



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

EMISE TUHÝCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK

EMISSIONS OF SOLID POLLUTANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Strnad

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Ondřej Strnad**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Emise tuhých znečišťujících látek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Prachové částice v současné době stojí v popředí zájmu ekologů i energetiků. Náplní bakalářské práce je rešerše o vlastnostech prachových částic vzniklých při spalování tuhých paliv a o metodách jejich eliminace. Součástí práce bude návrh zařízení na eliminaci těchto emisí.

Cíle bakalářské práce:

- přehled vlastností tuhých znečišťujících látek a dopad na zdraví člověka a ŽP
- přehled metod eliminace koncentrací TZL
- experimentální získání dat pro návrh odlučovače TZL
- výpočet a návrh zařízení pro snižování koncentrace TZL

Seznam doporučené literatury:

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-708-0517-X.

HEMERKA, Jiří, Pavel VYBÍRAL. Ochrana ovzduší. Praha: ČVUT v Praze, 2010. ISBN 978-80--1-04646-3

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Práce pojednává o problematice a vlastnostech tuhých částic antropogenního původu. Popisuje principy a technologie pro jejich odstranění z proudu spalín a zamezení úniku do atmosféry. Zaměřuje se na druhy odlučovačů, především na mechanické odlučovače. Práce zahrnuje experimentální část zahrnující získání dat charakterizujících cyklonový (vírový) odlučovač.

Klíčová slova

tuhé znečišťující látky, prachové částice, emise, odlučivost, filtrace, cyklon

Abstract

The thesis deals with issue and properties of solid particles of anthropogenic origin. It describes the principles and technologies for removing them from the flue gas flow and avoiding leakage into the atmosphere. It focuses on types of separators, especially mechanical separators. The work includes an experimental part involving obtaining data characterizing the cyclone separator.

Key words:

solid pollutants, dust particles, emissions, separating capacity, filtration, cyclone

Bibliografická citace:

STRNAD, O. *Emise tuhých znečišťujících látek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 70 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem byl seznámen s předpisy pro vypracování bakalářská práce a že jsem celou práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené literatury, pod vedením vedoucího diplomové práce doc. Ing. Marka Baláše, Ph.D.

V Brně dne 25. května 2018

.....

Ondřej Strnad

Poděkování

Zde bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce panu doc. Ing. Markovi Balášovi, Ph.D. za vedení mé práce, cenné připomínky a čas strávený konzultacemi. Také bych rád poděkoval Ing. Otakarovi Štelcovi a Ing. Pavlovi Milčákovi za vedení experimentální části a pomoc se zpracováním výsledků.

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Znečišťující látky	12
2.1	Základní informace o znečišťujících látkách.....	12
2.1.1	Znečišťování a znečištění.....	12
2.1.2	Emisní limity obecné a specifické	12
2.2	Rozdělení znečišťujících látek.....	13
2.3	Přehled základních plynných znečišťujících látek	14
2.3.1	Oxid uhelnatý.....	14
2.3.2	Oxidy síry.....	14
2.3.3	Oxidy dusíku (NO _x).....	15
2.3.4	Přízemní ozon	15
2.3.5	Amoniak.....	15
2.3.6	Polycyklické aromatické uhlovodíky.....	16
2.3.7	Polychlorované bifenyly	16
3	Tuhé znečišťující látky.....	17
3.1	Tuhé znečišťující částice obecně	17
3.2	Tvar a ekvivalentní velikosti částic	17
3.3	Zrnitost částic	18
3.4	Polétavý prach	21
3.4.1	Definice frakcí PM ₁₀ a PM _{2,5}	21
3.4.2	Smog	22
3.4.3	Smogová situace	22
3.5	Hlavní zdroje emisí PM ₁₀ a PM _{2,5}	23
3.6	Kvalita ovzduší v České republice	25
3.6.1	Suspendované částice PM ₁₀	25
3.6.2	Suspendované částice PM _{2,5}	27
4	Odlučovací zařízení a principy odlučování.....	29
4.1	Celková a frakční odlučivost	29
4.2	Základní odlučovací principy	32
4.2.1	Cíle odlučovacího procesu	32
4.2.2	Odlučovací principy obecně	32
4.2.3	Gravitační princip	32
4.2.4	Setrvačný princip	34
4.2.5	Odstředivý princip	36
4.2.6	Elektrický princip.....	37
4.2.7	Difúzní princip	39
4.2.8	Intercepční princip	40
4.3	Odlučovače a jejich charakteristiky.....	41
4.3.1	Základní skupiny odlučovačů	41
4.3.2	Suché mechanické odlučovače.....	41
4.3.3	Mokrý mechanické odlučovače.....	43

4.3.4	Průmyslové filtry	44
4.3.5	Elektrické odlučovače	44
4.4	Suché mechanické odlučovače vírové (cyklonové).....	45
4.5	Mokré vírové mechanické odlučovače	49
5	Experimentální část.....	50
5.1	Cíle experimentální části	50
5.2	Technické údaje zařízení Gemos 110	50
5.3	Popis experimentu	53
5.3.1	Příprava zařízení	53
5.3.2	Příprava filtrů	53
5.3.3	Vzorkovací zařízení (zachycovač)	54
5.3.4	Měřicí profil	54
5.3.5	Odběr vzorku	57
5.4	Výpočty koncentrací vzhledem ke kyslíku.....	59
5.5	Naměřené hodnoty.....	60
5.5.1	Zhodnocení výsledků	60
5.6	Porovnání s emisními limity danými legislativními požadavky	62
6	Závěr	64
	Seznam použitých zdrojů.....	65
	Seznam obrázků	67
	Seznam použitých symbolů a zkratek.....	69

1 Úvod

Za posledních 150 let došlo k mohutnému rozmachu průmyslu a dopravy. Jako zdroj různých druhů energie slouží v drtivé většině případů fosilní paliva, především uhlí a ropné deriváty. Jejich spalováním vzniká řada níže uvedených látek, které mají negativní vliv na faunu, flóru a samozřejmě i na zdraví člověka. Jsou také považovány za jednu z příčin změn klimatu.

Na rozdíl od většiny 20. století, kdy hrál hlavní roli (především v tzv. zemích východního bloku) těžký průmysl s minimálním zájmem odpovědných osob o jeho dopady na životní prostředí, dochází v posledních letech ke změně. Byla přijata různá opatření, která mají omezit únik znečišťujících látek do atmosféry, například odsiřování v elektrárnách, filtrační technologie tamtéž či u dopravních prostředků nebo dotace na modernější kotle. Také se vymýšlejí a zdokonalují technologie pro dosažení ještě větší efektivity. Bohužel ne ve všech zemích je ochrana životního prostředí důležitým tématem.

Tato práce pojednává o tuhých částicích, což je jeden z nejčastějších druhů znečišťujících látek. Jejich význam spočívá v tom, že trápí nejen velkoměsta s hustou dopravní sítí a průmyslovými podniky, ale také obyvatele venkova, kde se kvůli lokálnímu vytápění nekvalitním uhlím a špatným rozptylovým podmínkám drží hlavně ve formě smogu.

Cílem této práce je krátce popsat nejvýznamnější druhy znečišťujících látek, uvést jejich základní vlastnosti, zdroje tuhých znečišťujících látek (TZL) a oblasti v České republice nejvíce zasažené jejich výskytem.

Stěžejním bodem práce je poté popis principů a technologií, které se v současnosti využívají pro odstranění TZL z proudu plynu. Práce také zahrnuje experiment, z jehož výsledků bude možné stanovit některé parametry cyklonového odlučovače.

2 Znečišťující látky

2.1 Základní informace o znečišťujících látkách

2.1.1 Znečišťování a znečištění

Podle zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší je znečišťující látka jakákoliv látka vnesená do ovzduší nebo v něm druhotně vznikající, která má přímo, nebo může mít po fyzikální či chemické přeměně, nebo po spolupůsobnosti s jinou látkou škodlivý vliv na život zvířat a lidí, životní prostředí, klimatický systém Země, případně na hmotný majetek [1].

Pokud mluvíme o ochraně ovzduší, je třeba rozlišit dva důležité pojmy – emise a imise: [2]

- **Emise**, nazývané také znečišťování ovzduší, znamená vypouštění (emitování) znečišťujících látek do atmosféry. Mluvíme tedy o činnosti nebo ději. Množství emisí je pak mírou znečišťování ovzduší.
- **Imise** neboli znečištění ovzduší představuje přítomnost těchto látek v ovzduší v takové míře a době trvání, že se projeví jejich škodlivý vliv na životní prostředí. Je to tedy stav, který je důsledkem předchozího děje. Mírou znečištění nazýváme množství imisí jednotlivých látek v dané oblasti v přízemní vrstvě atmosféry.

Spojení mezi emisemi a imisemi zajišťuje zemská atmosféra. Znečišťující látky jsou vzduchem přenášeny (transportovány) a dochází zde k reakcím, jejichž výsledkem mohou být látky jiné, často nebezpečnější než původní. Obsah znečišťujících látek v přízemních vrstvách atmosféry hraje hlavní roli pro míru jejich působení na příjemce – člověka, rostliny, živočichy, vodu, půdu a stavby.

Nejvyšší přípustné množství znečišťující látky (nebo skupiny látek) vnášené do ovzduší ze stacionárního zdroje znečišťování se nazývá emisní limit, vymezený v § 2 v písm. i) zákona č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. Vyjadřuje se především ve formě hmotnostní koncentrace nebo hmotnostního toku látky [3].

2.1.2 Emisní limity obecné a specifické

Obecné emisní limity jsou uvedeny pro jednotlivé znečišťující látky a jsou pro ně (nebo jejich stanovené skupiny) určeny u těch zdrojů, které nejsou zařazeny mezi tzv. jmenovitě určené technologie a jsou dány zpravidla hodnotami hmotnostních koncentrací, kombinovaných s limitními hodnotami hmotnostních toků. Specifické emisní limity jsou stanoveny u jmenovitě uvedených (vybraných) stacionárních zdrojů a určují se bez přihlídnutí k obecným emisním limitům pro znečišťující látky nebo jejich stanovené skupiny. Jedná se o typické znečišťující látky pro dané technologie. Specifické emisní limity jsou nadřazeny obecním emisním limitům [2].

Obecné i specifické emisní limity jsou technickým kritériem ochrany ovzduší.

2.2 Rozdělení znečišťujících látek

Seznam znečišťujících látek a příslušné obecné emisní limity uvádí vyhláška MŽP č. 356/2002 Sb. v Příloze č. 1 [4].

Skupinu 1 tvoří základní znečišťující látky. Ty se dělí do sedmi podskupin, které se mohou ještě dále dělit.

- Podskupinu 1.1 tvoří tuhé znečišťující látky (TZL), které dále dělíme na frakce PM_{10} a $PM_{2,5}$.
- Podskupinu 1.2 tvoří anorganické kyslíkaté sloučeniny síry, vyjádřené jako SO_2 .
- Podskupinu 1.3 tvoří anorganické kyslíkaté sloučeniny dusíku, vyjádřené jako NO_x .
- Podskupinu 1.4 tvoří oxid uhelnatý CO.
- Podskupinu 1.5 tvoří organické látky (OC), vyjádřené jako celkový organický uhlík (TOC), z nichž se sledují zvláště těkavé organické látky (VOC).
- Podskupinu 1.6 tvoří amoniak (NH_3) a amonné soli.
- Podskupinu 1.7 tvoří metan (CH_4).

Skupina 2 zastupuje azbest a těžké kovy (TK – např. olovo, arsen, kobalt...) a jejich anorganické sloučeniny, vyjádřené jako kov.

Skupinu 3 tvoří perzistentní organické látky (POP), které se dělí do čtyř podskupin.

- Podskupinu 3.1 tvoří polychlorované dibenzodioxiny (PCDD) a dibenzofurany (PCDF).
- Podskupinu 3.2 tvoří polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU, PAH).
- Podskupinu 3.3 tvoří polychlorované bifenyly (PCB).
- Podskupinu 3.4 tvoří jiné chlorované perzistentní organické sloučeniny (například trichlorbenzen).

Skupina 4 reprezentuje organické sloučeniny klasifikované jako karcinogeny, mutageny nebo jedy ovlivňující reprodukční proces, neuvedené v předchozích skupinách (např. vinylchlorid, 1,2-dibromethan...).

Skupina 5 zahrnuje organické sloučeniny halogenové, neuvedené v předchozích skupinách (např. trichloretylen, benzylchlorid ...).

Skupina 6 jsou těkavé organické látky (VOC), neuvedené v předchozích skupinách (např. formaldehyd, toluen, aceton...).

Skupinu 7 tvoří organické látky a jejich stanovené skupiny, neuvedené v předchozích skupinách (např. fenol, naftalen, organické sloučeniny chloru).

Do **skupiny 8** řadíme anorganické látky a jejich stanovené skupiny, neuvedené v předchozích kapitolách (sirovodík, kyanovodík, fosgen...).

Skupinu 9 tvoří pachové látky.

Skupinu 10 pak zastupují ekvivalenty toxicity dibenzodioxinů a dibenzofuranů, **skupinu 11 a 12** pak ekvivalenty toxicity polychlorovaných bifenyly.

Znečišťující látky můžeme rozdělit podle skupenství: mohou to být škodlivé plyny – oxid uhelnatý, siřičitany SO_x (hlavně oxid siřičitý), dusitany NO_x , amoniak, přízemní ozon, benzen a další.

Dalším nebezpečím jsou pevné částice (prachové částice, polétavý prach), které jsou většinou uhlovodíkového původu. Vznikají spalováním uhlí, ropy a paliv z ní získaných a jsou důležitou součástí smogu.

Speciální kategorií jsou těžké kovy, které nabývají různé toxicity. Nejznámějšími zástupci jsou rtuť, olovo, arsen, kadmium.

2.3 Přehled základních plynných znečišťujících látek

V následujících několika kapitolách jsou uvedeny nejdůležitější plynné znečišťující látky, jejich základní vlastnosti a dopady na přírodu a zdraví živočichů.

2.3.1 Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý (vzorec CO) je hořlavý bezbarvý plyn bez chuti i zápachu. Molekula oxidu uhelnatého je složena z atomu uhlíku a atomu kyslíku spojených trojnou vazbou.

Vzniká nedokonalým spalováním všech uhlíkatých materiálů, tedy za podmínek, kdy nedostatek kyslíku, nízká teplota a krátký čas nedovoluje materiálu oxidovat za vzniku oxidu uhličitého. CO hoří modrým plamenem, při hoření je oxidován na oxid uhličitý.

Část světové produkce CO padá na vrub přirozeným procesům, mezi které patří fotochemické procesy v troposféře, vulkanická činnost, lesní požáry a jiné přírodní procesy doprovázené hořením. V atmosféře ochotně reaguje s hydroxylovými radikály za vzniku methanu a přízemního ozónu. Konečným produktem rozkladu CO je oxid uhličitý. CO je možné považovat za nepřímo působící skleníkový plyn. Nemalé množství CO vzniká v atmosféře oxidací methanu [5].

Přibližně 60% emisí CO má na svědomí lidská činnost – především doprava a průmysl (chemický, těžký průmysl), v poslední době také vypalování deštných pralesů.

Toxicita CO závisí na množství a době, po kterou je člověk jeho působení vystaven, a je spojena především se vznikem karboxyhemoglobinu, který není schopen vázat kyslík jako hemoglobin. Otrava CO se projevuje ztmavnutím kůžemi, křečemi, kómatem a nakonec smrtí. Riziková je zvýšená hladina CO především pro osoby s chronickými záněty dýchacích cest, kuřáky a osoby s nemocemi oběhové soustavy. [5]

2.3.2 Oxidy síry

Mezi oxidy síry patří oxid siřičitý (SO_2) a oxid sírový (SO_3). Oxid siřičitý je bezbarvý, štiplavě páchnoucí plyn. Je nehořlavý, za vzniku kyselého roztoku dobře rozpustný ve vodě. Oxid sírový vzniká oxidací oxidu siřičitého.

Hlavním antropogenním zdrojem oxidu siřičitého (SO_2) je spalování fosilních paliv (uhlí a těžkých olejů), výroba kyseliny sírové a tavení rud s obsahem síry.

Při nepříznivých meteorologických podmínkách v podzimních a zimních měsících roku (často při teplotní inverzi) se v neprovětrávaných oblastech hromadí škodliviny ze spalovacích procesů – především oxidy síry, dusíku, prachové částice. Společně s mlhou vytvářejí hustý aerosol, který při vdechnutí poškozují sliznice. Vysoké koncentrace oxidu siřičitého mohou vyvolat vážné poškození plic a dýchacích cest. Koncentrace oxidu siřičitého v rozsahu 2600-2700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ způsobují klinické změny spojené s bronchospasmy u astmatiků. Opakované krátkodobé pracovní expozice vysokým koncentracím oxidu siřičitého kombinované s dlouhodobými expozicemi nižším koncentracím mohou vést k výskytu chronické bronchitidy. [6]

Oxid siřičitý je také toxický pro rostliny, neboť reaguje s chlorofylem a narušuje tak fotosyntézu. V ovzduší oxiduje s vzdušným kyslíkem za přítomnosti vody na kyselinu sírovou, která je spolu s kyselinou siřičitou příčinou kyselých dešťů. Oxid siřičitý vzniká především jako vedlejší produkt při spalování méně kvalitního hnědého uhlí, které obsahuje jak volnou síru, tak některé sulfidy, například pyrit. Pro ochranu přírodního prostředí je proto důležité odsířování kouře u elektráren. Nejčastěji se používá reakce oxidu siřičitého se sus-

penzí vápence ve vodě, při níž vzniká méně škodlivý oxid uhličitý a jako vedlejší produkt síran vápenatý (tzv. energosádrovec). [7]

2.3.3 Oxidy dusíku (NO_x)

Oxidy dusíku NO_x rozumíme především dva druhy oxidů dusíku, a to oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO₂. Na emisích NO_x se podílejí zdroje stacionární (elektrárny, teplárny, domácí topeniště atd.) a zdroje mobilní (motory dopravních prostředků). Rozložení tvorby emisí NO_x podle typů zdrojů je pro každý stát odlišné. V zemích s vysokým rozvojem automobilismu může podíl mobilních zdrojů znečištění dosahovat až 60 %, v České republice je to asi 20 %, ale stále stoupá. [8]

Oxidy dusíku vznikají při spalování fosilních paliv oxidací dusíku chemicky vázaného v palivu a molekulárního dusíku atmosférického, který se účastní spalovacího procesu. U kotlů větších výkonů je směs NO_x tvořena přibližně 95 % NO a 5 % NO₂. [8]

Kromě toho, že oxid dusičitý napomáhá vzniku kyselých dešťů, má negativní vliv na dýchací soustavu živočichů.

2.3.4 Přízemní ozon

Přízemní ozon se tvoří při účinku slunečního záření v přítomnosti oxidů dusíku, organických prchavých látek a při nízké relativní vlhkosti. Podle oblastí se mění v různých ročních obdobích a souvisí se spalováním fosilních paliv, proto se může objevit v zimě dokonce i v horských oblastech.

Přízemní ozon vzniká sledem reakcí. Podmínkou jeho vzniku je rozklad oxidu dusičitého (NO₂) v přízemních vrstvách vzduchu účinkem slunečního záření. Vznikne tak oxid dusnatý (NO) a uvolní se atomární kyslík, který okamžitě reaguje s molekulou kyslíku (O₂) za tvorby ozonu (O₃). Za normálních podmínek ozon oxiduje zpět, oxid dusnatý na oxid dusičitý a z ozonu se stává neškodný kyslík. Pokud jsou ale v prostředí přítomny prchavé organické látky a jejich radikály, které mohou nahradit ozon při reakci s oxidem dusnatým, vznikne oxid dusičitý a reakce jeho rozkladu účinkem slunečního záření produkuje další molekulu ozonu. V přízemních vrstvách atmosféry se tak hromadí ozon.[9]

Ozon je účinným oxidantem. Vdechování ozonu negativně ovlivňuje především dýchací soustavu, vyvolává pokles kapacity plic a snižuje obranyschopnost organismu. Je prokazatelně toxický i pro vegetaci.

2.3.5 Amoniak

Amoniak (nazýván také čpavek) je bezbarvý a toxický štiplavý plyn zásadité povahy lehčí než vzduch.

Většina amoniaku emitovaného do ovzduší vzniká mirkobálním rozkladem dusíkatých organických materiálů a výměšků hlavně ve formě amonných solí. Menší, ale nezanedbatelná část amoniaku je emitována při spalovacích procesech a průmyslové výrobě umělých zemědělských hnojiv. K atmosférickým emisím amoniaku přispívá také doprava (vznik amoniaku v katalyzátorech).

Amoniak se projevuje dráždivými účinky na oči, kůži a sliznici dýchacích cest. Chronická expozice zvýšeným koncentracím může způsobovat bolesti hlavy a zvracení. [10]

2.3.6 Polycyklické aromatické uhlovodíky

Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU, PAH) představují velmi širokou škálu různých látek vyznačujících se tím, že ve své molekule obsahují kondenzovaná aromatická jádra a nenesou žádné heteroatomy ani substituenty. Do skupiny PAU náleží například následující látky: naftalen, acenaftylen, acenaften, fluoren, fenantren, antracen, fluoranten, pyren, benz(a)antracen a další. [11]

Čisté sloučeniny jsou bílé nebo nažloutlé krystalické pevné látky. Jsou špatně rozpustné ve vodě, ale snadno se rozpouštějí v tučích a olejích.

PAU vznikají při spalování jakýchkoli materiálů obsahujících uhlík, pokud není dokonalé. Jedná se o spalování téměř všech druhů uhlíkatých paliv. Je nutné je očekávat obecně všude tam, kde se vyskytují vysokovroucí ropné či uhelné produkty (dehty, asfalty). Dalším uváděným zdrojem emisí PAU je výroba hliníku.

Mezi přírodní zdroje emisí patří přirozené přírodní požáry a erupce sopek. Mezi antropogenní zdroje emisí můžeme zařadit zejména:

- spalovací procesy;
- koksárenství, rafinerie ropy, zplyňování a zkapalňování uhlí;
- výrobu hliníku;
- uvolňování z materiálů, které PAU obsahují – silnice, asfaltové izolace střech apod.
- emise naftalenu a antracenu
- obecně procesy, kde dochází k nakládání s dehty, asfalty a dalšími zahřátými ropnými či uhelnými produkty;
- významným zdrojem nebezpečného benzo(a)pyrenu jsou cigarety a saze.

PAU jsou látky obecně nebezpečné pro životní prostředí i pro zdraví člověka. Jejich nebezpečnost je znásobena tím, že jsou velmi stabilní a mohou se šířit na velmi dlouhé vzdálenosti. Patří mezi látky karcinogenní a ohrožující zdravý vývoj plodu. [11]

2.3.7 Polychlorované bifenyly

Polychlorovanými bifenyly (PCB) se nazývají syntetické, organické sloučeniny vyráběné a masivně používané hlavně mezi 30. a 70. lety minulého století. PCB jsou nechtěným produktem řady průmyslových výrob, vznikají při spalování odpadů i při hoření olovnatého benzínu. Jsou to látky teplotně odolné, nehořlavé a chemicky stálé, našly proto široké průmyslové uplatnění v chladících, izolačních a mazacích systémech, byly běžným aditivem barev, lepidel, vosků, plastů, pesticidů i balících papírů. Dodnes jsou přítomny v transformátorech a kondenzátorech. PCB kontaminují v podstatě všechny složky životního prostředí. Větrm a vodou mohou být přenášeny na velké vzdálenosti. [12]

Člověk může být PCB vystaven vdechnutím, požitím a kožním kontaktem. Akutní otravy nejsou příliš časté a projevují se např. únavou, bolestí hlavy, ztrátou vlasů, nebo bronchitidou. Chronické otravy jsou daleko nebezpečnější. U zvířat bylo zaznamenáno poškození jater, krevního oběhu a problémy s reprodukčním cyklem i s hormonálním a imunitním systémem. Od roku 2013 jsou PCB považovány za lidské karcinogeny (1 dle IARC). [12]

3 Tuhé znečišťující látky

3.1 Tuhé znečišťující částice obecně

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

Tuhé částice se do ovzduší dostávají různými procesy. Ty mohou být přírodní – například vulkanická činnost, odpařování a zvětrávání, nebo antropogenní (způsobené činností člověka). Za hlavní antropogenní zdroje se považují především spalovací procesy a také průmyslová a zemědělská činnost.

Kovy a další toxické látky bývají vázány spíše na jemné částice, které setrvávají v ovzduší delší dobu jako suspendované částice a mají tak předpoklady pro přenos na delší vzdálenosti [2].

Pojem TZL zaštiťuje obecně všechny formy výskytu těchto částic v emisích i imisích. Existují pro ně různé názvy – záleží na způsobu vzniku nebo jejich shodných vlastnostech: jako **prach** jsou označovány částice vznikající při mechanických operacích, erozích hornin, sopečnou činností. Jestliže není potřeba zdůraznit způsob vzniku, můžeme tento pojem použít obecně pro všechny formy výskytu tuhých částic. **Popílkem** nazýváme částice produkované spalováním pevných paliv, **dým** jsou jemné tuhé i kapalné částice vznikající kondenzací a tuhnutím par látek. **Kouř** pak zahrnuje částice vznikající spalováním organických látek obsahujících převážně uhlík. [2]

Důležitý je pojem **aerosol**, kterým chápeme jemné tuhé i kapalné částice v ovzduší, které setrvávají ve stavu vznosu. **Suspendované částice** jsou jemné částice atmosférického prachu, které zůstávají delší dobu ve vznosu a mají předpoklady pro dálkový přenos. [2]

Nejdůležitější vlastností souboru tuhých částic z hlediska jejich odlučování je specifikace jejich tvaru, zrnitosti (granulometrickém složení) a hustoty.

3.2 Tvar a ekvivalentní velikosti částic

Tvar částic se odvíjí v první řadě od způsobu jejich vzniku. Ideální tvar je koule a takové částice vznikají kondenzací a tuhnutím par látek. Složitější tvar mají částice vznikající mechanickými operacemi (drcení, mletí). Některé částice, často produkované spalovacími procesy, mohou obsahovat dutiny různých velikostí. Z toho vyplývá, že střední hustota částice ρ_c , kterou definujeme k vnějšímu rozměru částice, bývá nižší než hustota materiálu ρ_m , ze kterého je částice tvořena.

U částic izometrického tvaru (částice, které mají všechny tři rozměry vzájemně srovnatelné – nejsou vláknité, laminární) se v závislosti na způsobu stanovení jejich velikostí a vlastností pracuje s tzv. ekvivalentními velikostmi částic. Jedná se o náhradní kulové částice, které sdílí s původní částicí společnou určitou typickou vlastnost. Můžeme pak hovořit o ekvivalentní velikosti podle: průmětu a_A , povrchu a_S , objemu a_V , pádové rychlosti a . [2]

Z pohledu odlučování tuhých částic, kde hlavní etapou je separace částic z proudu plynu na odlučovací plochy, je nejdůležitější ekvivalentní velikost dle pádové rychlosti a , která respektuje pohybové vlastnosti částic v proudu plynu.

Zavedeme-li u ekvivalentní částice navíc vztažnou hustotu částice $\rho_c = 1000 \text{ kg/m}^3$, dostaneme ekvivalentní velikost dle pádové rychlosti s hustotou částic 1000 kg/m^3 a značíme ji a_1 . Tato ekvivalentní velikost částice se nazývá aerodynamická velikost částice. Pro vzájemný přepočítání velikostí částic a a a_1 platí jednoduchý vztah

$$a^2 \cdot \rho_c = a_1^2 \cdot 1000 \quad (3.1). [2]$$

3.3 Zrnitost částic

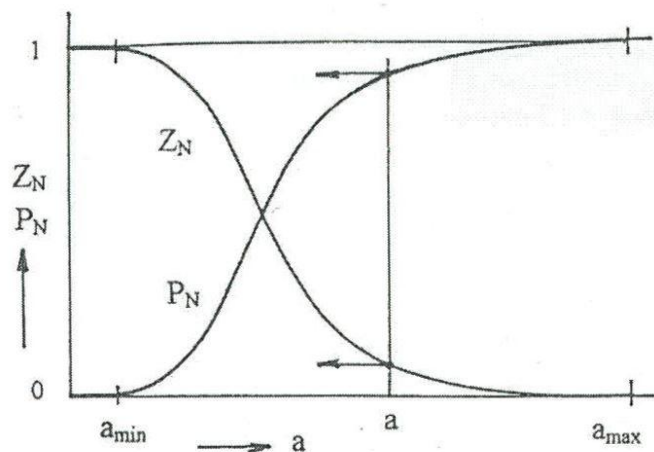
Částice v emisích mají přirozeně různé velikosti a vytvářejí tak polydisperzní soubor částic. Základním popisem tohoto souboru je informace o rozdělení velikostí částic, neboli zrnitosti (granulometrickém složení). Podle toho, kterou vlastnost částic při rozdělení sledujeme, hovoříme o rozdělení dle počtu, průmětu nebo hmotnosti.

Spojité rozdělení zrnitosti částic můžeme vyjádřit buď tzv. **kumulativní** (integrální) křivkou zrnitosti nebo křivkou **relativní četnosti**.

Kumulativní křivka zrnitosti je křivka zbytků, nebo křivka propadů. Jestliže sledujeme počet částic, dostaneme závislost $Z_N(a)$, resp. $P_N(a)$, u průmětu je $Z_A(a)$ resp. $P_A(a)$ a u odlučování nejčastějšího vyjádření, tedy rozdělení dle hmotnosti, máme závislost $Z_M(a)$ resp. $P_M(a)$. [2]

Charakteristický průběh $Z_N(a)$ a $P_N(a)$ je naznačen na následujícím obrázku. Pro každou velikost částice a musí platit:

$$P_N(a) + Z_N(a) = 1 \quad (3.2).$$



Obrázek 1 Křivka propadů a zbytků [2]

Křivka propadů (zbytků) dle počtu má také fyzikální význam – pro každou velikost částice a udává poměrný počet částic v souboru menších (větších) než je daná velikost. Pro minimální velikost částice v souboru a_{\min} je proto $P_N(a_{\min}) = 0$ a $Z_N(a_{\min}) = 1$. Pro maximální velikost naopak $P_N(a_{\max}) = 1$ a $Z_N(a_{\max}) = 0$. Jestliže provedeme derivaci křivky propadů dle

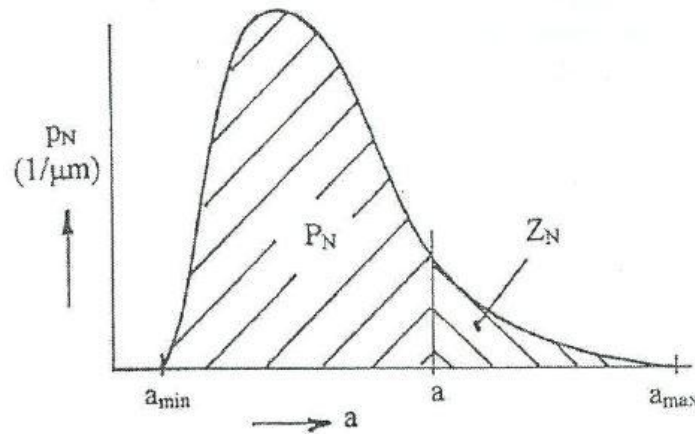
velikosti částice $dP_N(a)/da$, dostaneme diferenciální křivku zrnitosti neboli křivku četnosti dle počtu $p_N(a)$. Pokud je rozměr částice a uváděn v mikrometrech, pak je rozměr $p_N(a)$ v μm^{-1} . [2]

Pokud je křivka četností $p_N(a)$ derivační křivkou křivky propadů $P_N(a)$, musí být křivka propadů integrální křivkou křivky četností. Pro každou velikost částice a potom platí:

$$P_N(a) = \int_{a_{\min}}^a p_N(a) da; Z_N(a) = \int_a^{a_{\max}} p_N(a) da \quad (3.3).$$

Křivky propadů a zbytků $P_N(a)$ a $Z_N(a)$ se proto také nazývají integrální křivky zrnitosti. Grafická interpretace předchozích vztahů a průběh křivky $p_N(a)$ je ukázána na následujícím obrázku popisujícím, jak se v určitém souboru mění četnost p_N v závislosti na velikosti částice:

$$p_N(a) = dP_N(a)/da = dN/N \cdot da \quad (3.4). [2]$$



Obrázek 2 Křivka relativní četnosti dle počtu [2]

U každého souboru částic je možné definovat charakteristické velikosti. Mimo již zmíněných a_{\max} a a_{\min} to jsou modus podle počtu $a_{\text{mod},N}$ a medián podle počtu $a_{\text{med},N}$. Velikost $a_{\text{mod},N}$ odpovídá částici, která se v souboru nachází s největší relativní četností a velikost $a_{\text{med},N}$ odpovídá částici, pro kterou platí $P_N = Z_N = 0,5$. Dále lze v souboru stanovit řadu tzv. středních velikostí. Střední aritmetická ($i=1$), kvadratická ($i=2$) a kubická ($i=3$) velikost je definována vztahem:

$$a_{N,i} = \left[\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^i p_N(a) da \right]^{1/i} \quad (3.5)$$

a vyjadřuje velikost náhradního monodisperzního souboru částic, který má s původním polydisperzním souborem stejný celkový počet částic N a v případě střední velikosti $a_{N,1}$ i stejný součet průměrů, u $a_{N,2}$ stejný počet průmětů A , resp. povrchů S , a u $a_{N,3}$ stejný součet objemů V . Veličiny $a_{N,2}$ a $a_{N,3}$ se proto používají k vyjádření celkového průmětu nebo povrchu

souboru částic, resp. celkového objemu nebo za předpokladu konstantní hustoty částic i celkové hmotnosti částic. [2]

U běžného nesymetrického rozdělení velikostí částic (obr. 3.3) platí mezi charakteristickými velikostmi vztah

$$a_{\text{mod},N} < a_{\text{med},N} < a_{N,1} < a_{N,2} < a_{N,3} \quad (3.6). [2]$$

Ze známého rozdělení velikostí částic podle počtu je možné stanovit rozdělení velikostí částic dle průmětu a především rozdělení dle hmotnosti. Mezi příslušnými diferenciálními a integrálními křivkami zrnitosti platí analogické vztahy:

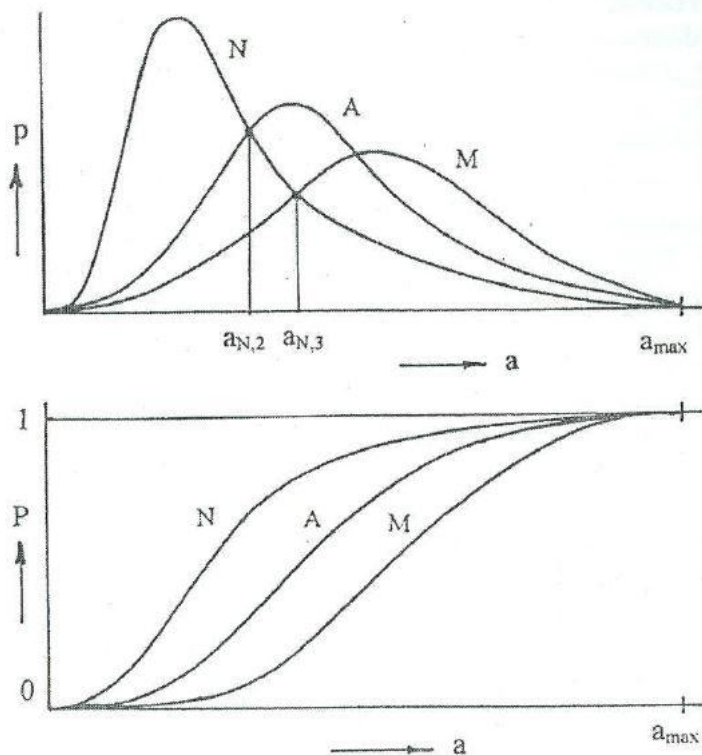
$$dP_N(a) = -dZ_N(a) = \frac{dN}{N} = p_N(a)da \quad (3.7)$$

$$dP_A(a) = -dZ_A(a) = \frac{dN}{N} = p_N(a)da \quad (3.8)$$

$$dP_M(a) = -dZ_M(a) = \frac{dN}{N} = p_N(a)da. \quad (3.9)$$

U rozdělení dle průmětu mluvíme o křivce propadů (zbytků) dle průmětu a o křivce četnosti dle průmětu. U rozdělení dle hmotnosti se jedná o křivku propadů (zbytků) dle hmotnosti a o křivku četnosti dle hmotnosti. Příslušné křivky lze také označit jako počtové, průmětové, hmotnostní. [2]

Vzájemnou souvislost mezi jednotlivými křivkami propadů a četností ukazuje následující obrázek:



Obrázek 3 Křivky propadů a relativních četností [2]

Pro účely odlučování tuhých částic, kde rozhodující fází je pohyb částic z proudu plynu k odlučovacím plochám, je nutno příslušné zrnitosti částic vyjadřovat s použitím ekvivalent-

ních velikostí dle pádové rychlosti a , resp. a_1 . Výsledky takového rozdělení obdržíme pomocí měřících metod, založených na sledování pohybu částic.

3.4 Polétavý prach

Polétavý prach jsou obecně malé pevné částice, které mohou být unášeny vzduchem na velké vzdálenosti. Mají negativní dopady na lidské zdraví a mohou být přírodního i antropogenního původu.

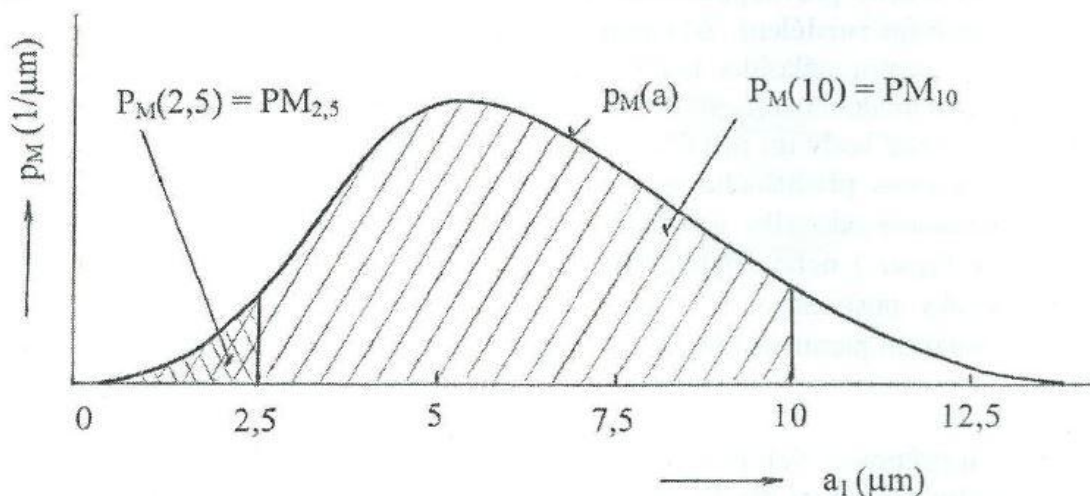
3.4.1 Definice frakcí PM_{10} a $PM_{2,5}$

Definice frakce částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ vychází z velikostí částic a_1 , což jsou aerodynamické velikosti částic s hustotou 1000 kg/m^3 .

Frakce částic PM_{10} je definována jako částice v souboru, vyjádřené ve formě aerodynamické velikosti a_1 , které jsou menší než $10 \mu\text{m}$. [2]

Obdobně **frakce částic $PM_{2,5}$** chápeme jako částice v souboru, vyjádřené ve formě aerodynamické velikosti a_1 , které jsou menší než $2,5 \mu\text{m}$. [2]

Význam těchto frakcí můžeme vidět v následujícím obrázku, kde je soubor částic vyjádřen ve formě četnosti dle hmotnosti. Hmotnostní podíl frakce PM_{10} a $PM_{2,5}$ odpovídá hodnotě propadu $P_M(a_1)$ pro velikost částic $a_1 = 10 \mu\text{m}$ a $2,5 \mu\text{m}$.



Obrázek 4 Vyjádření definice frakcí PM_{10} a $PM_{2,5}$ [2]

Kvůli neexistenci třídiče, který by ideálně (skokově) roztřídil částice u dané velikosti, se realizuje stanovení dané frakce průchodem vzorku částic třídičem s reálnými třídícími schopnostmi.

Podle Nařízení vlády č. 597/2006 Sb. jsou **PM_{10}** „částice, které projdou velikostně-selektivním vstupním filtrem vykazujícím pro aerodynamický průměr $10 \mu\text{m}$ odlučovací účinnost 50 %“, tj. definuje se zde pouze hodnota frakční účinnosti třídiče 50% právě u velikosti $10 \mu\text{m}$. [2]

Frakce **$PM_{2,5}$** definuje Nařízení vlády č. 597/2006 Sb. jako „částice, které projdou velikostně-selektivním vstupním filtrem vykazujícím pro aerodynamický průměr $2,5 \mu\text{m}$ odlučovací účinnost 50 %“, tj. definuje se zde pouze hodnota frakční účinnosti třídiče 50 % právě u aerodynamické velikosti $2,5 \mu\text{m}$. [2]

3.4.2 Smog

Smog znamená mimořádné chemické znečištění ovzduší lidskou činností při nepříznivých meteorologických podmínkách. Název pochází se spojení anglických slov smoke (kouř) a fog (mlha). Jedná se o jev, během kterého je atmosféra obohacena o složky, které v ní normálně nejsou a které jsou škodlivé pro zdraví. Rozlišujeme dva druhy smogu: redukční a oxidační.

Redukční smog (londýnský, zimní) je označení pro směs městského a průmyslového kouře s mlhou, která se vyskytuje během roku obvykle v zimním období při teplotní inverzi. V závislosti na průmyslovém znečištění je zimní smog složen převážně z produktů spalovacích procesů - oxidy síry, dusíku, prachové částice a další látky pak společně s mlhou vytvářejí hustý aerosol, který při vdechnutí poškozuje sliznice. [13]

Smog londýnského typu byl také typický pro průmyslové oblasti na území dnešní České republiky, zejména v pánevních oblastech severních Čech a na Ostravsku. Nejhorší situace nastala v 70. a 80. letech 20. století v důsledku intenzivní těžby a spalování uhlí. V 90. letech se situace zlepšila v důsledku nově přijatého zákona o ovzduší a následné výstavbě odsiřovacích zařízení v elektrárnách a dalších velkých zdrojích znečištění. [13]

Oxidační smog (losangelský, letní, fotochemický) vzniká především v oblastech s velkou mírou urbanizace vlivem působení slunečních paprsků na některé složky dopravních exhalací. Jeho součástí jsou vysoké koncentrace přízemního ozonu, kvůli kterému se může jevit jako namodralý opar, dále pak uhlovodíky, oxidy dusíku a síry.

Oxidační smog může způsobovat pálení očí, dýchací potíže, malátnost nebo snížení obranyschopnosti organismu. Má také nepříznivý vliv na vegetaci, včetně zemědělských plodin. [13]

3.4.3 Smogová situace

Nové znění **Zákona o ochraně ovzduší č.201/2012 Sb.** (platnost od 1.9.2012, přímý odkaz na celé znění je uveden ve zdrojích) definuje v §10 SMOGOVOU SITUACI takto:

(1) Smogová situace je stav mimořádně znečištěného ovzduší, kdy úroveň znečištění oxidem siřičitým, oxidem dusičitým, částicemi PM₁₀ nebo troposférickým ozonem překročí některou z prahových hodnot uvedených v příloze č. 6 k tomuto zákonu za podmínek uvedených v této příloze.

Příloha 6

Smogové situace a podmínky jejich vzniku a ukončení

1. Informativní prahová hodnota pro oxid siřičitý, oxid dusičitý a částice PM₁₀

Informativní prahová hodnota pro oxid siřičitý odpovídá hodnotě jeho koncentrace o velikosti 250 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ za dobu průměrování jedné hodiny, pro oxid dusičitý hodnotě jeho koncentrace o velikosti 200 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ za dobu průměrování jedné hodiny a pro částice PM₁₀ jejich hodnotě koncentrace o velikosti 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ za dobu průměrování dvanácti hodin.

Informativní prahová hodnota je považována za překročenou v případě, že alespoň na jedné měřicí lokalitě, není-li stanoveno jinak, reprezentativní pro úroveň znečištění v oblasti minimálně 100 km² překročila

a) hodinová průměrná koncentrace oxidu siřičitého hodnotu 250 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ve třech po sobě následujících hodinách,

b) hodinová průměrná koncentrace oxidu dusičitého hodnotu $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ve třech po sobě následujících hodinách, nebo

c) hodnota dvanáctihodinového klouzavého průměru hodinové koncentrace částic PM_{10} hodnotu $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, a to alespoň na polovině měřicích lokalit reprezentativních pro úroveň znečištění v oblasti minimálně 100 km^2 , nebo na dvou měřicích lokalitách, pokud jsou pro úroveň znečištění v oblasti reprezentativní právě dvě měřicí lokality, a zároveň se na základě vyhodnocení předpovědi meteorologických podmínek a imisní situace během následujících 24 hodin nepředpokládá pokles koncentrace pod informativní prahovou hodnotu*.

Seznam měřicích lokalit a jejich reprezentativnost pro konkrétní území v rámci zóny nebo aglomerace je stanoven ve Věstníku Ministerstva životního prostředí.

Imisní limity a povolený počet jejich překročení za kalendářní rok

1. Imisní limity vyhlášené pro ochranu zdraví lidí a maximální počet jejich překročení

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit	Maximální počet překročení
Oxid siřičitý	1 hodina	$350 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	24
Oxid siřičitý	24 hodin	$125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	3
Oxid dusičitý	1 hodina	$200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	18
Oxid dusičitý	1 kalendářní rok	$40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Oxid uhelnatý	maximální denní osmihodinový průměr ¹⁾	$10 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Benzen	1 kalendářní rok	$5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Částice PM_{10}	24 hodin	$50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	35
Částice PM_{10}	1 kalendářní rok	$40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Částice $\text{PM}_{2,5}$	1 kalendářní rok	$20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
Olovo	1 kalendářní rok	$0,5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0

Obrázek 5 Imisní limity [3]

3.5 Hlavní zdroje emisí PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$

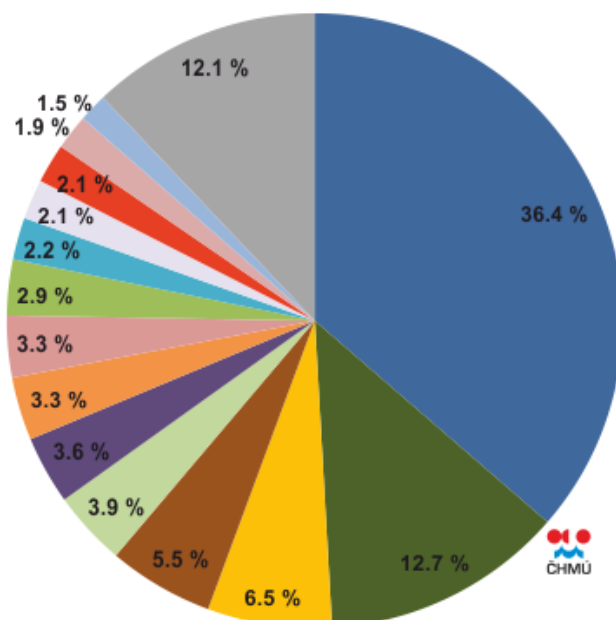
Emise PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ jsou do ovzduší přinášeny z velkého počtu zdrojů. Hlavní roli zde hrají očividné zdroje, kde TZL vznikají spalováním fosilních paliv (a látek na jejich bázi) a jsou vypouštěny komíny nebo výfuky (lokální topeniště, průmyslové zdroje, doprava). Nezanedbatelné množství emisí pochází z tzv. fugitivních zdrojů, tedy zdrojů, kde nelze stanovit hmotnostní tok znečišťující látky. Patří sem například kamenolomy a skládky prашných materiálů. Jsou zde zahrnuty rovněž emise z otěrů pneumatik, brzdového uložení, abraze vozovek a resuspenze (znovuzvíření) částic. [14]

Jak lze vidět na obrázcích 6 a 7, hlavní zdroj PM_x emisí v roce 2015 byl sektor 1A4bi – lokální vytápění domácností. Následuje u PM_{10} 3Dc – Polní práce zahrnující vznik emisí při zpracování půdy, sklizni a čištění zemědělských plodin.

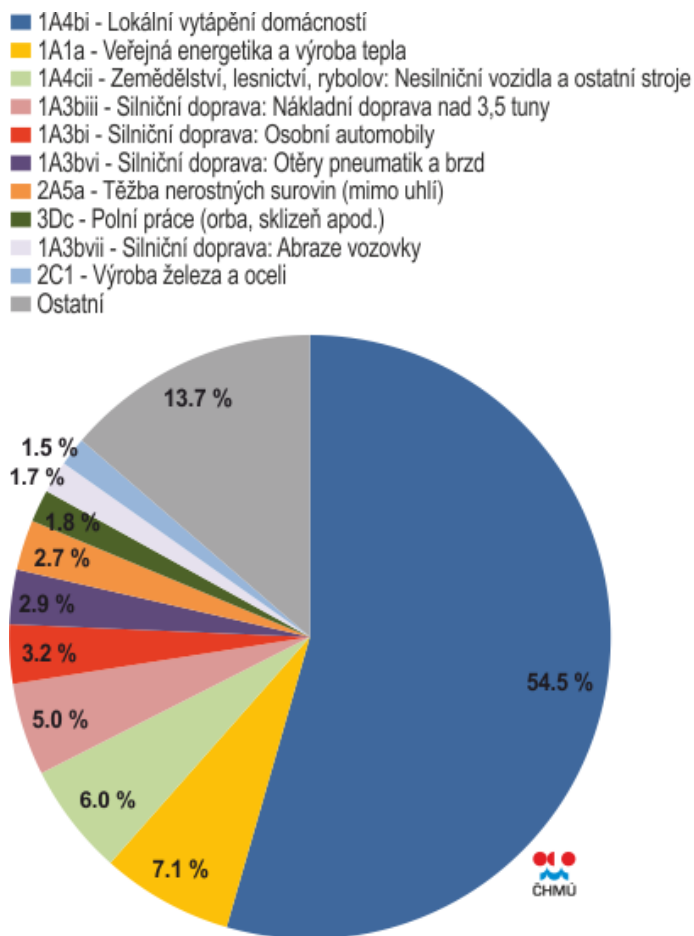
Nezanedbatelným problémem především ve velkých aglomeracích jsou emise částic produkované vozidly se spalovacími motory, především vznětovými. Tyto částice o rozměrech jednotek až stovek nanometru jsou schopny proniknout hluboko do plic, což je velkým

rizikem pro zdraví člověka. [14] Mohou způsobovat onemocnění dýchacích cest, velké nebezpečí představují pro astmatiky.

- 1A4bi - Lokální vytápění domácností
- 3Dc - Polní práce (orba, sklizeň apod.)
- 1A1a - Veřejná energetika a výroba tepla
- 1B1a - Fugitivní emise z pevných paliv: Těžba a manipulace s uhlím
- 1A4cii - Zemědělství, lesnictví, rybolov: Nesilniční vozidla a ostatní stroje
- 1A3bvi - Silniční doprava: Otěry pneumatik a brzd
- 2A5a - Těžba nerostných surovin (mimo uhlí)
- 1A3biii - Silniční doprava: Nákladní doprava nad 3,5 tuny
- 3B4gii - Chovy hospodářských zvířat - Chov broilerů
- 3B4gi - Chovy hospodářských zvířat - Nosnice
- 1A3bvii - Silniční doprava: Abraze vozovky
- 1A3bi - Silniční doprava: Osobní automobily
- 3B3 - Chovy hospodářských zvířat - Chov prasat
- 2C1 - Výroba železa a oceli
- Ostatní



Obrázek 6 Podíl sektorů na celkových emisích PM₁₀ v r. 2015 [14]

Obrázek 7 Podíl sektorů na celkových emisích PM_{2,5} v r. 2015 [14]

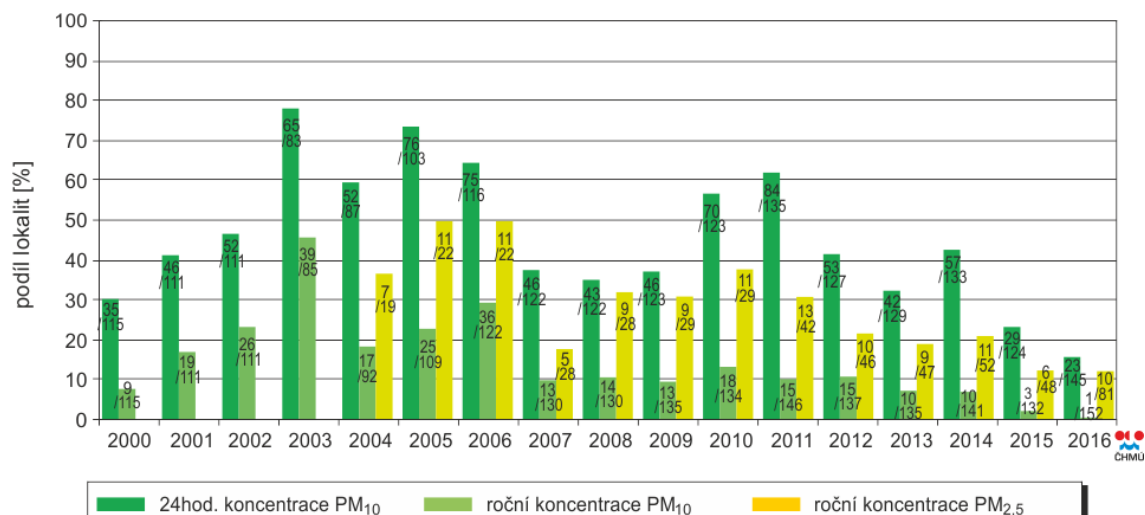
3.6 Kvalita ovzduší v České republice

Nejnovější údaje o znečištění ovzduší suspendovanými částicemi frakcí PM₁₀ a PM_{2,5} zveřejněné Českým hydrometeorologickým ústavem (ČHMÚ) pocházejí z roku 2016. Vyplývá z nich, že znečištění ovzduší suspendovanými částicemi frakcí PM₁₀ a PM_{2,5} zůstává jedním z hlavních faktorů negativně ovlivňujících kvalitu ovzduší v ČR. Překračování imisního limitu PM₁₀ a PM_{2,5} se stále významným způsobem podílí na zařazení obcí mezi oblasti s překročenými imisními limity.

3.6.1 Suspendované částice PM₁₀

Imisní limit pro průměrnou 24hodinovou koncentraci PM₁₀ byl v roce 2016 překročen na 1,4 % území ČR s cca 7,3 % obyvatel. V případě průměrné roční koncentrace PM₁₀ došlo v roce 2016 pouze k lokálnímu překročení imisního limitu na jedné stanici. [14]

K překročení 24hodinového imisního limitu PM₁₀ došlo v roce 2016 na 15,9 % stanic (23 stanic z celkového počtu 145 s dostatečným počtem dat pro hodnocení). To je méně než v roce 2015, kdy bylo překročení denního imisního limitu PM₁₀ zaznamenáno na 23,4 % stanic (29 stanic ze 124, viz následující obrázek 8). [14]

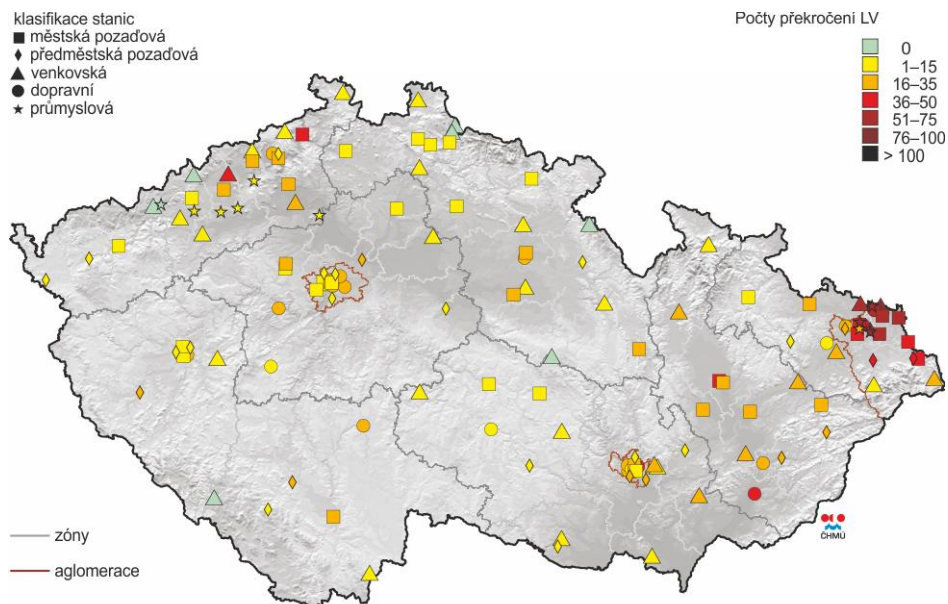


Poznámka
Číslo u každého sloupce vyjadřuje počet stanic, na kterých došlo k překročení imisního limitu (před lomítkem) z celkového počtu stanic (za lomítkem) s dostatečným měřením pro hodnocení.

Obr. IV.1.8 Podíl lokalit, kde došlo k překročení imisního limitu pro průměrnou 24hod. koncentraci PM₁₀ a průměrnou roční koncentraci PM₁₀ a PM_{2,5}, 2000–2016
Obrázek 8 Lokality, kde došlo s překročení imisního limitu [14]

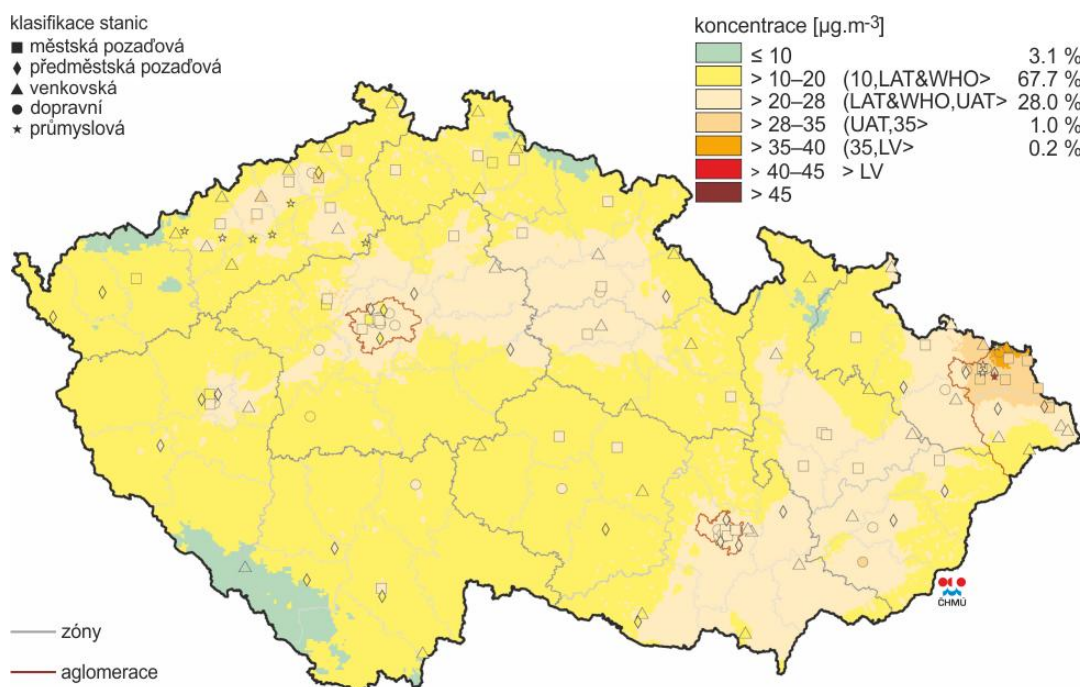
Na základě těchto výsledků je možné konstatovat, že přetrvává trend zmenšování území, na kterém došlo k překročení denního imisního limitu PM₁₀, který je s menšími výkyvy patrný od roku 2010. Došlo ke zmenšení z 2,5 % území, kde žilo cca 10,4 % obyvatel ČR v roce 2015, na již zmíněných 1,4 % s cca 7,3 % obyvatel v roce 2016. Uvedené zmenšení území s překročením 24hodinového limitu se projevilo zejména v Moravskoslezském kraji a v aglomeraci Ostrava, Karviná a Frýdek-Místek. Přesto však byla tato lokalita nejvíce zatíženou oblastí, stejně jako v předešlých letech. Denní imisní limit PM₁₀ zde byl v roce 2016 překročen na většině stanic. [14]

24hodinový imisní limit PM₁₀ však bývá překračován i v dalších zónách a aglomeracích. V roce 2016 nebylo překročení zaznamenáno v zónách Severovýchod, Střední Čechy, Jihozápad a Jihovýchod a v aglomeraci Praha. V aglomeraci Brno došlo v roce 2016 k překročení 24hodinového imisního limitu PM₁₀ pouze na dopravně vytížených lokalitách Brno-Svatoplukova a Brno-Zvonařka. V aglomeracích Praha a Brno bývá překročení imisního limitu spojeno především s dopravním zatížením, v již zmíněných aglomeracích Moravskoslezského kraje a ostatních zónách však dochází k překročení i na pozadových městských, předměstských a venkovských stanicích. Grafickou interpretaci můžeme vidět na obr. 9. [14]



Obrázek 9 Počty překročení hodnoty imisního limitu pro 24hod. koncentrace PM_{10} , 2016 [14]

Koncentrace PM_{10} byly nejvyšší v chladných měsících roku. Tento jev souvisí jak s vyššími hodnotami emisí částic ze sezonních tepelných zdrojů, tak i se zhoršenými rozptylovými podmínkami, které jsou častější v tomto období. Pole roční průměrné koncentrace PM_{10} představuje obr. 10.



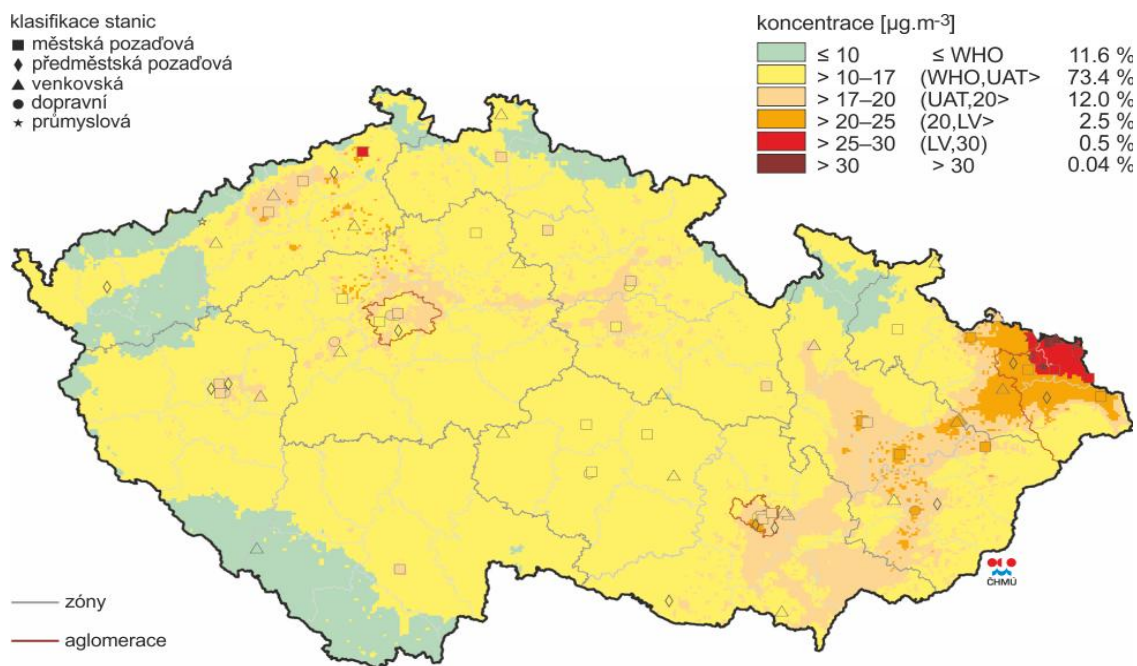
Obrázek 10 Pole roční průměrné koncentrace PM_{10} v r. 2016 [14]

3.6.2 Suspendované částice $PM_{2,5}$

Ke snížení úrovně znečištění ovzduší při porovnání let 2015 a 2016 došlo i v případě částic $PM_{2,5}$ (viz obr. 8). Emisní limit pro průměrnou roční koncentraci $PM_{2,5}$ byl překročen na 0,5 % území ČR s cca 3 % obyvatel oproti 0,9 % plochy s 5,1 % obyvatel v roce 2015. K pře-

kročení limitu došlo v roce 2016 na devíti stanicích v Moravskoslezském kraji a na jedné stanici v kraji Ústeckém. Překročení imisního limitu bylo zaznamenáno na 10 stanicích (12,4 %) z celkového počtu 81, přičemž v roce 2015 došlo k překročení na 6 stanicích (12,5 % z 48). [14]

Vyšší hodnoty znečištění ovzduší $PM_{2,5}$ byly zaznamenány opět hlavně v chladném období roku a jsou, podobně jako u PM_{10} , důsledkem emisí z vytápění a horších rozptylových podmínek (obrázek 7). Stejně jako u PM_{10} byly nejvyšší průměrné měsíční koncentrace $PM_{2,5}$ v roce 2016 naměřeny v lednu. [14]



Obrázek 11 Pole roční průměrné koncentrace $PM_{2,5}$ v r. 2016 [14]

4 Odlučovací zařízení a principy odlučování

4.1 Celková a frakční odlučivost

Při návrhu nebo výběru vhodného odlučovače musíme vzít v potaz několik faktorů:

- dosažená celková odlučivost, resp. koncentrace částic na výstupu ze zařízení
- spotřeba energie pro odlučování ovlivněná tlakovou ztrátou odlučovače
- investiční, pořizovací a provozní náklady.

Funkcí každého odlučovacího systému je odloučení nežádoucích příměsí z proudu plynu na minimálně hodnotu emisního limitu. Označíme-li hmotnostní tok částic na odlučovači na přívodu (vstupu) \dot{M}_p , \dot{M}_v na výstupu a \dot{M}_z jako záchyt, dostaneme celkovou odlučivost O_c , resp. celkový průnik P_c určené dle vztahu: [2]

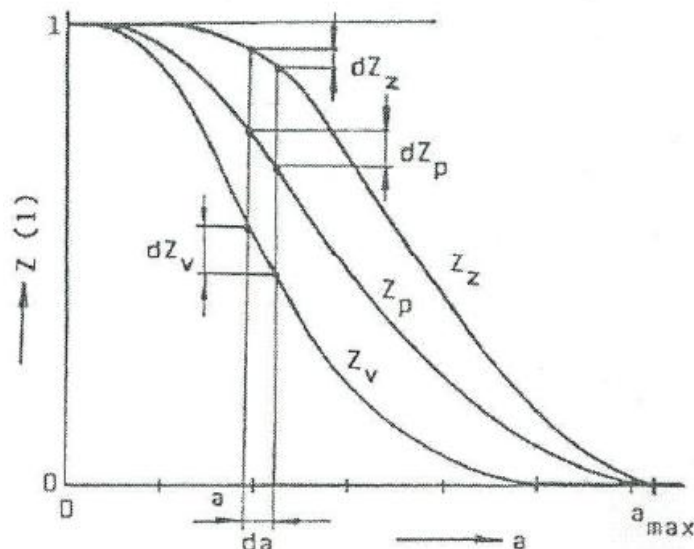
$$O_c = \frac{\dot{M}_z}{\dot{M}_p} = \frac{\dot{M}_p - \dot{M}_v}{\dot{M}_p} = 1 - \frac{\dot{M}_v}{\dot{M}_p} = 1 - P_c \quad (4.1).$$

Hmotnostní toky částic na vstupu a výstupu se stanovují měřením hmotnostních koncentrací C_p a C_v (mg/m^3) a příslušných objemových průtoků V_p a V_v (m^3/s). Vzhledem k tomu, že u odlučovačů lze zpravidla zanedbat změnu stavu plynu mezi vstupem a výstupem a přibližně platí $V_p = V_v$, můžeme pro celkovou odlučivost psát: [2]

$$O_c = \frac{\dot{V}_p \cdot C_p - \dot{V}_v \cdot C_v}{\dot{V}_p \cdot C_p} = \frac{C_p - C_v}{C_p} = 1 - \frac{C_v}{C_p} \quad (4.2).$$

Sledovanou hmotnostní koncentraci částic na výstupu ze zařízení C_v je třeba převést na příslušné vztažné podmínky pro danou technologii a teprve takto přepočítanou koncentraci lze porovnávat s daným emisním limitem a posoudit, zdali byl u daného zdroje dodržen.

Dosažená celková odlučivost O_c a koncentrace částic na výstupu C_v závisí na odlučovacích schopnostech odlučovače, vyjádřených závislostí frakční odlučivosti na velikosti částice $O_f(a)$ a na zrnitosti a koncentraci částic na vstupu do odlučovače.



Obrázek 12 Průběh křivek zbytků na odlučovači [2]

Zrnitosti částic v přívodu, výstupu a záchytu jsou spojeny **bilančními vztahy** na odlučovači. Pokud vycházíme z příslušných křivek zbytků na odlučovači, jejichž průběh je schematicky znázorněn na obr. 12, musí platit bilance celkových hmotnostních toků

$$\dot{M}_p = \dot{M}_z + \dot{M}_v \quad (4.3)$$

a bilance frakčních hmotnostních toků

$$\dot{M}_p dZ_p = \dot{M}_z dZ_z + \dot{M}_v dZ_v \quad (4.4).$$

Frakční odlučivost O_f vyjadřuje schopnost odlučovače odloučit částice v úzkém velikostním intervalu a ($a, a + da$) a je dána jako poměr příslušných frakčních hmotnostních toků v záchytu a přívodu:

$$O_f = \frac{\dot{M}_z dZ_z}{\dot{M}_p dZ_p} = O_c \frac{dZ_z}{dZ_p} \quad (4.5). [2]$$

Pomocí tohoto vztahu je možné u daného odlučovače při znalosti celkové odlučivosti O_c a příslušných křivek zbytků $Z_z(a)$ a $Z_p(a)$ náhradou diferenciálů da , dZ_p a dZ_z za diference Δa , ΔZ_z a ΔZ_p stanovit celý průběh závislosti frakční odlučivosti na velikosti částice $O_f(a)$. Tato závislost bývá u odlučovačů známa, protože vyjadřuje odlučovací schopnosti daného typu odlučovače - je jeho vlastností a vyplývá z odlučovacích principů, které jsou u daného odlučovače nejvíce uplatněny, a bývá pro konkrétní podmínky stanovena experimentálně. [2]

Ze vztahu (3.14) vyplývá i výpočetní postup stanovení celkové odlučivosti O_c , pokud známe průběh $O_f(a)$ a zrnitost částic na výstupu $Z_p(a)$. Integrací tohoto vztahu v celém rozsahu velikostí částic dostaneme vztah

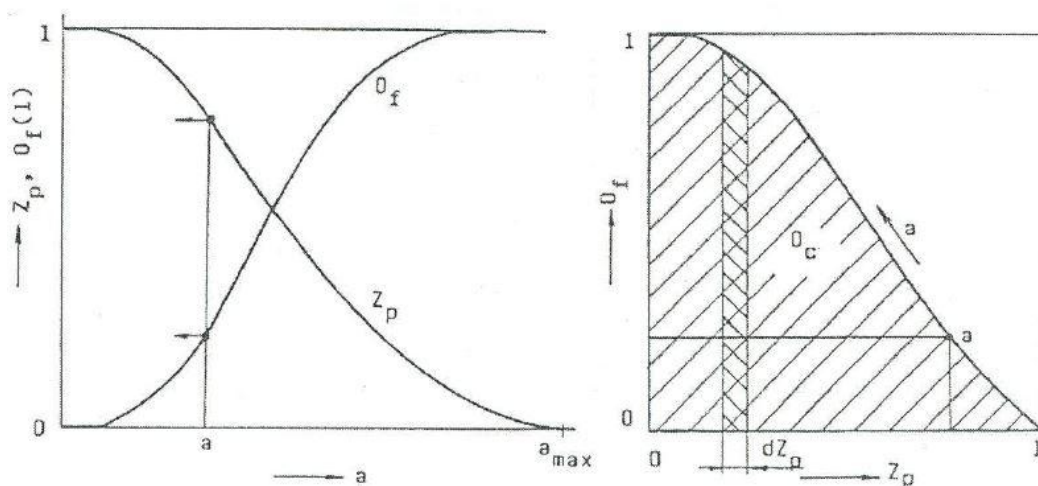
$$O_c = \int_{a_{\min}}^0 O_f(a) \cdot dZ_p(a) \quad (4.6),$$

přičemž hodnotu O_c lze přibližným způsobem (náhrada integrálního počtu sumací) stanovit jako

$$O_c = \sum_{i=1}^n O_{f,i} \cdot \Delta Z_{p,i} \quad (4.7),$$

kde n značí počet velikostních intervalů, na který rozdělíme celkový obsah velikostí částic a_{\max} až a_{\min} a O_f vyjadřuje frakční odlučivost pro velikost částice uprostřed daného intervalu. Čím je n vyšší, tím je výpočet přesnější. [2]

Vztah (4.6) představuje také grafické řešení, které je naznačeno na následujícím obrázku. Hodnota integrálu je číselně rovna ploše pod křivkou diagramu $O_f - Z_p$, který můžeme vytvořit postupným vynášením dvojic hodnot O_f a Z_p pro zvolenou velikost částice a . [2]



Obrázek 13 Stanovení celkové odlučivosti OC grafickou cestou [2]

Dalším důležitým pojmem je tlaková ztráta odlučovačů Δp_z (Pa). Je definována jako rozdíl celkových tlaků (součet statického a dynamického tlaku) na vstupu a výstupu odlučovače. Její velikost závisí na vlastnostech daného typu odlučovače. [2]

U suchých mechanických odlučovačů je tlaková ztráta závislá na charakteru proudění plynu v odlučovači a vyjadřuje se pomocí ztrátového součinitele ξ_A a příslušného dynamického tlaku jako

$$\Delta p_z = \xi_A \cdot \frac{v_A^2}{2} \cdot \rho \quad (4.8),$$

kde v_A je charakteristická rychlost plynu v odlučovači.

U mokrých mechanických odlučovačů se mění množství cirkulující vody v systému, která se proudem plynu strhává a rozprašuje. Tlaková ztráta tedy kromě průtoku plynu také závisí na měrné cirkulující vody

V případě průmyslových filtrů způsobuje tlakovou ztrátu především průchod plynu filtračním materiálem a přilehlou vrstvou částic, která se v pravidelných cyklech odstraňuje (re-

generace materiálu). Protože má proudění s ohledem na nízké filtrační rychlosti ($1\div 3$ cm/s) filtrační vláknitou vrstvou i vrstvou částic laminární charakter, je závislost Δp_z na průtoku (filtrační rychlosti) téměř lineární. [2]

4.2 Základní odlučovací principy

4.2.1 Cíle odlučovacího procesu

Hlavním cílem odlučování je snaha zabránit nežádoucím částicím vnik do okolní atmosféry. Je snaha separovat tyto částice z proudu plynu na odlučovací plochy, které u tuhých částic podle druhu odlučovače mohou být ve formě:

- přímo stěny odlučovače (např. u vírových odlučovačů)
- vestavby odlučovače (např. elektrické odlučovače)
- vrstvy vláknitého či zrnitého materiálu
- již odloučených částic (filtrační koláč u průmyslové filtrace)
- vodní pěny či kapalných částic v proudu plynu.

4.2.2 Odlučovací principy obecně

Podobu síly nebo přenosový děj, který se podílí na separaci částic z proudu plynu, určuje odlučovací princip. U většiny z nich se při vyjádření konečné odlučovací rychlosti částice k odlučovacím plochám u_k vychází z pohybové rovnice individuální částice, která vyjadřuje rovnováhu sil působících na pohybující se částici v proudu plynu. Obecná pohybová rovnice částice má tvar

$$M_\varepsilon \frac{d\vec{u}}{dt} = \xi \cdot \frac{\pi a^2}{2} \left| \vec{v} - \vec{u} \right| \left(\vec{v} - \vec{u} \right) \cdot \rho - V_\varepsilon \vec{\nabla} p + \vec{F}_e \quad (4.9),$$

přičemž členy na pravé straně rovnice reprezentují sílu aerodynamického odporu \vec{F}_r , vztakovou sílu \vec{F}_v a obecnou vnější sílu \vec{F}_e , které jsou v rovnováze se setrvačnou silou částice. V tomto vztahu znamená \vec{v} (m/s) rychlost plynu, \vec{u} (m/s) rychlost částice, M_ε (kg) hmotnost a V (m³) objem částice, ξ (–) součinitel odporu částice a ∇p (Pa/m) gradient tlaku. [2]

U odlučovačů je většinou jeden princip dominantní a podle něj bývá odvozen i název odlučovače. V některých případech (např. filtrace) působí současně více odlučovacích principů.

4.2.3 Gravitační princip

Podstata tohoto principu spočívá v působení gravitační síly na pohybující se částice v proudovém poli. Stěžejní je výpočet pádové rychlosti částice u_p (m/s) jako ustálené rychlosti částice v klidovém prostředí. Na částici o velikosti a a hustotě ρ_ε v klidném prostředí

s hustotou ρ působí v ustáleném stavu vnější gravitační síla, aerodynamický odpor a vztlaková síla, pro kterou v gravitačním silovém poli platí:

$$\vec{F}_v = -V_\varepsilon \cdot \rho \cdot \vec{g} \quad (4.10).$$

Z rovnováhy těchto sil vyplývá obecný vztah pro výslednou pádovou rychlost

$$u_p = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot (\rho_\varepsilon - \rho) \cdot g}{3 \cdot \xi \cdot \rho}} \quad (4.11)$$

kde ξ je součinitel odporu závislý na hodnotě Reynoldsova kritéria obtékání částice Re_r definovaného jako

$$Re_r = \frac{u_p \cdot a \cdot \rho}{\eta} \quad (4.12). [2]$$

Zde ovšem narážíme na problém – Reynoldsovo číslo obtékání částice závisí na hledané hodnotě pádové rychlosti částice u_p . Proto je potřeba k jejímu výpočtu použít buď iteračního postupu se znalostí závislosti $\xi(Re_r)$, nebo zvláštního postupu s použitím komplexu veličin $\xi \cdot Re_r^2$, k jeho vyčíslení není znalost hodnoty u_p nutná.

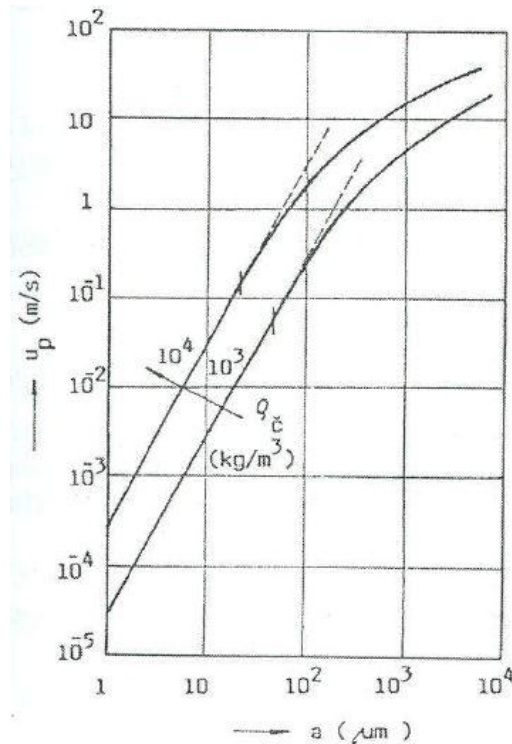
V oblasti $Re_r = 0.2 \div 400$ lze k vyjádření součinitele odporu ξ využít empirický vztah

$$\xi = \frac{24}{Re_r} \left(1 + \frac{1}{6} Re_r^{2/3} \right) \quad (4.13).$$

V oblasti $Re_r < 0.2$ (u pádové rychlosti se jedná o velikosti částic cca do 30 μm) platí pro výpočet součinitele odporu ξ tzv. Stokesův zákon $\xi = 24/Re_r$ a pro výpočet pádové rychlosti

$$u_p = \frac{a^2 \cdot (\rho_\varepsilon - \rho) \cdot g}{18 \cdot \eta} \quad (4.14),$$

kde η (Pa·s) je dynamická viskozita plynu. Pro vzduch a standardní podmínky ($\eta = 18,15 \cdot 10^{-6}$ Pa·s a $\rho = 1,2$ kg/m³) jsou hodnoty u_p vyjádřeny v následujícím diagramu (obr. 13) pro částice s hustotou $\rho_\varepsilon = 10^3$ kg/m³ a $\rho_\varepsilon = 10^3$ kg/m⁴. [2]



Obrázek 14 Pádová rychlost částice [2]

Z hodnot u_p plyne, že ke konečnému odloučení částic z proudu plynu, kde výsledná rychlost částice může být znázorněna vektorovým součtem unášivé rychlosti (rychlost plynu v gravitační komoře) a pádové rychlosti u_p , je možné gravitační princip použít pouze jako předodlučovač – pro odlučování poměrně velkých částic ($a > 100 \mu\text{m}$) např. ve dřevozpracujícím průmyslu. Lze jej také použít v kombinaci s dalšími odlučovacími principy – např. se setrvačným. [2]

4.2.4 Setrvačný princip

Pro setrvačný princip je klíčová setrvačnost částic při obtékání překážek, tedy změna směru proudu plynu. Z řešení pohybové rovnice částice je patrné, že při této změně se vlivem setrvačnosti odchyluje výsledná trajektorie částice od proudnice a při vhodném uspořádání překážky částice dosáhne odlučovací plochy.

Pro pohyb částice v oblasti platnosti Stokesova zákona za předpokladu působení gravitační síly a vztlaku bude tvar pohybové rovnice (4.1):

$$\frac{\pi \cdot a^3}{6} \rho_c \frac{d\vec{u}}{dt} = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a \cdot (\vec{v} - \vec{u}) + \frac{\pi \cdot a^3 \cdot (\rho_c - \rho) \cdot \vec{g}}{6} \quad (4.15)$$

přičemž první člen na pravé straně rovnice představuje aerodynamický odpor částice \vec{F}_r . Jestliže podělíme celou rovnici komplexem $3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a$, rovnice přechází do tvaru

$$\tau_c \frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{v} - \vec{u} + \vec{u}_p \quad (4.16),$$

kde $\tau_\varepsilon = \frac{a^2 \cdot \rho_\varepsilon}{18 \cdot \eta}$ je doba relaxace částice v sekundách, \vec{u}_p značí již zmíněnou pádovou rychlost a člen $\left(\vec{v} - \vec{u}\right)$ představuje relativní rychlost obtékání částice \vec{v}_r . [2]

Hlavním bezrozměrným kritériem plynoucím z pohybové rovnice částice a popisujícím její chování je Stokesovo kritérium definované jako

$$Stk = \frac{\tau_\varepsilon \cdot v_0}{l} \quad (4.17),$$

kde v_0 (m/s) představuje charakteristickou rychlost proudu a l (m) charakteristický rozměr překážky. Čím vyšší hodnoty Stk nabývá, tím více je trajektorie částice přímá a odchyluje se od proudnice, tedy hodnota frakční odlučivosti O_f bude také vyšší. [2]

Setrvačný odlučovací princip můžeme nalézt u prašníků v kombinaci s gravitačním principem a také u lamelových a žaluziových odlučovačů.

Důležitá veličina popisující chování částice v proudu plynu je pohyblivost částice B . Je dána jako poměr konečné rychlosti částice v klidném prostředí k vnější síle, která tento pohyb způsobila. Pokud uvažujeme pohyb částice v gravitačním poli, dostaneme vztah

$$B = \frac{\vec{u}_k}{\vec{F}_e} = \frac{u_p}{F_g} [s/kg] \quad (4.18)$$

Pokud při rovnováze v gravitačním poli zanedbáme vztlakovou sílu F_v ($\rho \ll \rho_\varepsilon$), lze do předchozího vztahu dosadit místo gravitační síly vztah pro aerodynamický odpor částice

$$F_\tau = \frac{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a \cdot u_p}{1 + K_C \cdot \frac{l_m}{a}} \quad (4.19),$$

kde l_m (m) představuje tzv. střední dráhu molekul plynu a K_C je Cunninghamova korekční konstanta ($K_C \cong 2,7$). Po dosazení vztahu (4.11) za F_g do (4.10) a vykrácení u_p dostaneme konečný tvar pro vyjádření pohyblivosti částice:

$$B = \frac{1 + K_C \cdot \frac{l_m}{a}}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a} \quad (4.20).$$

Obecná pohybová rovnice (4.1) pak po výše popsáných úpravách přejde do tvaru

$$M_\varepsilon \frac{d\vec{u}}{dt} = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a \cdot \left(\vec{v} - \vec{u}\right) + \vec{F}_e \quad (4.21),$$

po vydělení komplexem $3\pi\eta a$ má pohybová rovnice částice tvar s vyjádřením doby relaxace τ_ε a pohyblivosti částice B ve tvaru

$$\tau_\varepsilon \frac{d\vec{u}}{dt} = \left(\vec{v} - \vec{u} \right) + B \cdot \vec{F}_e \quad (4.22). [2]$$

Při řešení odlučování můžeme použít také **kvazistacionární princip**. Pokud částice např. u odlučovacích ploch koná již téměř ustálený (kvazistacionární) pohyb, můžeme v pohybové rovnici částice (4.14) zanedbat setrvačnou sílu a pohybová rovnice pak bude ve tvaru

$$\vec{u}_r = B \cdot \vec{F}_e \quad (4.23),$$

kde $\vec{u}_r = -\vec{v}_r = - \left(\vec{v} - \vec{u} \right)$ značí relativní rychlost částice vůči prostředí. [2]

4.2.5 Odstředivý princip

Je to speciální případ setrvačného principu a je užitečný především při proudění plynu ve válcových a kuželových komorách, kde na částice působí odstředivá síla. Pokud se zaměříme na oblast těsně u stěny těchto typů komor o průměru d (viz obr. 15), má zde rotující plyn pouze tangenciální (obvodovou) složku rychlosti v_t . Předpokládáme, že částice je tímto plynem unášena a její obvodová složka je $u_t = v_t$ a v radiálním směru se částice ke stěně pohybuje ustálenou rychlostí u_ρ , zatímco radiální složka rychlosti plynu v_ρ je rovna nule. Hodnotu této radiální složky získáme pomocí upraveného vztahu pro relativní rychlost částice vůči prostředí

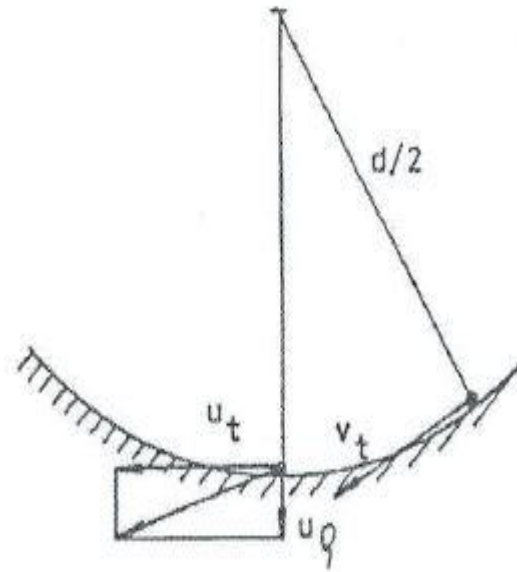
$$u_\rho = B \cdot F_o \quad (4.24),$$

kde $B = \frac{1}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a}$ je pohyblivost částice a $F_o = M_\varepsilon \cdot \frac{v_t^2}{d} \cdot 2$ je odstředivá síla. Po dosazení a úpravách dostaneme vztah pro konečnou odlučovací rychlost částice odstředivého principu

$$u_k = u_\rho = \frac{a^2 \cdot \rho_\varepsilon \cdot v_t^2 \cdot 2}{18 \cdot \eta \cdot d} \quad (4.25),$$

který je de facto analogií vztahu pro pádovou rychlost u_p u gravitačního principu. [2]

Z tohoto vztahu vyplývají i kvalitativní závěry platné pro zvyšování odlučivosti částic u vírových odlučovačů. Konečná odlučovací rychlost částice u_k i frakční odlučivost O_f roste se zmenšujícím se průměrem d válcové odstředivé komory a zvětšující se rychlostí průtoku komorou v_t . Nevýhoda je, že tyto předpoklady platí u reálných vírových odlučovačů pouze částečně, protože je potřeba brát v potaz tlakovou ztrátu odlučovačů a proudění mimo stěnu válcové komory. [2]



Obrázek 15 Odstředivý princip [2]

4.2.6 Elektrický princip

Tento princip je důležitý u zařízení s největším objemovým průtokem plynu (např. spalovací stroje). Spočívá v působení elektrické síly \vec{F}_Q na částice s nábojem Q nacházející se v elektrickém poli o intenzitě \vec{E} (V/m). Platí zde základní vzorec pro elektrickou (Coulombovu) sílu:

$$\vec{F}_Q = \vec{E} \cdot Q \quad (4.26).$$

Pro účinné odloučení částic musí platit několik základních podmínek:

- částice musí nést dostatečně velký monopolární náboj Q
- přirozený náboj částic je nedostatečný, takže se částice před vlastním odlučováním uměle nabíjejí ionty plynu dané polarity
- k ionisaci plynu dochází při koronovém výboji v okolí vysokonapěťových elektrod
- částice musí disponovat vhodnými elektrickými vlastnostmi z hlediska nabíjení částice (dielektrické vlastnosti – permitivita ε_m), tak z hlediska odporu částic ve vrstvě ρ_v (Ωm)
- v odlučovacím prostoru se mezi soustavou elektrod musí nacházet elektrické pole dostatečně vysoké intenzity.

V tomto poli se částice za přítomnosti iontů plynu nabíjejí současně po siločárách a difúzí iontů. [2]

V případě částic $a > 1 \mu m$ převládá nabíjení po siločárách. Částice o permitivitě ε_m svým působením v prostředí s permitivitou $\varepsilon \cong 1$ změní původní homogenní elektrické pole tak, že na povrchu částice dochází k zhuštění siločar. Toto zhuštění se zvětšuje s rostoucím poměrem permitivit $\varepsilon_m / \varepsilon$. Samotné nabíjení probíhá tak, že ionty plynu jsou jako malé nabitě částice elektrickou silou přivedeny na povrch částice. Ta se v poli o dané intenzitě za dobu řádově milisekund nabije na rovnovážný (saturační) náboj

$$Q(C) = \pi \cdot a^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot E \cdot \kappa \quad (4.27),$$

kde ε_0 je permitivita vakua a κ je nabíjecí konstanta závislá na dielektrických vlastnostech materiálu částic. [2]

Náboj částice Q může dosáhnout pouze celých násobků elementárního náboje $e = 1,602 \cdot 10^{-19} C$. U částice o velikosti a řádu mikrometrů v poli o běžné intenzitě $E = 2 \cdot 10^5 V/m$ a nabíjecí konstantě $\kappa = 2,5$ dosáhne náboj Q velikosti přibližně stonásobku elementárního náboje e . [2]

V případě částic $a < 1 \mu m$ je zkreslení elektrického pole přítomností částic malé a dominuje nabíjení difúzí iontů. Při normálních podmínkách u elektrických odlučovačů je možné velikost náboje částic zjednodušeně vyjádřit empirickým vztahem

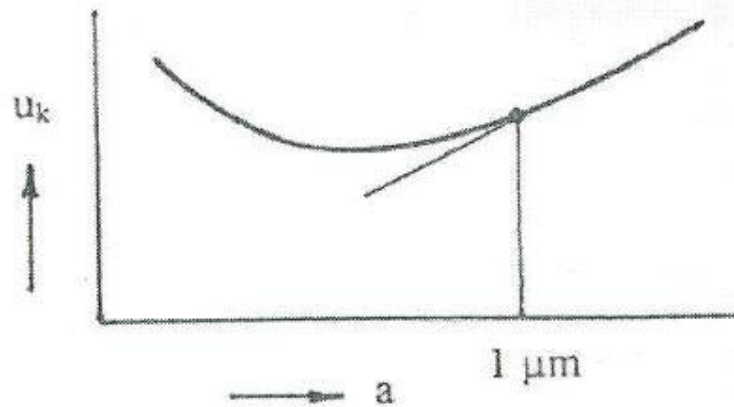
$$Q \cong 10^8 \cdot a \cdot e \quad (4.28).$$

V případě elektrického odlučovače je elektrické pole vytvořeno pomocí soustavy vysokonapěťových elektrod, které jsou umístěny v podélné osově rovině mezi usazovacími deskovými elektrodami.

U usazovacích elektrod působí vektor intenzity elektrického pole \vec{E} kolmo ke stěně elektrod, kolem kterých proudí plyn. Protože Coulombova síla působí ve směru elektrického pole, má u usazovacích elektrod rovněž kolmý směr k těmto elektrodám. Za předpokladu, že částice koná směrem ke stěně už téměř ustálený pohyb, můžeme zde opět aplikovat kvazistacionární princip. Na základě vztahů (4.12; 4.15; 4.18) ve směru kolmém na rovinu usazovacích elektrod za předpokladu $v_y = 0$ pro konečnou odlučovací rychlost částice u_k u usazovacích elektrod platí vztah

$$u_{r,y} = u_y - v_y = u_y = u_k = Q \cdot E \cdot \frac{1 + K_c \cdot \frac{l_m}{a}}{3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a}. \quad (4.29). [2]$$

Předpokládejme, že u částic $a > 1 \mu m$ převládá nabíjení po siločárách (vztah 4.19) a u menších částic nabíjení difúzí iontů (vztah 4.20). Z těchto vztahů vyplývá průběh konečné odlučovací rychlosti u_k vzhledem k její velikosti (obr. 15) a fakt, že u elektrických odlučovačů dochází k účinnému odlučování i u jemných částic. Zvýšená odlučovací rychlost u těchto částic je příčinou snížení aerodynamického odporu částice díky skluzu plynu na jejím povrchu (Cunninghamova korekce) a posléze zvýšení pohyblivosti částice B. V běžných podmínkách dosahuje hodnot řádově cm/s. [2]

Obrázek 16 Průběh u_k na velikosti elektrického odlučovače [2]

Jestliže provedeme ve vytknutém elementu elektrického odlučovače hmotnostní bilanci částic, kde hmotnostní tok částic směrem k usazovacím elektrodám zapříčiní pokles koncentrace ve směru proudu plynu, dostaneme po integraci přes celý odlučovač vztah pro frakční odlučivost částice O_f ve tvaru

$$O_f = 1 - \exp\left(-\frac{u_k \cdot S}{\dot{V}}\right) \quad (4.30)$$

kde S (m^2) je celková plocha usazovacích elektrod a \dot{V} (m^3/s) objemový průtok odlučovačem. Z tohoto vztahu zjistíme, že závislost O_f je podobná závislosti konečné odlučovací rychlosti částice u_k (viz 15). [2]

4.2.7 Difúzní princip

Je to hlavní odlučovací princip ve filtraci jemných částic na povrch filtračních vláken tvořících filtrační vrstvu. Uplatňuje se při obtékání těles malou rychlostí a spočívá v difúzi částic z proudu plynu na povrch obtékaného tělesa. [16]

Vzhledem k malému průměru filtračních vláken lze při jejich obtékání předpokládat laminární proudění a za součinitel difúze D se považuje součinitel tepelné (Brownovské) difúze

$$D_B = k \cdot T \cdot B \quad (4.31),$$

kde k je Boltzmannova konstanta, T (K) je absolutní teplota plynu a B (s/kg) je pohyblivost částice.

Částice určité velikosti vykonávají vlivem tepelné difúze v klidném prostředí náhodný pohyb. Jestliže bude sledován pohyb těchto částic v určitém směru, je možné z teorie náhodných pohybů vyjádřit střední aritmetický posuv částice

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{4 \cdot D_B \cdot t}{\pi}} \quad (4.32).$$

Jestliže zvolíme $t = 1$ s, získáme díky této rovnici střední posuv částice za sekundu \bar{x}_1 (m), který formálně porovnáme s pádovou rychlostí u_k . V klidovém prostředí ve vzduchu a při běžných stavových podmínkách pro částice $a < 1 \mu\text{m}$ platí, že $\bar{x}_1 > u_p$. Tyto částice tak zůstanou ve stavu vzhledu a nemluvíme u nich o pádové rychlosti částice. [2]

Charakteristickým kritériem u difúzního odlučovacího principu je Pecletovo kritérium

$$Pe = \frac{v_0 \cdot d}{D_B} \quad (4.33)$$

kde d (m) je charakteristický rozměr obtékaného tělesa (obvykle průměr vlákna), a v_0 rychlost v nabíhající proudě. Pomocí tohoto kritéria, společně s Reynoldsovým kritériem obtékání válce Re_d (vliv viskozity), můžeme vyjádřit frakční odlučivost O_f formou kritériálních vztahů.

U většiny těchto vztahů se Pe kritérium vyskytuje s mocninou $-2/3$, např. Langmuirův vztah

$$O_f = 1,71 \cdot [2 - \ln(Re_d)]^{-1/3} \cdot Pe^{-2/3} \quad (4.34),$$

který platí pro viskózní proudění s hodnotou $Re_d < 1$. Pokud podrobně zanalyzujeme tento vztah s uvažováním příslušných vztahů pro Pe , D_B a B , tak zjistíme, že pro větší částice platí $O_f \approx Pe^{-2/3} \approx D_B^{2/3} \approx a^{-2/3}$ a pro menší částice $O_f \approx a^{-4/3}$. Z toho vyplývá, že u difúzního odlučovacího principu se frakční odlučivost O_f zvyšuje s klesající velikostí částice. Společně s elektrickým patří mezi jediné odlučovací principy, kde lze odlučovat velmi jemné částice. [16]

4.2.8 Intercepční princip

Spočívá v přímém zachycení částic a nejčastěji jej využijeme, pokud plyn prochází vláknitou nebo zrnitou vrstvou.

Předpokládejme teoretický případ částice o velikosti a , která se nachází v proudě plynu u obtékaného vlákna, s malou setrvačností a pohybující se po proudnici. Vlivem konečné velikosti částice budou na vlákně odloučeny všechny částice, které se v proudě plynu před vláknem nacházejí v pásmu šířky y . Tato hodnota závisí na velikosti částice a a charakteru obtékání – rychlostním poli. Označíme-li dle obr. 16 podélnou složku rychlosti jako v_x , lze napsat rovnici kontinuity pro příčný řez ve vzdálenosti před vláknem a řez vedoucí osou vlákna ve směru osy y , odkud se stanoví hodnota šířky y : [16]

$$v_0 \cdot \frac{y}{2} = \int_{d/2}^{d/2+a/2} v_x dy \quad (4.35).$$

Charakteristickým parametrem je zde parametr intercepce α , vyjádřený jako

$$\alpha = a/d \quad (4.36).$$

Ve vztazích vyjadřujících O_f u viskózního obtékání vlákna se vyjadřuje ve tvaru α^n , kde $n \approx 1,8$. U hodnot $0,05 < \alpha < 1$ a $0,001 < Re_d < 1$ pro viskózní proudění platí vztah

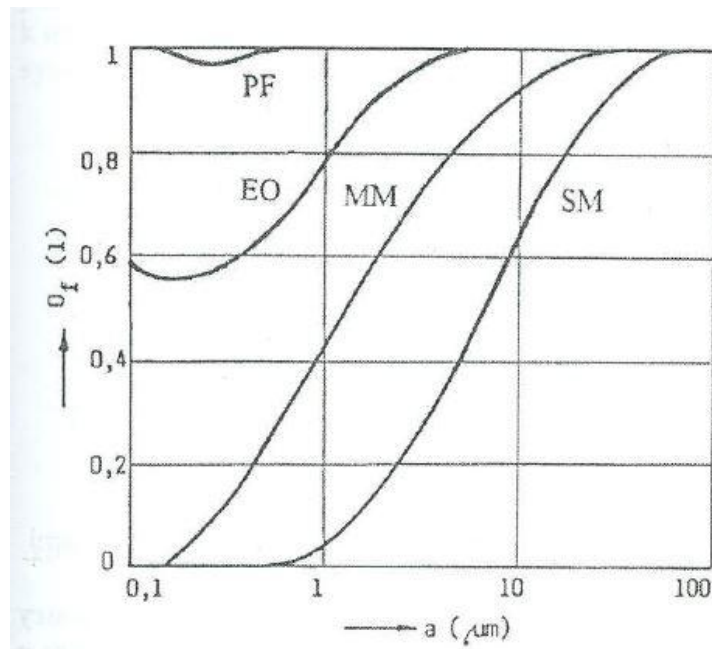
$$O_f = 0,26 \cdot Re_d \cdot \alpha^{1,82} \quad (4.37).$$

4.3 Odlučovače a jejich charakteristiky

4.3.1 Základní skupiny odlučovačů

Odlučovače se dělí do čtyř základních skupin: suché mechanické, mokré mechanické, průmyslové filtry a elektrické odlučovače. Podle použitých principů se pak tyto skupiny dělí na podskupiny (druhy).

Odlučovací schopnosti jednotlivých skupin odlučovačů vyjadřuje průběh frakční odlučivosti O_f na velikosti částice a na obrázku 16:



Obrázek 17 Typické průběhy závislosti $O_f(a)$ u jednotlivých skupin odlučovačů [2]

Funkce a výhodnost odlučovacích zařízení jsou posuzovány podle několika základních hledisek:

- dosažené celkové odlučivosti, resp. koncentraci částic na výstupu
- spotřeby energie na odlučování a tlakové ztráty odlučovače
- investičních a provozních nákladů
- obestavěného prostoru.

4.3.2 Suché mechanické odlučovače

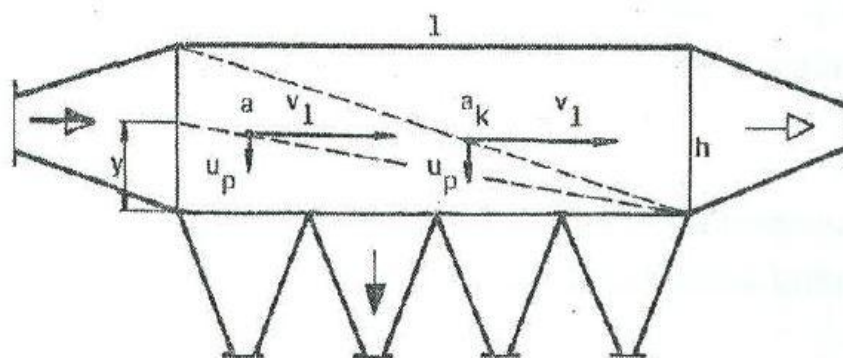
Suché mechanické odlučovače jsou nejstarší a nejrozšířenější. Využívají gravitační, setrvačný a odstředivý princip. Samostatně použité splňují tyto odlučovače jen výjimečně požadavky na emisní limity, a proto se používají hlavně jako první úroveň u vícestupňových odlučovacích systémů k odloučení větších frakcí částic. Mezi jejich nejdůležitější vlastnosti a charakteristiky patří:

- jednoduchá konstrukce
- provozní spolehlivost

- nenáročnost na obsluhu a údržbu
- nižší pořizovací náklady a spotřeba energie
- vhodnost i pro vyšší teplotu plynu. [16]

Jako hlavní nevýhoda se jeví nízká odlučivost pro jemné frakce. Mez odlučivosti se podle druhu a typu odlučovače pohybuje v rozmezí $a_m = 2 \div 100 \mu\text{m}$. [16]

Gravitační neboli tíhové odlučovače patří mezi nejjednodušší. Nejběžnějším typem je usazovací komora. Na následujícím obrázku můžeme vidět trajektorii částice o velikosti a_k , která se dokonale odloučí ($O_f = 1$), a trajektorii částice $a < a_k$ ($O_f = y/h$), která se odloučí pouze částečně. [16]

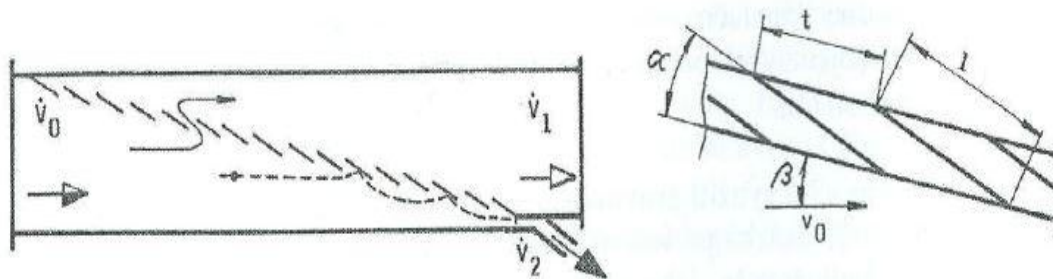


Obrázek 18 Schéma usazovací komory [16]

Gravitační princip lze kombinovat se setrvačným – tato kombinace se nazývá prašník.

U setrvačných odlučovačů je využit setrvačný odlučovací princip při průtoku plynu skrz vhodně vyprofilované překážky. Existují dva hlavní typy – lamelový odlučovač, používaný především k odlučování kapek za mokřými mechanickými odlučovači nebo u vzduchotechnických systémů za vodními pračkami. Plyn protéká několika řadami lamel a částice se v případě odrazu od odlučovací plochy usazují v okrajových oblastech lamely, kde sedimentují do výsypky. [16]

Druhým typem a pro tuto práci důležitějším je žaluziový odlučovač, který se zaměřuje na odlučování tuhých částic. Plyn protéká skrz žaluziovou (lopatkovou) mříž, která se směrem přívodu plynu svírá úhel $\beta = 6 \div 12^\circ$ a skládá se z lopatek délky l rozteče t , které s rovinou mříže svírají úhel $\alpha = 20 \div 40^\circ$. Částice v proudu plynu narážejí na čelní plochu lopatek a následně se odrážejí zpět do proudu plynu. Jejich koncentrace se tak podél délky mříže postupně zvětšuje. Odloučené částice jsou nakonec odvedeny výmetným otvorem pryč v dílčím proudu plynu \dot{V}_2 , pro který platí: $\dot{V}_2 \approx 0,1 \cdot \dot{V}_0$. [16]



Obrázek 19 Schéma žaluziového odlučovače [16]

Vírové odlučovače (cyklony), kterých se týká experimentální část, budou podrobněji popsány na konci kapitoly 4.

Posledním typem suchých mechanických odlučovačů jsou odlučovače rotační – část zařízení s plynem se otáčí. Podle způsobu, jakým je plyn uveden do rotace, se tyto odlučovače dělí na odstředivkové a ventilátorové.

Odstředivkový odlučovač se skládá ze zvláštního zdroje sání a soustavy rotujících soustředných válců, díky kterým je plyn uveden do rotace, a částice se působením odstředivé síly usazují na vnitřních stěnách válců. Po určité době se otáčky sníží a uzavře se přívod plynu, aby částice mohly být odvedeny ke sběrnému prostoru. [16]

U ventilátorového typu je rotace plynu ve spirální skříni vyvolána oběžným kolem ventilátoru, který plní také funkci sání. Působení odstředivé síly částice soustředí na vnější stěnu spirální skříně, odkud vstupují společně s dílčím proudem plynu do paralelního vírového článku menšího průměru, kde se odloučí. Plyn se odtud následně vrací zpět do prostoru sání ventilátoru. [16]

Rotační odlučovače najdou využití hlavně u čištění plynů s malými objemovými průtoky. Naopak je nevhodné je používat pro odlučování abrazivních a lepivých prachů.

4.3.3 Mokrý mechanický odlučovač

Tyto odlučovače využívají převážně setrvačný a odstředivý odlučovací princip. Částice jsou odloučeny do kapaliny především čtyřmi způsoby: [16]

- odloučením částic na kapičkách vlivem setrvačného principu
- odloučením částic na smáčeném povrchu obtékaných těles vlivem setrvačného a odstředivého principu
- odloučením částic na hladině kapaliny vlivem setrvačného principu
- odloučením částic na povrchu bublin plynu při jeho průchodu vrstvou kapaliny

Mezi kladné vlastnosti mokrých odlučovačů jsou zahrnuty následující charakteristiky:

- + na rozdíl od suchých mechanických odlučovačů lze dosáhnout vyšší odlučivosti pro jemné částice
- + jsou použitelné i pro abrazivní a lepivé částice
- + současně s TZL je schopen zachycovat i plynné znečišťující látky
- + kondenzace plynu nenaruší odlučování, u jemných částic jej naopak zlepšuje
- + použitelné pro vysoké koncentrace částic i pro odlučování výbušných prachů
- + menší prostorová náročnost než u průmyslových filtrů a elektrických odlučovačů
- + nízká povrchová prašnost v okolí odlučovačů.

Existují zde samozřejmě také nevýhody. Mezi nejdůležitější patří:

- spotřeba vody na odpar, což může limitovat odlučování plynů o vyšší teplotě
- vyšší tlaková ztráta u některých odlučovačů
- nebezpečí koroze a zamrzání, potřeba kalového hospodářství
- náročnost na obsluhu a údržbu.

Velmi důležitým předpokladem pro použití mokrých odlučovačů pro určitý prach je jeho dobrá smáčivost, což může být často limitujícím faktorem použitelnosti těchto odlučovačů. Je také nezbytné vzít v úvahu měrnou spotřebu vody $m = V_v / V_p$ (l/m^3), což je poměr množství přivedené vody k objemu plynu. Čím vyšších hodnot m nabývá, tím větší kontaktní plochy mezi znečištěným proudem plynu a kapalinou, a tedy i větší odlučivosti můžeme dosáhnout. S mokrymi odlučovači se také pojí kalové hospodářství – voda většinou cirkuluje a k oddělení odloučených částic od vody se pak používají kalové nádrže, odkud se poté kal pomocí odpovídajícího zařízení nebo manuálně odstraní. [16]

Existuje šest základních podskupin mokrých mechanických odlučovačů, které se rozdělují podle způsobu vzniku kontaktního povrchu plyn – kapalina (odlučovací plochy) na sprchové, setrvačné, vírové, pěnové, proudové a rotační.

4.3.4 Průmyslové filtry

Filtrační zařízení používané k odlučování tuhých částic se dělí do dvou skupin podle oblasti využití – filtraci atmosférického vzduchu a filtraci průmyslovou.

Základním aspektem filtrace je odlučování částic ve filtrační vrstvě. Nejrozšířenější jsou vláknité vrstvy (filtrační textilie, vyrobené tkaním nebo vypichovací technologií s následnou povrchovou úpravou), mohou být také zrnité nebo z porézní hmoty. Odlučivost a tlaková ztráta pak závisí nejen na struktuře a fyzikálně-chemických vlastnostech látky této vrstvy, ale i na parametrech plynu a stavu zanesení vrstvy odloučenými částicemi. [16]

U průmyslové filtrace sestává odlučovací proces ze tří fází. V první jsou částice odloučeny na jednotlivých vláknech čelní části filtrační vrstvy pomocí principů difúze, setrvačnosti a intercepce. Ve střední fázi se částice odlučují ve vrstvě na již odloučených částicích a vzniknuvšími plošnými shluky a řetězci částic dochází k přemostování vláken. V poslední fázi dochází k zaplnění pórů na čelní straně vrstvy a odloučené částice vytvářejí na povrchu filtrační koláč tvaru vrstvy těchto částic, která poté působí jako porézní zrnitá vrstva pro odlučování dalších částic. S nárůstem tloušťky koláče roste také tlaková ztráta, proto je potřeba tento koláč je potřeba po překročení dané hodnoty tlakové ztráty odstranit (regenerace filtru). Maximální koncentrace částic se zde pohybuje v g/m^3 a teplota plynů dosahuje až několika set °C. [16]

Pokud se zaměříme na filtraci atmosférického vzduchu, tak její využití najdeme především ve větrání a klimatizaci. Maximální vstupní koncentrace částic dosahuje hodnot mg/m^3 a teplota vzduchu je standardní. Částice se odlučují na ve vrstvě (hloubková filtrace) a filtrační materiály se mimo hrubých filtru neregenerují. [16]

4.3.5 Elektrické odlučovače

Při tomto způsobu odlučování jsou tuhé nebo kapalné částice odstraňovány z proudu plynu pomocí elektrického principu – elektrických sil. Pole vytvořené mezi elektrodami je elektrostatické, pohybem nabitých částic a iontů zde však vzniká proud. Často se také pro tato zařízení používá ne úplně přesný název elektrostatische odlučovače.

Mezi charakteristické vlastnosti elektrických odlučovačů patří: [16]

- + vyšší odlučovací schopnosti i pro jemné částice
- + vhodnost pro velké objemové průtoky plynů, i o vyšších teplotách
- + nízká tlaková ztráta do 200 Pa, způsobená spíše ztrátami v rozvodech průchodem plynu odlučovačem
- + nízká měrná spotřeba energie na odlučování

- vysoké investiční náklady
- vysoké nároky na obestavěný prostor
- náročnost na údržbu, potřeba kvalifikované obsluhy
- citlivost na změny ve složení prachu
- nevhodnost pro odlučování prachu s příliš vysokým a také nízkým měrným elektrickým odporem

Elektrické odlučovače se dělí především podle uspořádání elektrod. Soustava se může skládat ze dvou souosých elektrod, což se nazývá trubovým uspořádáním. Další případ je deskový ionizátor, tedy soustava tvořená lineární elektrodou ležící uprostřed dvou navzájem rovnoběžných rovinných ploch. Poslední případ představuje komorové uspořádání – soustavu tvoří lineární rovnoběžné elektrody se stejnými roztečemi ležící uprostřed dvou navzájem rovnoběžných rovinných ploch. Záleží také na směru průtoku plynu – proto se uplatní také rozdělení na horizontální (většina komorových) a vertikální (trubové). Podle způsobu odvodu částic pak na suché a mokré.

Elektrické odlučovače jsou nejpoužívanější pro čištění plynů s velkými objemovými průtoky. Proto je můžeme nalézt především v energetice při čištění plynů ze spalovacích procesů.

Pro odlučovače pro odlučování emisí je nejčastější suchý horizontální komorový odlučovač. Trubové odlučovače najdou uplatnění ve speciálních případech jako odlučování kapalných příměsí, např. dehtu, olejů a mlhy z různých technologií (koksárenský průmysl, výroba kyseliny sírové).

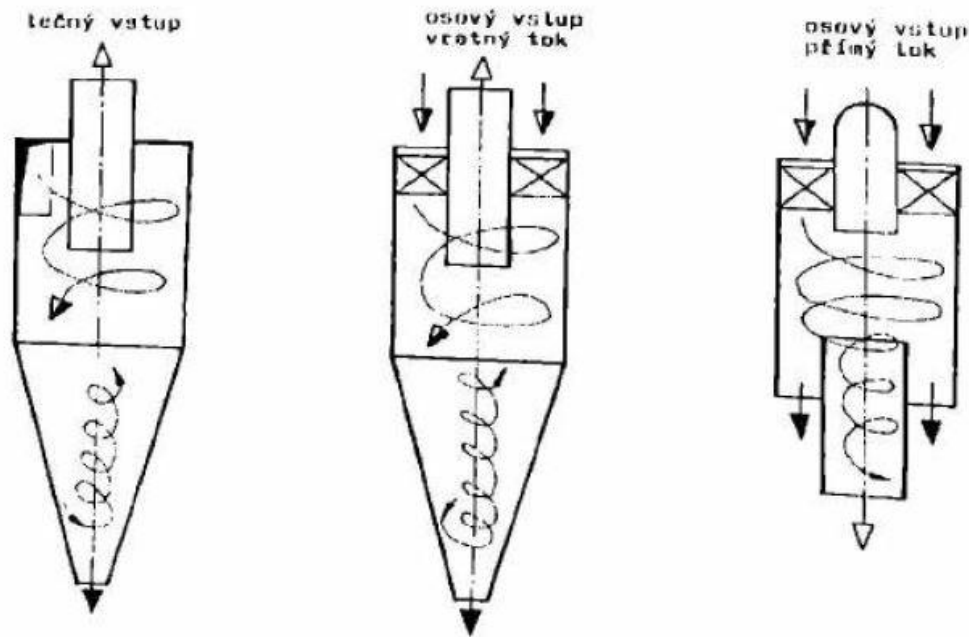
4.4 Suché mechanické odlučovače vírové (cyklonové)

Cyklonový odlučovač je zařízení umožňující na základě odstředivých sil mechanické odlučování prachu z proudu plynu. Odlučuje dobře hrubší částice, ale není schopen odloučit jemnou frakci, proto se často používá jako předodlučovač zapojený paralelně (pro zvýšení kapacity) nebo sériově (pro zvýšení odlučivosti).

Nejdůležitější součástí vírových odlučovačů je vírový článek. Existují tři možnosti podoby článků, které se rozdělují podle způsobu dosažení rotace plynu na typy: [2]

- s tečným vstupem,
- s osovým vstupem a vratným tokem,
- s osovým vstupem a přímým tokem.

Články s tečným vstupem mohou obsahovat uspořádání s kolmým tečným vstupem nebo se spirálovým či šroubovým vstupem. Schéma těchto typů můžeme vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 20 Hlavní typy vírových článků [2]

Schopnost odloučit tuhé částice můžeme vyjádřit pomocí Stokesova kritéria pro mez odlučivosti a_m definovaného jako:

$$Stk_m = \frac{\tau_{c,m} \cdot v_d}{d} \quad (4.38),$$

kde d (m) představuje vnitřní průměr válcové komory a v_d (m/s) tzv. fiktivní rychlost v této komoře, pro kterou platí

$$v_d = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d^2} \quad (4.39).$$

Ze vztahu (5.1) vyplývá, že když pro daný typ vírového článku platí $Stk_m \cong \text{konst.}$, tak se při zvýšení objemového průtoku V (m³/s) článkem zvýší fiktivní rychlost v_d a úměrně tomu se sníží hodnota meze odlučivosti a_m . Celá závislost frakční odlučivosti na velikosti částice $O_f(a)$ se tak posouvá do oblasti menších částic. [2]

Je potřeba provozovat odlučovač v limitovaném rozsahu objemových průtoků, protože při malém průtoku je účinek odstředivé síly nízký a $O_f(a)$ se posouvá do oblasti větších částic. Naopak při příliš velkém průtoku hrozí nebezpečí strhávání již odloučených částic z výsypky do výstupu.

Důležitým faktorem ovlivňujícím chod odlučovačů je tlaková ztráta, která závisí především na konstrukci a způsobu dosažení rotace plynu. Vyjádříme ji pomocí ztrátového součinitele ξ vztaženého na fiktivní rychlost v_d podle vztahu

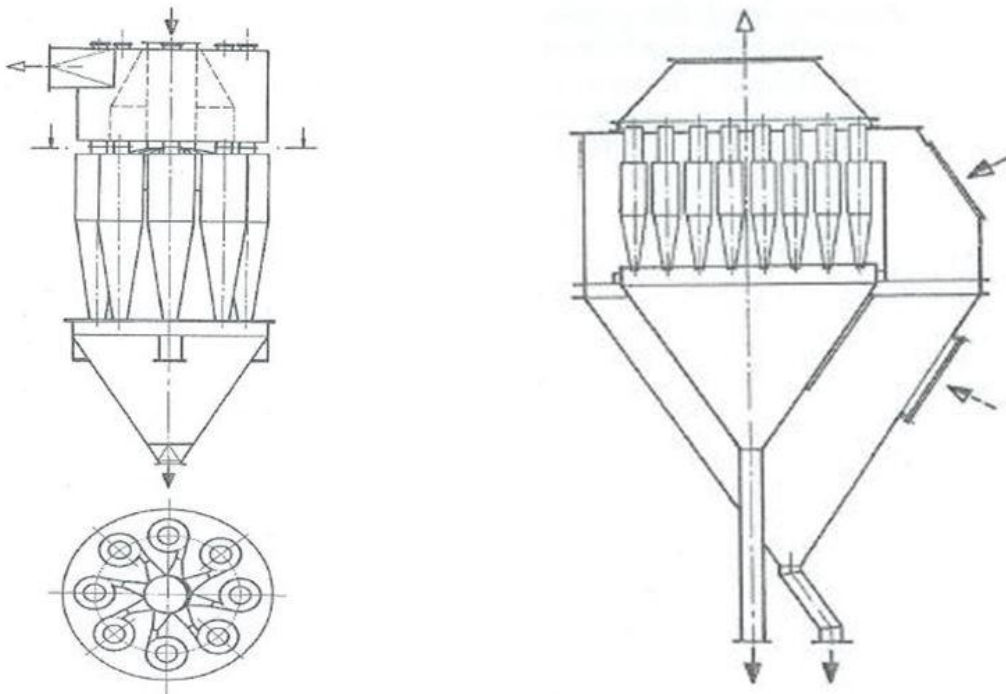
$$\Delta p_z = \xi \frac{v_d^2 \cdot \rho}{2} \quad (4.40).$$

Ve skutečnosti jsou fiktivní rychlosti oproti reálným v článku řádově nižší, což se projevuje vysokými hodnotami ztrátových součinitelů, které se pohybují v řádu desítek až stovek. U častého provedení – článku s kolmým tečným vstupem – dosahuje tlaková ztráta při optimálním režimu hodnot $600 \div 1000$ Pa. U článků s osovým vstupem a vratným tokem a osovým vstupem a přímým tokem jsou hodnoty součinitele $50 \div 60$, respektive 10. Fiktivní rychlosti nabývají vyšších hodnot, cca 5 a 10 m/s, výsledná tlaková ztráta bude tedy nižší (cca 500 a 400 Pa). [2]

Pokud je třeba čistit větší objemový průtok plynu, je vhodné jej rozložit na paralelní rovnoměrný průtok větším počtem článků o menším průměru. Výsledná tlaková ztráta je pak přibližně rovna tlakové ztrátě při průtoku plynu jedním velkým článkem. Je možné teoreticky dokázat, že když se použijí geometricky podobné články se stejnou hodnotou ζ a při požadavku na stejnou tlakovou ztrátu (tj. stejnou hodnotu v_d), se hodnota meze odlučivosti a_m u uspořádání s jedním velkým článkem zmenší na hodnotu meze odlučivosti u paralelního uspořádání s n články $a_{m,n}$ dle vztahu

$$a_{m,n} = \frac{a_m}{n^{1/4}} \quad (4.41). [2]$$

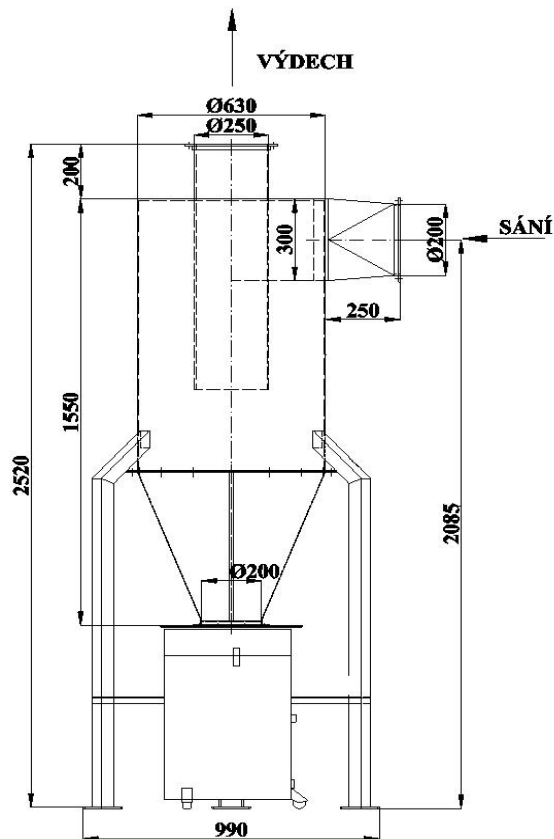
Z tohoto vztahu je patrné, že pokud se zvětší počet článků, tím je větší posuv meze odlučivosti do oblasti menších částic a tady i nárůst odlučovacích schopností. Právě proto se odlučovače konstruují tak, aby byl průtok plynu rozdělen do co největšího počtu paralelních a symetricky uspořádaných článků a výsledná odlučovací schopnost soustavy odpovídala schopnostem jednoho většího článku. Takový odlučovač, kde u každého článku je rozdělovačem proveden individuální přívod plynu a existuje zde také společný výstup, se nazývá skupinový odlučovač. [16]



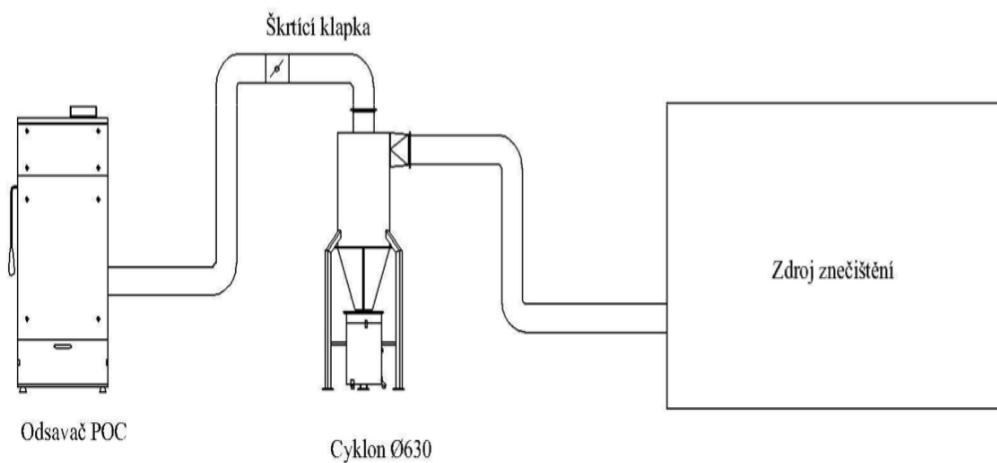
Obrázek 21 Skupinový (vlevo) a bateriový odlučovač [2]

Další možností konstrukce je bateriové uspořádání, tzv. multicyklona. Jednotlivé články si samy nasávají dílčí proud ze společného vstupu a výstupní trubky vedou opět do společného výstupního prostoru. [2]

Existují také mokré vírové mechanické odlučovače, které se podle přívodu kapaliny a systému vírových článků dělí na odlučovače se smáčenou stěnou a na vírníkové.



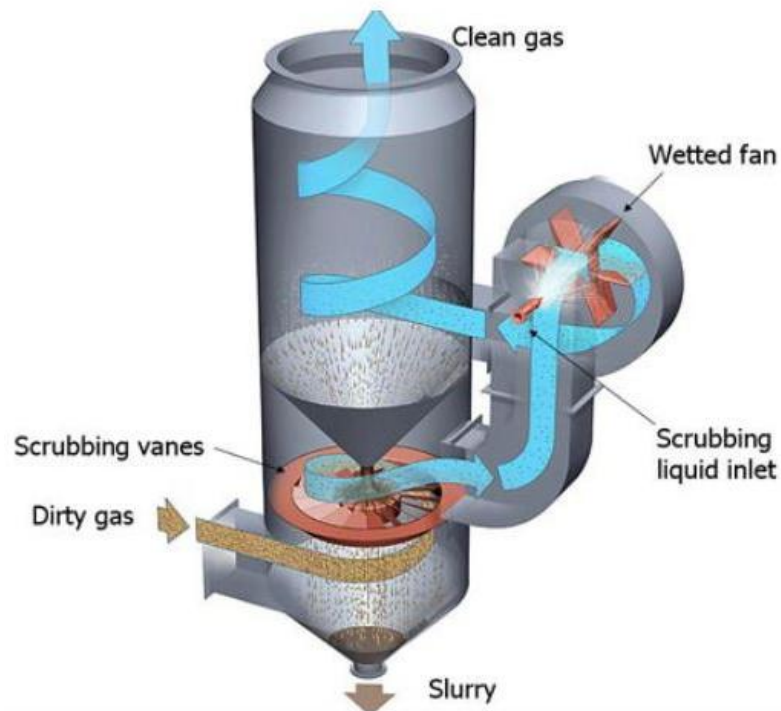
Obrázek 22 Příklad cyklonového odlučovače (Separátor D 630) [17]



Obrázek 23 Příklad zařazení cyklonu do sestavy odsávání [17]

4.5 Mokrý vírový mechanický odlučovače

V porovnání se suchými mechanickými odlučovači jsou schopny dosáhnout vyšších odlučivostí pro jemné částice (u některých typů lze dosáhnout meze odlučivosti i pod 1 mikrometr). Fungují na principu odstředivé síly a jsou s tečným vstupem plynu. Vstupující plyn se smáčí již ve vstupní části, díky tomu dosahují tyto odlučovače velmi dobrých vlastností i pro jemné frakce. Velice často se používají jako absorbéry, kde dochází k chemické reakci plynných znečišťujících látek.[15]



Obrázek 24 Mokrý vírový mechanický odlučovač [15]

5 Experimentální část

5.1 Cíle experimentální části

Ve spalovacím zařízení Gemos 110 byl spalován digestát. Cílem experimentu bylo zjistit množství tuhých částic ve spalinách a posoudit vliv rychlosti cyklonu na množství odloučených částic.

Experiment byl proveden ve výzkumných laboratořích Energetického ústavu v areálu NETME Fakulty strojního inženýrství pod Palackého vrchem.

5.2 Technické údaje zařízení Gemos 110

Výrobce spalovacího zařízení je společnost GEMOS Čelákovice. Sestává z teplovodního výměníku KWH 180 o jmenovitém výkonu 180 kW a zplyňovací komory ZKG 110 s jmenovitým výkonem 110 kW. Dále je součástí této spalovací jednotky zásobník paliva s automatickým podavačem, spalinový ventilátor, systém řízení, regulace a měření a cyklonový odlučovač popílku.



Obrázek 25 Štítek spalovacího zařízení Gemos 110

Zplyňovací komora ZKG je tvořena ocelovým pláštěm s dvoustěnnou, která může být chlazená vzduchem nebo vodou. Masivní šamotová vyzdívka umožňuje spalovat i palivo o vyšší vlhkosti a pomáhá udržovat stabilní teplotu hoření. [18]

Vnitřní část komory je tvořena šikmým a vodorovným roštem. Do prostoru nad roštem se lze dostat dvěma způsoby – stropem spalovací komory přes otevíratelnou izolovanou desku (pro provádění údržby) a skrz dvířka umístěná ve stěně pro okamžitý přístup. V prostoru pod roštem se nachází zásobník na popel.

Palivo je přiváděno na šikmý litinový rošt a tíhou se přirozeně posouvá do pece. Přitom je palivo predehříváno a vysoušeno. Za šikmým roštem je pak rošt vodorovný, kde dochází ke spalování.



Obrázek 26 Zplyňovací komora ZKG



Obrázek 27 Detail zplyňovací komory ZKG

Výměník KWH sestává z ocelových plechů a trubek. Toto zařízení zajišťuje přestup tepla ze spalin do teplotnosného media, vody. Výměník tvoří dvě základních částí, roštové a konvekční. Přední roštová část, do které je vyústěn výstupní kanál zplyňovací komory, ze kterého vystupují spaliny, slouží k primárnímu usazení pevných částí ze spalin. Popílek propadne roštem do spodní části výměníku, odkud je možné jej vybrat dvířky ve spodní části kotle. V horní, šikmé části výměníku se nacházejí dvířka, která umožňují přístup do roštové části výměníku. Druhá, konvekční část, obsahuje konvekční svislé trubky. V horní konvekční části výměníku jsou nad každým tahem umístěna snímatelná víka. Po jejich sejmutí jsou přístupné svislé konvekční trubky, takže je možné popílek mechanicky odstranit. Svislé konvekční trubky se zanášejí mnohem méně než trubky vodorovné. Zešikmené trubkovnice snižují tlakovou ztrátu na straně spalin. Obdélníkový výstup spalin je opatřen regulační klapkou tahu. [19]



Obrázek 28 Výměník KWH [18]



Obrázek 29 Výměník KWH v laboratořích Energetického ústavu FSI

5.3 Popis experimentu

5.3.1 Příprava zařízení

Nejprve byla provedena příprava spalovací jednotky – nasypání paliva do zásobníku a roztopení. Po dosažení ustáleného výkonu bylo zahájeno měření.

5.3.2 Příprava filtrů

Množství pevných částic ve spalinách bylo zjištěno pomocí filtrů – gravimetrickou metodou. Filtry se nejprve umístily v příslušné dóze na jednu hodinu do sušárny Venticell, kde se při teplotě cca. 105 °C zbavily vlhkosti. Následně byly po vytažení vloženy do exsikátoru, kde chladly přibližně tři hodiny. Poté se pomocí laboratorní váhy Denver Instrument SI-234 zvažily a donesly k spalovacímu zařízení.



Obrázek 30 Sušárna Venticell



Obrázek 31 Laboratorní váha Denver Industries SI-234, nalevo exsikátor

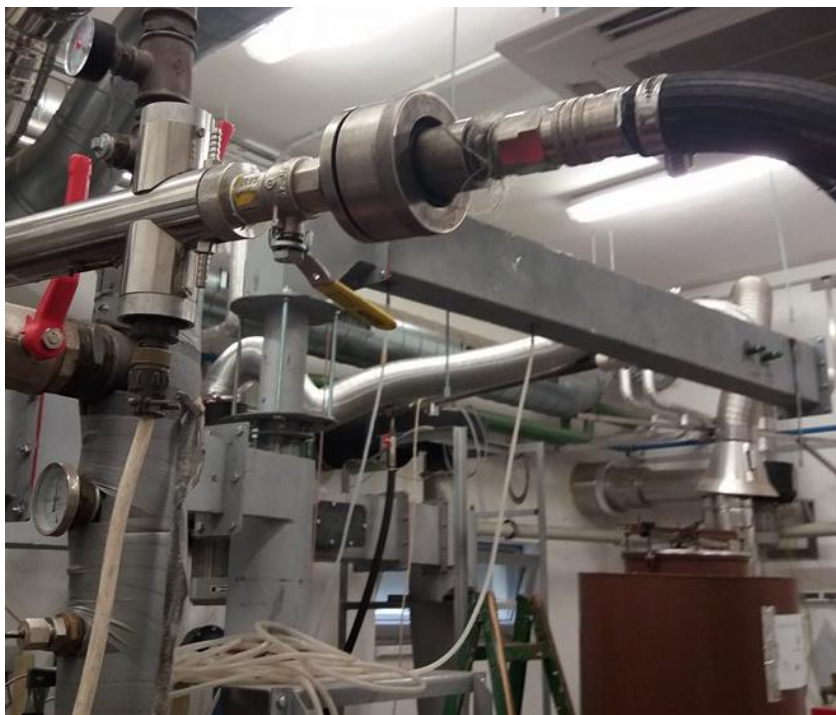
5.3.3 Vzorkovací zařízení (zachycovač)

Nejprve byla zařízení důkladně prohlédnuta, jestli nenesou známky poškození nebo znečištění. Následně byla zvolena hubice s určitým průměrem v závislosti na objemovém průtoku a rychlosti proudění plynu. Poté se filtr vložil do sběrače umístěného na nosné trubce sondy, ke které se následně přišroubovala hubice sondy. Nakonec bylo potřeba k nosné trubce připojit systém chlazení proudu spalin, čerpadla pro regulaci průtoku plynu a izokinetických podmínek a také soustavu pro měření objemového průtoku plynu. Sestavená vzorkovací zařízení byla následně připojena pomocí příruby k otvorům do měřicího profilu.

5.3.4 Měřicí profil

Měřicí profily byly zvoleny na přímém úseku kouřovodu. Na vstupní otvor byla nasazena příruba, na kterou poté bylo připojeno vzorkovací zařízení.

Byla zvolena dvě místa – nad výměníkem, kde se nacházelo vzorkovací zařízení s planárním filtrem, pomocí kterého se zaznamenávalo množství pevných částic v nepročištěném proudu plynu (zachycovač 1). Druhý zachycovač se nacházel nad zásobníkem paliva a obsahoval cylindrický filtr zachycující pevné částice v proudu plynu za cyklonem.



Obrázek 32 Zachycovač 1 (před cyklonem, planární filtr)



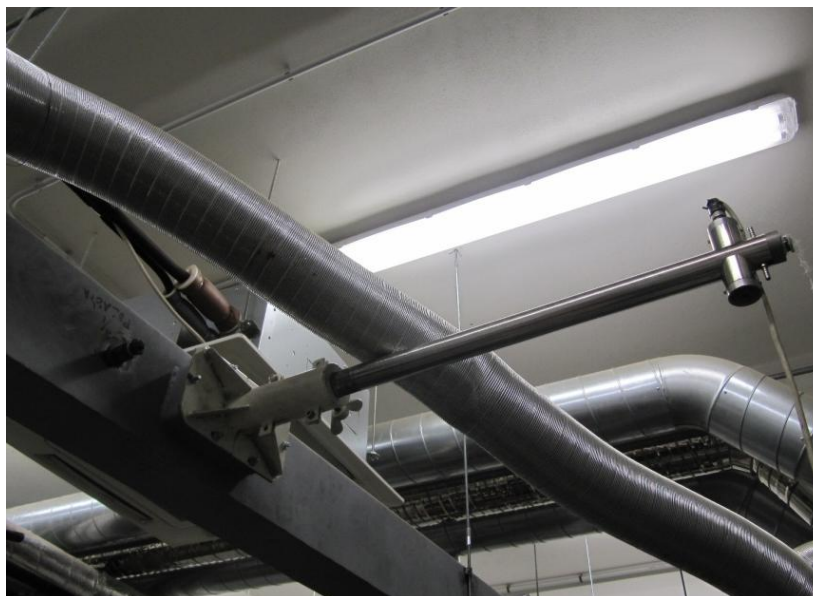
Obrázek 33 Planární filtr



Obrázek 34 Zachycovač 2 (za cyklonem, cylindrický filtr)



Obrázek 35 Cylindrický filtr



Obrázek 36 Připojení zachycovače 2 k měřicímu profilu na kouřovodu

5.3.5 Odběr vzorku

Po roztopení spalovacího zařízení a instalaci měřicí soustavy přišel na řadu odběr vzorku. Doba potřebná pro odběr každého vzorku pro stanovení koncentrace TZL trvala 30 minut. Pokaždé byl zapsán čas odběru (začátek a konec měření), objemový průtok plynu a obsah O_2 pro přepočítání hodnot na referenční podmínky. Plynoměr však neukazoval úplně přesně, což mohlo mít vliv na průběh experimentu.

Po ukončení jednotlivých měření byly filtry vyjmuty ze sondy a opět vysušeny v sušárně a následně ponechány několik hodin v exsikátoru. Poté byly zváženy pomocí laboratorní váhy a byl zapsán rozdíl jejich hmotností před a po měření. Koncentrace se poté pomocí změřených veličin a vzorců (důležité uvedeny v kapitole 5.4) přepočítala vzhledem k 10 % O_2 .

Po skončení všech měření bylo vysypáno přebytečné palivo ze zásobníku a zplyňovací komora se nechala vyhasnout.



Obrázek 37 Spalovací jednotka



Obrázek 38 Průběh experimentu, vlevo nahoře zachycovač 1



Obrázek 39 Vírový (cyklonový) odlučovač

5.4 Výpočty koncentrací vzhledem ke kyslíku

Odchylka měření od izokinematického ideálního odběru se určí porovnáním reálného průtoku vzorku vztaženého na reálné stavové podmínky v potrubí Q_a a požadovaného průtoku vzorku zaznamenaného za stavových podmínek plynu v plynoměru Q_m [20].

$$Q_m = Q_a \cdot \frac{100 - \varphi_m(\text{H}_2\text{O})}{100 - \varphi_a(\text{H}_2\text{O})} \cdot \frac{T_m}{T_a} \cdot \frac{p_a}{p_m} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (5.1),$$

Kde:

Q_m	průtok vzorku za stavových podmínek plynu v plynoměru,
Q_a	průtok vzorku vztažený na reálné stavové podmínky v potrubí,
$\varphi_m(\text{H}_2\text{O})$	objemový zlomek vodní páry ve vzorku plynu procházejícím plynoměrem vyjádřený v procentech,
$\varphi_a(\text{H}_2\text{O})$	objemový zlomek vodní páry v plynu procházejícím potrubím vyjádřený v procentech,
T_m	termodynamická teplota vzorku plynu procházejícího plynoměrem vyjádřená v kelvinech,
T_a	termodynamická teplota plynu procházejícího potrubím vyjádřená v kelvinech,
p_a	statický tlak vzorku plynu proudícího potrubím,
p_m	statický tlak vzorku plynu procházejícího plynoměrem.

Pro každé měření lze hmotnostní koncentrace pevných částic vypočítat ze vztahu:

$$c = \frac{m}{V} \quad (5.2),$$

kde V představuje objem vzorku plynu se specifikací, zda se jedná o suchý nebo vlhký plyn a jestli je vztažen na normální stavové podmínky, a m představuje celkovou hmotnost zachyceného prachu. [20]

Hmotnostní koncentrace je dále korigována s ohledem na referenční obsah kyslíku pomocí korekčního faktoru, který získáme ze vztahu

$$f_c = \frac{20,9\% - \varphi_{ref}(O_2)}{20,9\% - \varphi_m(O_2)} \quad (5.3),$$

kde $\varphi_{ref}(O_2)$ je referenční hodnota objemového zlomku kyslíku v suchém plynu za normálních stavových podmínek vyjádřená v % a $\varphi_m(O_2)$ je objemový zlomek kyslíku v suchém plynu za stavových podmínek plynu proudícího potrubím vyjádřený v %. Hodnota 20,9 % pak představuje obsah O_2 v mezní vrstvě atmosféry.

5.5 Naměřené hodnoty

Bylo provedeno několik měření při různých rychlostech, viz následující tabulka. Celkovou odlučivost získáme pomocí vzorce

$$O_c = 1 - \frac{C_v}{C_p} \quad (5.4),$$

kde C_v je hmotnostní koncentrace na výstupu za cyklonem a C_p je hmotnostní koncentrace na přívodu před cyklonem. Po vynásobení výsledku číslem 100 dostaneme odlučivost v procentech.

Tabulka 1 Naměřené a vypočítané hodnoty

Rychlost v komoře cyklonu [m/s]	Číslo odběru	Koncentrace TZL před cyklonem C_p [mg/m ³]	Koncentrace TZL za cyklonem C_v [mg/m ³]	Pozn.	Celková odlučivost O_c [%]	$C_p - C_v$ [mg/m ³]
$v = 20$ m/s	1	626,39	365,87	přepočteno na 10% O_2	41,60	260,52
	2	661,88	566,58		14,40	95,3
$v = 16$ m/s	1	667,56	382,89		42,64	284,67
	2	629,29	395,74		37,11	233,55
$v = 12$ m/s	1	32,94	440,91		-	-
	2	660,01	420,69		36,26	239

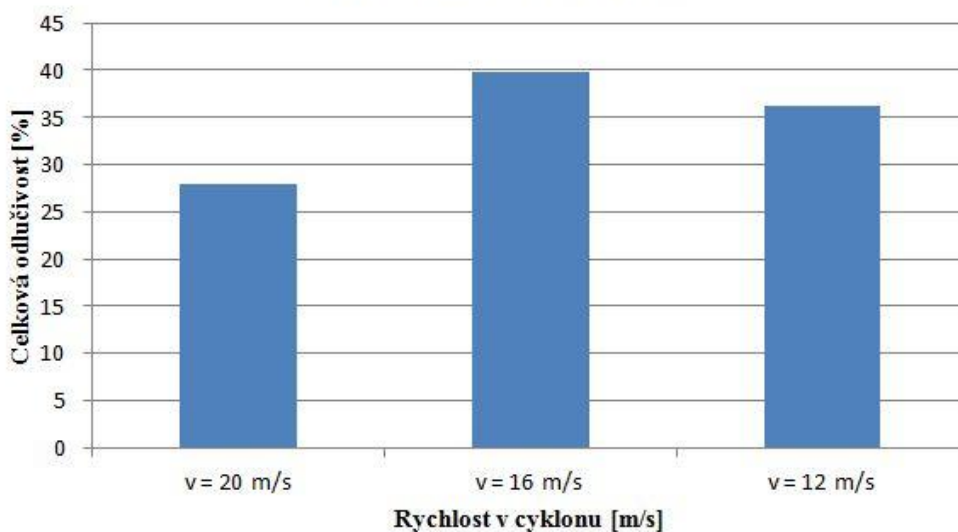
Je vhodné poznamenat, že u měření č. 1 pro rychlost $v = 12$ m/s došlo k protržení filtru, proto tento výsledek není relevantní a dále nebude brán v potaz. U měření č. 2 pro rychlost $v = 20$ m/s pak hodnota C_v vykazuje výraznou odchylku od ostatních výsledků, což může být způsobeno krátkou dobou vysoušení filtru nebo nechtěným znečištěním.

5.5.1 Zhodnocení výsledků

Z výsledků měření je patrné, že celková odlučivost se ve všech případech (kromě dvou měření zkruslených zřejmě poškozovanými filtry) pohybuje kolem 40 %. To je velmi nízká hodnota, neboť v praxi, kde se cyklony používají často jako předodlučovače řazené za sebou v několika stupních, může dosáhnout až 90 %. Tento jev může být způsoben použitím pouze jednoho cyklonového odlučovače a také plynoměrem, který na začátku měření fungoval ne úplně dobře. Vliv mohlo hrát také palivo, jak bude rozepsáno dále.

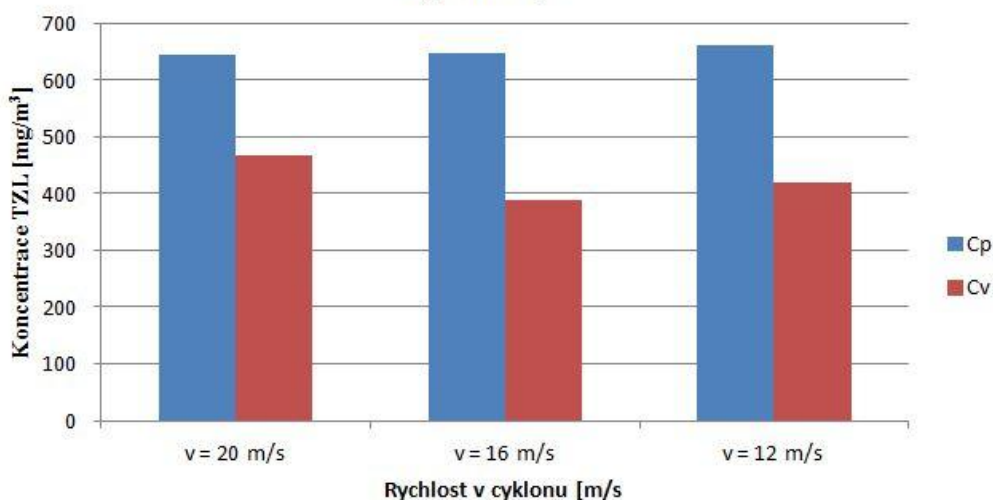
Z naměřených hodnot také vyplývá, že nejvyšší odlučivosti po zprůměrování jednotlivých dvojic měření bylo dosaženo pro rychlost $v = 16$ m/s.

Odlučivost při různých rychlostech (pro průměrné hodnoty ze dvou měření)



Obrázek 40 Závislost odlučivosti na rychlosti v cyklonu (průměr)

Závislost koncentrace TZL na rychlosti cyklonu (průměr)



Obrázek 41 Závislost koncentrace TZL na rychlosti v cyklonu (průměr)

5.6 Porovnání s emisními limity danými legislativními požadavky

Emisní limity musí být dodrženy na každém komínovém průchodu a vývodu spalin z procesu spalování. Veškeré nově vyrobené kotle na tuhá paliva se před uvedením do prodeje musí certifikovat. Pro kotle spalující tuhá paliva určené k ústřednímu vytápění se jmenovitým tepelným výkonem do 500kW platí novelizovaná evropská norma ČSN EN 303-5 platná od 1. 2. 2013. Kotle mohou být používány s přirozeným nebo nuceným odtahem spalin a palivo dodáváno ručně či samočinně. [21]

Množství emisí při spalování musí být co nejnižší. Norma ČSN EN 303-5 uvádí požadavky na konstrukci kotlů (materiál, provedení), kontrolu výroby, bezpečnost provozu, průběh zkoušky pro určení výkonu a účinnosti a popis manuálního měření částic prachu v toku spalin gravimetrickou metodou. Také uvádí maximální přípustné hodnoty nejen prachu (TZL), ale i CO a TOC (celkový organický uhlík) pro kotle provozované při jmenovitém tepelném výkonu. V případě kotlů s rozsahem tepelného výkonu provozovaných při jmenovitém tepelném výkonu a při minimálním tepelném výkonu jsou zde i uvedeny odchylky mezích hodnot pro ostatní státy Evropy. [21]

Mezní hodnoty emisí pro referenční kyslík 10 %, rozděleny do jednotlivých emisních tříd, jsou uvedeny v tabulce 1 [21].

Tabulka 2 Mezní hodnoty emisí dle evropské normy ČSN EN 303-5 [21]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (mg/m ³ při 10 % O ₂)								
			CO			TOC			prach (TZL)		
			3	4	5	3	4	5	3	4	5
Ruční	Biopaliva	≤ 50	5000	1200	700	150	50	30	150	75	60
		> 50 ≤ 150	2500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1200			100			150		
	Fosilní paliva	≤ 50	5000			150			125		
		> 50 ≤ 150	2500			100			125		
		> 150 ≤ 500	1200			100			125		
Samočinná	Biopaliva	≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	150	60	40
		> 50 ≤ 150	2500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1200			80			150		
	Fosilní paliva	≤ 50	3000			100			125		
		> 50 ≤ 150	2500			80			125		
		> 150 ≤ 500	1200			80			125		

POZNÁMKA: Hodnoty prachu v tabulce vycházejí na základě měření gravimetrickou filtrační metodou, která musí být zmíněna v protokolu o zkoušce. Emise pevných částic, měřené podle této evropské normy, nezahrnuje kondenzované organické látky, které mohou tvořit dodatečné pevné částice, když se spaliny smísí s okolním vzduchem. Hodnoty proto nejsou přímo srovnatelné s hodnotami naměřenými metodami s ředěním v tunelu, ani nemohou být přímo převedeny do koncentrací částic v okolním vzduchu.

Odchylka od izokinetického průtoku se musí pochybovat v rozmezí 5÷15 %, jinak je měření neplatné.

Z tabulky č. 1 vyplývá, že se hodnoty koncentrací prachových částic pohybují v rozmezí 620 ÷ 670 mg/m³ v nepočistěném proudu spalin a nad 360 ÷ 570 mg/m³ v proudu plynu za cyklonem. Zplyňovací jednotka má jmenovitý výkon 110 kW. V tabulce č. 2 tedy spadá do kategorie > 50 ≤ 150 kW. Palivo byl digestát biologického původu, jehož dodávka probíhala samočinně.

Vzhledem k tomu, že mezní hodnota emisí TZL pro třídu 3 je 150 mg/m^3 , je patrné, že kotel se nachází mimo emisní limity. Není to ovšem způsobeno špatnou funkcí kotle, protože při měřeních v minulých letech v rámci prací podobného zaměření spadal do emisní třídy 3. Tyto vysoké hodnoty koncentrací TZL jsou tedy s největší pravděpodobností způsobeny vlastnostmi spalovaného digestátu.

6 Závěr

V současné době je znečištění ovzduší považováno za jeden z největších problémů lidstva. Naštěstí si toho jsme vědomi a snažíme se vymýšlet způsoby, jak toto nebezpečí snížit, nebo alespoň zpomalit.

Mezi nejdůležitější znečišťující látky patří prachové částice (neboli tuhé znečišťující látky), které jsou schopny proniknout hluboko do plic a způsobit tak nepříjemné zdravotní potíže.

Cílem této bakalářské práce je seznámit čtenáře se základními druhy plynných znečišťujících látek, zákonnými definicemi a rozdělením TZL, jejich výskytem na území České republiky a původem. Hlavní oddíl teoretické části pak popisuje principy a způsoby, pomocí kterých lze odloučit částice z proudu plynu.

Experimentální část je pak věnována měření TZL ve spalinách pomocí manuální gravimetrické metody. Nakonec jsou uvedeny výsledky, jejich diskuze a porovnání s platnými evropskými normami.

Je důležité upozorňovat na rizika spojená s nedokonalým spalováním tuhých látek, která napomáhají ke zhoršení kvality ovzduší. Z kapitoly 3.5 vyplývá, že jedním z největších znečišťovatelů jsou domácnosti. Proto je důležité pokračovat ve vývoji technologií a co nejvíce používat ekologičtější kotle a spalovací jednotky, splňující aktuální emisní normy.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Zákon o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší.).
č. 86/2002 Sb. 2002. Dostupné také z: <http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?r=2002&cz=86>
- [2] HEMERKA, Jiří a Pavel VYBÍRAL. *Ochrana ovzduší*. V Praze: České vysoké učení
technické, 2010. ISBN 978-80-01-04646-3.
- [3] Zákon o ochraně ovzduší. Č. 201/2012 Sb. 2012. Dostupné také z: <http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/%24%24OpenDominoDocument.xsp?documentId=9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0&action=openDocument>
- [4] Vyhláška Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví seznam znečišťujících látek,
obecné emisní limity, způsob předávání zpráv a informací, zjišťování množství vypouštěných
znečišťujících látek, tmavosti kouře, přípustné míry obtěžování zápachem a intenzity pachů,
podmínky autorizace osob, požadavky na vedení provozní evidence zdrojů znečišťování
ovzduší a podmínky jejich uplatňování. Č 356/2002 Sb. Dostupné také z: <http://www.psp.cz/sqw/sbirka.sqw?cz=356&r=2002>
- [5] *Oxid uhelnatý* [online]. 2014 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z:
<http://arnika.org/oxid-uhelnaty>
- [6] *Oxidy síry* [online]. 2014 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z:
<http://arnika.org/oxidy-siry>
- [7] *Oxid siřičitý* [online]. 2018 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD
- [8] *Snižování emisí NO_x* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z:
https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovem_5.html
- [9] *Přízemní ozon a jeho účinky na fotografii* [online]. 17. 7. 2011 [cit. 2018-04-07].
Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/prizemni-ozon-a-jeho-ucinky-na-fotografie>
- [10] *Znečišťující látky* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z:
<http://www.ecmost.cz/ovzdusi/latky.php>
- [11] *Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z:
https://www.irz.cz/repository/latky/polycyklicke_aromaticke_uhlovodiky.pdf

- [12] *Polychlorované bifenyly (PCB)* [online]. 2014 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://arnika.org/polychlorovane-bifenyly-pcb>
- [13] *Smog* [online]. 2018 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Smog>
- [14] *Grafická ročenka 2016: Kvalita ovzduší v České republice* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/IV1_PM_CZ.html
- [15] Mokrý mechanický odlučovač. *Depuro* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <http://www.depuro.cz/mokreacute-mechanickeacute-odlu269ova269e.html>
- [16] HEMERKA, Jiří. *Odlučování tuhých částic*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-010-1088-0.
- [17] Cyklonový odlučovač. *Vzduchotechnik Chrastava* [online]. [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.vzduchotechnik.cz/vyrobky/cyklon-d-630/>
- [18] Zplyňovací komory ZKG. *GEMOS CZ, spol. s r.o.* [online]. 21. 8. 2014 [cit. 2018-05-18] Dostupné z: <http://www.gemos.net/clanky/zplynovaci-komora-zkg/zplynovaci-komory-zkg.html>
- [19] Výměník KWH. *GEMOS CZ, spol. s r.o.* [online]. 25. 4. 2014 [cit. 2018-05-18]. Dostupné z: <http://www.gemos.net/clanky/vymeniky-kwh/vymenik-kwh.html>
- [20] Stacionární zdroje emisí – Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu – Manuální gravimetrická metoda. ČSN EN 1384-1. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [21] Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Křivka propadů a zbytků [2]	18
Obrázek 2 Křivka relativní četnosti dle počtu [2]	19
Obrázek 3 Křivky propadů a relativních četností [2]	20
Obrázek 4 Vyjádření definice frakcí PM ₁₀ a PM _{2,5} [2]	21
Obrázek 5 Imisní limity [3]	23
Obrázek 6 Podíl sektorů na celkových emisích PM ₁₀ v r. 2015 [14]	24
Obrázek 7 Podíl sektorů na celkových emisích PM _{2,5} v r. 2015 [14].....	25
Obrázek 8 Lokality, kde došlo s překročení imisního limitu [14].....	26
Obrázek 9 Počty překročení hodnoty imisního limitu pro 24hod. koncentrace PM ₁₀ ,2016 [14]	27
Obrázek 10 Pole roční průměrné koncentrace PM ₁₀ v r. 2016 [14]	27
Obrázek 11 Pole roční průměrné koncentrace PM _{2,5} v r. 2016 [14].....	28
Obrázek 12 Průběh křivek zbytků na odlučovači [2]	30
Obrázek 13 Stanovení celkové odlučivosti OC grafickou cestou [2].....	31
Obrázek 14 Pádová rychlost částice [2]	34
Obrázek 15 Odstředivý princip [2].....	37
Obrázek 16 Průběh u_k na velikosti elektrického odlučovače [2].....	39
Obrázek 17 Typické průběhy závislosti $O_f(a)$ u jednotlivých skupin odlučovačů [2]	41
Obrázek 18 Schéma usazovací komory [16]	42
Obrázek 19 Schéma žaluziového odlučovače [16].....	43
Obrázek 20 Hlavní typy vírových článků [2]	46
Obrázek 21 Skupinový (vlevo) a bateriový odlučovač [2].....	47
Obrázek 22 Příklad cyklonového odlučovače (Separátor D 630) [17].....	48
Obrázek 23 Příklad zařazení cyklonu do sestavy odsávání [17]	48
Obrázek 24 Mokrý vírový mechanický odlučovač [15].....	49
Obrázek 25 Štítek spalovacího zařízení Gemos 110	50
Obrázek 26 Zplyňovací komora ZKG	51
Obrázek 27 Detail zplyňovací komory ZKG.....	51
Obrázek 28 Výměník KWH [18].....	52
Obrázek 29 Výměník KWH v laboratořích Energetického ústavu FSI.....	52
Obrázek 30 Sušárna Venticell	53
Obrázek 31 Laboratorní váha Denver Industries SI-234, nalevo exsikátor	54
Obrázek 32 Zachycovač 1 (před cyklonem, planární filtr).....	55
Obrázek 33 Planární filtr	55
Obrázek 34 Zachycovač 2 (za cyklonem, cylindrický filtr)	56
Obrázek 35 Cylindrický filtr.....	56
Obrázek 36 Připojení zachycovače 2 k měřicímu profilu na kouřovodu	57
Obrázek 37 Spalovací jednotka	58
Obrázek 38 Průběh experimentu, vlevo nahoře zachycovač 1	58
Obrázek 39 Vírový (cyklonový) odlučovač	59

Obrázek 40 Závislost odlučivosti na rychlosti v cyklonu (průměr).....	61
Obrázek 41 Závislost koncentrace TZL na rychlosti v cyklonu (průměr).....	61

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol/zkratka	Jednotka	Význam
a	(m; μm)	velikost kulové částice, ekvivalentní velikost částice dle pádové rychlosti
a_1	(m; μm)	aerodynamická velikost částice
$a_{N,1}$	(m; μm)	střední aritmetická velikost částice
$a_{N,2}$	(m; μm)	střední kvadratická velikost částice
$a_{N,3}$	(m; μm)	střední kubická velikost částice
d	(m)	průměr, vzdálenost
e	(C)	elementární náboj
f_c	(-)	korekční faktor koncentrace TZL zachycených gravimetrickou metodou
g	(m/s^2)	tíhové zrychlení
k	J/K	Boltzmannova konstanta
m	(kg)	hmotnost
p	($1/\mu\text{m}$)	četnost (relativní)
p	(Pa)	tlak
Δp_z	(Pa)	tlaková ztráta
∇p	(Pa/m)	gradient tlaku
t	(s)	čas
\vec{u}	(m/s)	rychlost pohybu částice
u_k	(m/s)	konečná odlučovací rychlost částice
u_p	(m/s)	pádová rychlost částice
\vec{v}	(m/s)	rychlost proudu plynu
\vec{v}_r	(m/s)	relativní rychlost obtékání částice
\bar{x}	(x)	střední aritmetický posuv částice
x, y, z	(m)	souřadnice
p, v, z		přívod, výstup, záchyt v odlučovači
min, max		minimum, maximum
med, mod		medián, modus
A	(-)	průmět
B	(s/kg)	pohyblivost částice
C	(mg/m^3)	koncentrace částic
D_B	(m^2/s)	součinitel tepelné (Brownovské) difúze

\vec{E}	(V/m)	intenzita elektrického pole
\vec{F}	(N)	síla
\vec{F}_e	(N)	vnější síla
\vec{F}_Q	(N)	elektrická (Coulombova) síla
\vec{F}_t	(N)	aerodynamický odpor částice
K_C	(-)	Cunninghamova korekční konstanta
l_m	(m)	střední dráha molekul plynu
M	(kg)	hmotnost
\dot{M}	(kg/s)	hmotnostní průtok
N	(-)	počet částic
O_c	(-)	celková odlučivost
O_f	(-)	frakční odlučivost
P	(-)	propad
Q	(C)	elektrický náboj
Q	(m ³ /s)	objemový průtok
T	(K)	termodynamická teplota
V	(m ³)	objem
Z	(-)	zbytek
α	(-)	parametr intercepce
ε	(-)	poréznost
ε_0	(F/m)	permitivita vakua
η	(Pa·s)	dynamická viskozita
κ	(-)	nabíjecí konstanta
ν	(m ² /s)	kinematická viskozita
ρ	(kg/m ³)	hustota
τ_c	(s)	doba relaxace částice
ξ	(-)	ztrátový součinitel, součinitel odporu
$\varphi_{\text{ref}}(\text{O}_2)$	(%)	referenční hodnota objemového zlomku kyslíku v suchém plynu za normálních stavových podmínek
$\varphi_m(\text{O}_2)$	(%)	objemový zlomek kyslíku v suchém plynu za stavových podmínek plynu proudícího potrubím
NETME		New Technologies for Mechanical Engineering
PAU, PAH		polycyklické aromatické uhlovodíky
PCB		polychlorované bifenylly
TZL		tuhé znečišťující látky