřená v jednotkách hmotnosti na jednotku objemu. Tab. č.1, tab. č.2 a tab. č. 3 a tab. č.4 ukazují imisní limity pro jednotlivé látky a jsou určeny v příloze č. 1 zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší.

Tab.1: Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení [1]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit	Maximální počet překročení
Oxid siřičitý	1 hodina	350 $\mu\text{g.m}^{-3}$	24
Oxid siřičitý	24 hodin	125 $\mu\text{g.m}^{-3}$	3
Oxid dusičitý	1 hodina	200 $\mu\text{g.m}^{-3}$	18
Oxid dusičitý	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Oxid uhelnatý	maximální denní osmihodinový průměr ¹	10 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Benzen	1 kalendářní rok	5 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Částice PM10	24 hodin	50 $\mu\text{g.m}^{-3}$	35
Částice PM10	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Částice PM2,5	1 kalendářní rok	20 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0
Olovo	1 kalendářní rok	0,5 $\mu\text{g.m}^{-3}$	0

„Poznámka: ¹) Maximální denní osmihodinová průměrná koncentrace se stanoví posouzením osmihodinových klouzavých průměrů. Každý osmihodinový průměr se přiřadí ke dni, ve kterém končí.“[1]

Tab. 2: Imisní limity vyhlášené pro ochranu ekosystémů a vegetace [1]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit
Oxid siřičitý	Kalendářní rok a zimní období (01. 10. – 31. 03.)	20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Oxidy dusíku ¹	1 kalendářní rok	30 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

„Poznámka: ¹) Součet objemových poměrů oxidu dusného a dusičitého vyjádřený v jednotkách hmotnostní koncentrace oxidu dusičitého.“[1]

Tab. 3: Imisní limity pro celkový obsah znečišťující látky v částicích PM10 vyhlášené pro ochranu zdraví lidí [1]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit
Arsen	1 kalendářní rok	6 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
Kadmium	1 kalendářní rok	5 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
Nikl	1 kalendářní rok	20 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
Benzo(a)pyren	1 kalendářní rok	1 $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Tab. 4: Imisní limity pro troposférický ozon[1]

Účel vyhlášení	Doba průměrování	Imisní limit	Maximální počet překročení
Ochrana zdraví lidí ¹⁾	Maximální denní osmihodinový průměr ²⁾	120 $\mu\text{g.m}^{-3}$	25 ³⁾
Ochrana vegetace ⁴⁾	AOT40 ⁵⁾	18 000 $\mu\text{g.m}^{-3}.\text{h}$ ⁶⁾	0

„Poznámka: ¹⁾ Plnění imisního limitu se vyhodnocuje na základě průměru za 3 kalendářní roky.

²⁾ Maximální denní osmihodinová průměrná koncentrace se stanoví posouzením osmihodinových klouzavých průměrů počítaných z hodinových údajů a aktualizovaných každou hodinu. Každý osmihodinový průměr je připsán dni, ve kterém končí, což znamená, že první výpočet je proveden z hodinových koncentrací během periody 17:00 předešlého dne a 01:00 daného dne. Poslední výpočet pro daný den se provede pro periodu od 16:00 do 24:00 hodin.

³⁾ V případě dodržení imisního limitu při maximálním počtu překročení v zóně nebo aglomeraci je třeba usilovat o dosažení nulového počtu překročení.

⁴⁾ Plnění imisního limitu se vyhodnocuje na základě průměru za 5 kalendářních let.

⁵⁾ Pro účely tohoto zákona AOT40 znamená součet rozdílů mezi hodinovou koncentrací větší než $80 \mu\text{g.m}^{-3}$ a hodnotou $80 \mu\text{g.m}^{-3}$ v dané periodě užitím pouze hodinových hodnot změřených každý den mezi 08:00 a 20:00 SEČ, vypočtený z hodinových hodnot v letním období (1. května - 31. července).

⁶⁾ V případě dodržení imisního limitu v zóně nebo aglomeraci ve výši $18\,000 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{h}$ je třeba usilovat o dosažení imisního limitu ve výši $6\,000 \mu\text{g.m}^{-3}.\text{h}$.“[1]

2.1.2. Emisní limity

Emisní limit označuje nejvyšší přípustné množství znečišťujících látek, uvolňovaných do ovzduší, nejčastěji se popisuje jako hmotnostní tok nebo hmotnostní

koncentrace dané látky. Podle § 4 odst. 2 zákona č. 201/2012 Sb., rozlišujeme celkem dva různé pojmy emisních limitů a to obecné a specifické.

V tab. č.5 jsou znázorněny obecné emisní limity pro jednotlivé znečišťující látky a jejich skupiny prováděcím právním předpisem, tj. přílohou č.9 vyhlášky č.415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Pokud je pro stacionární zdroj stanoven jeden nebo více specifických emisních limitů, nevztahují se na něj obecné limity.[12]

Tab. 5: Obecné emisní limity. [12]

Název znečišťující látky	Hmotnostní tok [g/h]	Hmotnostní koncentrace [mg.m ⁻³]
Tuhé znečišťující látky	≤2500	200
	>2500	150
Oxidy síry vyjádřené jako SO ₂	>20000	2500
Oxidy dusíku vyjádřené jako NO ₂	>10000	500
Oxid uhelnatý	>5000	500
Organické látky vyjádřené jako celkový organický uhlík (TOC)	>3000	150
Amoniak a amonné soli vyjádřené jako amoniak	>500	50
Sulfan	>100	10
Sirouhlík	>100	20
Chlor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HCl	>500	50
Fluor a jeho plynné anorganické sloučeniny vyjádřené jako HF	>100	10

Specifické emisní limity jsou stanovené buď prováděcím právním předpisem, tj. vyhláškou č.415/2012 Sb. specificky pro jednotlivé typy stacionárních zdrojů, nebo mohou být stanoveny krajským úřadem v povolení provozu. Specifický emisní limit stanovený krajským úřadem v povolení provozu nesmí být stejný nebo vyšší než specifický emisní limit stanovený vyhláškou č. 415/2012 Sb. Z uvedeného ustanovení vyplývá, že krajský úřad má na základě zákona možnost zpřístupnit v rámci povolení provozu zdroje specifické emisní limity, případně stanovit i specifické emisní limity, které vyhláška pro daný typ zdroje vůbec nestanoví. [12]

Povinnosti provozovatele stacionárního zdroje znečištění upravuje §17 zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší.

2.2. Smogová situace

Smogová situace je stav mimořádně znečištěného ovzduší oxidem siřičitým, oxidem dusičitým, částicemi PM10 nebo troposférickým ozónem při překročení úrovně některé z prahových hodnot. Prahové hodnoty rozdělujeme do tří skupin.

V případě, že v žádné měřící lokalitě zastupující pro úroveň znečištění v okruhu minimálně 100 km² není naměřena vyšší hodnota koncentrace znečišťujících látek, než je příslušná prahová hodnota, nastane ukončení smogové situace, avšak jen v případě, že tento stav trvá minimálně 12 hodin. Zároveň nesmí být v následujících 24 hodinách na základě meteorologické předpovědi očekáváno opětovné překročení prahové hodnoty. [1]

2.3. Nízkoemisní zóny

Obec může z důvodu omezení znečištění ovzduší z dopravy na svém území nebo jeho části stanovit zónu s omezením provozu silničních motorových vozidel, tato zóna se označuje jako nízkoemisní zóna. Do této zóny smějí vjet pouze vozidla označená emisní plaketou nebo zvláště vyjmenovaná vozidla.

V případě vzniku smogové situace mohou být v opatření obecné povahy stanoveny zvláštní podmínky provozu v nízkoemisní zóně, týkající se omezení okruhu silničních

motorových vozidel, která mají do nízkoemisní zóny povolen vjezd v době trvání smogové situace.[1]

3. Suspendované částice frakce PM_x

Frakce tuhých znečišťujících látek se dají rozdělit na hrubé frakce, kam patří frakce PM_{2,5} - PM₁₀ a na frakce jemné o velikosti PM₁ - PM_{2,5}, částice < 1 μm nazýváme submikrometrové částice. Dále jsou děleny na primární a sekundární, primární částice vznikají přímo ze zdrojů a rozlišují se podle původu z antropogenních zdrojů či z přírodních zdrojů. Sekundární částice vznikají na základě chemických a fyzikálních procesů v ovzduší, do ovzduší se také dostávají resuspencí v důsledku lidské činnosti nebo na základě meteorologických faktorů.

Velikost frakce je z hlediska vlastností důležitým faktorem, jemné frakce částic jsou často rozpustné, mají kyselé pH a obsahují sekundárně vzniklé aerosoly kondenzací plynů. Částice vznikající sekundárně reakcemi plyných škodlivin zde převažují, jsou to např. částice ze spalování fosilních paliv nebo znovu kondenzované organické či kovové páry. Jemné částice v ovzduší přetrvávají dny až týdny, jako vytvořený aerosol mohou být transportovány stovky až tisíce km, tím dochází k rozptýlení na velké území. Z hlediska ohrožení obyvatel je velmi důležité pronikání jemných částic do interiérů budov, kde lidé tráví převážnou část svého času. [13]

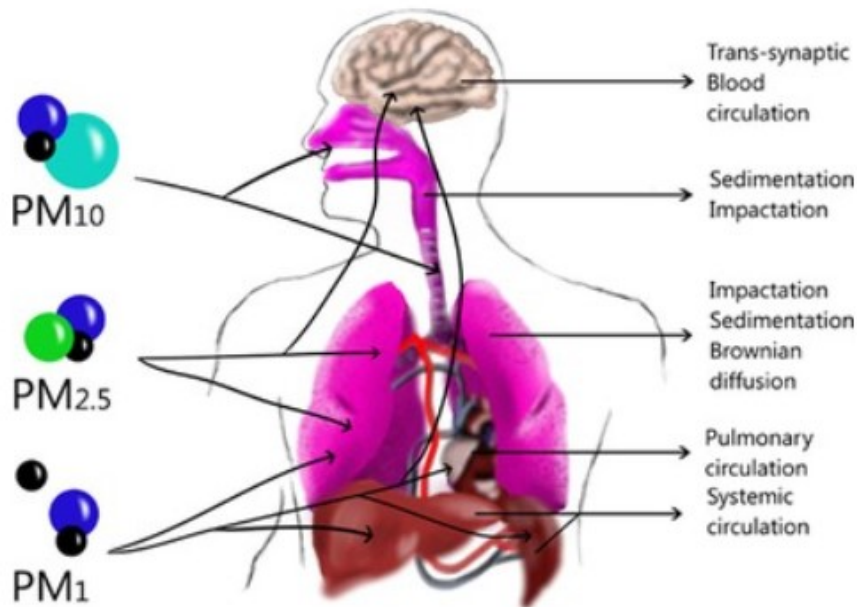
Hrubé částice jsou oproti jemným částicím převážně nerozpustné, bývají zásaditého pH a vznikají při demolicích, mechanickým rozpadem materiálu zemského povrchu, nekontrolovaným spalováním nebo sekundárním vířením prachu. Během minut až hodin podléhají rychlé sedimentaci, přenášejí se řádově do kilometrových vzdáleností. [13]

3.1. Účinky částic na zdraví obyvatel a životní prostředí

Velikost částic přímo souvisí s potenciálem způsobovat zdravotní problémy, čím menší částice je, tím větší je zdravotní riziko, částice menších velikostí se mohou dostat hluboko do plic a některé dokonce do krve. Na rozdíl velké části se zachycují již při vstupu dýchacími otvory, např. na chloupkách v nose a jsou následně vykašlány nebo

spolknuty, z toho důvodu nezpůsobují větší potíže. Na obr. č.1 je znázorněn průchod jednotlivých částic při vdechnutí.

Obr. 1: Průchod frakcí PMx. [15]



Znečištění ovzduší částicemi PM je spojeno s řadou zdravotních problémů u lidí, např. nepravidelný srdečný tep, infarkty, zhoršené astma, snížená funkce plic, zvýšené respirační příznaky nebo dokonce předčasná smrt u lidí s onemocněním srdce nebo plic. [14]

Kvality a čistoty vzduchu lze ve vnitřních prostorech dosáhnout například instalací čističky vzduchu, avšak pro poskytnutí kompletně zdravotně nezávadného prostředí, je potřeba vybrat filtry, které zachycují i frakce PM1.

Dopady na životní prostředí jsou různé, např. zaprášení listů rostlin zmenšuje jejich aktivní plochu, ovlivňuje podnebí tvorbou oblaků, u živočichů vstupuje prach stejně jako u lidí do dýchacích cest nebo toxické působení látek obsažených ve frakcích. Částice jsou přenášeny větrem na dlouhé vzdálenosti a jejich usazování může způsobovat změnu bilance živin v podbřežních vodách, kyselení jezer a potoků a přispívání k účinkům kyselých dešťů, vyčerpání živin v půdě, poškození citlivých lesů a zemědělských plodin. Prach může poškodit i různé materiály, např. Obarvením kamenů nebo jiných materiálů, tyto problémy se objevují často na budovách, pomnících nebo kulturně významných předmětech. [14]

3.2. Měření částic frakce PM_x

V ČR funguje více než 50 stanic, které nepřetržitě monitorují vnější prostředí a stav jeho znečištění. Ve vnitřních prostorách se využívá menších zařízení, existuje několik způsobů měření částic prachu, mezi nejznámější patří metody založené na principu zachycení částic na filtru a následné vyhodnocení pomocí mikroskopu či vážení filtru. Mezi další způsoby patří např. okamžité třídění částic, které spočívá v určování velikosti částic z jejich chování, vyhodnocování zde probíhá téměř okamžitě během měření nebo procesy používající zobrazení prostřednictvím elektronových mikroskopů. Měření interakcí částic v elektrickém poli, založené na měřené elektrické mobilitě částic, je další zásadní měřicí metodou. [16]

Mezi konkrétní měřicí metody patří např. laserová difrakce, která využívá rozptylu světla, základním principem rozptylu světla je prosvícení velkého množství částic najednou, Laserový paprsek prochází vzorkem, který obsahuje částice různých velikostí, které různě ovlivňují úhel rozptylu. Malé částice ohýbají světlo, pod větším úhlem a velké naopak, rozptýlené světlo je následně snímáno fotodiodou nebo fotonásobičem. Dalším způsobem měření částic je mikroskopická analýza, principem této metody je zachycení částic na vhodném filtru a následné vložení do mikroskopu a zkoumání. Časté využití zde mají elektronové mikroskopy, které se od světelných liší nahrazením světelné čočky za elektromagnetickou, tudíž místo světla prochází vzorkem elektrony. [16]

Jednou ze základních a často využívaných metod je gravimetrie, její princip spočívá v zachycení částic na vhodný filtr, který je před i po měření zvážen a rozdíl hmotností udává kvantitu zachycených částic. Nevýhodou této metody, že nedokáže rozlišovat velikosti částic, dokáže určit pouze míru znečištění. [16]

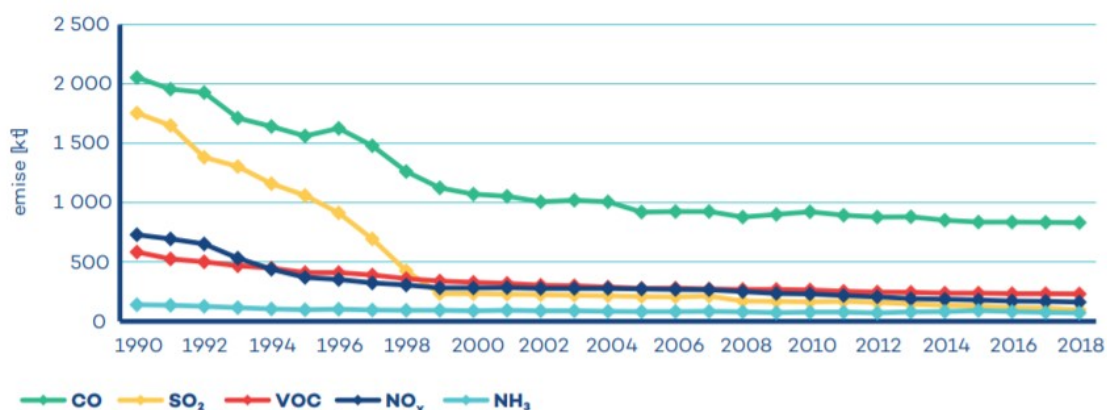
4. Situace v České republice

4.1. Vývoj kvality ovzduší v ČR

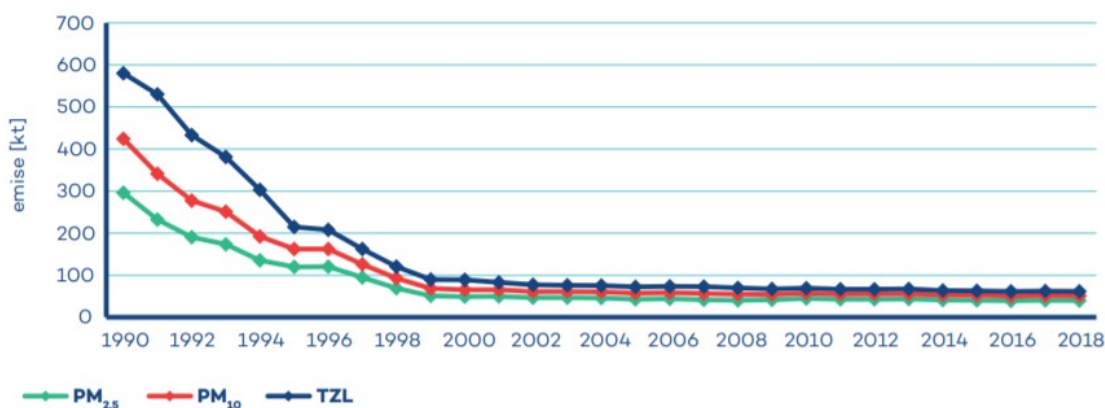
Vývoj úrovně znečištění je úzce spjat s ekonomickou a společensko-politickou situací i s rozvojem poznání v oblasti životního prostředí. Po negativním vývoji znečištění ovzduší před rokem 1989 došlo v 90. letech k významnému zlepšení kvality ovzduší v České republice. Nová legislativa pro oblast ochrany ovzduší byla připravena ve velmi krátké době po roce 1989. V roce 1991 vstoupil v platnost zákon č. 309/1991 Sb., o ochraně ovzduší, doplněný zákonem 389/1991 Sb., o státní správě ochrany ovzduší a poplatcích za jeho znečišťování, který poprvé v historii České Republiky zavedl s platností od roku 1998 emisní limity. Došlo k restrukturalizaci národního hospodářství, k modernizaci zdrojů a mnoho z nich ukončilo nebo omezilo provoz.

Trend vývoje úrovně emisí plyných znečišťujících látek je ukázán na obr. č.2 a obr. č.3 v období roku 1990 až 2001 je pokles znečištění výraznější než po roce 2001, ovšem je stále možné říci, že množství vypouštěných znečišťujících látek nadále klesá, i když v některých případech jen velice mírně, i v závislosti na panujících rozptylových podmínkách.[17]

Obr. 2: vývoj celkových emisí hlavních znečišťujících látek, 1990-2018 [17]



Obr. 3: Vývoj celkových emisí částic, 1990-2018 [17]



4.2. Kvalita ovzduší v ČR

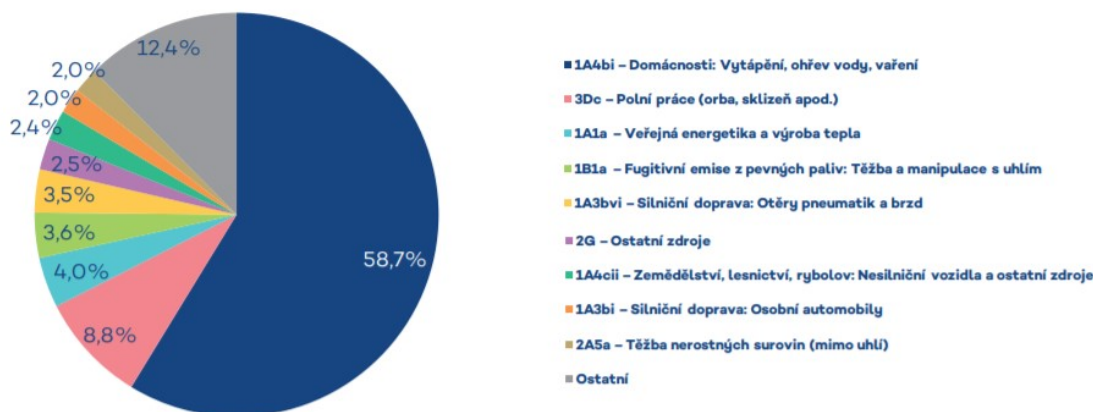
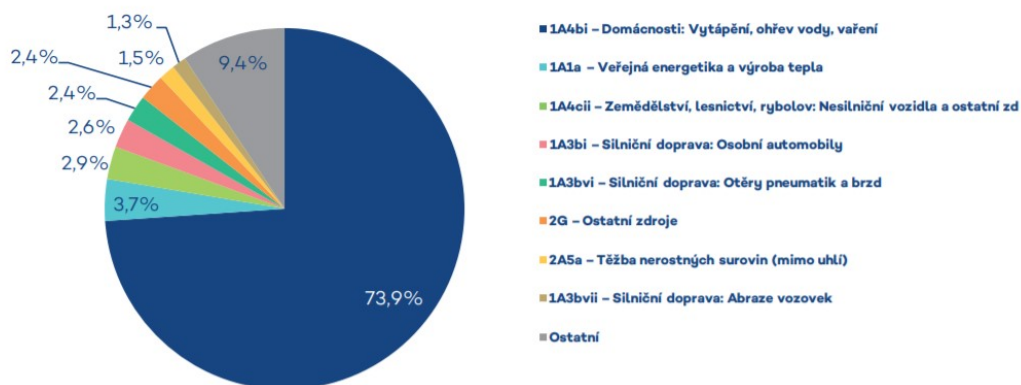
Hodnocení kvality ovzduší se provádí s ohledem na ochranu zdraví populace a na ochranu ekosystémů a vegetace. Koncentrace naměřené na monitorovacích stanicích jsou základem pro hodnocení kvality ovzduší. Měřicí síť pokrývá celou ČR, avšak v oblastech s nejvyššími koncentracemi je nejhustší.

ČHMÚ provozuje státní síť imisního monitoringu (SSIM), která je hlavní sítí monitorovacích stanic. Součástí státní imisní sítě jsou jak manuální imisní stanice (MIM), tak automatizované monitorovací stanice (AIM), z těchto stanic jsou odebírány vzorky, které jsou následně analyzovány v laboratořích ČHMÚ. Znečištění je často sledováno jak metodou manuální, tak metodou automatizovanou. [17]

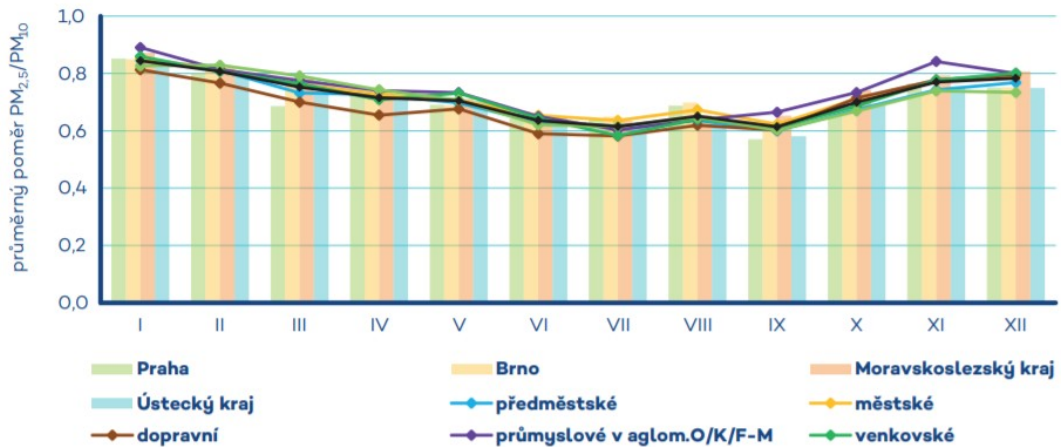
Jedním z důležitých problémů znečištění ovzduší, které je potřeba řešit při zajišťování kvality ovzduší ČR, jsou suspendované částice frakcí PM₁₀ a PM_{2,5}, pro které existují imisní limity.

4.2.1. Znečištění ovzduší suspendovanými částicemi

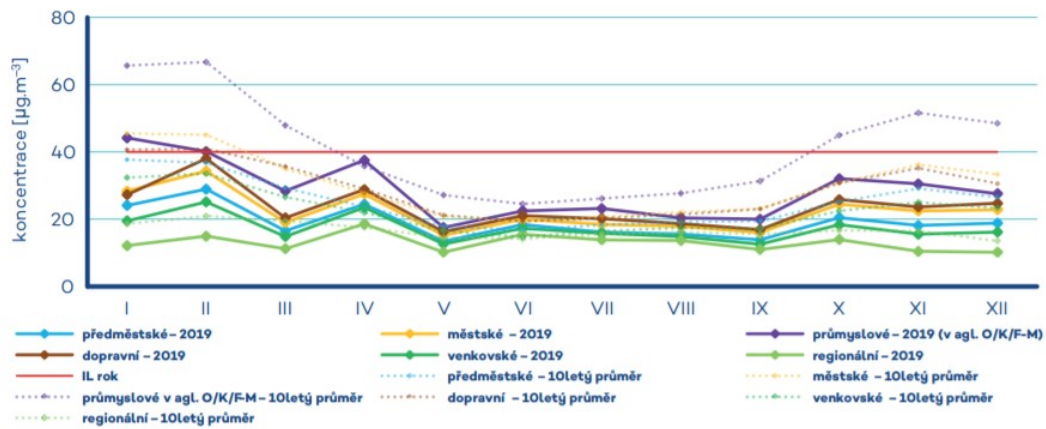
Na obr. č.4 a obr. č.5 je znázorněn podíl zdrojů emisí PM₁₀ a PM_{2,5}. Je z nich patrné, že v obou případech mezi hlavní zdroje emisí částic v roce 2018 patřily domácnosti. [17]

Obr. 4: Podíl sektorů NFR na celkových emisích PM₁₀, 2018. [17]Obr. 5: Podíl sektorů NFR na celkových emisích PM_{2,5}, 2018. [17]

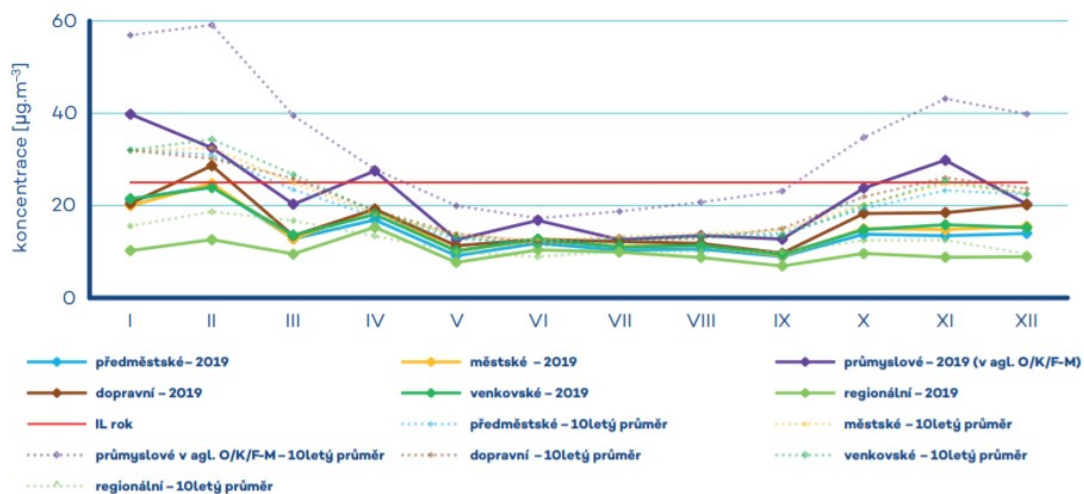
Na obr. č. 6 je vidět, že poměr frakcí PM_{2,5} a PM₁₀ není konstantní, závisí na charakteru lokality a vykazuje sezónní průběh. Dle údajů ČHMÚ se v roce 2019 pohyboval v rozmezí 0,61 až 0,84, v průměru z 58 stanic v ČR, s nižšími hodnotami v teplejších obdobích. Emise ze spalovacích zdrojů vykazují vyšší zastoupení frakce PM_{2,5}, než. Např. emise ze zemědělské činnosti. Vyšší podíl frakce PM_{2,5} ve frakci PM₁₀ může být způsoben vytápěním v zimním období. Pokles v jarním období a na začátku léta je v některých studiích vysvětlován například i nárůstem množství větších částic. Nejnižší poměr frakcí PM_{2,5} vůči frakci PM₁₀ je na dopravních lokalitách, přestože při spalování paliv v dopravě se emitované částice nalézají nejvíce ve frakci PM_{2,5}. Zdůrazňuje se zde význam emisí větších částic z brzdového obložení, otěrů pneumatik a ze silnic nebo případně i v důsledku resuspenze částic ze zimního posypu. [17]

Obr. 6: Průměrné měsíční poměry $PM_{2,5}$ a PM_{10} , 2019. [17]

Při pohledu na jednotlivé frakce je z obr. č. 7 a obr. č. 8 patrné, že měsíční průměrné koncentrace frakce PM_{10} zůstávají z dlouhodobého hlediska pod hodnotou imisního limitu, narozdíl od měsíční průměrné koncentrace frakce $PM_{2,5}$.

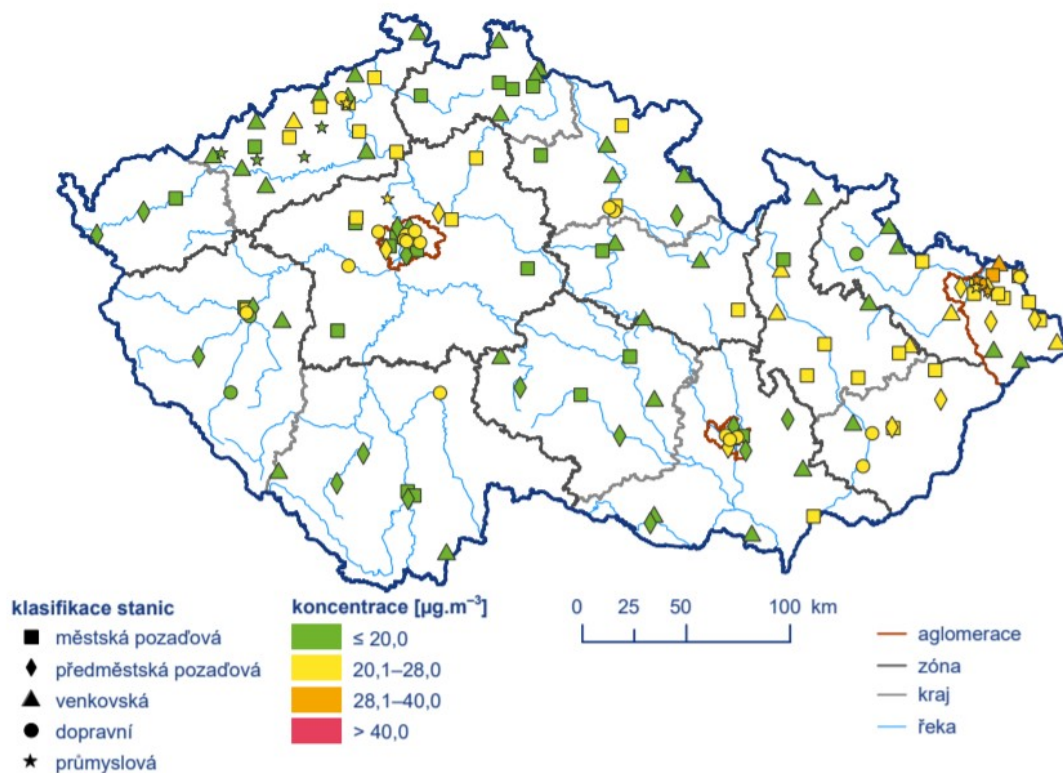
Obr. 7: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací PM_{10} (průměry pro daný typ stanice), 2019 [17]

Obr. 8: Roční chod průměrných měsíčních koncentrací PM_{2,5} (průměry pro daný typ stanice), 2019 [17]

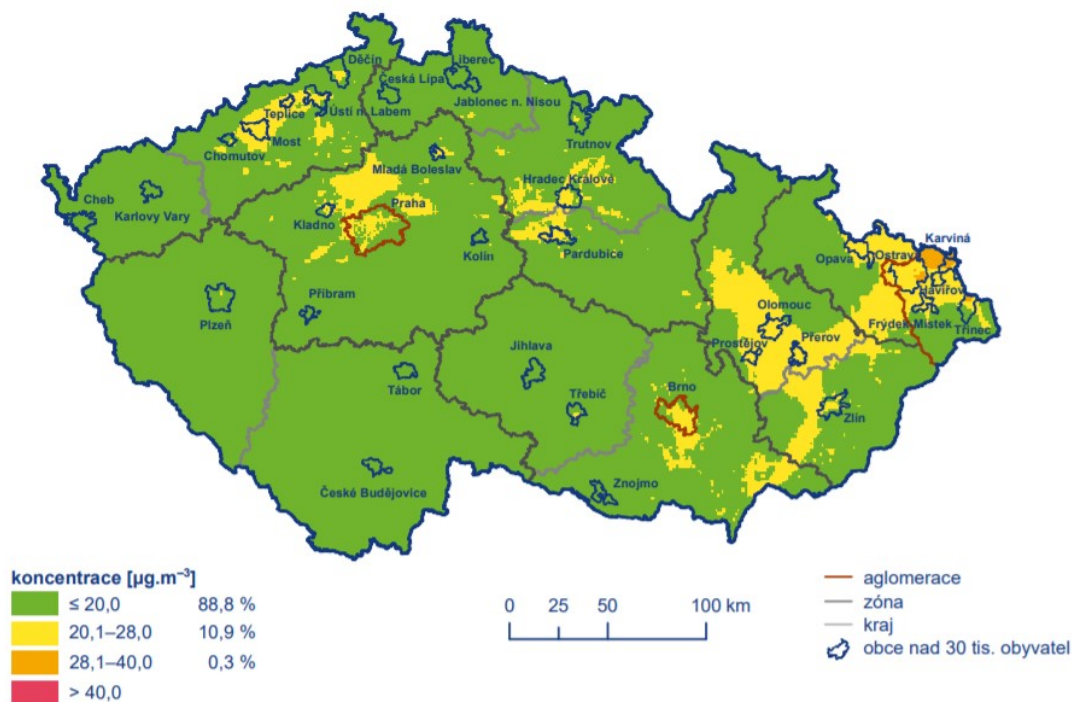


Na obr. č. 9 je znázorněna roční průměrná koncentrace PM₁₀ v roce 2019, imisní limit zde nebyl poprvé za hodnocené období 2009-2019 překročen na žádné stanici ČR. Z obr. č. 10 je zjevné, že v prostorovém rozlišení 1x1 km nebylo vymezeno žádné území ČR s nadlimitní roční průměrnou koncentrací PM₁₀. [17]

Obr. 9: Roční průměrné koncentrace PM10 měřené na stanicích imisního monitoringu, 2019 [17]

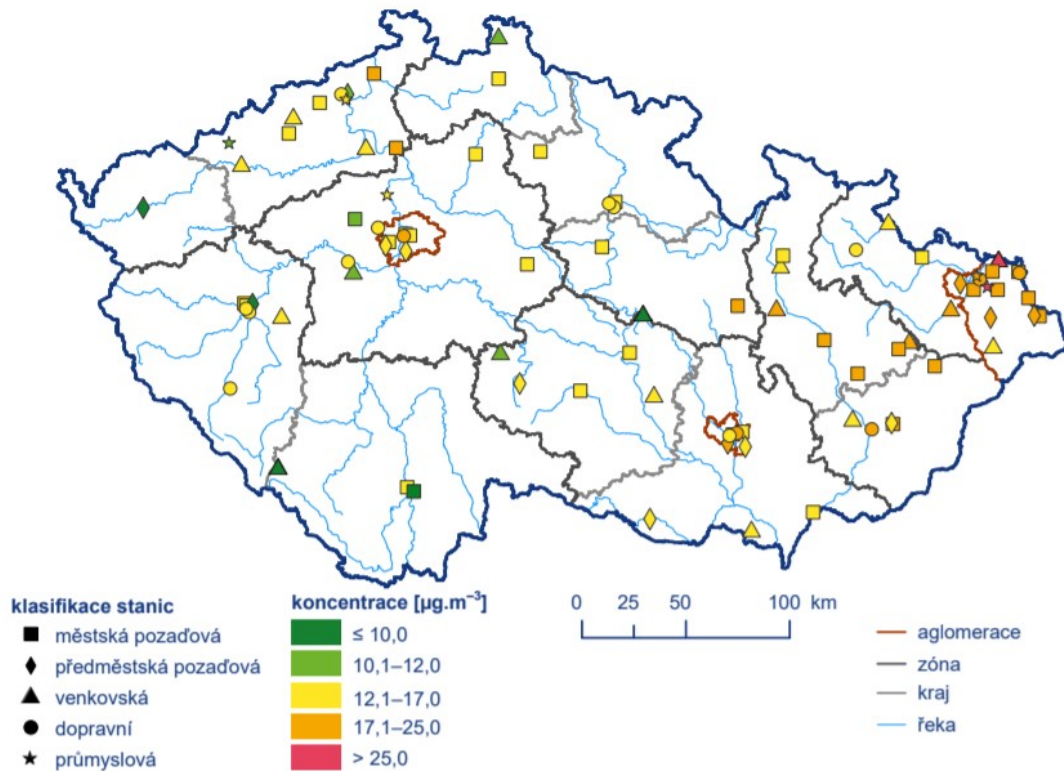


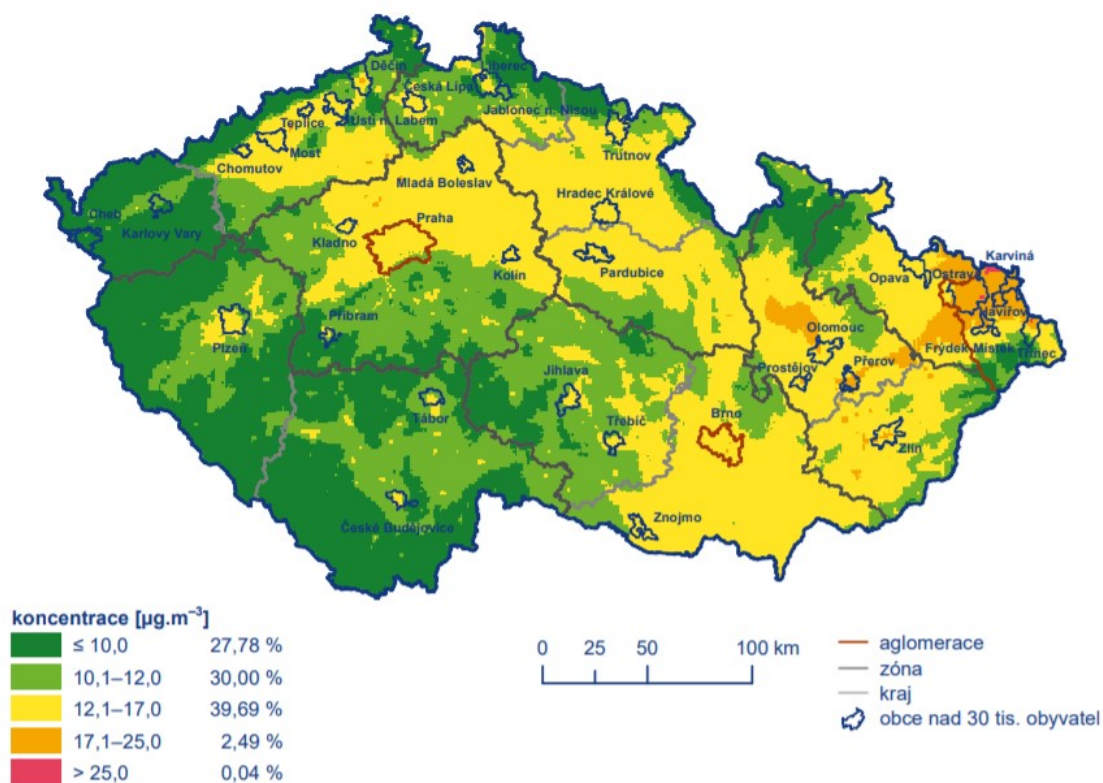
Obr. 10: Pole roční průměrné koncentrace PM10, 2019 [17]



Na obr. č. 11 je znázorněna roční průměrná koncentrace PM_{2,5}, je z něj patrné, že v roce 2019 byl imisní limit pro roční průměrnou koncentraci PM_{2,5} překročen ve 2 stanicích, obě tyto stanice leží v aglomeraci O/K/F-M (Ostrava, Karviná, Frýdek-Místek). Z obr. č. 12 je zjevné, že v této oblasti bylo vymezeno území s nadlimitní roční průměrnou koncentrací PM_{2,5}, konkrétně 0,04% území ČR. [17]

Obr. 11: Roční průměrné koncentrace PM_{2,5} měřené na stanicích imisního monitoringu, 2019 [17]



Obr. 12: Pole roční průměrné koncentrace PM_{2,5}, 2019 [17]

V roce 2019 byla jemná frakce částic PM₁ naměřena na 24 stanicích, ovšem pouze 19 z nich mělo dostatečný počet dat pro hodnocení. Na dopravní stanici Ostrava-Českobratrská byla naměřena nejvyšší roční koncentrace I maximální denní koncentrace. [17]

5. Technologie snižování emisí tuhých znečišťujících látek

5.1. Odlučovací principy

Základem všech odlučovacích procesů je separace částic z proudu plynu na odlučovací plochy. Podle druhu odlučovače u tuhých částic, může být odlučovací plochou přímo stěna odlučovače, vestavba odlučovače, povrch vláken, zrnitého materiálu nebo vrstva již odloučených částic. U některých druhů mokrých odlučovačů odlučovací plochu mohou tvořit i kapalně částice v proudu plynu nebo vodní pěna. [18]

Při odlučování částic převládá některý z principů, dle kterého se odlučovač nazývá. Principy odlučování charakterizují způsob odlučování částic a určují technické možnosti odlučovačů. [19]

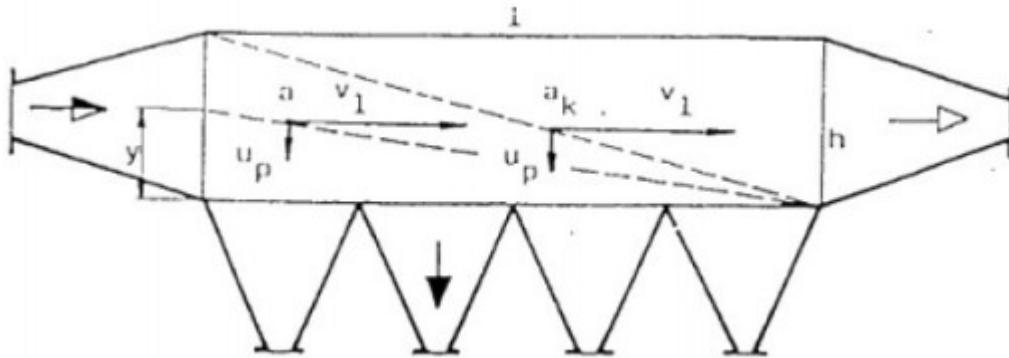
U některých odlučovačů může současně působit více odlučovacích principů, tento jev je typický zejména u filtrace, kde současně dochází k difúznímu, setrvačnému a intercepčnímu principu odloučování.[2]

Podle síly, která v daném momentu odloučení částic působí, se určí druh principu. Mezi tyto principy patří:

- 1) Gravitační princip
- 2) Setrvačný princip
- 3) Odstředivý princip
- 4) Elektrický princip
- 5) Difúzní princip
- 6) Intercepční princip

5.1.1. Gravitační princip

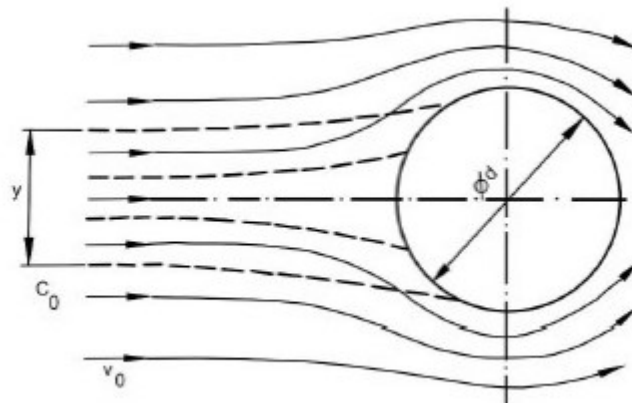
Gravitační princip odlučování je založen na působení gravitační síly na pohyb částice, je využíván u gravitačních odlučovačů. Nejjednodušším typem jsou usazovací komory - obr.č.13 [19]



Obr. 13: Gravitační princip - usazovací komora. Vstup do komory je vlevo, přičemž odlučované částice se díky vyšší hustotě oddělí a hromadí se dole. Vyčištěný plyn opouští komoru vpravo [19]

5.1.2. Setrvačný princip

Setrvačný princip využívá setrvačnosti při obtékání těles či při jinak vyvolané změně směru proudu plynu. Dochází zde k zakřivení rychlostního pole v blízkosti odlučovací plochy a trajektorie částice se vlivem setrvačnosti odchyluje od proudnice. Příkladem je obr. č.14 znázorňující obtékání válce. Setrvačný princip se široce využívá u suchých mechanických odlučovačů a je základním principem odlučování částic na kapičkách u některých typů mokrých odlučovačů a jedním ze základních principů ve filtraci. [19]



Obr. 14: Obtékání válce proudem plynu [19]

5.1.3. Odstředivý princip

Jedná se o zvláštní případ setrvačného principu, který se uplatňuje při proudění plynu ve válcových a kuželových komorách, kde na částice působí odstředivá síla. Částice jsou tedy vlivem odstředivé síly unášeny ve směru k odlučovací ploše.

5.1.4. Elektrický princip

Elektrický princip je odlučovací princip, kde působením elektrické síly na částici, je vyvolán pohyb částice směrem k odlučovací ploše. Elektrický princip se samostatně uplatňuje jako odlučovací princip u elektrických odlučovačů, kde elektrická Coulombova síla působí na nabitě částice v elektrickém poli.

V proudu plynu při obtékání těles působí elektrické síly i na nabitě částice s opačnou polaritou. Tato alternativa pak zpravidla působí s jinými odlučovacími principy a lze ji uplatnit např. ve filtraci. [19]

5.1.5. Difúzní princip

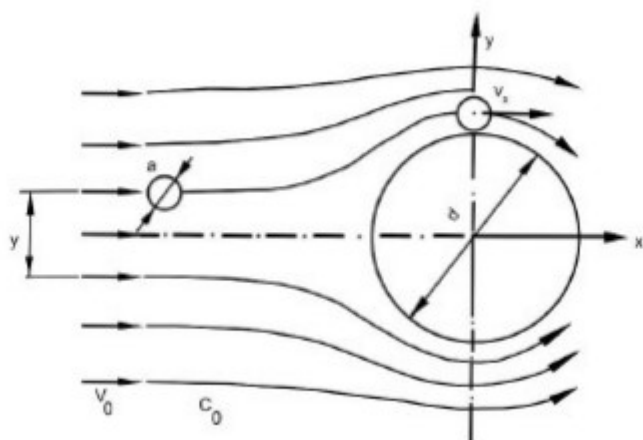
Difúzní odlučovací princip je založen na difúzi částic z proudu plynu na povrchu obtékaného tělesa a uplatňuje se při obtékání těles malou rychlostí. Difúzní odlučovací princip se zpravidla uplatňuje u malých částic $< 1 \mu\text{m}$, které podléhají v plynu účinkům Brownova pohybu a pohybují se značně nepravidelně. [18]

Vliv vnějších a setrvačných sil je zde velmi malý, avšak tento odlučovací princip nabývá velkého významu při odlučování částic na povrch filtračních vláken tvořících vláknitou vrstvu při filtraci.

5.1.6. Intercepční princip

Intercepční princip, známý také jako přímé zachycení částic je odlučovací princip, který je uplatňován zejména ve filtraci při průchodu plynu zrnitou či vláknitou vrstvou.

Na obr. č.15 je vidět, jak se částice s předpokládanou malou setrvačností, pohybující se proudnicí odloučí ve vlákňě.[19]



Obr. 15: Přímé zachycení částic v proudu plynu [19]

5.2.Odlučovače

Druhy odlučovačů se nejčastěji dělí do následujících skupin:

FILTRY

Průmyslové filtry

Filtry atmosférického vzduchu

ELEKTRICKÉ ODLUČOVAČE

Komorové odlučovače

Trubkové odlučovače

SUCHÉ MECHANICKÉ ODLUČOVAČE

Gravitační odlučovače

Setrvačné odlučovače

Vírové odlučovače

Rotační odlučovače

MOKRÉ MECHANICKÉ ODLUČOVAČE

Setrvačné odlučovače

Sprchové odlučovače

Vírové odlučovače

Proudové odlučovače

Pěnové odlučovače

Rotační odlučovače

5.2.1. Filtry

Filtrace je odlučovací proces, kterým lze dosáhnout nejvyšších odlučivostí i pro nejjemnější částice. Filtrační zařízení pro odlučování tuhých částic je děleno do dvou základních skupin, filtraci atmosférického vzduchu a filtraci průmyslovou. Obě tyto skupiny mají společný základ, což je odlučování částic ve vláknité či zrnité vrstvě. Filtrace atmosférického vzduchu je používána při větrání a v klimatizaci, maximální vstupní koncentrace částic, kterou je schopen tento princip odloučit se pohybuje v jednotkách mg/m^3 a teplota vzduchu se pohybuje v rozmezí odpovídajícímu běžným atmosférickým podmínkám. U filtrace průmyslové bývají částice zpravidla větší než u atmosférického prachu, maximální koncentrace částic se zde pohybuje v jednotkách g/m^3 a teplota plynů může dosáhnout až stovek stupňů Celsia. [19]

5.2.2. Elektrické odlučovače

Elektrické odlučovače využívají elektrických sil k odloučení tuhých nebo kapalných látek z nosného plynu. Elektrické odlučovače jsou nejpoužívanějšími odlučovači pro čištění plynů s vysokými objemovými průtoky. Hlavní předností elektrických odlučovačů je jejich vyšší odlučovací schopnost i pro jemné částice. [19]

Elektrické odlučovače lze rozdělit na komorové a trubkové a to na základě uspořádání soustavy elektrod. Další způsob rozdělení je na základě odstraňování částic z usazovacích elektrod, podle kterého jsou odlučovače rozděleny na suché a mokré, dále dle směru průtoku lze pak dělit odlučovače na horizontální a vertikální. [18]

5.2.3. Suché mechanické odlučovače

Suché mechanické odlučovače patří mezi poměrně rozšířené a vůbec nejstarší používané odlučovače, jsou založeny na využití gravitačního, setrvačného a odstředivého principu odlučování částic. Jsou konstrukčně jednoduché, spolehlivé, mají nenáročnou obsluhu, obecně nízké pořizovací i provozní náklady a jsou vhodné i pro využití ve vyšších teplotách. Hlavní nevýhodou je pak nízká odlučivost pro jemné frakce. Většinou se používají jako první stupeň u vícestupňových odlučovacích systémů k odloučení hrubších částic, protože jako samotně použité splňují jen výjimečně požadavky na emisní limity.[18]

5.2.4. Mokré mechanické odlučovače

Mokré odlučovače jsou založeny na využití odstředivého a setrvačného odlučovacího principu. V porovnání se suchými mechanickými odlučovači mají vyšší odlučivost a některé mohou účinně odlučovat i submikronové částice. Jako další kladné charakteristické vlastnosti patří např. zachycení i plyných znečišťujících látek, vhodnost pro lepidlo a abrazivní částice, použitelnost pro vysoké koncentrace částic, vhodnost i pro odlučování výbušných prachů a další. Mezi nevýhody se pak řadí např. spotřeba vody na odpar, nebezpečí koroze, potřeba kalového hospodářství, nebezpečí zamrzání a další. K odloučení částic dochází v zásadě čtyřmi způsoby: odloučením

částic na kapičkách, odloučením části na smáčeném povrchu obtékaných těles, odloučením částic na hladině kapaliny a odloučením částic na povrchu bublin plynu. Dobrá smáčivost je zásadním předpokladem použití mokrých mechanických odlučovačů. Je ale také limitujícím faktorem, jelikož se z provozních a finančních důvodů zpravidla neupravuje. [19]

Závěr

Cílem a obsahem této práce bylo popsat frakce PM_x suspendovaných částic v ovzduší, zhodnocení zdravotních účinků, popis principů měření a základních způsobů snižování emisí tuhých znečišťujících látek. Dále pak popis současné legislativy a zhodnocení situace z hlediska znečištění a znečišťování v této oblasti v České republice a zhodnocení kvality ovzduší.

První část práce popisuje základní pojmy této oblasti, které jsou důležitým základem pro pochopení této problematiky, v práci je navázáno na popis současné legislativy, která stanovuje zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší a vyhlášky na něj navazující.

Další kapitola se věnuje suspendovaným částicím frakce PM_x, popisuje jejich účinky na zdraví obyvatel a životní prostředí, z kapitoly je zřejmé, že čím menší částice, tím větší riziko pro člověka představuje. Dále se kapitola zabývá různými principy měření částic.

Navazující kapitolou, je tedy současná situace v České republice, práce se zde věnuje vývoji a kvalitě ovzduší v České republice a konkretizuje na stav znečištění suspendovanými částicemi PM_x. Na závěr se práce zaměřuje na technologie ke snižování emisí tuhých znečišťujících látek. Kde jsou popsány odlučovací principy a jejich způsoby využití v různých odlučovačích.

Seznam použité literatury

- [1] Zákon 201/2012 Sb. Zákon o ochraně ovzduší. Dostupný z: <https://www.mzp.cz/cz>
- [2] Hemerka, J., Vybíral, P.: Ochrana ovzduší, Nakladatelství ČVUT v Praze, 2010, ISBN 978-80-01-04646-3
- [3] Český hydrometeorologický ústav [online]: Dostupné z www.chmu.cz
- [4] Český hydrometeorologický ústav: Znečištění ovzduší na území České Republiky v roce 2012, ročenka ČHMÚ, Praha, 2013, ISBN – 978-80-87577-20-2. Dostupné z www.chmu.cz
- [5] Oxidy síry [online]. 2014 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <http://arnika.org/oxidy-siry>
- [6] Oxidy dusíku [online]. 2014 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://arnika.org/oxidy-dusiku>
- [7] Oxid uhelnatý [online]. 2014 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <http://arnika.org/oxid-uhelnaty>
- [8] Oxid uhličitý [online]. 2014 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: <https://arnika.org/oxid-uhlicity>
- [9] Příručka ochrany kvality ovzduší [online]. 2013 [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzdusi/\\$FILE/000-prirucka_OPLZZ_komplet-20190708.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzdusi/$FILE/000-prirucka_OPLZZ_komplet-20190708.pdf)
- [10] Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU) [online]. [cit. 2020-11-08]. Dostupné z: https://www.irz.cz/repository/latky/polycyklicke_aromaticke_uhlovodiky.pdf
- [11] Platná legislativa [online]. Dostupná z: <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf>
- [12] Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečištění a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Dostupná z: <https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf>

- [13] Suspendované částice [online]. Dostupné z:
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Znecistenisusp_castice.pdf
- [14] Particulate Matter (PM) Pollution [online]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [15] TZB-info [online]. Camfil s.r.o. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/potrubia-jeho-soucasti/15062-pm-fracce-nejmensich-anejskodlivejsich-castic-nove-zamereni-na-ochranu-lidskeho-zdravi>
- [16] Dvořáková Michaela, BP: Levné přístroje pro měření čistoty ovzduší. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193227
- [17] Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2019, grafická ročenka 2019. Dostupné z:
https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/19groc/gr19cz/Obsah_CZ.html