



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO SNÍŽENÍ EMISÍ TUHÝCH
ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK**

DESIGN OF EQUIPMENT TO REDUCE EMISSIONS OF SOLID POLLUTANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Alina Barybina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Alina Barybina**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**
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:

Návrh zařízení pro snížení emisí tuhých znečišťujících látek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Prachové částice v současné době stojí v popředí zájmu ekologů i energetiků. Na snižování emisí tuhých znečišťujících látek, zejména PM 10 a PM 2,5, je vyvíjen velký společenský i legislativní tlak. Cílem bakalářské práce je rešerše o vlastnostech prachových částic vzniklých při spalování tuhých paliv, zejména biomasy a o metodách jejich eliminace. Součástí práce je návrh zařízení pro snížení koncentrace tuhých znečišťujících látek ve spalínách.

Cíle bakalářské práce:

- přehled vlastností tuhých znečišťujících látek s ohledem na možnosti eliminace a dopad na zdraví člověka a ŽP
- přehled metod eliminace koncentrací TZL s důrazem na suché metody odlučování
- návrh zařízení pro snížení koncentrace TZL ve spalínách vzniklých spalováním biomasy

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 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 bakalářská práce se skládá z teoretické a praktické části.

V teoretické části (1. a 2. kapitola) jsou popsány vlastnosti TZL, legislativa v České republice, principy odloučení částic a různé typy odlučovacích zařízení.

V praktické části byl proveden návrh filtračního systému na odloučení TZL ze spalín třech kotlů na biomasu.

Klíčová slova: tuhé znečišťující látky, průmyslová filtrace, odprášení, filtrační zařízení

ABSTRACT

This bachelor thesis consists of the theoretical and the practical part.

In the theoretical part (chapters 1 and 2) the properties of PM, legislation in the Czech Republic, principles of separation of particles and different types of separation devices are described.

In the practical part in the chapter 3, a design of a filtration system for separating PM from the flue gas from three biomass boilers was made.

Key words: particular matters, industrial filtration, dedusting, filtration equipment

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARYBINA, Alina. *Návrh zařízení pro snížení emisí tuhých znečišťujících látek* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116602>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Marek Baláš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Návrh zařízení pro snížení emisí tuhých znečišťujících látek** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

Alina Barybina

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za odbornou pomoc a vhodné rady. Dále děkuji společnosti CIPRES FILTR BRNO s.r.o. a jejímu řediteli Ing. Přemyslu Pazderovi za cenné připomínky a ochotu při tvorbě této bakalářské práce.

OBSAH:

ÚVOD	10
1. TUHÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY, PŘEHLED	11
1.1 ŠKODLIVÉ ÚČINKY TZL.....	11
1.2 LEGISLATIVA	12
1.3 VLASTNOSTI ČÁSTIC	13
1.4 TEORETICKÁ PODSTATA ODLUČOVÁNÍ	14
1.5 ZÁKLADNÍ PRINCIPY ODLUČOVÁNÍ TZL	15
2 ZAŘIZENÍ NA ODLOUČENÍ TZL	16
2.1 SUCHÉ MECHANICKÉ ODLUČOVAČE	16
2.1.1 Gravitační odlučovače	16
2.1.2 Setrvačné odlučovače.....	17
2.1.3 Vírové odlučovače	17
2.1.4 Rotační odlučovače	18
2.2 MOKRÉ MECHANICKÉ ODLUČOVAČE.....	19
2.2.1 Sprchové věže	19
2.2.2 Pěnové odlučovače.....	19
2.3. LÁTKOVÉ FILTRY	20
2.3.1 Provedení	20
2.3.2 Filtrační látky.....	23
2.3.3 Regenerace filtračního media	26
2.3.4 Zatížení filtrační plochy	26
2.3.5. Volba filtračního zařízení.....	27
2.4. ELEKTROSTATICKÉ ODLUČOVAČE.....	28
2.5. SPOJENÍ NĚKOLIKA TYPŮ ZAŘIZENÍ.....	28
3. NÁVRH FILTRAČNÍHO ZAŘIZENÍ	30
3.1. CYKLÓNY	30
3.2. LÁTKOVÝ FILTR.....	31
3.3. VENTILÁTOR.....	33
3.4 KALKULACE CENY	34
4. ZÁVĚR.....	36
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	37
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	Chyba! Záložka není definována.
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	38
SEZNAM TABULEK.....	38
SEZNAM PŘÍLOH	39

ÚVOD

Tuhé znečišťující látky neboli TZL patří mezi základní znečišťující látky a zauímají výrazný podíl ve znečišťování ovzduší v ČR. V kontextu nebezpečí pro člověka a omezující legislativy budeme mluvit hlavně o částicích menších než 10 μm , které na rozdíl od větších částic už nebudou přirozeně odloučeny v horních dýchacích cestách a jejich velká část se dostane do hrtanu a dále. Netoxické prachy můžou vyvolat podráždění v dýchacích cestách, toxické způsobují intoxikaci organismu. Dlouhodobý kontakt se zaprášeným vzduchem zvyšuje riziko vzniku rakoviny a chronických onemocnění plic.

Popis základních vlastností TZL, jejich účinků a omezující legislativy je uveden v 1. kapitole.

Vzhledem k nežádoucímu vlivu TZL je tedy velmi důležité omezení jejich počtu ve vzduchu. Velký podíl na znečištění tuhými látkami zauímají rozličné sektory průmyslu. Díky tomu, že průmyslové emise se přísně kontrolují legislativou, stav ovzduší v ČR se postupně zlepšuje. Výrazného snížení emisí TZL lze dosáhnout použitím vhodného filtračního zařízení.

Filtrace se používá již od 19. století a technologie se stále zlepšují. V současné době existuje hodně odprašovacích metod a každá má vlastní specifické použití, své výhody a nevýhody. Tyto metody jsou popsány v kapitole 2.

Dalším cílem této bakalářské práce je návrh filtračního zařízení pro spalovací zařízení na biomasu, což je provedeno v kapitole 3. Návrh byl vytvořen ve spolupráci s firmou CIPRES FILTR BRNO s.r.o. a řídil se mimo jiné jejími podklady a výrobními možnostmi.

1 TUHÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY, PŘEHLED

Tuhými znečišťujícími látkami (dále TZL) se obecně rozumí tuhé částice, vznikající v důsledku přírodních procesů a lidské činnosti.

Mezi přírodní zdroje emisí TZL patří vulkanická činnost, činnost větru (eroze), lesní požáry aj. [1] Mezi zdroje znečištění antropogenního původu patří zejména: spalování paliv, doprava, zemědělství, rafinerie petroleje, barevná metalurgie, slévárny, papírny, třídění uhlí [1].

Dle vzniku se dělí TZL na:

- **prach**, vzniká v důsledku mechanických operací, drcení, mletí atd.,
- **popílek**, čímž se rozumí částice vznikající po spalování tuhých paliv,
- **dým**, jemné a kapalné částice vznikající kondenzací a tuhnutím par látek,
- **kouř**, který obsahuje zejména uhlík a vzniká po spalování organických látek [7].

1.1 ŠKODLIVÉ ÚČINKY TZL

Z hlediska zdravotní bezpečnosti a vlivu na životní prostředí se obvykle pozorují dvě frakce TZL: **PM₁₀** o aerodynamickém průměru menší než 10 μm a **PM_{2,5}**, které jsou menší než 2,5 μm. V poslední době se často hovoří také o částicích **PM₁** menších než 1 μm, které se postupně od roku 2008 začínají měřit na stanicích v ČR [4].

Aerodynamický průměr určuje schopnost pronikání do organismu. Větší částice při dýchání jsou relativně bezpečné díky tomu že se přirozeně odloučí v horních dýchacích cestách. Frakce **PM₁₀** proniká při dýchání do spodních dýchacích cest. Jemnější částice **PM_{2,5}** jsou schopné proniknout až do plicních sklípků a nejmenší se můžou dostat do krve [14].

TZL nemají specifické složení, a proto představují směs látek s různými účinky a můžou působit jak mechanicky, tak i chemicky. Současně mohou být částice nosiči pro plynné škodliviny jako **SO₂**, **NO_x** [14].

Vliv koncentrace, která se u TZL zpravidla měří v jednotkách [mg/m³], se nejvýznamněji projevuje u toxických prachů. Prašné emise mohou obsahovat uhlíkaté látky, zahrnující v sobě sloučeniny s možnými mutagenními nebo karcinogenními účinky (PAU, benzen) a soli (sulfáty, nitráty) nebo těžké kovy (arzén) [14].

Vliv koncentrace netoxických prachů, například po dřevovýrobě nebo na přesýpacích uhelných stanicích, není tak velký, jako u toxických [14]. Dlouhodobé dýchání zaprášeného vzduchu škodí hlavně dýchacím cestám, ale také způsobuje srdeční nemoci a rakovinu [11].

Dle Světové zdravotnické organizaci je ovlivnění TZL příčinou cca 3 000 000 úmrtí ročně po celém světě [11].

Znečištění tuhými látkami je škodlivé také pro životní prostředí. Zaprášení rostlin omezuje fotosyntézu a těžké kovy pronikající do půdy způsobují její intoxikaci [1].

1.2 LEGISLATIVA

S ohledem na nežádoucí účinky TZL jsou zákonem stanovená omezení jejich koncentrace, která se stále zpřísňuje. ČR se řídí zákonem o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. [3] a vyhláškou č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší [2].

Stanovené emisní limity závisí především na zdroji znečištění, výkonu kotle a typu použitého paliva, druhu výroby pro průmysl atd. Jako příklad takové závislosti a zpřísnění legislativy s časem lze uvést údaje z tabulky 1.1.

Doba uvedení kotle do provozu	Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]		
		> 0,3 až < 1 MW	1-5 MW	> 5-50 MW
před 01.09.2014	Pevné palivo	250	250	150
	Kapalné palivo	-	100	100
po 01.09.2014, před 20.12.2018	Pevné palivo	100	50	30
	Kapalné palivo	-	50	30
20.12.2018 a později	Pevné palivo s výjimkou biomasy	100	50	20
	Pevné palivo-biomasa	100	33	13
	Kapalné palivo s výjimkou plynového oleje	-	50	20

Tabulka 1.1 Specifické emisní limity pro TZL stacionární energetické zdroje [4]

Pro přehled vývoje situace s časem lze přivést údaje stavu z let 1969-1970. Odhad celkového vzniklého množství TZL v důsledku lidské činnosti za 1 rok je cca 265 000 [kt]. Podíly jednotlivých sektorů na emisích je vidět na grafu 1.1 [1].

Pro srovnání v roce 2016 celkové emise činily:

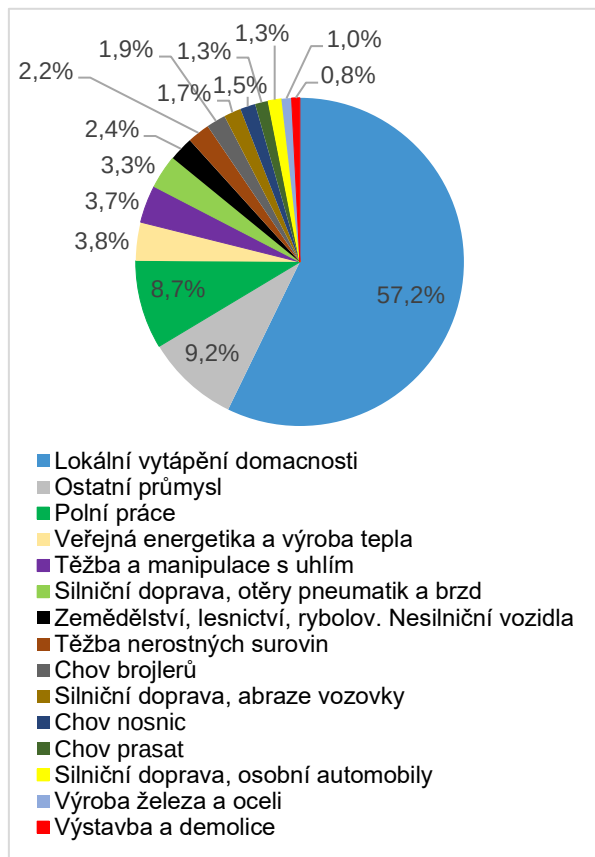
- PM₁₀
 - 52 [kt] v ČR [4]
 - 33,66 [kt] tun na Slovensku [6],
- PM_{2,5}
 - 39 [kt] v ČR [4]
 - 26,75 [kt] tun na Slovensku [6].

Z toho plyne, že celkové emise se s časem značně snížily, a to díky zpřísnění legislativy a vylepšení technologie výroby, spalování a filtrace. Z grafů 2 a 3 můžeme vidět, že největší podíl ve znečišťování ovzduší tuhými látkami na území České

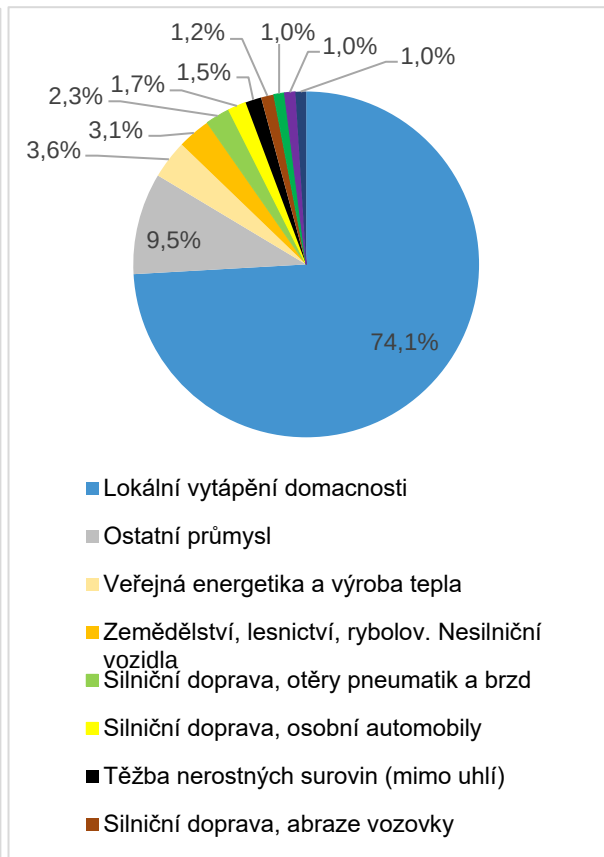


Graf 1.1 Podíl na celkových emisích TZL v roce 1970 na území ČSSR [12]

republiky se v současné době objevuje u lokálního vytápění domácností. Lze to vysvětlit tím, že tento sektor, tzn. technologie spalování a kvalita paliva v něm, je náročný pro kontrolu legislativních orgánů.



Graf 1.2 Podíl sektorů NFR na celkových emisích PM10 v roce 2016 na území ČR [4]



Graf 1.3 Podíl sektorů NFR na celkových emisích PM2,5 v roce 2016 na území ČR [4]

1.3 VLASTNOSTI ČÁSTIC

Pro správný návrh odlučovacího procesu je důležité znát podstatné vlastnosti částic: **tvar, velikost, zrnitost** aj.

Tvar částic závisí hlavně na způsobu jejich vzniku. Ideální tvar (koule) vzniká při kondenzaci a následujícím tuhnutí par látek. Složitý tvar vzniká v důsledku mechanického působení, například drcením [7].

Objem částice není vždycky homogenní. Některé částice, zejména vzniklé po spalování, mohou obsahovat dutiny [7].

Pro zjištění vlastností částice izometrického tvaru můžeme tuto částici pro jednoduchost nahradit částicí ve tvaru koule, přičemž náhradní částice bude mít společnou charakteristickou vlastnost s částicí nahrazenou, např. průmět, povrch, pádovou rychlost. Jedná se v takovém případě o **ekvivalentní velikost** [7].

Když zavedeme u ekvivalentní částice vztažnou hustotu částice $\rho_c = 1000 \text{ kg/m}^3$ tak dosáhneme ekvivalentní velikost částice dle pádové rychlosti s hustotou částic ρ_c a značíme ji a_1 . Tato ekvivalentní velikost je **aerodynamická velikost částice** [7].

Pro vzájemný přepočet velikosti částic tím pádem platí:

$$a^{2*} \rho_c = a_1^{2*} 1000 \quad [7] \quad (1)$$

Zrnitost částic lze definovat jako rozdělení velikosti částic v souboru. Rozdělení může být dle počtu, průmětu nebo hmotnosti, podle toho, co při rozdělení sledujeme [7].

Rozdělení zrnitosti lze vyjádřit kumulativní křivkou zrnitosti, která je buď křivka zbytků nebo křivka propadů. Fyzikální význam křivky propadu (zbytku) je takový, že pro každou velikost částice a uvádí poměrný počet částic v souboru menších (větších) než je daná velikost [7].

Definice frakce PM₁₀ a PM_{2,5}. Dle zákona č. 201/2012 Sb. se «stanoví poměr částic, které projdou velikostně-selektivním vstupním filtrem vykazujícím pro aerodynamický průměr 10 µm odlučovací účinnost 50 % (dále jen „částice PM₁₀“), a částic, které projdou velikostně-selektivním vstupním filtrem vykazujícím pro aerodynamický průměr 2,5 µm odlučovací účinnost 50 % (dále jen „částice PM_{2,5}“), vůči tuhým znečišťujícím látkám v emisích» [3].

Důležité vlastnosti částic jsou také **smáčivost** a **elektrická vodivost**, které závisí především na chemickém složení.

1.4 TEORETICKÁ PODSTATA ODLUČOVÁNÍ

Podstatné faktory pro návrh a zhodnocení funkce odlučovače jsou:

- celková odlučivost, resp. koncentrace částic na výstupu;
- spotřeba energie, která je ovlivněna tlakovou ztrátou;
- investiční a provozní náklady [7].

Odlučivost (O_C [–]) je možné vyjádřit pomocí vztahu:

$$O_C = \frac{\dot{M}_Z}{\dot{M}_P} = \frac{\dot{M}_P - \dot{M}_V}{\dot{M}_P} = 1 - \frac{\dot{M}_V}{\dot{M}_P} = 1 - P_C \quad [7] \quad (1)$$

Kde:

$\dot{M}_P$ – hmotnostní tok na vstupu [m^2/s];

$\dot{M}_V$ – hmotnostní tok na výstupu [m^2/s];

$\dot{M}_Z$ – zachyt [m^2/s];

P_C – celkový průnik [–].

Pro návrh vhodného zařízení je důležitá také frakční odlučivost (O_F) která je definovaná jako schopnost odloučení částic v úzkém velikostním intervalu (a).

$$O_F = \frac{\dot{M}_Z dZ_Z}{\dot{M}_P dZ_P} = O_C \frac{dZ_Z}{dZ_P} \quad [7] \quad (2)$$

Kde:

Z_Z – zrnitost zachycených částic;

Z_P – zrnitost částic na vstupu.

Z toho vyplývá že celkovou odlučivost O_C lze stanovit výpočetně pomocí integrace:

$$O_C = \int O_F(a) dZ_P(a) \quad [7] \quad (3)$$

Tlakovou ztrátu odlučovače Δp lze definovat jako rozdíl celkových tlaků (statický plus dynamický) na vstupu a výstupu z odlučovače.

Avšak je nutno říci, že v praxi při návrhu zařízení je těžké definovat přesné hodnoty koncentrace prachu na vstupu a výstupu a jiné, protože proces je závislý na hodně podmínkách. Proto je to často odhad.

1.5 ZÁKLADNÍ PRINCIPY ODLUČOVÁNÍ TZL

Základem každého procesu odlučování částic je jejich odvod z proudícího plynu na odlučovací plochy. Touto odlučovací plochou může být stěna odlučovače, například u cyklonů, vestavba, jako v elektrických odlučovačích, povrch vláken nebo zrnitého materiálu (látkové filtry), vrstva už odloučených částic (filtrační koláč) [1, 7].

Ten odvod probíhá za několika základních principů uvedených níže.

Gravitační princip je mechanický princip založený na využití gravitační síly. Při vodorovném proudění na částice působí dvě silové složky: unášivé síly proudu a gravitace. U těžších částic bude gravitační složka větší při vhodném návrhu rychlosti proudu, díky čemuž spadnou dolů a budou odloučené. Není tento způsob vhodný na jemné a lehké částice [1].

Setrvačný princip. Dle Newtonového zákona těleso, na které nepůsobí žádná vnější síla, bude setrávat ve svém původním dynamickém stavu. Působením vnější síly se pohyb tělesa změní ve směru působení síly, přičemž vznikne setrvačná složka síly. U těžších částic bude setrvačná složka větší, a to můžeme použít pro odlučování prachu [1].

Nejčastější způsob je zakřivení dráhy proudu plynu pevnou stěnou, přičemž těžší částice narazí na stěnu, budou odloučené z proudu a spadnou dolů.

Elektrostatický princip je založen na využití pohybu hmotných částic v elektrickém poli. V první fázi se částice nabijí monopolárním nábojem a v druhé fázi jsou tyto částice odváděny z proudu působením elektrického pole [1].

Difuzní princip je hlavním principem při průchodu částic vláknitou vrstvou v látkových filtrech. Souhlasně tomuto principu jednou ze složek hustoty toku je difuzní přenos ve směru snižující se koncentrace [7].

Intercepční princip neboli přímé zachycení částic – jeden z principu používaných při průchodu částic vláknitou vrstvou.

Sítový princip. Tento princip se uplatňuje při průchodu plynu přes filtrační vláknitou nebo zrnitou vrstvu nebo vrstvu již odloučených částic. [7]

2 ZAŘÍZENÍ NA ODLOUČENÍ TZL

Redukci emisí TZL lze rozdělit na primární a sekundární. Primární redukce je snížení produkce TZL.

Například při spalování množství vzniklých částic závisí na typu kotle, typu spalovaného paliva a technologii spalování. Při spalování uhlí podíl popelovin přecházejících do spalin jako popílek závisí zejména na technologii spalování:

- práškové kotle 80-90 %
- roštové kotle 40 %
- cyklonové 30 %
- cirkulační fluidní 90 % [13]

Pro vyloučení vzniku TZL při spalování lze také použít palivo neobsahující tuhé částice, např. zemní plyn místo uhlí a dřeva.

Avšak taková primární redukce není ve většině případů dostačující pro splnění legislativy. Proto se stává filtrace v průmyslu nezbytnou součástí procesu.

Všechny odlučovače můžeme rozdělit do čtyř základních skupin [7]:

- **suché mechanické odlučovače**
- **mokrý mechanický odlučovač**
- **látkové filtry**
- **elektrické odlučovače**

Dle umístění ventilátoru, kterým je vzduch poháněn, dělí se vzduchotechnická zařízení na přetlakové a podtlakové

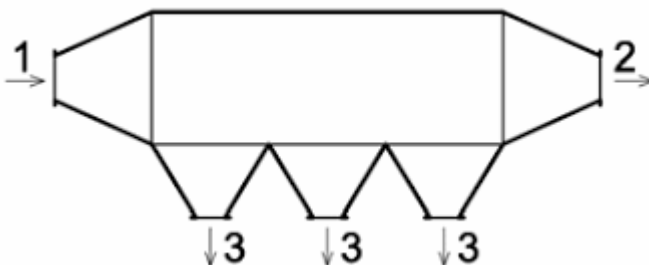
2.1 SUCHÉ MECHANICKÉ ODLUČOVAČE

Suché odlučovače patří mezi nejstarší typy odlučovačů a jsou používány již od 19. století. Jejich rozšířenost lze vysvětlit jednoduchostí konstrukce a údržby, nižší cenou odprašování, než pomocí mokrého odlučování a látkových filtrů. Nevýhodou ale je nedokonalé odprašování, zejména jemných částic. Proto v praxi jsou suché mechanické odlučovače používány v málo případech samostatně. Jsou nejčastěji zapojeny do vícestupňových systému pro odloučení hrubších částic.

2.1.1 Gravitační odlučovače

Jako příklad gravitačního odlučovače můžeme uvést **usazovací komoru** (obr 2.1). Je to jedna z nejjednodušších technologií.

Odprašení se provádí snižováním rychlosti proudu v důsledku zvětšení průřezu, kterým plyn prochází. Pro prodloužení doby, za kterou plyn bude procházet komorou a tím i zvýšení účinnosti mohou být navíc použity přepážky [7].



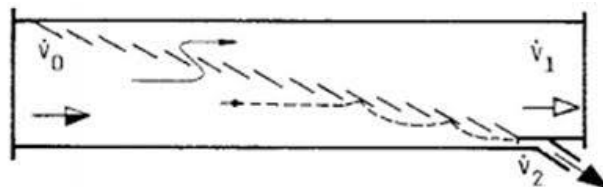
Obrázek 2.1 Usazovací komora [9]
1 – vstup znečištěného plynu
2 – výstup plynu
3 – výpad prachu

Obecně tento typ můžeme hodnotit jako odlučovače s nízkou odlučivostí, mez odlučivosti a_m při vhodné volbě zařízení a nižších průtocích je mezi 30 až 50 μm [7].

2.1.2 Setrvačné odlučovače

Setrvačné odlučovače používají princip setrvačnosti při průchodu plynu přes vhodně profilované přepážky vložené do komory, jimiž je průtok usměrňován [13].

V **žaluziových odlučovačích** (obr 2.2), používaných zejména jako předodlučovače, je proud změněn hustou žaluziovou mříží. Prach bude odloučen z hlavního proudu a převeden do účinnějšího odlučovače, například cyklonu.

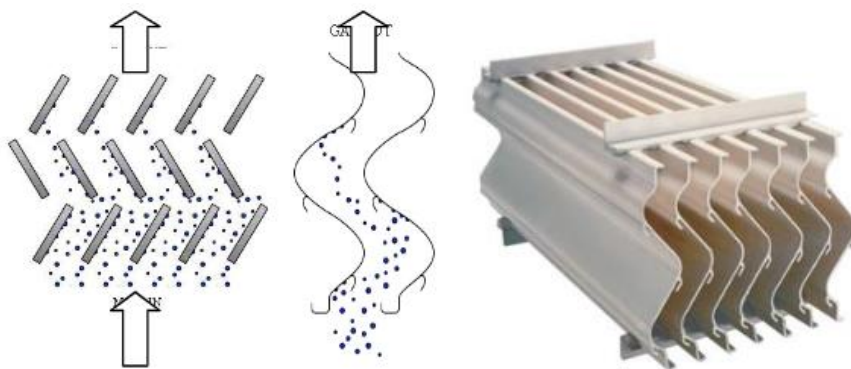


Obrázek 2.2 Žaluziový odlučovač [9]

Mez odlučivosti může být až 10 μm [7] a závisí na tvaru žaluzie, rozteči listů, postupové rychlosti plynu a na velikosti částic [13].

Tento typ odlučovačů má relativně malé tlakové ztráty. Jsou vhodné pro nelepivý a neabrazivní prach a vysoké teploty [13].

Lamelové odlučovače (obr 2.3) jsou určeny primárně pro odlučování kapek buď za mokrémi mechanickými odlučovači nebo za vodními pračkami a jsou založené na mnohonásobné změně směru proudu. Větší kapky vody budou zachyceny na lamelách a odtečou za působení gravitační síly.



Obrázek 2.3 Lamelový odlučovač [9]

2.1.3 Vírové odlučovače

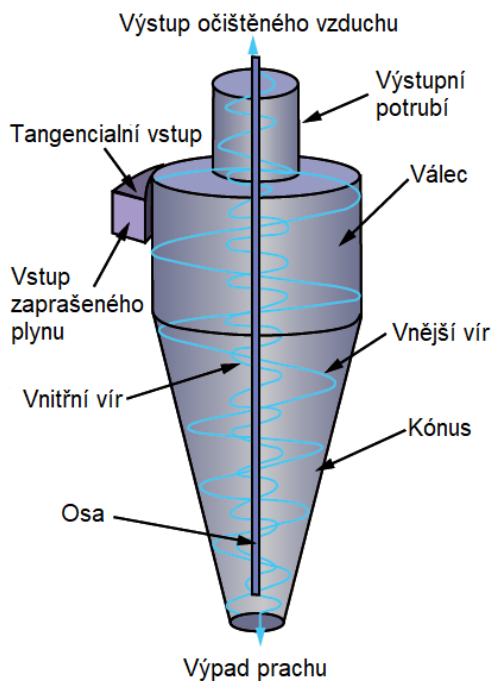
Vírové odlučovače neboli cyklóny jsou nejrozšířenějším typem suchých odlučovačů díky jednoduchosti své konstrukce, spolehlivosti a nízkým provozním nákladům [12].

Fungování cyklonu je založeno na odstředivé síle působící na částice při spirálovém pohybu v cylindrovou nebo kuželovou komoru cyklonu (obr. 2.4), přičemž částice se dostávají do stěny, kde se z proudu odlučují a padají dolů do výsypky. Jsou často používány ve víceúrovňovém zapojení jako předodlučovače větších částic, čímž se sníží zátěž dalšího filtračního zařízení a dojde k stabilnějším provozním podmínkám celého systému [5].

Při odsávání kotlů na tuhá paliva plní cyklón také funkci odlučovače jisker, což snižuje nebezpečí vyhoření následujícího filtru [5].

Procesy, které se dějí v cyklónech jsou složité a závislé na mnoha faktorech a nejsou zatím dokonale popsány. Proto při návrhu cyklónu musíme brát v úvahu také výsledky z experimentů a zkušenosti z provozu [12].

Proto aby se odloučený prach nedostal zpátky do proudu je nutno zajistit tlakové oddělení komory a výsypky pomocí rotačního podavače.



Obrázek 2.4 Pohyb plynu v cyklónu [10]

Dle způsobu vstupu zaprášeného plynu se cyklóny dělí na tři základní typy:

- s tečným vstupem,
- s osovým vstupem a vratným tokem,
- s osovým vstupem a přímým tokem [1]

Pro výpočet odlučovací schopnosti cyklónu lze použít tak zvané Stokesovo kritérium (Stk_m):

$$Stk_m = \frac{\tau_{\xi,m} v_d}{d} \quad [7] \quad (4)$$

Kde:

$\tau_{\xi,m}$ [s] – doba relaxace částice pro hodnotu meze odlučivosti a_m ,

v_d [m/s] – fiktivní rychlost ve válcové komoře,

d [m] – vnitřní průměr válcové komory.

Fiktivní rychlost v_d lze vyjádřit vztahem:

$$v_d = \frac{4V}{\pi d} \quad [7] \quad (5)$$

Tlakové ztráty u vírových článků závisí na konstrukci a pohybují se v rozmezí 400 až 1000 Pa, pro niž platí:

$$\Delta p_z = \xi \frac{v_d^2 \rho}{2} \quad [7] \quad (6)$$

kde ξ je ztrátový součinitel.

Pro větší provoz může být několik cyklónů zapojeno do soustavy která se nazývá multicyklón. Nevýhodou multicyklónu je velká tlaková ztráta a klesající účinnost při nižších průtocích plynu než ty, pro které byl určitý multicyklón navržen [5].

Cyklóny jsou vhodné pro suchý nelepivý prach a jejich hlavní nevýhodou je špatná odlučivost menších částic, zejména částic velikosti pod 10 μm .

2.1.4 Rotační odlučovače

Rotační odlučovače jsou primárně určeny pro odlučování papírových nebo PVC odřezků v papírzpracujícím průmyslu [5].

Částice jsou při rotaci zachyceny sítí na stěně komory a tím se odlučují z proudu. Velikost síť je navrhována z hlediska velikosti částic, které je třeba odloučit [5].

Zachycený odpad se pak zpravidla slisuje.

2.2 MOKRÉ MECHANICKÉ ODLUČOVAČE

Ve srovnání se suchými mechanickými odlučovači mokré odlučovače jsou efektivnější pro odloučení jemnějších částic, navíc jsou vhodné na lepivé a abrazivní částice a prach s nebezpečím výbuchu.

Jako nevýhody lze uvést nevhodnost na špatně smáčivé a cementující prachy, nutnost kalového hospodářství, nebezpečnost koroze a zamrzání [7].

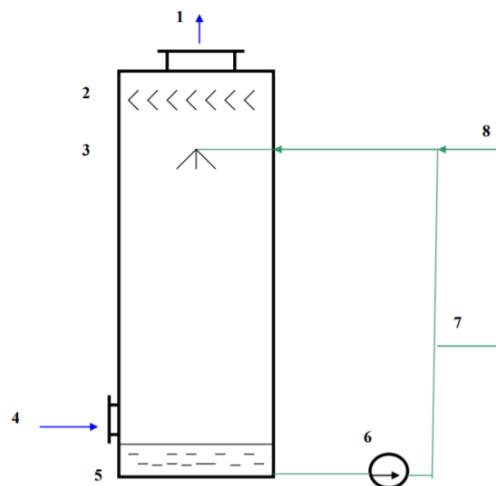
2.2.1 Sprchové věže

Jsou to zpravidla válcové komory, ve kterých shora je nastříkovaná kapalina a plyn je přiváděn zdola a vystupuje nahoře – viz obr. 2.5 [9].

Skrápěcí kapalina se buď vrací do výrobního procesu nebo odváděná na čistírnu.

Výhodou tohoto zařízení je snadná automatizace, nevýhodou jsou velké rozměry (výška věže může dosáhnout 5-10 metrů).

V současné době jsou používány jen výjimečně.



Obrázek 2.5 Sprchová věž bez výplně [9]

1 – výstup čistého plynu, 2 – žaluziový odlučovač kapek, 3 – rozstřikovač skrápěcí kapaliny, 4 – vstup znečištěného plynu, 5 – předlohová nádrž, 6 – cirkulační čerpadlo, 7 – odpouštění koncentrované skrápěcí kapaliny, 8 – přívod č

2.2.2 Pěnové odlučovače

Pěnové odlučovače patří mezi nejefektivnější, a proto nejpoužívanější mokré odlučovače. Nejčastěji jsou to kolony čtvercového průřezu. Před výstupem plynu, pod horním víkem je vždycky instalován odlučovač kapek [9].

Plyn vstupuje zdola a protéká rošty uspořádané do pater, na které je přiváděna voda. Voda pak stéká dolů do kalové nádrží. Nevýhodou pěnových odlučovačů je velké tlakové ztráty – až 300 na jedno patro [7].

Dále uvedené typy mokrých odlučovačů jsou používány pro čištění menších objemů plynů, většinou pod 20 000 Nm³/hod

- vírníkové odlučovače a mokré vírové odlučovače (mokré cyklóny),
- hladinové odlučovače,
- odstředivé skrubry,
- pračky s mechanickým rozstřikem vypírací kapaliny (obvykle vody) [9].

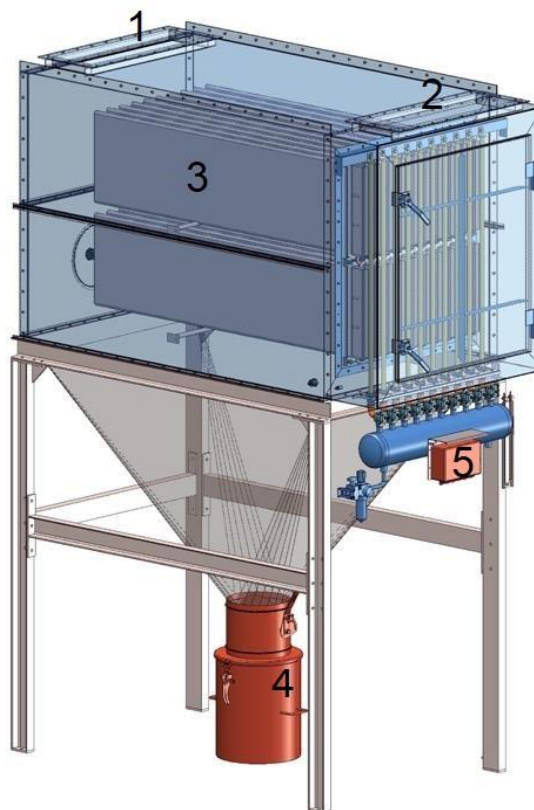
2.3. LÁTKOVÉ FILTRY

Látkové průmyslové filtry jsou používané už od konce 19. století. Odlučování TZL se v nich provádí hlavně za síťového principu, když znečištěný vzduch prochází přes vrstvu filtračního média poháněný ventilátorem. Při tom účinnost filtru může dosahat až 99.99 % a výstupní koncentrace jsou pod 1 mg/m^3 , což odpovídá současným normám. Vzduch pak může být odveden ven nebo přiveden zpátky do haly.

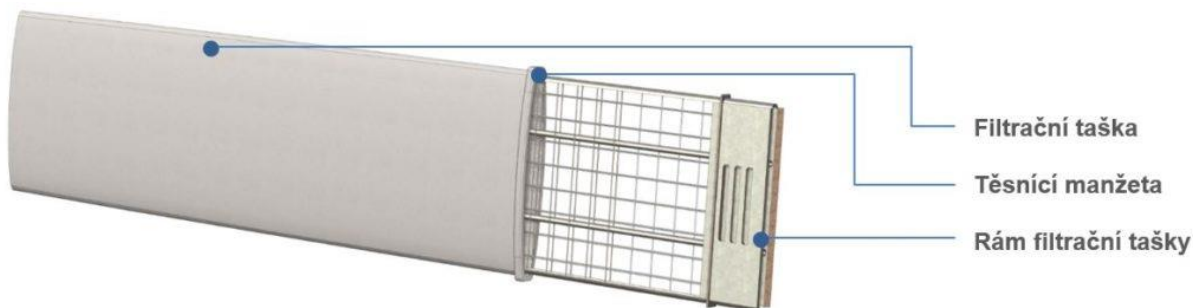
2.3.1 Provedení

Dle základních typů provedení se filtry dělí na **hadicové** a **taškové** nebo **kapsové**.

Taškové nebo **kapsové filtry** představují modernější technologie, filtrační médium má tvar plochých tašek, které drží svůj tvar díky kovovému prolisu uvnitř (obr. 2.7). Řada takových tašek je umístěna do řady buď vertikálně nebo vodorovně (viz obr 2.6).



Obrázek 2.6 [5]
1 – vstup
2 – výstup
3 – filtrační tašky
4 – kontejner
5 – systém regenerace média



Obrázek 2.7 Filtrační taška [5]

U hadicových filtrů (obr. 2.8) představuje filtrační médium hadice průměrem 125 až 650 mm a délkou až 9 m.

Při správném návrhu hadicové a taškové filtry mohou plnit úplně stejné funkce.

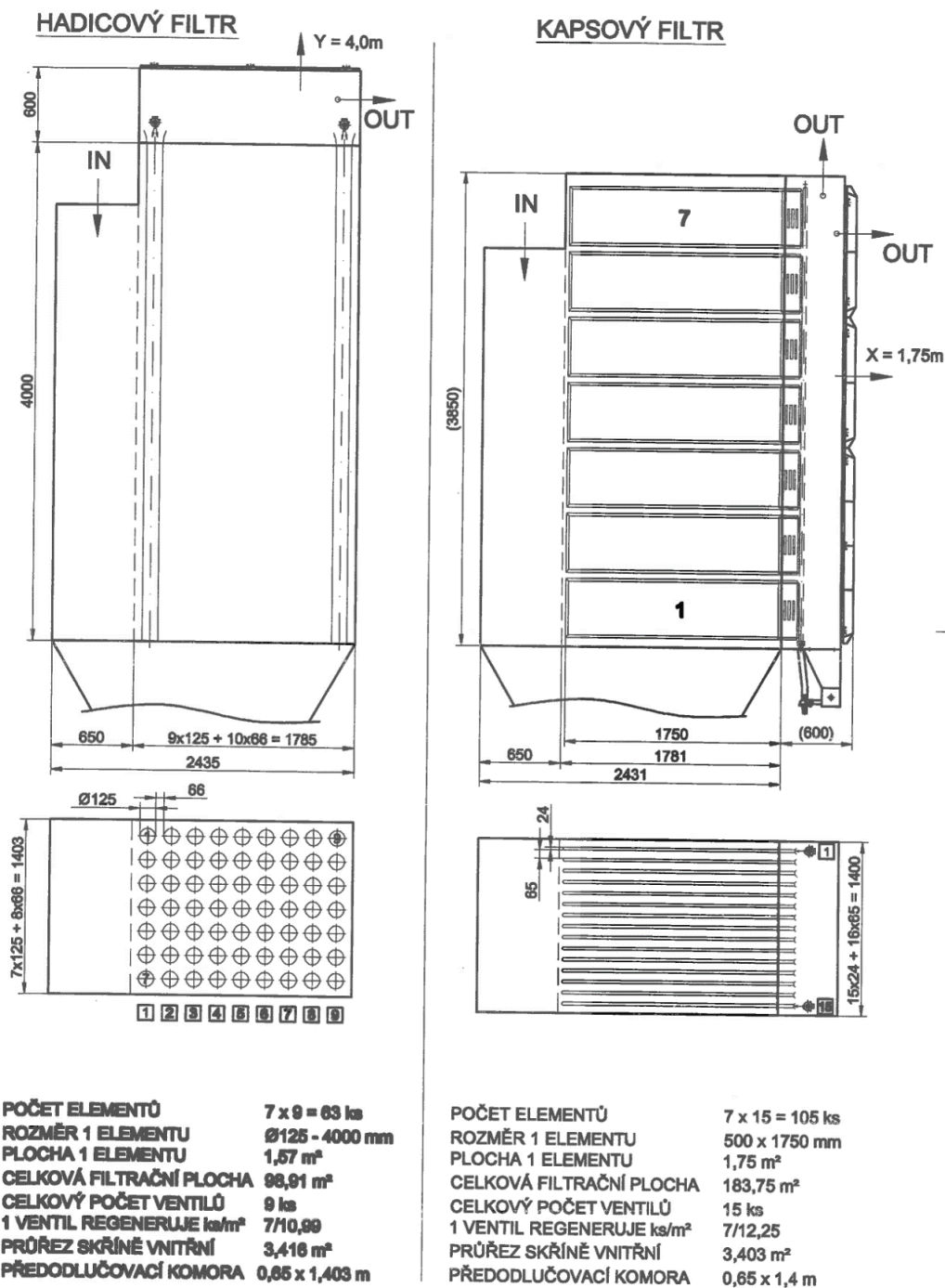
Výhodou hadicových filtrů je jejich nižší cena.

Taškové filtry ale mají řadu výhod, což z nich dělá lepší variantu pro většinu případů. (viz obr. 2.9):



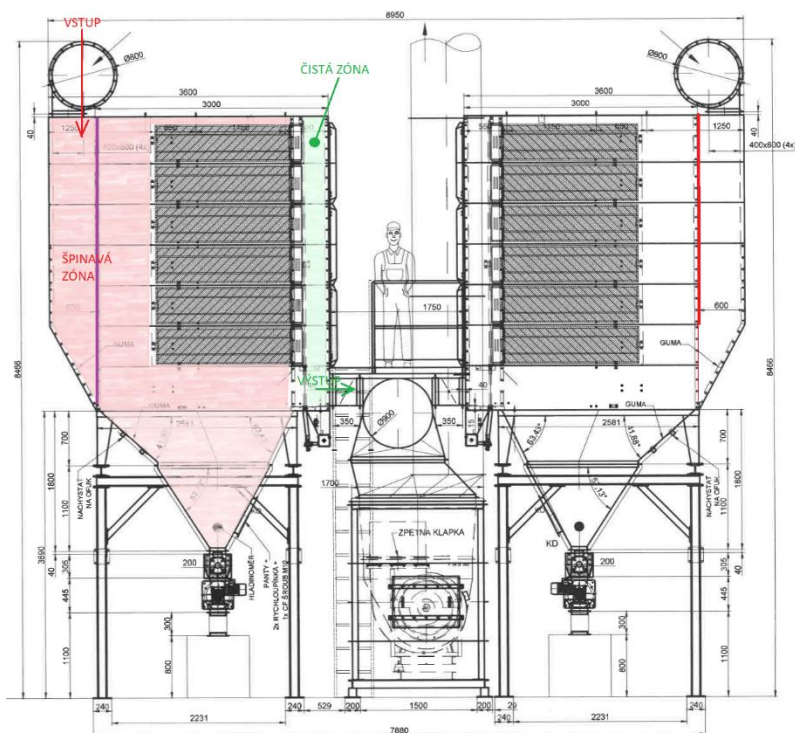
Obrázek 2.8 Hadicový filtr [5]

- Díky plochým kapsám jsou taškové filtry kompaktnější než hadicové. Ve stejném objemu skříně mají téměř dvakrát větší filtrační plochu.
- Tašky jsou jen 1,75 m dlouhé a v případě nutnosti je lze jednoduše vyjmout ve směru osy x a vyměnit, přičemž se mění jen textil, nosný rám je opakovaně využíván.
- Při čištění stlačeným vzduchem vstřík do tašky na délku 1,75 m má vyšší účinek, než na délku hadice 4 m [5].



Obrázek 2.9 Porovnání taškového a hadicového filtrů [5]

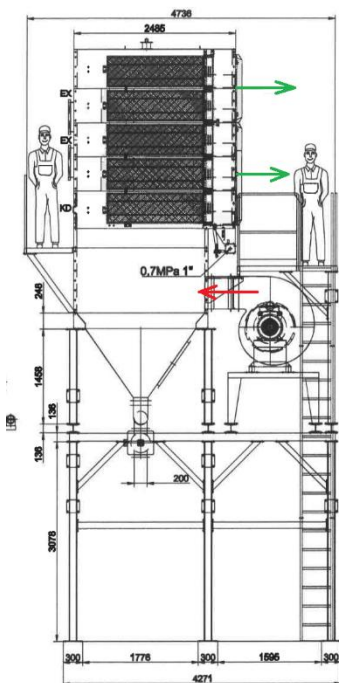
Pro zhodnocení efektivity filtrace je nutno znát velikost filtrační plochy, avšak není to jediný podstatný parametr. Odprášení může být optimalizováno pomocí vhodného konstrukčního řešení s ohledem na typ prachu.



Obrázek 2.10 Filtr pro slévarenský průmysl [5].

Jako příklad lze uvést slévarenský průmysl (viz obr 2.10), kde vznikají částice kovů, jenž jsou vysoce abrazivní a mají velkou hustotu a poměrně velkou hmotnost. Vstup vzduchu je udělán v tomto případě nahoře a vstupní část je oddělena nahoře stěnou od komory s taškami. Nejtěžší částice se narazí na stěnu, ztratí svou rychlost a spadnou podél stěny dolů ještě před tím, než dosáhnou tašek, což zabraňuje rychlému opotřebování filtračního média abrazivními částicemi.

Podobný princip lze využít při odsávání prachu ve dřevozpracujícím průmyslu.

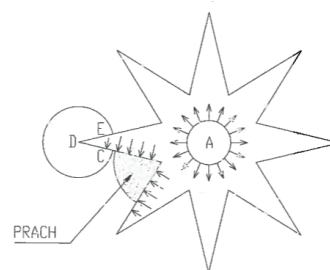


Obrázek 2.11 Filtrační zařízení pro dřevozpracující průmysl [5]

Vzduch vstupuje dole a vystupuje nahoře. Největší a nejtěžší částice spadají dolů dříve než se dostanou do filtračního média (viz obr. 2.11).

Vyskytují se také filtrační elementy s uzavřenou plochou, například tzv. **patrony**. Jejich výhodou je větší kompaktnost při stejné filtrační ploše, je ale řada nevýhod, které v současné době dělají použití patronu v průmyslové filtraci neprospěšným:

- Jsou vhodné jen na hrubší, sypké, nelepivé materiály, při tom potřebují 3 až 5krát větší filtrační plochu.
- Pro jemnější a lepivé materiály potřebná plocha bude již 5 až 10krát větší než pro filtr s otevřenou plochou, čímž je hlavní výhoda patronů ztracena.
- Nebezpečí ucpávání. Při vstřiku vzduchu do bodu A pro čištění filtru (viz obr 2.12) prach místo toho, aby vypadl tak je stisknut, přičemž využitelná filtrační plocha se zmenšuje a je ohraničena v řezu body C, D, E [5].



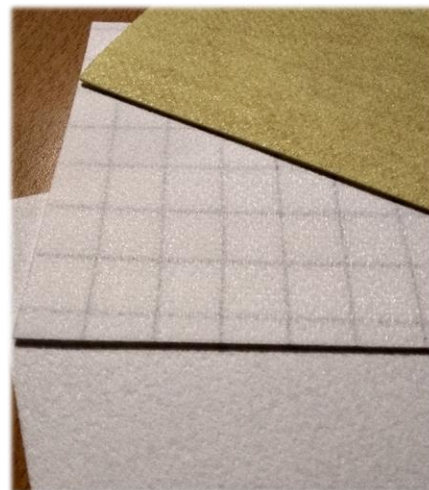
Obrázek 2.12 Patron v řezu [5]

Při odloučení prachu s nebezpečím výbuchu, například ve dřevozpracujícím průmyslu nebo na přesýpacích uhelných stanicích, jsou používány explozní membrány, které zabraňují zvýšení tlaku uvnitř filtru.

2.3.2 Filtrační látky

Při volbě filtrační látky je nutné uvažovat její strukturu a také tepelnou, mechanickou a chemickou odolnost s ohledem na vlastnosti a teplotu plynu, vlastnosti, koncentraci a složení prachu, systém regenerace (viz obr. 2.13) [5].

Dříve se používaly vlněné a bavlněné filtrační látky, dnes by ale taková filtrace těžce odpovídala požadovaným emisním limitům. Filtrační schopnosti jsou u látek používaných v průmyslové filtraci v současné době téměř stejně dobré (při plošné hmotnosti kolem 500 g/m^2) a nejsou podstatné při volbě.



Obrázek 2.13 Filtrační látky [5]. Zhora:

- tepelně odolná látka, aramidová vlákna přidávají látce tmavší barvu
- antistatické upravení polyesteru, kovová mřížka
- polyester v standardním provedení

Materiál	Obchodní označení	Trvalá odolnost [°C]	Špičková odolnost [°C]
Polyamid / PAD	Nylon	100-110	115-120
Polypropylen / POP, PP	Meraklon	90	95
Polyakrylonitril / PAN, PAC	Dolanit, ricem	130	135
Polyester / PES	Trevira, diolen, terylen, dacron	140-150	150
Aramid / AR	Nomex, conex	190-200	200-240
Polyfenylen-sulfid / PPS	Ryton, procon	190	200
Polyimid / PI	P 84	240	260
Polytetrafluorethylen/ PTFE	Teflon, rastex	250	280
Sklo (tkaniny) / GL	Fiberglass, Huyglass	260	290

Tabulka 2.1 Tepelná odolnost filtračních látek [5], [7]

Pro vyšší teploty (až 500 stupňů Celsia) je možné použít tkaniny z vláken legované oceli.

Často z ekonomických důvodů je výhodnější cesta ochlazení znečištěného plynu a použití levnějšího filtračního média s menší tepelnou odolností. Ochlazení se provádí buď přívodem falešného vzduchu z okolí u filtrů menších výkonů nebo použitím tepelného výměníku [5].

Chemická odolnost je zhodnocena v tab. 2.2 a je hodnocena 5 až 1 podle úbytku pevnosti v tahu filtrační textilie:

- 5 – vynikající odolnost (0–5 % úbytku pevnosti),
- 4 – velmi dobrá (5–10 %),
- 3 – dobrá (10–15 %),
- 2 – snížená (15–60 %),
- 1 – nedostačující (více než 60 %) [7].

Odolnost proti	Materiál vláken						
	POP	PAN	PES	AR	PPS	PI	PTFE
kyselinám	5	3-4	~ 2	2-3	4-5	4-5	5
zásadám	5	~2	2-3	3-4	4	2-3	5
organ. rozp.	4-5	4	~ 3	3-4	3-4	5	5
oxid. činidlům.	2	3	~ 4	1-2	3	4-5	5
hydrolyze	4	4-5	~ 2	3	4-5	4	5
abrazi	5	4	5	~4	4	-	~2
přibližná cenová relace	~100 %	~100 %	100 %	až 400 %	až 600 %	až 700 %	až 2000 %

Tabulka 1.2 Mechanická a chemická odolnost látek [7]

Pro návrh vhodného zařízení je podstatné dimenzování filtrační plochy s ohledem na strukturu zvolené látky, která určuje její filtrační schopnost.

Další kritéria, například antistatické provedení, oleofobní a hydrofobní vlastnosti se řeší úpravami textilu.

Téměř každá látka může být jak v antistatickém, tak v standartním provedení. Antistatické látky mají v sobě elektrostatické vodivé vlákno z nerezové oceli, mědi nebo uhlíku.

Následující tabulka popisuje typy uprav a na jaký prach jsou určeny:

Úprava Vlastnosti prachů	Code 1	Code 4 Glaze	x-surf Code 9	Si	CS17®	CS1 8®	CS29
volné poletavý	0						
aglomerující		0					
Extrémně jemný							
abrazivní	0		0				
vlhký					0		0
lepivý		0			0	0	
Elektrostatický náboj							
Příležitostný výskyt jisker							
kyselý/zásaditý							0
pyroforní prach							
Úprava Vlastnosti prachů	CS30 CS31	CS42 at NO, NX	FireGuard®		PyroGuard ®	MPS ®	Epi, as ExCharge®
volné poletavý							
aglomerující							
Extrémně jemný						0	
abrazivní							
vlhký		0					
lepivý	0						
Elektrostatický náboj							0
Příležitostný výskyt jisker			0				
kyselý/zásaditý		0					
pyroforní prach					0		

Tabulka 2.2 Úpravy filtračních látek [5]

- Code 1: opálená funkční strana;
- Code 4 Glaze: zachlazená funkční strana;
- Code 4: kalandrovaná funkční strana;
- x-surf Si Code 9: antiadhezní úprava;
- CS17®: oleofobní a hydrofobní úprava;
- CS18®: PTFE povrchový nanos;
- CS29: ochranná oprava proti mírnému chemickému ataku;
- CS30: úprava na bázi PTFE;
- CS31: oleofobní a hydrofobní úprava na bázi PTFE;
- CS42: ochranná úprava proti chemickému a hydrolytickému ataku;
- FireGuard®: vrstva odolná proti jiskrám;
- PyroGuard®: grafitový nanos pro ochranu plsti před pyroforním prachem;
- MPS®: Micro Pore Size, vysoce účinná konstrukce filtračního media;
- Epi: příměs epitropických vláken;
- Epi, as ExCharge®: trvale vodivá mřížka.

2.3.3 Regenerace filtračního média

Hromaděním emisních látek na filtračním médiu vzniká takzvaný filtrační koláč, který do určité doby zvyšuje účinnost odloučení. Pak ale tlakové ztráty dosahují takové úrovně, za kterou účinnost začne zase klesat.

Ve filtrech odlučujících TZL z atmosférického vzduchu se filtrační látka zpravidla nečistí v průběhu provozu a vyměňuje se celá po nějaké době.

V průmyslových filtrech, kde je koncentrace TZL řádově větší, je třeba ty nalepené částice pravidelně odstraňovat, což se nazývá regenerace filtračního média. Regeneraci můžeme rozdělit dle způsobu na čištění mechanickým oklepáním a protiproudem stlačeného vzduchu.

Mechanické oklepaní se provádí buď ručně nebo automaticky pomocí vibračního motoru. Hlavním omezením tohoto způsobu je to, že regenerace je možná pouze mimo provoz.

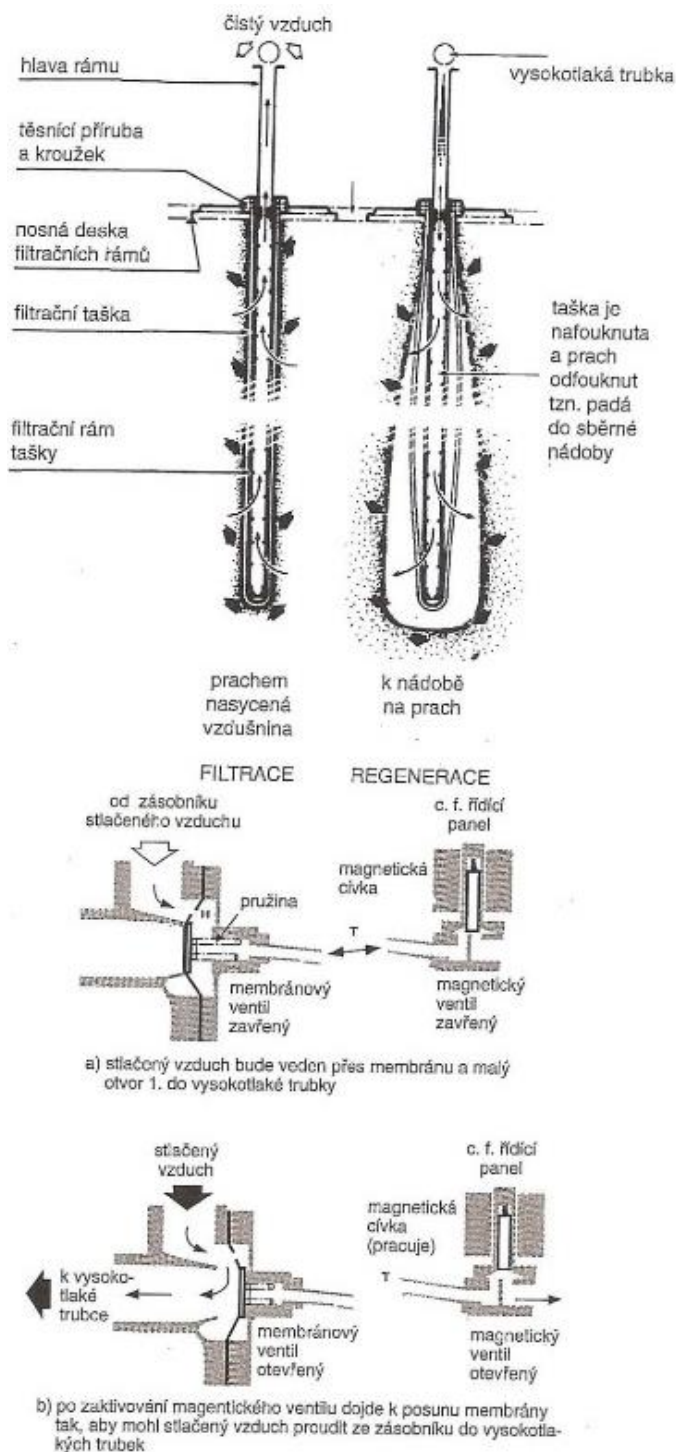
Při regeneraci protiproudem (obr 2.14) se každá taška profukuje stlačeným atmosférickým vzduchem s předem nastavenou periodou. Tato regenerace je účinnější a může být provedena buď off-line nebo online, tzn. v průběhu provozu.

V případě odlučování velmi jemných částic, například toneru z tiskárny, které se mohou nalepit zpátky na filtrační látku po jejím ofukování, lze udělat ve filtru několik komor, tašky se v každé čistí za její odstavení na krátkou dobu, když ostatní jsou v provozu. Tak se postupně regeneruje celá filtrační plocha.

Správnou regeneraci dostaneme životností média minimálně 20 000 provozních hodin bez nutnosti manuálního čištění nebo výměny látky.

2.3.4 Zatížení filtrační plochy

Důležité je při návrhu zařízení **měrné zatížení filtrační textilie (ZFP)**, které představuje doporučenou hodnotu měrného průtoku plynu v ustáleném provozním



Obrázek 2.14 Systém regenerace protiproudem [5]

stavu, v podstatě vyjadřuje filtrační rychlost. Tato hodnota se pohybuje v závislosti na materiálu mezi 40 až 120 [m/min] [7].

Samo o sobě měrné zatížení nic neříká o konstrukci filtru a nemůže sloužit jako srovnávací hodnota vedoucí k posouzení dobré funkce filtračního zařízení. Je nutno provést korelaci ve smyslu následujících součinitelů K_1 až K_6 [5].

$$ZFP_{skut} = ZFP_0 * K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * K_5 * K_6 \quad [5] \quad (7)$$

- ZFP_{skut} [m/min] – skutečné zatížení filtrační plochy;
- ZFP_0 [m/min] – výpočtové zatížení filtrační plochy;
- K_1 – účinnost předodlučovací komory, vliv předřazeného cyklónu atp.;
- K_2 – poměr rychlosti ve vzhledu k usazení prachových podílů;
- K_3 – vliv souběhu strojů a druhu regulace výkonů;
- K_4 – způsob regenerace;
- K_5 – tvar filtračního elementu;
- K_6 – poměr rozměru filtračního elementu, spadová výška prachu atp.

$$ZFP_0 = \frac{\dot{Q}}{S} \quad [5] \quad (8)$$

- $Q \left[\frac{m^3}{min} \right]$ – výkon;
- $S [m^2]$ – filtrační plocha

2.3.5. Volba filtračního zařízení

Při výběru vhodného filtračního zařízení pro daný účel je třeba se počítat s následujícími faktory [5]:

1. **Plnění daného technického úkolu.** Základními parametry jsou odsávací výkon $Q \left[\frac{m^3}{min} \right]$ při tlaku ventilátoru p [Pa] a příkonu/výkonu motoru P [kW]
2. **Plnění legislativou daných parametrů.** Zahrnuje správné řešení výduchu včetně umístění měřicích přírub a přístupu k nim, pochůzkové a obslužné plochy
3. **Konstrukční části filtrů:** výška spadu prachu, způsob regenerace, tvar filtračního elementu apod.
4. **Provozní jistota,** zvláště u větších celků.
5. **Náklady na provoz** se v zásadě soustředí na součet elektrické energie, spotřeby na stlačení vzduchu apod.
6. **Náklady na údržbu:** životnost celků, dostupnost pro údržbu, řádné a prokazatelné vedení deníku údržby a jeho dostupnost.
7. **Vhodnost dodavatele.** Opomíjená je volba dodavatele, který má aspoň částečnou vlastní výrobu, má vlastní montážní a servisní personál, má základní jmění, které v případě problému může garantovat finanční krytí.

2.4. ELEKTROSTATICKÉ ODLUČOVAČE

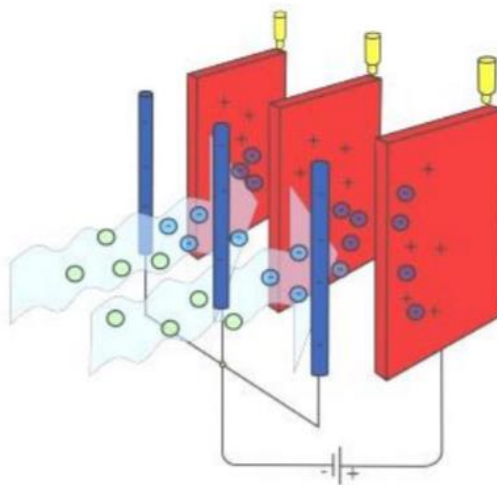
Elektrické odlučovače fungují za využití přitažlivosti mezi opačně nabitými částicemi.

Základní komponenty jsou (viz obr. 2.15):

- nabíjecí elektroda o malé ploše
- srážecí elektroda o velké ploše

Soustava nabíjecích elektrod tvoří elektrické pole. Plyn procházející tímto polem je ionizován, částice se nabijí a odlučují se na následujících srážecích elektrodách majících opačný náboj.

Výhodou je vysoká odlučivost, až 99,9 %, a nízké tlakové ztráty. Nevýhodou ale je složitost tohoto zařízení, proto elektrofiltry jsou vhodné hlavně na velké průtoky a těžké pracovní podmínky, díky čemu se úspěšně používají v energetice.



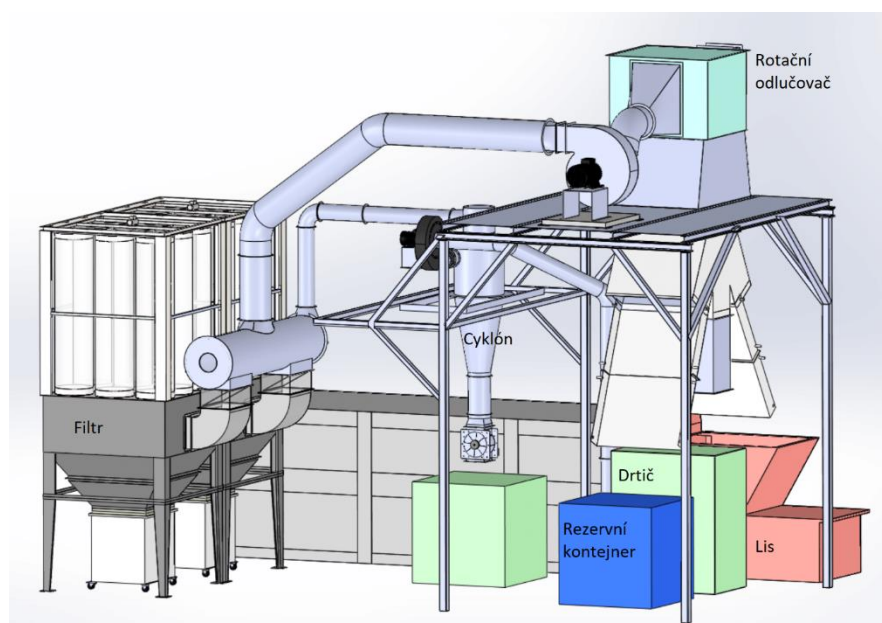
Obrázek 2.15 Horizontální elektrostatický odlučovač [9]

Dle uspořádání elektrod lze elektrické filtry rozdělit na trubkové a komorové.

2.5. SPOJENÍ NĚKOLIKA TYPŮ ZAŘÍZENÍ

Pro optimalizaci procesu a dosažení požadované koncentrace TZL v odpadním plynu je často používané vícestupňové odprašování, resp. kombinace několika typu zařízení s ohledem na jejich vlastnosti a výhody.

Jako příklad lze uvést spojování **rotačního odlučovače, cyklónu a látkového filtru** ve výrobě automobilových koberců (obr. 2.16).



Vláknitý prach je podáván do rotačního odlučovače, který odlučuje největší částice. Vzduch je potom převeden do látkového hadicového filtru, kde jsou odloučené jemnější částice. Odprášený vzduch pak splňuje všechny požadavky a může být přiveden zpátky do výrobní haly nebo odveden ven.

Pro odloučený prach z rotačního odlučovače

Obrázek 2.16 Rotační odlučovač, cyklón a látkový filtr [5]

jsou dvě možnosti: drcení a lisování, které můžou být kdykoliv přepnuté pracovníkem. Pokud je drtič nebo lis přeplněn, prach bude automaticky spadat do rezervního kontejneru.

Na drtič je navazován cyklón jako předodlučovač a látkový hadicový filtr.

3. NÁVRH FILTRAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

V této kapitole bude proveden návrh zařízení pro odstranění TZL ze spalín dle uvedené níže požadavky. Při návrhu jsem se řídila podklady a konzultaci ve firmě Cipres Filtr Brno s.r.o. a jejími výrobními možnostmi. Všechny objemové jednotky v této kapitole jsou uvedené v metrech normálních.

Odsávání spalín od třech kotlů na biomasu (dřevěné pelety).

- Dva kotle na 1000 kW,
množství spalín 2700 m³/h po každém kotlu.
- Jeden kotel na 500 kW,
množství spalín 1350 m³/h.

Maximální teplota spalín je 210 °C, hmotnostní koncentrace TZL na výstupu z kotlů je 800 mg/m³.

Hustota popílku 1500 kg/m³. Musí být splněn emisní limit na zbytkový úlet TZL v maximální koncentraci 50 mg/m³ dle vyhlášky č. 415/2012 Sb.

Základní elementy systému budou (viz schéma v příloze 1):

- 1. stupeň filtrace – 3 cyklónů, jeden na výstupu z každého kotlu,
- 2. stupeň filtrace – látkový filtr,
- ventilátor umístěný na čisté straně systému pro odtah spalín.

3.1. CYKLÓNY

Cyklóny se standardně používají jako první odlučovací stupeň při odsávání kotlů na tuhá paliva pro primární odloučení největších částic a jisker, což snižuje nebezpečí vyhoření látkového filtru, abrazi a zatěžování filtrační látky.

Dané zařízení se vybírá z modelové řady výrobku firmy, přičemž všechny typy mají stejné poměry (viz obr. 18 a tab. 7) a hlavní charakteristika při výběru je potřebný průtok.

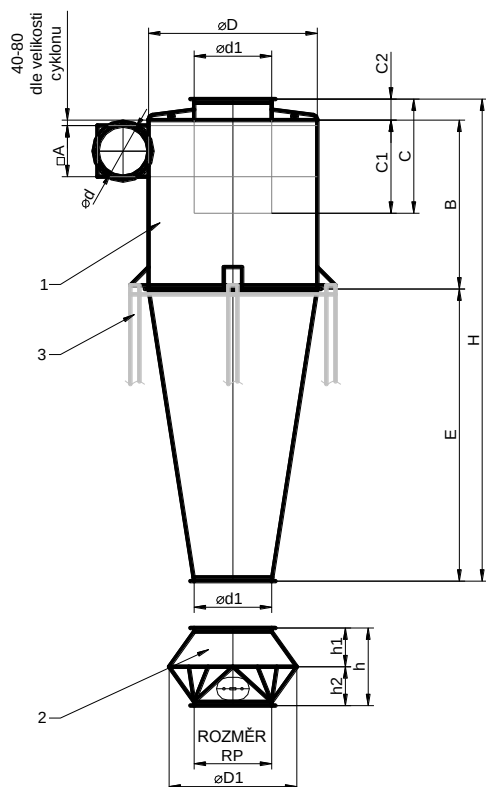
Průtok na výstupech z kotlů 1. a 2. je 2 700 m³/h. Tím pádem nejvhodnější modely cyklónů pro ni jsou:

- buď CF4, $Q_{\text{doporučený}} = 2\,400 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{max}} = 2\,760 \text{ m}^3/\text{h}$,
- nebo CF5, $Q_{\text{doporučený}} = 3\,600 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{max}} = 4\,140 \text{ m}^3/\text{h}$.

Na základě konzultace byly zvoleny cyklóny **CF4** (viz příloha 2 pro detailnější technickou informaci a výkres). CF5 kvůli větším rozměrům by měl horší odlučivost.

Průtok na výstupu z kotlů 3. je 1 350 m³/h. Nejvhodnější modely jsou:

- buď CF2, $Q_{\text{doporučený}} = 1\,200 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{max}} = 1\,380 \text{ m}^3/\text{h}$,
- nebo CF3, $Q_{\text{doporučený}} = 1\,800 \text{ m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{max}} = 2\,070 \text{ m}^3/\text{h}$.



Obrázek 3.1 Cyklón a ex. nádoba [5].

1 – cyklón,
2 – expanzní nádoba,
3 – podpory, nejsou v ceně.

Ze stejných důvodů je zase zvolen menší model – CF2 (viz příloha 3).

Součástí cyklónů je odpovídající typu cyklonu expanzní nádoba nacházející na výsypu materiálu. Expanzní nádoba má za úkol uklidnit rotující materiál před vstupem do navazujícího rotačního podavače, který celou sestavu tlakově uzavírá [5].

Jednotlivé rozměry části zvolených cyklónů a rotačních nádob jsou uvedené v tabulce 7.

Pod expanzní nádobou je umístěn rotační podavač, který odděluje podtlakovou zónu uvnitř cyklonu od okolí a nedovolí vyfukování či přisávání vzduchu přes výpad materiálu a tím přispívá k vyváženosti celého vzduchotechnického systému [5]. Přes rotační podavače se vysypá odloučený prach do kontejnerů.

Cyklón											Expanzní nádoba		
TYP	ROZMĚRY (mm)										ROZMĚRY (mm)		
	$\varnothing d$	$\varnothing d_1$	$\varnothing D$	A	C_1	C_2	C	$B = \varnothing D$	E	H	h_1	h_2	h
CF2	150	200	470	140	250	120	370	470	840	1 430	0	300	300
CF4	200	280	630	200	350	170	520	630	1 100	1 900	0	200	200

Tabulka 3.1 Rozměry vybraných typů cyklónů a expanzních nádob [5]

3.2. LÁTKOVÝ FILTR

Pro garantované splnění emisních limitů na zbytkový úlet TZL a zachycení jemných částic je nutno použít 2. stupeň filtrace – látkový filtr. Filtr se bude skládat na míru dle potřeby klienta ze standardizovaných elementů.

Konstrukce (příloha 4). Filtr se bude skládat z horizontálně umístěných plochých tašek. Každá taška má velikost 1 700 x 500 mm. Firma nabízí také tašky o délce 1 500 a 2 000 mm, ale první varianta by zbytečně zvětšila velikost filtru a druhá je náročnější na regeneraci.

Vstupní potrubí je nahoře, přičemž mezi vstupujícím proudem a filtračními taškami je umístěn děrovaný plech, který částečně odloučí prach a zmenší opotřebení filtračního media.

Systém regenerace. Vzhledem k typu prachu a nepřetržitosti provozu byla zvolena regenerace filtrační látky protiproudem stlačeného vzduchu (0,6 – 0,7 MPa). Běžně se bude regenerace provádět on-line, časově řízeně off-line.

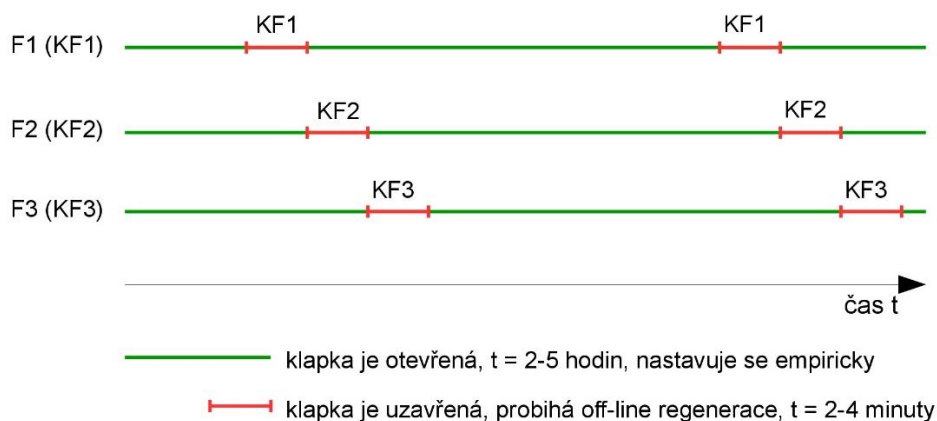
Každá sekce má svou řídicí jednotku, která umožňuje nastavení časových intervalů regenerace. Časy budou nastaveny během odlaďování systému a to empiricky.

Systém regenerace off-line se volí z důvodu:

- lepšího účinku regenerace při odstávce proudění spalín ve zvolené komoře uzavřením klapky na výstupu z filtrační komory a automatickým přepnutím regulárního cyklu na zrychlený chod (kratší pauzy),
- úspory tlakového vzduchu.

V praxi to vypadá následovně:

- v provozu jsou všechny komory filtru tzn F1, F2, F3,
- v nastaveném čase se uzavře klapka KF1, regenerace filtru F1 proběhne nastavený čas zrychleně,
- potom se klapka KF1 uzavře, komora F1 jde do provozu a uzavře se klapka KF2, proběhne to stejné a tak dále až po klapku KF3 a komoru F3.



Obrázek 3.2 Systém off-line regenerace, časový průběh

Filtrační plocha. Pro určení filtrační plochy (S_m) vycházíme ze předpokladu, že její výpočtové zatížení (ZFP_o) musí být cca $1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{min}$. Tím pádem pro průtok $112,5 \text{ m}^3/\text{min}$ je plocha média $112,5 \text{ m}^2$.

Avšak díky navrženému systému regenerace jedna ze třech komor bude občas odstavena, proto je nutno zvýšit filtrační plochu o cca 50 % aby zatížení nebylo moc velké při dvou fungujících komorách. Z toho vyplývá plocha cca 169 m^2 .

Z důvodu toho, že jedna taška má plochu $1,5 \text{ m}^2$ a nutnosti umístit stejný počet tašek v každé ze třech komor celková filtrační plocha vzrostla na **180 m^2** . To znamená **120** tašek, 40 v každé komoře.

Pro optimální využití prostoru tašky v komorách budou umístěny do pěti řad, jedna nad druhou, 8 tašek v řadě. Výpočtové zatížení filtrační plochy tak vychází $0,62 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{min}$ (za odstávky jedné komory $0,93 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{min}$).

Provozní tlaková ztráta filtru je 800 - 1 500 Pa [5].

Filtrační médium. Teplota spalin na výstupu z kotlů může dosáhnout až 210 °C, proto byla vybrána oleo a hydrofobní filtrační látka obsahující aramidová vlákna se špičkovou tepelnou odolností 220 °C.

Použití tepelně odolnější látky, např. obsahující teflonová vlákna, by nebylo z důvodu vysokých investičních nákladů racionální.

Bezpečnost proti vyhoření. Aby filtrační látka nevyhořela, před vstupem do každé komory je umístěné čidlo teploty (T1, T2, T3) (viz příloha 1), přičemž když teplota spalin dosahuje 180 °C, otevírá se klapka KP, přisávající okolní vzduch z haly pro chlazení. V případě, když to nepomůže, se otevře klapka KB2 a zavrou se KB1 a KB3 – spaliny začnou proudit bypassem.

Ostatní příslušenství.

Vzhledem k vysoké teplotě spalin pro vyloučení vzniku kondenzátu byla navržena tepelná izolace těla filtru a izolace plus ohřev kónusů.

V každém ze dvou kónusů je umístěn hladinoměr pro vyloučení ucpávání prachem.

Pro měření tlakových ztrát je v dodávce U-manometr.

3.3. VENTILÁTOR

Typ ventilátoru byl vybrán z výrobního katalogu firmy. Základními charakteristikami ventilátoru, podle kterých se zařízení volí, jsou:

- dopravní výkon Q_D [m³/h]
- celkový tlak p_C [Pa]

Objemový průtok v soustavě je cca 6 750 m³/h. Celkové provozní tlakové ztráty soustavy (z_{celk}) se skládají ze ztrát v cyklónech (cca 800 – 1 200 Pa (viz přílohy 2, 3), ztráty ve filtru (cca 800 – 1 500 Pa) a dalších nepatrných dálkových a místních ztrát.

Pro daný případ byl zvolen radiální ventilátor **F36** s výkonem 12 000 m³/h a tlakem 4 000 Pa (viz příloha 5).

Velká rezerva tlaku a výkonu se bere z důvodu:

- možnosti že v praxi se budou tyto hodnoty průtoku a tlakových ztrát lišit od teoreticky uvedených,
- nutnosti každopádně dodržovat konstantní podtlak 50 Pa na výstupu z kotlů, který je požadován výrobcem kotlů pro správné spalování a odvod spalin.

Součástí dodávky je **frekvenční měnič**, kterým jsou otáčky ventilátoru řízené. Frekvenční měnič ne napojen na čidla tlaku (p_1 , p_2 , p_3 , viz příloha 1) za úkolem dodržování konstantního podtlaku. Ventilátor nebude běžet na plný výkon pořád, ale v případě nutnosti rezerva pokryje špičkový výkon.

Výkonová křivka ventilátoru je uvedena v příloze 6.

3.4 KALKULACE CENY

Na základě ceníků firmy CIPRES FILTR BRNO s.r.o. byla provedená následující kalkulace.

			Kč netto/ks (bez DPH)	Σ Kč, netto (bez DPH)
Poz. 1.1	2x	Cyklón CF4 včetně expanzní nádoby, včetně rotačního podavače	37 600,-	75 200,-
Poz. 1.2	1x	Cyklón CF2 včetně expanzní nádoby, včetně rotačního podavače	26 800,-	26 800,-
Poz. 1.3		Montáž, doprava, zkouška	54 000,-	54 000,-
				156 000,-
Poz. 2.1	1x	Tříkomorová filtrační jednotka s automatickou regenerací filtračního média vyvolanou tlak. vzduchem protiproudem. Typ jednotky CARM GH 8/3/1+5/15/2RP Filtrační plocha 180 m ² Průtok spalin až 10 000 m ³ /h Provozní tlaková ztráta 800 až 1 500 Pa 230 V / 50 Hz Spotřeba regeneračního tlak. vzduchu 20-30 m ³ /h Tlak regeneračního vzduchu 0,6 - 0,7 MPa Dodávka včetně: - vstupního potrubí - výstupního potrubí - přísávací klapky KP - třech řídících klapek KF1 až KF2 - U-Manometru - dvou rotačních podavačů RP1 50/20-8 - tepelné izolace těla filtru - tepelné izolace a vyhřívání kónusů 2x1,5 kW - nosné a pochůzkové plošiny - filtračního média s tep. odolnosti do 220 °C	1 490 000,-	1 490 000,-
Poz. 2.2		Montáž, doprava, zkouška	447 000,-	447 000,-
				1 937 000,-
Poz. 3.1	1x	Spalinový ventilátor typ CFB F36 V = max. 12 000 m ³ /h při p = 4 000 Pa P _i = 22 kW Q = 12 000 m ³ , p = 4 Pa Dodávka včetně: - rámu - silentblocku - pružných spojů - pohonu na primo - externího chlazení motoru - tepelné izolace skříně ventilátoru - čidla vibrací předního ložiska	115 000,-	115 000,-
Poz. 3.2		Montáž, doprava, zkouška	34 500,-	34 500,-
				149 500,-
Celková cena v Kč (bez DPH):				2 242 500,-

Po zkouškách funkčnosti jednotlivých elementů byl navržený systém dodán, smontován a zahájen do provozu. Následující měření emisí prokázalo schopnost systému odlučovat TZL a splňovat emisní limity.

4. ZÁVĚR

V prvních dvou kapitolách byla provedena rešerše, popisující základní pojmy, týkající se TZL, jejich vlastností, účinků na zdraví a životní prostředí. Vzhledem ke spoustě nežádoucích účinků existují emisní limity, závislé na výkonu kotle, typu použitého paliva aj.

Dále jsou popsány principy odloučení TZL a jednotlivé typy zařízení, které lze rozdělit do čtyř základních skupin:

- suché mechanické odlučovače
- mokré mechanické odlučovače
- látkové filtry
- elektrické odlučovače

Třetí kapitola se zabývala návrhem filtračního zařízení ve spolupráci se společností CIPRES FILTR BRNO s.r.o. pro konkrétní případ:

Odsávání spalín třech kotlů na biomasu (dřevěné pelety).

- Dva kotle na 1000 kW,
množství spalín 2700 m³/h po každém kotlu.
- Jeden kotel na 500 kW,
množství spalín 1350 m³/h.

Maximální teplota spalín je 210 °C, hmotnostní koncentrace TZL na výstupu z kotlů je 800 mg/m³.

Hustota popílku 1500 kg/m³. Musí být splněn emisní limit na zbytkový úlet TZL v maximální koncentraci 50 mg/m³ dle vyhlášky č. 415/2012 Sb.

Jako řešení byl navržen systém s dvoustupňovou filtrací. První stupeň odloučení je cyklon, jeden na výstupu z každého kotle. Cyklón odloučí největší částice a případné jiskry, čímž zmenší opotřebení filtrační látky. Typ cyklónu se vybíral dle jednotlivých průtoků.

Druhým stupněm filtrace je látkový filtr, který má odlučivost až 99,9 % a je nezbytný pro splnění předepsaných emisních limitů. Celková filtrační plocha je 180 m², přičemž byla použita látka s tepelnou odolností až 220 °C. Regenerace filtračního média je zajištěna protiproudem tlakového vzduchu. Očekávaná životnost média je více než 20 000 provozních hodin.

Po filtru byl umístěn ventilátor s výkonem až 12 000 m³/hod. a tlakem až 4 000 Pa. Dodávka je včetně frekvenčního měniče, který řídí otáčky rotoru, což zajistilo flexibilitu celého systému a přizpůsobivost na změny tlakových ztrát a průtoků.

Celkové investiční náklady sestavily 2 242 500 Kč včetně montáže a zkoušky.

V současné době je systém uveden do provozu a na základě měření lze posoudit, že limity byly splněny a návrh byl úspěšný.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BRETSCHNEIDER, B., KURFURST, J. Technika ochrany ovzduší. Nakladatelství technické literatury, 1978. 260 s.
- [2] ČESKÁ REPUBLIKA. Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. [online]. [cit. 05-05-2019]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [3] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. [online]. [cit. 05-05-2019]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [4] Český hydrometeorologický ústav. Souhrnný tabelární přehled. 2017. [online]. [cit. 03-05-2019]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/tab_roc/2017_enh/index_CZ.html
- [5] CIPRES FILTR BRNO s.r.o., podklady společnosti.
- [6] Emisie znečišťujících látek do ovzdušia. [online]. [cit. 03-05-2019]. 2017. Dostupné z: <https://www.enviroportal.sk/indicator/detail?id=141&print=yes>
- [7] HEMERKA, J., VYBÍRAL, P. Ochrana ovzduší. ČVUT v Praze, 2010. 148 s. ISBN 978-80-01-04646-3.
- [8] HOVORKA F.: Technologie chemických látek. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [online]. [cit. 03-05-2019] Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-588-9/pages-pdf/001.html
- [9] RICHTER, M., SÖHNEL, O. Průmyslové technologie III. Stroje a zařízení průmyslu. 2012. [online]. [cit. 03-05-2019]. Dostupné z: http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/13%20CisteníPlynu.pdf
- [10] Separation Equipments [online]. [cit. 25-11-2018]. Dostupné z: <https://nptel.ac.in/courses/103103027/pdf/mod5.pdf>
- [11] VALENTZA, O. Particular matters: a threat for human health. Scientific Chronicles. 2016; 21(3): 233-244. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/314040371_Particular_matters_a_threat_for_human_health
- [12] VATIN, N. I., STRELEC, K. I. Očistka vozdukha pri pomoshhi apparatov tipa ciklon. [online] 2003. [cit. 13-12-2018]. Dostupné z: http://engstroy.spb.ru/library/strelets_ciklon.pdf.
- [13] VEJVODA, J., MACHAČ, P., BURYAN, P. Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů. Praha, 2003. 226 s. ISBN 80-7080-517-X
- [14] Vliv ovzduší na zdraví populace Ostravy a Moravskoslezského kraje [online]. [cit. 03-05-2019]. Dostupné z: http://www.khsova.cz/docs/01_aktuality/files/tiskova_konference_20111115.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 2.1 Usazovací komora [9]
Obrázek 2.2 Žaluziový odlučovač [9]
Obrázek 2.3 Lamelový odlučovač [9]
Obrázek 2.4 Pohyb plynu v cyklónu [10]
Obrázek 2.5 Sprchová věž bez výplně [9]
Obrázek 2.6 [5]
Obrázek 2.7 Filtrační taška [5]
Obrázek 2.8 Hadicový filtr [5]
Obrázek 2.9 Porovnání taškového a hadicového filtrů [5]
Obrázek 2.10 Filtr pro slévárenský průmysl [5]
Obrázek 2.11 Filtrační zařízení pro dřevozpracující průmysl [5]
Obrázek 2.12 Patron v řezu [5]
Obrázek 2.13 Filtrační látky [5]
Obrázek 2.14 Systém regenerace protiproudem [5]
Obrázek 2.15 Horizontální elektrostatický odlučovač [9]
Obrázek 2.16 Rotační odlučovač, cyklón a látkový filtr [5]
Obrázek 3.1 Cyklón a ex. nádoba [5]
Obrázek 3.2 Systém off-line regenerace, časový průběh [5]

SEZNAM TABULEK

- Tabulka 1.1 Specifické emisní limity pro TZL stacionární energetické zdroje [4]
Tabulka 2.1 Tepelná odolnost filtračních látek [5], [7]
Tabulka 2.2 Mechanická a chemická odolnost látek [7]
Tabulka 2.3 Úpravy filtračních látek [5]
Tabulka 3.1 Rozměry vybraných typů cyklónů a expanzních nádob [5]

SEZNAM PŘÍLOH

1. Schéma zapojení filtračního zařízení
2. Cyklón CF4, technický list [5]
3. Cyklón CF2, technický list [5]
4. Výkres filtru CARM GH [5]
5. Ventilátor F36, technický list [5]
6. Ventilátor F36, výkonová křivka [5]