



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ODLUČOVAČE TZL PRO KOTLE MALÝCH VÝKONŮ

DUST SEPARATORS FOR SMALL POWER BOILERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Szweda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Milčák

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Martin Szweda**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Milčák**
Akademický rok: 2018/19

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:

Odlučovače TZL pro kotle malých výkonů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Odlučovače slouží k zachytu tuhých látek z procesních plynů. V tomto případě se jedná o odlučovač tuhých znečišťujících látek ze spalín kotle spalujícího biomasu.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše odlučovačů pro malé kotle na biomasu
- volba vhodného odlučovače pro zadané podmínky
- experimentální měření na daném odlučovači
- vyhodnocení výsledků měření

Seznam doporučené literatury:

YANG, Wen-Ching. Fluidization, Solids Handling, and Processing: Industrial Applications. Elsevier Science, 1998. ISBN 0815514271.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato práce je rozdělena do dvou částí. První část této práce obsahuje rešerši o znečišťujících látkách, odlučovačích a její legislativě, přičemž tato část je spíše zaměřována na prachové částice a jejich chování při odlučování. Následuje krátká rešerše o různých typech odlučovačů, které se mohou využívat pro kotle malých výkonů. V druhé části je sepsán experiment, kde se prakticky ověřuje účinnost na daném odlučovači a poté se porovnají naměřené hodnoty. Z použitých výsledků se určí, zda použitý odlučovač je vyhovující pro odlučování při spalování biomasy pro kotle o malých výkonech.

Klíčová slova

Biomasa, TZL, emise, prach, odlučovače, částice, popílek

ABSTRACT

This thesis is divided into two parts. The first part of this thesis contains research on pollutants, separators and its legislation, while this part is focused on dust particles and their separation behavior. This is followed by a search on the different types of separators that can be used for small power boilers. The second part is followed by an experimental part, where the practical efficiency of the given separator is verified and then the measured values are compared and the result is evaluated. The results are used to determine whether the separator used is suitable for the separation of biomass for low-power boilers.

Key words

Biomass, TZL, emissions, dust, separators, particles, pollution

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SZWEDA, Martin. *Odlučovače TZL pro kotle malých výkonů*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116957>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Milčák.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma **Odlučovače TZL pro kotle malých výkonů na biomasu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Martin Szweda

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlovi Milčákovi za jeho cenné rady a připomínky, které mi byly poskytnuty při vypracování závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Otakarovi Štelcovi, bez kterého by nemohla proběhnout experimentální část v kotelně.

OBSAH

1	Úvod	11
2	Biomasa	12
3	Kotle malých výkonů na biomasu	13
3.1	Způsoby spalování	13
4	Emise znečišťujících látek	16
4.1	Plynné emise	16
4.2	Těžké kovy	17
4.3	Tuhé znečišťující látky (TZL)	18
4.3.1	Vlastnosti prachových částic	19
4.3.2	Podíl sektorů na znečištění ovzduší částicemi PM ₁₀ a PM _{2,5}	22
4.3.3	Metody měření TZL	23
4.4	Legislativa	25
4.4.1	Ekodesign	26
5	Typy odlučovačů	27
5.1	Základní vlastnosti pro volbu správného odlučovače	27
5.1.1	Celková odlučivost	27
5.1.2	Frakční odlučivost	28
5.1.3	Tlaková ztráta	28
5.2	Základní principy při odlučování	29
5.2.1	Gravitační síla	29
5.2.2	Setrvačná síla	29
5.2.3	Elektrostatická síla	29
5.2.4	Filtrační děj	29
5.3	Mechanické suché odlučovače	30
5.3.1	Usazovací komory	30
5.3.2	Prašníky	31
5.3.3	Žaluziové odprašovače	31
5.3.4	Rotační odlučovače	32
5.3.5	Cyklóny	33
5.3.6	Multicyklóny	33

5.4	Mechanické mokré odlučovače	34
5.4.1	Vírové odlučovače (vírníky).....	34
5.4.2	Pěnové odlučovače	35
5.4.3	Hladinové odlučovače	36
5.4.4	Sprchové věže (pračka).....	36
5.4.5	Venturiho pračky	37
5.5	Elektrostatické odlučovače.....	38
5.6	Tkaninové filtry.....	39
6	Experimentální část.....	40
6.1	Zadání	40
6.2	Postup měření	43
6.3	Výpočetní část	45
6.3.1	Použité vzorce.....	45
6.3.2	Vzorové výpočty pro uvedené rovnice	49
6.3.3	Záznamy hodnot z měření	50
6.3.4	Vypočtené hodnoty jednotlivých měření.....	55
6.3.5	Vyhodnocení experimentu.....	57
7	Závěr	59
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	60
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	64
	SEZNAM TABULEK.....	65

1 Úvod

Během takzvaného století páry nikdo neřešil žádné emise, a to se v průběhu času ukázalo jako enormní problém, který se odráží jak ve zdraví člověka, tak při změnách klimatu na Zemi a je mu také mnohdy přisuzován podíl na globálním oteplování. Na druhou stranu se toto stalo pro mnoho ekologicky myslících lidí motivací, aby tuto problematiku začali řešit, a to počínaje od 50. let 20. století, kde u nás vznikaly první normy, které měly za úkol snížit dané množství emisí na určené limity. Tyto limity se postupem času snižovaly a upravovaly pro dané typy spalovacích zařízení.

Dnes je kladen největší důraz na tuhé znečišťující látky, které ulétají při spalovacím procesu do ovzduší a tím mohou proniknout až do plicních sklípků člověka, kde mohou v kombinaci s některými prvky způsobovat rakovinotvorné zárodky. Tyto částice jsou rozděleny podle velikosti na PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 a $PM_{0,1}$, kde dané číslo určuje velikost částice v μm . Přičemž částice $PM_{2,5}$ jsou schopny projít až do plicních sklípků a částice menší, než PM_1 se mohou dostat až do krve. Sledovány jsou všechny tyto frakce kromě $PM_{0,1}$, což je však jenom otázka času, kdy se začnou pořádně sledovat i tyto ultra jemné částice.

Malé zdroje znečištění, které mají obrovský podíl na vzniku celkových emisí PM_{10} a $PM_{2,5}$ mohou být život ohrožující. Proto je nutné tento typ znečištění redukovat. Práce se věnuje krátce těmto emisím, s důrazem na tuhé znečišťující látky. Následně jsou popsány určité typy odlučovačů, které mají vliv na snížení obsahu koncentrací těchto částic ovzduší. Přičemž použitá metoda s cyklónovým odlučovačem byla experimentálně aplikována na malém kotli spalující biomasu v laboratořích Vysokého učení technického v Brně. Z následných naměřených hodnot se porovnají koncentrace tuhých znečišťujících látek a určí se, zda použitý cyklónový odlučovač vyhovuje při spalování biomasy pro kotle o malých výkonech na biomasu.

2 Biomasa

Pod pojmem biomasa si můžeme představit veškerou organickou hmotu. Vznik biomasy je spojován s fotosyntézou, utváří se za pomoci oxidu uhličitého, vody a slunečního záření. Následně při rozložení nebo spálení vznikne opět oxid uhličitý, voda a energie. Tudiž je biomasa neutrální ke vzniku oxidu uhličitého a můžeme ji zařadit mezi obnovitelné zdroje energie. Biomasa je specifická svým nízkým obsahem popeloviny a vysokým obsahem prchavé hořlaviny.

Pro spalovací zařízení se především využívá dendromasa (dřevní odpad) nebo fytomasa (zemědělské plodiny, tj. obiloviny, olejnin, travní porosty, rychle rostoucí dřeviny na zemědělské půdě, byliny a rostlinné zbytky). Při spalování se kontrolují převážně emisní limity znečišťujících látek. Dané limitní normy koncentrací těchto znečišťujících látek ve spalinách jsou závislé na druhu používaného paliva a výkonu daného kotle. Tyto normy se stále zpřísnují. [1], [2]

Využití biomasy

Díky nízkému obsahu síry je z energetického hlediska nejběžnější využití biomasy především pro spalování. Dále se využívá pro esterifikaci surových olejů, při kvašení a vznik kvalitnějšího paliva pro spalování. Biomasu můžeme rozdělit na záměrně pěstovanou a odpadní biomasu. Podle způsobu vzniku dělíme procesy na:

- **Termochemické procesy**

Jsou označovány jako suché procesy, které se využívají pro spalování či zplyňování. Vlhkost vody v biomase je menší než 50 %. Spalování jsou procesy, kdy dochází při vysokých teplotách k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny. Pro zvýšení výhřevnosti je nutno biomasu upravovat pomocí mletí, lisování, sušení apod. Zplyňování je rychlý proces přeměny pevného materiálu na plyn, přičemž můžeme využít různé způsoby výroby (pyrolýza, zplyňování vzduchem a kyslíkem). [2]

- **Biochemické procesy**

Vlhkost biomasy je větší než 50 % a nese označení mokrých procesů, kde za pomoci fermentace, což je způsob výroby bioplynu při biologickém odbourávání organických látek ve stavu tekutém za nepřítomnosti vzduchu, ve tmě a za působení metanových bakterií za určité teploty, dochází k alkoholovému nebo metanovému kvašení. [2]

- **Fyzikální procesy**

Proces, kdy se pomocí mechanických úprav (drtiče, lisy) vytváří palivo s vyšší výhřevností pro spalování. Jedná se o brikety, pelety, štěpky apod.

3 Kotle malých výkonů na biomasu

V dnešní době jsou kotle malých výkonů na biomasu využívány pro decentralizovaný způsob zásobování tepla pro domácnosti nebo menší průmyslové firmy čím dál tím častěji, za což může cenová atraktivita biomasy. Výkony těchto kotlů dosahují od 5 do 500 kW.

Při spalování biomasy je důležitá použitá technologie kotle, jelikož biomasa se svým složením hořlaviny, popeloviny a prvky (např. sodík a draslík) podstatně liší od jiných paliv, jako je například uhlí. Biomasa má vysoký obsah prchavé hořlaviny, ale nižší obsah uhlíku, čímž má menší výhřevnost než uhlí. Velmi nízký obsah síry je také příhodnější pro životní prostředí a životnost kotle. [3], [5]

Problém při spalování biomasy však může nastat při špatném způsobu přívodu spalovacího vzduchu, kde kvůli tzv. dlouhému plameni musíme vzduch přivádět nad vrstvu paliva. Pokud budeme přivádět nedostatečné množství vzduchu, tak dojde k neúplnému vyhoření a zvýší se tvorba CO a uhlovodíků, což může zapříčinit jejich kondenzaci a také vznikající dehtové nánosy. [7]

Konstrukce kotlů na biomasu využívá stupňovitého spalování paliva, kde je palivo nejdříve zplyňováno pod stechiometrickým přívodem primárního vzduchu a v další části spalovací komory dohořívá v plynné fázi za přívodu sekundárního vzduchu. [3]

Kotle na biomasu se rozdělují podle:

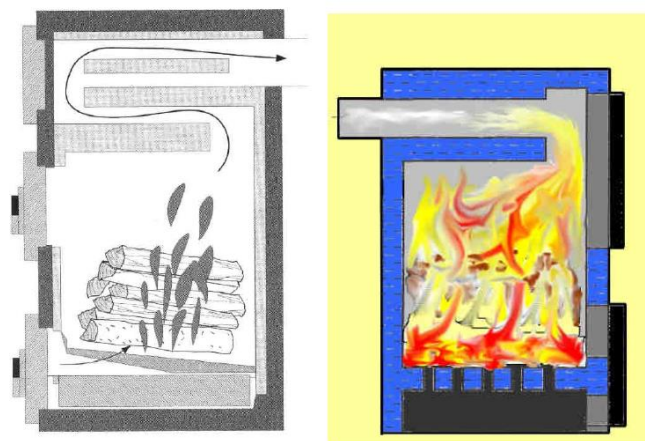
- Materiálu kotle – litinové a ocelové kotle.
- Teplonosného média – teplovodní a teplovzdušné kotle.
- Způsobu spalování – prohořivací, odhořivací a zplyňovací kotle.
- Metody přikládání – automatické a kotle s ruční obsluhou.

3.1 Způsoby spalování

Prohořivací kotle

Tyto kotle obsahují nejstarší systém spalování a jsou určené pro paliva s nízkým obsahem prchavé hořlaviny (koks, černé uhlí). U těchto kotlů je velkoprostorové ohniště, které se naplní palivem a předá se zde většina vzniklého tepla. Konstrukce kotlového tělesa je článková a podle počtu těchto článků se určuje výkon. Jako nejběžnější materiál se využívá litina. Dle zákona je nutnost použít dochlazovací smyčku, jelikož tyto prohořivací kotle mají malý prostor pro dochlazení spalin.

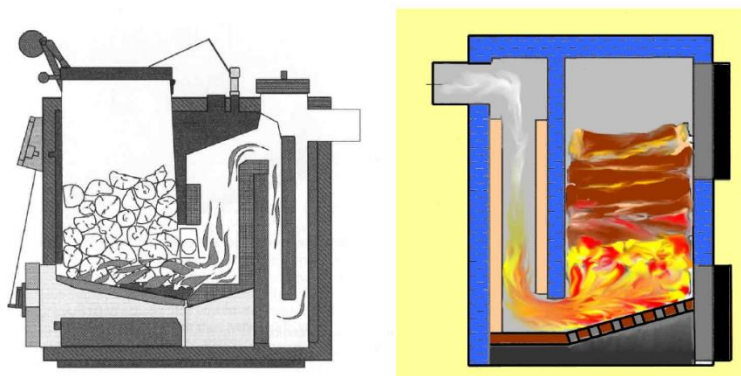
Hlavní nevýhodou těchto kotlů je omezená možnost regulace výkonu (50 – 100 %) a nevyhovující emise, díky kterým se tyto kotle řadí do emisní třídy 1. Tyto kotle se vyznačují svou dlouhou životností a možností spalovat i vlhké palivo o obsahu vody až 25 %. Účinnosti těchto kotlů na dřevo dosahuje okolo 50 – 80 %. [3], [4]



Obr. 1 Schéma prohořivacích kotlů [4]

Odhořivací kotle

Kotle jsou určeny pro paliva s vyšším obsahem prchavé hořlaviny. Mezi jeho hlavní částí patří palivová šachta, rošt, spalovací komora a výměník. Teplo se u těchto typů předává ve spalovací komoře i ve výměníku pro dochlazení spalin. Tyto kotle spadají do emisní třídy 2. Liší se dle konstrukce pro použití biomasy nebo fosilního paliva. U kotle na biomasu je větší násypka a primární vzduch je přiváděn nad rošt. Naopak u kotlů na fosilní paliva je primární vzduch přiváděn pod rošt. Oproti prohořivacím kotlům je zde delší doba hoření, což snižuje emise. Účinnost kotlů na dřevo se pohybuje okolo 50 – 80 %. [3]

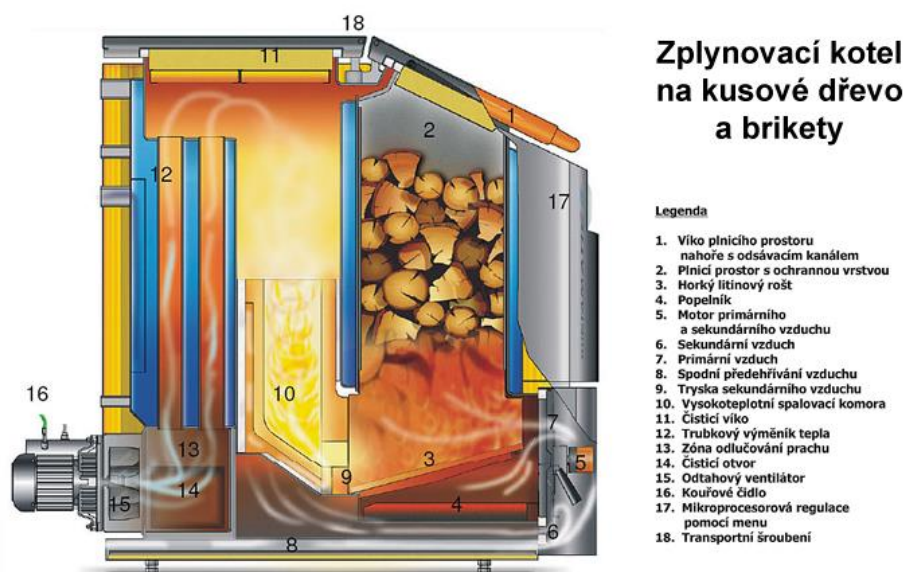


Obr. 2 Kotel se spodním odhoříváním [4]

Zplyňovací kotle

Jedná se o takzvané kotle fungující na principu pyrolýzy. Při zplyňovacím procesu dochází k tepelnému rozkladu pevného uhlíku obsaženého v palivu v jiné části spalovacího zařízení, než kde dochází k vlastnímu spalování vzniklého plynu. V horní komoře je přívod primárního vzduchu, kde se reakcí uhlíku a kyslíků rozkládá na oxid uhelnatý a vodu, přičemž dochází k dalšímu uvolnění hořlavých plynů. Do spalovací komory je přiváděn sekundární vzduch, kde hořlavé plyny a oxid uhelnatý shoří. Zplyňovací kotle mají nižší emise, protože plynné palivo se spaluje snadněji než pevné palivo. Účinnost kotle na biomasu se pohybuje okolo 70 – 90 %.

[3]



Obr. 3 Zplyňovací kotel na dřevo Guntamatic Synchro [6]

4 Emise znečišťujících látek

Škodlivé nečistoty, které se při spalování biomasy objevují ve spalinách jsou zatěžující jak pro živočichy, tak i vegetaci. Z tohoto důvodu byly vytvořeny legislativní požadavky, které mají za úkol snižovat koncentrační množství vyprodukovaných emisí při spalování v kotlích. Jednotlivé škodliviny se dělí podle vzniku na ty, co se ovlivnit spalovacím procesem ovlivnit dají (CO , NO_x , dioxiny), nedají (SO_2 , sloučeniny fluoru a chlóru, těžké kovy, CO_2) a na ty které mají vliv na skleníkový efekt. V této kapitole budou stručně popsány jednotlivé plynné emise ve spalinách, přičemž tuhým znečišťujícím látkám bude věnována pozornost v samostatné kapitole. [8], [9]

4.1 Plynné emise

Během spalování biomasy vznikají především oxidy uhlíku, vodní pára a oxidy dusíku. Výhodou při spalování biomasy je nízký obsah síry, to však záleží na místě, kde biomasa roste a či není kontaminována nějakou chemikálií, která může ovlivnit složení daného paliva.

Oxid uhelnatý (CO)

Tento znečišťující plyn patří mezi nejrozšířenější škodlivinu. Vzniká nedokonalým spálením uhlíku (doprava, lesní požáry, sopečná činnost, topeniště). Je to bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, je lehčí než vzduch, jedovatý, hoří modrým plamenem a je nedráždivý. Tato sloučenina způsobuje energetické ztráty v kotli a otravu v krvi (vysoká afinita v hemoglobinu). Abychom předešli jeho vzniku, spalování musí probíhat s tzv. přebytkem vzduchu, kde musíme optimálně zavést přívod vzduchu do spalovací komory. [9]

Oxidy uhličitý (CO_2)

Oxid uhličitý není klasifikován jako škodlivina, ale je sledován z důvodu jeho vlivu na skleníkový efekt. Vzniká při spalování uhlíku (spalování, odlesňování, eroze hornin), ale třeba také i při kompostování. Je těžší než vzduch, bez barvy, kyselé chuti a má ostrý zápach. Při vyšší koncentraci je toxický pro zdravý člověka. Tato sloučenina se využívá v potravinářském, chemickém, farmaceutickém průmyslu, ale také třeba i jako hnojivo. [9]

Oxid dusný (N_2O)

Vzniká při nízkoteplotním spalování palivového dusíku. Je to bezbarvý, nehořlavý plyn s nasládlou chutí. Také tento plyn je znám pod názvem jako „rajský plyn“. Považuje se za škodlivinu, jelikož narušuje ozónovou vrstvu a podporuje skleníkový efekt. Můžeme se s tímto plynem setkat u bombiček na přípravu šlehačky, v analytické chemii (absorpční spektrometrie), v raketových motorech a v medicíně. [9]

Oxid dusnatý (NO)

Tento plyn vzniká při teplotách vyšších než 1000 °C. Je to bezbarvý, málo reaktivní plyn, který je ve větším množství jedovatý. Při reakci s ozónem patří mezi hlavní činitele, které ničí ozónovou vrstvu. [9]

Oxid dusičitý (NO₂)

Dráždivý červenohnědý plyn, který je prudce jedovatý a je rozpustný ve vodě. Vzniká oxidací oxidu dusnatého, přímá tvorba NO₂ je příliš nízká. Tento plyn způsobuje dýchací potíže a je příčinou tvorby tzv. fotochemického smogu (losangeleský). [9]

Chlorovodík (HCl)

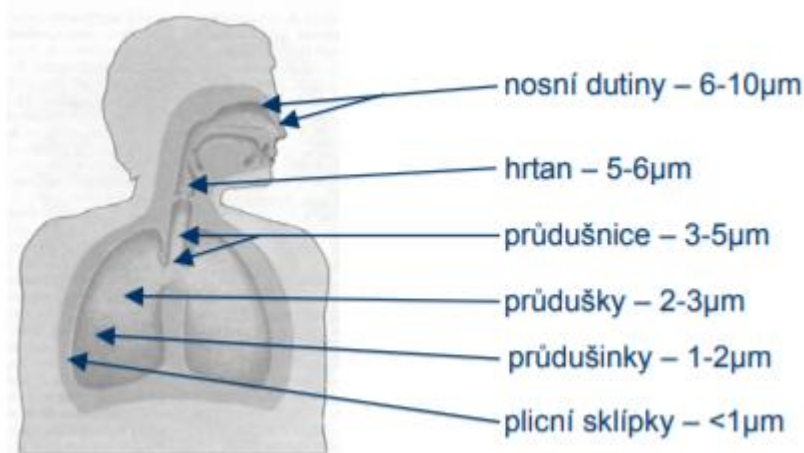
U biomasy můžeme najít prvky chlóru převážně tam, kde byla použita průmyslová hnojiva. Jedná se o bezbarvý plyn, který v reakci s vodou vytváří silnou kyselinu chlorovodíkovou. Dráždivý na pokožku, oči a dýchací cesty. Podílí se na vzniku dioxinů, což jsou polychlorované dibenzodioxiny (PCDD) a polychlorované dibenzofurany (PCDF). [9]

4.2 Těžké kovy

Mezi hlavní prvky, které jsou sledovány kvůli kontaminaci prostředí (toxicitě) jsou Ag, As, Hg, Pb, Se, Ti, Zn, Ni a další, jelikož při navázání na tuhé částice mohou způsobit vážné zdravotní problémy či narušit vegetaci. Například olovo se může usazovat v kostech, kde vytěsňuje vápník a tím zpomaluje výkon člověka. Kovy alkalických zemin (K a Na) se podílí na vzniku koroze. V přírodě se s kovy lze setkat ve formě solí nebo v ryzí formě. Nevýhodou těžkých kovů je, že nepodléhají chemické degradaci a tím se akumulují v prostředí. [9], [10]

4.3 Tuhé znečišťující látky (TZL)

Poletavý prach označován také jako tuhé znečišťující látky (dále jen TZL), který je všude přítomen okolo nás, vzniká přírodním (kosmický prach, anorganický prach, organický prach, aerosol) nebo antropogenním původem (transport surovin, důlní či opravárenská činnost, spalování paliv). Prachové částice jsou sledovány, jelikož mohou způsobit různá zdravotní onemocnění (alergické, dýchací, infekční, kardiovaskulární), kde ve spojení s kovy mohou být i karcinogenní. Sledovány jsou především frakce PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 výjimečně. Průnik jednotlivých velikostních frakcí prachu do dýchacích cest je zobrazen na obr. 4. Dále tyto částice přispívají k šíření různých reproduktivních materiálů, organismů či patogenů (viry, pyl, bakterie, spory). Také byl pozorován v Arktidě jev, kde byl sníh pokryt černými prachovými částicemi, které způsobovaly větší absorpci světla, a tím docházelo k zadržování více tepla, což zapříčinilo roztávání sněhu a ledu. [11], [17]



Obr. 4 Průnik jednotlivých velikostních frakcí prachu do dýchacích cest [19]

Prachové částice se rozdělují na [15]:

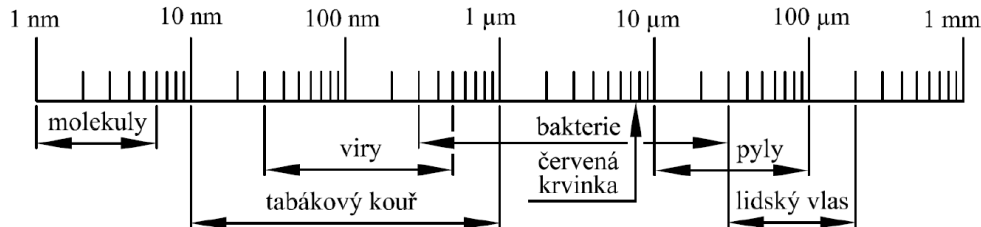
- Aerosol – částice rozptýlená v ovzduší (dým, mlha).
- Dým – jemné částice (0,1 – 1 μm) vzniklé při oxidačních procesech kondenzací látek, které jsou vypařovány za tepla.
- Mlha – kapalná směs částic (0,1 – 30 μm) vzniklá z kondenzací plynné fáze nebo rozrušením většího objemu tekutiny.
- Kouř, saze – jemné částice (0,01 – 0,5 μm) vzniklé nedokonalým spalováním.
- Prach – tuhé částice vzniklé převážně mechanickým způsobem (broušení, drcení, mletí, otěr).

Každá prachová částice je specifická svým tvarem a velikostí, které patří mezi základní parametry při odlučovacích metodách. Tyto vlastnosti ovlivňují dynamiku, rychlost a celkovou účinnost odlučování. Jako částici můžeme považovat jakýkoliv tuhý nebo kapalný disperzní materiál, kde jeho elementy mají rozměr větší než řádový rozměr molekul. Velikost u prachových částic se sleduje od průměru menším než 500 μm až po 0,1 μm . [13], [14]

Sledované částice dělíme podle velikosti na PM_{10} , $PM_{2,5}$, PM_1 , $PM_{0,1}$, kde PM_x (z anglického „Particulate Matter“) je označení pro částice o velikosti menší než $x \mu m$. Na velikosti částic závisí také jejich rychlost sedimentace, kde u větších částic je rychlejší sedimentace prachu než u velmi jemných částic (Brownův pohyb). [15]

Klasifikace podle velikosti:

- Hrubé částice (PM_{10}) – průměr částice $d \leq 10 \mu m$ může projít do horních dýchacích cest. Vznikají především suspenzí prachu, v zemědělství, činností sopek a erozí zeminy.
- Střední částice ($PM_{2,5}$) – průměr částice $d \leq 2,5 \mu m$ už může projít až do dolních dýchacích cest a plic. Vznikají z dopravních emisí, spalováním biomasy, činností papíren, oceláren, cementáren a v hutích.
- Jemné částice (PM_1) – průměr částice $d \leq 1 \mu m$ se dostane až do plicních sklípků. Vznikají z dopravních emisí, spalováním biomasy, činností papíren, oceláren, cementáren a v hutích.
- Velmi jemné částice ($PM_{0,1}$) – průměr částice $d \leq 0,1 \mu m$. Tyto velmi malé částice jsou specifické svou krátkou životností (minuty až hodiny), následně rychle zvětšují svůj objem (pomocí kondenzace či koagulace) do větších komplexních agregátů. Zrod těchto velmi jemných částic je ze spalovacích zdrojů, výfukových plynů a fotochemických reakcí. [17], [18]



Obr. 5 Obvyklé velikosti částic [18]

4.3.1 Vlastnosti prachových částic

V této kapitole budou popsány základní vlastnosti sledovaných prachových částic, které rozhodují o odlučovacích schopnostech a vlivu na opotřebení zařízení (korozivní a abrazivní účinky). Tato kapitola je vytvořena za pomoci těchto zdrojů: [14], [15], [20].

Tvar částic

Tvar částice je závislý na způsobu složitosti jejich vzniku. Dále je závislý na daném skupenství disperzního podílu, kde při kondenzaci vznikají pravidelné tvary koule. Můžeme se setkat i s komplikovanějšími tvary, které vznikají při mechanických procesech.

Částice a jejich tvary rozdělují v praxi do třech základních druhů:

- Izometrické částice (korpuskulární) – v souřadnicovém trojrozměrném systému jsou všechny tři rozměry os téměř shodné.
- Ploché částice (laminární) – jeden rozměr je výrazně menší než dva další rozměry, tvar destiček, šupinek a lamel (břidlice, tuha, laky, hobliny).
- Vlákenné částice (fibrilární) – jeden rozměr je výrazně větší než zbývající dva rozměry, tvar vláken, tyčinek nebo jehlic (piliny, textilní vlákna).

Měrná hmotnost

Měrná hmotnost nebo také měrná hustota slouží k určení objemu prachových částic.

Dělíme je na tři druhy:

- Skutečná měrná hmotnost – objem bez pórů, pro zjištění hmotnosti se využívá pyknometrická metoda.
- Synná měrná hmotnost – objem s póry, určení objemu zjišťujeme pomocí nádob.
- Střesená měrná hmotnost – objem střeseného prachu, určení pomocí nádob, kde setřesení probíhá za předem definovaných podmínek.

Měrný povrch

Měrný povrch má vliv na absorpci vlhkosti plynů a na rychlosti rozpouštění částic. Abychom určili celkový povrch částic, tak musíme využít některou z metod pro absorpci plynu (chromatograf).

Distribuce částic

Tuto vlastnost je důležité sledovat z důvodu konstrukce odlučovačů, kde musíme znát granulometrii částic, a to především od 0 – 30 μm . Pro granulometrii (zrnitost) využíváme metody pro stanovení velikosti částic, které rozdělujeme na:

- Mechanické – síťová analýza, filtrace, gelová chromatografie, ultrafiltrace.
- Sedimentační (gravitační) – sedimentační kužely a centrifuga.
- Optické – dělíme na přímé (mikroskopické analýzy, skenovací mikroskopické sondy) a nepřímé metody (laserová analýza, rentgenová analýza).

Smáčivost

Je dáno povrchovým napětím kapalin. Smáčivost lze rozdělit do dvou základních skupin, a to na hydrofobní a hydrofilní částice. Tento parametr je velice důležitý pro funkci mokřích mechanických odlučovačů.

Adheze (lepivost)

Důležitým faktorem lepivosti je soubor Van der Walsových, elektrostatických a kapilárních sil. Dále jsou silně závislé na vlhkosti materiálu. Prachové částice dle adheze rozdělujeme do čtyř základních skupin:

- Nelepivé prachy ($A < 0,06$ MPa) – struska, písek a suťový prach.
- Málo lepivé prachy ($0,06 < A < 0,3$ MPa) – koks, magnezit a hrubý uhelný prach.
- Středně lepivé prachy ($0,3 < A < 0,6$ MPa) – saze, popílek a jemný uhelný prach.
- Velmi lepivé prachy ($0,6 > A$ MPa) – vápenec, sádra, kaolin a jemné prachy (PM₁₀).

Sypný úhel a úhel kluzu

- Sypný úhel – volně sypaný materiál vytváří kužel, jehož povrch svírá s podstavou sypný úhel.
- Úhel kluzu – je úhel podložky, při kterém dojde k pohybu materiálu na nakloněné rovině.

Permitivita

Jedná se o schopnost materiálu se polarizovat. Součinem permitivity vakua a relativní permitivity dostaneme celkovou permitivitu. Permitivita ovlivňuje jevy probíhající v elektrostatickém poli, zejména velikost náboje prachových částic. Relativní permitivita je závislá na hustotě látky.

Elektrický odpor

Elektrický odpor je důležitý z pohledu odporu na stěnách elektrostatických odlučovačů, kde menší měrný odpor je příznivější pro odlučování. Měrný odpor je závislý na mnoha faktorech (chemické složení, vlhkost, vodivost, rosný bod plynu, zrnitost).

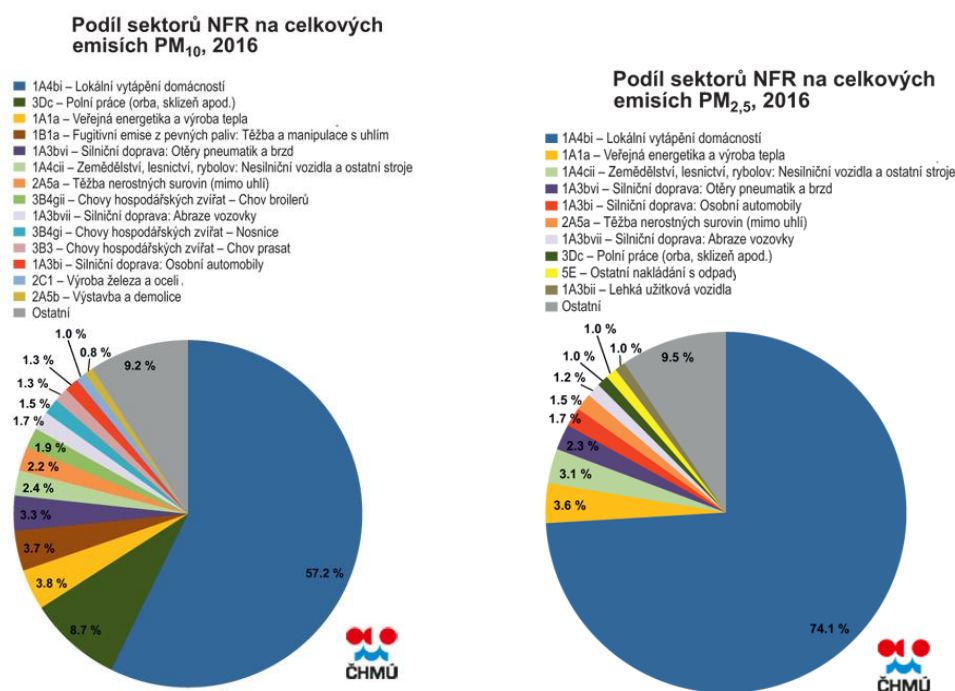
Výbušnost

Některé práškové materiály se stykem ve směsi s kyslíkem mohou být výbušné. Proto se určuje horní a dolní mez výbušnosti. Zde jsou zmíněné podmínky, které musí být splněny, aby došlo k výbuchu:

- Minimální obsah kyslíku v prostředí.
- Koncentrace prachu je v mezích výbušnosti.
- Dostatečná energie pro zážeh (jiskra, horké plochy, manipulace s otevřeným ohněm).

4.3.2 Podíl sektorů na znečištění ovzduší částicemi PM₁₀ a PM_{2,5}

Suspendované částice frakce PM₁₀ a PM_{2,5} stále zůstávají mezi hlavními, které znečišťují ovzduší, a proto je nutno řešit jejich redukci či eliminaci za účelem zlepšení kvality ovzduší. Z toho důvodu ČHMÚ z kontinuálního imisního monitoringu ve spolupráci s laboratoří ochrany ovzduší sbírají data, které vydávají v grafické ročenke. Níže jsou dva grafy s podílem sektorů NFR na celkových emisích frakce PM₁₀ a PM_{2,5} z grafické ročenky 2017. [21]



Obr. 6 Podíl sektorů NFR na celkových emisích z roku 2016 pro frakce PM₁₀ a PM_{2,5} [21]

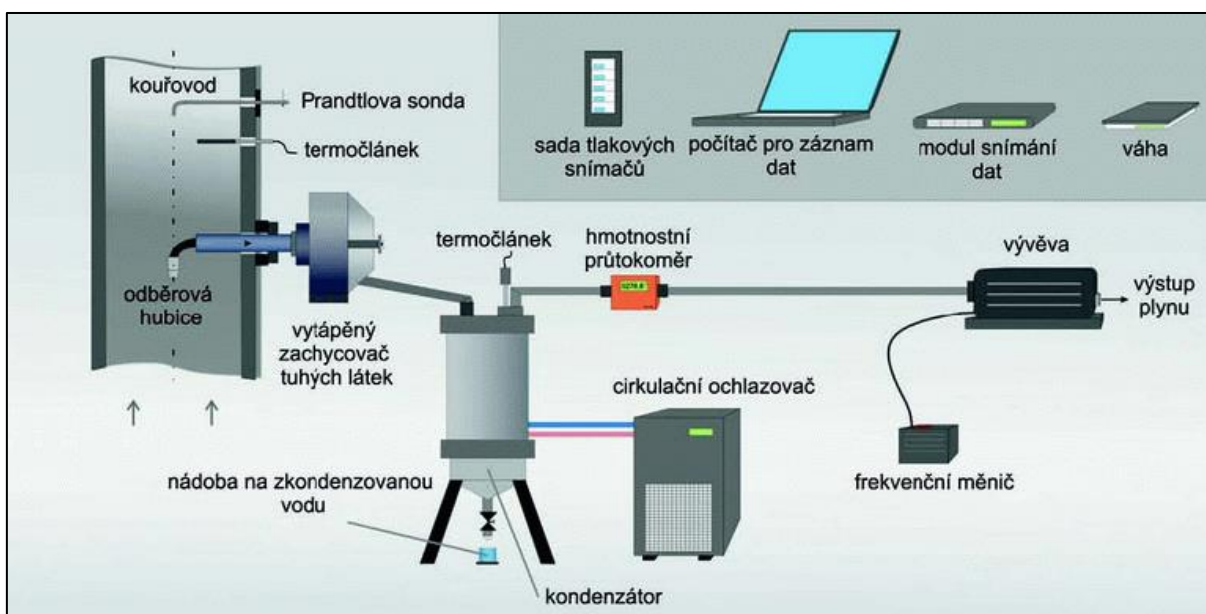
Z těchto grafů můžeme vyčíst, že největší podíl na celkových emisních frakcích PM₁₀ a PM_{2,5} je zastoupen v sektoru „lokální vytápění domácností“, kde podíl v roce 2016 u frakce PM_{2,5} dosahoval až 74,1 % a u frakce PM₁₀ 57,2 %. Tudíž je patrné, že největší příspěvek do zhoršování kvality ovzduší mají kotle o malých výkonech spalující tuhá paliva, krby a kamna. Problém, kdy dochází opakovaně k nedodržování imisních koncentrací se objevuje ve velkých aglomeracích jako je Praha, Brno či na Ostravsku, přičemž v Ostravě jsou zaznamenávány opakovaně největší hodnoty, což z části ovlivňuje i přenos částic z Polské republiky. Toto je řešeno legislativními požadavky, které mají za úkol redukovat tyto emise. Největší rozdíl na podílu v jednotlivých sektorech by měl být vidět až po roce 2022, kdy má být zakázán provoz kotlů 1. a 2. emisní třídy a ty mají být nahrazeny moderními nízkoemisními zdroji tepla.

4.3.3 Metody měření TZL

Měřit TZL lze několika osvědčenými metodami. Přičemž metoda gravimetrická, optoelektronická a radiometrická je popsána v této kapitole. V experimentální části byla využita právě metoda gravimetrická.

Gravimetrická metoda

Spaliny jsou odebírány z komína pomocí odběrové hubice, kde prochází přes vytápěný zachycovač tuhých látek. Zde se nachází filtr ze skleněných vláken, na který se zachycují prachové částice. Zbytek spalin prochází skrz filtr směrem až do kondenzátoru, kde voda obsažená ve spalinách zkondenzuje. Na konci celé této metody je hmotnostní nebo objemový průtokoměr, který měří množství odebraných spalin. Konečnou koncentraci TZL následně zjistíme podle podílu hmotnosti zachyceného prachu na filtračním materiálu a množství spalin, které byly odebrány pomocí průtokoměru. Tato metoda vychází z normy ČSN EN 13284-1. [22]



Obr. 7 Stanovení koncentrace TZL dle ČSN EN 13284-1 [22]

Podmínkami měření se rozumí podmínky, za kterých musí být měření dodrženo, aby výsledné hodnoty byly relevantní a jednotné s normou. Některé důležité podmínky jsou sepsány níže:

- Odběr každého vzorku musí trvat minimálně 30 minut.
- Musí být zajištěn izokinetický odběr vzorku, kdy rychlost v ústí odběrové sondy má stejnou rychlost jako rychlost mimo ní, když tato podmínka není dodržena, mohou se částice nerovnoměrně vtahovat do sondy.
- Minimálně 4 měření.
- Výsledné koncentrace musí být přepočteny na referenční obsah kyslíku.
- Během odběru musí být konstantní proudění spalin.

Optoelektronická metoda

Tato metoda je založena na orthogonální nefelometrii, která využívá laserový paprsek na prosvícení proudu pod úhlem 90° . Při kontaktu s částicemi se paprsek neodrazí zpátky do původního místa, ale pod určitým úhlem, který je přímo závislý na velikosti dané částice. Výhodou tohoto měřicího přístroje je, že umí vyhodnotit více frakcí najednou a zjistit konečné koncentrace pro PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 . [23]

Radiometrická metoda

Jedná se o dosti podobnou metodu jako je gravimetrická. Rozdíl u této metody je takový, že filtr při této metodě nevážíme, ale místo toho využijeme β -záření, kterým ho prozařujeme. Za filtrem, kde je umístěn detektor, měříme intenzitu tohoto paprsku. S větším množstvím prachu na filtru, nám klesá intenzita prostupu paprsku. [23]

4.4 Legislativa

Jediná možnost pro snižování škodlivých emisí je úprava její legislativy. Emisní limity pro kotle do 500 kW se v současné době řídí dle normy EN 303-5:2012. Tato norma nařizuje měření tří mezních hodnot emisí. Jedná se o koncentrace CO, OGC a TZL. Tyto hodnoty se udávají v $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ (za normálních podmínek) při 10 % O_2 nebo při 13 % O_2 .

V této normě jsou také popsány požadavky na bezpečnost kotlů, způsoby jejich zkoušek a konstrukční materiál.

Dále jsou emisní limity rozděleny do pěti tříd, které musí tyto kotle plnit při sníženém i jmenovitém výkonu. V současné době se smí prodávat pouze a jen kotle 4. a vyšší třídy. Kotle 1. a 2. emisní třídy se přestaly prodávat od 1.1.2014, avšak provozovat se mohou až do 1.9.2022. Prodej kotlů s emisní třídou 3. byl ukončen 1.1.2018 a ty se budou moci provozovat i po roce 2022 společně s 4. a 5. emisní třídou, u kterých bude prodej kotlů ukončen od 1.1.2020. Po roce 2020 se bude moci koupit pouze kotel, který bude splňovat požadavky na tzv. Ekodesign. Mezní hodnoty pro TZL jsou znázorněny v tab. č. 1. [24]

Tab. č. 1 Staré a nové emisní limity prachu dle EN 303-5:1999 a EN 303-5:2012 [26]

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnoty emisí (koncentrace)				
			Prach (TZL)				
			$\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10% O_2 ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 13% O_2)				
			Třída 1 ¹⁾	Třída 2 ¹⁾	Třída 3 ^{2),3)}	Třída 4 ²⁾	Třída 5 ²⁾
Ruční	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	75 (55)	60 (44)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
Samočinná	Biologické	≤ 50	200 (145)	180 (131)	150 (109)	60 (44)	40 (29)
		> 50 až 150	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	200 (145)	180 (131)	150 (109)		
	Fosilní	≤ 50	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 50 až 150	180 (131)	150 (109)	125 (91)		
		> 150 až 300 ¹⁾ , 500 ²⁾	180 (131)	150 (109)	125 (91)		

¹⁾ dle již zrušené EN 303-5:1999

²⁾ dle nové EN 303-5:2012

³⁾ U kotlů emisní třídy 3 pro alternativní biopaliva není třeba splnit požadavek na emise prachu. Skutečná hodnota musí být uvedena v technické dokumentaci a nesmí překročit $200 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 10% O_2 ($145 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ při 13% O_2).

4.4.1 Ekodesign

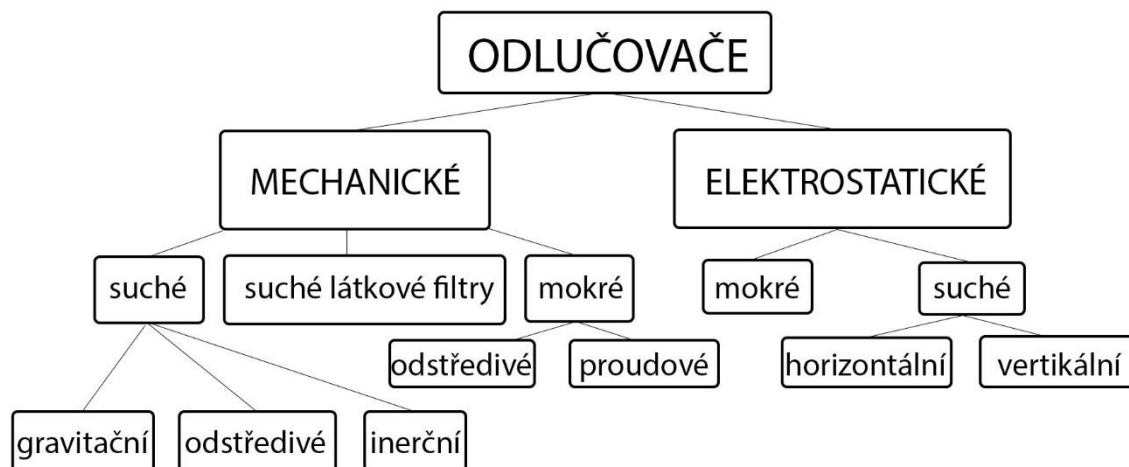
Od 1. 1. 2020 musí každý prodejce kotlů na tuhá paliva splňovat normu Ekodesign, což je norma, která zpřísňuje emisní limity pro provoz kotlů. Zavádí se zde nový parametr pojmenovaný jako „Sezónní energetická účinnost vytápění“. U kotlů s výkonem do 20 kW je její minimální hodnota stanovena na 75 % a pro kotle od 20 – 500 kW na 77 %. Ve výpočtu u účinnosti se při stanovení příkonu využívá spalného tepla místo výhřevnosti. Jedná se o vážený průměr kotle, který v průběhu topné sezóny pracuje jen omezeně při jmenovitých podmínkách (váha je stanovena na 85 % pro snížený výkon a 15 % pro jmenovitý výkon). V tabulce níže jsou požadavky dle směrnice Ekodesignu. Pokud nedojde k úpravě těchto emisních limitů, tak se dají považovat za konečné. [24]

Tabulka č. 2 Požadavky pro kotle na tuhá paliva dle směrnice Ekodesign, které budou platit po roce 2020 (vyjádřeno jako koncentrace znečišťující látky v mg/m^3 v suchých spalínách při 6 % O_2 , 101 325 Pa, 0 °C) [24]

Platné předpisy	výkon / příkon kotle	typ kotle	tuhé částice (PM)	uhlovodíky (OGC, TOC)	oxid uhelnatý (CO)	oxidy dusíku (NO _x vyjádřeno jako NO ₂)
<i>Požadavky dle Směrnice o Ekodesignu 2009/125/ES - požadavky pro kotle na tuhá paliva, platnost od 1. 1. 2020, jedná se o sezónní emise znečišťujících látek - vážený průměr (85% P_{snížený}, 15% P_{jmen})</i>	do 0,5 MW	automatické kotle	55 (40)	27 (20)	682 (500)	273 ⁴⁾ (200)
		manuální kotle	82 (60)	41 (30)	955 (700)	477 ⁵⁾ (350)
4) kotle na biomasu						
5) kotle na fosilní paliva						

5 Typy odlučovačů

Při odlučování částic využíváme různé metody, typy a principy odlučování. Základní rozdělení těchto odlučovačů je naznačeno na obr. 6. Jednotlivé typy, principy a vlastnosti odlučovačů budou popsány v této kapitole.



Obr. 8 Rozdělení odlučovačů

5.1 Základní vlastnosti pro volbu správného odlučovače

Pro volbu vhodného odlučovače je důležité sledovat celkovou a frakční odlučivost, které rozhodují o účinnosti daného zařízení. Dále je nutno pozorovat tlakové ztráty, které mohou značně ovlivnit provozní náklady a také funkčnost odlučování. Musíme také brát v potaz investiční náklady na pořízení samotného zařízení a jejich provozní náročnost.

5.1.1 Celková odlučivost

Základním úkolem každého odlučovače je odloučit příměs z proudu plynu na minimální hodnotu emisního limitu. Z toho důvodu se zavedla veličina nazývaná celková odlučivost, která má za úkol zjistit účinnost odlučování. [14]

Tuto veličinu můžeme jednoduše zjistit z hmotnostní bilance, kde u odlučovače máme hmotnostní tok na vstupu do odlučovače $\dot{M}_p$, na výstupu $\dot{M}_v$ a na záchytu $\dot{M}_z$. Z čehož pak dostaneme vztah pro výpočet celkové odlučivosti O_c (také označováno jako celkový průnik P_c):

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

Hmotnostní toky na vstupu a výstupu jsou určovány zpravidla měřeními hmotnostních koncentrací (C_p a C_v) a objemových průtoků (V_p a V_v). Když nedochází ke změně stavu plynu při průtoku, tak můžeme zanedbat objemové průtoky. Potom pro celkovou odlučivost platí [14]:

$$O_c = \frac{\dot{V}_p \cdot C_p - \dot{V}_v \cdot C_v}{V_p \cdot C_p} = \frac{C_p - C_v}{C_p} \quad (2)$$

Hmotnostní koncentrace částic se musí přepočítat na normální podmínky a až poté je můžeme porovnávat s emisními limity. Celková odlučivost závisí na odlučovacích schopnostech odlučovače a na zrnitosti vstupujícího prachu, která se vyjadřuje křivkou zbytků. [14]

5.1.2 Frakční odlučivost

Frakční odlučivost O_f nám vyjadřuje schopnost odlučovat částice v úzkém velikostním intervalu, která je dána poměrem příslušných frakčních hmotnostních toků v přívodu a záchytu. [14]

$$O_f = \frac{\dot{M}_z \cdot dZ_z}{\dot{M}_p \cdot dZ_p} = O_c \frac{dZ_z}{dZ_p} \quad (3)$$

Kvůli odlučovacím schopnostem se frakční odlučivost považuje za základní vlastnost pro odlučovače. Tato vlastnost nám udává odlučivost jednotlivých velikostí částic – frakce.

5.1.3 Tlaková ztráta

Další pozorovaný parametr je tlaková ztráta, která rozhoduje u většiny odlučovačů při spotřebě energie daného odlučovače, čímž také určuje jejich provozní náklady. Tlaková ztráta je definována jako rozdíl celkových tlaků na vstupu a výstupu. Tlakové ztráty jsou závislé také na měrné spotřebě vody, což se týká pouze mokrých odlučovačů. U průmyslových filtrů jsou největší ztráty při průchodu materiálem a přilehlou vrstvou částic. [14]

5.2 Základní principy při odlučování

V této kapitole jsou popsány základní fyzikální principy s kterými se můžeme setkat u různých typů odlučovačů.

5.2.1 Gravitační síla

Proud plynu, který unáší částici určitou rychlostí je vystaven působením gravitační síly, která vytváří u částice pádovou rychlost. Výsledný pohyb této částice je dán součtem těchto dvou sil. Při větším rozdílu mezi hustotou částice a prostředím roste také pádová rychlost a tím i sklon jejího klesání. Často je velikost gravitační síly příliš nízká, což není moc vyhovující pro jemnější částice, u kterých je unášivá síla mnohokrát větší než gravitační, a proto jejich účinnost odlučování je skoro nulová. Také musíme u velmi malých částic brát v potaz Brownův pohyb v kapalině a její vliv na turbulenci proudu, který napomáhá k jejich neodloučení. [14]

5.2.2 Setrvačná síla

Tento princip využívá náhlou změnu rychlosti částice, která využívá náraz do překážek, které způsobí změnu směru proudění vlivem své setrvačnosti. Tím ztrácí svou rychlost a odchýlí se od své původní trajektorie a dopadne na odlučovací odběrné místo. [14]

5.2.3 Elektrostatická síla

Tohoto principu využívají elektrostatické odlučovače, které využívají elektrických vlastností částic ve vzniklém elektrickém poli. Tyto částice jsou nabíjeny tzv. „koronovým“ výbojem pomocí nabíjecí elektrody. To způsobí vychýlení z proudu plynu vlivem elektrostatické síly, kde dojde k odloučení těchto částic na srážecí elektrodě. Při tomto odlučování musí být důkladně analyzován proudící plyn, který musí splňovat základní podmínky pro elektrické odlučování. Elektrické pole musí mít vysokou intenzitu. [14]

5.2.4 Filtrační děj

Zachycení částic spočívá spolupůsobením několika mechanismů, které reagují mezi sebou. Zde jsou popsány jednotlivé mechanismy [14]:

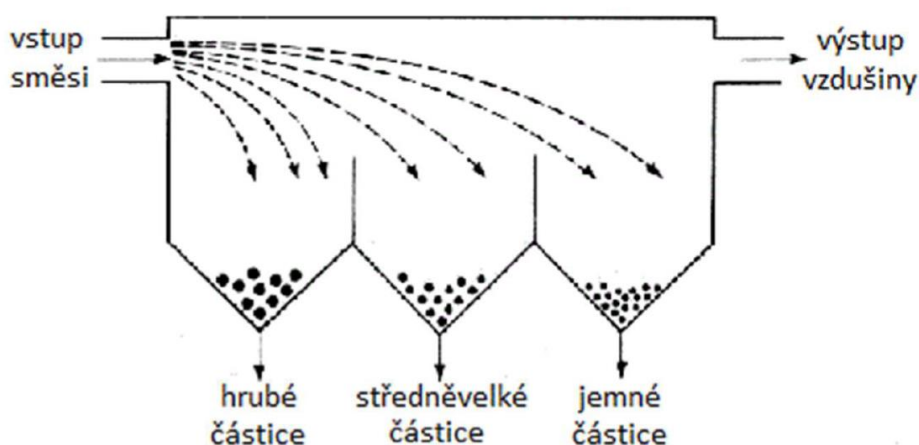
- Sítovací účinek – dochází k přímému zachycení částic prachu větších, než je samotný průměr pórů filtračního koláče či přepážek.
- Impaktní – po nárazu částice na filtrační přepážku se prachová částice zachytí ve filtrové textilií.
- Difusní účinek – v důsledku Brownova pohybu se částice submikronové velikosti usazují na vláknech přepážek.
- Elektrostatický účinek – usazení částic na vláknech pomocí elektrostatických sil.
- Sedimentační účinek – usazení prachových částic vlivem gravitační síly.

5.3 Mechanické suché odlučovače

Při tomto způsobu odlučování se využívají gravitační, odstředivé a setrvačné síly. Díky rozdílné hustotě TZL a plynným spalinám dochází k odloučení dané frakce částic. Tyto odlučovače patří mezi ty investičně a provozně nenáročné, to si však vybírá daň na nižší účinnosti, která se pohybuje kolem 50 %. Mechanické suché odlučovače dokážou odlučovat pouze hrubé částice, přičemž jemné částice nedokážou odloučit vůbec. Proto se tyto typy odlučovačů používají spíše jako první stupeň u vícestupňových systémů, kde díky nim odloučíme hrubší částice. [14], [27]

5.3.1 Usazovací komory

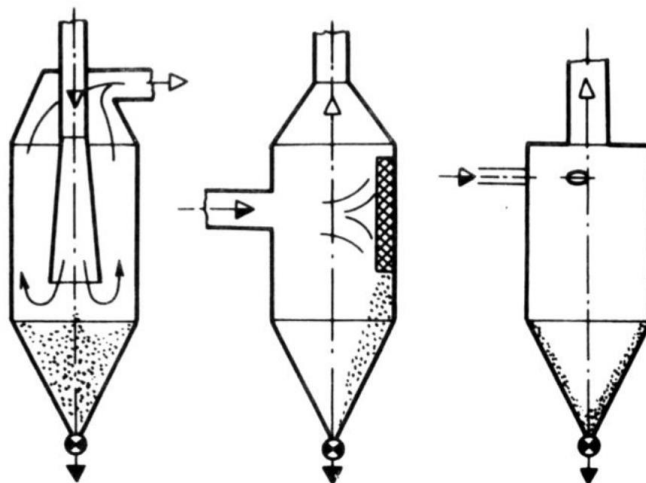
Tyto typy odlučovačů využívají gravitačního principu odlučování. Spaliny jsou přivedeny do usazovací komory potrubím, kde hrubší částice ztrácí unášivou rychlost dříve než jemnější částice a díky gravitační síle a své setrvačnosti se odlučují ve výsypce. Účinnost se dá zvýšit přidáním přepážek, které způsobí snížení unášivé rychlosti částice a tím změni svůj směr a odloučí se. Avšak ani s těmito přepážkami není účinnost těchto odlučovačů moc vysoká, jelikož usazovací komory nedokážou odloučit částice o velikosti menší než 0,1 mm. [19], [27]



Obr. 9 Usazovací komora bez přepážky [25]

5.3.2 Prašníky

Svou válcovitou konstrukcí patří mezi nejjednodušší konstrukce odlučovačů, které mají výhodu menší tlakové ztráty, avšak mezní odlučivost je velice nízká ($50 - 100 \mu\text{m}$), tudíž i celková účinnost odlučovače. Prašníky využívají setrvačného principu odlučování. Tyto odlučovače obsahují různé přepážky či zábrany, na kterých se částice díky své setrvačnosti a tíhy odloučí. Ty co se neodloučí, jsou výstupním otvorem odváděny pryč. [14], [27]



Obr. 10 Typy prašníků [34]

5.3.3 Žaluziové odprašovače

U těchto odlučovačů jsou využívány žaluzie (přepážky), na které letící částice narážejí a tím se mění jejich rychlost a směr, čímž se odloučí do výsypky. Jemnější částice kopírují směr přepážek a pokračují dále v proudu. Žaluziové odprašovače slouží převážně jako předstupeň pro zvýšení koncentrace při malém objemu plynu. Nevýhodou je snížená životnost v důsledku abrazie částic na žaluzie a také možnost jejich zalepení, což pak může zapříčinit výbuch v odlučovači. [14], [27]



Obr. 11 Žaluziový horizontální odprašovač [36]

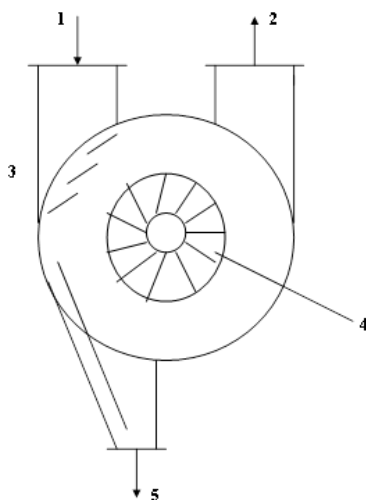
5.3.4 Rotační odlučovače

Rotační odlučovač je charakteristický svým rotorem, který pohání asynchronní elektromotor. Tím se plyn dostává do rotace, kde se odloučí. Dělíme je na odlučovače ventilátorové a odstředivé.

Ventilátorový rotační odlučovač využívá na konci tvarovaných lopatek odstředivou a Coriolisovou sílu. Částice jsou na tyto lopatky vháněny ventilátorovým kolem a následně jsou odlučovány svou setrvačností přímo do výsypky. Vyčištěný plyn dále proudí do spirální skříně.

Dalším typem je odstředivý rotační odlučovač, kde se nachází soustava rotujících soustředných válců. Těmito válci prochází plyn a je jimi uveden do rotace. Vlivem odstředivé síly dojde k odloučení těchto částic na vnitřních stěnách válců. Odloučené částice jsou poté odváděny při nižších otáčkách a uzavřené uzavírací klapky pro přívod plynu. Částice poté díky sklonu osy válců spadnou do výsypky.

Nejsou vhodné pro odlučování abrazivních a lepivých prachů. Mez odlučivosti se pohybuje kolem 10 μm . Používají se pro menší objemové průtoky. [14], [27]



Obr. 12 Ventilátorový rotační odlučovač [29]

1 – vstup znečištěného plynu, 2 – výstup odprášeného plynu,

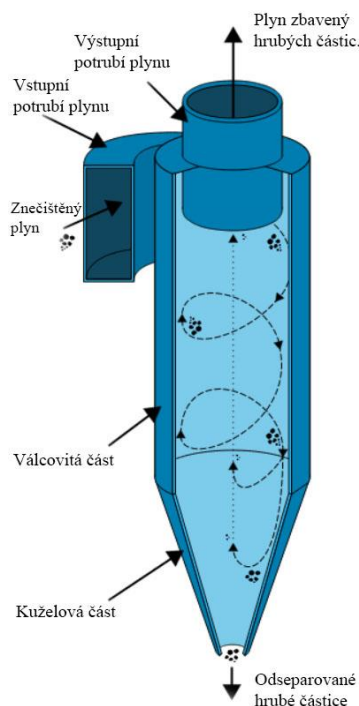
3 – žaluzie, 4 – rotor, 5 – výsypka

5.3.5 Cyklóny

Cyklóny často taky známe jako vírové odlučovače patří mezi jedny z nejpoužívanějších mechanických odlučovačů. Princip spočívá v tom, že spaliny jsou přiváděny potrubím do cyklónu tangenciálně, což způsobí vířivý šroubovicový pohyb. Tento pohyb na základě setrvačného a odstředivého principu odloučí částice až do výsypky. S menším průměrem částice a hustotou odlučivost zařízení prudce klesá. Hrubé částice se odlučují ihned po stěně odlučovače, zatímco jemné částice jsou rovnoměrně rozptýlovány a nedochází k jejich odloučení, což snižuje zmiňovanou účinnost.

Mezi hlavní výhody těchto cyklónových odlučovačů patří jednoduchá konstrukce, nízké provozní náklady, malý požadavek na údržbu, malé prostorové náklady a možnost rekuperace surovin. Tento typ odlučovače se nehodí pro čištění plynu s vysokou relativní vlhkostí a pro částice, které jsou menší než 10 μm . U axiálních cyklónů může docházet k zanášení vstupní lopatky.

Dále jsou tyto cyklóny nevhodné pro mazlavý a lepkavý materiál, který může zanášet stěny cyklónů. Cyklóny jsou častokrát využívány při dvoustupňovém odlučování, kde v prvním stupni se odlučují hrubé částice a ve druhém stupni se pomocí elektrostatických odlučovačů nebo textilními filtry odloučí jemnější frakce. [14], [27]



Obr. 13 Cyklónový odlučovač [28]

5.3.6 Multicyklóny

Pro čištění většího objemu plynu se využívají multicyklóny, což je zařízení s více cyklóny uspořádaných za sebou v uzavřené skříni. Principiálně fungují podobně jako cyklóny, s tím rozdílem, že výstupy jednotlivých cyklónů se napojují na společnou odvodní trubici. Hlavní nevýhodou jsou velké výrobní náklady tohoto zařízení. [14], [27]

5.4 Mechanické mokré odlučovače

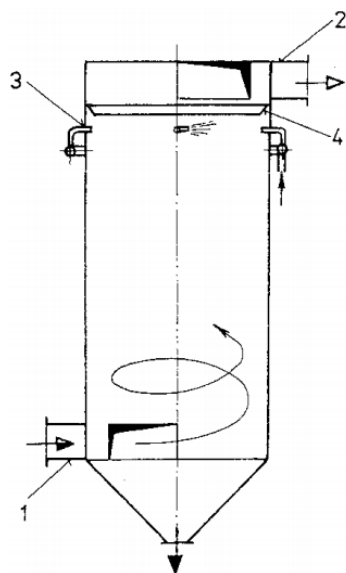
Mokré odlučovače využívají odstředivý a setrvačný princip k odlučování částic. Částice se vážou do kapiček kapaliny (ve většině případech voda), kde se společně odlučují do odběrného místa. Díky tomuto způsobu odlučování jsme schopni odloučit i jemnější frakce. Tyto odlučovače se hodí pro abrazivní i lepkavé částice. Často se tyto mokré odlučovače využívají ve spalovnách komunálního odpadu.

Mezi nevýhody těchto zařízení patří možné zamrzání, nebezpečí koroze a velmi časté zanášení. Také jsou velmi ekonomicky náročné na provoz z důvodu vysoké spotřeby kapaliny, avšak s jednoduchou údržbou. Charakteristické jsou svou vysokou tlakovou ztrátou. Mezi hlavní výhody patří dobrá odlučivost těch nejjemnějších frakcí. Společně s prachovými částicemi dokážeme odstraňovat i další nežádoucí látky v procesu (nutno zvolit vhodnou kapalinu). Můžeme odlučovat i aerosoly. [14], [27]

Hlavní kritéria vhodnosti prací kapaliny:

- Malé povrchové napětí.
- Dobrá smáčivost (dvojice látek).
- Velká ochlazovací schopnost.
- Nízká cena.

5.4.1 Vírové odlučovače (vírníky)



Vírníky známe taky jako mokré cyklóny. Fungují na stejném principu jako suché cyklóny, s tím rozdílem, že plyn je přiváděn do spodní části komory a na vnitřních stěnách komory je plyn smáčen vodou, která tvoří kapalnou film na obvodu stěny. V tomto místě se zachytávají prachové částice a jsou odváděny do výsypky ve formě kalu. Vstupní teplota do komory by neměla být větší než 150 °C, jelikož by mohla způsobit vypařování vodního filmu a částice by se mohly lepit na stěnu komory a zanášet se. Účinnost u tohoto mokrého odlučovače je oproti ostatním mokrým odlučovačům nižší. [14]

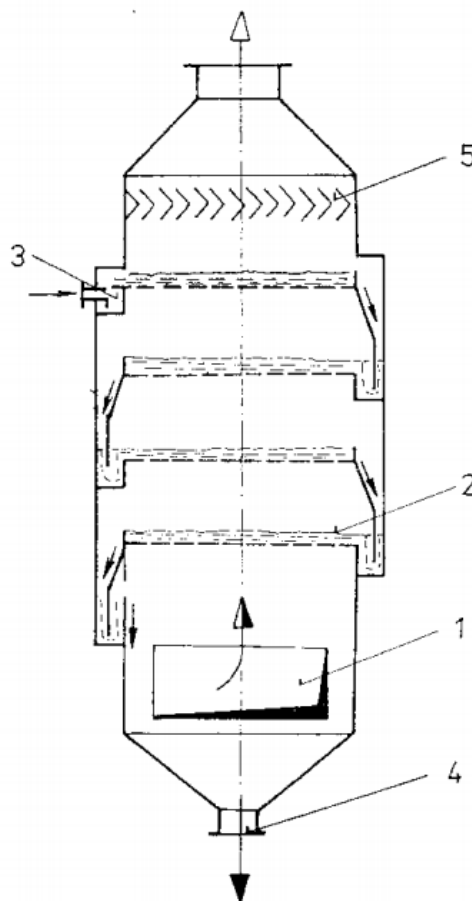
Obr. 14 Mokrá vírový odlučovač [14]

- 1 – vstup znečištěného plynu,
2 – odvod vyčištěného plynu,
3 – přívod vody,
4 – odlučovač kapek

5.4.2 Pěnové odlučovače

Principem pěnového odlučovače je probublávání plynu jednou či více vrstvami vody, ta je vstříkována na děrované rošty, kde vytváří voda nestabilní pěnu. Tato nestabilní pěna protéká do nižších pater, kde se přes tříšť vodních kapiček odlučují částice o velikosti nad PM_{10} při účinnosti až 95 %. Takto vysoká odlučivost řadí pěnové odlučovače mezi nejúčinnější mokré mechanické odlučovače. Pro částice menší, než PM_{10} je odlučivost částic velmi nízká, tudíž pro jemnější částice prachu není vhodná. Děrované rošty jsou umístěny do pater, přičemž s každým dalším přidaným patrem se zvyšuje tlaková ztráta zařízení. V horní části odlučovače je umístěn odlučovač kapek, který slouží k odloučení zbytku vodních kapek vyčištěného plynu. [14]

Nevýhodou je možné skladování prachových částic na jednotlivých patrech a vyšší pořizovací náklady. Naopak výhodou je dobrá přizpůsobivost podmínkám, což nám dává možnost odlučovat i při malém objemovém průtoku. [27]

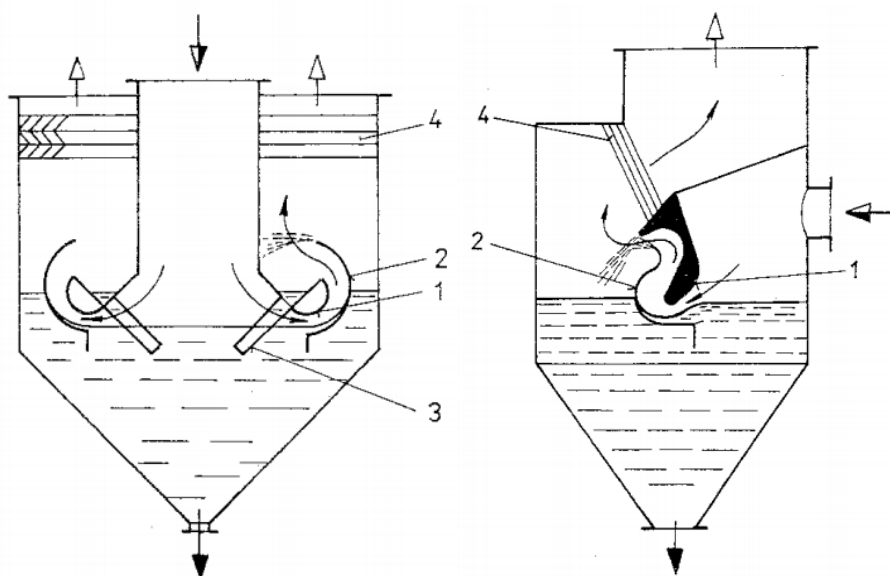


Obr. 15 Pěnový odlučovač [14]

1 – vstup znečištěného plynu, 2 – patro s pěnovou vrstvou, 3 – přívod kapaliny, 4 – kal,
5 – odlučovač kapek

5.4.3 Hladinové odlučovače

Tento typ mokrého odlučovače funguje na setrvačném principu. Kde přívod plynu je přiváděn nad hladinu kapaliny, a to buď kolmým nebo tangenciálním způsobem. Plyn dále prochází kolem vodní hladiny a přes různé typy štěrbin. Tady dochází k unášení částic vlivem odstředivé síly na stěnu štěrbin, která je omývána vodním nástríkem kapaliny. Dojde ke smísení částic a proběhne jejich odloučení. Na výstupu, jak už je u mokrých odlučovačů zvykem je tzv. odlučovač kapek. Nevýhodou je velká tlaková ztráta, která může dosáhnout až 1500 Pa. Výhodou je naopak vysoká mez odlučivosti, a to až PM₁. [14]



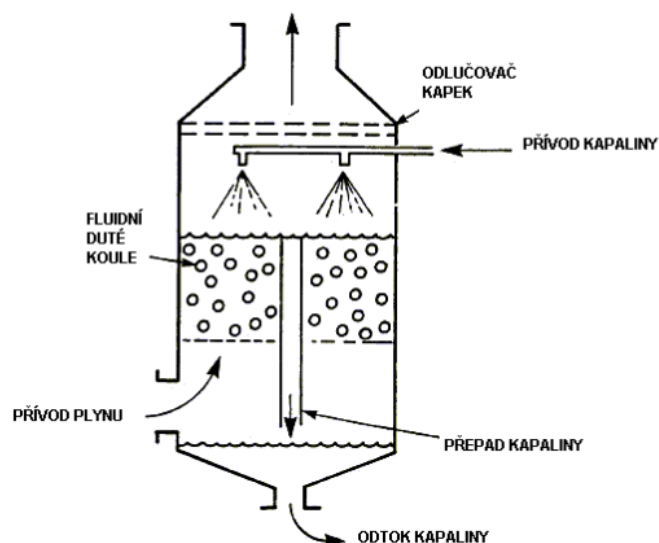
Obr. 16 Hladinový odlučovač s kolmým (vlevo) a s tečným (vpravo) přívodem plynu [14]

1 – přívod znečištěného plynu, 2 – štěrbin, 3 – odvodní kanál, 4 – odlučovač kapek

5.4.4 Sprchové věže (pračka)

Jedná se o nejpoužívanější typ mokrých odlučovačů. Pračka využívá trysky umístěné na roštu pro rozstřikávání kapaliny (vzniká mlha) do protiproudu plynu, ten je přiváděn zespoda. Prachové částice jsou strhávány kapkami vody a jsou odloučeny. Tyto kapky s prachovými částicemi se shromažďují u dna, kde poměrně čistá část na povrchu se pomocí čerpadla zpátky cirkuluje do trysek, a ta kontaminovaná část se odvádí jako odpad pryč a je nahrazována v systému novou kapalinou. Vyčištěná kapalina je odváděna vrchní částí přes odlučovač kapek. [14]

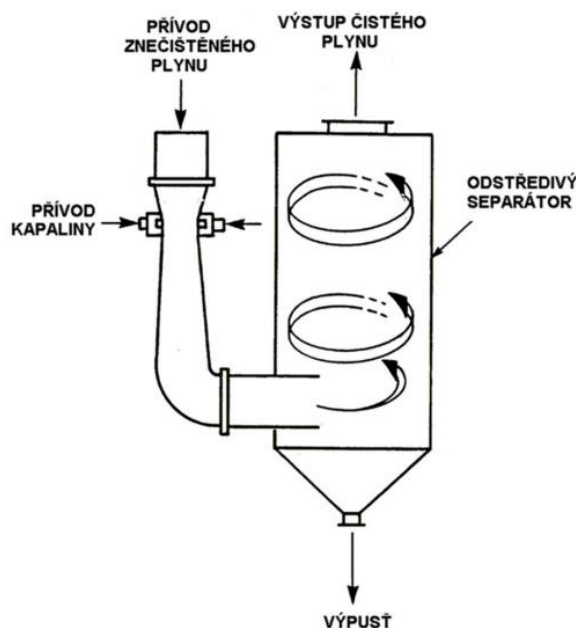
Většinou tyto sprchové věže slouží pro předčištění a ochlazení plynu. Pro zvýšení účinnosti je možno přidat vestavbu (náplň). Tato náplň je tvořena z kuliček či z rašigových kroužků, které jsou buď keramické nebo plastové. Díky nim se tvoří film, který zvyšuje odlučivost. Pračky mají nízké investiční náklady, ale vysoké provozní náklady. Jsou prostorově nenáročné a téměř se neucpávají. Existují horizontální a vertikální sprchové věže. [14]



Obr. 17 Sprchová věž vertikální (pračka) [31]

5.4.5 Venturiho pračky

Venturiho pračky známé také jako difúzní nebo proudové odlučovače jsou využívány pro odlučování jemnějších frakcí. Pro jejich odloučení se používá převážně setrvačný princip. Odlučivost u těchto mokrých odlučovačů patří mezi ty s nejvyšší odlučivostí, a to pro velikost částice kolem desetin μm . Princip odlučování spočívá v tom, že vypírací kapalina se nástřikem přivádí do proudu znečištěného plynu do tzv. Venturiho trubice. Zde rychlost plynu dosahuje rychlosti až 100 m/s, která při styku s kapalinou je roztržena na malé kapičky o velikosti desítek μm . Díky své setrvačnosti následuje odloučení těchto částic. Výhodou jsou malé nároky na údržbu, snadná konstrukce, jednoduchá instalace a nezanášivost. Problémem však je vysoká hluchnost, náchylnost ke korozi a vysoká tlaková ztráta, která se pohybuje od 5 až 10 kPa. [14]



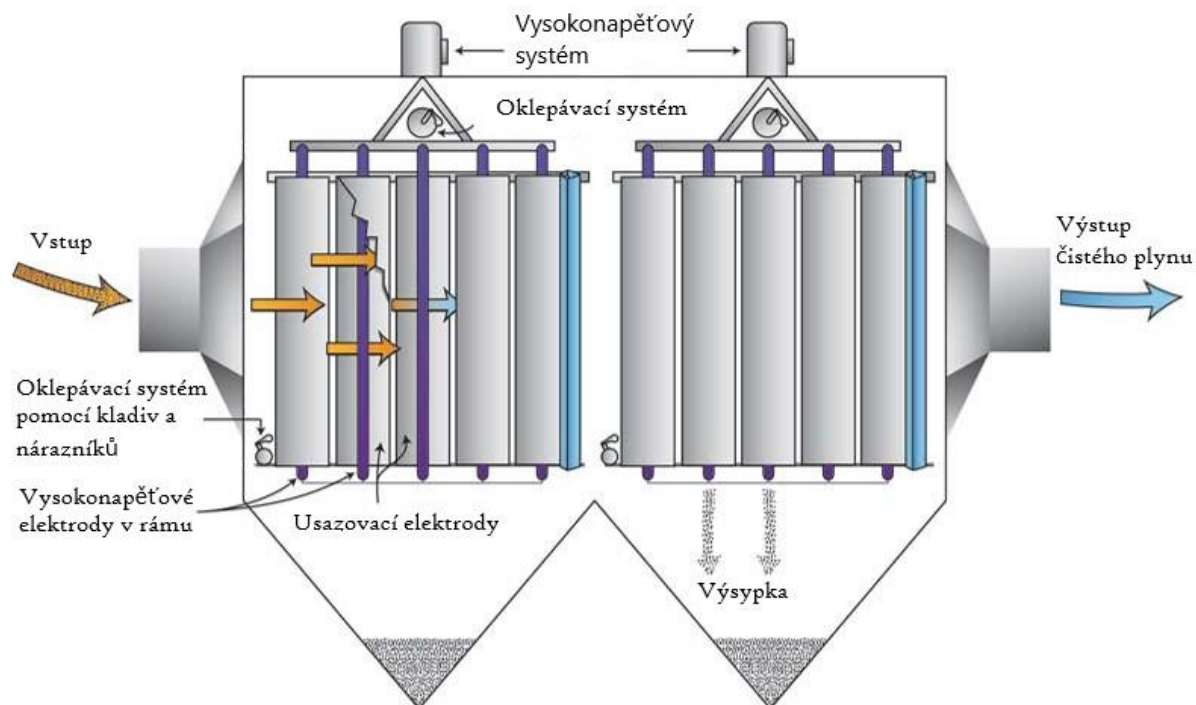
Obr. 18 Venturiho pračka [30]

5.5 Elektrostatické odlučovače

Elektrostatické odlučovače využívají přitažlivých elektrických sil mezi nabitými částicemi a opačně nabitou usazovací elektrodou. Nabíjecí elektrody jsou pod vysokým stejnosměrným napětím, kterým je vytvářeno silné elektrostatické pole. Okolo vysokonapěťové elektrody se vytváří tzv. koróna. Při průchodu unášených částic TZL korunou jsou částice nabitý zápornými ionty, a tím získají záporný náboj. Tyto nabité částice jsou poté přitahovány vlivem elektrického pole na usazovací (srážecí) elektrodu, kde po kontaktu s elektrodou ztrácí svou rychlost a dojde k jejich odloučení.

Usazovací elektrody jsou náchylné k usazování prachem. Pro jejich pravidelné čištění se využívá mechanické oklepávání nebo sonické čištění (ultrazvukové). Stejnosměrné napětí vysokonapěťové elektrody se pohybuje v rozsahu od 55 až 75 kV. Při vyšším napětí se elektrody rychleji nabíjí. Může dojít k výboji a zkratu, čímž elektrostatické pole zanikne.

Výhodou je nízká tlaková ztráta. Velká odlučivost jemných částic dává zařízení účinnost až 99 %. Vhodné pro velké rozsahy teplot, tlaků a průtoků. Nevýhodou je poměrně velká energetická náročnost, velká mez výbušnosti, která může způsobit riziko výbuchu suchého prachu a vysoké prostorové nároky. Odlučovače jsou citlivé na fyzikální parametry a na správné umístění elektrod, které závisí na prouděném plynu. Nutno mít při provozu tohoto zařízení kvalifikovaný personál. Existují i mokré elektrostatické odlučovače, které slouží převážně pro odlučování aerosolů. Tyto odlučovače však mají nižší rozsah mezi korunou a výboji. [35], [36]



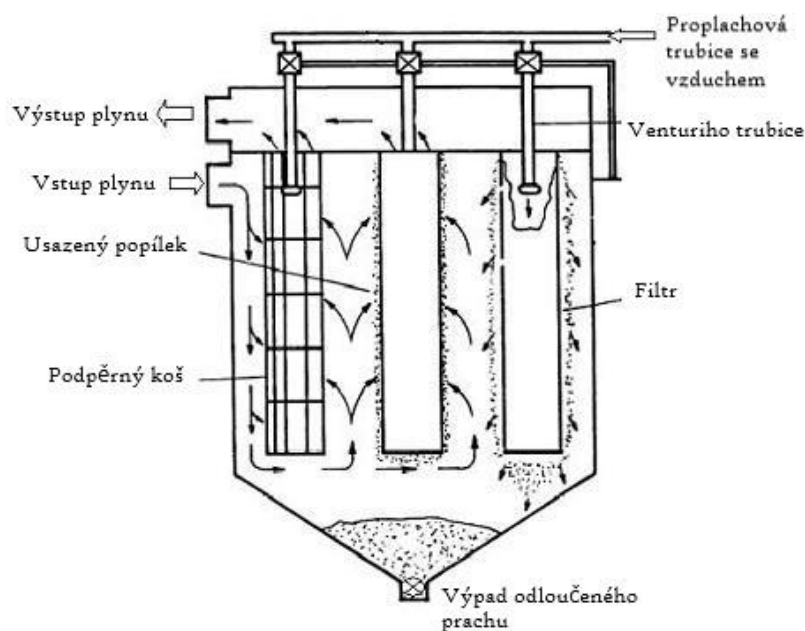
Obr. 19 Elektrostatický odlučovač [32]

5.6 Tkaninové filtry

Tyto odlučovače patří mezi jedny z nejpoužívanějších mechanických odlučovačů, jelikož s probíhajícími inovacemi v nanotechnologii, nám vznikají nové možnosti tkanin, které lze využívat právě v těchto filtrech pro zvýšení odlučování. Při vyšších teplotách vlákna ztrácí pevnost, dilatují a zvětšují se póry, které zvyšují prostupnost částic, což je nežádoucí. Proto musíme volit vždy vhodný filtrační materiál, který se hodí pro zadané teplotní parametry. Mezi nejpoužívanější materiály patří papír, bavlna, PVC, keramika, textilie s polopropustnou membránou z termoplastu (teflon), tvrzené materiály a mnoho dalších.

U tkaninových filtrů se odpadní plyn vhání do komory, kde prochází přes textilní bariéru (filtr). Zde jsou zachycovány částice pomocí filtračního děje (viz. kapitola 5.2.4). Při delším zachycování částic se vytvoří na textilií tzv. filtrační koláč, který o zachycené částice na textilií zachytí další částice, čímž zvětší svůj povrch a tím i nepropustnost menších částic. Tento koláč zvyšuje účinnost tkaninového filtru. Aby se předešlo možné kondenzaci musí být teplota plynu nad rosným bodem. U průmyslových filtrů bývá velká tlaková ztráta. Ta se dá snížit tím, že se zvýší povrch tkaniny. Kvůli přiváděnému množství plynu se tkaninové filtry rychleji zanáší a zvyšuje se jejich tlaková ztráta, což musíme řešit pravidelným čištěním. Nejčastější metodou čištění je mechanický oklep nebo tlakový ráz. Tlakový ráz, který se provádí v krátkých časových intervalech pomocí pulzního profuku stlačeného vzduchu bývá nejčastější. Pro případ výbuchu je nutno mít nainstalované bezpečnostní zařízení, které se skládá z explozních dvířek, hasicího zařízení a uzávěru. Konstrukce komory je vyrobena z ocelových nerezových plechů.

Výhodou je vysoká odlučivost jemných i hrubých částic. Odlučivost pro TZL menších než $PM_{2.5}$. Při nízké tlakové ztrátě bývá účinnost odlučování TZL až 99,9 %. Tyto odlučovače se používají hlavně při čištění odpadních průmyslových plynů, ve vápenkách, cementárnách, vysavačích, při ventilaci a klimatizaci. [34], [35]



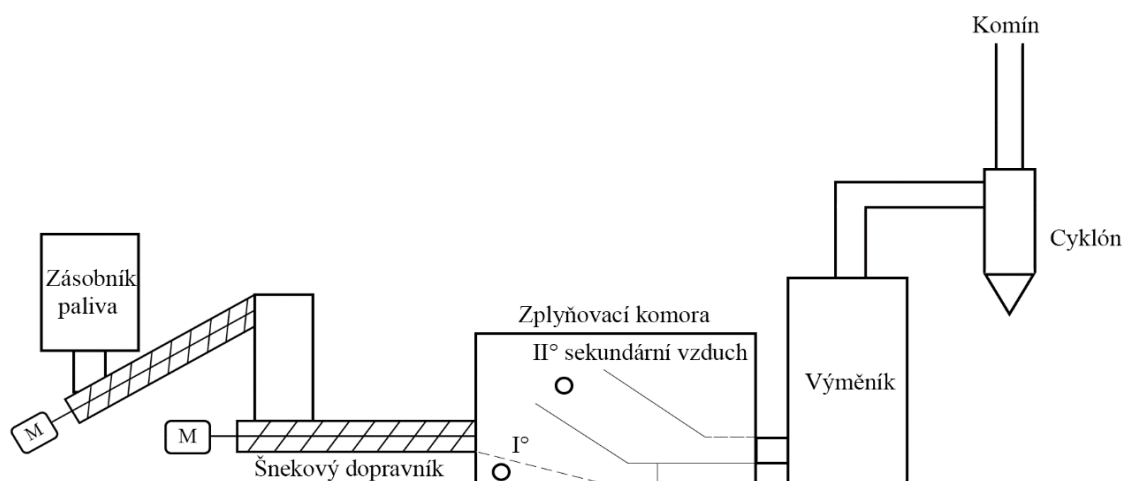
Obr. 20 Tkaninový filtr s profukem [33]

6 Experimentální část

V této kapitole se nachází praktická část této bakalářské práce, kde je sepsáno experimentální měření na zadaném cyklónovém odlučovači pro malý kotel na biomasu. Měření probíhalo v areálu Vysokého učení technického v Brně. Tato část spočívá v měření koncentrace TZL dle gravimetrické metody. Tato metoda je podrobněji popsána v kapitole 4.3.3. Dále je zde přiblíženo zařízení, které bylo při tomto měření použito a dále obsahuje výpočetní část. Na konci kapitoly je vyhodnocení celého měření.

6.1 Zadání

Úkolem této experimentální části je zjistit na zadaném cyklónovém odlučovači (obr. 23) celkovou odlučivost tohoto zařízení. Pro určení jeho účinnosti se využívá gravimetrická metoda, díky které se zjistí výsledná koncentrace TZL před a za cyklónem. Spalování je provedeno na spalovací jednotce GEMOS 110, kde se spaluje biomasa, konkrétně dřevní piliny. Toto palivo je do kotle dopravováno šnekovými dopravníky, které jsou poháněny elektromotory.



Obr. 21 Schéma měřicí tratě

Spalovací zařízení GEMOS 110

Jedná se o kombinaci teplovodního výměníku KWH 180 a zplyňovací komory ZKG 110. Jmenovitý výkon výměníku je 180 kW a u kotle 110 kW. Toto spalovací zařízení společně s automatickým podavačem paliva se řadí do 3. emisní třídy.

Zplyňovací komora je tvořena ocelovou konstrukcí se šamotovou vyzdívkou. Zařízení ZKG obsahuje šikmý a vodorovný rošt, kde na šikmý rošt je přiváděno palivo automaticky ze zásobníku. Zde se vlivem gravitace palivo posouvá směrem dolů, vysouší a zároveň odhořívá. Za šikmým rostem se nachází vodorovný rošt. Do kotle je přiváděn primární vzduch pod rošt a sekundární vzduch do ohniště (obr. 20). Pod rostem se nachází zásobník na popel.



Obr. 22 Teplovodní výměník KWH 180 (vlevo) a zplyňovací komora ZKG 110 (vpravo)

Cyklónový odlučovač

Měření proběhlo na zadaném cyklónovém odlučovači, který byl navržen a testován pro zákazníka. K analytickému návrhu modelu byly využity simplexky pro návrh cyklónových odlučovačů. Tento návrh je zobrazen společně se vstupními parametry na obr. 20. Na obr. 22 je viděno reálný model odlučovače, kde dole jsou přimontovány dva spojené kužely, které sloužily k zabránění zpětnému víření prachových částic z výsypky.



Obr. 23 Cyklónový odlučovač

Vstupní parametry:

$$Q = 175 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$t = 130 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$p = 1 \text{ [bar}_{\text{a}}]}$$

Hustota částic:

$$\rho_p = 860 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Tlaková ztráta:

SHEPHERD and LAPPLE

$$\Delta p_{S,L} = 769,8 \text{ [Pa]}$$

CASAL and BENET

$$\Delta p_{C,B} = 601,4 \text{ [Pa]}$$

RAMACHANDRAN

$$\Delta p_{RA} = 571,2 \text{ [Pa]}$$

Doporučené rozměrové simplexky:

Stairmand, Swift
high efficiency

$$a/D_c = 0,44-0,5$$

$$b/D_c = 0,2-0,21$$

$$H_c/D_c = 3,9-4$$

$$h/D_c = 1,4-1,5$$

$$D_e/D_c = 0,4-0,5$$

$$D_d/D_c = 0,375-0,4$$

$$s/D_c = 0,5$$

Skutečné rozměrové simplexky:

$$a/D_c = 0,75$$

$$b/D_c = 0,19$$

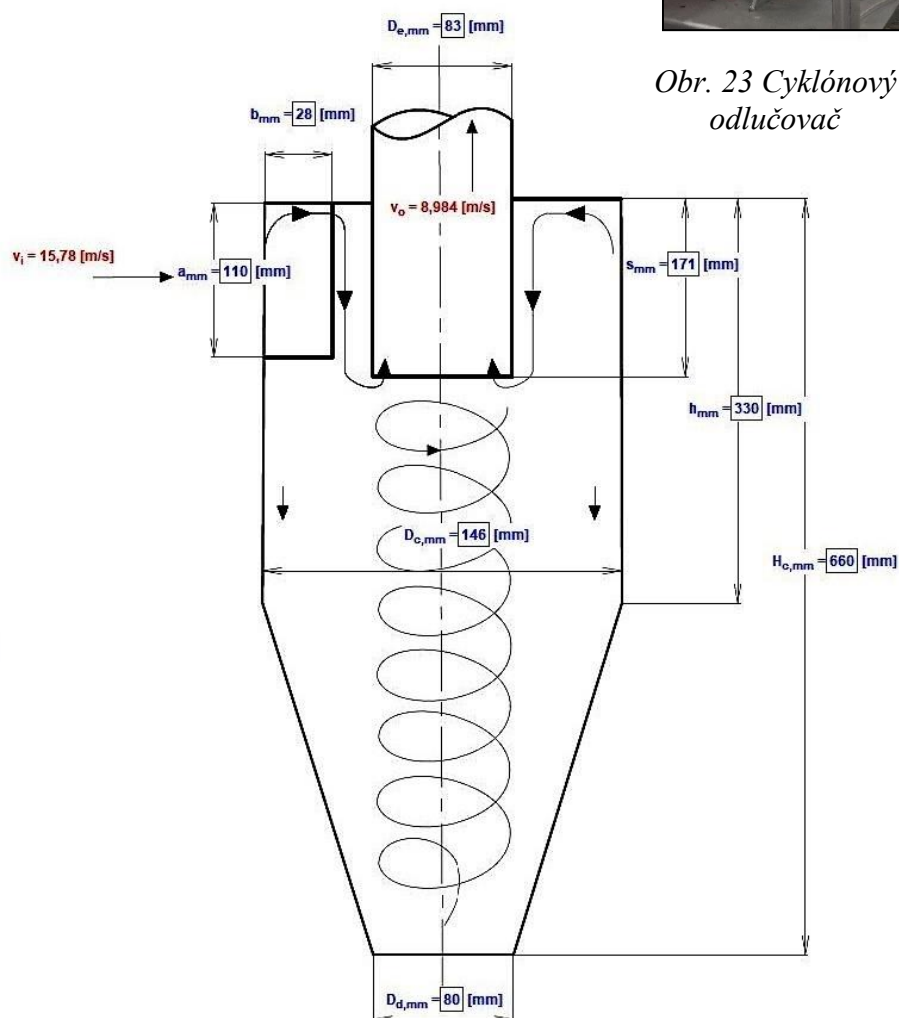
$$H_c/D_c = 4,52$$

$$h/D_c = 2,26$$

$$D_e/D_c = 0,57$$

$$D_d/D_c = 0,55$$

$$s/D_c = 1,17$$



Obr. 24 Analytický model cyklónového odlučovače

6.2 Postup měření

Nejprve je nutno naplnit zásobník palivem (pilinami) a zapálit kotel. Poté seřídít a zahřát spalovací jednotku GEMOS 110 na ustálený výkon, čímž se prohřejí všechny části kotle i s potrubím. Tím se mohou simulovat podmínky při běžném spalování. Během měření je spuštěn měřič emisí Siemens ULTRAMAT (obr. 21), který za pomoci analyzátoru spalín (obr. 22) kontinuálně zaznamenává hodnoty emisí (NO , CO , O_2) v čase. Aby se do analyzátoru spalín nedostávalo zbytečné množství vlhkosti, tak spaliny prochází tzv. chladicí smyčkou, ve které dochází ke kondenzaci vlhkosti.

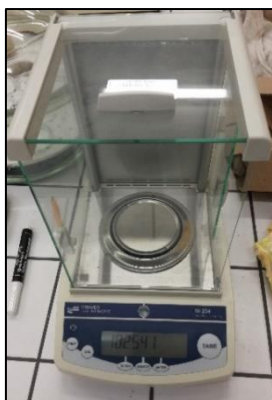


Obr. 25 Siemens ULTRAMAT



Obr. 26 Analyzátor spalín

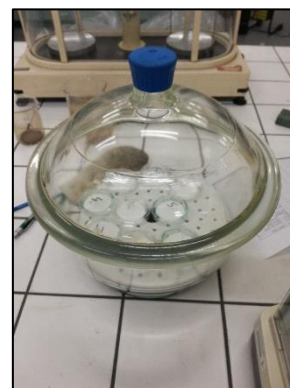
Poté následuje zvážení navážky vysušených čistých filtrů v petriho miskách. Sušení filtrů probíhá v sušárně Venticell (obr. 26), a to nejméně 4 hodiny při teplotě 105°C . Váží se na laboratorní váze Denver Instrument SI-234 (obr. 23). S filtry se manipuluje pouze pinzetou. Před začátkem prvního měření je nutno provést zkušební měření. To obnáší vložení filtrů do odběrových sond (obr. 24), otevření ventilů, zapnutí vývěv a zkontrolování těsnosti celé soustavy. Po zkontrolování této soustavy se vyzkoušela také výměna měřících plynoměrů, kde se ověřilo, že oba plynoměry odebírají při jednotném průtoku stejné množství plynu. Po úspěšném zkontrolování celé soustavy se může měřit.



Obr. 27 Denver Instrument SI-234



Obr. 28 Odběrová sonda



Obr. 29 Eksikátor

Následuje opakované měření po dobu 30 minut, kde je nutno vždy vložit filtry do odběrových sond, nasadit sondy do potrubí, zapnout vývěvy a otevřít uzavírací ventily. Před začátkem a na konci každého měření je nutno do předem vytištěné tabulky zapsat stavy na plynoměru. Během měření dodržujeme izokinetický odběr spalin, který se pravidelně kontroluje na průtokové měřicí stanici Elster BK-G4 pomocí rotametru. Na němž se nastaví u obou odběrových sond jednotný průtok 20 l/min. Je nutno sledovat i další parametry, a to rychlost proudění v potrubí, teplotu plynu a statický tlak v potrubí.

Po uplynutí 30 minut se uzavřou uzavírací ventily, vypnou vývěvy, sundají sondy a odeberou filtry z odběrové soustavy. Zapiše se doba měření, teplota, tlak a stav na plynoměru. Poté jsou filtry v miskách zaneseny opět do sušárny Venticell, kde se žíháním při teplotě 105 °C po dobu 4 hodin zbaví vlhkosti. Po vysušení se vloží do exsikátoru (obr. 25) po dobu minimálně 4 hodin, kde se filtry dosuší. Následně se misky s filtry opět zváží na laboratorní váze a z rozdílu počátečních a konečných naměřených hmotností se vypočítá hmotnost částic, které jsou odebrány z proudu spalin. Z této hmotnosti a z množství odebraných spalin se vypočítá koncentrace TZL.



Obr. 30 sušárna Venticell

6.3 Výpočetní část

V této kapitole jsou sepsány vzorce, které byly využity v programu Microsoft Office Excel pro zjednodušení výpočtů, kde jsem následně porovnal koncentrace před a za cyklónem. Vzorce vychází z normy ČSN EN 13284-1 a ČSN ISO 9096.

6.3.1 Použité vzorce

Hmotnostní koncentrace TZL se vypočítá dle vzorce:

$$c = \frac{m}{V_{CSN}} [mg/m^3] \quad (4)$$

Kde: m [kg] hmotnost prachu,
 V_{CSN} [m³] objem suchých spalín za normálních podmínek,
 c [mg/m³] hmotnostní koncentrace TZL.

Hmotnost získáme z navážky suchého filtru před měřením a po měření. Provedeme rozdíl těchto dvou navážek a dostaneme výslednou hmotnost TZL v kilogramech, tu musíme ještě převést na základní jednotku v miligramech.

Objem plynu se změří na plynoměru klasickým zapsáním hodnot před spuštěním měření a po. Proveďte se odečet a přepočet na normální fyzikální podmínky. Jelikož koncentrace TZL platí pro suché spaliny, tak je nutno přepočítat objem plynu dle daného vztahu:

$$V_{CSN} = V_{CS} \cdot \frac{(p_{atm} + p_c)}{101325} \cdot \frac{273,15}{(273,15 + t_c)} [m_N^3] \quad (5)$$

Kde: V_{CS} [m³] objem plynu naměřený plynoměrem,
 p_a [Pa] atmosférický tlak,
 p_c [Pa] tlak plynu v plynoměru,
 t_c [°C] teplota plynu v plynoměru.

Při ředění vzduchem je nutné koncentraci c vyjádřit pro koncentraci vztaženou na referenční obsah kyslíku. Tuto koncentraci vynásobíme faktorem f_c :

$$f_c = \frac{20,9\% - \varphi_{ref}(O_2)}{20,9\% - \varphi_m(O_2)} [-] \quad (6)$$

Kde: $\varphi_{ref}(O_2)$ [%] referenční hodnota objemového zlomku kyslíku v suchém plynu za normálních stavových podmínek,

$\varphi_m(O_2)$ [%] objemový zlomek kyslíku v suchém plynu za stavových podmínek plynu proudícího potrubím (medián),

f_c [-] faktor pro přepočet na referenční obsah kyslíku při ředění spalin.

Výsledná koncentrace vychází z rovnice:

$$c' = c \cdot f_c [mg/m^3] \quad (7)$$

Pro dodržení podobného proudění plynu v potrubí a v ústí hubice je nutno určit, zda byly dodrženy izokinetické podmínky. Pro zjištění izokinetického poměru je nutno nejdříve vypočítat objem vlhkého vzorku plynu:

$$V_{CN} = \frac{V_{CSN}}{1 - x_{H_2O}} [m^3] \quad (8)$$

Kde: V_{CSN} [m^3] objem suchého vzorku plynu vztaženého na normální stavové podmínky,

V_{CN} [m^3] objem vlhkého vzorku plynu vztaženého na normální stavové podmínky,

x_{H_2O} [-] koncentrace H_2O ve vlhkém plynu.

Vztahy pro výpočet koncentrace H_2O ve vlhkém plynu a ve stavu nasycení jsou:

$$x_{H_2O} = x_{H_2O}'' \cdot \frac{RH}{100} [-] \quad (9)$$

Kde: RH [%] relativní vlhkost,
 x_{H_2O}'' [-] koncentrace H_2O ve stavu nasycení.

$$x_{H_2O}'' = \frac{p_{HR}''}{(p_a + \Delta p_p)} [-] \quad (10)$$

Kde: p_{HR}'' [Pa] parciální tlak H_2O při stavu nasycení,
 Δp_p [Pa] statický tlak plynu v potrubí.

Pro zjištění parciálního tlaku H_2O při stavu nasycení byla využita Antoineova rovnice:

$$\log p_{HR}'' = A - \frac{B}{C + t_p} [Pa] \quad (11)$$

$$p_{HR}'' = e^{A - \frac{B}{C + t_p}} [Pa] \quad (12)$$

Kde: t_p [°C] teplota plynu v potrubí,
 A, B, C konstanty uváděné v tabulkách pro danou teplotu v potrubí.

Poté se již dopočítá izokinetický poměr:

$$p = \frac{v}{\frac{V_C}{T \cdot 60} \cdot \frac{\pi \cdot H^2}{4000000}} [-] \quad (13)$$

Kde: $p [-]$ izokinetický poměr,
 $v [\text{m/s}]$ rychlost proudění v potrubí,
 $V_C [\text{m}^3]$ objem vlhkého vzorku plynu vztaženého na provozní podmínky,
 $T [\text{min}]$ doba měření,
 $H [\text{mm}]$ průměr hubice sondy.

$$V_C = V_{CN} \cdot \frac{101325}{(p_a + \Delta p_s)} \cdot \frac{(273,15 + t_p)}{273,15} [\text{m}^3] \quad (13)$$

Kde: $V_C [\text{m}^3]$ objem vlhkého vzorku plynu vztaženého na provozní podmínky.

6.3.2 Vzorové výpočty pro uvedené rovnice

Všechny tyto uvedené rovnice byly pro ulehčení výsledků použity v Microsoft Office Excel. Pro ukázkový výpočet je zde ilustrován jeden výpočet ze záznamu hodnot měření č.2 za cyklónem:

$$V_{CSN} = V_{CS} \cdot \frac{(p_{atm} + p_c)}{101325} \cdot \frac{273,15}{(273,15 + t_c)} = 0,511 \cdot \frac{98000 + 0}{101325} \cdot \frac{273,15}{(273,15 + 28)} = 0,45 m_N^3$$

$$c = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V_{CSN}} = \frac{(34,1582 - 34,1546) \cdot 1000}{0,45} = 68,26 \text{ mg/m}^3$$

$$f_c = \frac{20,9\% - \varphi_{ref}(O_2)}{20,9\% - \varphi_m(O_2)} = \frac{20,9 - 10}{20,9 - 8,16} = 0,86$$

$$c' = c \cdot f_c = 68,26 \cdot 0,86 = 58,48 \text{ mg/m}^3$$

$$p_{HR}'' = e^{A - \frac{B}{C + t_s}} = e^{23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + 75}} = 38537,8 \text{ Pa}$$

$$x_{H_2O}'' = \frac{p_{HR}''}{(p_a + \Delta p_p)} = \frac{38537,8}{(98000 + (-820))} = 0,31$$

$$x_{H_2O} = x_{H_2O}'' \cdot \frac{RH}{100} = 0,31 \cdot \frac{20,8}{100} = 0,06$$

$$V_{CN} = \frac{V_{CSN}}{1 - x_{H_2O}} = \frac{0,45}{1 - 0,06} = 0,49 \text{ m}^3$$

$$V_C = V_{CN} \cdot \frac{101325}{(p_a + \Delta p_s)} \cdot \frac{(273,15 + t_p)}{273,15} = 0,608 \cdot \frac{101325}{(9800 - 820)} \cdot \frac{(273,15 + 75)}{273,15} = 0,65 m_N^3$$

$$p = \frac{v}{\frac{V_C}{T \cdot 60} \cdot \frac{\pi \cdot H^2}{4000000}} \cdot 100 = \frac{2}{\frac{0,65}{30 \cdot 60} \cdot \frac{\pi \cdot 15^2}{4000000}} = 0,98$$

6.3.3 Záznamy hodnot z měření

Tab. č. 3 Záznam hodnot z měření č.1

		Před cyklónem				Za cyklónem				
		1	2	3	4	1	2	3	4	
Filtr suchý s miskou	m_1	34,157 7	34,057 8	35,192 1	34,040 1	35,586 5	34,355 2	34,154 6	35,435 9	[g]
Filtr po měření s miskou suché	m_2	34,184 7	34,082 5	35,214 9	34,060 7	35,617 2	34,366 7	34,185 2	35,462 6	[g]
Navážka vzorku	m	27	24,7	22,8	20,6	30,7	11,5	30,6	26,7	[mg]
Začátek odběru	T_1	13:11	13:45	14:26	15:04	13:11	13:45	14:25	15:04	[hh:mi n]
Konec odběru	T_2	13:41	14:15	14:56	15:34	13:41	14:15	14:55	15:34	[hh:mi n]
Doba odběru	T	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	[min]
Hubice	H	15	15	15	15	15	15	15	15	[mm]
Rychlost proudění v potrubí	v	2	2	2	2	2	2	2	2	[m/s]
Medián koncentrace O_2	O_2	7,1	7,23	8,16	8,41	7,1	7,23	8,16	8,41	[%]
Referenční koncentrace O_2	O_{2re} f	10	10	10	10	10	10	10	10	[%]
Plynoměr										
Počáteční stav plynoměru	V_1	284,22 2	284,83	285,37 1	285,92 9	190,19 7	190,69 3	191,16 6	191,67 7	[m ³]
Konečný stav plynoměru	V_2	284,83	285,37 1	285,92 9	286,47 5	190,69 3	191,16 6	191,67 7	192,16	[m ³]
Objem vzorku	V_{cs}	0,608	0,541	0,558	0,546	0,496	0,473	0,511	0,483	[m ³]
Teplota plynu v plynoměru	t_c	27	28	28	21	28,2	28	28	30	[°C]
Tlak plynu v plynoměru	p_c	12	10	8	9	40	10	0	0	[Pa]
Podmínky měření										
Atmosférický tlak	p_a	98000	98000	98000	98000	98000	98000	98000	98000	[Pa]
Teplota plynu v potrubí	t_p	110	109	88	80	85	89	75	69	[°C]
Statický tlak plynu v potrubí	Δp_p	-160	-160	-160	-160	-820	-820	-820	-820	[Pa]
Relativní vlhkost v plynoměru	RH	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	[%]

Tab. č. 4 Záznam hodnot z měření č.2 před cyklónem

Před cyklónem									
		1	2	3	4	5	6	7	
Filtr suchý s miskou	m_1	34,5175	35,1809	33,6236	33,3200	32,8251	33,4189	33,9975	[g]
Filtr po měření s miskou suché	m_2	34,5555	35,1901	33,6451	33,3410	32,8526	33,4564	34,0382	[g]
Navážka vzorku	m	38	9,2	21,5	21	27,5	37,5	40,7	[mg]
Začátek odběru	T_1	10:31	11:06	12:19	12:53	13:29	14:03	14:47	[hh:min]
Konec odběru	T_2	11:01	11:36	12:49	13:23	13:59	14:33	15:17	[hh:min]
Doba odběru	T	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	[min]
Hubice	H	15	15	15	15	15	15	15	[mm]
Rychlost proudění v potrubí	v	2,4	2,4	2	2	2	2,5	2	[m/s]
Medián koncentrace O_2	O_2	7,48	8,2	12,58	12,81	12,35	6,74	5,53	[%]
Referenční koncentrace O_2	O_{2ref}	10	10	10	10	10	10	10	[%]
Plynoměr									
Počáteční stav plynoměru	V_1	256,438	257,332	257,017	258,433	258,946	259,412	259,853	[m ³]
Konečný stav plynoměru	V_2	257,332	257,917	258,433	258,946	259,412	259,853	260,313	[m ³]
Objem vzorku	V_{cs}	0,894	0,585	1,416	0,513	0,466	0,441	0,46	[m ³]
Teplota plynu v plynoměru	t_c	21	22	23	23	24	25	25	[°C]
Tlak plynu v plynoměru	p_c	10	10	12	24	24	24	22	[Pa]
Podmínky měření									
Atmosférický tlak	p_a	98000	98000	98000	98000	98000	98000	98000	[Pa]
Teplota plynu v potrubí	t_p	117,5	113	88,6	87	85,7	107,8	103,9	[°C]
Statický tlak plynu v potrubí	Δp_p	-160	-140	-160	-160	-150	-150	450	[Pa]
Relativní vlhkost v plynoměru	RH	16	16	16	16	16	16	16	[%]

Tab. č. 5 Záznam hodnot z měření č.2 za cyklónem

Za cyklónem									
		1	2	3	4	5	6	7	
Filtr suchý s miskou	m_1	33,4939	33,991	34,6902	33,8346	33,6095	33,1696	33,0553	[g]
Filtr po měření s miskou suché	m_2	33,5406	34,0265	34,7222	33,8642	33,6461	33,2181	33,1112	[g]
Navážka vzorku	m	46,7	35,5	32	29,6	36,6	48,5	55,9	[mg]
Začátek odběru	T_1	10:31	11:06	12:19	12:53	13:29	14:03	14:47	[hh:min]
Konec odběru	T_2	11:01	11:36	12:49	13:23	13:59	14:33	15:17	[hh:min]
Doba odběru	T	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	[min]
Hubice	H	15	15	15	15	15	15	15	[mm]
Rychlost proudění v potrubí	v	2,4	2,4	2	2	2	2,5	2	[m/s]
Medián koncentrace O_2	O_2	7,48	8,2	12,58	12,81	12,35	6,74	5,53	[%]
Referenční koncentrace O_2	O_{2ref}	10	10	10	10	10	10	10	[%]
Plynoměr									
Počáteční stav plynoměru	V_1	171,776	172,12	172,751	173,441	174,072	174,668	175,217	[m ³]
Konečný stav plynoměru	V_2	172,12	172,751	173,441	174,072	174,668	175,217	175,764	[m ³]
Objem vzorku	V_{cs}	0,344	0,631	0,69	0,631	0,596	0,549	0,547	[m ³]
Teplota plynu v plynoměru	t_c	20	21	21,5	23	23	24	24	[°C]
Tlak plynu v plynoměru	p_c	0	0	0	0	0	0	0	[Pa]
Podmínky měření									
Atmosférický tlak	p_a	98000	98000	98000	98000	98000	98000	98000	[Pa]
Teplota plynu v potrubí	t_p	85	89	75	69	69	69	69	[°C]
Statický tlak plynu v potrubí	Δp_p	-820	-820	-820	-820	-820	-820	-820	[Pa]
Relativní vlhkost v plynoměru	RH	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	20,8	[%]

Tab. č. 6 Záznam hodnot z měření č.3 před cyklónem

Před cyklónem								
		1	2	3	4	5	6	
Filtr suchý s miskou	m_1	33,3714	34,5207	34,487	35,9288	34,713	33,5103	[g]
Filtr po měření s miskou suché	m_2	33,3858	34,5354	34,4994	35,9424	34,7261	33,5286	[g]
Navážka vzorku	m	14,4	14,7	12,4	13,6	13,1	18,3	[mg]
Začátek odběru	T_1	11:01	11:40	12:12	12:46	13:22	13:57	[hh:min]
Konec odběru	T_2	11:31	12:10	12:42	13:16	13:52	14:27	[hh:min]
Doba odběru	T	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	[min]
Hubice	H	15	15	15	15	15	15	[mm]
Rychlost proudění v potrubí	v	2	2	2	2	2	2	[m/s]
Medián koncentrace O_2	O_2	10,19	10,24	9,95	9,6	10,4	8,84	[%]
Referenční koncentrace O_2	O_{2ref}	10	10	10	10	10	10	[%]
Plynoměr								
Počáteční stav plynoměru	V_1	281,312	281,831	181,928	182,333	182,736	283,338	[m ³]
Konečný stav plynoměru	V_2	281,812	282,293	182,333	182,736	183,194	283,828	[m ³]
Objem vzorku	V_{cs}	0,5	0,462	0,405	0,403	0,458	0,49	[m ³]
Teplota plynu v plynoměru	t_c	20	20	21	21	21,5	22	[°C]
Tlak plynu v plynoměru	p_c	12	10	8	9	14	22	[Pa]
Podmínky měření								
Atmosférický tlak	p_a	98000	98000	98000	98000	98000	98000	[Pa]
Teplota plynu v potrubí	t_p	103,6	100,5	100,1	98,8	96,7	98	[°C]
Statický tlak plynu v potrubí	Δp_p	-150	-150	-150	-150	-150	-150	[Pa]
Relativní vlhkost v plynoměru	RH	16	16	16	16	16	16	[%]

Tab. č. 7 Záznam hodnot z měření č.3 za cyklónem

Za cyklónem								
		1	2	3	4	5	6	
Filtr suchý s miskou	m_1	33,7375	33,8395	33,7161	33,754	34,3816	34,5687	[g]
Filtr po měření s miskou suché	m_2	33,7464	33,8569	33,7356	33,772	34,4013	34,5949	[g]
Navážka vzorku	m	8,9	17,4	19,5	18	19,7	26,2	[mg]
Začátek odběru	T_1	11:01	11:36	12:12	12:46	13:22	13:57	[hh:min]
Konec odběru	T_2	11:31	12:06	12:42	13:16	13:52	14:27	[hh:min]
Doba odběru	T	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	0:30	[min]
Hubice	H	15	15	15	15	15	15	[mm]
Rychlost proudění v potrubí	v	2	2	2	2	2	2	[m/s]
Medián koncentrace O_2	O_2	10,19	10,24	9,95	9,6	10,4	8,84	[%]
Referenční koncentrace O_2	O_{2ref}	10	10	10	10	10	10	[%]
Plynoměr								
Počáteční stav plynoměru	V_1	181,061	181,594	282,293	282,664	282,939	183,194	[m ³]
Konečný stav plynoměru	V_2	181,594	181,928	282,664	282,939	283,338	183,652	[m ³]
Objem vzorku	V_{cs}	0,533	0,334	0,371	0,275	0,399	0,458	[m ³]
Teplota plynu v plynoměru	t_c	20	21	22	22	23	23	[°C]
Tlak plynu v plynoměru	p_c	0	0	0	0	0	0	[Pa]
Podmínky měření								
Atmosférický tlak	p_a	98000	98000	98000	98000	98000	98000	[Pa]
Teplota plynu v potrubí	t_p	85,1	82,6	82,3	81,2	80,1	81	[°C]
Statický tlak plynu v potrubí	Δp_p	-810	-810	-810	-810	-810	-810	[Pa]
Relativní vlhkost v plynoměru	RH	16	16	16	16	16	16	[%]

6.3.4 Vypočtené hodnoty jednotlivých měření

Tab. č. 8 Vypočtené hodnoty pro stanovení koncentrace TZL z měření č.1

		Před cyklónem				Za cyklónem				
		1	2	3	4	1	2	3	4	
Objem pro provozní podmínky	V_c	1,12	0,98	0,78	0,73	0,68	0,67	0,65	0,59	[m ³]
Vlhký objem	V_{CN}	0,77	0,67	0,57	0,55	0,50	0,49	0,49	0,45	[m ³]
Suchý objem	V_{CSN}	0,54	0,47	0,49	0,49	0,44	0,41	0,45	0,42	[m ³]
Koncentrace TZL	c	50,45	52,04	46,57	42,00	70,57	27,71	68,26	63,43	[mg/m ³]
Výpočet na referenční obsah kyslíku	f_c	0,79	0,80	0,86	0,87	0,79	0,80	0,86	0,87	[-]
Koncentrace TZL (referenční obsah kyslíku)	c'	39,92	41,57	39,90	36,70	55,85	22,14	58,48	55,42	[mg/m ³]
Izokinetický poměr	p	0,57	0,65	0,82	0,87	0,94	0,95	0,98	1,08	[%]

Tab. č. 9 Vypočtené hodnoty pro stanovení koncentrace TZL z měření č.2

		Před cyklónem							
		1	2	3	4	5	6	7	
Objem pro provozní podmínky	V_c	0,83	0,57	1,54	0,56	0,51	0,44	0,47	[m ³]
Vlhký objem	V_{CN}	0,56	0,39	1,13	0,41	0,37	0,31	0,33	[m ³]
Suchý objem	V_{CSN}	0,80	0,52	1,26	0,46	0,41	0,39	0,41	[m ³]
Koncentrace TZL	c	47,32	17,57	17,02	45,88	66,36	95,94	99,83	[mg/m ³]
Výpočet na referenční obsah kyslíku	f_c	0,81	0,86	1,31	1,34	1,27	0,77	0,71	[-]
Koncentrace TZL (referenční obsah kyslíku)	c'	38,50	15,10	22,23	61,62	84,39	74,01	70,98	[mg/m ³]
Izokinetický poměr	p	0,92	1,35	0,41	1,13	1,25	1,80	1,36	[%]
		Za cyklónem							
		1	2	3	4	5	6	7	
Objem pro provozní podmínky	V_c	0,37	0,67	0,75	0,69	0,65	0,60	0,59	[m ³]
Vlhký objem	V_{CN}	0,27	0,48	0,57	0,53	0,50	0,46	0,46	[m ³]
Suchý objem	V_{CSN}	0,31	0,57	0,62	0,56	0,53	0,49	0,49	[m ³]
Koncentrace TZL	c	150,64	62,64	51,72	52,59	68,84	99,37	114,94	[mg/m ³]
Výpočet na referenční obsah kyslíku	f_c	0,81	0,86	1,31	1,34	1,27	0,77	0,71	[-]
Koncentrace TZL (referenční obsah kyslíku)	c'	122,56	53,83	67,57	70,63	87,54	76,65	81,73	[mg/m ³]
Izokinetický poměr	p	2,06	1,14	0,84	0,92	0,98	1,33	1,07	[%]

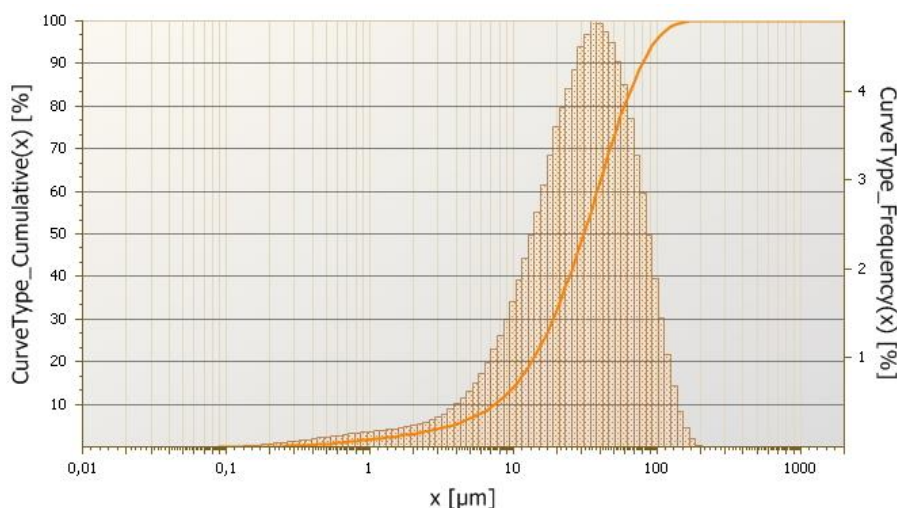
Tab. č. 10 Vypočtené hodnoty pro stanovení koncentrace TZL z měření č.3

Před cyklónem								
		1	2	3	4	5	6	
Objem pro provozní podmínky	V_c	0,52	0,49	0,43	0,43	0,49	0,52	[m ³]
Vlhký objem	V_{CN}	0,37	0,35	0,30	0,30	0,35	0,37	[m ³]
Suchý objem	V_{CSN}	0,45	0,42	0,36	0,36	0,41	0,44	[m ³]
Koncentrace TZL	c	31,95	35,30	34,09	37,57	31,90	41,71	[mg/m ³]
Výpočet na referenční obsah kyslíku	f_c	1,02	1,02	1,00	0,96	1,04	0,90	[-]
Koncentrace TZL (referenční obsah kyslíku)	c'	32,52	36,09	33,93	36,25	33,10	37,74	[mg/m ³]
Izokinetický poměr	p	1,22	1,30	1,48	1,48	1,30	1,22	[%]
Za cyklónem								
		1	2	3	4	5	6	
Objem pro provozní podmínky	V_c	0,59	0,37	0,41	0,31	0,44	0,51	[m ³]
Vlhký objem	V_{CN}	0,43	0,27	0,30	0,23	0,33	0,38	[m ³]
Suchý objem	V_{CSN}	0,48	0,30	0,33	0,25	0,36	0,41	[m ³]
Koncentrace TZL	c	18,53	58,00	58,72	73,13	55,35	64,13	[mg/m ³]
Výpočet na referenční obsah kyslíku	f_c	1,02	1,02	1,00	0,96	1,04	0,90	[-]
Koncentrace TZL (referenční obsah kyslíku)	c'	18,85	59,30	58,46	70,56	57,44	58,01	[mg/m ³]
Izokinetický poměr	p	1,07	1,71	1,54	2,08	1,44	1,25	[%]

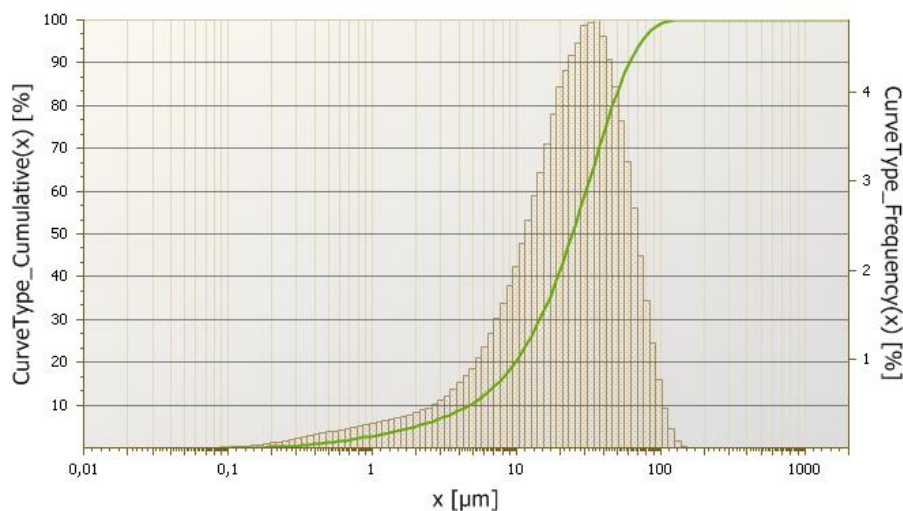
6.3.5 Vyhodnocení experimentu

Úkolem tohoto experimentu bylo zjistit účinnost pro zadaný cyklónový odlučovač na kotli o výkonu 110 kW, který spaloval dřevní piliny. Z výsledků, které jsou zapsány v tabulkách z měření je vidět, že ne vždy byl dodržen izokinetický odběr proudění, což částečně ovlivnilo výslednou koncentraci TZL. Každopádně zajímavější anomálie, která se přihodila byla, že nebylo možné vypočítat výslednou celkovou účinnost cyklónového odlučovače, jelikož množství odloučeného prachu ve výsypce bylo téměř nulové a výsledná koncentrace TZL za cyklónem je větší ve všech měřeních než před cyklónem.

Na základě tohoto zjištění se na ústavu Energetického inženýrství uskutečnila analýza vzorku prachových částic v různých částech na spalovací trase. Tato analýza měla určit četnost určitých průměrů částic při spalování pilin. Analýza byla provedena pomocí laserové difrakce na měřicích přístrojích Fritch ANALYSETTE 22 MicroTec plus a Horiba LA 950. Dva výsledky z této analýzy jsou zobrazeny v grafech (obr. 27. a obr. 28.).

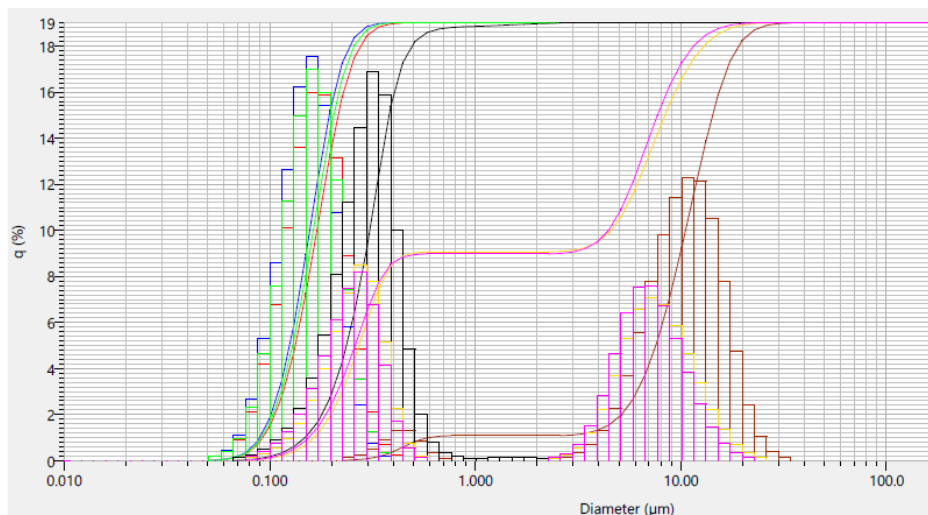


Obr. 31 Distribuce částic ve vzorku odebraného z ventilátoru před cyklónem



Obr. 32 Distribuce částic ve vzorku odebraného z potrubí před cyklónem

Na těchto dvou grafech můžeme vidět, že největší četnost částic u těchto dvou vzorků se pohybovala kolem 30 μm , které by měl však mechanický cyklónový odlučovač zvládnout odloučit. Analýza z ostatních vzorků (obr. 29) vznikajícího prachu při spalování pilin však ukázala, že částice mají největší zastoupení od $\text{PM}_{0,1-1}$ a PM_{10} , což už pro mechanické odlučovače je problematické.



Obr. 33 Celková distribuce částic při spalování dřevních pilin

Z toho všeho lze usoudit, že menší částice, než PM_{10} už cyklónový odlučovač nezvládl odloučit. Částice, které byly větší byly zachyceny svou setrvačností ve spalovací jednotce a na vnitřních stranách specifického povrchu potrubí, které bylo navíc různě zatočené, a to taky napomohlo k jejich odloučení. Menší částice, než PM_{10} pak již nedokázaly být odloučeny cyklónem a prošly dál. Větší koncentrace TZL za cyklónem se dá vysvětlit ochlazením spalin za cyklónovým odlučovačem, to způsobilo kondenzaci v této oblasti, což zapříčinilo, že ultra jemné částice o velikosti $\text{PM}_{0,1}$ se díky kondenzaci začaly shlukovat do větších komplexních agregátů (koagulovat), a to se projevilo na větším odběru na měřicím filtru za cyklónem.

Závěrem lze říct, že cyklónové odlučovače nejsou vhodné pro odlučování TZL pro kotle spalující biomasu, proto bude nutno hledat jinou alternativní metodu, která nebude náročná pro jejich provoz a bude účinná.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo napsat rešeršní část o odlučovačích pro malé kotle na biomasu, které vypouští do ovzduší velké zastoupení částic PM_{10} a $PM_{2,5}$. Z toho důvodu se zjišťovalo pro zákazníka, zda cyklónový odlučovač je vyhovující pro odlučování částic pro kotle malých výkonů. Hlavním cílem tedy bylo experimentálním měřením vypočítat na cyklónovém odlučovači výsledné koncentrace TZL pomocí gravimetrické metody a následně tyto hodnoty vyhodnotit a určit, zda zadaný cyklónový odlučovač vyhovuje při odlučování prachu pro malé kotle na biomasu.

V experimentální části se zjistilo, že ve výsypce se nacházelo minimální množství odloučeného prachu a koncentrace TZL za odlučovačem vyšla vždy větší než před. Z toho důvodu byla provedena analýza pomocí laserové difrakce v jednotlivých částech spalovací trasy. Tato analýza ukázala četnost určitých průměrů částic při spalování dřevních pilin, kde největší zastoupení částic se pohybovalo okolo PM_{10} a $PM_{0,1-1}$. Částice mezi těmito velikostmi se objevovaly pouze zřídka. Z tohoto zjištění lze usoudit, že cyklónový odlučovač částice menší než PM_{10} nedokázal odloučit. Větší koncentrace TZL za cyklónem se dá vysvětlit ochlazením spalin za cyklónovým odlučovačem, to způsobilo kondenzaci v této oblasti, což zapříčinilo, že ultra jemné částice o velikosti $PM_{0,1}$ se díky kondenzaci začaly shlukovat do větších komplexních agregátů (koagulovat), a to se projevilo na větším odběru na měřícím filtru za cyklónem.

Výsledkem experimentální části tedy je, že mechanický cyklónový odlučovač není vhodný pro odlučování TZL pro kotle na biomasu. Tyto malé zdroje mají obrovský podíl na celkových emisích TZL, tudíž se bude muset hledat jiná alternativní náhrada, která dokáže být provozně nenáročná a zároveň dosti účinná při odlučování pro kotle malých výkonů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] JIROUŠ, František. Efektivní spalování paliv. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2013. ISBN 978-80-260-5393-4.
- [2] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. Biomasa obnovitelný zdroj energie. 1. Praha 8: FCC PUBLIC, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [3] KOLONIČNÝ, Jan, Jiří HORÁK a Silvie PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ. Kotle malých výkonů na pevná paliva. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2542-7.
- [4] VAN LOO, Sjaak a Jaap KOPPEJAN. The handbook of biomass combustion and co-firing. Sterling, VA: Earthscan, 2008. ISBN isbn9781844072491.
- [5] ŠKORPÍK, Jiří. In: Biomasa jako zdroj energie [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/03.html>
- [6] Zplyňovací kotel na dřevo Guntamatic Synchron. In: Biom.cz [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/obrazek/zplynovaci-kotel-na-drevo-guntamatic-synchro>
- [7] Biomasa a uhlí v kotlích malých výkonů. Tzb-info [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://vytapieni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/11527-biomasa-a-uhli-v-kotlich-malych-vykonu>
- [8] Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. Sbírka zákonů České republiky. 2012.
- [9] HAVEL, Milan, Vít VEBR a Petr VÁLEK. Chemické látky. Arnika [online]. b.r. [cit.2019-05-06]. Dostupné z: <http://arnika.org/chemicke-latky>
- [10] BENCKO, Vladimír, Miroslav CIKRT a Jaroslav LENER. Toxické kovy v životním a pracovním prostředí člověka. Vyd. 2., přeprac. a dopl. Praha: Grada, 1995. ISBN 80-7169-150-X.
- [11] Změna klimatu a ovzduší [online]. Evropská agentura pro životní prostředí, 2013 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/cs/signal/signal-2013/clanky/zmena-klimatu-a-ovzdusi>
- [12] FERENČÍK, M. Imunitní systém: informace pro každého. 1. vyd. Překlad Kristýna Pokorná. Praha: Grada Publishing, c2005, 236, [4] s. ISBN 80-247-1196-6
- [13] KURSA, Jaroslav. Zoohygiena a prevence chorob hospodářských zvířat. 1. vyd. Praha: Česká zemědělská univerzita, Agronomická fakulta, 1998, 200 s. ISBN 80-213-0419-7
- [14] HEMERKA, J.: Odlučování tuhých částic (skripta). Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01088-0
- [15] CHOBOT, I. Drobné prachové částice v plynných produktech spalování. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 71 s.
- [16] POPE, C. Arden., Douglas W. DOCKERY,. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. Journal of the Air & Waste Management Association č. 56, 2006, s. 709–742. ISSN 1047-3289.
- [17] WHO. Health aspect of air pollution: Results from the WHO Project “Systematic review of health aspect of air pollution in Europe“ Denmark, 2004, 24 s., E83080
- [18] OBROUČKA, Karel. Látky znečišťující ovzduší. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. 73 s. ISBN 80-248-0011-X.
- [19] Emise PM10 a jejich zdroje [online]. Ing. Helena Hnilicová, Český hydrometeorologický ústav, 2016 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/07/sd2008-prednaska-hh-emise-pm10-a-jejich-zdroje.pdf>

- [20] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003, 226 s. ISBN 80-7080-517-x.
- [21] ČMHU: Grafická ročenka 2017. [online]. [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/17groc/gr17cz/IV2_BaP_CZ.html
- [22] ČSN EN 13284-1: Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda. Praha: ČNI, 2002
- [23] Metody měření – měřicí přístroje. Virtuální centrum informací o životním prostředí pro školy [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.virtualnicentrum.cz/vzdelavaci-moduly/modul-ovzdusi/znecisteni-ovzdusi/prach/metody-mereni/>
- [24] Porovnání emisních požadavků pro kotle do 300 MW. Tzb-info [online]. 2015 [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/12909-co-musi-splnit-novy-kotel-na-tuha-paliva-po-roce-2020>
- [25] CEBAK, Jiří. Odlučování tuhých částic. Praha : ČVUT, 2014.
- [26] ČSN EN 303-5:2013. 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.
- [27] NESVADBA, Jindřich. Čištění spalin: text přednášky...v Akci celoživotního vzdělávání občanů. Praha: INKOTEKA - Environmental Experts, 1996, 160 s.
- [28] Cyklónový odlučovač. In: Energyeducation.ca: Cyclone separator [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Cyclone_separator
- [29] Rotační odlučovač [online]. In: [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2873647/>
- [30] Venturiho pračka [online]. In: [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/ChTPI/Pred07_KysSir.pdf
- [31] MAREK, Jozef. AMONIAK PRŮMYSLOVÁ VÝROBA SYNTETICKÉHO AMONIAKU [online]. In: [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://adoc.tips/amoniak-prmyslova-vyroba-syntetickeho-amoniakuc06437231ba76fdc24ccc60aa043921625061.html>
- [32] Elektrostatický odlučovač [online]. In: [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.redecam.com/electrostatic-precipitators/>
- [33] Tkaninový filtr [online]. In: [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://mjcetenvsci.blogspot.com/2013/11/air-pollution-causes-effects-and.html>
- [34] BRETSCHNEIDER, Boris; Jiří Kunfürst. Technika ochrany ovzduší 1.vyd. Praha: SNTL, 1978.
- [35] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-7080-517-X.
- [36] Čištění plynu [online]. In: [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/13%20CisteniPlynu.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Celý název
A	adheze
Ag	stříbro
As	astat
C	uhlík
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
ČHMU	český hydrometeorologický ústav
Hg	rtuť
K	draslík
Na	sodík
NFR	nomenklatura pro podávání zpráv
Ni	nikl
NOX	oxidy dusíku
O ₂	kyslík
OGC	organicky vázaný uhlík
Pb	olovo
PM	particulate matter
PVC	polyvinylchlorid
Se	selen
SO ₂	oxid siřičitý
TOC	celkový organický uhlík
Ti	titan
TZL	tuhé znečišťující látky
Zn	zinek

Symbol	Veličina	Jednotka
c	hmotnostní koncentrace TZL	mg/m^3
f_c	faktor pro přepočet na referenční obsah kyslíku	-
H	průměr hubice sondy	mm
m	hmotnost prachu	mg
p	izokinetický poměr	%
$p_{\text{HR}}^{\text{“}}$	parciální tlak H_2O při stavu nasycení	Pa
p_a	atmosferický tlak	Pa
p_c	tlak plynu v plynoměru	Pa
p_p	tlak plynu v potrubí	Pa
RH	relativní vlhkost	%
T	doba měření	min
t_c	teplota plynu v plynoměru	$^{\circ}\text{C}$
t_p	teplota plynu v potrubí	$^{\circ}\text{C}$
v	rychlost proudění v potrubí	m/s
V_c	objem pro provozní podmínky	m^3
V_{cn}	objem vlhkého vzorku plynu (provozní podmínky)	m^3
V_{cs}	objem plynu naměřený plynoměrem	m^3
V_{csn}	objem suchého vzorku plynu za normálních podmínek	m_N^3
$x_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{“}}$	koncentrace H_2O ve stavu nasycení	-
$x_{\text{H}_2\text{O}}$	koncentrace H_2O ve vlhkém plynu	-
z	odchylka izokinetického průtoku	%
Δp_p	statický tlak plynu v potrubí	Pa
φ_m	medián referenčního objemového zlomku kyslíku	%
φ_{ref}	referenční hodnota objemového zlomku kyslíku	%

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Schéma prohořívacích kotlů [4]
Obr. 2 Kotel se spodním odhoříváním [4]
Obr. 3 Zplyňovací kotel na dřevo Guntamatic Synchron [6]
Obr. 4 Průnik jednotlivých velikostních frakcí prachu do dýchacích cest [19]
Obr. 5 Obvyklé velikosti částic [18]
Obr. 6 Podíl sektorů NFR na celkových emisích z roku 2016 pro frakce PM₁₀ a PM_{2,5} [21]
Obr. 7 Stanovení koncentrace TZL dle ČSN EN 13284-1 [22]
Obr. 8 Rozdělení odlučovačů
Obr. 9 Usazovací komora bez přepážky [25]
Obr. 10 Typy prašníků [34]
Obr. 11 Žaluziový horizontální odprašovač [36]
Obr. 12 Ventilátorový rotační odlučovač [29]
Obr. 13 Cyklónový odlučovač [28]
Obr. 14 Mokrý vírový odlučovač [14]
Obr. 15 Pěnový odlučovač [14]
Obr. 16 Hladinový odlučovač s kolmým a s tečným přívodem plynu [14]
Obr. 17 Sprchová věž vertikální (pračka) [31]
Obr. 18 Venturiho pračka [30]
Obr. 19 Elektrostatický odlučovač [32]
Obr. 20 Tkaninový filtr s profukem [33]
Obr. 21 Schéma měřicí tratě
Obr. 22 Teplovodní výměník KWH 180 (vlevo) a zplyňovací komora ZKG 110 (vpravo)
Obr. 23 Cyklónový odlučovač
Obr. 24 Analytický model cyklónového odlučovače
Obr. 25 Siemens ULTRAMAT
Obr. 26 Analyzátor spalín
Obr. 27 Denver Instrument SI-234
Obr. 28 Odběrová sonda
Obr. 29 Eksikátor
Obr. 30 Sušárna Venticell
Obr. 31 Distribuce částic ve vzorku odebraného z ventilátoru před cyklónem
Obr. 32 Distribuce částic ve vzorku odebraného z potrubí před cyklónem
Obr. 33 Celková distribuce částic při spalování dřevních pilin

SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 Staré a nové emisní limity prachu dle EN 303-5:1999 a EN 303-5:2012 [26]

Tab. č. 2 Požadavky pro kotle na tuhá paliva dle směrnice Ekodesign [24]

Tab. č. 3 Záznam hodnot z měření č.1

Tab. č. 4 Záznam hodnot z měření č.2 před cyklónem

Tab. č. 5 Záznam hodnot z měření č.2 za cyklónem

Tab. č. 6 Záznam hodnot z měření č.3 před cyklónem

Tab. č. 7 Záznam hodnot z měření č.3 za cyklónem

Tab. č. 8 Vypočtené hodnoty pro stanovení koncentrace TZL z měření č.1

Tab. č. 9 Vypočtené hodnoty pro stanovení koncentrace TZL z měření č.2

Tab. č. 10 Vypočtené hodnoty pro stanovení koncentrace TZL z měření č.3