



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

VLIV ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE NA DISTRIBUCI A CHEMICKÉ SLOŽENÍ ČÁSTIC PŘI SPALOVÁNÍ BIOMASY

EFFECT OF ESP ON DISTRIBUTION AND CHEMICAL COMPOSITION OF PARTICLES FROM BIOMASS
COMBUSTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Preisler

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Vladimír Adamec, CSc.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1694/2021 Akademický rok: 2021/22
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany
životního prostředí
Student: **Bc. Lukáš Preisler**
Studijní program: Chemie a technologie ochrany
životního prostředí
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **prof. Ing. Vladimír Adamec, CSc.**

Název bakalářské práce:

Vliv elektrostatického odlučovače na distribuci a chemické složení částic při spalování biomasy

Zadání bakalářské práce:

Zpracování literární rešerše zaměřené na metody měření distribuce a chemické složení jemných částic při spalování biomasy.

Analýza jemných částic odebraných z kouřovodu s využitím SEM/EDX.

Vyhodnocení změny distribuce a chemického složení jemných částic po odloučení elektrostatickým odlučovačem.

Termín odevzdání bakalářské práce: 3.6.2022:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Bc. Lukáš Preisler
student

prof. Ing. Vladimír Adamec, CSc.
vedoucí práce

prof. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2022

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Přechod na spalování biomasy znamená produkci nezanedbatelného množství částic, které vypouštěním do ovzduší negativně ovlivňuje lidské zdraví. Znalost velikosti a složení částic je zásadní pro možné odlučování ze spalin technologií elektrostatického odlučování. Tato technologie je vyvinuta a využívána ve velkých energetických celcích, ale v lokálních topeništích toto opatření na snižování množství částic běžné není. V této práci jsou popsány způsoby vzniku jemných částic a jejich velikostní distribuce a složení. Dále jsou uvedeny metody analýzy velikostní distribuce a složení těchto částic. Vliv elektrostatického odlučovače na velikostní distribuci a složení je diskutován na základě rešeršních poznatků. V experimentální části byly odebrány vzorky jemných částic ze spalin kouřovodu kotle na dřevní pelety, ve kterém je zařazený experimentální elektrostatický odlučovač. Z provozních důvodů nebyl elektrostatický odlučovač při odběru vzorků spuštěný, jelikož na vnitřním povrchu velké části kouřovodu spaliny kondenzovaly. Vzorky byly odebrány na začátku kouřovodu, kde spaliny nekondenzovaly, a na jeho konci. Odebrané vzorky částic na filtru podstoupily analýzu na elektronovém mikroskopu.

ABSTRACT

Biomass combustion causes a significant number of particles that, released into the atmosphere, negatively affect human health. Knowledge of the size and composition of the particles is essential for possible flue gas separation by electrostatic precipitation technology. This technology is developed and used in large power plants, but the electrostatic precipitation in domestic boilers is rare. This work describes the methods of fine particle formation and their size distribution and composition. Measurement methods of chemical composition and the size distribution are provided. According to a review, the effect of electrostatic precipitator on size distribution and chemical composition is discussed. In the experimental part, fine particles were sampled from the flue gas of a domestic wood pellet boiler containing an experimental electrostatic precipitator. Due to operational reasons, the electrostatic precipitator did not run during sampling. Flue gas condensed on the inner surface of the flue. The particles were sampled on filters at the beginning and the end of the flue. The filter was analyzed on an electron microscope.

Klíčová slova

Jemné částice, SEM/EDX, spaliny, velikostní distribuce, elektrostatické odlučování

Key words

Fine particles, SEM/EDX, flue gas, size distribution, electrostatic precipitation

PREISLER, Lukáš. Vliv elektrostatického odlučovače na distribuci a chemické složení částic při spalování biomasy [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-27]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139321>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí. Vedoucí práce Vladimír Adamec.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Vladimíru Adamcovi, CSc. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Za zpracování vzorků na elektronovém mikroskopu děkuji brněnské pobočce ČHMÚ a tamější pracovníci Ing. Martině Brenčíč.

OBSAH

1 ÚVOD	6
2 TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1 Znečišťující látky ze spalování tuhých paliv	7
2.2 Jemné částice ze spalování biomasy	7
2.3 Vznik jemných částic	8
2.4 Chemické složení částic	10
2.5 Velikostní distribuce jemných částic	11
2.6 Vliv jemných částic na zdraví člověka	12
2.7 Způsoby čištění spalin	13
2.7.1 Suché metody k odstraňování suspendovaných částic	13
2.7.2 Mokrý metody k odstraňování suspendovaných částic	13
2.7.3 Elektrostatické odlučování	14
2.8 Metody měření distribuce jemných částic	15
2.9 Metoda SEM/EDX	15
2.10 Vliv elektrostatického odlučovače na distribuci a složení částic	17
2.11 Popis přístrojové techniky na měření	20
2.11.1 Kotel Ekoscroll Alfa	20
2.11.2 Zařízení na měření distribuce velikosti částic	21
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
3.1 Experimentální elektrostatický odlučovač	24
3.2 Odběr jemných částic	25
4 VÝSLEDKY A DISKUZE	26
4.1 Analýza filtru s částicemi	26
4.2 Návrh budoucího měření	27
5 ZÁVĚR	28
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	29
7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	33

1 ÚVOD

V České republice se tepelná a elektrická energie získává nejčastěji spalováním tuhých paliv [1]. Největším znečišťovatelem ovzduší v České republice jsou lokální zdroje k vytápění domácností právě na tuhá paliva [2]. Ve snaze přecházet na nízkoemisní energetiku je uhlí nahrazováno zejména biomasou a plynem. Vzhledem k závislosti na plynu z Ruska a současné geopolitické situaci nabývá nyní na významu právě biomasa na úkor plynu. Dá se proto očekávat i v následujících letech zvýšená poptávka po spalovacích jednotkách na biomasu.

V posledních třech desetiletích byly významně vyvinuty a aplikovány metody, jak z produktů spalování odstranit tuhé znečišťující látky pomocí elektrostatického odlučování [3]. Velké elektrárny a teplárny touto metodou výrazně eliminovaly vypouštění škodlivých látek, aby odpovídaly přísným emisním limitům. Elektrostatické odlučovače jsou v současnosti schopné zachytit až 99,9 % vypouštěných částic [4]. Malých lokálních zdrojů k vytápění, kam patří kotle, krby a kamna, je takové množství, že jejich emise nejdou velkoplošně eliminovat, legislativně není možné tyto zdroje ani kontrolovat. Na základě iniciativy Zelená dohoda pro Evropu byl u těchto zdrojů nařízen přechod ze spalování uhlí mj. na biomasu a na spalovací jednotky s vyšší emisní třídou, vypouštějící menší množství škodlivin. Spalováním biomasy jsou do ovzduší vypouštěny prachové částice velmi malých průměrů v řádu desetin až jednotek μm , díky čemuž pronikají do lidského organismu snadněji než větší částice. Tyto nejmenší částice je možné odlučovat elektrostatickým odlučovačem, narozdíl od mechanických cyklónů nebo jiných metod.

Cílem práce je sledování velikostní distribuce a složení částic při spalování biomasy. V teoretické části jsou popsány jemné částice z hlediska jejich vzniku, složení a velikostní distribuce. Dále jsou popsány metody měření velikostní distribuce a chemického složení a metody opatření k čištění spalin. Na základě dostupné literatury byl popsán vliv elektrostatického odlučovače na velikostní distribuci částic. V experimentální části proběhlo měření na experimentálním elektrostatickém odlučovači. Jednalo se o prvotní měření se sestaveným zařízením, které při odběru částic nebylo z provozních důvodů spuštěno. Vzorky, které byly odebrány na silikátový filtr, byly zkoumány pod elektronovým mikroskopem.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Znečišťující látky ze spalování tuhých paliv

Při spalování biomasy jsou do ovzduší vypouštěny spaliny s velkým množstvím látek, které mají negativní vliv na člověka a na okolní životní prostředí. Může se jednat jak o plynné produkty spalování, organické látky nebo jiné toxické prvky, které jsou zachycené na částicích.

Pokud je v palivu zastoupena síra, znečišťující složkou spalin je oxid siřičitý. Zastoupení síry je značné zejména v uhlí. Hnědé uhlí obsahuje okolo 2 % síry, zatímco vývojově starší černé uhlí zhruba 1 % [5]. Zastoupení v biomase je řádově v desetinách procent, dle typu biomasy [6]. Největší nebezpečí oxidu siřičitého hrozí z jeho přeměny na oxid sírový, který je v přítomnosti vzdušné vlhkosti hydratován na kyselinu sírovou. Ta může následně reagovat s alkalickými částicemi, z čehož vznikají sírany. Důsledkem je zvyšování koncentrace částic. Pokud není dostupné dostatečné množství alkalických částic, zvyšuje se kyselost okolního prostředí [7].

Dalším plynným znečišťovatelem jsou oxidy dusíku, souhrnně označované jako NO_x. Do skupiny se řadí oxidy dusný, dusnatý, dusičitý a dusičný. K souhrnnému porovnání jsou tyto oxidy přepočítávány obvykle na oxid dusnatý. Tyto oxidy dusíku se mohou přeměňovat na kyselinu dusičnou, která reaguje s některými částicemi, zejména oxidy hořčíku a vápníku. Společně s těkavými organickými látkami jsou NO_x za přítomnosti ultrafialového záření zdroji přízemního ozonu [7].

Znečišťující látkou, která je do ovzduší vypouštěna téměř výhradně z lokálních topenišť spalujících biomasu, je benzo(a)pyren [2]. Tato karcinogenní látka patří mezi polycyklické aromatické uhlovodíky a vzniká pyrolýzou a následnou pyrosyntézou dle závislosti na teplotě a koncentraci kyslíku ve spalovací komoře [8]. V moderních spalovacích jednotkách jsou pro eliminaci tuhých částic vyšší teploty, důsledkem je ale zvýšená produkce benzo(a)pyrenu. Dále u něj platí, že vzniká v mnohem větší míře u spalovacích jednotek s ručním přikládáním než při automatickém přikládání [8].

Nejvýznamnějším znečišťovatelem jsou při spalování biomasy suspendované částice. Je to směs částic organických i anorganických, která se vyskytuje v pevném či kapalném skupenství. Suspendované částice se rozdělují na primární a sekundární. Primární částice vznikají přímo, jakožto produkt spalování, a s postupem času se přeměňují na sekundární částice, které vznikají fyzikálními a chemickými procesy [7]. Velikost těchto suspendovaných částic nabývá širokého spektra velikostí v řádu jednotek nanometrů až stovek mikrometrů. Dle velikosti se dělí na jemné částice a hrubé částice, přičemž hraniční velikost je 2,5 μm. Částice, které jsou větší než tato hranice, jsou označovány hrubé částice, menší jsou jemné částice. Předmětem zájmu práce jsou jemné částice a jsou popsány v následující podkapitole.

2.2 Jemné částice ze spalování biomasy

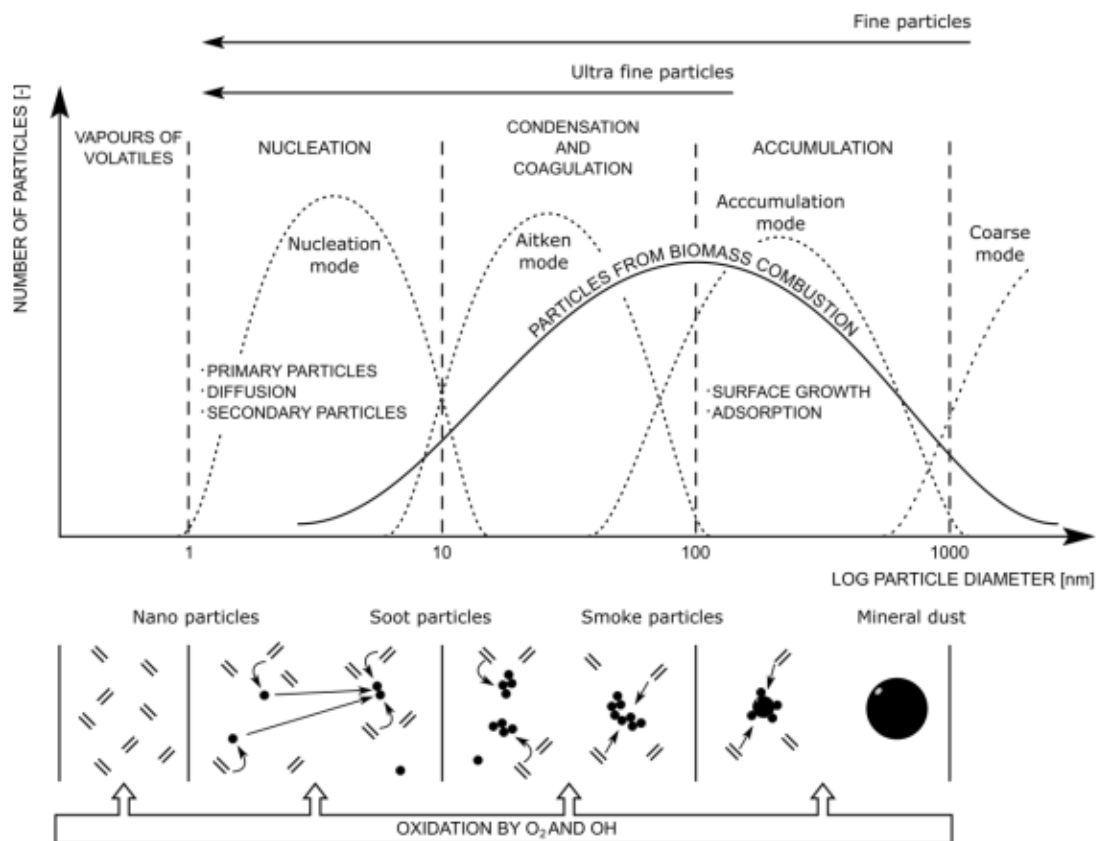
Jemnými částicemi jsou označovány látky, které se nacházejí v plynném médiu. Jemné částice jsou obecně označovány jako ty částice, které mají velikost mezi 10 nm a 2500 nm [7]. Ty nejmenší částice, ve velikosti 10 nm až 100 nm, jsou označovány ultrajemné částice [7].

Jelikož částice obsažené v ovzduší jsou zdraví škodlivé, je jejich koncentrace plošně měřena. Neplatí to však pro ultrajemné částice, ale pouze částice větší 1 μm . Zákon o ochraně ovzduší v České republice stanovuje tři imisní limity, z nichž jsou dva pro částice PM_{10} , tedy tuhé částice s velikostí 10 μm a jeden pro částice $\text{PM}_{2,5}$, s průměrem 2,5 μm . Ani jemné částice nejsou široce sledovány, což je způsobeno obtížnějším praktickým sledováním. Až postupně jsou vyvíjeny techniky, které jsou schopné tyto jemné částice detekovat. Zcela však chybí imisní limity částic PM_1 a menších, které jsou v největším zastoupení při spalování biomasy a současně nebezpečnější pro lidský organismus.

Spalování biomasy v kotlích menších domácích rozměrů je specifické velikostí emitovaných částic. Největší zastoupení, co se týče velikosti, mají částice mezi 50 nm a 1000 nm. Velikost vzniklých částic závisí na typu použitého paliva, jeho vlhkosti a fázi spalování. Klíčové je také v jaké fázi spalovacího procesu se částice nachází [9].

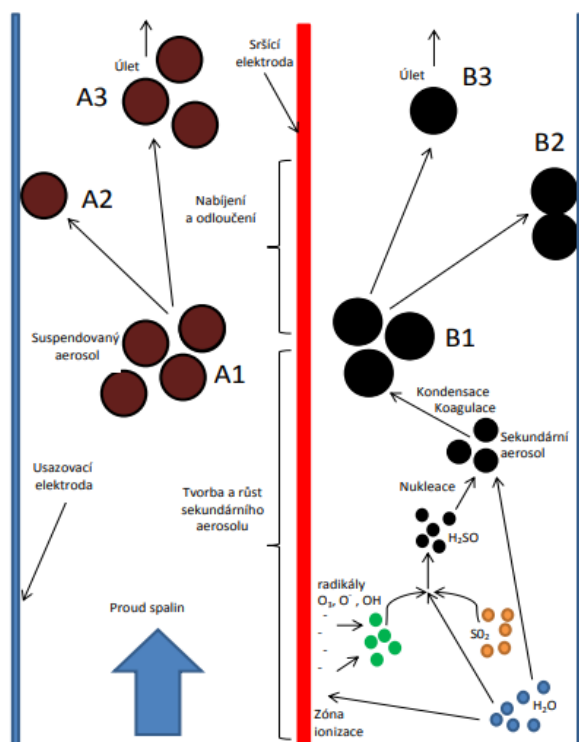
2.3 Vznik jemných částic

Pro popis velikostní distribuce částic je potřeba nejprve pochopit princip vzniku při spalování biomasy. Částice, které vznikají přímo ve spalovací jednotce, se nazývají primární částice. Nejprve vznikají ty nejmenší částice s vrcholem aerodynamického průměru mezi 15 nm a 40 nm v módu nukleačním [7]. Přeměňují se z plynných těkavých komponent homogenní kondenzací par a částečnou koagulací. Koagulací je myšleno shlukování částic [10]. Přeměna vychází zejména z hoření a tavení kovů při vysoké teplotě. Nukleační částice jsou silně reaktivní a v tomto módu setrvávají pouze krátkou dobu. Na nukleační navazuje Aitkenův mód, jehož částice mají vrchol aerodynamického průměru mezi 10 nm a 100 nm. Vznikají růstem nukleačních částic heterogenní kondenzací a částečnou koagulací. S rostoucí dobou pobytu částic ve spalinách se přeměňují do akumulárního módu s vrcholem velikosti mezi 100 nm a 1000 nm. Vznikají kombinací procesů kondenzace, koagulace a akumulace. Největší je mód hrubých částic, který je vytvářen nejčastěji mechanickými procesy. Velikost hrubého módu dosahuje až 30 μm [11]. Velikostní distribuce částic s ohledem na jejich mód je uvedena na obrázku 1, ze kterého je zřejmý modus částic s průměrem 100 nm.



Obrázek 1 Průběh vzniku a distribuce velikosti jemných částic. Převzato z [12].

Specifický je vznik částic v elektrostatickém odlučovači. Zejména z důvodu přítomnosti korónového výboje a elektrického pole v prostoru, kde proudí spaliny, se částice chovají odlišně. Za podmínek velkého elektrického pole a intenzivního vzniku iontů korónovým výbojem je produkováno velké množství radikálů kyslíkového původu, jako je O^- , OH^- a O^3 . Vysoká reaktivita těchto radikálů způsobuje výskyt reakcí s některými znečišťujícími plyny, které vycházející ze spalovacího procesu. Vzájemnou reakcí částic s těmito radikály jsou v důsledku tvořeny pevné částice [13]. Schematický vznik částic je znázorněn na obrázku 2, který uvažuje spalování uhlí. Při spalování biomasy je, na rozdíl od obrázku, SO_2 ve spalinách zastoupeno pouze minimálně.



Obrázek 2 Formování částic v elektrostatickém poli EO. Převzato z [14].

2.4 Chemické složení částic

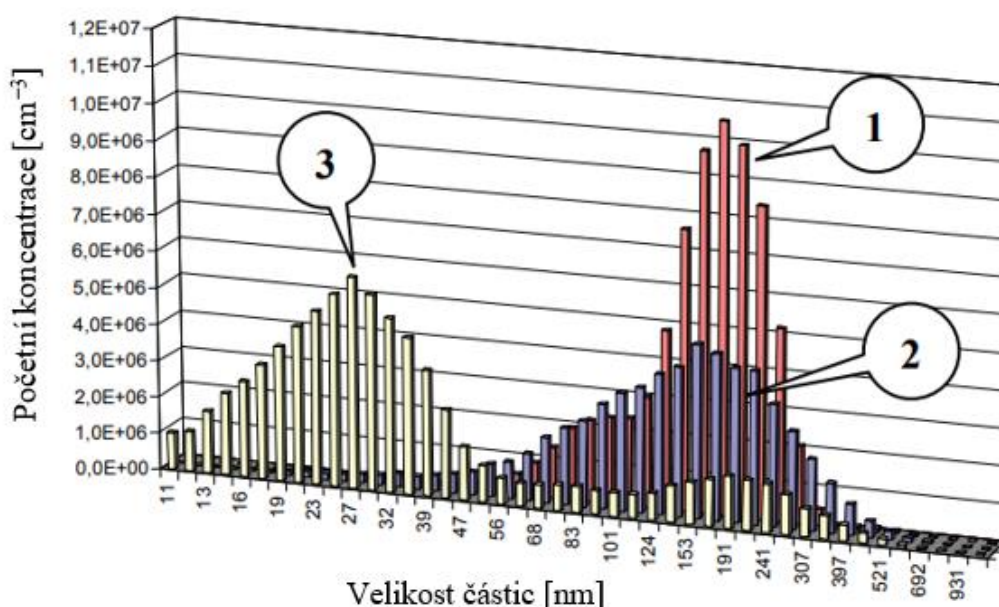
Složení jemných částic je velmi variabilní a závisí na jejich původu, složení paliva, podmínek a procesů, při kterých vznikaly, a samotné spalovací jednotky [15]. Skládají se zejména z elementárního a organického uhlíku, na které jsou navázány různé frakce anorganických látek. Obsažené těžké kovy nebo řada organických sloučenin, které na částici zkonzovaly, mají karcinogenní či mutagenní účinky [7].

Složení se značně liší i v porovnání mezi hrubými a jemnými částicemi. Jemné částice jsou obvykle v kyselé oblasti a v závislosti na složení plynu, ve kterém vznikaly, obsahují často soli, zejména sulfáty a nitráty [7]. Hrubé částice mají charakter obvykle zásaditý a v důsledku vyšší hmotnosti než jemné částice se také rychleji usazují. Dosažením podmínek dokonalého spalování vznikají částice tvořené solemi K, Si, S, Cl a Ca [7]. Tyto minerální sloučeniny se odpařují z hořící částice a vytváří podmínky pro nukleaci. Na samém počátku jsou to částice s velikostí několika průměrů daného atomu. Z těžkých kovů jsou v popelu z částic nejvíce zastoupeny prvky Zn a Ba, nezanedbatelná je také přítomnost toxických prvků Pb a Cd [15]. Často byly také v částicích nalézány prvky Cr, Rb, Br a V [8].

Produktem spalovacího procesu, který může být spalinami odnášen, je dále popel, tvořený zejména CaCO_3 . Velikost částic popele se pohybuje ve velikosti řádu jednotek μm . Nedokonalým spalováním, tedy za nedostatečného přístupu kyslíku, vznikají organické sloučeniny a částice sazí s velikostí do 100 nm. Ultrajemné částice obsahují nejčastěji organické materiály, zejména polycyklické aromatické uhlovodíky a těžké kovy [16].

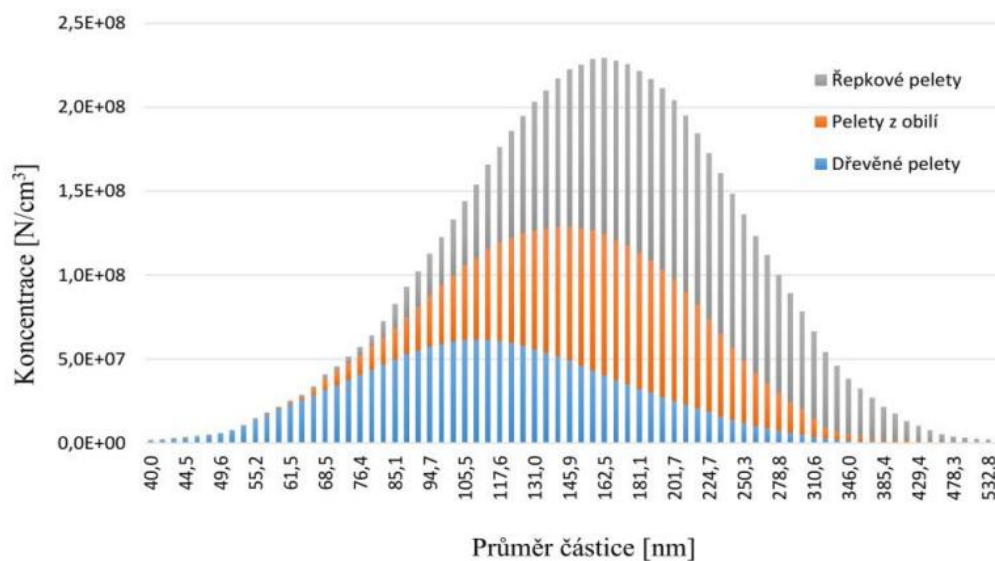
2.5 Velikostní distribuce jemných částic

Velikostní distribuce jemných částic závisí na velkém množství proměnných parametrů. Jednou proměnnou je fáze spalování, která se dá rozdělit na počáteční fázi, ustálený stav a dohořivací fázi. Distribuční křivky těchto fází jsou uvedeny na obrázku 3 [17]. Délka počáteční fáze je závislá na vlhkosti, velikosti a typu spalovaného paliva. V této fázi vzniká největší množství částic, a proto je snaha, aby trvala co nejkratší dobu. Za ustáleného stavu spalování, které je z dlouhodobého hlediska žádoucí, je množství vznikajících částic výrazně menší než v počáteční fázi. Vrchol velikosti částic je v počáteční fázi i za ustáleného stavu podobný, mezi 160 a 170 nm [17]. Závěrečná dohořivací fáze způsobuje opět nárůst v množství vznikajících částic. Křivka velikostní distribuce je v tomto případě bimodální. Menší vrchol je ve velikosti mezi 180 a 200 nm, větší vrchol částic je při výrazně menší velikosti než v předchozích fázích a to při 30 nm [17].



Obrázek 3 Velikostní distribuce částic v průběhu spalování dřevěných polen. 1) počáteční fáze 2) ustálený stav 3) dohořivací fáze. Převzato z [17].

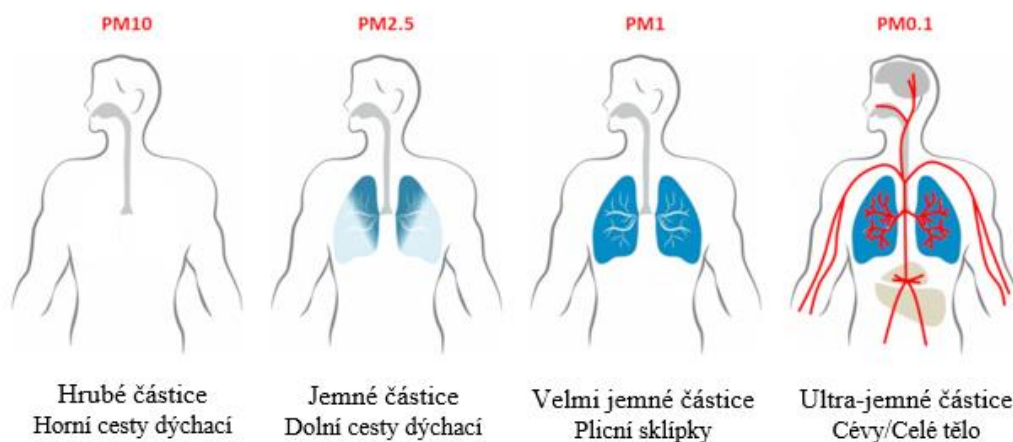
Velký vliv na velikostní distribuci má také spalované palivo, jak zobrazuje graf na obrázku 4. Nejlepší jsou v tomto ohledu dřevní pelety, které produkují nejmenší množství částic. Vrchol velikosti částic má s menším průměrem částic než pelety řepkové a z obilí. Produkce částic řepkových pelet je výrazně větší než u pelet z obilí.



Obrázek 4 Srovnání velikostních distribucí částic při spalování různých paliv. Převzato z [18].

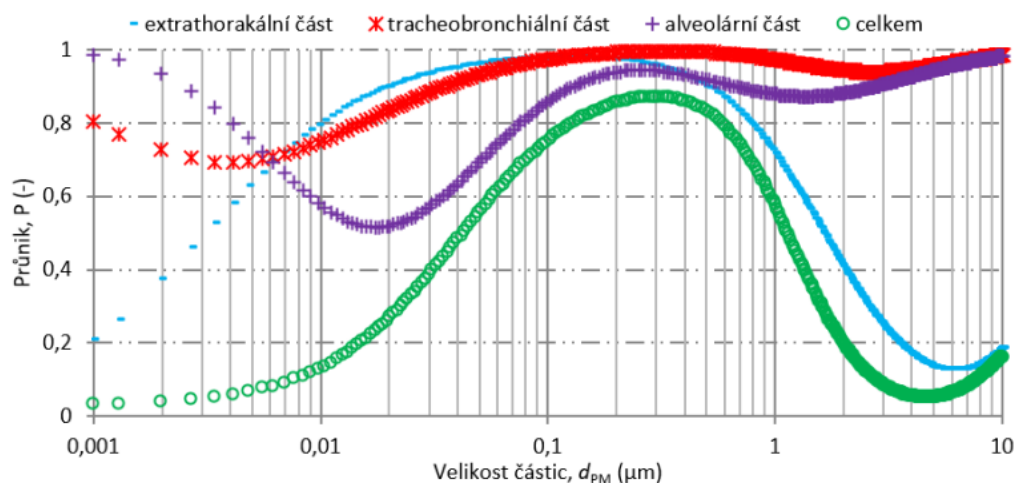
2.6 Vliv jemných částic na zdraví člověka

Vdechování částic, které vznikly spalováním biomasy, je nepochybně škodlivé pro lidský organismus. Klíčovou roli má zde velikostní distribuce vypouštěných částic. Menší částice mají ochotu pronikat hlouběji skrze lidský organismus, zatímco větší částice se zachytávají již v horních dýchacích cestách a nezpůsobují tím takové škody. Průnik částic organismem je uveden na obrázku 5. Velikosti částic se dělí na vdechovatelnou, extrathorakální, thorakální, tracheobronchiální a respirabilní frakci [19]. Vdechovatelná frakce je stanovena hmotnostním zlomkem aerosolových částic, které jsou vdechnuty nosem a ústy. Extrathorakální frakce jsou vdechnuté částice, které nepronikají za hrtan. Thorakální frakce jsou vdechnuté částice, které za hrtan pronikají. Tracheobronchiální frakce je definována průnikem do průdušnic a průdušek. Respirabilní frakce jsou vdechnuté částice, které se dostávají do plicních sklípků. Ultrajemné částice mohou procházet skrze plicní sklípky až do krevního oběhu [7].



Obrázek 5 Pronikání suspendovaných částic dýchací soustavou. Převzato z [20].

Vliv velikostní distribuce částic na zdraví člověka je zřejmý z grafu na obrázku 6. Kritickou velikostí jsou částice s velikostí mezi 0,1 μm a 1 μm . Průnik částic s touto velikostí do lidského organismu je nejpravděpodobnější. Proto je třeba se nejvíce věnovat vzniku a možnému odlučování této frakce částic.



Obrázek 6 Graf průniku částic podle jejich velikosti. Převzato z [21].

2.7 Způsoby čištění spalin

Opatření ke snižování znečišťujících látek ve spalinách jsou určena obvykle pro určitou složku spalin. Čištění spalin zahrnuje denitrifikaci, odsiřování, odstraňování emisí rozpustných ve vodě, toxických materiálů nebo odlučování tuhých částic. Pro snížení množství suspendovaných částic ze spalin slouží několik způsobů, které se dělí na mokré metody, suché metody a kombinace obojího [7].

2.7.1 Suché metody k odstraňování suspendovaných částic

U suchých metod odstraňování suspendovaných částic není vyžadována přítomnost žádné kapaliny, principem odlučování jsou jiné fyzikální jevy. Jedním z nich je odstředování v mechanických cyklonech. Spaliny, vstupující do válcovitého cyklonu, začínají vlivem vnějších sil rotovat, přičemž částice jsou odstředovány mimo osu proudění a plyn bez částic pak vystupuje vzhůru v ose proudění mimo cyklon. Částice z cyklonu odchází spádem dolní částí cyklonu. Tato metoda je vhodná pro odlučování částic s velikostí přes 10 μm , ale účinnost pro jemné částice, vypouštěné spalováním biomasy, je minimální [22]. Další možností je čištění pomocí filtrů, u kterých závisí velikost zachytávaných částic na porozitě filtru. Vhodný je také pro plynné nečistoty, jako je SO_2 a HCl . Filtry však není možné použít u velkého množství vznikajících spalin, které jsou odnášeny mimo spalovací jednotku kouřovodem [22].

2.7.2 Mokrý metody k odstraňování suspendovaných částic

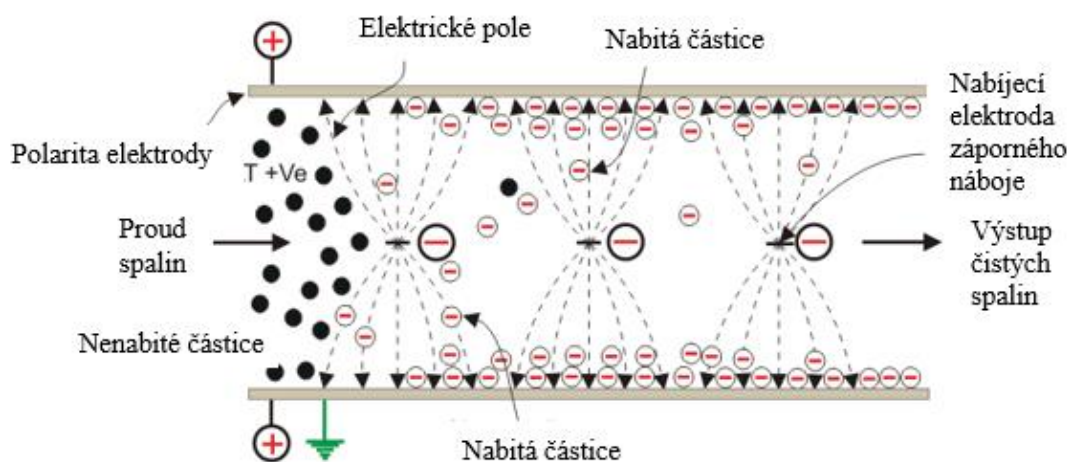
Při odstraňování suspendovaných částic mokrou metodou je využito kapaliny k extrakci kontaminantu ze spalin. Některé nečistoty jsou ve vodě rozpustné, čehož je při odlučování využito. Obecnou nevýhodou pro mokré metody je potřeba recyklace vody, použité k čištění. Jednou z široce využívaných technologií jsou mokré pračky, které mají výhodu v jednoduché

konstrukci a snadné obsluze. Využívají se ke skrápění kyselých plynů a částic s rizikem vznícení. Mokrými pračkami je možné dosáhnout až 90% čištění dehtu [22]. Pro odlučování částic je vhodnější mokrý elektrostatický odlučovač, který kombinuje klasický elektrostatický odlučovač a mokrou pračku. Zásadní výhodou při skrápění vodou oproti klasickému elektrostatickému odlučovači je menší závislost na rezistivitě odlučovaných částic [22].

2.7.3 Elektrostatické odlučování

Elektrostatický odlučovač je zařízení, které slouží k zachycování částic, obsažených ve spalinách kotlů, spalující tuhá paliva. Jeho největší výhodou oproti ostatním způsobům je možnost odlučování těch nejmenších frakcí. Zatímco ostatní výše uvedené technologie účinně zachytávají částice s větší velikostí nad 10 μm , menší frakce v řádu desítek a stovek nm účinně odlučovat nezvládají. S menšími frakcemi se elektrostatické odlučovače vypořádat dokážou, s výjimkou problematické frakce okolo 100 nm, kdy je účinnost nižší, než u ostatních frakcí [23].

Elektrostatický odlučovač se skládá ze dvou hlavních komponent, nabíjecí a usazovací elektrody a jeho princip je znázorněn na obrázku 7. Na nabíjecí elektrodu je přiváděno vysoké napětí do takové míry, že v elektrickém poli mezi nabíjecí a usazovací elektrodou vzniká korónový výboj. Ten způsobuje velmi intenzivní vznik nabitých iontů, které se přesouvají z nabíjecí elektrody na usazovací. Částice, procházející kolmo tímto proudem iontů, získávají od iontů elektrický náboj, a v důsledku silného elektrického pole se přesouvají po směru elektrického pole na usazovací elektrodu. Tam svůj náboj předají a na povrchu se zachytí. Získávání náboje souvisí s velikostí odlučované částice. Ty nejmenší částice s velikostí do 100 nm získávají náboj difúzním mechanismem, zatímco ty největší s velikostí nad 1 μm získávají náboj polarizací [24]. Z uvedeného vyplývá, že nejhůře se odlučují částice, které mají velikost mezi 100 nm a 1 μm , jelikož jsou slabě nabíjeny kombinací obou ze zmíněných mechanismů. Důležitou fyzikální vlastností částic při elektrostatickém odlučování je rezistivita, související s chemickým složením odlučovaných částic [25]. Vzhledem k tomu, že je povrch usazovací elektrody postupně nasycován usazenými částicemi, je třeba tyto částice z povrchu odstranit, aby nehrozilo, že se opět dostanou do proudu spalin [26].



Obrázek 7 Princip elektrostatického odlučovače. Převzato z [27].

V praxi se využívají dva základní typy elektrostatického odlučovače [24]. Jedním typem je konfigurace deska-drát, při které je nabíjecí elektrodou drát a usazovací elektrodou deska. V této konfiguraci je také uveden princip z obrázku 7. Mezi dvěma deskami jsou s určitou roztečí napnuté dráty. Desek je takto velké množství vedle sebe. Tato konfigurace je vhodná zejména pro odlučovací jednotky ve velkých energetických celcích, ve kterých je elektrostatický odlučovač řazený obvykle ve více stupních. Pro menší spalovací jednotky v lokálních topeništích je vhodnější jednodušší konfigurace trubka-drát. Zde je usazovací elektrodou trubka, uvnitř které je ve středu upnut drát. Tato konfigurace byla použita také v experimentálním elektrostatickém odlučovači, který byl využit pro měření v této práci.

2.8 Metody měření distribuce jemných částic

Pro získání reprezentativního vzorku, ze kterého je měřena distribuce a chemické složení částic, je potřeba nejprve provést odběr. U něj je potřeba zajistit vhodné podmínky, při kterých bude zachycováno odpovídající množství částic. Pro stanovení distribuce velikosti částic je potřeba stanovit, jak bude určována velikost dané částice. Pro vzájemné porovnání se používá průměr částice jako směrodatná veličina. Průměr se může definovat několika způsoby, například opsanou kružnicí okolo plochy průřezu, nebo vytvořením kružnice, která má stejný rozměr plochy, jako ekvivalentní kružnice. Z praktického hlediska se běžně uvažuje aerodynamický průměr. Důležitým parametrem pro zdravotní rizika je aktivní plocha povrchu. Při kontaktu částice uvnitř lidského těla je důležitý právě povrch, na kterém jsou zachyceny toxické látky.

Přístroje na měření počtu částic dané frakce jsou obvykle dimenzované na menší množství částic, než obsahují spaliny z kotle. Proto jsou pro měření velikostní distribuce částice ředěné se vzduchem. K zamezení zanesení prachovými částicemi je vzduch vyčištěn HEPA flitrem [11]. K měření počtu částic dané velikosti lze využít filtraci, optické čítače, setrvačné impaktory, aerosolové spektrometry, analyzátory elektrické mobility nebo kondenzační čítače částic. Vzhledem k tomu, že se ve všech případech jedná o citlivá zařízení s vysokou cenou, jejich použití vychází z dostupnosti na pracovištích, kde jsou částice měřeny a analyzovány.

2.9 Metoda SEM/EDX

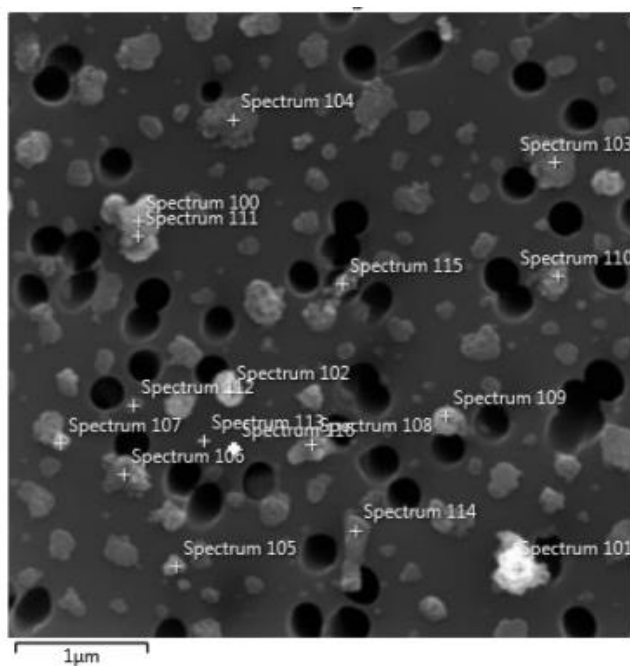
Pro analýzu jemných částic zachycených na filtru byl využit elektronový mikroskop Mira3 od firmy TESCAN, který je na pracovišti brněnské pobočky Českého hydrometeorologického ústavu. Jedná se o elektronový mikroskop SEM, tedy skenovací elektronový mikroskop, který funguje tak, že se od vzorku odrazí elektronový paprsek s energií v řádu desítek kV. Informace po odrazu jsou následně zpracovány příslušnými detektory. Díky využití elektronového paprsku je rozlišení získaného obrazu mnohonásobně jemnější než s využitím světelné mikroskopie [28].

Pro prvkovou analýzu vzorku v elektronovém mikroskopu je klíčový detektor EDX (Energy Dispersive X-ray). Při dopadu primárního elektronu na valenční vrstvu sledovaného prvku, a excitování elektronu z jeho vnějšího obalu, je vytvořena elektronová díra a současně je vyzářeno rentgenové záření se specifickou energií v řádu desetin až jednotek keV [29]. Při dopadu většího množství elektronů na vzorek s různým složením vzniká spektrální křivka, která udává intenzitu záření pro dané hodnoty energií. Z vrcholů této spektrální křivky je zřejmé, jaký prvek je zde zastoupen. Vyzářená energie je charakteristická pro každý prvek.

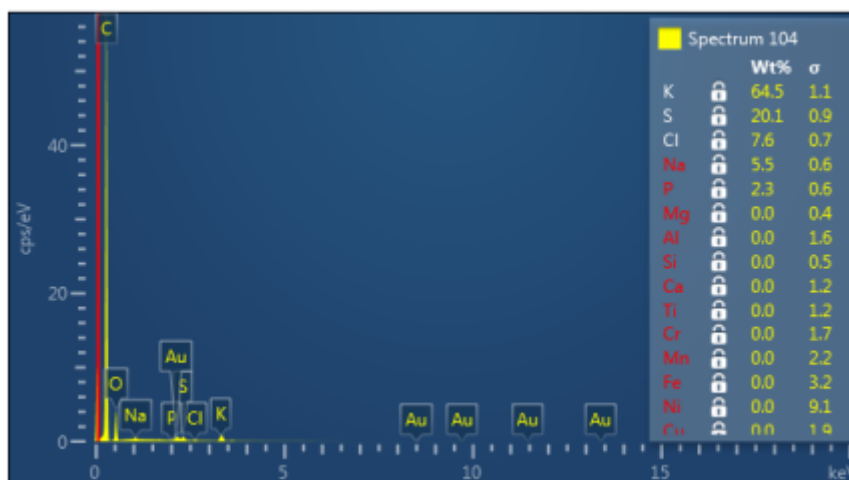
Je tím však získáno pouze zastoupení jednotlivých prvků, nikoliv složení látek. Přesnost procentuálního zastoupení prvků je zhruba v řádu procent a metoda není příliš přesná pro prvky s atomovým číslem do 10. Metoda není uvažována jako citlivá, prvky lze spolehlivě detekovat pouze při zastoupení nad 0,1 %.

Pro sledování morfologie částic se využívá detektor SE, který snímá sekundární elektrony, které jsou generovány nepružnými srážkami primárních elektronů z elektronového svazku s atomy vzorku. Tyto sekundární elektrony jsou charakteristické nízkou energií v řádu desítek eV.

Příklad prvkové analýzy [30] pomocí SEM/EDX je uveden na obrázku 9 pro částici z obrázku 8. Pro analýzu byly částice zachytávány na polykarbonátové filtry s porozitou 0,4 μm pomocí impaktoru, který zachytával pouze určité velikosti částic. Nasávané spaliny s částicemi byly ředěny vzduchem pro dosažení optimální koncentrace částic na filtru. Výsledky prvkové analýzy byly srovnávány s metodou ICP-OES. V tomto příkladu byly spalovány dřevní pelety v automatickém kotli s jmenovitým výkonem 28 kW. Z prvkové analýzy pomocí SEM/EDX vyplývá největší zastoupení uhlíku, draslíku, síry a chloru. Prvková analýza pomocí ICP-OES zjistila, seřazeno od největšího podílu, přítomnost uhlíku, kyslíku, křemíku, sodíku, draslíku, vápníku a zinku. Ze snímku je zřejmá podobná velikost částic pochytených na filtr v řádu nižších stovek nm.



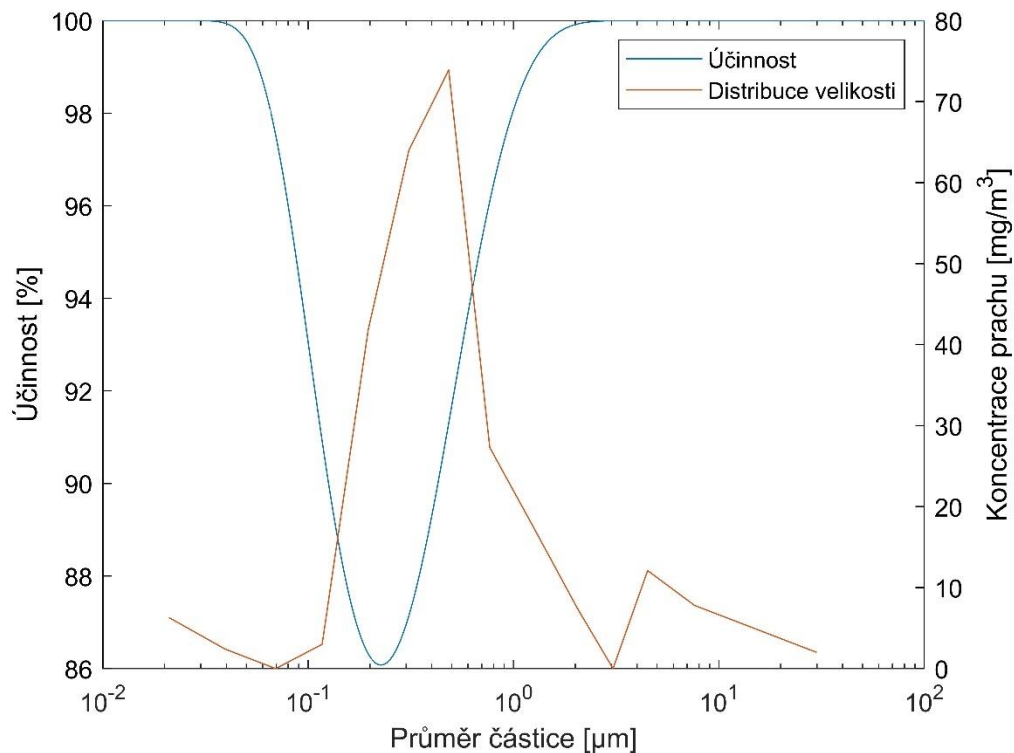
Obrázek 8 Snímek částic z elektronového mikroskopu. Převzato z [30].



Obrázek 9 Prvková analýza částice odebrané na filtr. Převzato z [30].

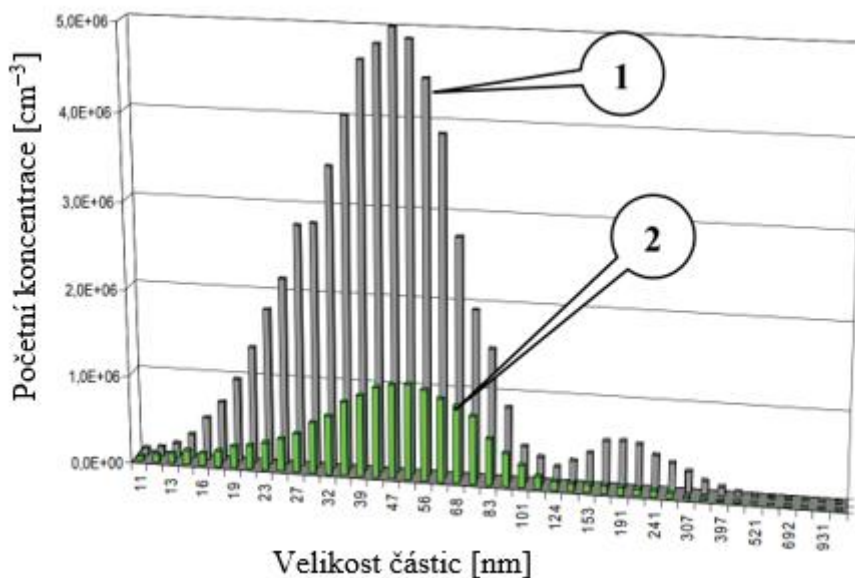
2.10 Vliv elektrostatického odlučovače na distribuci a složení částic

Jak bylo uvedeno v předcházející kapitole, dle mechanismu nabíjení částic jsou nejhůře odlučitelné částice o velikosti 100 nm až 1 μm . Při návrhu experimentálního elektrostatického odlučovače byl vytvořen výpočtový model, který vyplývá z fyzikálních vztahů pro elektrostatické odlučování, ale oproti skutečnosti obsahuje určité množství zjednodušení [31]. Na obrázku 10 je uvedena frakční odlučivost navrženého elektrostatického odlučovače v kontrastu s křivkou velikostní distribuce částic, která byla získána z měření v počáteční fázi spalování v krbu [30]. Velikostní distribuce byla měřena pomocí kaskádového impaktoru a sloužila jako vstupní hodnota do výpočtového modelu. Z uvedeného grafu je zřejmý pokles odlučivosti ve frakcích, které jsou ve spalinách zastoupeny nejvíce, což snižuje celkovou schopnost odlučovat částice. Vliv elektrostatického odlučovače byl vztažen pouze na spalování dřevních paliv z důvodu jejich nejširšího využití.

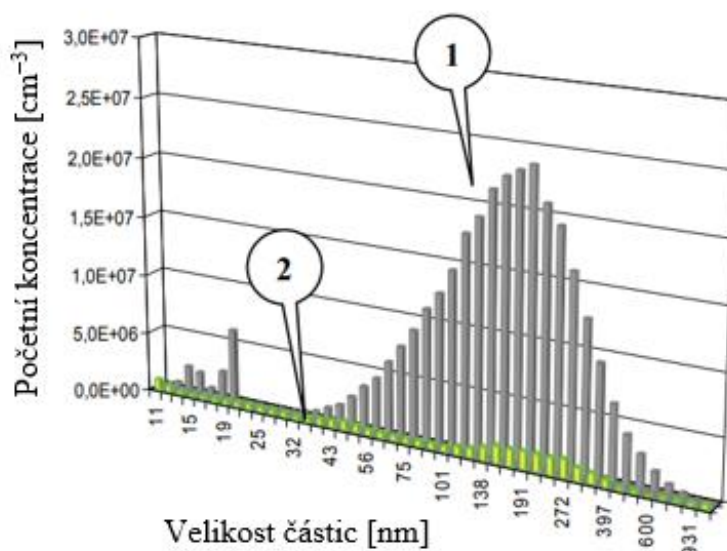


Obrázek 10 Graf frakční účinnosti EO a distribuce velikosti částic. Převzato z [31].

Bologa a kol. [17] vytvořili elektrostatický odlučovač, na kterém měřili velikostní distribuci částic v počáteční fázi spalování, viz obrázek 11, a v ustálené fázi, viz obrázek 12. Je zde zřejmý výrazný pokles zastoupení částic ve spalinách, zejména ve velikostech nad 100 nm, což je protiklad oproti tvrzení ohledně nižšího získávání náboje a odlučivosti částic mezi 100 nm a 1 μm . V dohořovací fázi, při které se vytváří menší částice, je pokles v křivce velikostní distribuce méně výrazný než u větších částic. Obtížnost odlučování elektrostatickým odlučovačem částic s velikostí do 1 μm potvrzují další autoři [32, 33, 34]. Z toho vyplývá, že částice s velikostí desítek nm sice získávají náboj snadno, ale jejich zachycení na povrchu usazovací elektrody není dostatečné.



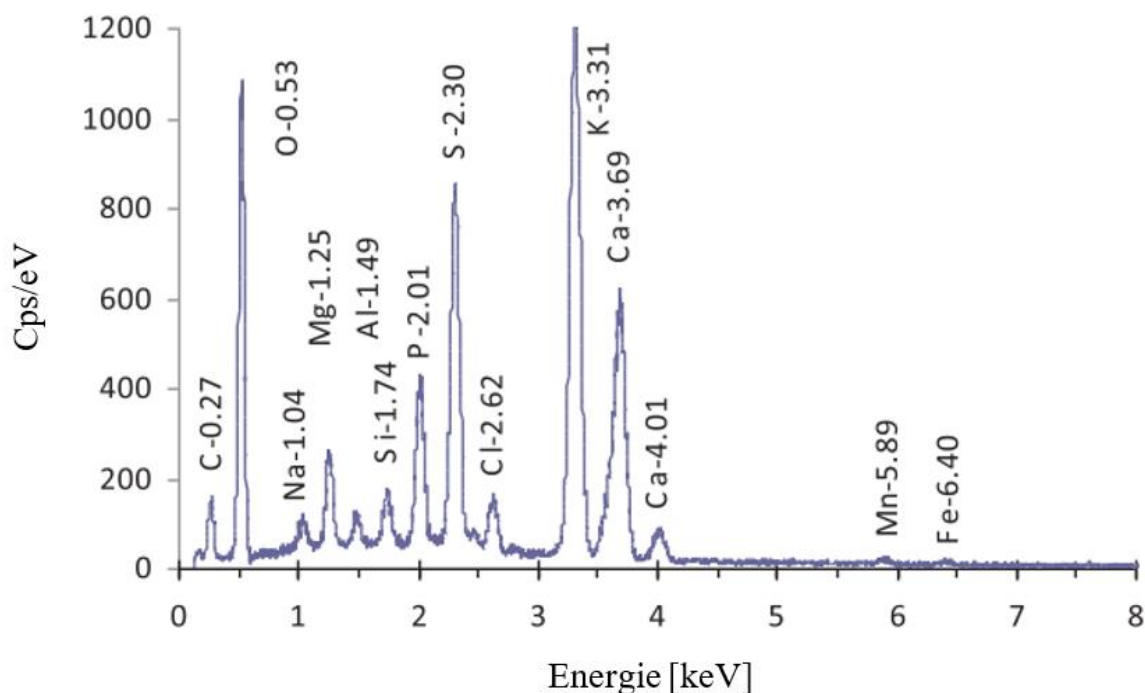
Obrázek 11 Velikostní distribuce částic v dohřívací fázi spalování dřevěných polen. 1) vypnutý EO 2) zapnutý EO. Převzato z [17].



Obrázek 12 Velikostní distribuce částic v ustálené fázi spalování dřevěných polen. 1) vypnutý EO 2) zapnutý EO. Převzato z [17].

Prvkovou analýzu částic odebraných elektrostatickým odlučovačem provedl *Jaworek a kol.* [32] a je zobrazena na obrázku 13. Vzorky částic byly odebrány z 3. stupně elektrostatického odlučovače tepelné elektrárny, která spaluje dřevní palivo. Elektrostatický odlučovač byl zavedený po předchozích sekundárních opatření k redukci znečišťujících plynů (oxid siřičitý, oxidy dusíku a uhlíku). Prvková analýza byla provedena metodou SEM/EDX. Ve srovnání oproti spalování uhlí bylo zaznamenáno menší zastoupení SiO_2 , Al_2O_3 a Fe_2O_3 . Nárůst byl zaznamenán u P_2O_5 a alkalických sloučenin CaO , MgO , Na_2O a K_2O . Chemické složení částic se v této analýze ukázalo jako důležitý parametr pro odlučování. Pro elektrostatické odlučování

je důležité znát rezistivitu odlučovaných částic, která závisí právě na chemickém složení, zejména na zastoupení uhlíku, vápníku, draslíku a sodíku.



Obrázek 13 Prvková analýza pomocí SEM/EDX částic, které byly pochytané elektrostatickým odlučovačem. Převzato z [32].

Částice odloučené elektrostatickým odlučovačem posloužily k analýze chemického složení, kterou provedl *Kronenberger a kol.* [15]. Spalování probíhalo v kotlech lokálních rozměrů, které nemají povinnost sekundárních opatření a bez zařazení elektrostatického odlučovače by byly částice vypouštěny do ovzduší. Bylo zjištěno, že odloučené částice mají vysoké zastoupení znečišťujících látek, které překračují limitní hodnoty pro komunální odpad. Ve větším množství jsou proto považovány za nebezpečný odpad. Limit je překračován v hodnotě celkového organického uhlíku, chloru, fluoru a také chromu. Dále bylo zjištěno, že v menších částicích, které jsou hůře odlučitelné, je větší koncentrace těžkých kovů oproti větším částicím. V celkovém měřítku je tak snížena účinnost pro toxické těžké kovy.

2.11 Popis přístrojové techniky na měření

V této podkapitole jsou uvedeny a popsány přístroje, které byly využity nebo je vhodné využít k měření velikostní distribuce a složení částic při spalování biomasy.

2.11.1 Kotel Ekoscroll Alfa

Zdrojem znečištění a částic ve spalinách byl při měření kotel Ekoscroll Alfa (Ekogalva, s.r.o.), který je na obrázku 14. Jeho jmenovitý tepelný výkon je 25 kW a kotel spadá do 5. emisní třídy při spalování dřevních pelet. Produkce částic v této emisní třídě odpovídá hodnotě 40 mg částic na m³, což je už tak velmi nízká hodnota, která splňuje požadavky na Ekodesign, tedy požadavek na nízkoemisní provoz kotlů podle nařízení Evropské unie 2015/1189 [35].

Na poměry kotlů spalující tuhá paliva je tak předpoklad dosažení velmi nízkých hodnot částic ve spalinách při využití elektrostatického odlučovače. Palivo, které je v kotli běžně spalováno, jsou dřevní pelety typu A1. Je však určeno také pro různé typy agropelet.



Obrázek 14 Kotel Ekoscroll Alfa 25 kW

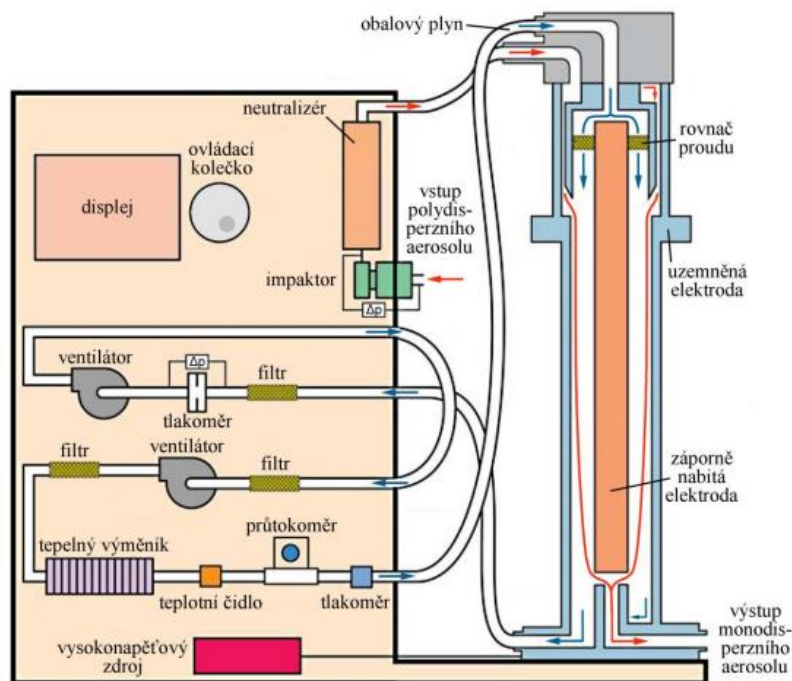
2.11.2 Zařízení na měření distribuce velikosti částic

Pro měření velikostní distribuce jemných částic je připravena k využití přístrojová technika, která je dostupná na pracovišti Energetického ústavu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně.

Primární zařízení, určené k měření velikostní distribuce částic, je elektrostatický klasifikátor *SMPS 3080 (TSI Inc.)*, dále *SMPS* [36]. Skládá se z impaktoru odlučujícího částice větší než 10 μm , nábojového neutralizátoru a jednotlivých zařízení *DMA* a *CPC*. V zařízení je možné plyn ředit, až do poměru 1:30.

Diferenciální třídič pohyblivosti částic (*DMA, TSI Inc.*)

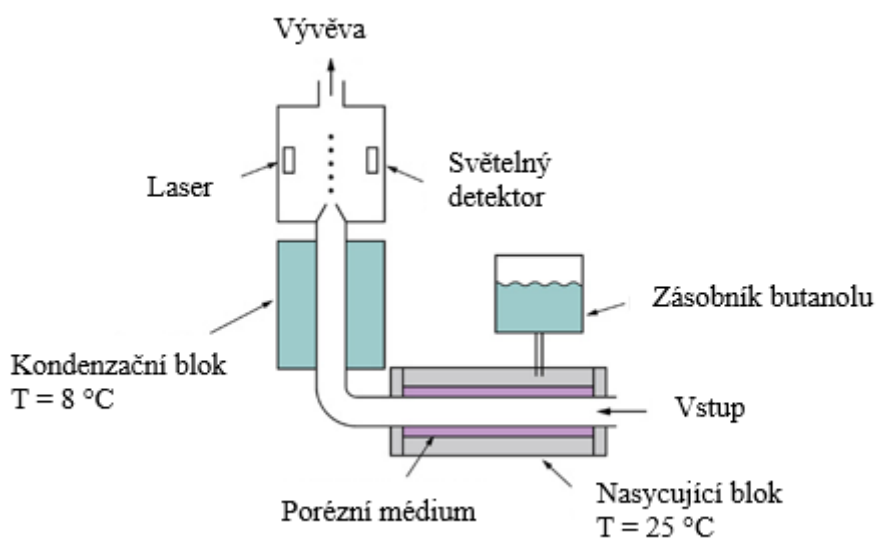
DMA je zařízení, které rozděljuje částice podle své elektrické pohyblivosti. Schéma zařízení je uvedeno na obrázku 15. V principu funguje velmi podobně, jako výše popsany elektrostatický odlučovač. Aktivní část se skládá ze záporně nabitých a uzemněných elektrod. Vysokonapěťový zdroj je regulovatelný v rozmezí od 0 do 10 kV. Do prostoru mezi nabitou a uzemněnou elektrodou prochází částice z neutralizátoru společně s nosným plynem. Po průchodu mezi elektrodami vychází z *DMA* monodisperzní aerosol, který má pro danou velikostní frakci stejnou hmotnost a elektrický náboj. Ostatní velikosti částic přitahují elektrody do prostoru odlišného výstupu, než je pro monodisperzní aerosol. Nastavením hodnoty napětí je určena velikost dané frakce a napětí je měněno pro získání celkové distribuční křivky velikosti částic.



Obrázek 15 Schéma zařízení DMA včetně impaktoru a neutralizéru. Převzato z [37].

Kondenzační čítač částic (CPC, TSI Inc.)

Do zařízení CPC vstupuje monodisperzní aerosol, tedy částice stejné velikosti, které jsou detekovány optoelektronicky. Schéma zařízení je uvedeno na obrázku 16. Z důvodu příliš malé velikosti částic k detekci optickou metodou prochází částice nasycenými parami butanolu. Následným snížením teploty částice narostou na velikost přesahující 1 μm . To je již dostatečná velikost, která zajistí měření počtu částic, které prochází mezi laserovým paprskem a fotodetektozem [38].



Obrázek 16 Schéma zařízení CPC. Převzato z [38].

Kaskádový impaktor (*Dekati HT-DLPI+*)

Dalším zařízením k naměření velikostní distribuce částic je kaskádový impaktor. Toto zařízení pracuje na principu zachytávání částic do čtrnácti kaskádovitých pater, z nichž každým patrem projdou pouze částice s určitou aerodynamickou velikostí [39]. V nejvyšším patře je největší mezera pro průchod částic. Největší se tam zastaví, zbytek prochází dál. Takto se to opakuje pro všechna ostatní patra. Rozmezí oddělovaných částic v impaktoru je 16 nm až 10 μm . Samotná analýza zastoupení frakce na každém patře probíhá gravimetricky, tedy zvážením na analytických vahách, čímž je určena hmotnost každé frakce. Impaktor je také vhodný pro zachytávání částic pro analýzu metodou SEM/EDX, zejména z důvodu nezbytného ředění spalin vzduchem k zajištění ideálního rozvrstvení částic na filtr.

Analyzátor plynu (*Horiba VA-5000*)

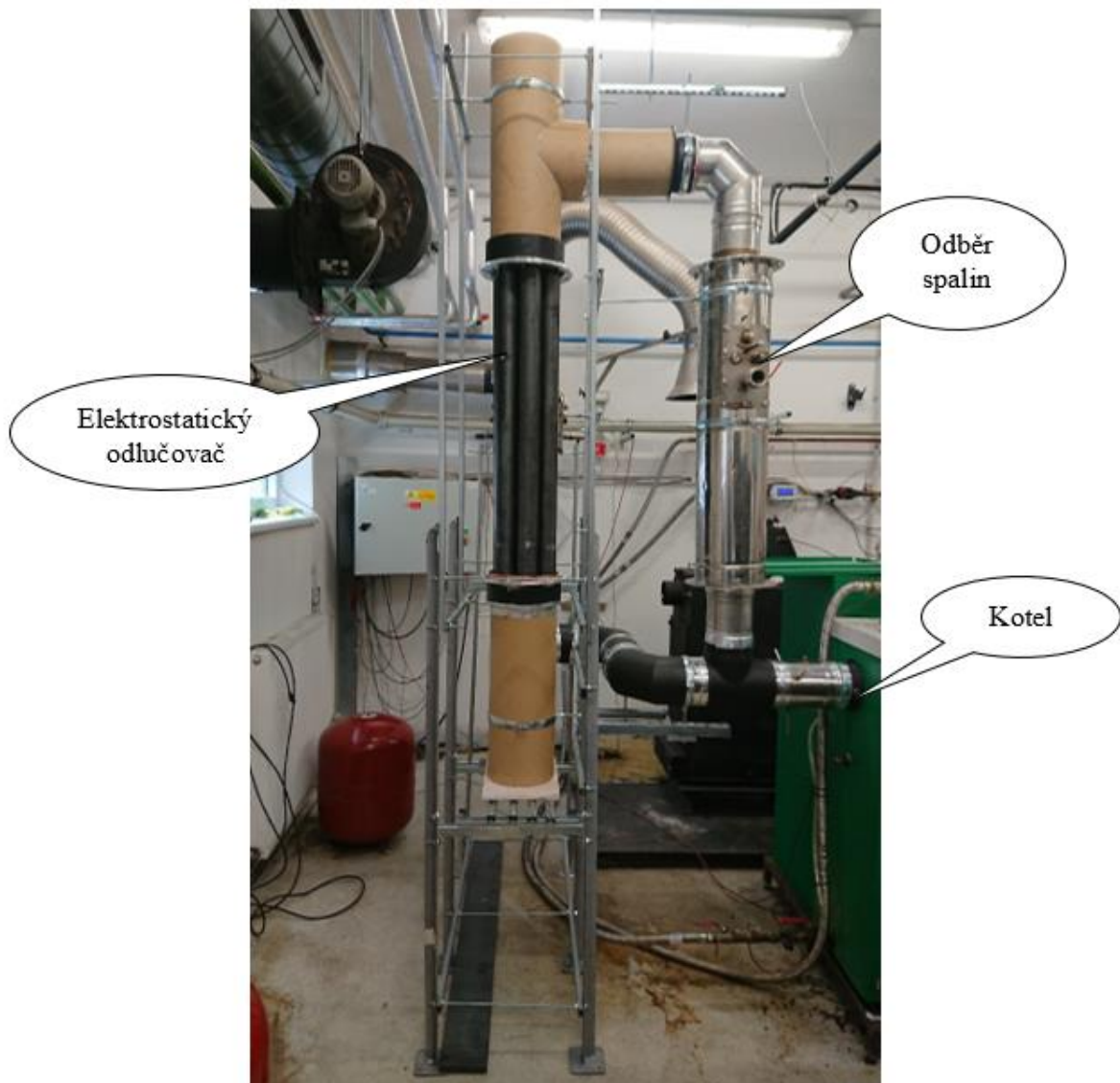
Nezbytné zařízení pro průběžnou analýzu spalovacího procesu je analyzátor plynu *Horiba VA 5000* [40]. V reálném čase je sledováno zastoupení kyslíku ve spalinách, z čehož je zjištěn přebytek kyslíku. Jeho hodnota nad 1 je zcela zásadní podmínka, aby v kotli probíhalo dokonalé spalování. Tento modulární analyzátor zaznamenává zastoupení plynů, dle zvolené konfigurace zařízení. Dostupné zařízení měří kromě kyslíku dále NO_x , SO_2 , CO a CO_2 .

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části probíhalo měření na kotli EkoScroll Alfa s jmenovitým výkonem 25 kW. Spaliny vznikající v kotli procházely kouřovodem experimentální aparatury se zavedeným elektrostatickým odlučovačem. Průběžně probíhalo měření parametrů spalování a zachytávání částic na filtr pro analýzu.

3.1 Experimentální elektrostatický odlučovač

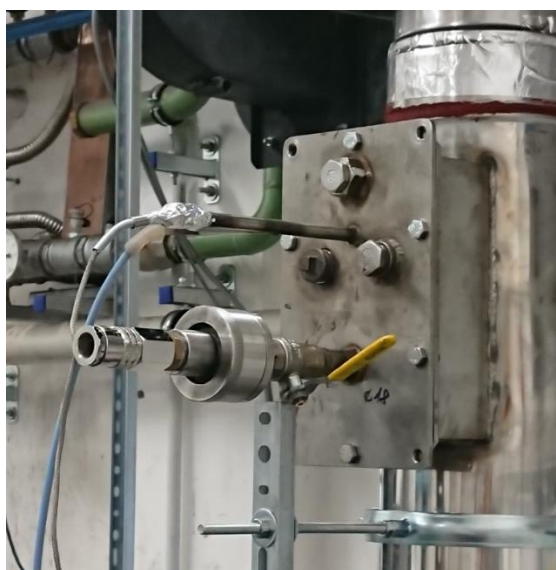
Součástí kouřovodu při měření byl experimentální elektrostatický odlučovač. Zařízení bylo vytvořeno v roce 2022 na Energetickém ústavu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně a jednalo se tak o prvotní měření částic, odebraných z kouřovodu, který tento elektrostatický odlučovač obsahuje. Experimentální elektrostatický odlučovač zařazený do kouřovodu je zobrazen na obrázku 17.



Obrázek 17 Fotografie kouřovodu s elektrostatickým odlučovačem, kde probíhalo měření.

3.2 Odběr jemných částic

Na výstupu z kotle byla zařazena trubka, ve které je odběrová kazeta. Fotografie kazety je na obrázku 18. Odběr při měření zahrnoval vstup do analyzátoru *Horiba VA 5000*, který po celou dobu měření zaznamenával teplotu spalin, a zastoupení některých látek. Konkrétně zaznamenával koncentraci O_2 , CO_2 , CO a NO_x . Dále byly odebírány spaliny vývěvou skrze silikátové filtry pro analýzu na elektronovém mikroskopu. Částice se tak na filtru zachytávaly. Totožná odběrová trubka byla zavedena také na konci kouřové cesty při vstupu do komína.



Obrázek 18 Odběrová kazeta s filtrem na výstupu do komínu

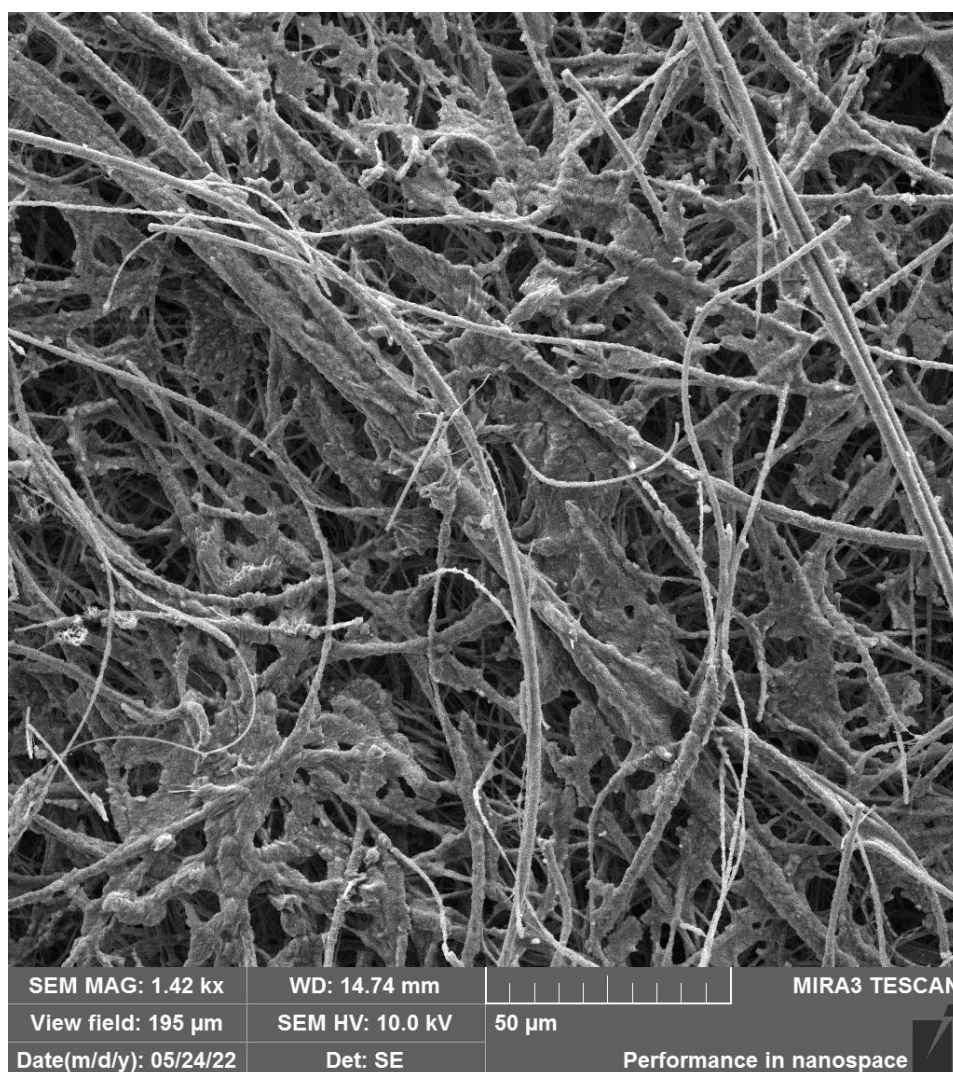
Z provozních důvodů kondenzace spalin na vnitřním povrchu kouřovodu nebylo možné zprovoznit elektrostatický odlučovač. Izolátor, který slouží k elektrickému oddělení nabíjecí a usazovací elektrody, se stal po nasáknutí vodou vodivým, což zamezilo vzniku korónového výboje, který je nezbytný pro účinné odlučování částic. Nebylo tak možné kvantitativně ověřit schopnost zařízení odlučovat jemné částice. Měření velikostní distribuce částic nebylo při měření provedeno, proto byl vliv elektrostatického odlučovače na distribuci velikosti částic a jejich chemické složení proveden pouze v teoretické části práce.

Bez spuštěného elektrostatického odlučovače procházely kouřovodem spaliny, které byly odebírány na filtr, zachytávající částice. Odběr částic na filtr probíhal na začátku a na konci kouřovodu, tedy před a za elektrostatickým odlučovačem.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Analýza filtru s částicemi

V průběhu měření a odběru částic se z důvodu kondenzujících spalin prothly oba filtry, na které byly částice zachytávány. Nebylo tak možné gravimetricky zjistit hmotnost částic zachycených na filtrech a zhodnotit vliv kondenzujících spalin na zachytávání částic. Po skončení měření byl filtr vysušen a sledován pod elektronovým mikroskopem. Ze snímku na obrázku 19 je vidět vláknitý povrch filtru, na kterém ulpívají částice v meziprostoru vláken. Z vláknité struktury povrchu filtru bylo zjištěno, že není vhodný pro prvkovou analýzu ani sledování morfologie jednotlivých částic. Na vláknech, zejména jejich spojnicích, je vidět nános částic, kterými byl filtr nasycen.



Obrázek 19 Snímek z elektronového mikroskopu filtru, zachytávající částice.

4.2 Návrh budoucího měření

Vzhledem k provoznímu důvodu kondenzace spalin nebylo možné provést měření se spuštěným experimentálním elektrostatickým odlučovačem. Po úpravách elektrostatického odlučovače, které povedou k jeho funkčnosti i za přítomnosti kondenzující vody, je doporučováno provést detailní měření částic, dle výše popsaných metod a zařízení. Klíčové je zjištění velikostní distribuce částic v odlučovaném a neodlučovaném stavu pro různé provozní podmínky a spalováním různých paliv. Pro prvkovou analýzu metodou SEM/EDX je vhodné použít polykarbonátový filtr, na který jsou částice zachytávány ze spalin zředěných vzduchem kaskádovým impaktorem [30]. Po zjištění prvkového zastoupení částic před a po odloučení je vhodné se zaměřit na vzájemnou souvislost složení a rezistivity částic. Měření na elektrostatickém odlučovači je také vhodné provést na jiných spalovacích jednotkách než je kotel EkoScroll Alfa. Méně účinné spalovací jednotky emitují do ovzduší větší množství částic a také mají vyšší teplotu spalin, což zamezí kondenzaci v kouřovodu.

5 ZÁVĚR

Spalování tuhých paliv v lokálních topeništích znečišťuje ovzduší suspendovanými částicemi, a to větším podílem než ve velkých tepelných elektrárnách a teplárnách. O proniknutí těchto částic do lidského organismu rozhoduje zejména jejich velikost. Zatímco větší částice se zachytí ve vyšších cestách dýchací soustavy, ty nejmenší pronikají hlouběji do organismu a o to více ho zatěžují. Znalost velikostní distribuce částic je proto společně s chemickým složením důležitá pro hodnocení kvality spalovacího procesu a vlivu na okolní prostředí. Emise suspendovaných částic z velkých tepelných elektráren a tepláren byly použitím elektrostatického odlučovače sníženy na minimum, z lokálních topenišť odchází spaliny do ovzduší nevyčištěné.

Při vypracování teoretické části vyplynulo, že při spalování biomasy vznikají částice, jejichž velikostní distribuce má maximum mezi 100 nm a 1 μ m. Pouze při dohořívání má nejpočetnější frakce velikost do 100 nm. Dále platí, že kvalitnější typ biomasy, kterým jsou dřevěné pelety, má křivku velikostní distribuce posunutou ke škodlivějším menším částicím. Z rešerše vyplynulo, že použití elektrostatického odlučovače významně snižuje koncentraci částic ve spalinách. Snadněji se odlučují částice s velikostí nad 1 μ m, ale i u menších částic je účinnost odlučování dostatečná ke zlepšení kvality ovzduší. Složení částic závisí na podmínkách spalování a druhu paliva. Obecně se v částicích hojně vyskytuje uhlík, křemík, alkalické kovy a kovy alkalických zemin.

V experimentální části proběhlo měření na kotli se zavedeným experimentálním elektrostatickým odlučovačem. Při měření nebyl elektrostatický odlučovač z provozních důvodů spuštěný. Na počátku a konci kouřovodu byly odebírány částice na filtr pro jeho následné sledování pod elektronovým mikroskopem. Ze snímku z elektronového mikroskopu bylo zjištěno, že filtr je nevhodný pro prvkovou analýzu. Po zprovoznění elektrostatického odlučovače je doporučeno provedení série testů, vedoucí ke zhodnocení účinnosti tohoto zařízení se změnou velikostní distribuce částic.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Výroba a spotřeba elektrické energie v roce 2019. In: *Český statistický úřad* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/xb/vyroba-a-spotreba-elektricke-energie-v-jihomoravskem-kraji-v-roce-2019>
- [2] BRZEZINA, J. *Ve městě nedýchatelno, na vesnici čistý vzduch - opravdu?* [online]. In: . [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2019/04/16/ve-meste-nedychatelno-na-vesnici-cisty-vzduch-opravdu/>
- [3] Snižování znečištění ovzduší. In: *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/energie-pro-budoucnost/zajistit-udrzitelny-provoz/zivotni-prostredi/programy-snizovani-zateze-zp/programy-snizovani-zateze-zp>
- [4] Odlučovač popílku. In: *Svět energie* [online]. [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/uhelne-elektrarny/uhelna-elektrarna-podrobne/odlucovac-popilku/fyzikalni-principy>
- [5] *Chemické složení pevných paliv s obsahem vody do 15 %* [online]. In: . [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/115-chemicke-slozeni-pevnych-paliv-s-obsahem-vody-do-15>
- [6] PARMAR, K. Biomass- An Overview on Composition Characteristics and Properties. *IRA-International Journal of Applied Sciences* [online]. 2017, 7(1), 42-51 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: doi:10.21013
- [7] ANDREOVSKÝ, Jan, Vladimíra HENELOVÁ, ed. *Příručka ochrany kvality ovzduší* [online]. Vyd. 1. Praha: Sdružení společností IREAS centrum, 2013 [cit. 2022-04-19]. ISBN 978-80-86832-77-7. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/prirucka_ochrany_kvality_ovzdusi/\\$FILE/OOO-prirucka_OPLZZ_komplet-20140408.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/prirucka_ochrany_kvality_ovzdusi/$FILE/OOO-prirucka_OPLZZ_komplet-20140408.pdf)
- [8] VICENTE, E.D a C.A ALVES. An overview of particulate emissions from residential biomass combustion. *Atmospheric research* [online]. NEW YORK: Elsevier B.V, 2018, 199, 159-185 [cit. 2022-06-01]. ISSN 0169-8095. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosres.2017.08.027
- [9] LESKINEN, J, J TISSARI, O USKI et al. Fine particle emissions in three different combustion conditions of a wood chip-fired appliance – Particulate physico-chemical properties and induced cell death. *Atmospheric environment (1994)* [online]. OXFORD: Elsevier Ltd, 2014, 86, 129-139 [cit. 2022-04-13]. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2013.12.012
- [10] KANAZAWA, S, T OHKUBO, Y NOMOTO a T ADACHI. Submicron particle agglomeration and precipitation by using a bipolar charging method. *Journal of*

- electrostatics* [online]. Amsterdam: Elsevier B.V, 1993, 29(3), 193-209 [cit. 2022-04-14]. ISSN 0304-3886. Dostupné z: doi:10.1016/0304-3886(93)90024-2
- [11] ORDOU, Niloofar a Igor E. AGRANOVSKI. Contribution of Fine Particles to Air Emission at Different Phases of Biomass Burning. *Atmosphere* [online]. Basel: MDPI AG, 2019, 10(5), 278 [cit. 2022-04-19]. ISSN 2073-4433. Dostupné z: doi:10.3390/atmos10050278
- [12] POLÁČEK, Jan, Ladislav ŠNAJDÁREK, Michal ŠPILÁČEK, Jiří POSPÍŠIL a Tomáš SITEK. Particulate Matter Produced by Micro-Scale Biomass Combustion in an Oxygen-Lean Atmosphere. *Energies (Basel)* [online]. Basel: MDPI AG, 2018, 11(12), 3359 [cit. 2022-04-19]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en11123359
- [13] JING, He, Siqin HE, Qisheng OU, Ta-chih HSIAO a Da-ren CHEN. Development of a Compact Electrostatic Nanoparticle Sampler for Offline Aerosol Characterization. *MĀPAN: journal of Metrology Society of India* [online]. India: Springer India, 2013, 28(3), 217-226 [cit. 2022-04-14]. ISSN 0970-3950. Dostupné z: doi:10.1007/s12647-013-0072-y
- [14] MOLCHANOV, Oleksandr, Kamil KRPEC a Jiří HORÁK. Electrostatic precipitation as a method to control the emissions of particulate matter from small-scale combustion units. *Journal of cleaner production* [online]. Elsevier Ltd, 2020, 246 [cit. 2021-05-04]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.119022
- [15] KRONENBERGER, Daniel a Bodo GROß. Chemical and Physical Analysis of Different Ash Fractions from Small Biomass Boilers. *Chemical engineering & technology* [online]. WEINHEIM: WILEY-VCH VERLAG GMBH, 2018, 41(11), 2159-2167 [cit. 2022-05-28]. ISSN 0930-7516. Dostupné z: doi:10.1002/ceat.201800095
- [16] CORSINI, Emanuela, Roberta VECCHI, Laura MARABINI et al. The chemical composition of ultrafine particles and associated biological effects at an alpine town impacted by wood burning. *The Science of the total environment* [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 2017, 587-588, 223-231 [cit. 2022-04-23]. ISSN 0048-9697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.125
- [17] BOLOGA, A., H. -R. PAUR a K. WOLETZ. Development and Study of an Electrostatic Precipitator for Small Scale Wood Combustion. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*. 2011, 5(2), 168-173.
- [18] PAŽOUREK, Josef. *Jemné částice emitované při reálném spalování biomasy*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2018.
- [19] SKÁCEL, František a Viktor TEKÁČ. *Analýza ovzduší*. Vydání: první. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. ISBN 978-80-7592-038-6.
- [20] Airborne particulate matter and their health effects. In: *Encyclopédie de l'Environnement* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.encyclopedie-environnement.org/en/health/airborne-particulate-health-effects/>

- [21] BULEJKO, P., V. ADAMEC a B. SCHÜLLEROVÁ. Estimation of particulate matter (PM) deposition efficiency and PM-bound metals deposition fluxes in human respiratory. *Expert Forensic Science 2018: 488-494*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Ústav soudního inženýrství, Purkyňova 464/118, 612 00 Brno, ISBN: 978-80-214-5600-6.
- [22] SINGH, R. a A. SHUKLA. A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, 29, 854-864. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.09.005
- [23] ŠTORCH, Otakar. *Průmyslová odlučovací zařízení*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1957, 322 s.
- [24] BÖHM, Jaroslav. *Elektrické odlučovače*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1977, 327 s.
- [25] WHITE, Harry J. Resistivity Problems in Electrostatic Precipitation. *Journal of the Air Pollution Control Association*. 1974, 24(4), 313-338. Dostupné z: doi:10.1080/00022470.1974.10469923
- [26] TIWARY, Abhishek, Ian WILLIAMS a Jeremy COLLS. *Air pollution: measurement, modelling and mitigation*. Fourth edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2019. ISBN 978-1-4987-1945-2.
- [27] Electrostatic Precipitator: What is it And How Does it Work?. In: *Electrical 4U* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/electrostatic-precipitator/>
- [28] ŠLOUF, M., E. PAVLOVA, D. KRÁLOVÁ, J. HROMÁDKOVÁ, H. VLKOVÁ a M. LAPČÍKOVÁ. Elektronová mikroskopie, mikroanalýza a difrakce na ÚMCH AV ČR. *Ústav makromolekulární chemie AV ČR* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <http://www.xray.cz/xray/csca/kol2010/abst/slouf.htm>
- [29] LEWIS, B.J., W.T. THOMPSON a F.C. IGLESIAS. Fission Product Chemistry in Oxide Fuels. *Comprehensive Nuclear Materials* [online]. 2012, 515-546 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080560335000422>
- [30] POLÁČEK, Ján. *Vliv provozních parametrů spalovacího procesu na koncentraci jemných částic ve spalínách biomasových kotlů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2020.
- [31] PREISLER, Lukáš. *Experimentální realizace elektrostatického odlučovače pro domovní kotel spalující dřevní paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav., 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140222>. Před zveřejněním
- [32] JAWOREK, Anatol, Tadeusz CZECH, Arkadiusz T SOBCZYK a Andrzej KRUPA. Properties of biomass vs. coal fly ashes deposited in electrostatic precipitator. *Journal of electrostatics* [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 2013, 71(2), 165-175 [cit. 2022-05-28]. ISSN 0304-3886. Dostupné z: doi:10.1016/j.elstat.2013.01.009
- [33] LIND, Terttaliisa, Jouni HOKKINEN, Jorma K JOKINIEMI, Sanna SAARIKOSKI a Risto HILLAMO. Electrostatic Precipitator Collection Efficiency and Trace Element

- Emissions from Co-Combustion of Biomass and Recovered Fuel in Fluidized-Bed Combustion. *Environmental science & technology* [online]. WASHINGTON: American Chemical Society, 2003, 37(12), 2842-2846 [cit. 2022-05-28]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es026314z
- [34] STRAND, M, J PAGELS, A SZPILA, A GUDMUNDSSON, E SWIETLICKI, M BOHGARD a M SANATI. Fly Ash Penetration through Electrostatic Precipitator and Flue Gas Condenser in a 6 MW Biomass Fired Boiler. *Energy & fuels* [online]. WASHINGTON: American Chemical Society, 2002, 16(6), 1499-1506 [cit. 2022-05-28]. ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/ef020076b
- [35] STUPAVSKÝ, V. *Směrnice o Ekodesignu pro kotle a kamna na tuhá paliva* [online]. In: . 2014 [cit. 2022-06-01]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/kotlikove-dotace/11937-smernice-o-ekodesignu-pro-kotle-a-kamna-na-tuha-paliva>
- [36] *Electrostatic Classifiers Series 3080: Operation and Service Manual*. USA: TSI Incorporated, 2009.
- [37] SITEK, Tomáš. *Ultrajemné částice generované spalovacím procesem*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2018.
- [38] Condensation Particle Counters (CPC). In: *Centre for Atmospheric Science* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <http://www.cas.manchester.ac.uk/restools/instruments/aerosol/cpc/>
- [39] HT-DLPI+. In: *Dekati* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://www.dekati.com/products/ht-dlpi/>
- [40] VA-5000 / VA-5000WM Series: Multi-Component Gas Analyzer. In: *Horiba* [online]. [cit. 2022-06-02]. Dostupné z: <https://www.horiba.com/int/products/detail/action/show/Product/va-5000-va-5000wm-series-143/>

7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Význam
CPC	Condensation Particle Counter
DMA	Differential Mobility Analyzer
EDX	Electron-Dispersive X-ray
HEPA	High Efficiency Particulate Absorbing
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectrometry
PM _X	Particulate Matter, velikost X μm
SEM	Scanning Electron Microscope
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer