

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**SNÍŽENÍ PRODUKCE JEMNÝCH ČÁSTIC U MALÝCH
SPALOVACÍCH JEDNOTEK**

THERMAL STABILITY OF THE BIOMASS COMBUSTION PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Grygar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ján Poláčik

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Jan Grygar
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce:	Ing. Ján Poláčik
Akademický rok:	2019/20

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:

Snížení produkce jemných částic u malých spalovacích jednotek

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spalovací procesy v energetice jsou jedním z hlavních polutantů (znečišťujících látek) produkujících jemné částice. Proto je snaha neustále hledat řešení, jak tvorbu těchto částic výrazně snížit. Malé domácí spalovací jednotky na biomasu jsou v dnešní době nezanedbatelným producentem jemných částic. Bakalářská práce pojednává o spalovacích procesech, tvorbě znečišťujících látek a možnostech jak předcházet znečištění ovzduší spalovacími procesy.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešeršně zpracovat problematiku jemných částic vznikajících spalováním uhlíkatých látek, analýza procesu jejich tvorby a životnosti.
2. Popsat proces spalování tuhých paliv, statiku a dynamiku spalovacího procesu, dokonalé a nedokonalé spalování.
3. Navrhnout řešení, snižující produkci jemných částic pro domácí biomasové spalovací jednotky.

Seznam doporučené literatury:

HINDS, William C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. 2nd ed. New York: Wiley, c1999. ISBN 978-0-471-19410-1.

KURFÜRST, Jiří, ed. Kompendium ochrany kvality ovzduší. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2008. ISBN isbn978-80-86832-38-8.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřená na jemné částice, které jsou produkovány malými spalovacími jednotkami, a jejich snížení. První kapitola se věnuje problematice jemných částic, jejich vzniku, složení a dopadu na člověka a životní prostředí. Další části práce se už věnují procesu spalování tuhých paliv a palivem. Poslední kapitola se zabývá návrhem řešení pro snižování emisí malých biomasových spalovacích jednotek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Jemné částice, spalování, odlučovač

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on fine particles, which are produced by small combustion units, and their reduction. The first chapter deals with the issue of fine particles, their creation, composition and their impact on man and the environment. The last chapter deals with the design of solution for reducing of emissions of small biomass combustion units.

KEY WORDS

Fine particles, combustion, separator

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

GRYGAR, Jan. *Snížení produkce jemných částic u malých spalovacích jednotek* [online]. Brno, 2020. Dostupné z:<https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125000>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ján Poláčik.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Snížení produkce jemných částic u malých spalovacích jednotek“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Jánů Poláčikovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. A také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu a hlavně trpělivost při mém studiu.

Obsah

Úvod	15
1 Tuhé znečišťující látky	16
1.1 Rozdělení	16
1.2 Zdroje	17
1.3 Princip vzniku částic spalováním	18
1.4 Složení	19
2 Vliv na zdraví člověka a životní prostředí	20
2.1 Člověk	20
2.2 Životní prostředí	21
3 Palivo	22
3.1 Paliva tuhá	22
3.1.1 Uhlí	22
3.1.2 Biomasa	24
3.2 Paliva kapalná	25
3.3 Paliva plynná	26
4 Proces spalování	28
4.1 Statika spalování	29
4.1.1 Dokonalé spalování tuhých a kapalných paliv	29
4.1.2 Nedokonalé spalování	31
4.2 Dynamika spalování	32
5 Výběr vhodného zařízení na snížení produkce jemných částic pro domácnost	34
5.1 Elektrické odlučovače	34
5.2 Suché mechanické odlučovače	35
5.3 Mokrý mechanické odlučovače	36
5.4 Filtry	37
Závěr	40
Seznam použité literatury	41
Seznam příloh	48

Úvod

Biomasa se v domácnostech hlavně využívá k výrobě tepla nebo k ohřevu teplé užitkové vody. V ČR podle průzkumu Energo z roku 2015 Českým statistickým úřadem, 25% domácností využívá tuhé obnovitelné zdroje jako palivo do svých spalovacích zařízení. K těmto zdrojům energie patří biomasa ve formě palivového dřeva, dřevěných pelet nebo briket.

V roce 2013 bylo ještě vytápění a ohřev TUV pomocí dřeva nebo pelet ekonomicky výhodné a lákavé. Protože dřevo a štepka, které měly náklady na rok v rozmezí 16,2 - 17,8 tis. Kč v domě s roční spotřebou 65 GJ, se oproti zemnímu plynu (38,2 tis. Kč/rok) vyplatily dvojnásobně. [1] V dnešní době jsou roční výdaje za zemní plyn a dřevní pelety skoro identické. Ostatní způsoby vytápění jako je elektřina nebo lehký topný olej se ekonomicky moc nevyplatí, protože jejich náklady jsou stále dvakrát dražší. [2]

Ale jelikož cenově biomasa už moc neláká, spousta lidí si už spalovací jednotku na biomasu pořídila. I když v nejbližších letech nemůžeme očekávat obrovský nárůst zájmu kvůli poklesu cen ostatních složek, je to furt třetí nejčastější způsob vytápění v České Republice. S tím také přichází problém znečištění ovzduší, které se už do povědomí lidí pomalu dostává. Průmyslový sektor je už značně ovlivněný právními předpisy, a proto hlavními znečišťovateli jsou lokální topeniště a doprava. V obou případech se už vymýšlejí způsoby na snižování emisí, ať už jsou to filtry pevných částic u aut nebo třeba program kotlíková dotace, která zařizuje výměnu starých neekologických kotlů na pevná paliva.

Tato práce se zaměřuje na popis problematiky spalování, produkci jemných částic do okolí, a snaží se navrhnout řešení pro snížení produkce jemných částic hlavně pro domácí spalovací zařízení na biomasu.

1 Tuhé znečišťující látky

Jedním z hlavních ukazatelů kvality ovzduší je počet tuhých znečišťujících látek obsažených ve vzduchu. Tyto prachové částice, které jsou označovány zkratkou PM z ang. slova "Particulate Matter", jsou velice snadno vdechnutelné a jejich složení může být různé. [3] [4]

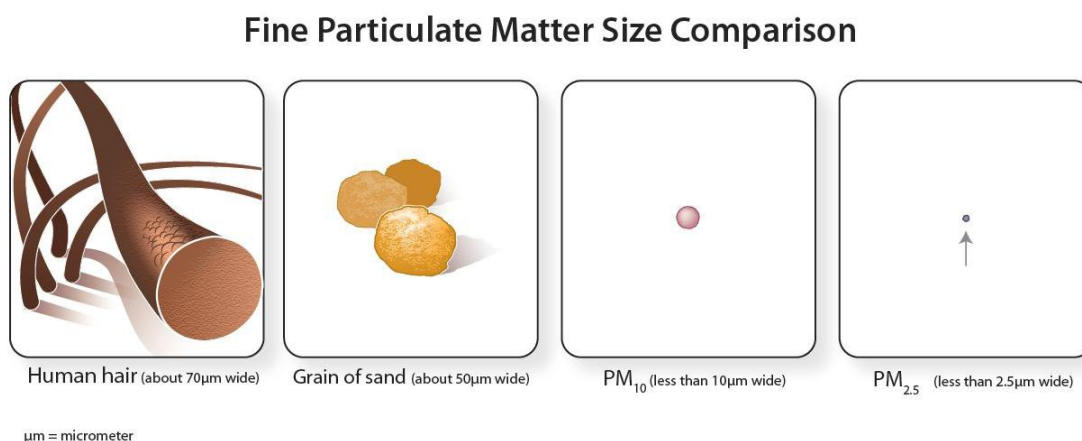
1.1 Rozdělení

Rozděluje se podle jejich aerodynamického průměru. V realitě se jejich tvar nemusí ani zdaleka přibližovat kouli, tak se pod pojmem aerodynamický průměr rozumí průměr kapičky vody o stejné hmotnosti. Dělí se podle velikosti (většinou udávané v μm) s označením PM_x , můžeme si proto libovolně vybírat podle velikosti jaké částice budeme sledovat, ale s ohledem na četnost měření jsou tyto nejčastěji měřeny:

PM_{10} (Hrubé) - jejich velikost se pohybuje do $10 \mu\text{m}$

$\text{PM}_{2,5}$ (Jemné) - jejich velikost se pohybuje do $2,5 \mu\text{m}$

PM_1 - jejich velikost se pohybuje do $1 \mu\text{m}$ [3]



Obr. 1.1: Porovnání velikosti částic (Human hair - lidský vlas, Grain of sand - zrnko písku, Fine particulate matter size comparison - velikostní porovnání jemných částic)[5]

1.2 Zdroje

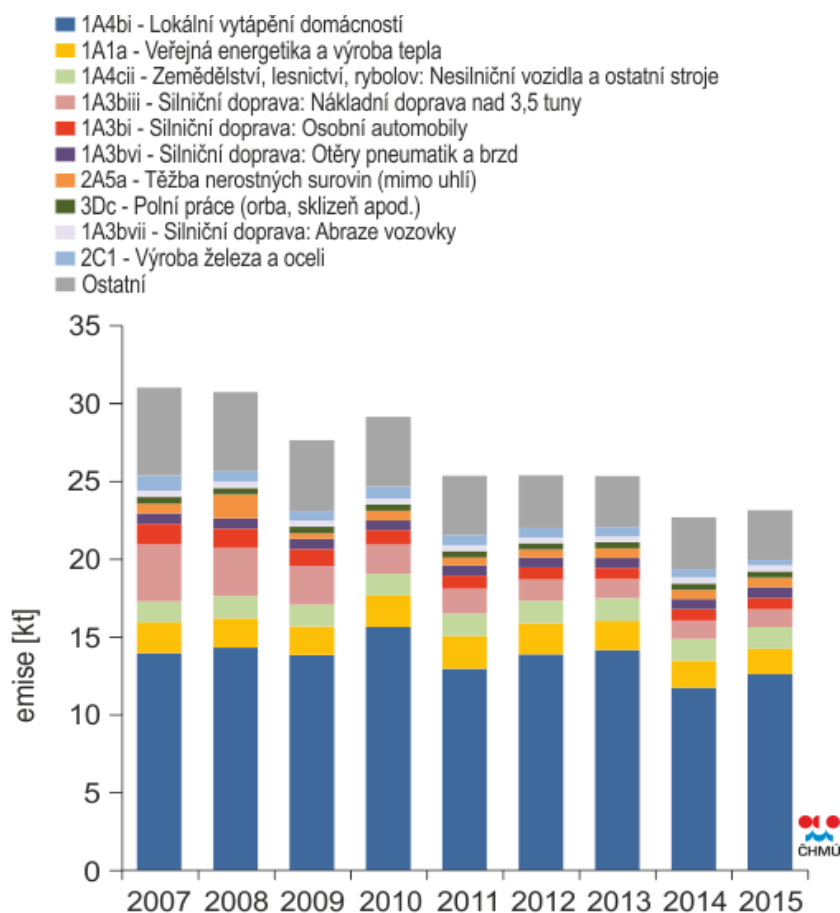
Polétavý prach vzniká samovolně v přírodě, ale lidskou (antropogenní) činností tuto koncentraci navyšujeme. Hlavními přírodními zdroji jsou lesní požáry, které jsou čím dál častější, sopečné výbuchy, větrná eroze, nebo také sůl z moře, která se větrem dostává do atmosféry.

Lidé jsou jedním z hlavních zdrojů znečištění. Řadíme mezi ně vypalování lesů za účelem zvětšení zemědělské plochy. Ale jedním z nejzávažnějších způsobů, kterým produkujeme částice je spalování uhlí, dřeva, biomasy, ropy atd., jak v lokálních topeništích, tak také v energetice (teplárny, elektrárny), průmyslu a dopravě.

S tímto problémem souvisí dva pojmy: emise a imise.

Emise jsou látky emitované do okolního prostředí z komínů elektráren, továren nebo výfuků automobilů. Tedy emisní limit udává, jak velké množství znečišťující látky lze daný zdroj vypustit. Udává se v jednotkách kg/den nebo t/rok.

Imise jsou nežádoucí látky obsažené v ovzduší. Tedy imisní limit stanovuje nejvyšší přípustnou hodnotu znečištění ovzduší. Udává se v jednotkách $\mu\text{g}/\text{m}^3$. [3] [6] [7]

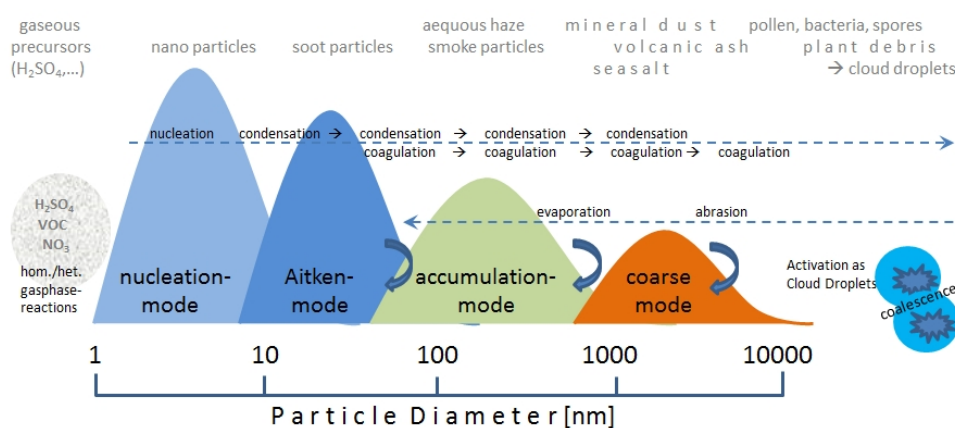


Obr. IV.1.20 Vývoj celkových emisí $\text{PM}_{2.5}$, 2007–2015

Obr. 1.2: Vývoj celkových emisí $\text{PM}_{2.5}$ [8]

1.3 Princip vzniku částic spalováním

Tvorba jemných částic je spojována se spalováním obecně a jedním z faktorů tvorby částic je palivo, které je do procesu dodáváno a také spalovací zařízení, ve kterém se spalování provádí. Při spalování je hlavní optimalizovat proces a zavádí se tzv. pravidlo „3T“¹. Důležité je zajistit dostatečnou dobu setrvání ve spalovací komoře, teplotu spalování, zajistit dostatečnou turbulenci a množství přiváděného kyslíku. Částice vznikají různorodě v tzv. módech. Tyto módy se nazývají překrývají ve velikostním spektru a velikost částic se neustále mění díky koagulaci, akumulaci, fragmentaci a odpařování.



Obr. 1.3: Schéma velikostní distribuce částic v jednotlivých módech (Nucleation mode - nukleační mód, Aitken mode - Aitken mód, Accumulation mode - akumulární mód, Coarse mode - coarse mód)[9]

- **Nukleační mód** - částice o velikosti do 20 nm. Vznikají nukleací z plynných látek. Je to první krok fázového přechodu, vznik stabilního zárodku nové fáze, např. při kondenzaci vznik stabilního zárodku kondenzátu.
- **Aitken mód** - částice o velikosti 20 - 100 nm. Produkovány lokálním zdrojem např. spalovací procesy při nedokonalém spalování.
- **Akumulační mód** - částice o velikosti 100 nm - 2,5 μm. Částice těchto velikostí vznikly koagulací menších částic nebo kondenzací prchavých sloučenin. Sedimentace částic se v tomto módu vyznačuje menší účinností, zatímco jiné termodynamické a mechanické procesy jako odpařování nebo sublimace mají větší dopad.
- **Coarse mód** - částice o velikosti nad 2,5 μm. Nachází se zde zvětrávané prachové částice, velké solné částice z moře a mechanicky generované antropogenní částice jako zemědělství, těžba nebo také z dopravy (tření pneumatik). Kvůli

¹turbulence - turbulence, time - čas, temperature - teplota

jejich velikosti se snadno usadí nebo dopadnou na povrch země. Jejich životnost se pohybuje od několika hodin až po dny.[10] [11] [12]

1.4 Složení

Částice aerosolu jsou odlišné jak svým složením, tak i způsobem jakým vznikají. Primární částice jsou do vzduchu vypouštěny přímo ze svého zdroje (zvětralé horniny a minerály, popel z vulkánů, částice mořské soli...). Zatímco sekundární aerosoly vznikají chemickými reakcemi v atmosféře z původních plynných látek.

Hlavním produktem spalování nejen biomasy jsou uhlíkaté aerosoly. Uhlíkové částice lze rozdělit na:

- **Elementární uhlík** (z angl. slova Elementar carbon - EC nebo je také označován jako Black carbon - BC) - vzniká hlavně nedokonalým spalováním organických látek, fosilních paliv nebo biomasy. Primární zdroje zahrnují emise z dieslových motorů, vypalování lesů nebo lesních požárů. Nedokonalé spalování produkuje oxid uhelnatý a saze, které jsou spolu se suspendovanými částicemi velkou součástí PM částic. Tyto PM částice jsou potom schopné na sebe navázat ostatní chemické látky nebo sloučeniny.

BC přispívá ve velké míře ke klimatickým změnám. Jestliže se nachází ve vzduchu, pohlcuje světlo a generuje tím teplo do okolní atmosféry. Jeho krátká životnost znamená, že pokud by se snížila produkce BC, tak tím by se také zpomalilo globální oteplování. Zatímco oxid uhelnatý jako hlavní hnací motor klimatických změn má tak dlouhou životnost, že by trvalo dekády, než by se snížila koncentrace oxidu uhelnatého v atmosféře.[13]

- **Organický uhlík** (z angl. slova Organic carbon - OC) - vzniká přímo spalováním uhlíkatých plynných látek. Jeho životnost je poměrně krátká, pohybuje se v rozmezí dnů až týdnů.

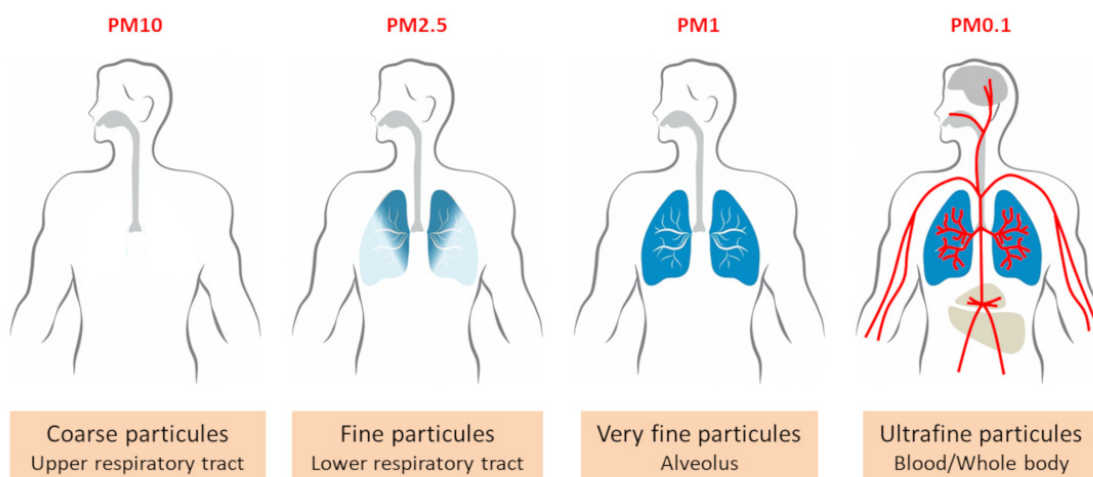
Při ned. spalování biomasy se tvoří BC i OC, kterého je podstatně více. Fosilní paliva nebo i nafta to mají naopak, takže BC je v atmosféře více než-li OC.[14] [15]

2 Vliv na zdraví člověka a životní prostředí

2.1 Člověk

Polétavý prach nemá vliv jenom na člověka, ale také na životní prostředí. V tomto případě platí čím menší máme částice, tím horší jsou důsledky. Menší částice se dostávají hlouběji do našeho dýchacího systému a zároveň se lehce přenáší na větší vzdálenosti, zatímco větší polétavý prach, např. PM_{10} , se rychleji usazuje na zemský povrch a zachycuje se už v horních cestách dýchacích.

Závažnost zdravotních komplikací vždy záleží na tom, jak dlouho jsme byli znečištění vystavování a jak velké částice se dostali do našeho dýchacího systému, protože na tom závisí, kde je schopno naše dýchací ústrojí tuto částici zachytit.



Obr. 2.1: Velikost částic a jejich vliv na zdraví (Coarse particles - hrubé částice, Upper respiratory tract - horní cesty dýchací, Fine partucules - jemné částice, Lower respiratory tract - dolní cesty dýchací, Very fine particles - Velmi jemné částice, Alveolus - plicní sklípky, Ultrafine particles - Ultrajemné částice, Blood/whole body - krev/celé tělo)[16]

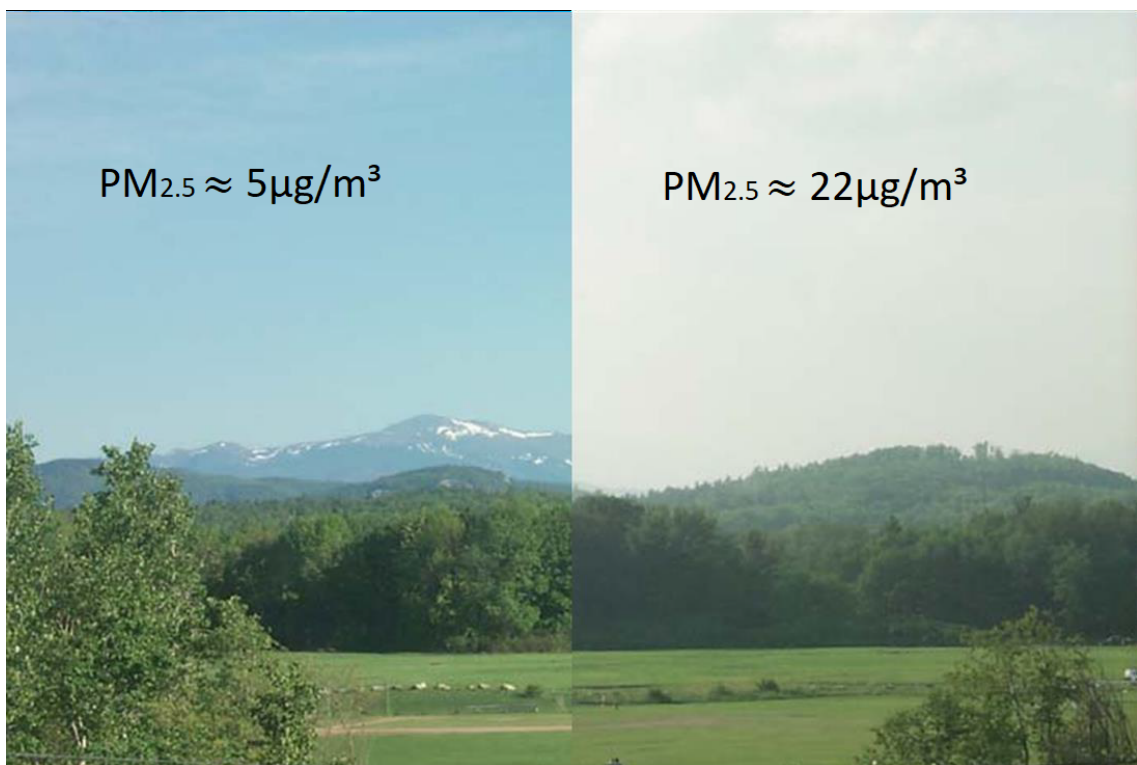
Z Obr. 4.1 můžeme vidět, že PM_{10} jsme už schopni zachytit v nosní dutině nebo v horních cestách dýchacích. Vliv na zdraví je tedy minimální, mohou způsobit např. lehké kašlání. Částice $PM_{2,5}$ a menší se už dostanou do dolních cest dýchacích, plicních sklípků a konkrétněji $PM_{0,1}$ se už dostanou přes alveoli do krevního oběhu. V případě, že má na sobě navázanou jedovatou sloučeninu/těžké kovy, může dojít k otravě krve.

Při krátkodobém pobytu na znečištěném ovzduší dochází pouze k podráždění, v horším případě k astmatu, nebo zánětu horních cest dýchacích. Naopak při delším

vystavování se znečištění vznikají závažnější, ne-li smrtelné onemocnění jako např. rakovina plic.[6][16]

2.2 Životní prostředí

Jedním z nejběžnějších problémů, které jsou způsobeny produkováním TZL, je viditelnost, se kterou se někteří potkávají dennodenně. Ve městech se setkáváme s tzv. smogem, ale díky své velikosti a hmotnosti se menší částice mohou díky větru přesouvat na větší vzdálenosti, a tedy špatná viditelnost se může vyskytnout i tam, kde se nenachází žádný výrazný producent znečištění.



Obr. 2.2: Porovnání viditelnosti[17]

Částice mohou znemožňovat kytkám fotosyntézu: díky vrstvě prachu nepohltí tolik slunečního záření a snižuje se jejich schopnost "dýchat".

Dle chemického složení se mohou rovněž podílet na:

- kyselých deštích
- znečištění jezer, potoků a řek
- vyčerpávání živin v půdě
- rozmanitosti v ekosystému [18]

3 Palivo

Palivo je důležitou součástí spalování, při kterém se transformuje chemická energie v palivu na tepelnou energii. V souvislosti s palivem se zavádí pojmy jako výhřevnost a spalné teplo.

Výhřevnost Q_i^r [kJ/kg] je množství tepla uvolněné dokonalým spálením 1kg paliva při ochlazení spalin na teplotu 20 °C a vzniklá pára nekondenzuje, je ve formě páry.

Spalné teplo Q_s^r [kJ/kg] je množství tepla uvolněné dokonalým spálením 1kg paliva při ochlazení spalin na teplotu 20 °C a při této teplotě pára kondenzuje.[19]

3.1 Paliva tuhá

Jako nejvíce používaným tuhým palivem je uhlí, potom se dále využívá biomasa, zemědělské, průmyslové a komunální odpady. Základními požadavky paliva jsou:

- **Vysoká výhřevnost**
- **Jednoduchá spalitelnost**
- **Při hoření bezdýmá**
- **Spalování beze zbytku**[20]

Hrubým rozborem se stanovuje poměrný obsah vody W^r a popelovin A^r a platí rovnice:

$$h + A + W = 100\% \tag{3.1}$$

Zároveň se určí výhřevnost paliva a rovněž prchavá hořlavina. Dále potřebujeme vědět jeho elementární obsah, to znamená určení poměrného obsahu jednotlivých chemických prvků, ze kterých se skládá hořlavina (C, H, S, N, Cl, F) [21]

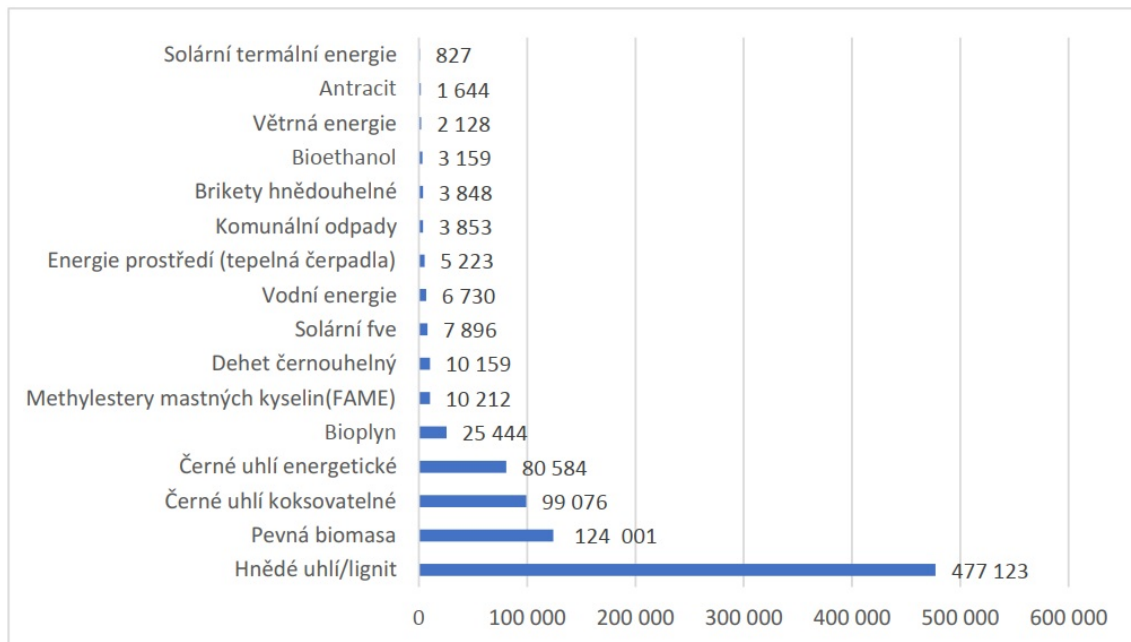
	← Surové uhlí →		
přimísená voda	voda W^r	popeloviny A^r	hořlavina h
	přítěž (balast)		prchavý podíl tuhý podíl
	bezvodé uhlí (sušina)		
spálením vznikne:			
vodní pára	tuhé zbytky – škvára (struska), popílek	spaliny	

Obr. 3.1: Složení tuhých paliv[22]

3.1.1 Uhlí

Podle stáří dělíme uhlí na antracit, černé uhlí, hnědé uhlí, lignit a rašelinu (seřazeno sestupně). Čím starší uhlí máme, tím je kvalitnější, má větší výhřevnost a spalné

teplo. Dále pak mají větší podíl uhlíku a obsah kyslíku a vodíku je menší než u mladšího typu, to znamená, že např. lignit se lépe zapaluje a hoří delším plamenem za menších spalovacích teplot než černé uhlí.[21]



Obr. 3.2: Primární energetické zdroje z r. 2017 (množství energie (v palivu) přímo využitě v České republice k výrobě elektřiny nebo tepla k prodeji)[23]

Z obr. 3.2 jde vidět, že spalování uhlí je stále hlavním zdrojem nejenom v energetickém sektoru, ale rovněž se uhelná paliva využívají k výrobě elektřiny, vytápění a k odlišným technologickým procesům v různých odvětvích. S 477 123 GJ je hnědé uhlí daleko před biomasou, která s 124 001 GJ zaujímá druhé místo. Samotné hnědé uhlí převyšuje všechny OZE dohromady.

Koksování je jedna z metod, která je často využívána na přeměnu nízkopopelového a nízkosírného černého uhlí. V peci při teplotě 1000 °C jsou odstraněny prchavé složky a vzniká čpavek, dehet, svítiplyn a lehké oleje. Jeho výhodami jsou vysoká výhřevnost, která se pohybuje kolem 30 MJ/kg, a dále má vysoký podíl uhlíku, málo nečistot.[24]

V tab. 3.1 lze vyčíst prvkový rozbor jednotlivých typů uhelných paliv. Nejvyšší antracit má velký podíl pevného uhlíku, a z toho vyplývá, že má také nejvyšší výhřevnost. Kvalitu můžeme vždy zkontrolovat obsahem síry, popela a vody. Platí, že čím nižší je obsah těchto substancí, tím je uhlí kvalitnější. Síra často způsobuje korozi kotle, palivo se spékává na rošti a v neposlední řadě znečišťuje okolí. Vodu samozřejmě v palivu nechceme, protože zhoršuje účinnost při spalování. Popelovina snižuje účinnost při procesu získávání tepla a znečišťuje kotel, což pro nás znamená častější údržbu.

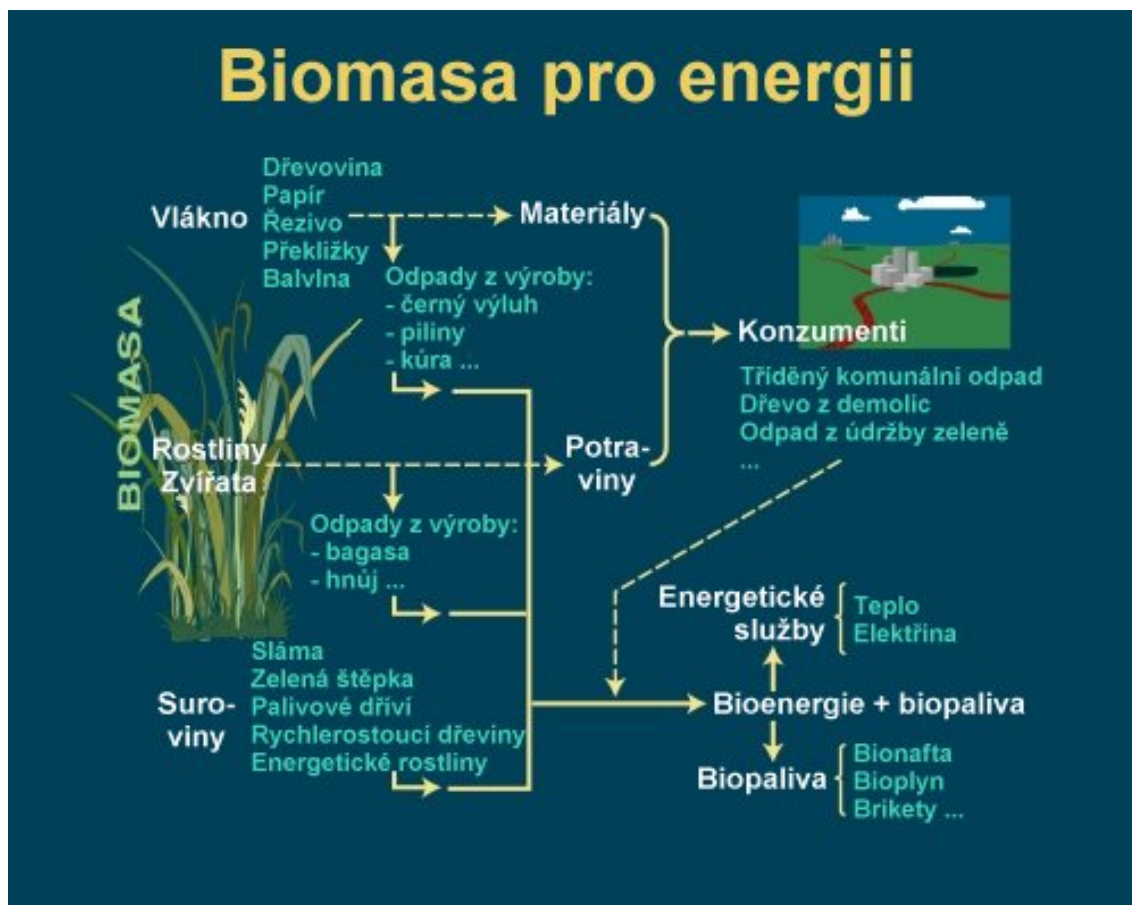
Tab. 3.1: Hrubý a prvkový rozbor různých druhů tuhých paliv[21]

	antracit	černé uhlí	hnědé uhlí	lignit	dřev. piliny
vlhkost (%)	7,7	5,2	23,4	33,3	16,5
prchavá hořlavina (%)	6,4	40,2	40,8	43,6	78,6
pevný uhlík (%)	83,1	50,7	54	45,3	-
popelovina (%)	10,5	9,1	5,2	11,1	1,5
C^r (%)	83,7	74	72	63,3	51,2
H^r (%)	1,9	5,1	5	4,5	6,3
N^r (%)	0,9	1,6	0,9	1	1,9
S^r (%)	0,7	2,3	0,4	1,1	-
A^r (%)	10,5	9,1	5,2	11,1	1,5
O^r (%)	2,3	7,9	16,4	19	33
spalné teplo (MJ/kg)	34,7	29,2	21,4	16,5	9,9
tep. měknutí popele - t_a ($^{\circ}C$)	-	1215	1149	1110	-

3.1.2 Biomasa

Mezi biomasu patří veškerá hmota organického původu. Označuje se jako obnovitelný zdroj energie. Lze ji podle původu rozdělit na živočišnou a rostlinnou, pro energetiku je hlavně důležitá ta která je energeticky využitelná a tou je většinou biomasa rostlinná. Rostliny mají totiž schopnost využít sluneční energii k fotosyntéze. Jednoduše řečeno dochází k akumulaci slunečního záření, která se vyznačuje velmi nízkou účinností.

Třídít je můžeme do dvou kategorií, a to **záměrně pěstovanou biomasu** - z velké části to jsou rychle rostoucí dřeviny nebo rostliny bylinného charakteru jako topol, vrba, olše, šťovík atd. Jejich hlavní výhodou je jednoduchý výsev a krátké vegetační období. Druhou skupinou je **odpadní biomasa** - a jsou to hlavně odpady z rostlinné, živočišné výroby, lesní odpady, a v neposlední řadě i biologicky rozložitelný komunální odpad.



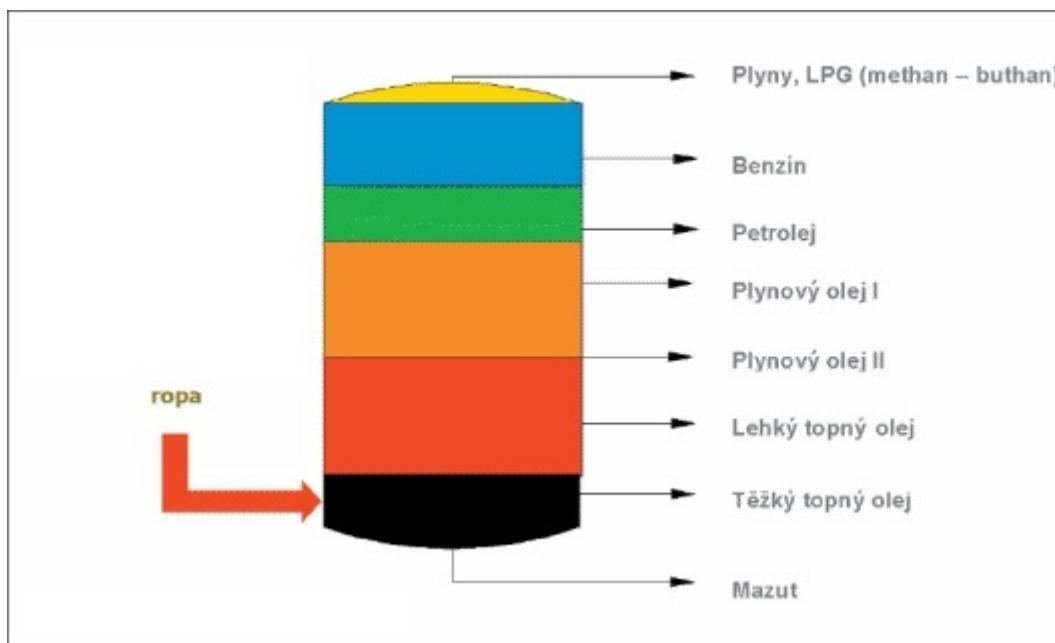
Obr. 3.3: Využití biomasy[25]

Spalováním biomasy, kdy se organický materiál rozkládá na hořlavé plyny a další látky, dochází k oxidaci za přítomnosti vzduchu. Do vzduchu se následovně uvolňuje oxid uhličitý, voda a teplo, které závisí na zvoleném typu biomasy a jeho výhřevnosti. Bilance oxidu uhličitého je oproti fosilním palivům nulová, protože množství, které se uvolní do ovzduší, je stejné jako množství, které pohltí rostliny pomocí fotosyntézy.[26]

3.2 Paliva kapalná

Ropa jako základní surovina kapalných paliv je sloučenina uhlovodíku, která vzniká buďto organicky, nebo anorganicky. Většina uhlovodíků v ropných nalezištích je organického původu a tedy vznikla rozkladem z živočišných nebo rostlinných zbytků. Díky vlivu teploty a tlaku se časem přemění na kerogen dále pak na živice, až se postupně přetvoří v ropu.

Destilací ropy lze získat paliva, které lze vidět na obr. 3.4



Obr. 3.4: Atmosférická destilace ropy[27]

Stejně jako u tuhých paliv je rovnice hrubého roboru paliv

$$h + W + A = 100\%^1 \quad (3.2)$$

Ale zatímco hořlavina je hlavní součástí paliva, tak zastoupení popeloviny a vody je minimální, obojí do 1 %. Vodu v oleji nechceme, jelikož při ohřátí nad teplotu 100 °C se voda odpařuje, olej přitom pění a může přetéct z nádrže, anebo dojde ke zvýšení tlaku v nádrži.[21]

Kapalná paliva dosahují obvykle vyšších výhřevností než tuhá paliva. Odpadá ztráta citelným teplem (v tuhých zbytcích), lze spalovat s nižšími přebytky vzduchu (tedy nižší komínová ztráta). Nepříznivé z hlediska komínové ztráty jsou vyšší teploty spalin, což je ochrana proti kondenzaci kyselých složek spalin. [28]

3.3 Paliva plynná

Do plynných paliv řadíme plyny, které obsahují hořlavé složky jako CO, H₂, plynné uhlovodíky atd. Vlastnosti plynu vždycky vztahujeme k teplotě 0 °C a tlaku 101,35 kPa. Tento fakt je dán tím, že objem plynu není konstantní a vždycky závisí na těchto dvou veličinách.

Novým trendem je používání plynu pro pohon automobilů, a to hlavně z těchto dvou

¹h - hořlavina, W - voda, A - popelovina

důvodů. Za prvé úspora ropných paliv. Za druhé protože jejich spaliny v některých případech obsahují menší množství škodlivých látek.[29]

Plynná paliva lze je rozdělit podle jejich výhřevnosti do skupin málo výhřevné (Q_i^r do $8,35 \text{ MJ/m}^3$), středně výhřevné (Q_i^r $8,35 - 12,5 \text{ MJ/m}^3$), velmi výhřevné (Q_i^r $12,5 - 21,5 \text{ MJ/m}^3$) a velmi vysoce výhřevné (Q_i^r nad $21,5 \text{ MJ/m}^3$).

V průmyslu jsou potom tyto plyny nejvyužívanější:

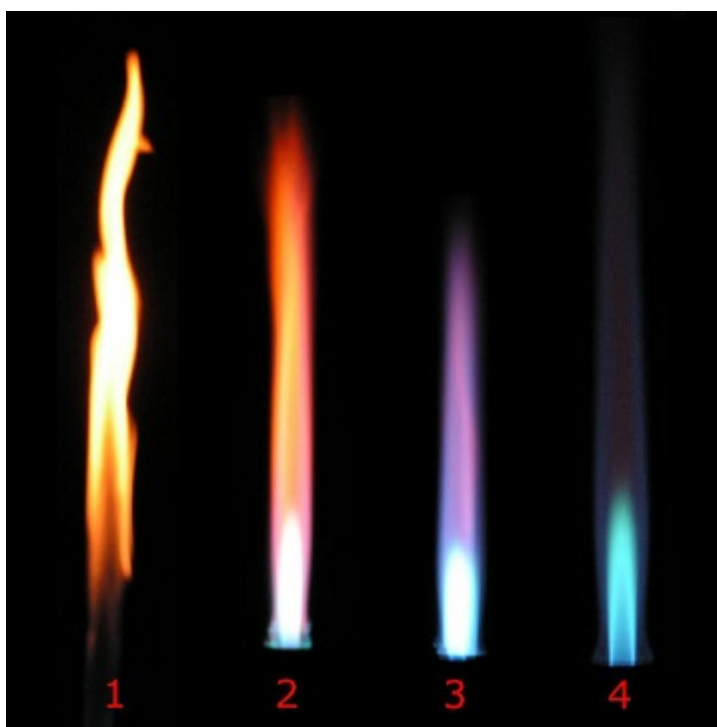
- Zemní plyn - $33,5 \text{ MJ/m}^3$
- Vodní plyn - $10,5 \text{ MJ/m}^3$
- Koksárenský plyn - $16,3 \text{ MJ/m}^3$
- Generátorový plyn - $5,2 \text{ MJ/m}^3$
- Bioplyn - 20 MJ/m^3 [21]

4 Proces spalování

Spalování je chemický proces, který zahrnuje reakci kyslíku a látky (palivo). Sloučením kyslíku a směsi paliva dojde k tzv. hoření, a výsledkem této reakce je uvolněné teplo a produkty spalovacího procesu (plynné spaliny, tuhý a kapalný zbytek).

Důležitým indikátorem spalování je plamen, z jeho zbarvení a svítivosti můžeme říct o jaký druh paliva se jedná, nebo jestli jde o dokonalý či nedokonalý proces. Většina plamenů je zbarvených do oranžova, toto zbarvení způsobují elementární částičky uhlíku neboli saze, které jsou zahřáty na určitou teplotu, a podle toho září určitou barvou. Ale toto obarvení mohou ovlivnit i přídavné chemické prvky v palivu, dobrým příkladem toho je zábavní pyrotechnika např.

- Li^+ - červená
- Na^+ - žlutá
- K^+ - fialová
- Ba^{2+} - zelená



Obr. 4.1: Plamen zemního plynu[30]

V obr. 4.1 vidíme plamen zemního plynu. V prvním případě je zbarven do oranžova, protože není přiváděn kyslík. V krochích 2. 3. 4. postupně přivádíme vzduch do spalovacího procesu a vidíme, že se s postupným navyšováním vzduchu mění barva na modrou. Plamen je dokonale čistý a nevytváří se žádné sazí.[30][31][32]

4.1 Statika spalování

Statika spalování se zabývá především určením spotřeby spalovacího vzduchu a objemem, složením vzniklých spalin. Zaměřuje se tedy jenom na vstupy a výstupy za pomoci stechiometrických rovnic, která jsou jiná pro plynná paliva než pro tuhá a kapalná, kde jejich složení hořlaviny je podobné. [33]

4.1.1 Dokonalé spalování tuhých a kapalných paliv

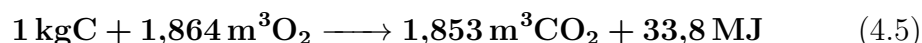
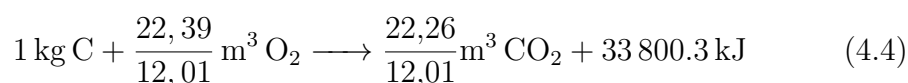
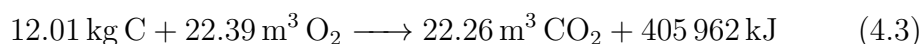
Dokonalé spalování nastane, pokud veškerá hořlavina v palivu vyhoří, přičemž uhlík se transformuje na CO_2 a uhlovodíky rovněž na CO_2 a vodu. Maximální nedopal v tuhých zbytcích je 5 %.

Pro následující výpočty jsou použity hodnoty z tabulky 4.1

Tab. 4.1: Používané hodnoty pro výpočty [19]

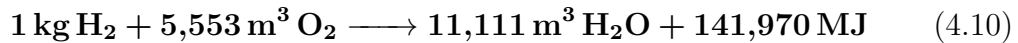
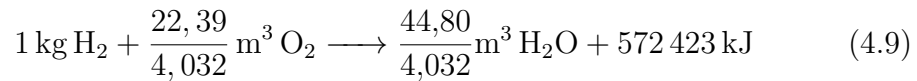
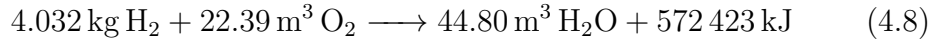
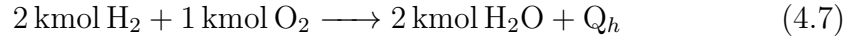
Prvek	Molární hmotnost [kg/kmol]	Molární objem [m ³ /kmol]
C	12,01	-
O ₂	32,00	22,39
CO ₂	44,01	22,26
CO	28,01	22,37
H ₂	2,016	22,41
H ₂ O	18,016	22,40
C _m H _n	12,01.m + 1,008.n	22,41
S	32,06	-
SO ₂	64,06	21,89
N ₂	28,013	22,40

- Spalování uhlíku [19]

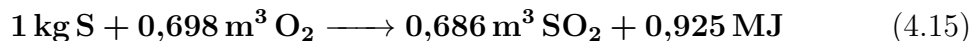
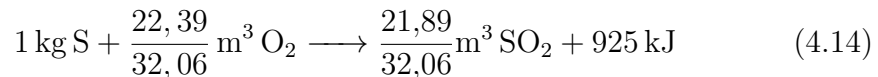
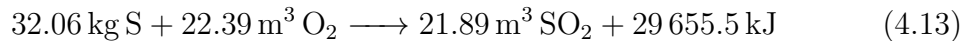
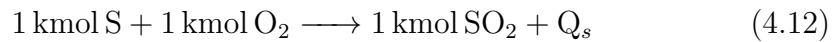


Výsledná rovnice (4.5) nám říká, že na spálení 1kg uhlíku je potřeba 1,864 m³ kyslíku, výstupem bude 1,853 m³ oxidu uhličitého a uvolní se 33,8 MJ tepla.

- **Spalování vodíku**[19]



- **Spalování síry**[19]



- **Výpočet minimálního objemu spalin**[19]

$$V_{sp,min}^s = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{Ar} [m_{spal}^3/kg_{pal}] \quad (4.16)$$

Za těchto předpokladů:

1. spaliny obsahují CO_2 z uhlíku hořlaviny a ze spalovacího vzduchu

$$V_{CO_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot C + \frac{1}{100} \cdot 0,03 \cdot V_{vz,min}^s [m_{CO_2}^3/kg_{pal}] \quad (4.17)$$

2. spaliny obsahují SO_2 ze síry z paliva

$$V_{SO_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot S [m_{SO_2}^3/kg_{pal}] \quad (4.18)$$

3. spaliny obsahují N_2 z hořlaviny a ze spal. vzduchu

$$V_{N_2} = \frac{22,40}{28,013} \cdot N_2 + \frac{1}{100} \cdot 78,05 \cdot V_{v,min}^s [m_{N_2}^3/kg_{pal}] \quad (4.19)$$

4. argon ze spal. vzduchu

$$V_{Ar} = \frac{1}{100} \cdot 0,92 \cdot V_{v,min}^s [m_{Ar}^3/kg_{pal}] \quad (4.20)$$

5. H_2O v podobě vodní páry z paliva, z vlhkosti paliva a spal. vzduchu

$$V_{H_2O} = \frac{44,81}{4,032} \cdot H_2 + \frac{22,41}{18,015} \cdot W_r + (f - 1) \cdot V_{vz,min}^s [m_{H_2O}^3/kg_{pal}] \quad (4.21)$$

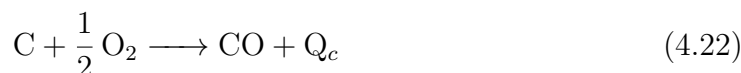
4.1.2 Nedokonalé spalování

Nedokonalost se určuje podle stupně vyhoření uhlíku:

- nevyhoří vůbec
- část vyhoří na CO_2
- část vyhoří na CO podle rovnice (4.22)

Oxidace paliva je neúplná a spaliny odcházející z reakce mají v sobě hořlavé složky, které určují ztrátu chemickým nedopalem¹ a snižují tak účinnost spalovacího zařízení. Výsledkem nedokonalého spalování tuhých a kapalných paliv je produkce CO, který je jedovatý, a proto se snažíme, aby k této situaci nedocházelo. Můžeme zasáhnout následujícími způsoby:

- teplotou v místech reakce
- správnou volbou součinitele přebytku vzduchu²
- dobrým promícháním vzduchu a paliv



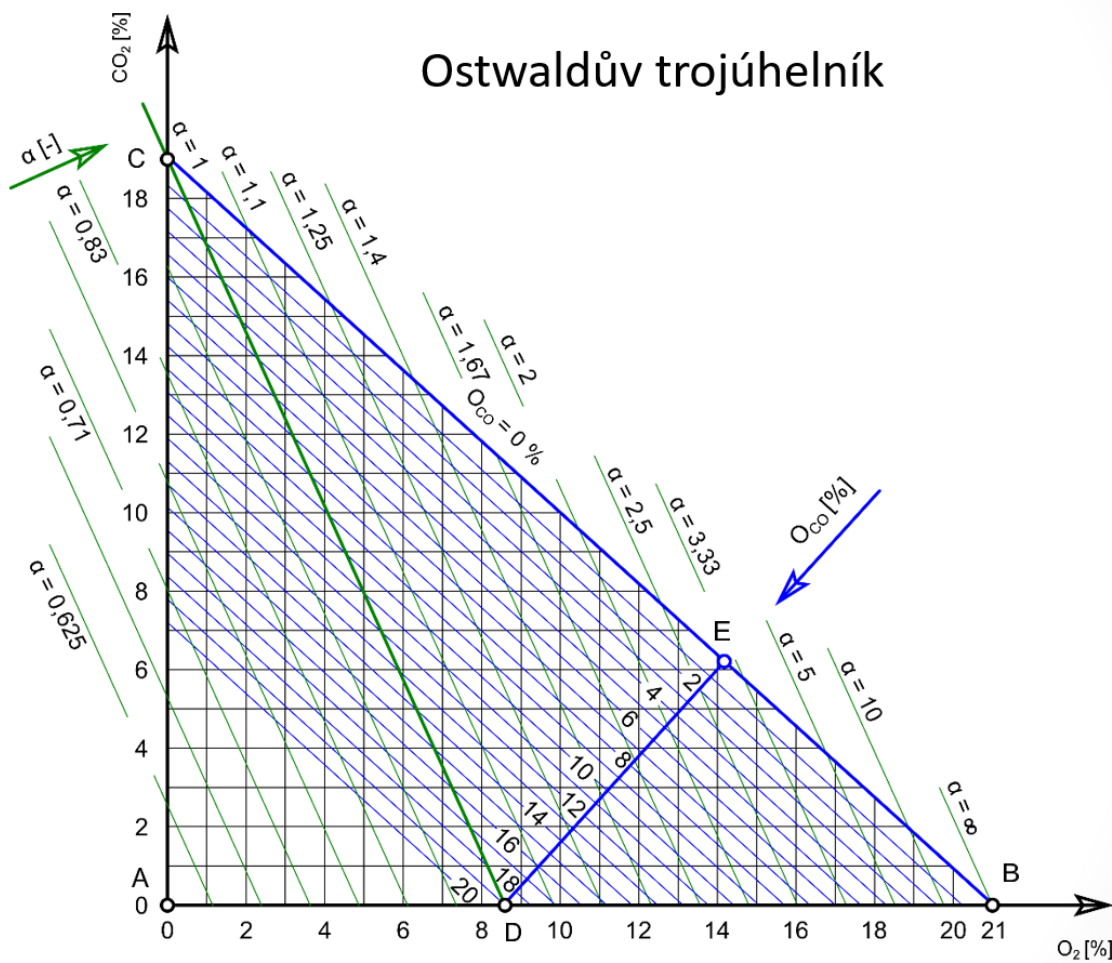
Ke kontrole dokonalosti spalování slouží spalovací trojúhelníky nebo tzv. Ostwaldův trojúhelník, kde každou stranu představují veličiny CO_2 , CO a O_2 , z toho jsou dvě známé a můžeme si dopočítat třetí veličinu. Nevýhodou je, že nezohledňuje ztrátu hořlaviny v tuhých zbytcích³ a proto se pro stanovení ideálního provozu spalovacího zařízení většinou využívají kontrolní trojúhelníky na koncentraci znečišťujících látek, aby se dodržely emisní limity stanovené zákonem. [19]

¹ztráta ξ_{cn} vzniká nevyužitím hořlavých složek ve spalinách

²Součinitel přebytku vzduchu α je poměr mezi množstvím vzduchu skutečně přivedeného do spalovací komory a teoretickým množstvím potřebného

³ztráta ξ_{mn} je způsobena obsahem nevyhořelého uhlíku v tuhých zbytcích odcházející ze spalovací komory

Ostwaldův trojúhelník



Obr. 4.2: Ostwaldův trojúhelník pro černé uhlí[34]

4.2 Dynamika spalování

Narozdíl od statiky spalování se při dynamice řeší prolínání fyzikálních a chemických dějů. To znamená, že celková doba spalovacího procesu se počítá z doby fyzikálních dějů τ_f a z doby chemických dějů τ_{ch} , kde y je součinitel vyjadřující překryv obou dějů viz rov. (4.23). Mezi chemické děje patří exotermické⁴ a endotermické⁵ reakce. Fyzikální děje, jako směšování paliva a okysličovacího média nebo přenos hmoty a látek, určují celkovou dobu spalování τ_c . [21]

$$\tau_c = \tau_f + y \cdot \tau_{ch} [s] \quad (4.23)$$

⁴je reakce při které se uvolní více energie než kolik jí bylo na začátku dodáno

⁵je reakce při které se uvolní méně energie než kolik jí bylo na začátku dodáno

Kinetické hoření[21] nastává tehdy, když doba chemických reakcí je mnohem kratší než doba fyz. dějů, platí tedy:

$$\tau_f \ll \tau_{ch} \Rightarrow \tau_c \doteq \tau_{ch} \quad (4.24)$$

Difuzní hoření[21] nastává tehdy, když doba chemických reakcí je mnohem kratší než doba fyz. dějů, platí tedy:

$$\tau_f \gg \tau_{ch} \Rightarrow \tau_c \doteq \tau_f \quad (4.25)$$

5 Výběr vhodného zařízení na snížení produkce jemných částic pro domácnost

V této kapitole se budeme věnovat zařízením pro snížení produkce jemných částic, které jsou produkovány biomasovými spalovacími jednotkami v domácnostech.

Nejprve si zvolíme kritéria, na které budeme při výběru brát ohledy:

- nižší investiční náklady
- nenáročná údržba
- vyšší celková odlučivost¹
- malé tlakové ztráty

Základní síly, které jsou využívány k odlučování:

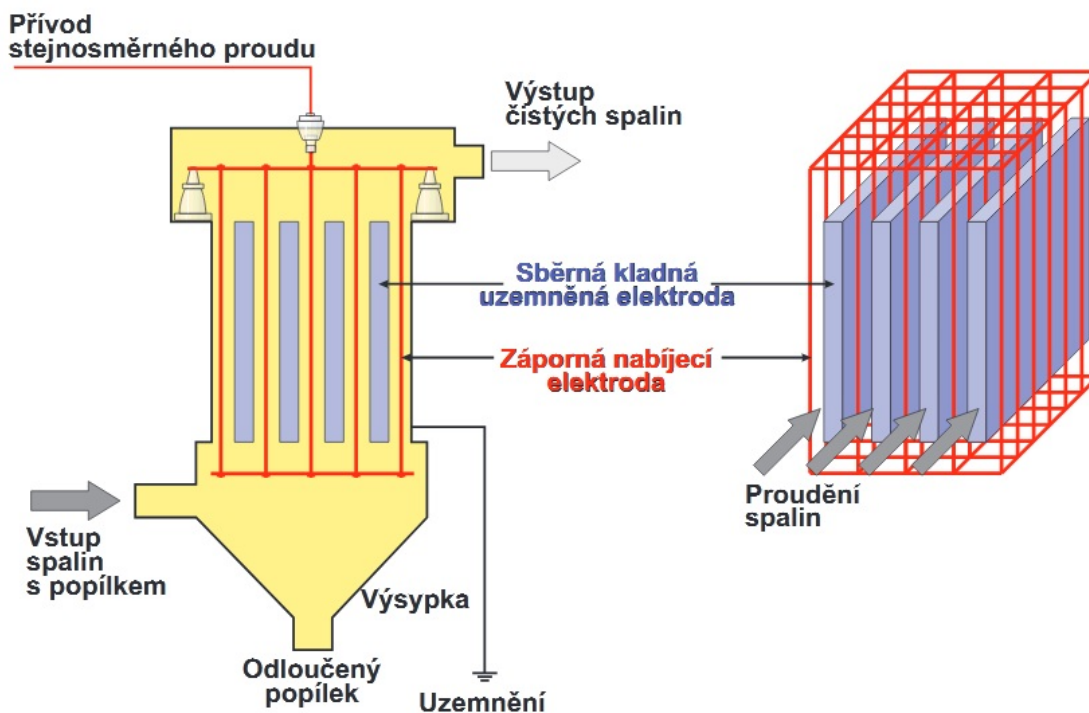
- působení gravitace
- působení setrvačných sil
- působení elektrostatického pole
- smáčená tuhých částic a následné odloučení
- filtrace [35]

5.1 Elektrické odlučovače

Využívá přitažlivých elektrických sil mezi nabitými částicemi a opačně nabitou usazovací elektrodou. Elektrodami prochází stejnosměrné napětí mezi 30-100 kV. Díky tomuto vysokému napětí vzniká velmi silné elektrické pole a důsledkem toho mezi elektrodami vzniká tzv. koronový výboj². TZL, které výbojem projdou, získávají záporný náboj. Následně jsou vlivem sil elektrického pole přitahovány na usazovací elektrody. Po kontaktu částice ztrácí rychlost a je odloučena.

¹celková odlučivost η_c - poměr hmotnosti odloučeného prachu k přivedenému množství prachu

²vzniká velké množství záporných iontů



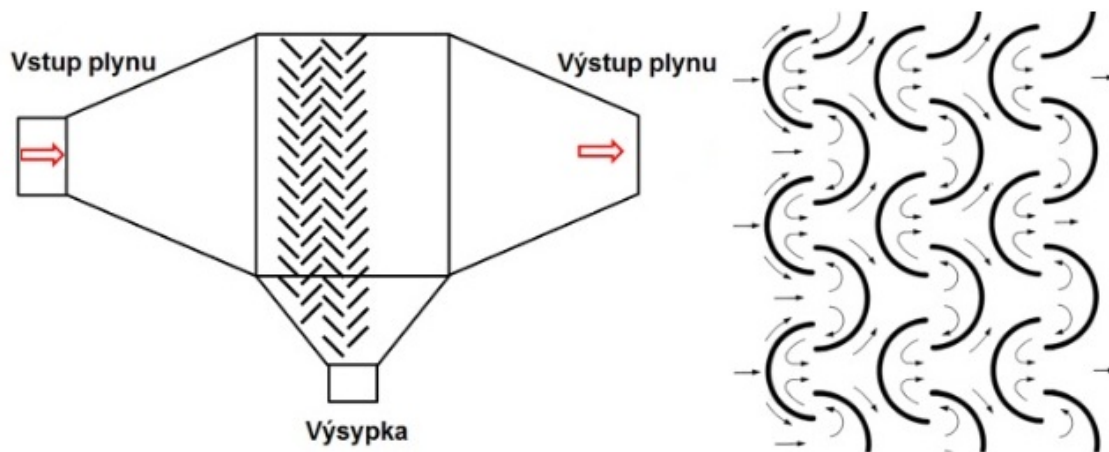
Obr. 5.1: Elektrostatický odlučovač[36]

- Výhody: Vysoká účinnost i u menších částic. Nízká tlaková ztráta. Vhodné pro velké rozsahy teplot, tlaků a průtoků. Mokrý elektrostatický odlučovač odstraní i lepkavé částice.
- Nevýhody: Vysoké investiční a prostorové náklady. Nebezpečí vysokého el. proudu. Riziko výbuchu suchého prachu. Kvalifikovaný personál. Účinnost je závislá na elektrostatických vlastnostech směsi plyn-prach.[37][38][35]

El. odlučovače jsou využívány pro odlučování částic u provozů s velkým objemovým průtokem a při těžkých provozních podmínkách.[39] Proto jsou považovány jako nevhodné.

5.2 Suché mechanické odlučovače

Tento typ odlučovačů využívá gravitační, odstředivé a setrvačné síly k odlučování částic. K odloučení dochází změnou směru dráhy směsi plynu.



Obr. 5.2: Žaluziový odlučovač[36]

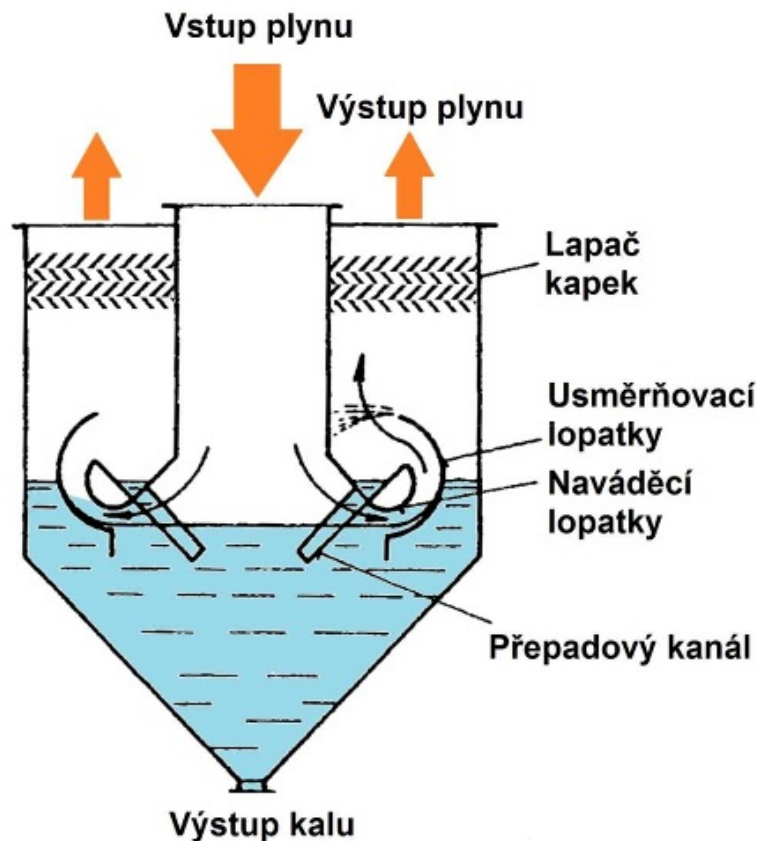
- Výhody: Nenáročný na obsluhu a údržbu. Jednoduchá instalace. Nízké pořizovací náklady a také celková spotřeba energie.
- Nevýhody: Nízká odlučivost jemných částic, která se pohybuje podle typu odlučovače mezi 2 - 100 μm . Nevhodný pro lepkavý a mazlavý materiál. Hluk.[37][38][35]

Samostatně většinou nesplňují emisní limity a většinou se používají u vícestupňových odlučovacích systému jako první stupeň odlučování. Díky nízké odlučivosti jemných částic jsou tedy nevhodné.

5.3 Mokrý mechanický odlučovače

Využívají setrvačného a odstředivého odlučovacího principu. Odloučení dosáhneme spojením kapičky a zrnka prachu, a to těmito způsoby:

1. odloučením částic na kapičkách
2. odloučením částic na smáčeném povrchu obtékaných těles
3. odloučením částic na hladině kapaliny
4. odloučením částic na povrchu bubliny plynu při průchodu plynu vrstvou kapaliny



Obr. 5.3: Hladinový odlučovač s kolmým vstupem[36]

- Výhody: Vyšší odlučivost jemných částic v porovnání se suchými odlučovači. Vhodné pro lepidlo a abrazivní částice. Odlučování výbušných prachů. Mohou se použít i pro vysoké koncentrace částic. Kompaktnost.
- Nevýhody: Nebezpečí koroze a zamrznání. Vznik odpadní kapaliny. U některých typů je vyšší tlaková ztráta. Náročné na obsluhu a údržbu.[37][38][35]

Technologie je velice složitá a z největší pravděpodobnosti je zapotřebí zavést kalové hospodářství. Také údržba je náročná a je důležité aby obsluha byla kvalifikovaná je tento typ nevhodný.

5.4 Filtry

Filtry lze rozdělit do dvou skupin - **filtrace atmosférického vzduchu** a **filtrace průmyslová**.

Filtrace atmosférického vzduchu je používána v větrání a klimatizaci. Maximální vstupní koncentrace se pohybuje v jednotkách mg/m^3 . Teplota vzduchu se přibližuje standardním podmínkám a filtrační materiál se neregeneruje.

Částice u filtrace průmyslové jsou větší než u první zmíněné filtrace. Koncentrace se

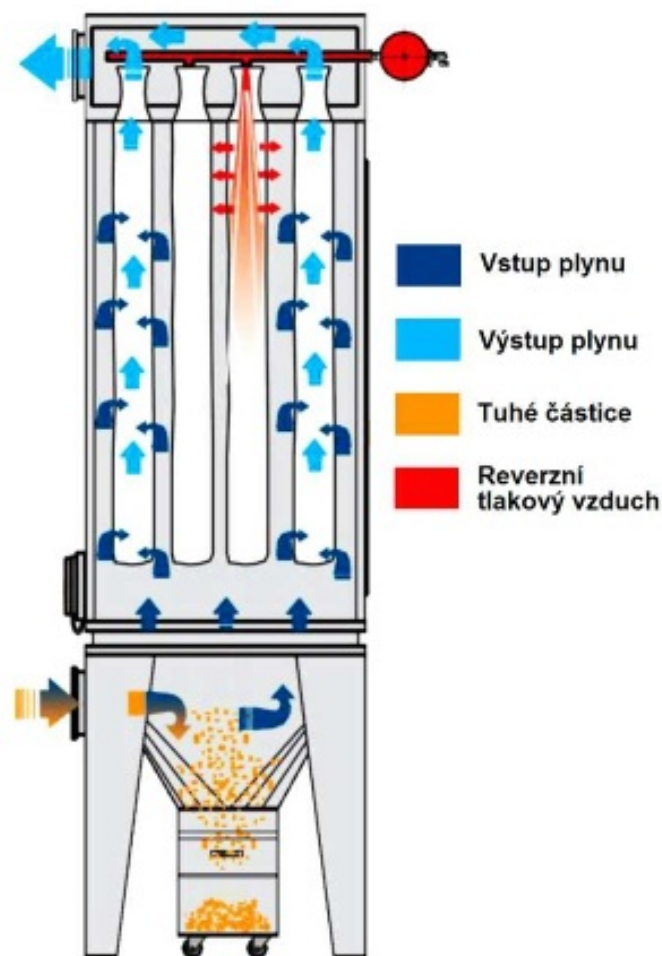
pohybuje v jednotkách g/m^3 . Částice se po určitém čase usadí na filtračním materiálu a vytváří tzv. filtrační koláč, který se odstraňuje.

Provedení průmyslových filtrů je různé a závisí na použitém filtračním materiálu a způsobu regenerace.

Základním způsobem regenerace je zpětný proplach, pulsní profuk nebo mechanickými způsoby, jako je chvění.[37][38]

Dále je rozdělujeme na:

Tkaninové filtry: Odpadní plyn prochází hustě tkaným materiálem (látkou), který zachycuje TZL³ prosíváním. Na povrchu tkaniny se vytváří filtrační koláč, který může účinnost filtru ještě zvýšit. Tlaková ztráta během celého procesu roste, a tak je zapotřebí automatické regenerace při dosažení limitní tlakové ztráty.[35]

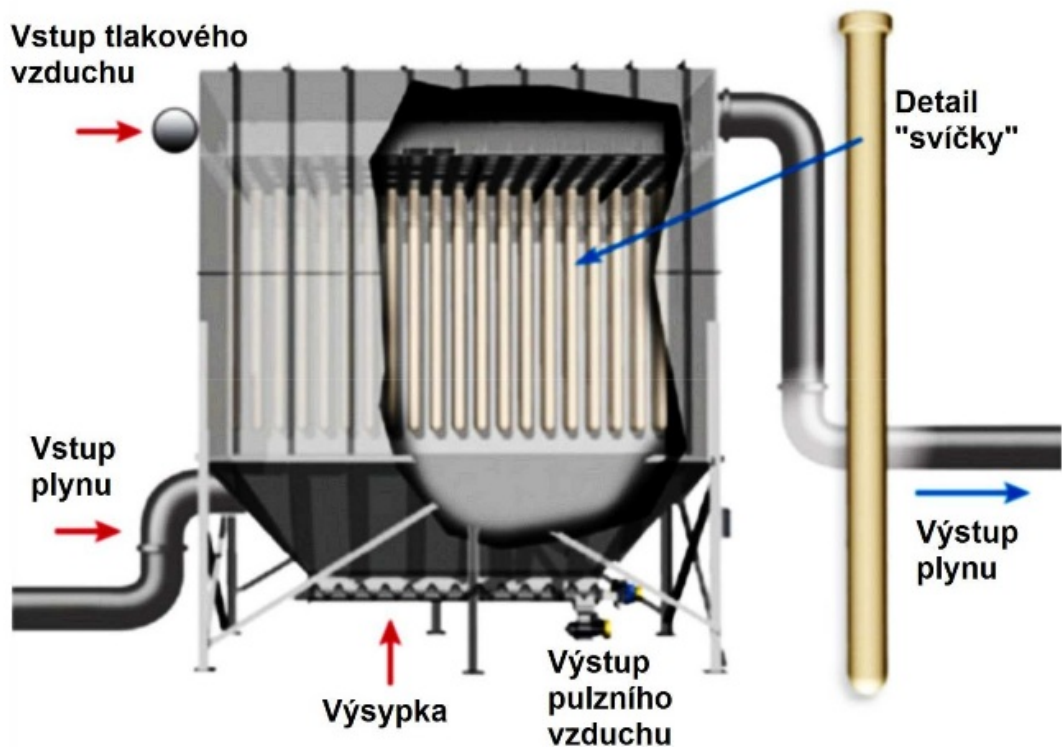


Obr. 5.4: Tkaninový odlučovač s pulsní regenerací[36]

Filtry s porézni/zrnitou vsrtvou: Filtrační vrstva je anorganického původu, z dolomitu nebo slinutého písku. Vhodná i pro vyšší teploty. Někdy jsou vrstvy

³tuhé znečišťující látky

potahovány teflonovou membránou pro zlepšení regenerace i na úkor vyšší tlakové ztráty.[36]



Obr. 5.5: Svíčkový filtr[36]

- Výhody: Vysoká odlučivost hrubé i jemné frakce. Jednoduchá obsluha. Prach se separuje bez příměsí.
- Nevýhody: Pořizovací a provozní náklady se odvíjejí od velikosti částic, které chceme odloučit, čím menší částice tím dražší. Nevhodné pro mokré nebo lepkavý prach. Nutnost čistit filtry v určitých intervalech. Při špatných provozních podmínkách může docházet k častému zanášení filtrů, kdy následná údržba je časově náročná.[37][38] [35]

Filtry splňují z většiny naše požadavky a jsou proto i vhodným nástrojem pro snížení produkce jemných částic v domácích biomasových spalovnách. Jednoduše lze vybrat filtr, který je účinný a z ekonomického hlediska výhodný. Následná údržba by se neměla zanedbat pro bezpečný a dlouhodobý provoz.

Závěr

Rešeršní část je zaměřená na tuhé znečišťující látky. Popis jejich rozdělení podle velikosti, vymezení pojmů emise a imise, a také jak moc ovlivňují jednotlivé antropogenní sektory ovzduší. Dále je popsán princip vzniku těchto částic spalováním a jejich následné rozdělení do jednotlivých módů s ohledem na jejich velikost, způsob vzniku. Složení částic je velmi odlišné, a závisí na způsobu, jakým vznikají. Zaměřujeme se na uhlíkaté částice.

Vypouštěním PM částic do ovzduší nemůžeme opomenout také fakt, že částice ovlivňují náš každodenní život. V kapitole 2 je tedy stručně popsáno jaký vliv mají na náš respirační systém, a následně jaký dopad mají na životní prostředí.

Při spalování je nedílnou součástí palivo, které se věnuje kapitola č.3, kde jsou popsány jak už tuhá, kapalná tak i plynná paliva. U tuhých paliv se zabýváme uhlí a biomasou. Uhlí je nadále nejvíce využívaným palivem, a biomasa nabývá na popularitě zejména v domácnostech. Proč jenom v domácnostech a ne v energetice? Hlavním důvodem je účinnost technologií malých spalovacích jednotek, které přeměňují biomasu na energii. Jejich účinnost se pohybuje od 70 % a výš. Ve velkých uhelných elektrárnách se spaluje biomasa neefektivně.

Poslední část rešerše je věnována spalovacímu procesu. Popis statiky, se zaměřením na dokonalé a nedokonalé spalování, a dynamiky spalování.

Experimentální částí je návrh pro snížení produkce jemných částic pro domácí biomasové spalovací jednotky. Byly vyjmenovány jednotlivé typy odlučovačů s popisem funkce, jejich výhody, nevýhody a následné zhodnocení pro použití na domácích spalovacích jednotkách. Kritéria byla zvolena tak, aby to pro uživatele bylo finančně dostupné, vysoce účinné a nenáročné na obsluhu. V tomto případě je cílem dosáhnout kvality (vyšší účinnost celkového odloučení) při odlučování částic, ale s tím přichází problém vysokých investičních nákladů. Je tedy otázkou, zda je lepší investovat do odlučovačů s vyšší účinností nebo s menší účinností. Ty by byly cenově dostupnější, a tím pádem by se potencionálně zvýšil i počet jednotek, který by tento způsob odlučování využíval.

Seznam použité literatury

1. *MOŽNOSTI ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ BIOMASY* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/283371/Moznosti_energetickeho_vyuziti_biomasy.pdf.
2. *Porovnání nákladů na vytápění, teplou vodu a elektrickou energii: TZB-info* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/138-porovnani-nakladu-na-vytapani-teplou-vodu-a-elektrickou-energii-tzb-info>.
3. *Znečištění ovzduší – co to je a jak vzniká?* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.meteopress.cz/vysvetleni/znecesteni-ovzdusi-co-to-je-a-jak-vznika/>.
4. *Co jsou PM částice?* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/kvalita-vzduchu-v-uzavrenych-mistnostech-5-co-jsou-pm-castice.html>.
5. *Introduction to Particulate Matter* [online]. Brooklyn, NY: Publiclab.org, 2016 [cit. 2020-06-10]. Dostupné z: <https://publiclab.org/wiki/revisions/pm/25040%5C#Particle+Size>.
6. *Látky znečišťující ovzduší* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://arnika.org/latky-znecestujici-ovzdusi>.
7. *Particulate Matter (PM) Sources* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.valleyair.org/Air_Quality_Plans/AQ_plans_PM_sources.htm.
8. *Vývoj celkových emisí PM_{2.5} mezi roky 2007 - 2015* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/png/oIV1-20.png>.
9. *Particle size distribution* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.dwd.de/EN/research/observing_atmosphere/composition_atmosphere/aerosol/cont_nav/particle_size_distribution_node.html.
10. HINDS, William C. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd ed. New York: John Wiley, c1999. ISBN 04-711-9410-7.
11. *Aerosol atmosférický* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/heslo/24>.
12. *Výkladový slovník aerosolových termínů* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <http://cas.icpf.cas.cz/aerosolovnik.php>.

13. *What is Black Carbon?* [online]. Center for Climate a Energy Solutions [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.c2es.org/document/what-is-black-carbon/>.
14. BAHNER, Mark; WEITZ, Keith; ZAPATA, Alexandra. *Use of Black Carbon and Organic Carbon Inventories for Projections and Mitigation Analysis* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei16/session3/k.weitz.pdf>.
15. BLAŽEK, Jaroslav; SÝKOROVÁ, Ivana; HAVELCOVÁ, Martina. „BLACK CARBON“ JAKO PRODUKT NEDOKONALÉHO SPALOVÁNÍ – VZNIK, VLASTNOSTI, VÝSKYT, STANOVENÍ [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_09_859-864.pdf.
16. *Lung penetration of particles* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.encyclopedie-environnement.org/en/health/airborne-particulate-health-effects/>.
17. UNDERHILL, Jeffrey. *Špatná viditelnost* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.des.nh.gov/organization/divisions/air/cb/ceps/dust/documents/fugitive-dust.pdf>.
18. *Health and Environmental Effects of Particulate Matter* [online]. Washington [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>.
19. JIROUŠ, František. *Efektivní spalování paliv*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice, c2013. ISBN 978-80-260-5393-4.
20. WICHTERLE, Kamil; KOUTNÍK, Ivan. *Technologie a analýza paliv: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014. ISBN 978-80-248-3574-7.
21. BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vydání třetí. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-214-5769-0.
22. *Hrubý rozbor tuhých paliv* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>.
23. *Primární energetické zdroje v roce 2017* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/19810-uhli-v-ceske-republice>.
24. *Koksovatelné uhlí a koksování* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.okd.cz/cs/tezime-uhli/uhli-tradicni-zdroj-energie/koksovatelne-uhli-a-koksovani>.

25. *Využití biomasy* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://nanotechnologia.7x.cz/veda-ma-svoj-zmysel-pokial-sa/obnovitelne-zdroje-energie/biomasa>.
26. VOBOŘIL, David. *Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody>.
27. *Atmosférická destilace* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: https://www.znackoveoleje.cz/Vyroba-zakladovych-oleju-a5_9.htm.
28. HONSKUS, Petr et al. *Spalování paliva* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/%5C%5C\\$FILE/000-spalovani_paliv-20160222.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/techniky_u_stacionarnich_zdroju_vystup_projektu/%5C%5C$FILE/000-spalovani_paliv-20160222.pdf).
29. BLAŽEK, Josef; RÁBL, Vratislav. *Základy zpracování a využití ropy*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0619-2.
30. *Co způsobuje barvu ohně a hvězd? A jak jejich barva souvisí s teplotou?* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.prirodovedci.cz/zeptejte-se-prirodovedcu/1217>.
31. *Barvení plamene kationty kovů* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://studiumchemie.cz/experiment/barveni-plamene-kationty-kovu-i-a-ii-a-skupiny-1-a-2-skupiny/>.
32. ANDREOVSKÝ, Jan. *Spalování paliv - Kotle* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/obrazky/seminare/ovzdusi/seminar2/8_dil_4_andreovsky.pdf.
33. KÓL, Přemysl. *Statika hoření* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <http://spalovaci-procesy.wz.cz/Statika%5C%20horeni.html>.
34. *Studijní materiály předmětu - Palivové hospodářství: Vyučující: doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.* [online] [cit. 2020-06-24].
35. *Studijní materiály předmětu - Ochrana životního prostředí: Vyučující: doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.*
36. STAF, Marek. *Technologie ochrany ovzduší* [online] [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14265791-Technologie-ochrany-ovzdusi.html>.
37. NOVÝ, Richard a kolektiv. *Technika prostředí (skripta)*. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02108-4.
38. HEMERKA, Jiří. *Odlučování tuhých částic*. Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01088-0.

39. *Elektrické odlučovače* [online] [cit. 2020-06-23]. Dostupné z: <https://www.depuro.cz/elektrickeacute-odlu269ova269e.html>.

Seznam obrázků

1.1	Porovnání velikosti částic (Human hair - lidský vlas, Grain of sand - zrnko písku, Fine particulate matter size comparison - velikostní porovnání jemných částic)[5]	16
1.2	Vývoj celkových emisí $PM_{2.5}$ [8]	17
1.3	Schéma velikostní distribuce částic v jednotlivých módech (Nucleation mode - nukleační mód, Aitken mode - Aitken mód, Accumulation mode - akumulární mód, Coarse mode - coarse mód)[9]	18
2.1	Velikost částic a jejich vliv na zdraví (Coarse particules - hrubé částice, Upper respiratory tract - horní cesty dýchací, Fine partucules - jemné částice, Lower respiratory tract - dolní cesty dýchací, Very fine particules - Velmi jemné částice, Alveolus - plicní sklípky, Ultrafine particules - Ultrajemné částice, Blood/whole body - krev/celé tělo)[16]	20
2.2	Porovnání viditelnosti[17]	21
3.1	Složení tuhých paliv[22]	22
3.2	Primární energetické zdroje z r. 2017 (množství energie (v palivu) přímo využité v České republice k výrobě elektřiny nebo tepla k prodeji)[23]	23
3.3	Využití biomasy[25]	25
3.4	Atmosférická destilace ropy[27]	26
4.1	Plamen zemního plynu[30]	28
4.2	Ostwaldův trojúhelník pro černé uhlí[34]	32
5.1	Elektrostatický odlučovač[36]	35
5.2	Žaluziový odlučovač[36]	36
5.3	Hladinový odlučovač s kolmým vstupem[36]	37
5.4	Tkaninový odlučovač s pulzní regenerací[36]	38
5.5	Svíčkový filtr[36]	39

Seznam tabulek

3.1	Hrubý a prvkový rozbor různých druhů tuhých paliv[21]	24
4.1	Používané hodnoty pro výpočty[19]	29

Seznam výpisů

Seznam příloh