VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

POROVNÁNÍ VODNÍ DÝMKY, ELEKTRONICKÝCH CIGARET A KLASICKÝCH CIGARET Z HLEDISKA EMITOVANÝCH ČÁSTIC

COMPARISON OF HOOKAH, ELECTRONIC CIGARETTE AND CLASSIC CIGARETTES IN REGARD TO EMITTED PARTICLES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. ŠTĚPÁN KRÁTKÝ
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. FRANTIŠEK LÍZAL, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015

Zadání diplomové práce
STR. 1

Zadání diplomové práce
STR. 2

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá výzkumem vybraných stylů kouření a jejich porovnáním z hlediska emitovaných částic. Aerosol vznikající při kouření představuje vážné riziko pro lidské zdraví. Pro účely práce byla zkonstruována měřicí trať v Laboratoři výzkumu aerosolů na FSI VUT v Brně a provedeny experimenty simulující proces kouření. Výsledky měření podávají objektivní informace o složení vznikajícího aerosolu, který vstupuje do plic kuřáka. Existuje spousta mýtů o škodlivosti různých typů kouření. Cílem práce je uvést tyto informace na pravou míru a položit základ pro možný další výzkum v této oblasti.

Abstract

This master's thesis is focusing on the research of chosen smoking types and their comparison in regard to emitted particles. Aerosol created during smoking represents a serious threat for human health. For purposes of this work an experimental set-up was constructed in the Laboratory of Aerosol Research at BUT FME and experiments simulating smoking process were carried out. The results of these experiments are presenting objective information about the constitution of produced aerosol which enters smoker's lungs. There are many myths about the harmful effects of different types of smoking. The goal of this work is to verify and resolve these myths and set the foundation for possible upcoming research in this area.

Klíčová slova

Aerosol, kouření, vodní dýmka, cigarety, elektronické cigarety, skenovací třídič pohyblivosti částic

Keywords

Aerosol, smoking, hookah, cigarettes, electronic cigarettes, scanning mobility particle sizer

Bibliografická citace

KRÁTKÝ, Š. *Porovnání vodní dýmky, elektronických cigaret a klasických cigaret z hlediska emitovaných částic.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Lízal, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti práce

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Františka Lízala, Ph.D. a na základě citované literatury.

V Brně 25. 5. 2015

.....

Štěpán Krátký

Poděkování

Za cenné rady, ochotu a vstřícný přístup děkuji vedoucímu práce Ing. Františkovi Lízalovi, Ph.D. Poděkování patří projektu LO1202 NETME CENTRE PLUS s finanční podporou z Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky v rámci Národního projektu udržitelnosti I. Děkuji své rodině za neustálou podporu během studia. Speciální poděkování patří Bc. Evě Lackové a Mgr. Michalu Perničkovi za poskytnutí zkoumaných předmětů nutných k uskutečnění experimentů.

OBSAH

1 Úvod **11**

2 Teoretická část **13**

2.1 Aerosol **13**

2.2 Dýchací trakt **16**

2.3 Kouření **18**

2.3.1 Cigarety **19**

2.3.2 Vodní dýmka **20**

2.3.3 Elektronické cigarety **21**

3 Měření aerosolů **23**

3.1 Mikroskopická analýza **23**

3.2 Real-time sizing **24**

3.2.1 Setrvačné vlastnosti **24**

3.2.2 Optické vlastnosti **26**

3.2.3 Elektrická mobilita **27**

3.3 Popis měřicího přístroje **27**

3.4 Aerosolová statistika **29**

4 Praktická část **31**

4.1 Souhrn zkoumaných výrobků **32**

4.2 Popis experimentu **33**

4.2.1 Primární částice **34**

4.2.2 Vzorkovací komora **35**

4.2.3 Jedno potáhnutí **37**

4.3 Výsledky měření **39**

4.4 Porovnání výsledků **50**

5 Závěr **55**

Použité zdroje **56**

1 Úvod

Výzkum částic v ovzduší vzrůstá od průmyslové revoluce v 18. století, kdy se začal zjišťovat jejich vliv na životní prostředí a veškeré organismy, které se v něm nachází. Během rozkvětu průmyslu se rapidně zvýšila produkce antropogenních částic vypouštěných do atmosféry. Jejich neblahé vlivy, například na lidské zdraví, byly důvodem k zavedení regulací produkce částic, emisních limitů a prohlubování výzkumu v této oblasti.

Tyto částice, ať už tuhé či kapalné, se označují jako "částicový materiál" (particulate matter - PM) a jejich suspenze, nejčastěji s atmosférickým vzduchem, se nazývá aerosol. Tento termín byl poprvé použit v meteorologii roku 1920 jako obdoba termínu hydrosol (suspenze pevných částic v kapalině). Jedná se o dvoufázovou soustavu, kde jednou fází jsou částice a druhou plyn, který je obklopuje. S aerosoly se setkáváme všude kolem nás; částice se do vzduchu dostávají různými způsoby a ovlivňují viditelnost, srážky, klima i lidské zdraví.

Původ částic může být přírodní, jako jsou například sopky, lesní požáry, prachové bouře či mořský příboj. Nebo jsou produkovány lidskou činností, nejčastěji spalováním fosilních paliv v automobilech, domácích kotlích, elektrárnách či teplárnách. Drtivá většina aerosolů vzniká mořským sprejem z vodních ploch. Antropogenní aerosoly tvoří přibližně 10 % veškerých aerosolů v naší atmosféře [1].

Parametry popisující aerosol jsou velikost, tvar, koncentrace a chemické složení částic. Mezi aerosoly se řadí heterogenní směsi s velmi širokým spektrem velikostí částic od 1 nm do 100 μm, což je poměrově srovnatelné s velikostí zrnka máku oproti horkovzdušnému balónu. Vlastnosti aerosolu závisí převážně na velikosti částic. Částice přírodního původu mají obvykle větší průměr než antropogenní částice ze spalovacích procesů apod. Z hlediska lidského zdraví je velikost částic klíčová pro místo, kde se v dýchacím traktu částice usadí.

Depozice částic v dýchacím traktu člověka je předmětem výzkumu mnoha vědeckých stanovišť, byla také cílem dizertační práce školitele [2]. Částice ve vdechovaném aerosolu, které jsou větší než 10 μm, se usazují v horních cestách dýchacích. Tyto částice díky své velikosti rychle sedimentují působením silových polí. Částice o velikosti od desítek nanometrů do 10 μm se při vdechnutí nejčastěji usadí v průduškách a průdušnici. Dýchací trakt je opatřen obrannými mechanismy, které brání zanášení plic. Řasinkový epitel vystýlá velkou část dýchacího traktu a slouží k zachycování částic a filtraci vdechovaného vzduchu.

Nejproblémovější jsou malé částice, které při vdechnutí pronikají hluboko do plic. Částice menší než 1 μm jsou díky své hmotnosti stále ve vznosu a dostávají se až do plicních sklípků. Produktem spalovacích procesů jsou mimo jiné ultrajemné částice (1 až 100 nm). Nanočástice blízké rozměrům samotných molekul vzduchu mohou projít membránou, kde dochází k výměně kyslíku a oxidu uhličitého, a dostat se do krve, odkud pak mohou ohrožovat i jiné orgány [3]. Malé částice, které se neusadí v plicích nebo se nedostanou do krevního oběhu, jsou opět vydechovány.

Tato diplomová práce se zabývá výzkumem částic produkovaných kouřením tabákových výrobků a jejich náhrad v podobě elektronických cigaret. Popularita vodních dýmek vzrůstá během posledních let převážně mezi mladistvými, kteří věří v jejich menší zdravotní závadnost oproti klasickým cigaretám. Stejně tak kouření elektronických cigaret je uživateli považováno za méně nebezpečné než cigarety. Cílem této práce je srovnání velikostních spekter a koncentrací aerosolů vznikajících při různých typech kouření.

Karcinogenní aerosoly jsou nejnebezpečnější formou znečištění vzduchu. Obranné a čistící mechanismy dýchacího traktu nejsou schopné zabránit proniknutí jemných částic do plícních sklípků či krevního oběhu. Vědecké studie prokazují, že neexistuje bezpečné množství částic ve vdechovaném vzduchu. Karcinogeny způsobují trvalé mutace DNA, infarkty a předčasnou smrt. Studie zahrnující přes 300 000 lidí z devíti evropských zemí odhalila, že zvýšením koncentrace částic menších než 10 μm o každých 10 $\mu g/m^3$ se zvýšil také výskyt rakoviny plic o 22 %. Pro aerosol s jemnými částicemi (menšími než 2,5 μm) bylo zvýšení až o 36 % na 10 $\mu g/m^3$ [4]. Výsledky této diplomové práce by měly sloužit k lepšímu pochopení zdravotních dopadů jednotlivých stylů kouření.

2 Teoretická část

2.1 Aerosol

Aerosol je dvoufázová soustava, jednu část tvoří částice a druhou obklopující vzduch. Samotné částice představují pouze velmi malou část směsi. Vlastnosti aerosolu, jako viskozita a hustota, jsou tudíž velice blízké čistému vzduchu [5]. Částice větší než 10 μm podléhají gravitačním silám na rozdíl od malých částic, ty menší než 1 μm mohou zůstat v atmosféře i několik týdnů. Když je vzduch přesycený vodní parou, začne voda kondenzovat na povrchu částic a ty jsou deštěm smývány, dochází tak k čištění atmosféry.

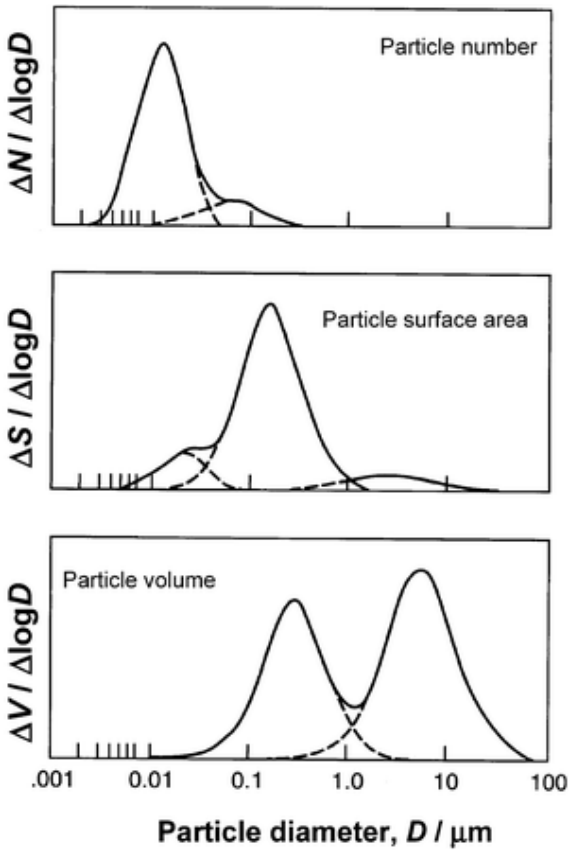
Obr. 1 – Příklady běžných aerosolů.

Aerosol se může vyskytovat v různých podobách. Suspenze kapalných částic vytváří opar či mlhu, pevné částice představují například prach nebo dým. Nejčastěji je aerosol směsí jak tuhých tak kapalných částic, mezi další příklady aerosolů patří kouř, oblaka, smog, sprej, aj (viz obr. 1). Speciální kategorií jsou bioaerosoly, kam patří mimo jiné spory, pyly, viry a bakterie. Nejvyšší hustotu pravděpodobnosti výskytu v atmosféře mají částice o velikosti kolem 0,3 μm, lidské oko je schopno rozlišit až částice větší než 50 μm. Pokud vzroste koncentrace částic v soustavě do té míry, že hustota vzniklého aerosolu je větší než 1 % hustoty vzduchu, pak má aerosol zřetelně definované hranice a jeví se jako oblak nebo mrak, který má velmi odlišné objemové vlastnosti než řidší aerosol [6]. Přítomnost aerosolů výrazně ovlivňuje také optické vlastnosti atmosféry a tepelnou bilanci země díky změně odrazivosti. Viditelnost při čistém vzduchu bez částic je až 340 km, ale už při mírné koncentraci aerosolu (20 $\mu g/m^3$) je viditelnost snížena na 43 km.

Při řešení aerosolů je potřeba vzít v úvahu i plyn, který částice obklopuje a značně ovlivňuje jejich chování. Klade odpor proti pohybu částic v závislosti na jejich velikosti, hlavně v případech, kdy se velikost částic blíží vzdálenosti molekul plynu. Ultrajemné částice podléhají Brownovu pohybu způsobenému kolizemi s rychlými molekulami obklopujícího plynu.

Velikost částic aerosolu je determinující pro zvolení vhodných fyzikálních zákonů k popisu jejich chování. Jednotlivé částice dostatečně charakterizuje tzv. ekvivalentní aerodynamický průměr. Drtivá většina částic má nepravidelný tvar a pro jejich popis se tato veličina zavádí. Nepravidelná částice je nahrazena koulí o hustotě 1000 kg/m^3, která má stejný objem a rychlost usazování jako příslušná částice.

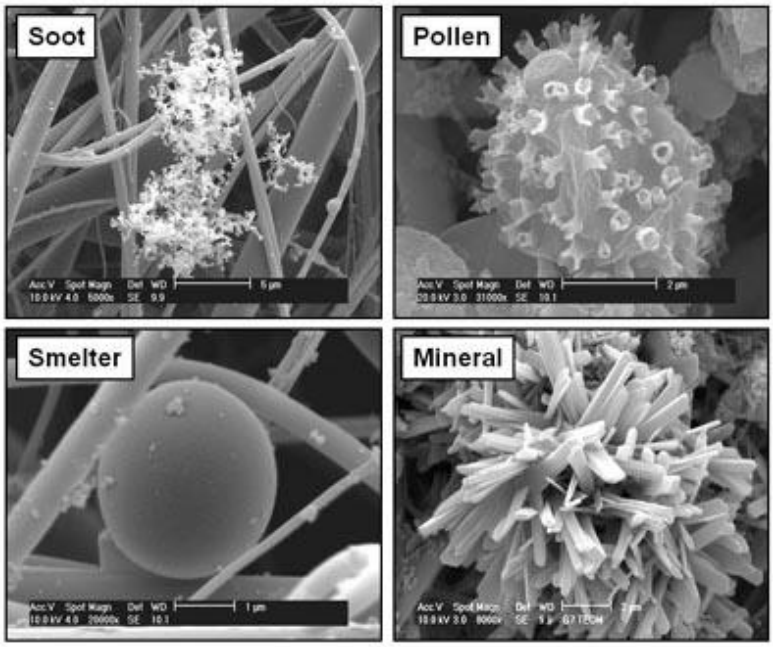
Aerosoly jsou většinou polydisperzní systémy s širokým spektrem velikostí částic. Pokud se v systému vyskytují částice s jednou převažující velikostí, označuje se aerosol jako monodisperzní. Polydisperzní soubor částic je složité a nevhodné popisovat výčtem charakteristik jednotlivých částic. Pro tento účel se určují velikostní distribuce částic pomocí vhodných statistických rozdělení dat. Všechny úvahy zahrnující velikostní distribuci aerosolu vychází z předpokladu, že částice jsou kulového tvaru. Rozpětí velikostí částic v měřeném aerosolu je rozděleno na vhodný počet intervalů, ke kterým jsou přiřazeny počty částic v každém z intervalů. Stejně jako počet částic se mohou provést distribuce povrchu, objemu či hmotnosti částic aerosolu, které mohou být v určitých situacích vhodnější. Normální distribuce mají v případě aerosolů nesymetrický tvar a díky škále velikostí, která může mít rozpětí několik řádů, se s výhodou využívá logaritmicko-normální rozdělení velikostí částic. Log-normální rozdělení sedí nejlépe pro aerosoly z jednoho zdroje. Místo velikosti částic jsou na horizontální ose vyneseny logaritmicky transformované velikosti x=log(D). [5]



Obr. 2 – Rozložení velikostí částic z hlediska počtu, povrchu a objemu částic. [7]

Distribuce částic atmosférického aerosolu je trimodální. Na obrázku 2 jsou tři grafy znázorňující počet, celkový povrch a objem částic atmosférického vzduchu. První graf představuje také první, nukleační mód. Nejvíce částic má rozměry kolem 20 nm, jedná se převážně o tzv. primární částice, které jsou formovány kondenzací horkých par z vysokoteplotních procesů (svařování, hoření, tavení kovů, aj.). Primární částice jsou většinou kulového tvaru, velmi reaktivní a s ostatními částicemi vytváří řetězovité agregáty, případně koagulují s částicemi akumulačního modu. Maximum druhého modu se pohybuje kolem 300 nm. Částic se zde vyskytuje mnohem méně a pro zvýraznění akumulačního modu je vhodné částice uspořádat podle jejich povrchu (viz graf 2, obr. 2). 95 % veškerých částic je menších než 1 μm [7], pro popis větších částic se používá jejich objem (viz graf 3, obr. 2). Objem či hmotnost vzrůstá se třetí mocninou průměru částic a třetí mód proto představují hrubé částice aerosolu, které vznikají především mechanickými procesy.

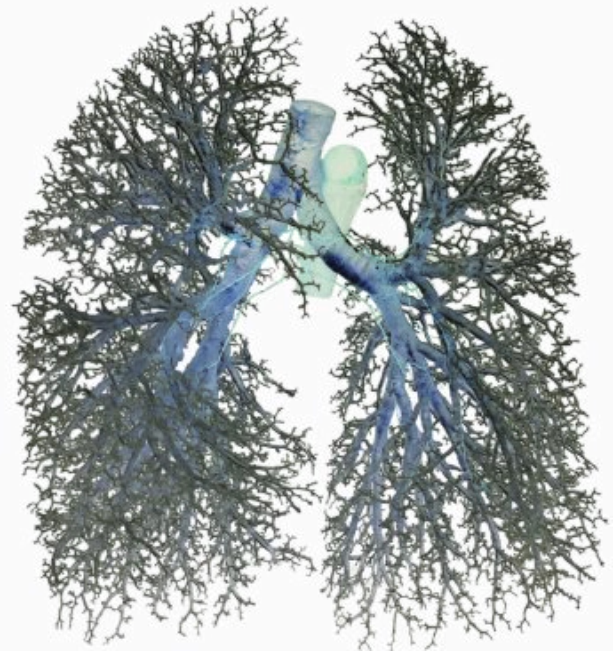
Částice akumulačního modu vznikají kondenzací plynů nebo vody na již existující částice nebo koagulací částic nukleačního modu. Částice aerosolu mají, na rozdíl od molekul vzduchu nebo velkých částic, tendenci ulpívat na površích, se kterými přijdou do styku vlivem van der Waalsových nebo elektrostatických sil. Díky Brownovu pohybu a vnějším silám dochází často ke styku částic a jejich koagulaci. Výsledkem jsou shluky částic zvané aglomeráty a v aerosolu časem dochází k poklesu koncentrace a zvýšení velikosti částic v systému. Další proces zvětšující velikost částic je kondenzace plynů a par, kdy jemné částice slouží jako kondenzační jádra. Opačný proces vypařování vede opět ke zmenšování částic. Do atmosféry se dostává neustále velké množství různorodých částic (viz obr. 3) tvořící aerosol.



Obr. 3 – Čtyři snímky z elektronového mikroskopu zachycující částice z různých zdrojů. Vlevo nahoře saze, vpravo pyl, vlevo dole produkt tavicí pece, vpravo minerální částice. [8]

2.2 Dýchací trakt

Řešení aerosolů a jejich dopadů na lidské zdraví vyžaduje znalosti široké škály vědních oborů, jedním z nich je i anatomie dýchacího systému. Nejdůležitější funkcí respiračního systému je výměna kyslíku a oxidu uhličitého v plicích. Jak bylo zmíněno dříve, dýchací trakt slouží rovněž k filtraci, zvlhčení a ohřátí vstupujícího vzduchu.



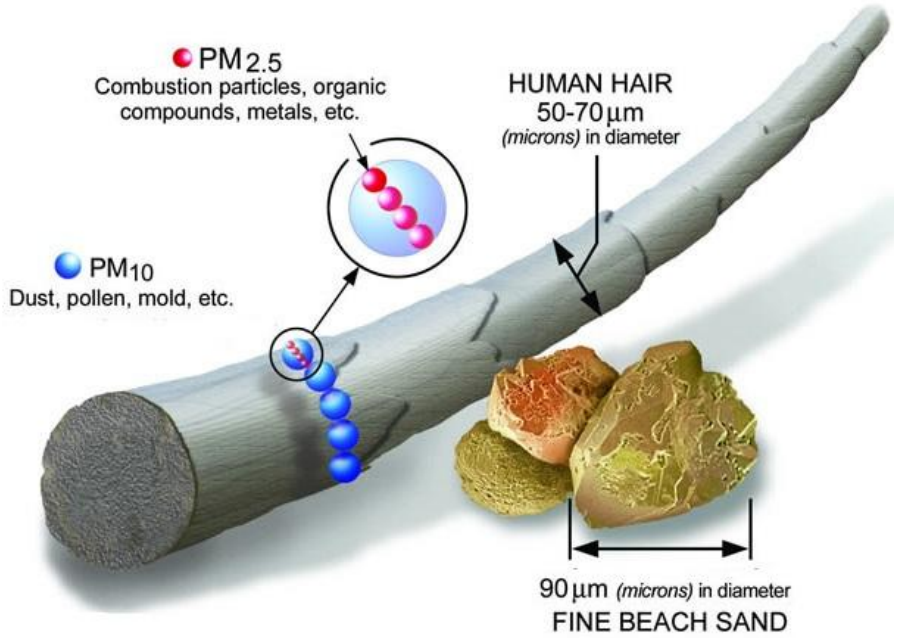
Obr. 4 – Model vnitřní struktury plic.

Dýchací trakt je rozdělen na horní a dolní cesty dýchací. Nosní a ústní dutina, hltan a hrtan tvoří horní cesty dýchací. Průdušnice, průdušky a průdušinky rozvádí vzduch do plícních sklípků a společně představují dolní cesty dýchací. Rozvody vzduchu se několikanásobně nesouměrně větví. Dolní cesty dýchací mají 23 generací větvení, které ústí do plícních váčků. Struktura plic připomíná obrácený strom (obr. 4). Výzkum depozice částic v plicích je díky komplexnosti zkoumaných orgánů velmi složitý.

Na konci normálního dechu jsou plíce tvořeny z 80 % vzduchem, z 10 % krví a zbylých 10 % zaujímá tkáň. Tato tkáň musí zprostředkovat dostatečně rozsáhlou plochu a tenkou membránu pro difúzní procesy, aby docházelo ke správné výměně vzduchu. Celková plocha, kde dochází k výměně vzduchu, je u dospělého muže až 140 m^2. Plíce jsou tvořeny velmi komplexní tkání se 40 různými druhy buněk a vysoce specializovanými nebuněčnými komponenty. [3]

Podle zdravotního působení aerosolu na člověka byly definovány velikostní skupiny s označením PM_x (Particulate Matter), kde x je aerodynamický průměr částic v mikrometrech. Vzorek aerosolu označený PM_x je definován jako takový soubor, kdy částice o aerodynamickém průměru x mikrometrů jsou v odběrovém zařízení (cyklon, impaktor, odstředivka) separovány s účinností právě 50 %, přičemž částice menší jsou ve vzorku obsaženy s téměř 100% pravděpodobností a naopak částice větší než x s pravděpodobností blížící se nule. [6]

Existují tři označení aerosolů a to PM_{10} pro respirabilní aerosoly, $PM_{2,5}$ zahrnuje pouze jemné částice a PM_1 pro označení ultrajemné frakce aerosolu. Hranice 2,5 μm odděluje mód jemných a hrubých částic (minimum v distribuční křivce). Běžná koncentrace v městském vzduchu je 10 000 částic/cm^3. Jeden člověk vdechne denně asi 100 miliard částic, z nichž polovina se usadí v plicích. Aerosoly hrají obrovskou roli ve zdraví člověka.



Obr. 5 – Porovnání velikostí částic aerosolu vůči velikosti lidského vlasu a zrnka jemného plážového písku.

Malé částice vznikající ze spalovacích procesů často obsahují rakovinotvorné látky a fungují jako přenašeče choroboplodných zárodků. Na obrázku 5 je poměrové srovnání velikostí částic, obrázek vytvořen Agenturou pro ochranu životního prostředí (EPA). Částice kolem 2,5 μm v průměru způsobují většinu optických atmosférických jevů (př. smog, červánky).

Poznatky o aerosolech však mají i své využití ve spoustě oborů od výrobního po farmaceutický průmysl. Aerosoly mohou být využity k léčbě onemocnění jako je astma, kdy se inhalují léčiva ve formě aerosolu. Struktura aerosolu je uzpůsobena tomu, aby se částice léku usadily na potřebném místě v dýchacím traktu.

2.3 Kouření

Kouření lze zjednodušeně popsat jako činnost, při které je srze spalování tabáku uvolňován a následně vdechován vznikající aerosol. Nejrozšířenější formou tabáku ke kouření jsou cigarety. Kouření má dlouhou historii a tradici. Původně byl tabák součástí náboženských obřadů a rituálů, historie sahá až 1000 let před náš letopočet [9]. Do Evropy se rozšířil až po objevení Ameriky, kde byl dlouhou dobu používán původními obyvateli. Užívání tabáku má také jistý společenský význam. V 19. století až do začátku století dvacátého bylo kouření považováno za symbol společenské úrovně. S rozvojem technologie na počátku 20. století byla prokázána škodlivost kouření spojená zejména se vznikem karcinomu plic a podobných onemocnění. Právě emitované částice vznikající při kouření představují rizika poškození dýchacích cest. Z těchto důvodů je v mnoha zemích omezen prodej či kouření tabákových výrobků zákonem. Zdravotnické organizace vedou rozsáhlé kampaně upozorňující veřejnost na škodlivost a návykovost kouření. Přesto zůstává kouření velmi populární činností. Citát z knihy o historii druhé světové války od W. Churchilla:

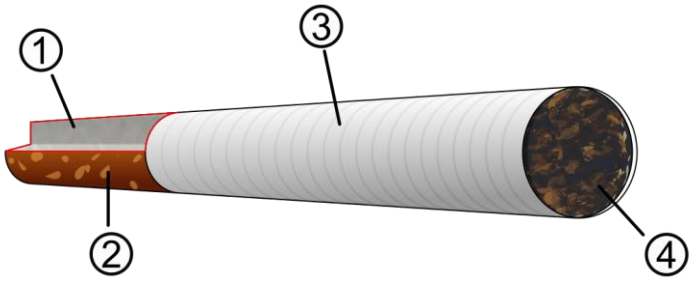
„Dočetl jsem se, že kouření doutníků škodí zdraví. Tak jsem se rozhodl, že přestanu číst.“ – Winston Churchill. *The Gathering Storm*. London, 1946

Hlavním důvodem oblíbenosti kouření je psychoaktivní látka obsažená v tabáku. Nikotin je obranný jed tabákových rostlin proti škůdcům. Při spalování tabáku se nikotin uvolňuje a dostává se v plicích do krve a následně do mozku. Nikotin působí na centrální nervovou soustavu a navazuje pocit uvolnění a relaxace. Člověk může při prvním užití či při předávkování nikotinem prodělat stav nevolnosti vlivem přiotrávení se touto látkou. Postupem času si však lidského tělo na látku zvykne a hrozí nebezpečí vybudování závislosti.

Existuje široká škála tabákových výrobků, různé odrůdy a úpravy tabáků, v podobě cigaret, doutníků či pro kouření dýmek. Tato práce se zabývá třemi styly kouření. Užívání klasických cigaret je porovnáváno s kouřením vodní dýmky a užíváním moderních elektronických cigaret. Škodlivost kouření patří k dnes již obecně známým faktům, ale rozdíl mezi vybranými styly kouření je stále nejasný.

2.3.1 Cigarety

Existuje více než 70 druhů tabákových rostlin, ze kterých jsou vyráběny tabákové produkty [9]. Vysušené tabákové listy jsou potřebně nařezány a upraveny pomocí příměsí pro konzervaci či ochucení. V případě cigaret je poté tabák srolován do tenkého papíru a často opatřen přibližně dvoucentimetrovým částicovým filtrem (viz obr. 6). Zapálením tabáku je poté vznikající aerosol vtahován přes filtr do ústní dutiny.



Obr. 6 – Konstrukce klasické cigarety (1 – filtr z acetátu celulózy, 2 – krycí papír filtru, 3 – rolovací papír, 4 – tabák).

Cigaretový kouř je komplexní a dynamický aerosol skládající se z tisíců různých komponentů, z nichž přibližně 158 má toxické vlastnosti [10]. Struktura cigaretového kouře je již poměrně dobře definována díky dlouholetému výzkumu. Pro charakterizaci škodlivosti cigaret se na balení umisťují informační štítky značící obsahy dehtu, nikotinu a oxidu uhelnatého.

Obsah nikotinu se pohybuje od 0,1 do 1,8 mg na jednu cigaretu. Jedná se o psychoaktivní látku obsaženou v tabáku. Nikotin zvyšuje krevní tlak a srdeční činnost, navazuje stav relaxace. Podobně jako kofein v kávě je nikotin stimulant, zvyšuje pozornost a pomáhá soustředění [11]. Nikotin není definován jako karcinogen, ale má také neblahý vliv na lidské zdraví. Mimo jeho návykovost poškozuje také cévy, riziko infarktu apod.

Dehet není přímo obsahem tabáku, ale vzniká až po jeho zapálení. Cigarety se vyrábí s předepsaným obsahem dehtu 0,5 až 25 mg na jeden kus. Tér neboli dehet je černá, hustá, olejovitá kapalina charakteristického zápachu. Je to směs několika set chemických látek, obsahuje převážně látky, které jsou považované za toxické nebo karcinogenní. Oxid uhelnatý rovněž není obsahem tabáku, ale produkt nedokonalého spalování. Hodnoty udávané na balení cigaret se pohybují v rozmezí 1 až 16 mg na jednu cigaretu. Mezi další škodliviny spojené s kouřením cigaret patří například arsen, toluen, glycerol či polonium.

2.3.2 Vodní dýmka

Za vynálezce vodní dýmky se považují Peršané [9]. Následovalo rozšíření do Arábie, na Střední východ, do Asie a do severní Afriky. Oblíbená je rovněž v Severní Americe a Evropě. Vodní dýmka je populární obzvlášť mezi mladými, kouření většinou probíhá ve větším počtu lidí. Princip užívání vodní dýmky se zásadně liší od cigaret. Základem je až 2 metry velká vodní dýmka a speciální tabák.

Obr. 7 – Konstrukce vodní dýmky (výška 70 cm).

Konstrukce standardní vodní dýmky je zachycena na obr. 7. Základem dýmky je skleněná váza či tzv. karafa, která se naplňuje vodou. Voda slouží k filtraci větších částic aerosolu a ochlazení kouře. Tělo vodní dýmky má dvě hlavní části, první je trubka vedoucí kouř z korunky do vázy, kde je spodní část trubky ponořena do vody. Aerosol procházející vodou je nasáván do druhé části těla, tzv. srdce dýmky, což je rozšířená část těla opatřená ventilem a otvorem pro hadici. Korunka je keramická miska s dírami ve dně, do které je umístěn kouřený tabák. Při užívání dýmky se přes naplněnou korunku umístí děrovaný kryt z alobalu (viz obr. 8). Na alobal je poté umístěn žhavý uhlík sloužící jako zdroj tepla umožňující vznik aerosolu.

Struktura tabáku pro vodní dýmky se velice liší od cigaretového tabáku. Tabák bývá smíšený s melasou a olejem, je vlhký, mazlavý a při zahřání vzniká hutný dým. Příklad tabáku do vodní dýmky je na obr. 9. Tyto tabáky bývají často aromatizované s velkou škálou různých příchutí. Existují také netabákové (bylinné) směsi do vodních dýmek.

Obr. 8 – Korunka vodní dýmky připravená k použití.

Většina dostupných tabáků do vodní dýmky postrádá informační štítky o složení tabáku. Některé výrobky mají štítky indikující procentní obsah nikotinu a dehtu (například 0,0 % dehtu, 0,05 % nikotinu). Z vědecké studie vyplývá, že tyto popisy jsou často nepřesné či nepravdivé [12]. Dehet není přímo složkou tabáku, jeho obsah je proto uváděn 0 %, i když při kouření vodní dýmky značné množství dehtu vzniká. Stejně tak dochází k nepřesnému značení obsahu nikotinu, ten se běžně pohybuje okolo 2 mg na gram tabáku.

Obr. 9 – Struktura tabáku do vodní dýmky.

Vlivem zavádějících informací (či jejich absenci) na obalech tabáku do vodní dýmky je užívání dýmky spojeno se spoustou mýtů a polopravd. Někteří uživatelé věří v menší zdravotní dopady díky filtraci kouře skrze vodní lázeň apod.

Na rozdíl od cigarety nedochází u vodní dýmky přímo ke spalování tabáku. Proces spalování u cigaret probíhá přibližně při 900 °C, ale tabák vodní dýmky je zahříván žhavým uhlíkem o teplotě zhruba 450 °C. Složení vznikajícího aerosolu je tudíž velmi odlišné u vodní dýmky.

2.3.2 Elektronické cigarety

Poslední kategorií zkoumaných stylů kouření jsou elektronické cigarety. Jedná se o jednoduché zařízení vytvořené k nahrazení kouření cigaret. Patent na elektronickou cigaretu byl vydán v roce 2003 v Číně [13]. Česká republika se stala po Austrálii, Turecku, Číně a Izraeli pátou zemí na světě, kde se elektronická cigareta začala distribuovat. V roce 2009 byl schválen zákon definující elektronickou cigaretu a vymezující její používání a prodej: zákon č. 305/2009 Sb. o opatřeních k ochraně před škodami působenými tabákovými výrobky, alkoholem a jinými návykovými látkami. Podle tohoto zákona je elektronická cigareta definována jako: „výrobek napodobující funkci tabákového výrobku nebo tabákové potřeby, jehož účelem je vdechování nikotinových výparů, včetně příslušenství takových výrobků.“.

Během posledních let došlo k značnému rozšíření a vývoji tohoto zařízení. Místo tabáku se v případě elektronické cigarety používá tekutá náplň známá jako e-liquid. Existuje velké množství různých náplní, základní dělení je podle obsahu nikotinu v jednom mililitru. Hodnoty nikotinu se pohybují až do 24 mg/ml. K dostání jsou také náplně bez nikotinu.

Náplně elektronických cigaret jsou většinou založeny na glycerolu či propylenglykolu, ve kterých je nikotin rozpuštěn. Dále jsou přidávána tabáková nebo potravinářská arómata. V závislosti na receptuře výroby může náplň obsahovat také jisté procento vody nebo alkoholu. Podobně jako v případě tabáku do vodní dýmky dochází často k porušení chemických zákonů pro označování výrobků.

Obr. 10 – Popis částí moderní elektronické cigarety.

Moderní elektronické cigarety se čím dál méně podobají klasickým cigaretám oproti prvním generacím zařízení, které měly záměrně podobný tvar jako cigarety. El. cigareta se skládá ze tří hlavních částí (viz obr. 10). První částí je baterie (Li-ion akumulátor) včetně řídící a regulační elektroniky. Druhou částí je atomizér, zodpovědný za odpaření náplně. Baterie napájí atomizér obsahující topnou spirálu z odporového drátu, která je v kontaktu se savým materiálem napuštěným e-liquidem. Poslední částí elektronické cigarety je patrona (cartrige) s náplní a náustek.

V elektronické cigaretě tedy nedochází ke spalování, ale k odpařování tekuté náplně do el. cigaret. Teplota procesu dosahuje přibližně 200 °C. Produkovaný aerosol bývá někdy nepřesně označován uživateli za páru a samotný proces kouření je nazýván „vaping“. Lidé přecházejí na elektronické cigarety z klasických cigaret převážně za účelem skoncování se závislostí na nikotinu či z přesvědčení o nižších zdravotních dopadech.

Díky relativně krátké existenci elektronických cigaret stále probíhají výzkumy a testování kvality, bezpečnosti a účinků e-cigaret. Problémem je absence poznatků o dlouhodobých dopadech užívání elektronických cigaret. Zdravotnické organizace proto nemohou doporučit užívání těchto zařízení, dokud nebude jasný jejich vliv na lidské zdraví. Složení aerosolu vznikajícího užíváním tohoto zařízení nemá tak velký výskyt karcinogenů jako cigaretový kouř. Při atomizaci však stále vzniká velké množství jemných částic, těžkých kovů či jiných toxických látek [14].

3 Měření aerosolů

Následující kapitoly jsou zaměřeny na způsoby měření a analýzy aerosolů. Podle potřeb experimentu můžeme zkoumat velikost, počet, tvar, hmotnost či složení částic. Nejdůležitějším zkoumaným parametrem charakterizujícím chování aerosolu je velikost částic, které jsou v něm obsaženy. V okolním vzduchu většinou existuje určité rozložení velikostí částic. Výsledkem měření aerosolů bývá nejčastěji hmotnostní či početní zastoupení částic v různých velikostních třídách. K popisu aerosolu bylo dříve používáno měření TSP (Total Suspended Particulate), hmota částic byla však silně dominována velkými částicemi prachu apod. V roce 1987 proto provedla Americká agentura EPA (Environmental Protection Agency) revizi normy o kvalitě vzduchu a zavedla ukazatel znečištění PM_{10} (Particulate Matter) pro respirabilní složku aerosolu, tedy částice menší než 10 μm. Další výzkum však odhalil větší provázanost chorob dýchacího traktu s jemnými částicemi menšími než 2,5 μm. Díky tomu došlo v roce 1997 k zavedení regulací pro $PM_{2,5}$. V případě zaměření na ultrajemné částice je zkoumáno PM_1 (< 1 μm), pro tuto složku však zatím nejsou zavedeny regulace a limity. [15]

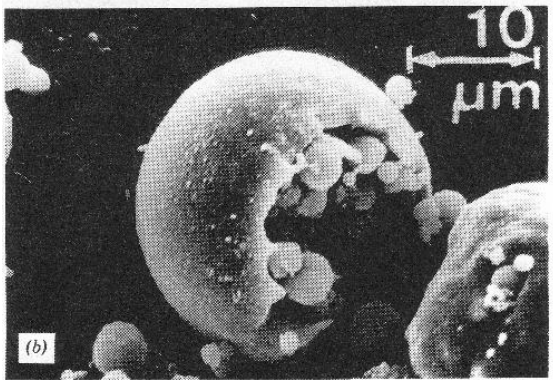
Při měření aerosolů zkoumáme vlastnosti nebo chování částic při různých podmínkách. Měřicí přístroje pracují na principech využívajících rozdílných typů vlastností a chování charakterizujících měřené částice. Přesnost a rozlišení měření závisí na použité metodě. Neexistuje žádná metoda, kterou by bylo možné měřit částice v celém spektru velikostí běžného aerosolu díky velkému rozpětí (1 nm až 100 μm). Pokud je potřeba měřit částice v širokém rozmezí velikostí je nutno uplatnit kombinaci měřicích způsobů či přístrojů. Dvěma hlavními způsoby měření a výzkumu aerosolů jsou mikroskopická analýza a „okamžité třízení částic“ (real-time sizing).

3.1 Mikroskopická analýza

Jedná se o pomalou a obtížnou metodu, kterou můžeme prakticky měřit jen malé vzorky. Zkoumají se většinou částice či vlákna, které ulpí na vhodných filtrech. Filtrace je jednoduchý, univerzální a ekonomicky výhodný způsob zachytávání částic aerosolů.

Nejběžnější jsou světelné mikroskopy využívající bíle světlo. Jako zdroj se používají také lasery, tyto mikroskopy zaostřují na úzkou optickou rovinu. Elektronové mikroskopy pak využívají místo proudu fotonů proud elektronů a skleněné čočky jsou nahrazeny elektromagnetickými "čočkami" (cívky), které vytváří vhodně tvarované magnetické pole. Elektrony mají podstatně

menší vlnovou délku než světlo a tím drasticky zvyšují rozlišovací schopnost mikroskopů. Na obrázku 11 je zachycena emitovaná částice z uhelné tepelné elektrárny, snímek byl vytvořen rastrovacím elektronovým mikroskopem (Scanning Electron Microscope).



Obr. 11 – Snímek částice popela z uhelné tepelné elektrárny pořízeny elektronových mikroskopem. [5]

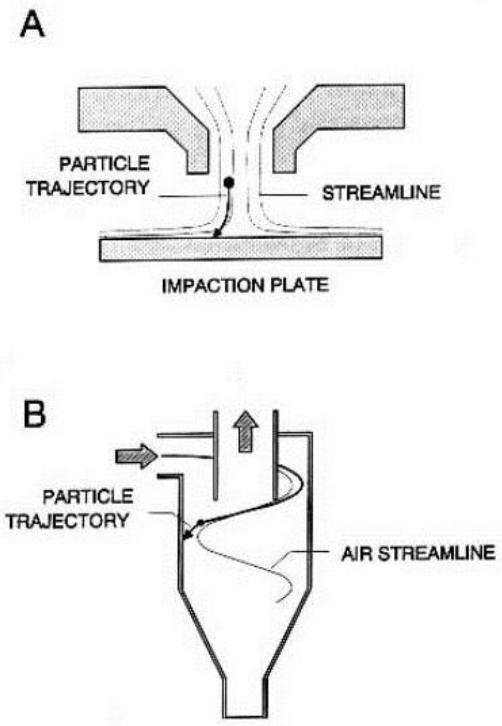
3.2 Real-time sizing

Velikost částic je tímto měřením získána na základě jejich chování. Metody umožňují získání téměř okamžitých *in-situ* informací o měřeném aerosolu. Výsledkem je velké množství dat specifikující aerosol. Analýza těchto dat může být poměrně komplikovaná a předmětem interpretačních chyb. Některé měřicí přístroje je také potřeba kalibrovat pro zaručení přesných výsledků. Hlavní principy, které se používají pro třízení částic aerosolu využívají setrvačných či optických vlastností nebo využívají chování částic v elektrickém poli.

3.2.1 Setrvačné vlastnosti částic

Čím jsou částice větší, tím vyšší mají setrvačnost. Velké částice jsou méně ovlivňovány okolními změnami. Mezi známé jednoduché zařízení využívající setrvačných vlastnosti patří např. impaktor, cyklon či odstředivka. Parametr popisující chování částice je relaxační čas (τ[s]), což je míra schopnosti částice přizpůsobit se změnám rychlosti toku (proudění). Používá se také Stokesovo číslo jako indikátor podobnosti chování částic při obtékání překážek, jedná se o poměr brzdné dráhy částice k charakteristickému rozměru (Stk -> 0: částice kopírují směr proudění, Stk -> ∞: částice odporují změnám ve směru jejich pohybu).

Impaktory mají rozsáhlé uplatnění v měření aerosolových částic. V první polovině 20. století byly tyto zařízení běžně používány k vzorkování prachu a vyhodnocování stavu prostředí. Schéma impaktoru (A) a cyklonu (B) pro odlučování velkých částic z aerosolu je na obrázku 12. Částice větší než daný průměr jsou zachytávány na impakční desce nebo na stěnách cyklonu.

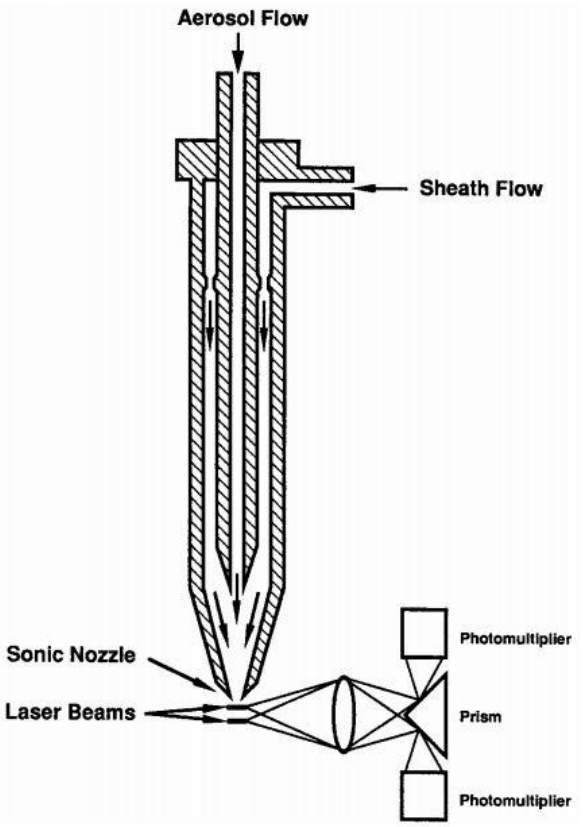


Obr. 12 – Schéma impaktoru (A) a cyklonu (B). [16]

$$Stk = \frac{\rho_p d_p^2 U C_c}{9\eta D_j} \; [-] \qquad (1)$$

Výpočet Stokesova čísla pro impaktor je uveden v rovnici 1, kde ρ_p je hustota částic, d_p je průměr částic, U je rychlost proudění, C_c je Cunninghamův korekční faktor na skluz (koriguje rovnici pro klouzání plynu podél povrchu), η je dynamická viskozita plynu a D_j je průměr výustky. Pro gravimetrickou analýzu aerosolu se používají tzv. kaskádové impaktory. Vyjimatelné impakční desky jsou zváženy před a po měření, kdy aerosol prochází sérií impaktorů se zmenšujícím se průměrem výustek.

Kaskádové impaktory jsou jednou z nejpoužívanějších metod pro zjišťování hmotnostní distribuce aerosolu. Získání výsledků je však poměrně pracné. Pro rychlejší měření se používají aerodynamické čítače částic (APS – Aerodynamic Particle Sizer, obr. 13). Tyto přístroje jsou vhodné pro měření velikostí částic od 0,5 do 10 µm. Proud aerosolu je tryskou urychlen a snímán dvěma paralelními laserovými svazky. Malé částice (< 0,3 µm) se pohybují stejně rychle jako plyn přičemž větší částice s vyšší setrvačností jsou urychleny pomaleji. Svazky jsou od sebe vzdáleny 100 µm a je měřen čas, za který částice projde mezi svazky. Tento čas je úměrný velikosti částice.



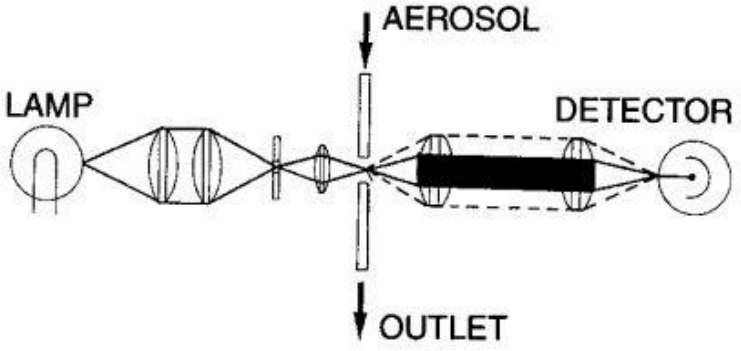
Obr. 13 – Schéma zařízení snímající čas letu částic a určuje jejich distribuci.[16]

3.2.2 Optické vlastnosti částic

Optické vlastnosti aerosolů jsou příčinou spousty úžasných atmosférických jevů, jako jsou červánky nebo duha. Zároveň také snižují viditelnost, což je obzvláště znatelné v oblastech s vysokým znečištěním vzduchu. Když světelná vlna o dané vlnové délce narazí na objekt, může dojít k několika efektům. Vlna může být objektem absorbována, kdy dochází k přeměně její energie na teplo, může se od objektu odrazit nebo jím projít. Častěji však dochází k tomu, že na objekt dopadá záření v širokém spektru frekvencí. V závislosti na druhu materiálu poté dochází k selektivní absorpci, odrazu či průchodu různých vlnových délek záření.

Na povrchu částic aerosolu dochází k odrazu a rozptylu světla. Viditelnost v atmosféře závisí na množství částic, které se nachází mezi pozorovatelem a pozorovaným objektem. U velmi vzdálených objektů či při značném znečištění je počet částic dostatečný pro výrazný pokles v rozlišitelnosti objektů. Část světla putující k pozorovateli je částicemi rozptýlena mimo zorné pole pozorovatele a podobně část světla dopadající na místo pozorovaného objektu je odražena směrem k pozorovateli. Vzdálené objekty proto vypadají světlejší.

Vědci Rayleigh a Mie vytvořili dvě teorie užívané pro popsání intenzity rozptylu světla. Rayleigho teorie je omezena pouze na malé částice (podstatně menší než vlnová délka světla), u kterých není rozptyl světla funkcí úhlu dopadu světla. Rozptyl světla na větších částicích už závisí na úhlu dopadu světla a popisuje jej Miova teorie rozptylu.



Obr. 14 – Jednoduché zařízení pro měření rozptylu světla částic.[16]

Částice větší než vlnová délka světla je tudíž možno měřit pomocí jejich optických vlastností, pokud jsou částice menší než přibližně 0,5 μm. V případě menších částic je potřeba použít přístroje, které zvyšují průměr částic kondenzací par na jejich povrchu tak, aby bylo možné je měřit. Schéma zařízení měřící rozptyl světla na částicích aerosolu na obrázku 14.

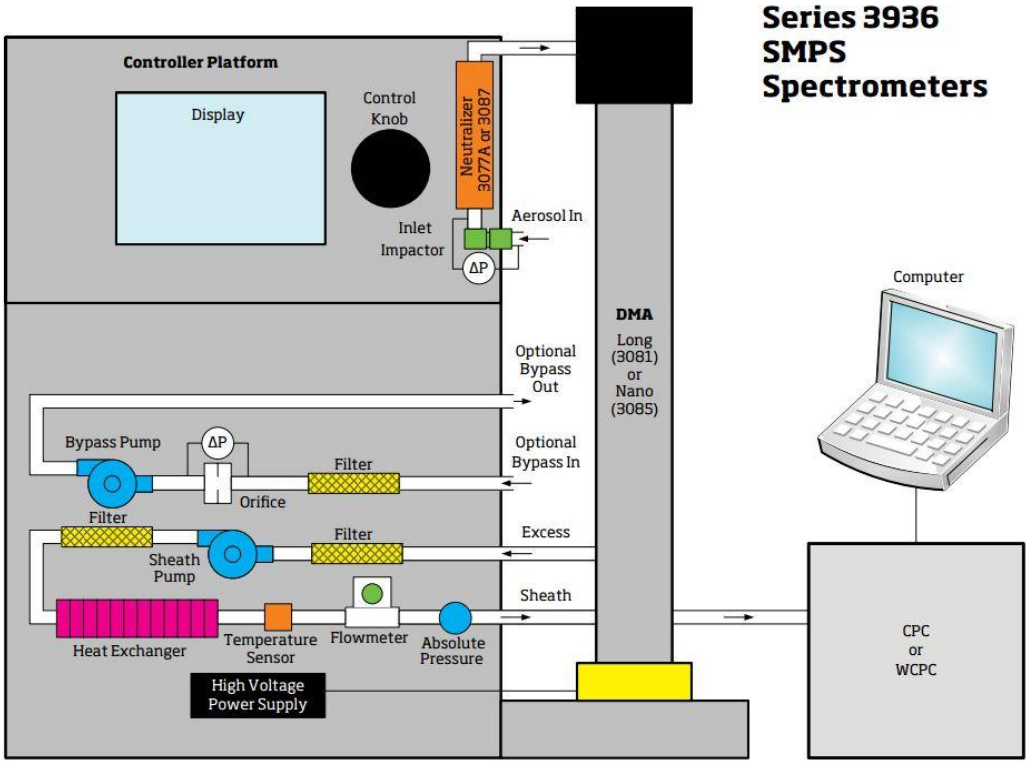
3.2.3 Elektrická mobilita částic

Na nabité částice v elektrostatickém poli působí určitá síla závisející na náboji částice a pole. Pro měření aerosolů existují přístroje, které využívají působení této síly pro třídění částic. Kladně nabité částice jsou přitahovány k záporně nabité elektrodě a naopak. Malé částice jsou poté přitahovány či odpuzovány rychleji než velké částice.

Měření částic emitovaných při kouření bylo rovněž provedeno přístrojem využívající těchto vlastností částic. Jedná se o skenovací třídič pohyblivosti částic (Scanning Mobility Particle Sizer). Popis funkce a nastavení přístroje se nachází v následující kapitole.

3.3 Popis měřicího přístroje

V rámci diplomové práce proběhlo měření vybraných tabákových výrobků pomocí přístroje SMPS 3936 společnosti TSI. Rozsah měřených velikostí přístroje je od 5 nm do 1 µm, prakticky se tedy měří emise PM_1. Přístroj má vysoké rozlišení a přesnost měření, využívá se například v nanotechnologii, atmosférickém měření, měření spalovacích procesů, testy filtrů či toxikologii. SMPS se skládá z několika důležitých komponentů, schéma přístroje je na obrázku 15.

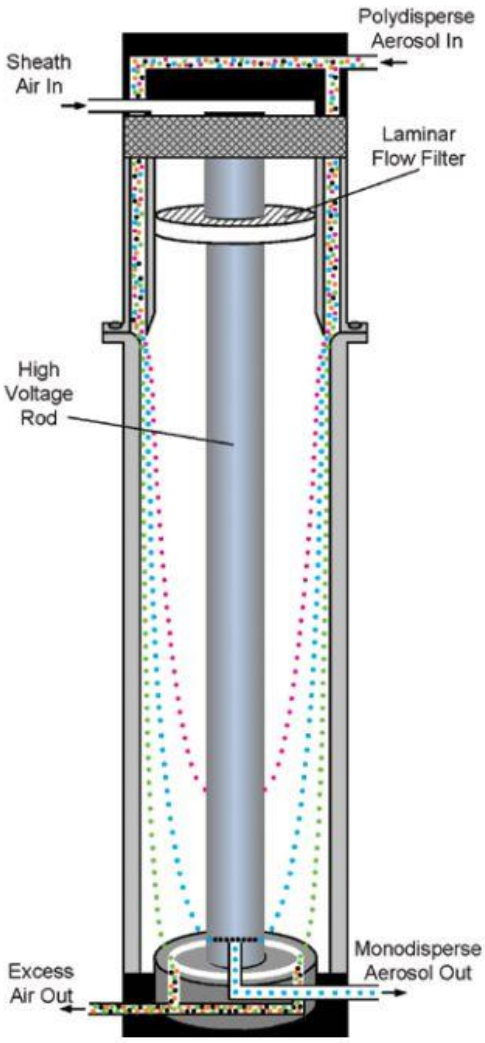


Obr. 15 – Konstrukce měřicího zařízení SMPS 3936 (TSI).

Přístroj je složen z elektrostatického třídiče (Differential Mobility Analyzer 3080), kondenzačního čítače částic (Condensation Particle Counter 3775) a aerosolového neutralizátoru (Neutralizer 3087).

Měřený aerosol vstupující do SMPS prochází impaktorem, který slouží k odstranění velkých částic z aerosolu pro limitování možných chyb měření. Dále prochází aerosol bipolárním iontovým neutralizátorem s kryptonovým jádrem, který generuje kladné a záporné ionty a přiřazuje částicím elektrický náboj.

Nabité částice aerosolu poté vstupují do diferenciálního analyzátoru pohyblivosti částic (DMA), schéma na obrázku 16. DMA tvoří dva soustředné válce, které slouží jako vnitřní a vnější elektroda. Vnější elektroda je uzemněná a na vnitřní straně je určité napětí (0 až 10 000 V), které vytváří elektrické pole v mezikruží.



Obr. 16 – Řez diferenciálním analyzátorem pohyblivosti (DMA).

Ve spodní části DMA je kruhová štěrbina, kterou prochází částice do kondenzačního čítače částic (CPC). Vnitřní elektroda DMA je obvykle záporně nabitá, neutrální částice nejsou ovlivněny elektrickým polem a proudí svisle dolů společně s laminárním proudem, záporně nabité částice jsou odpuzovány od vnitřní elektrody a záporné částice naopak k elektrodě přitahovány. Výsledné síla působící na částice od proudu vzduchu a elektrického pole pak způsobí, že pouze částice o velmi podobných velikostech projdou úzkou kruhovou štěrbinou do CPC.

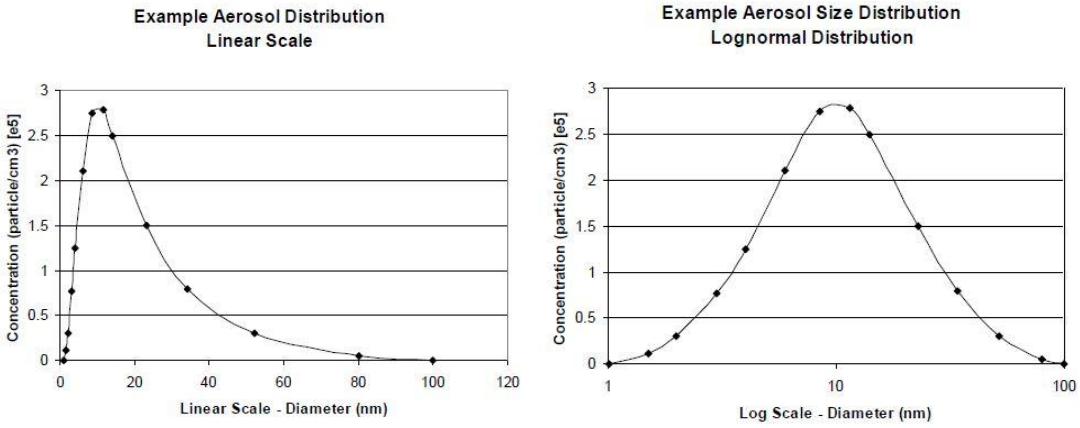
Při měření se mění napětí na vnitřní elektrodě DMA a tím se také mění velikost částic monodisperzního aerosolu vstupujícího do CPC. Kondenzační čítač částic slouží k sečtení procházejících částic pomocí rozptylu světla. Díky malým rozměrům částic je potřeba zvětšit jejich velikost, k tomu se používá CPC s butanolem (případně vodou). Aerosol prochází pórovitým materiálem, který je v kontaktu s pracovní tekutinou. Materiál se zahříván pro zajištění přítomnosti par (~37 °C pro butanol),

zvlhčený aerosol poté prochází kondenzátorem (~10 °C). Částice pak slouží jako kondenzační jádra a narostou na rozměry 10 až 12 µm, což umožňuje jednoduché měření například rozptylu světla (CPC 3775).

3.4 Aerosolová statistika

Pro práci s měřicím přístrojem byl společností TSI vyvinut software Aerosol Instrument Manager. Program umožňuje nastavení průběhu měření a vykreslení okamžitých výsledků. Výsledky měření zahrnují spoustu dat a informací o měřeném aerosolu, tato kapitola se zaměřuje na definici nejdůležitějších charakteristik aerosolu.

Standardní statistické metody používají normální rozdělení, které často není vhodné pro měření aerosolů. S výhodou se v těchto aplikacích používá log-normální distribuce (viz obr. 17). Neexistuje teoretický důvod, proč je pro rozložení aerosolů vhodnější log-normální rozdělení. Log-normální statistiky nejsou velmi používané, proto mohou být matoucí pro ty, kteří s nimi přicházejí do styku poprvé.



Obr. 17 – Příklad stejných dat vykreslených normálním (vlevo) a log-normálním (vpravo) rozdělením.

Log-normální rozdělení je vhodné, pokud je rozsah dat (rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou) na vodorovné ose vyšší než 10. Pokud se rozsah dat malý, log-normální distribuce aproximuje normální rozdělení.

Mimo grafické znázornění složení aerosolu jsou v Aerosol Instrument Manager programu spočítány taky ostatní důležité hodnoty jako celkové koncentrace, medián průměru (CMD) a směrodatná odchylka měření (GSD). Částice jsou programem rozděleny do velikostních intervalů (až 64 intervalů u SMPS 3936).

U normálního statistického rozdělení se nejčastěji pro popis používá geometrický průměr hodnot, který je u log-normálního rozdělení nahrazen mediánem souboru (Count Median Diameter).

$$CMD = \sqrt[N]{D_1^{n_1} D_2^{n_2} D_3^{n_3} \cdots D_N^{n_N}} \qquad (2)$$

Rovnice 2 znázorňuje výpočet hodnoty CMD, kde D_i je střední velikost částice dané velikostní třídy, n_i je počet částic o průměru D_i a N je celkový počet všech částic ve všech intervalech (velikostních třídách).

Standardní směrodatná odchylka měření (σ) je u log-normálního rozdělení nahrazena geometrickou směrodatnou odchylkou (σ_g či GSD – Geometric Standard Deviation). Tato odchylka je vždy větší než 1.

$$\log \sigma_g = \sqrt{\frac{\Sigma n_i (\log D_i - \log D_g)^2}{N - 1}} \qquad (3)$$

Algoritmus výpočtu geometrické směrodatné odchylky měření je na obrázku 3, kde D_i je střední průměr částice i-tého intervalu, n_i je počet částic v intervalu a N celkový počet částic.

Podle hodnoty GSD se dá usuzovat, jestli se jedná o mono- nebo polydisperzní aerosol. Pokud je $\sigma_g \leq 1{,}25$, pak se aerosol dá považovat za monodisperzní, pokud je hodnota odchylky větší, jedná se aerosol polydisperzní. [17]

Program Aerosol Instrument Manager rovněž vykresluje na svislou osu grafů tzv. normalizovanou koncentraci $dN/d\log D_p$. To znamená, že koncentrace je vážená šířkou intervalu velikostní třídy pro lepší porovnávání dat z ostatních přístrojů či při změně počtu velikostních intervalů. Normalizovaná koncentrace je tedy nezávislá na šířce intervalu.

$$\frac{dN}{d \log D_p} = \frac{dN}{\log D_{p,h} - \log D_{p,d}} \qquad (4)$$

Normalizovaná koncentrace je definována vztahem 4, kde dN je počet částic, D_p je střední průměr intervalu, $D_{p,h}$ je horní okrajová hodnota intervalu a $D_{p,d}$ je dolní hranice velikostní třídy. Tento typ koncentrace se běžně používá pro popis aerosolů

4 Praktická část

Výzkum emitovaných částic vznikajících při kouření je předmětem výzkumu mnoha pracovišť již spoustu let. Nedílnou součástí předních tabákových společností jsou speciální testovací laboratoře, na obrázku 18 je fotka z Italského tabákového závodu (přístroj na testování cigaret CERULEAN SM410). [18]

Obr. 18 – Zařízení na testování tabákových výrobků CERULEAN SM410 (Itálie).

Výzkum vodních dýmek není tak velkého rázu jako u cigaret díky podstatně menšímu zastoupení na trhu. I přesto existuje spousta vědeckých studií zabývající se emisemi vodních dýmek. Pro tyto účely bývá často využíváno měřicích přístrojů jako SMPS [19,20,21,22]. Výzkum elektronických cigaret velmi rychle vzrůstá díky zvyšující se popularitě [23].

Experimenty v těchto studiích mají různé podoby, většinou se jedná o určitou simulaci procesu kouření pro generování aerosolu z tabákových výrobků a následné změření rozložení částic. Pro vzorkování aerosolu se používají například injekční stříkačky [23], pístové mechanismy [24] či speciální zkonstruované přístroje simulující kouření [25]. Výsledky studií však vykazují vzájemné odlišnosti vlivem použití různých metod a měřicích přístrojů. To představuje problém při srovnávání různých stylů kouření pomocí dat z různých zdrojů. Cílem této práce je pomocí vhodných experimentů srovnat tři druhy velmi odlišných typů kouření a posoudit jejich dopad na lidské zdraví.

4.1 Souhrn zkoumaných výrobků

Nejnebezpečnějšími složkami tabákových výrobků je nikotin, dehet a oxid uhelnatý, jejichž podíly obsažené v produktech by měly být uvedeny na obalu. Balení cigaret obvykle jsou opatřeny informačními štítky, balení náplní do elektronických cigaret informuje pouze o obsahu nikotinu a zejména tabáky do vodních dýmek neuvádí informace o složení nebo používá nepravdivé informace.

Tab. 1 – Shrnutí složení a provozní teploty stylů kouření.

Typ			
Složení	Nikotin 0,1 - 1,8 mg/cig. Dehet 0,5 - 25 mg/cig. Oxid uhelnatý 1 - 16 mg/cig. Arsen Polonium	Nikotin ~2 mg/g Dehet Oxid uhelnatý Těžké kovy Glykol	Nikotin 0 - 20 mg/ml Voda Glycerin Těžké kovy Aldehydy
Provoz	Pyrolýza ~900 °C	Teplota uhlíku ~450 °C	Vypařování ~200 °C

Tabulka 1 informuje o složení zkoumaných tabákových výrobků. Složení cigaret je v miligramech na cigaretu, přičemž jedna standardní cigareta váží 0,7 g. Cigarety obsahují velké množství ostatních škodlivých látek díky materiálům použitým při výrobním procesu. Běžný obsah nikotinu v tabáku užívaném při kouření vodní dýmky je vztažen na gram tabáku. K dostání je také široká škála náplní do elektronických cigaret, od 0 mg na mililitr “e-liquidu“ (nikotin free) až po velmi silné nikotinové extrakty.

Důležitou odlišností jednotlivých stylů kouření je jejich provozní teplota. Tato práce se zabývá množstvím vznikajících částic, ale z hlediska zdravotních dopadů je nezbytné zohlednit také složení produkovaného aerosolu. Výzkumy tabákových výrobků ukazují, že tvorba mutagenů a nádorů vzrůstá zároveň s teplotou procesu. [26]

Tab. 2 – Obvyklé hodnoty průběhu jednoho nasátí.

Typ			
Objem	35 - 85 ml	300 - 800 ml	35 - 85 ml
Doba	1 - 3 s	3 - 6 s	2 - 4 s
Interval	20 - 40 s	~30 s	30 - 60 s
Počet	8 - 16	50 - 200	100 - 200

Porovnávané typy kouření se liší nejen složením a teplotním procesem, ale také stylem užívání (viz tab. 2). Jedná se o velmi subjektivní záležitost, která je u každého uživatele odlišná.

Nejobvyklejší hodnoty objemu nasátého aerosolu při kouření jsou měřeny spirometry [23, 25]. Objemy vdechovaného aerosolu při kouření klasických a elektronických cigaret jsou si velmi podobné, stejně jako doba, po kterou je aerosol nasáván. Uživatelé elektronických cigaret však tíhnou k vyšším objemům a s tím spojenou delší dobou vdechování. Zásadní rozdíl vodní dýmky je způsob, jakým se kouří. Jedná se často o dlouhý, hluboký nádech pro vytvoření dostatečného tahu v dýmce. Interval značí obvyklý čas mezi jednotlivými potáhnutími. Na jednu klasickou cigaretu je potřeba 8 až 16 potáhnutí, na vykouření vodní dýmky je potřeba 50 až 200 potáhnutí a na vypaření 1 ml náplně do elektronické cigarety je potřeba 100 až 200 nádechů. Za účelem srovnání stylů kouření byly zvoleny střední hodnoty zaznamenaných rozsahů.

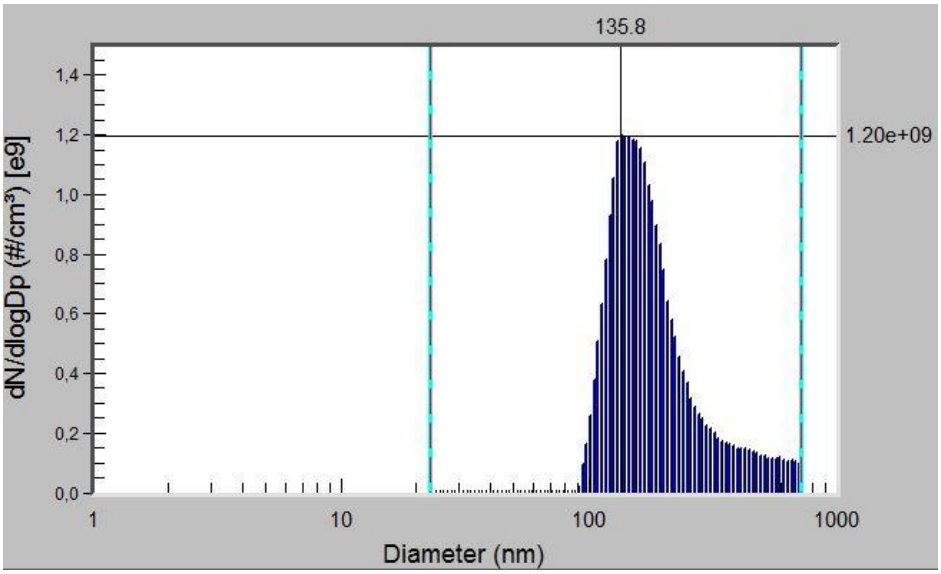
4.2 Popis experimentu

Pro účely práce proběhly tři typy experimentů. Každý typ měření byl proveden minimálně pětkrát. Měření velikosti a počtu částic bylo provedeno pomocí přístroje SMPS 3936 od firmy TSI. Následující podkapitoly popisují průběh uskutečněných experimentů.

4.2.1 Primární částice

První typ experimentu byl pojmenován "primární částice". Jedná se o nejjednodušší experiment, kdy jsou měřené objekty připojeny přímo na měřicí přístroj. Aerosol je poté generován konstantním průtokem na sání do měřicího zařízení.

Pro toto měření byla délka měření nastavena na jednu minutu. U všech měření byl nastaven průtok aerosolu 0,3 l/min. Po zapálení či zahřátí tabákového výrobku přístrojem tedy prošlo 300 ml vytvořeného aerosolu během každého vzorku.



Obr. 19 – Šířka měřeného pásma u měření primárních částic.

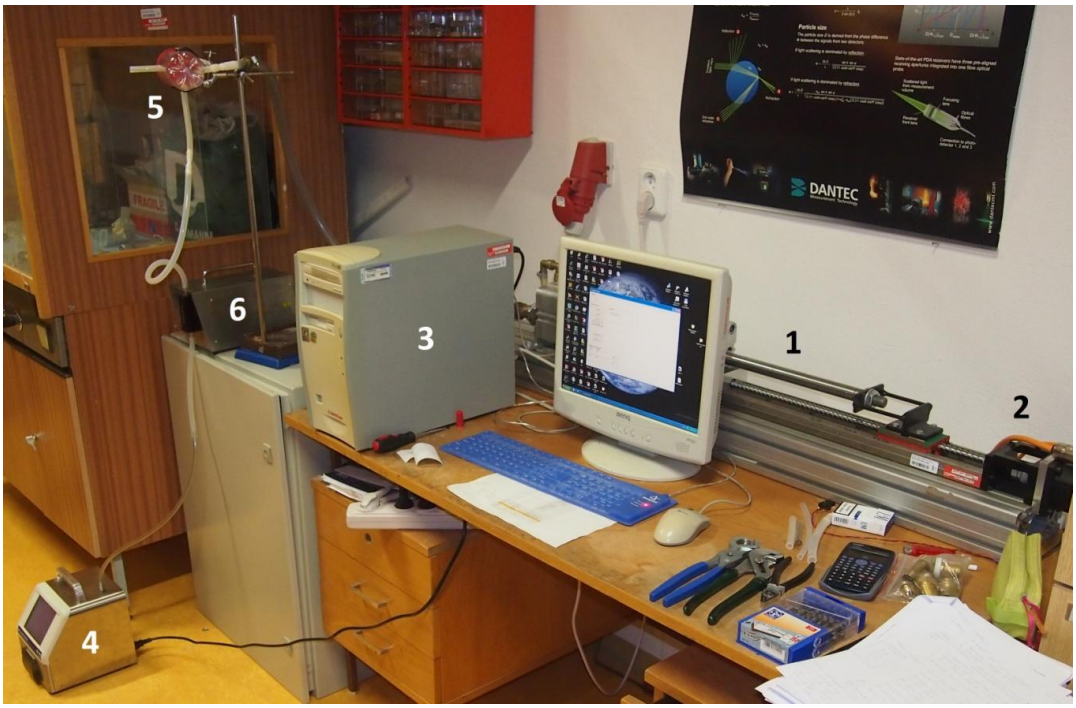
Ukázka výstupních dat z SMPS v programu Aerosol Instrument Manager (TSI) je na obrázku 19 (záznam z měření klasických cigaret). Šířka pásma proměřených velikostí je velmi závislá na délce měření, dlouhá měření umožňují přístroji proměřit širší škálu různých velikostí, krátká měření zužují zkoumanou oblast. Pro měření primárních částic byla zvolena délka měření 60 sekund, což odpovídá rozsahu od 23,3 do 710,5 nm. Kratší měření by proměřilo užší rozsah velikostí a na druhou stranu delší měření by způsobilo spálení celé cigarety nebo přehřátí žhavícího elementu elektronické cigarety, což může vést k poškození částí el. cigarety.

Pro měření primárních částic je typický velmi vysoký počet částic, které nemají prostor a čas k podlehnutí silným koagulačním efektům, jako je u vysokých koncentrací jemných částic zvykem. Toto měření podává informace o nezředěném aerosolu vstupujícím do ústní dutiny během kouření tabákových výrobků. Při experimentech vyšla najevo nevhodnost měření mikročástic generovaných vodní dýmkou díky nedostatečnému tahu měřicího přístroje. Zároveň se však pozorovatelně projevily důsledky změn

při vykonávání experimentů, jako rozdíly v počtu částic při měření cigaret s a bez filtru či zvyšující se počet částic se zkracováním (úbytkem) cigarety při kouření. Podrobný rozbor dat se nachází v následující kapitole Výsledky měření.

4.2.2 Vzorkovací komora

Další typy experimentů již nevyužívají průtoku měřicího zařízení pro generování aerosolu. Pro reálnější zachycení opravdového kouření bylo využito zařízení užívané k simulaci dýchání. Jedná se o píst poháněný servo motorem, který je řízen počítačem skrz software PliceBasic (VUT). V tomto programu lze nastavit zdvih a periodu posunutí pístu. Dva výstupy z pístové komory byly opatřeny zpětnými ventily. Při pohybu pístu dolů slouží jeden z nich jako sací ventil a vzniklý podtlak je při experimentu využíván k simulaci potáhnutí z cigaret apod. Při pohybu pístu nahoru se plyn ve válci stlačuje a vystupuje druhým výtlačným ventilem do okolního prostředí.



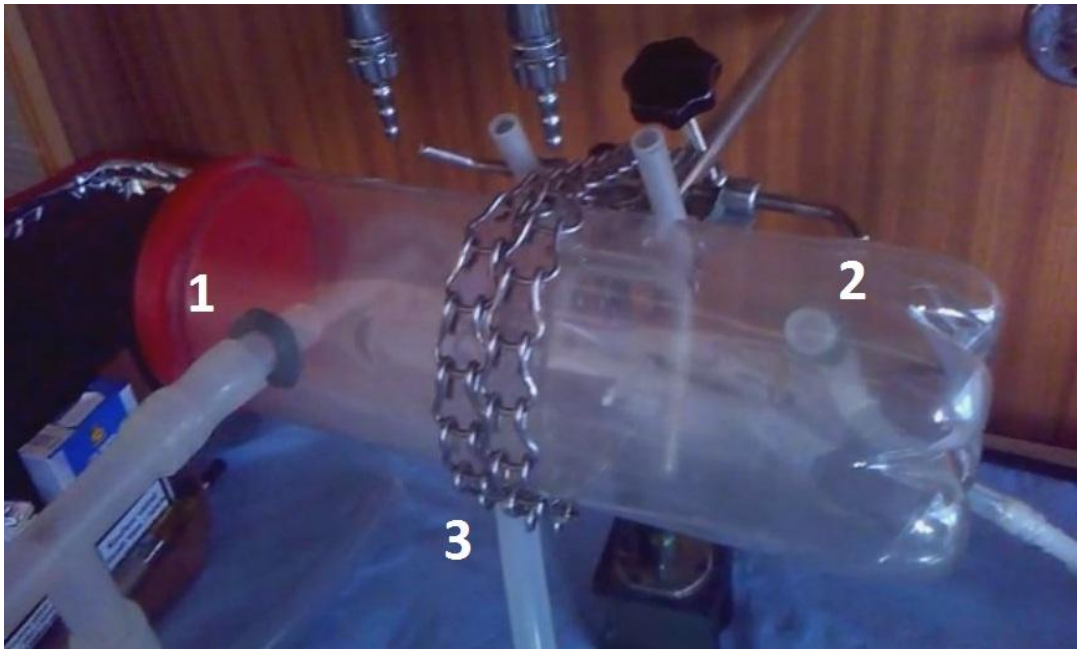
Obr. 20 – Jedno z prvních zapojení experimentální tratě.

Vývoj měřicí tratě prošel dlouhým vývojem, dřívější zapojení měřicí tratě je na obrázku 20 (1 – pístový jezdec, 2 – servo pohon, 3 – řídicí počítač, 4 – měřicí přístroj OPC (Optical Particle Counter), 5 – vzorkovací komora, 6 – dilutor). Servopohon (2) slouží k otáčení šroubovice, na které je jezdec (1) pohybující s pístem. Prvotní verze zapojení využívala pro testování vzorkovací komory (5) Optický čítač částic (4) společně s dilutorem (6), který sloužil k zředění vytvořeného aerosolu před vstupem do měřicího

zařízení. Později byl OPC nahrazen přesnějším přístrojem SMPS. Propojení okruhu je pomocí silikonových hadic, kterými je veden zkoumaný aerosol.

Proces kouření lze rozdělit na tři kroky [25, 27]:

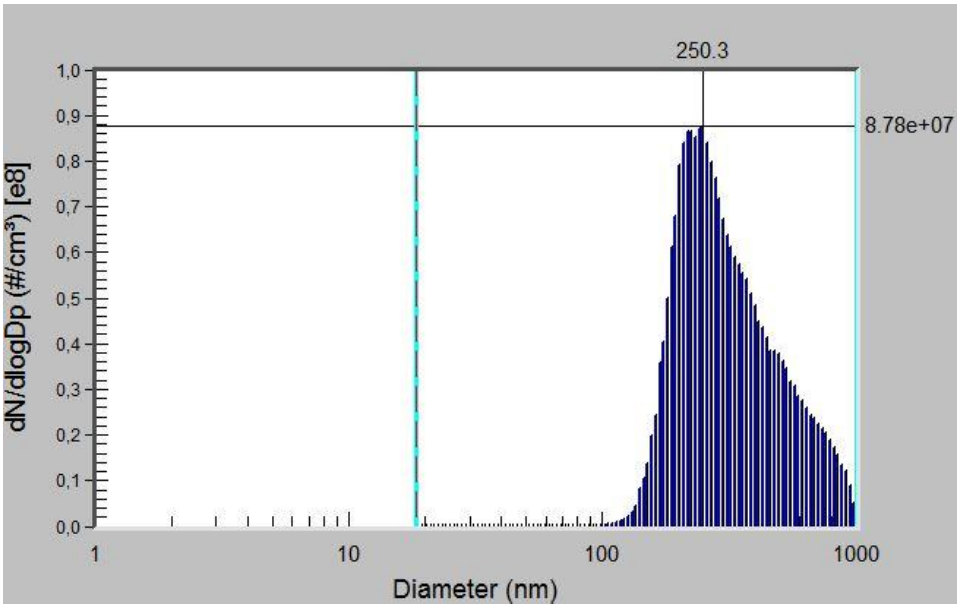
1. Nasátí aerosolu do ústní dutiny („puff“) – roztahování ústní dutiny, smíchávání se vzduchem v dutinách.
2. Zadržení kouře – částice menší než 0,1 μm jsou téměř eliminovány už po zadržení aerosolu v ústech na jednu vteřinu.
3. Vdechnutí aerosolu – roztažením plic je aerosol vtažen do plic společně s okolním vzduchem, se kterým se mísí.



Obr. 21 – Ukázka generování měřeného aerosolu.

Vzorkovací komora byla vytvořena z válcové plastové nádoby o objemu 647 ml. Tato komora představuje dutiny dýchacího ústrojí člověka, kde dochází ke směšování aerosolů (viz obr. 21). Vzorkovací komora má tři otvory: 1 – vstup aerosolu z tabákového výrobku do komory, 2 – otvor je připojen k sacímu ventilu zařízení pro simulaci vdechování, 3 – otvor pro odběr aerosolu do měřicího zařízení (0,3 l/min).

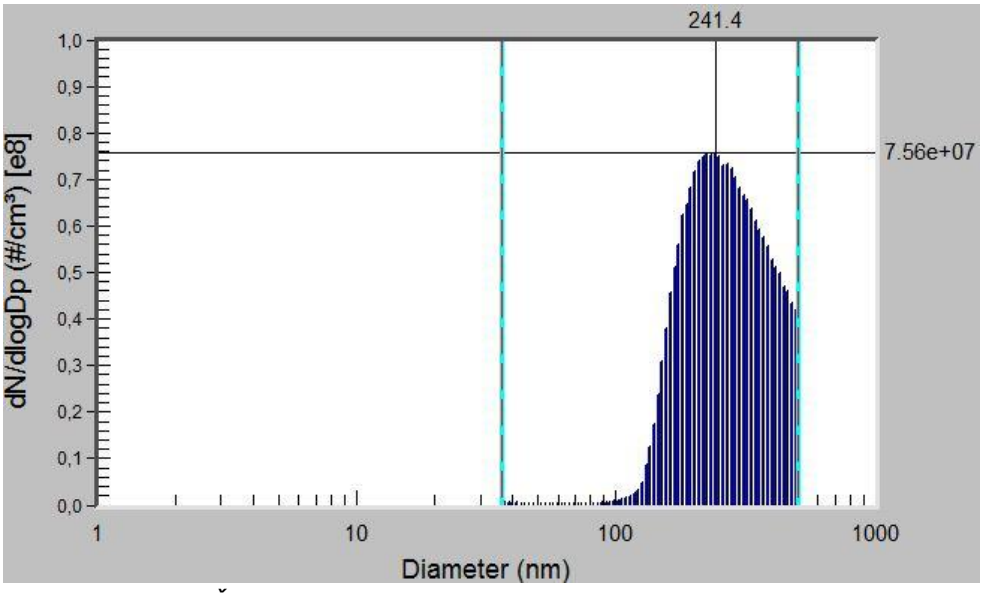
Výhody tohoto měření jsou v realističtěji pojatém přístupu ke kouření a nastavitelnosti režimu vdechování. Shromažďování aerosolu ve vzorkovací komoře odbourává restrikce na dobu měření. Oproti primárním částicím byla zvýšena doma měření na 160 sekund pro pokrytí co nejširšího spektra velikostí (od 18,8 nm do 1 μm) viz obr. 22. Experiment je vhodný zejména pro pozorování koagulace.



Obr. 22 – Dlouhé měření zaručuje široké pásmo měřených velikostí.

4.2.3 Jedno potáhnutí (1 puff)

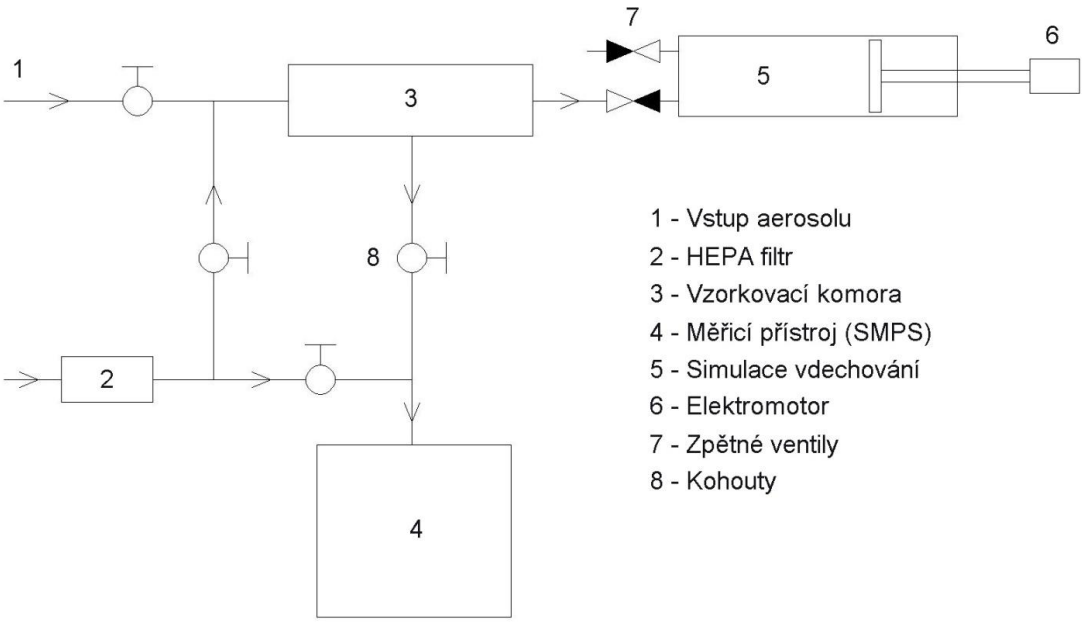
Poslední typ experimentu využívá měřicí trať se vzorkovací komorou. U předchozího experimentu bylo díky délce měření potřeba vytvořit dostatečné množství kouře, protože měřicí přístroj nasaje během 160 vteřin 800 ml aerosolu (0,3 l/min). V tomto případě se pomocí pístu simulovalo pouze jedno standardní nasátí kouře odpovídající danému typu kouření.



Obr. 23 – Šířka pásma proměřených velikostí částic pro 1 puff.

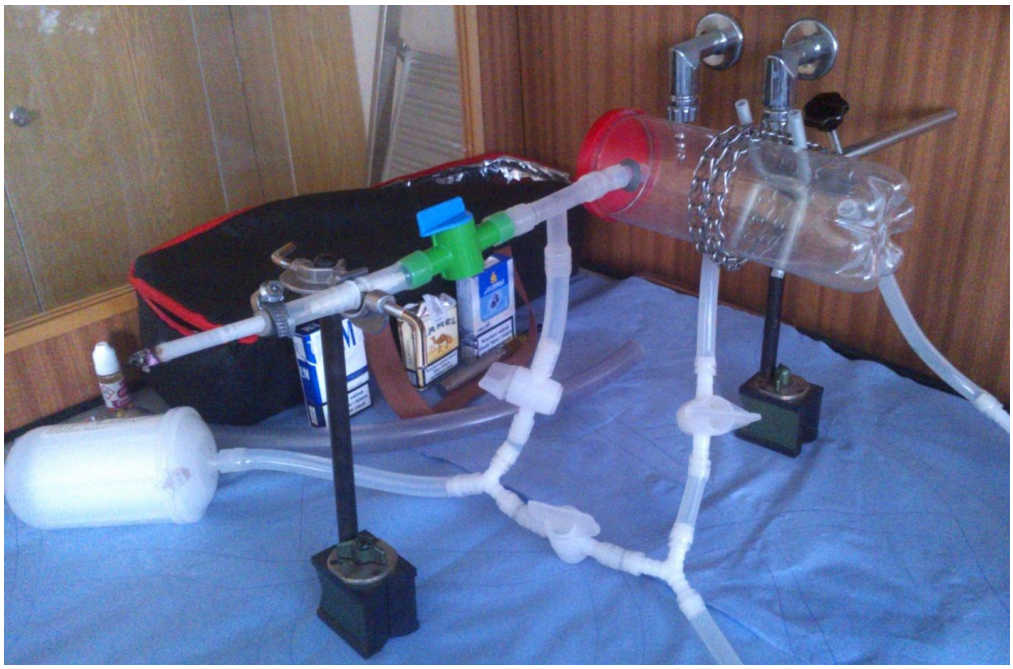
Díky malému množství vytvořeného kouře pouze jedním nasáním bylo potřeba snížit dobu měření na 30 vteřin (minimální doba měření pomocí SMPS). Krátké měření zachytí čerstvější aerosol, vytvořený ve vzorkovací komoře, ale zároveň podstatně ovlivní šířku měřeného pásma velikostí. Průtok aerosolu měřicím přístrojem je u všech experimentů stejný 0,3 l/min,

půlminutové měření pak vyhodnotí počet částic pro velikosti od 37,2 nm do 495,8 nm viz obr. 23.



Obr. 23 – Schéma zapojení měřicí tratě.

Schéma používané měřicí tratě je na obrázku 23. Popis funkce tratě: 2,4 – průtok čistého vzduchu měřicím přístrojem během vzorkování; 1,3,5 – generace aerosolu z tabákových výrobků; 2,3,4 – měření aerosolu; 2,3,5 – pročištění vzorkovací komory mezi měřením.



Obr. 24 – Fotka zapojení měřicího okruhu s cigaretou.

Videa zachycující měření se vzorkovací komorou jsou obsaženy na CD přiloženém k diplomové práci.

4.3 Výsledky měření

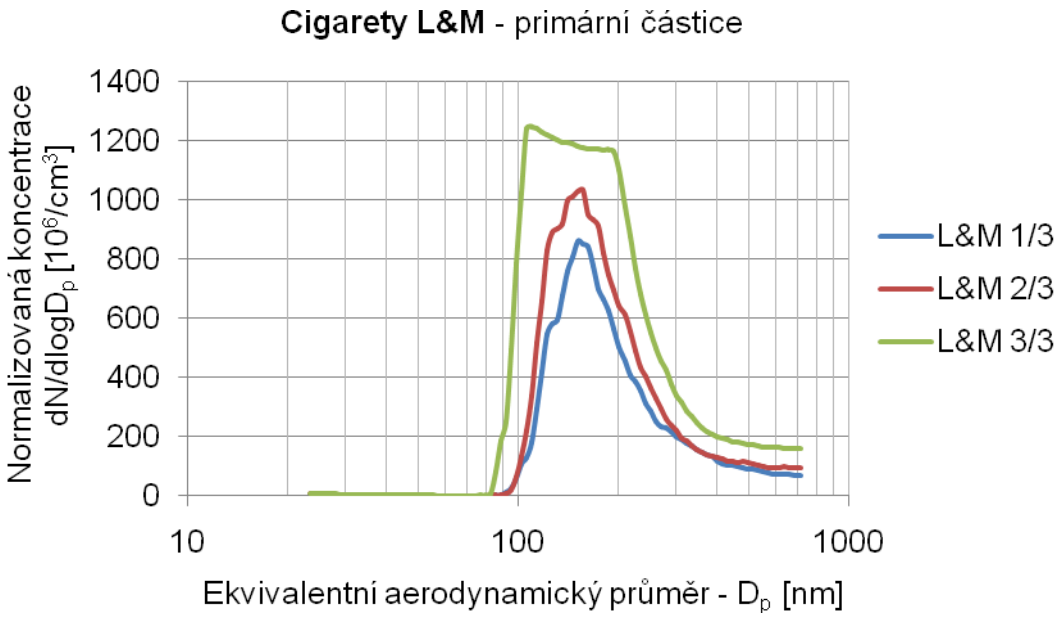
Shrnutí výsledků měření emitovaných částic od 8. 4. 2015 do 1. 5. 2015. Export dat byl proveden z programu Data Merge Software Module (TSI) do textových souborů. Potřebná data z textových souborů byla převedena do programu Excel (MS).

Zkoumané tabákové výrobky

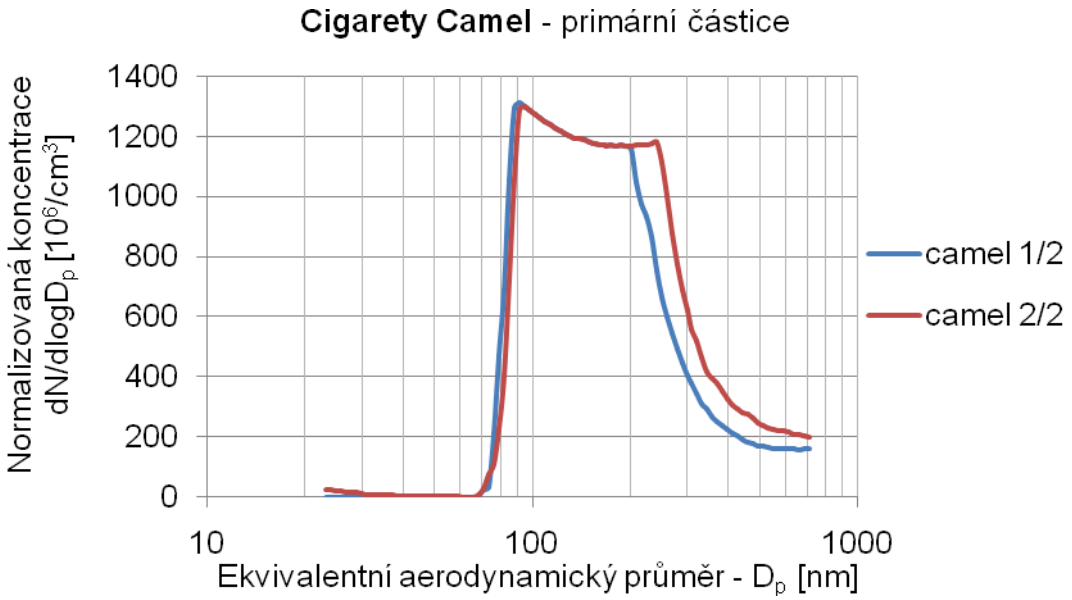
Pro účely práce byly zakoupeny čtyři typy tabákových výrobků:

1. Cigarety L&M Blue Label (Philip Morris Companies Inc. od roku 2003 Altria Group Inc.) Dehet: 8 mg/cig, Nikotin: 0,6 mg/cig, Oxid uhelnatý: 9 mg/cig
   20 ks cigaret v balení, cena: 79 kč.
2. Cigarety Camel bez filtru (výrobce: Japan Tobacco International) Dehet: 10 mg/cig, Nikotin: 0,8 mg/cig, Oxid uhelnatý: 10 mg/cig
   20 ks cigaret v balení, cena: 89 kč.
3. Tabák do vodní dýmky Al Fakher aromatický
   50 g balení, cena: 195 kč.
4. E-liquid Dekang Classic aromatický, Nikotin: 18 mg/ml
   10 ml balení, cena: 69 kč.

Primární částice – cigarety

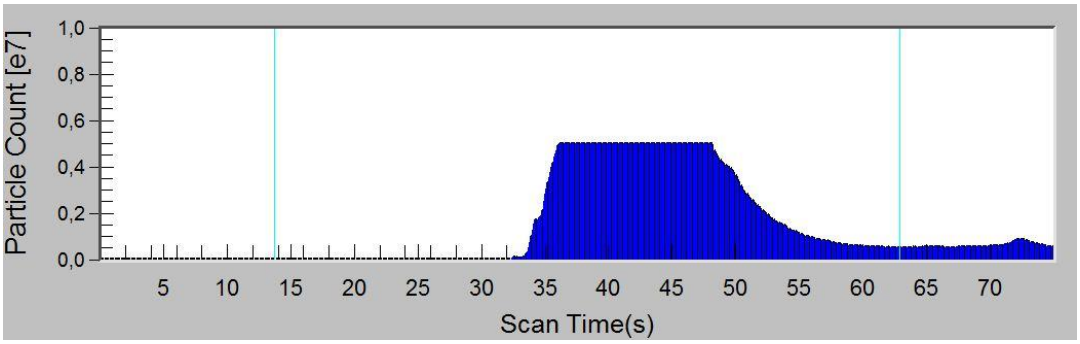


Obr. 25 - Měření cigaretového kouře, každá křivka reprezentuje třetinu cigarety (nejvyšší počet částic na konci cigarety).



Obr. 26 – Cigarety Camel bez filtru byly vykouřeny během dvou měření.

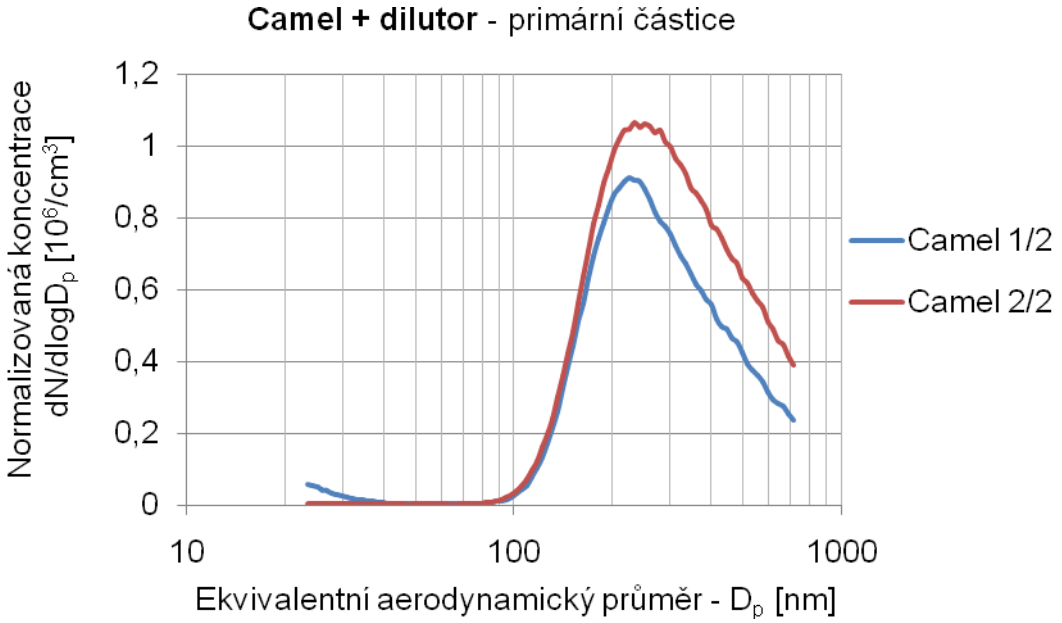
Hned u prvních výsledků můžeme pozorovat zajímavé jevy díky citlivosti měření primárních částic. Studie kouření odhalují, že počet částic je závislý převážně na obsahu dehtu v cigaretách, vyšší poměr dehtu v tabáku má za následek vyšší počet částic v kouři [28]. Tento fakt je potvrzen měřením v této práci. Zároveň byly odhaleny rozdíly v počtu částic v závislosti na úbytku cigarety a očekávaný vliv cigaretového filtru.



Obr. 27 – Graf hrubých dat z SMPS při měření primárních částic.

Při měření cigaret tímto způsobem došlo k dosažení maximální koncentrace částic v cm^3 aerosolu (viz obrázky 25 a 26). Měřicí přístroj (SMPS) není schopen rozlišit více než 1,3 x 10^9 částic v jedné velikostní třídě. Graf hrubých (nezpracovaných) dat z SMPS (obr. 27) udává počet naměřených částic během průběhu experimentu. Laserová jednotka pro detekci částic je schopna rozlišit maximálně 4 995 000 částic každou desetinu sekundy měření. Hrubá data jsou poté programem přiřazena odpovídajícím velikostním třídám. Při měření došlo k překročení rozlišovací meze přístroje.

Za účelem odstranění vzniklého problému s příliš vysokou koncentrací bylo měření primárních částic z cigaret provedeno jiným způsobem se zapojením dilutoru (DIL 554 firmy Topas) před vstup do měřicího zařízení.

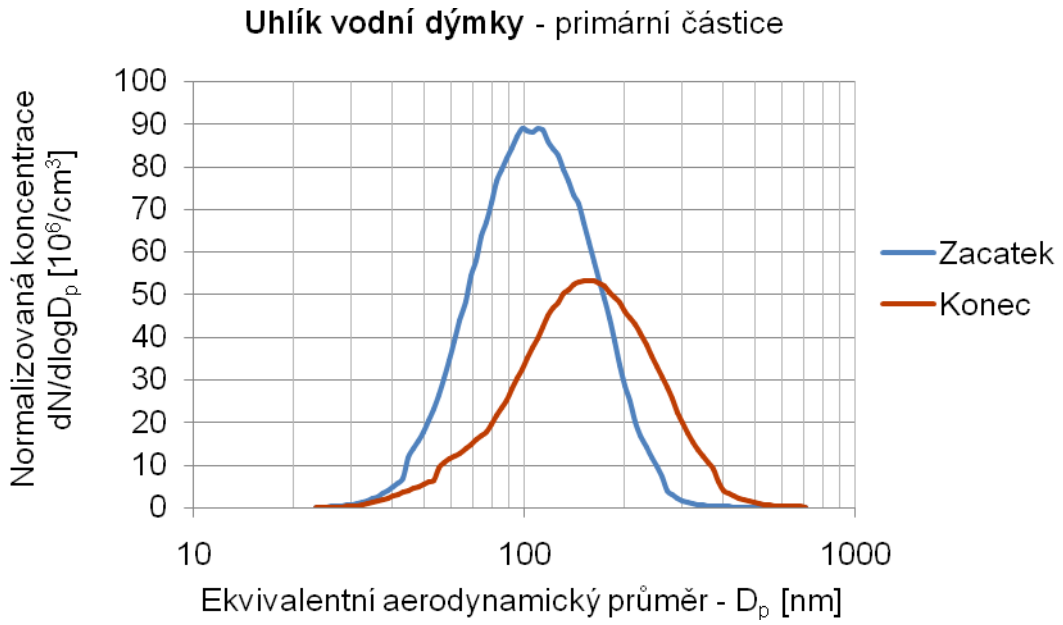


Obr. 28 – Měření primárních částic zředěného aerosolu dilutorem.

Velikostní rozdělení primárních částic s dilutorem (obr. 28) a bez dilutoru (obr. 26) se však příliš nepodobá. Výrobce dilutoru udává, že jeho použitím by nemělo dojít ke změně rozložení částic, přesto je po proběhnutých měřeních patrná náchylnost ke zvětšování částic. Výsledky měření primárních částic z cigaret nejsou vhodné pro srovnání.

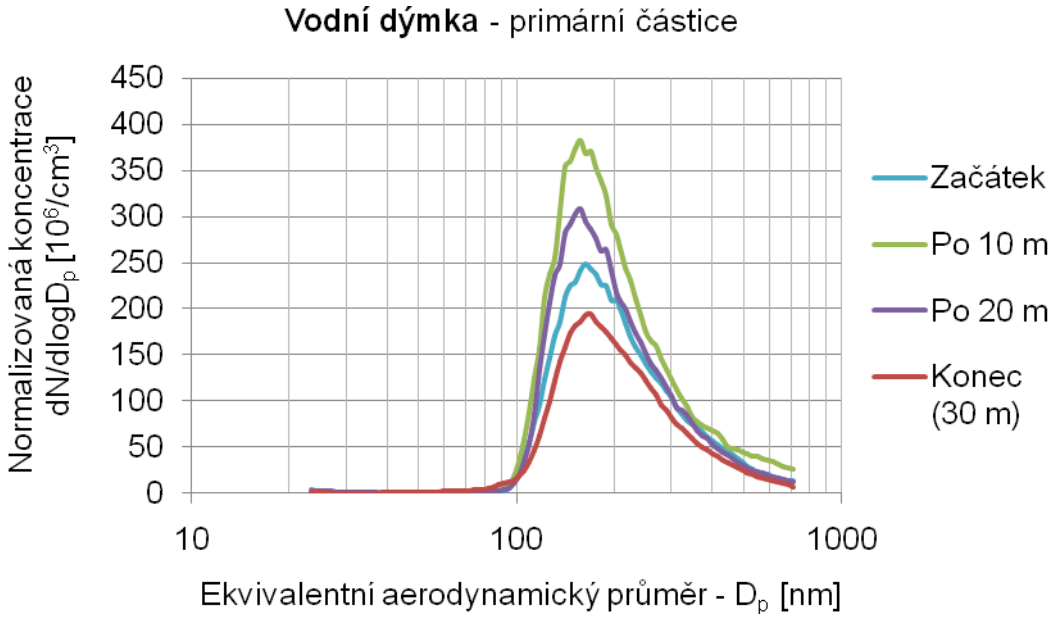
Primární částice – vodní dýmka

Kouř vstupující do ústní dutiny při kouření vodní dýmky vzniká jiným procesem než u klasických cigaret. Tabák do vodní dýmky má podstatně odlišnou strukturu, je ohříván uhlíkem a vznikající aerosol prochází vodní lázní před jeho nasátím. Při použití standardní vodní dýmky je použito 8 až 10 gramů tabáku a kouření může trvat až jednu hodinu. Stejně jako u cigaret bylo možné při měření primárních částic pozorovat změny počtu částic v průběhu experimentu. Během kouření vodní dýmky se průměrně spotřebují dva uhlíky (přibližně 30 min na uhlík), teplota procesu tvorby částic tedy kolísá v průběhu experimentu. Vědecké studie vodních dýmek rovněž vykazují změny počtu částic při kouření [21] a jsou potvrzeny v této práci. Aerosol vznikající při kouření vodních dýmek je ze dvou zdrojů. Kdy jedním je tabák a druhým je uhlík, který je zároveň zdrojem tepla. Pro vodní dýmku proto byly provedeny dva typy experimentů, první byl s klasickou vodní dýmkou naplněnou tabákem (obr. 30) a druhý byl proveden jen s uhlíkem bez tabáku (obr. 29).



Obr. 29 – Měření vodní dýmky jen s uhlíkem, počet částic na začátku a na konci experimentu.

Měření částic generovaných rychlozápalným uhlím používaným pro kouření vodních dýmek na obrázku 29. Měřicí přístroj detekoval velké množství částic při zapálení uhlíku (modře). Během zapálení uhlíku byl rovněž cítit silný zápach způsobený příměsemi pro rychlé vzplanutí uhlíku. Po prvních 10 minutách (1/3 experimentu) došlo k ustálení počtu částic na hodnoty blízké konci měření (červeně), což je záznam počtu částic před koncem použitelnosti uhlíku a jeho vyhasnutím.



Obr. 30 – Měření vodní dýmky s tabákem, délka experimentu 30 min (jeden uhlík).

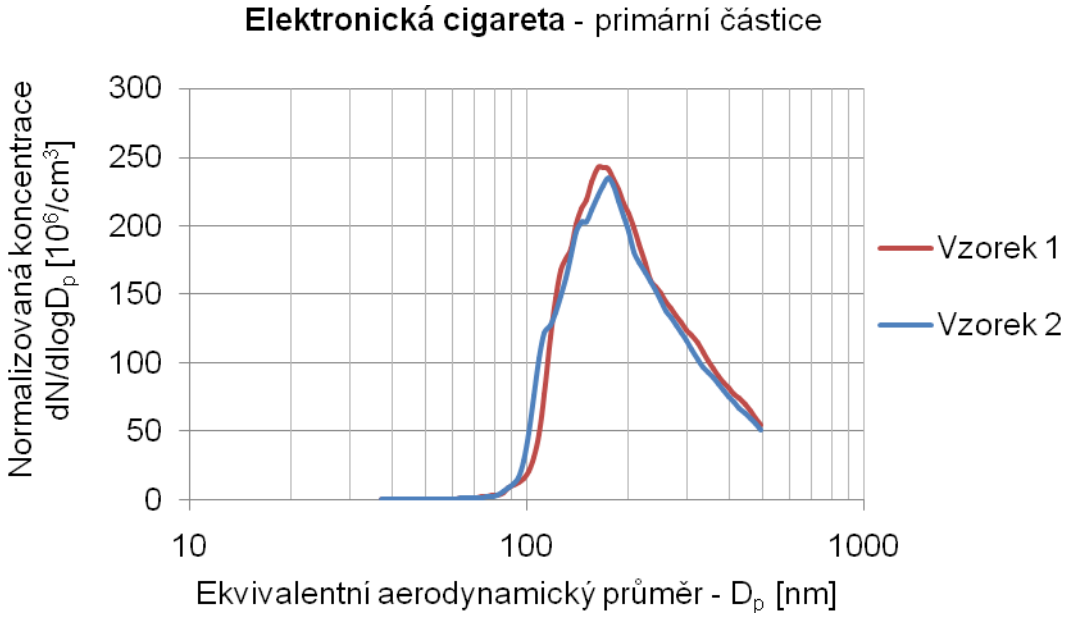
Počet částic v aerosolu vstupujícím do ústní dutiny při kouření vodní dýmky je na obrázku 30. Nejvyšší počet částic je po první třetině experimentu, kdy uhlík dosahuje maximální teploty.

Data z měření primárních částic u vodní dýmky posloužila k odhalení závislosti počtu generovaných částic na době kouření. Výsledky však nemohou být použity v porovnávání expozice škodlivým částicím díky nedostatečnému tahu měřicího přístroje, který v těchto experimentech slouží k vytváření aerosolů.

Primární částice – elektronická cigareta

V případě měření primárních částic emitovaných elektronickou cigaretou bylo potřeba snížit dobu měření na polovinu (30 s), aby se zamezilo přehřátí topného elementu při dlouhém měření.

I přes citlivost měření primárních částic, elektronické cigarety podávají velmi podobné výsledky měření, viz obr. 31. Aerosol je v e-cigaretě generován zvýšením teploty topného elementu a tento průběh je pro každé kouření stejný, dalo se tedy očekávat podobné množství vznikajících částic při každém potáhnutí.



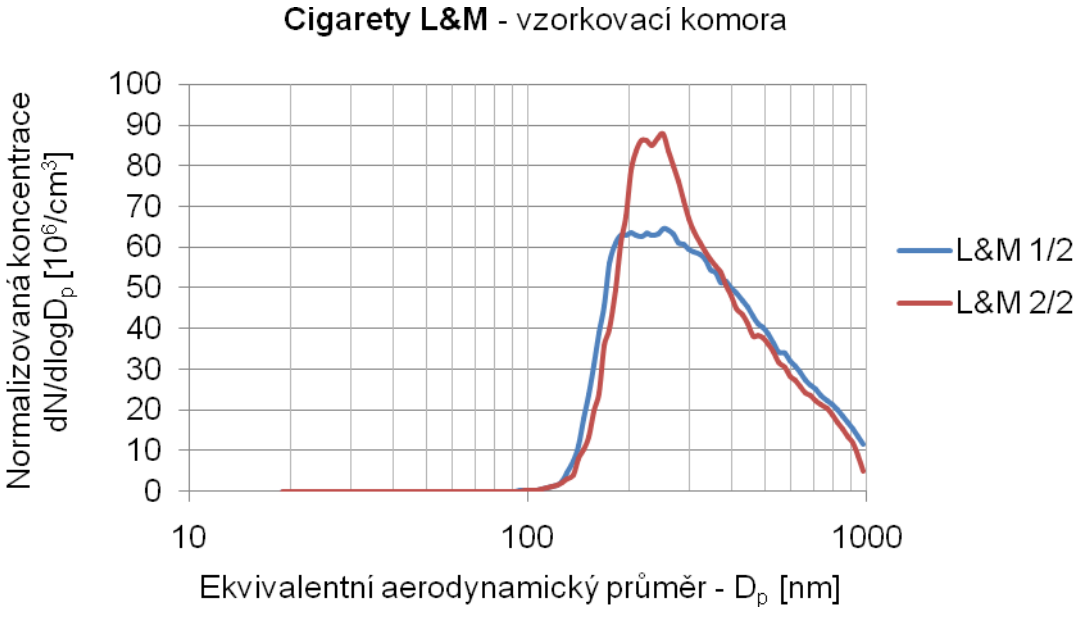
Obr. 31 – Dvě měření částic emitovaných elektronickou cigaretou.

Vzorkovací komora – cigarety

Výsledky experimentů s využitím vzorkovací komory se podstatně liší od prvního experimentu. Primární částice vznikající při nasátí vzduchu pohybem pístu se mísí s čistým vzduchem v komoře. Jak bylo uvedeno dříve, délka měření byla nastavena na 160 vteřin pro proměření širokého spektra velikostí (od 18,8 nm do 1 μm). Před měřením proto proběhla generace částic do komory tak, aby se celý prostor zaplnil aerosolem. Poté byl uzavřen vzorkovací okruh měřicí tratě a otevřen okruh pro měření, které probíhalo téměř tři minuty (společně se zpětnou korekcí SMPS – 15 s).

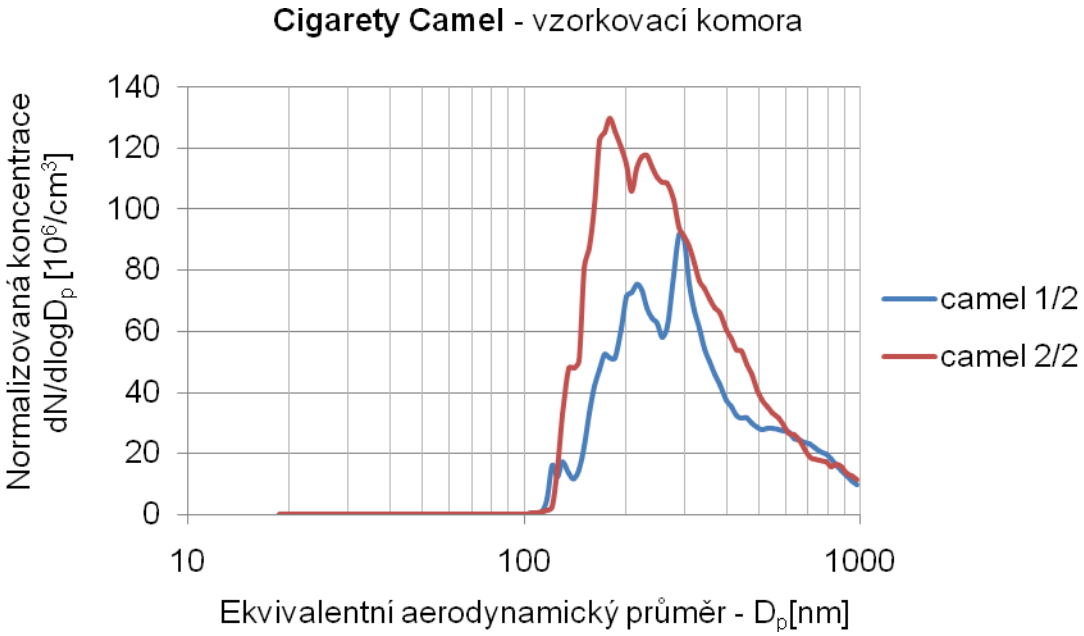
Počet částic v těchto experimentech je značně nižší než při prvním měření. Díky délce měření podstupuje aerosol v komoře rapidní koagulaci a hygroskopickým efektům, které jsou příznačné částicím o měřených rozměrech a vysoké koncentraci. Malých částic rychle ubývá přitom, jak formují částice větší. Průběhy grafů mají méně strmou pravou stranu znázorňující relativně vyšší počet částic o větších rozměrech vlivem koagulace, viz obr. 32.

Nastavení simulátoru potáhnutí z cigarety bylo nastaveno v programu PliceBasic. Hodnoty periody a zdvihu pístu byly stanoveny z dat provedeného výzkumu [29]. Pro cigaretu o dané velikosti bylo určeno kolikrát je potřeba potáhnout, aby cigareta došla. Pro dobu potáhnutí 2 vteřiny je potřeba 11 potáhnutí (odpovídá objemu nasátého vzduchu přibližně 60 ml). Perioda průběhu pístu byla tedy nastavena na 4000 ms, což odpovídá době nasátí 2 vteřiny. A zdvih pístu byl nastaven tak, aby byla cigareta vykouřena po 11 nasátích, což odpovídá objemu nasátého vzduchu 350 ml.



Obr. 32 – Počet částic v komoře po vykouření první a druhé poloviny cigarety.

Pro každou cigaretu byla provedena dvě měření. Prvních 5 nasátí po zapálení cigarety a poté dalších 5 nasátí před koncem cigarety (viz. obrázky 32 a 33). Výhodou tohoto experimentu je, že díky směšování kouře s čistým vzduchem v komoře nedochází k překročení rozlišovací schopnosti přístroje, jako tomu bylo u prvního měření. Aerosol vznikající z cigaret Camel obsahuje více částic stejně jako u primárních částic díky absenci filtru a vyššímu obsahu dehtu.



Obr. 33 – Koagulace kouře z cigaret bez filtru, první a druhá polovina cigarety.

Vzorkovací komora – vodní dýmka

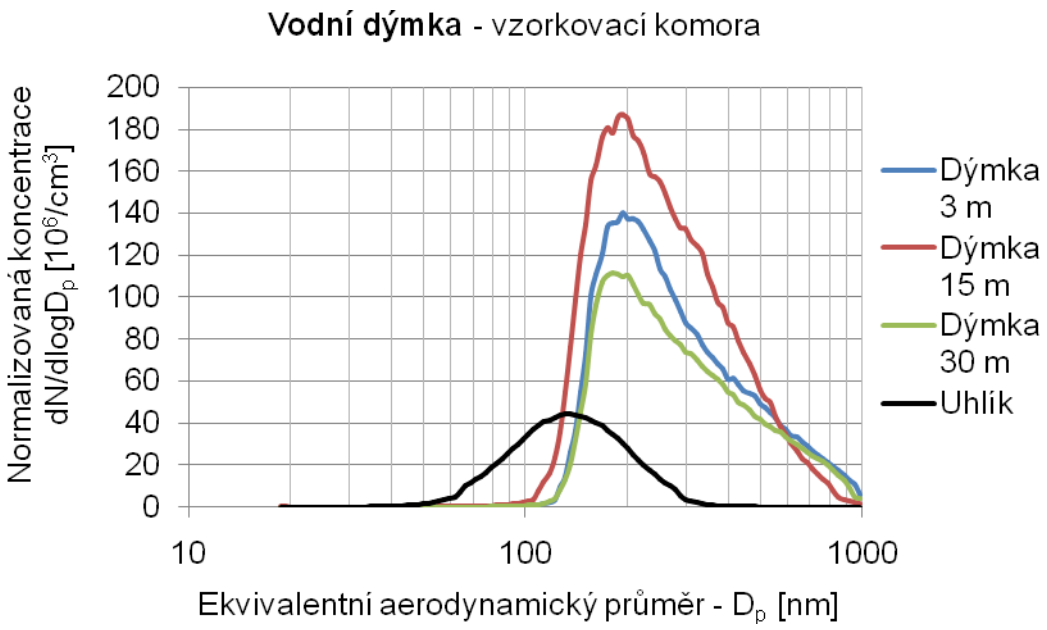
Experiment s vodní dýmkou byl proveden stejně jako u cigaret. Při kouření vodní dýmky se používá přibližně metr dlouhá hadice, kterou se aerosol nasává. V experimentu byla tato hadice nahrazena silikonovou hadicí stejné délky, viz obr. 34 na další straně. Stejně jako v případě primárních částic byly provedeny dva typy experimentů a to jak s tabákem, tak bez tabáku, pro měření emitovaných částic pouze uhlíkem.

Pístový simulátor vdechování umožňuje realizaci patřičného průběhu sání v tomto experimentu. Tím odpadá limitující faktor měření primárních částic konstantním průtokem SMPS.

Perioda pohybu pístu při měření vodní dýmky byla nastavena na 8000 ms, válec nasává 4 vteřiny. A zdvih pístu byl po testování a porovnávání s reálným kouřením nastaven na objem 900 ml (hluboký nádech). Před spuštěním měření bylo sání provedeno dvakrát.

Průběh koagulace u vodní dýmky je srovnatelný s cigaretovým kouřem. Díky relevantnosti průběhu generace částic je možné začít porovnávat různé styly kouření. Dosavadní výsledky naznačují nejvyšší počet částic u vodní dýmky, překonává i cigarety bez filtru.

Obr. 34 – Zapojení měřicí tratě s vodní dýmkou.



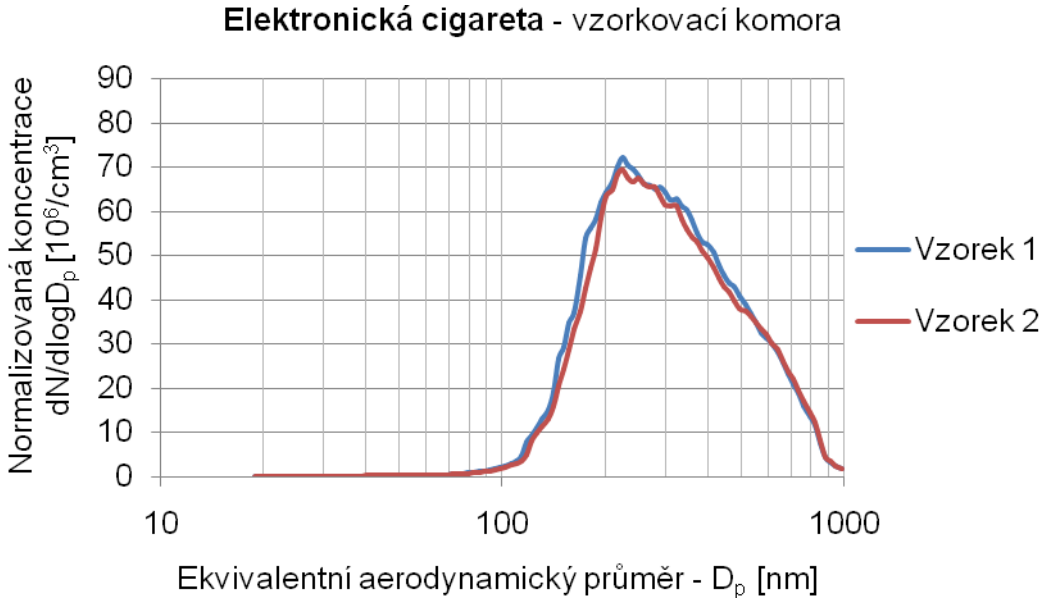
Obr. 35 – Emitované částice samotným uhlíkem a vodní dýmkou.

Pozornost je věnována také samostatnému měření uhlíku. Na obr. 35 jsou vykresleny střední hodnoty emisí způsobených uhlíkem během experimentu. Z grafu je patrná jiná stavba aerosolu produkovaná samotným uhlíkem. Při kouření vodní dýmky prochází aerosol z uhlíku tabákem a mísí se s aerosolem vytvářeným při zahřívání tabákové směsi. I přes délku experimentu se emise uhlíku příliš neliší od hodnot získaných při měření primárních částic, což značí pomalejší koagulaci těchto částic. Tento jev je

zčásti způsoben podstatně nižší koncentrací částic. Při měření bylo možné pozorovat, že uhlík produkuje málo viditelný aerosol oproti kouři z tabáku.

Vzorkovací komora – elektronická cigareta

Z výsledků měření emisí elektronické cigarety v komoře je možné získat podobné poznatky jako při měření primárních částic. Data z různých měření jsou si opět velmi podobná a počet částic je nejnižší ze všech typů kouření (viz obr. 36). Aerosol z elektronické cigarety koaguluje podobným způsobem jako tabákový kouř. Přístroj funguje srovnatelně pro širokou škálu stylů užívání. U elektronických cigaret je proces sání velmi podobný klasickým cigaretám, zdvih pístu je pro měření stejný jako u klasických cigaret. Doba sání byla oproti cigaretám zvýšena na 3 sekundy (T = 6 s).



Obr. 36 – Skladba aerosolu při dvou tříminutových měření emisí elektronické cigarety.

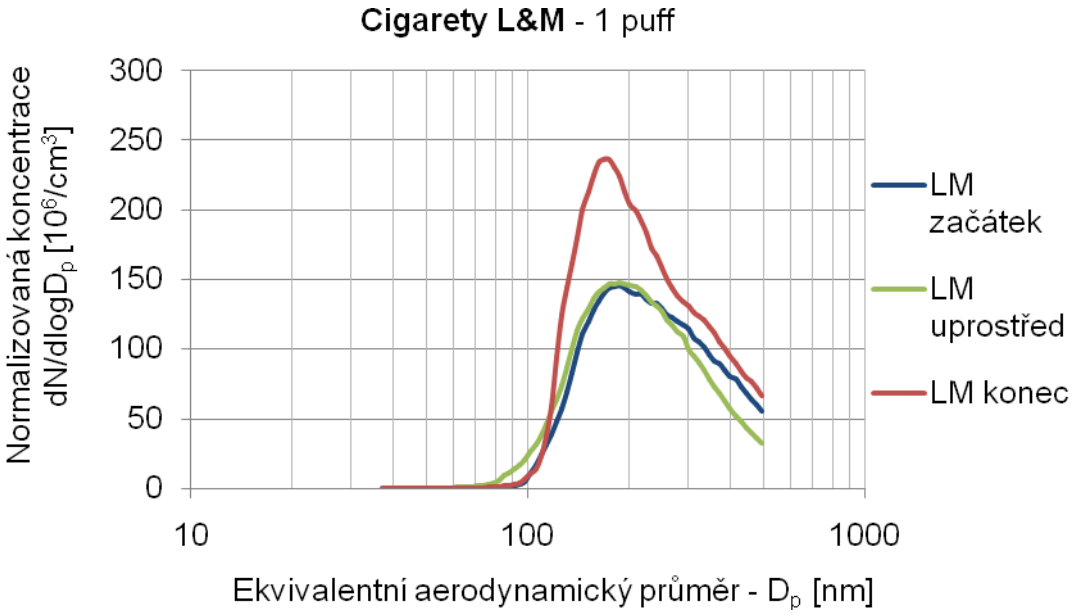
Jedno potáhnutí (1 puff) – cigarety

Poslední a nejnáročnější typ experimentu. Bylo využito stejné měřicí trati, ale sacím mechanismem bylo simulováno jen jedno odpovídající potáhnutí z tabákového výrobku. Vzápětí po nasátí aerosolu do vzorkovací komory bylo spuštěno krátké půlminutové měření.

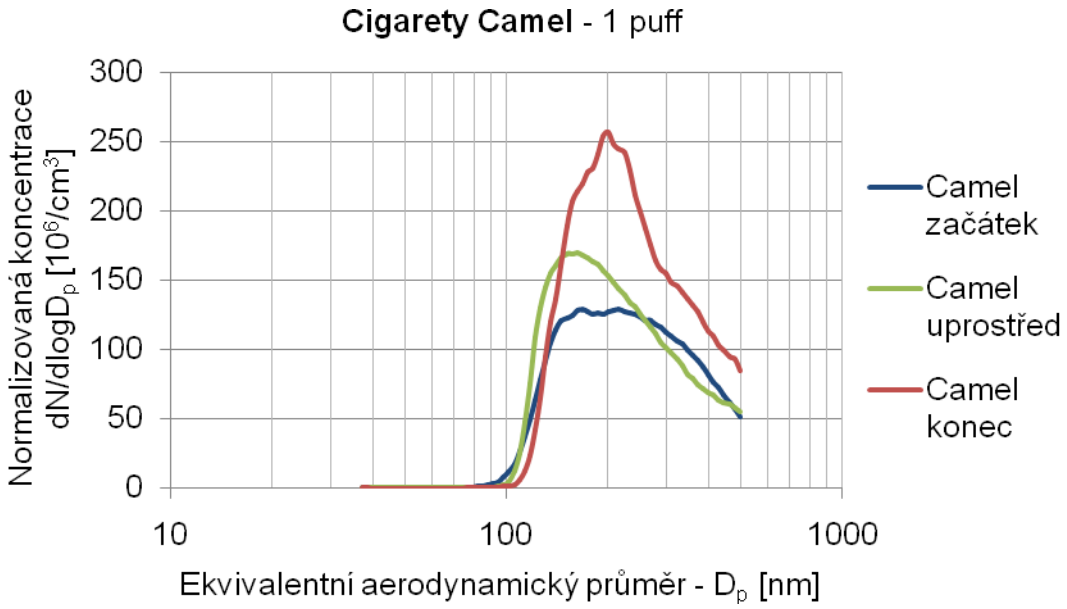
Účelem experimentu je zachytit co nejvěrnější proces kouření vybraných stylů a měření částic, které uživatel vdechuje do plic. Měření proto probíhalo nejnižší možnou dobu – 30 sekund. Díky tomu bylo možno zachytit aerosol smíchaný s malým množstvím čistého vzduchu, jako je tomu v dutinách dýchacího traktu člověka, který je krátce poté nasán do plic jejich roztažením společně s malým množstvím čistého vzduchu z okolí. Rychlým

měřením byl proto zachycen „čerstvý“ aerosol, který má minimum času na podstoupení koagulace apod. Výsledky experimentu vykazují proto vyšší počet částic než v předchozím měření se vzorkovací komorou (viz obrázky 37, 38).

Pro tento typ experimentu bylo potřeba provést nejvyšší počet měření, protože častěji docházelo k nesprávným průběhům při špatné koordinaci spouštění okruhů měřicí trati a používaných přístrojů. Na následujících grafech jsou zachyceny střední hodnoty z vhodných měření cigaret.



Obr. 37 – Počet částic v jednom potáhnutí na začátku, uprostřed a na konci cigarety.

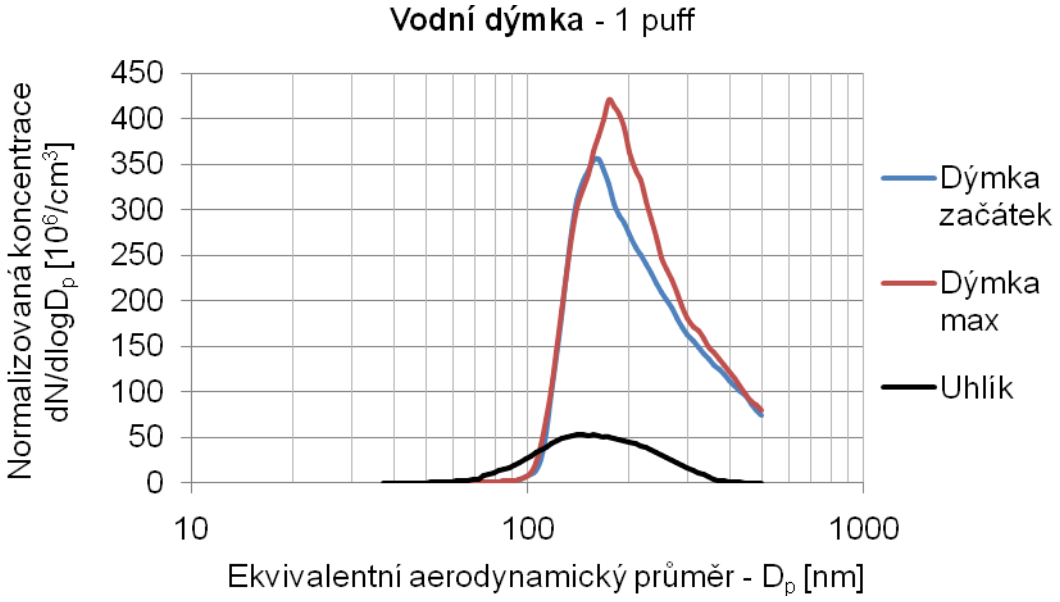


Obr. 38 – Jedno potáhnutí z cigarety Camel na začátku, uprostřed a na konci.

Výsledky experimentu také poukazují na zvyšování koncentrace částic ke konci cigarety, jako tomu bylo v ostatních experimentech. Avšak rozdíl mezi cigaretami s a bez filtru není tak markantní jako v předchozích experimentech. Pro cigarety bez filtru ale stále platí výskyt vyššího počtu částic, nicméně naměřená data naznačují jak malý vliv cigaretový filtr při kouření má.

Jedno potáhnutí (1 puff) – vodní dýmka

Vodní dýmka opět vykazuje nejvyšší počet částic ze všech experimentů. Rozdíl v koncentraci však nebyl tak velký v případě experimentu se vzorkovací komorou. Z naměřených dat lze odvodit rychlejší koagulaci aerosolu vznikajícího při kouření vodní dýmky. Tento fakt může být opět zčásti způsoben vyšší koncentrací a s tím spojenou vyšší pravděpodobností náhodných srážek částic. Vliv může mít také jiné složení tohoto aerosolu oproti cigaretovému aerosolu. V průběhu experimentu je nasát mnohem vyšší objem vzduchu, výskyt většího množství částic byl proto očekáván.

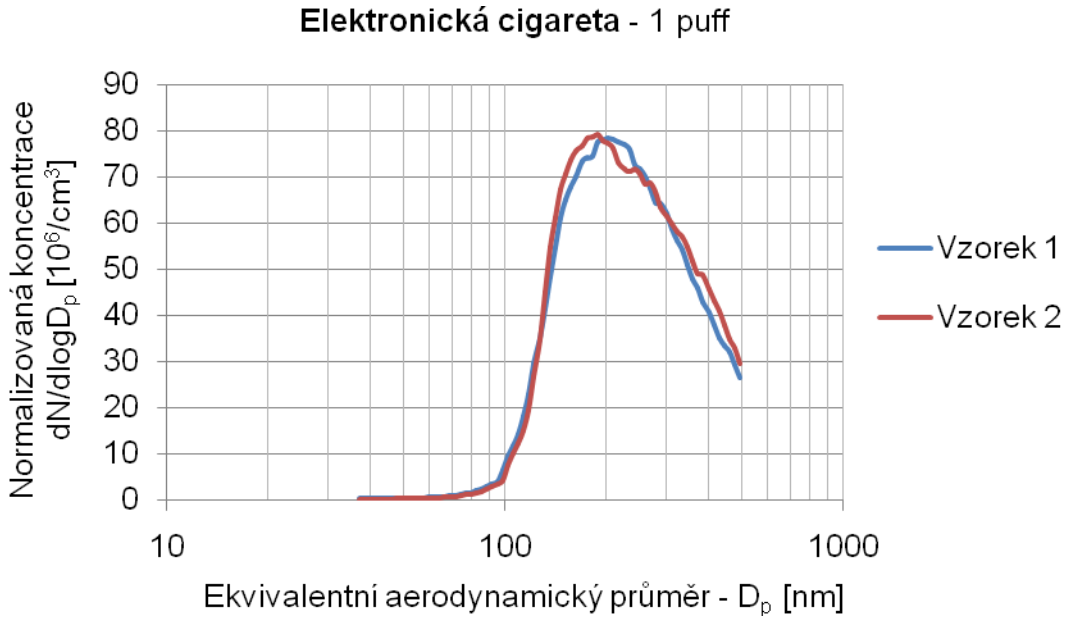


Obr. 39 – Jedno potáhnutí z vodní dýmky s tabákem a bez tabáku.

Na obrázku 39 jsou opět zahrnuty data měření samotného uhlíku vodní dýmky, který v tomto případě nepředstavuje tak velkou část vznikajících částic. Počet částic uhlíku je jen nepatrně vyšší než při předchozím měření. V grafu jsou vykresleny střední hodnoty emisí uhlíku a počtu částic na začátku a v polovině (nejvíce částic) měření vodní dýmky.

Jedno potáhnutí (1 puff) – elektronická cigareta

Na obr. 40 jsou vykreslena dvě různá měření jednoho potáhnutí z elektronické cigarety. Stejně jako v případě uhlíku, vznikající aerosol nepodléhá výrazné koagulaci díky relativně nízké koncentraci částic. Výsledky měření jsou velmi podobné předchozímu experimentu a podle očekávání částic je více v tomto experimentu.



Obr. 40 – Emise elektronické cigarety při dvou měřeních jednoho potáhnutí.

4.3 Porovnání výsledků

Cílem práce je porovnání různých typů kouření z hlediska emitovaných částic. Pro tyto účely byly vypracovány srovnávací tabulky pro měření vzorkovací komorou (viz tab. 3). Měření primárních částic není vhodné ke srovnání výsledků.

Pro statistický popis výsledků log-normálního rozdělení se nejčastěji používá medián velikosti (Count Median Diameter), což je velikost částice, která rozděluje soubor na dvě poloviny o stejném počtu částic. V tabulce je také uvedena geometrická směrodatná odchylka měření (Geometric Standard Deviation), popisující míru rozptylu hodnot v logaritmicko-normálním rozdělení. Posledními hodnotami v tabulce jsou celkové koncentrace měřených aerosolů v desítkách milionů částic na cm^3 (ml). Tyto hodnoty jsou stanoveny měřicím přístrojem při každém měření.

Hodnoty celkových koncentrací jsou si velmi podobné pro jednotlivé styly kouření, rozdíl v počtu částic není ani dvojnásobný mezi nejnižší (el. cigareta) a nejvyšší (vodní dýmka) průměrnou koncentrací.

Tab. 3 – Srovnání naměřených dat experimentu se vzorkovací komorou.

Vzorkovací komora	Typ experimentu	Medián velikosti (CMD)	Odchylka měření σ_g (GSD)	Celková koncentrace
		[nm]	[-]	[10^7/cm^3]
Cigarety	L&M 1/2	303,56	1,62	3,67
	L&M 2/2	288,5	1,56	3,79
	L&M	**296,03**		**3,73**
	Camel 1/2	287,42	1,61	3,66
	Camel 2/2	251,46	1,58	5,76
	Camel	**269,44**		**4,71**
Vodní dýmka	VD 3 m	251,27	1,59	6,14
	VD 15 m	237,46	1,54	8,42
	VD 30 m	256,1	1,6	5,08
	VD	**248,28**		**6,55**
	Uhlík	134,52	1,47	1,91
Elektronické cigarety		**292,81**	**1,64**	**3,41**

Tab. 4 – Data získaná měřením čerstvého aerosolu z jednoho potáhnutí.

Jedno potáhnutí	Typ experimentu	Medián velikosti (CMD)	Odchylka měření σ_g (GSD)	Celková koncentrace
		[nm]	[-]	[10^7/cm^3]
Cigarety	L&M začátek	223,78	1,46	6,8
	L&M uprostřed	207,27	1,47	6,78
	L&M konec	205,07	1,46	9,62
	L&M	**212,04**		**7,73**
	Camel začátek	222,92	1,48	6,77
	Camel uprostřed	201,16	1,47	7,59
	Camel konec	222,03	1,42	10,1
	Camel	**215,37**		**8,15**
Vodní dýmka	VD začátek	195,9	1,45	13,19
	VD uprostřed	198,33	1,43	15,23
	VD	**197,12**		**14,21**
	Uhlík	170,08	1,46	2,32
Elektronické cigarety		**220,41**	**1,48**	**3,72**

Experiment s jedním potáhnutím se osvědčil jako nejvhodnější pro porovnávání stylů kouření (viz tab. 4). Data získaná měřením přibližně odpovídají výsledkům experimentů provedených na jiných pracovištím v rámci výzkumu zdravotního dopadu kouření. Z tabulek je možno pozorovat pomalou koagulaci aerosolu z uhlíku a elektronické cigarety. Naopak díky vysoké koncentraci částic při kouření vodní dýmky dochází k nejvyššímu poklesu částic v těchto experimentech.

Tab. 5 – Porovnání charakteristik jednotlivých stylů kouření.

Emitované částice		**Celková koncentrace při jednom potáhnutí (z měření)**	**Průměrný nasávaný objem jednoho potáhnutí**	**Počet částic vstupujících do plic při jednom potáhnutí**	**Průměrný počet potáhnutí na vykouření**
		[10^7/cm^3]	**[cm^3]**	**[x10^7]**	
Cigareta	**L&M**	7,73	60	**463,8**	12/cig
	Camel	8,15	60	**489**	12/cig
Vodní dýmka		14,21	500	**7105**	20/g
El. cigareta		3,72	70	**260,4**	150/ml

Tabulka 5 srovnává výsledky experimentů jednoho potáhnutí a udává celkový počet částic vstupujících do plic kuřáka při jednom typickém potáhnutí z tabákového výrobku.

Přesto, že měření primárních částic při kouření není vhodné k porovnávání, je tento typ měření výhodný k zjištění rozložení velikostí částic a jejich koncentrace v okolním prostředí. Měřením čistého vzduchu v laboratoři, kde byly prováděny experimenty, byla zjištěna celková průměrná celková koncentrace 1,28 x 10^4 částic na cm^3 (CMD = 76,08 nm, GSD = 2,3). Koncentrace vdechovaného tabákového aerosolu je v případě vodní dýmky více než 10 000 krát vyšší (objem jednoho potáhnutí z dýmky je podobný objemu nadechnutého vzduchu při dýchání) než koncentrace běžného městského aerosolu.

Pro širší rozbor vlivu kouření byly vypočítány celkové počty částic při vykouření celé cigarety a následně celého balení. Stejně tak celkový počet vznikajících částic při vykouření celé vodní dýmky apod. (viz tab. 6).

Tab. 6 – Rozšířené porovnání produkce částic.

Emitované částice		Celkový počet částic při vykouření 1 cigarety, 1 gramu či 1 ml výrobku	"Balení" tabákových výrobků	Počet částic vznikající po vykouření celého balení
		[x10^{10}]		[x10^{10}]
Cigareta	L&M	5,56	20 cig/krabička	111
	Camel	5,87	20 cig/krabička	117
Vodní dýmka		142	8 g/vodní dýmka	1137
Elektronická cigareta		39,1	10 ml/balení	391

Vykouření jedné celé vodní dýmky je z hlediska emitovaných částic jako přibližně 10 krabiček cigaret (200 cigaret), avšak je potřeba zohlednit, že vodní dýmka je většinou sdílena ve více lidech. Při sdílení vodní dýmky v pěti lidech nasaje každý zúčastněný počet částic odpovídající dvěma krabičkám cigaret během zhruba hodinového kouření.

Pro bližší srovnání stylů kouření byl jako kritérium vybrán nikotin. Za tímto účelem byl uvažován kuřák, který potřebuje za den naplnit svůj nikotinový deficit. Jako výchozí bod byly uvažovány elektronické cigarety. Průměrný kuřák odpaří za den 1 až 1,5 ml náplně do el. cigarety, pro bližší specifikaci byla uvažována spotřeba 1 ml e-liquidu o obsahu nikotinu 18 mg/ml (stejně jako obsah nikotinu v měřeném objektu).

Tabulka 7 podává informace o celkovém počtu vdechnutých částic za den při spotřebování množství tabákových výrobků odpovídající 1 ml vybraného e-liquidu. Slabších cigaret je potřeba vykouřit více než silnějších proto dochází k větší zátěži částicemi u cigaret LM. Z tabulky lze usuzovat, že kouřením elektronických cigaret je lidský organismus zatěžován až 4 krát menším počtem potencionálně škodlivých částic. Naopak vodní dýmka nelze doporučit pro časté kouření díky alarmujícím hodnotám počtu částic.

Tab. 7 – Porovnání vznikajících částic při přijímání stejného množství nikotinu.

Užívání výrobků		Obsah nikotinu	Spotřeba výrobku na den odvozená od el. cigarety, pro stejný příjem nikotinu na den.	Celkový počet částic vdechnutých po užití stejného množství nikotinu za den
				[x10^{10}]
Cigareta	L&M	0,6 mg/cig	30 cig/den	**166,8**
	Camel	0,8 mg/cig	22,5 cig/den	**132**
Vodní dýmka		2 mg/g	9 g/den	**1278**
Elektronická cigareta		18 mg/ml	1 ml/den	**39,1**

Poslední zhodnocení tabákových výrobků je z finančního hlediska, z předchozího srovnání známo množství tabákových výrobků, které je potřeba užít pro dosažení stejného množství inhalovaného nikotinu. Výsledky v tabulce 8 odhalují předvídatelné vedení cigaretových výrobků. Zároveň však poukazuje na atraktivní cenu kouření elektronických cigaret. Tato kalkulace ale nepočítá s pořizovacími a údržbovými náklady e-cigaret.

Tab. 8 – Finanční zhodnocení měřených tabákových produktů.

Finanční zhodnocení		**Spotřeba výrobku**	**Cena**	**Celková hodnota vykouřených výrobků při stejném množství nikotinu**
Cigareta	**L&M**	30 cig/den	79 kč/krabička	118,5 kč/den
	Camel	22,5 cig/den	89 kč/krabička	100,1 kč/den
Vodní dýmka		9 g/den	195 kč/50g	35,1 kč/den
Elektronická cigareta		1 ml/den	69 kč/10ml	6,9 kč/den

Výsledky práce vykazují velký potenciál elektronických cigaret. V dnešní době ještě nejsou známy dlouhodobé účinky tohoto stylu kouření, ale prokazatelně se jedná o nejmenší zdroj jemných částic ze zkoumaných výrobků.

5 Závěr

Aerosoly jsou všude kolem nás, většinu částic tvořících aerosol nejsme schopni rozlišit pouhým okem, přesto mají velký vliv na lidské zdraví. Zejména ze spalovacích procesů se do okolního prostředí dostávají škodlivé částice, kterým je potřeba se vyhnout. Tato práce se zaměřuje na výzkum aerosolu vznikajícího při kouření různých tabákových produktů a posuzuje jeho vliv na zdraví člověka. Pro toto posouzení byl měřen počet částic menších než 1 μm (PM_1) pomocí přístroje SMPS 3936 firmy TSI. Součástí práce bylo navržení a sestrojení vhodné měřicí tratě pro uskutečnění experimentů. V experimentech byl aerosol generován způsobem simulujícím běžné kouřící návyky a porovnán z hlediska vznikajících částic.

Popularita kouření cigaret, zejména ve vyspělých zemích, pomalu upadá. Tabákové společnosti proto expandují do rozvojových zemí, kde trh s tabákem vzkvétá. Při vykouření běžné cigarety vznikne více než 5×10^{10} částic menších než 1 μm, které představují vysoké riziko onemocnění dýchacích cest (koncentrace vznikajícího aerosolu může být až 10 000 krát vyšší než koncentrace částic v běžném městském aerosolu).

Vodní dýmka má dlouhodobou tradici, tento typ kouření často probíhá ve více lidech najednou. Problémem vodních dýmek je speciální tabák, který může být nekvalitního původu, často chybí informace o obsahu škodlivých látek nebo mohou být uváděné nepravdivé hodnoty. Měřením v této práci bylo odhaleno u vodní dýmky jednoznačně největší množství emitovaných částic z měřených výrobků. V experimentu byla použita středně velká vodní dýmka (70 cm). Během vykouření přibližně 8 gramů speciálního melasového tabáku došlo k uvolnění stejného počtu částic jako z 200 klasických cigaret.

Na rozdíl od klasických cigaret se elektronické cigarety stávají čím dál populárnější. Spousta lidí na ně přechází z klasických cigaret, často díky snaze odbourat závislost na nikotinu. Výsledky uskutečněných experimentů prokazují, že při užívání elektronické cigarety vzniká nejmenší množství částic z měřených výrobků. Vytvářený aerosol však také obsahuje škodlivé látky, které mohou vést k těžkému onemocnění. Koncentrace částic vznikajících z el. cigarety je poloviční než u klasických cigaret, ale pořád se jedná o průměrně $3{,}72 \times 10^7$ potencionálně škodlivých částic v cm^3 aerosolu. Užívání elektronických cigaret není bezpečnou alternativou kouření klasických cigaret.

Použité zdroje

[1] RANDIN, M; KAHN, R. *Aerosols and climate change* [online]. Vydáno: 2. 11. 2010. Dostupné z: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Aerosols/>

[2] LÍZAL, F. *Experimentální výzkum transportu a depozice aerosolů v dýchacím traktu člověka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 137 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.

[3] GEHR, P; et al. *Particle-lung interactions.* New York: Informa Healthcare, 2010, 344 p. ISBN 1420072560.

[4] RAASCHOU-NIELSEN, O; et al. *Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts.* Lancet Oncology, 14, Srpen 2013, 813-822.

[5] HINDS, W. C. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles.* New York: Wiley, 1999, 483 p. ISBN 0471194107.

[6] HOLOUBEK, I. *Chemie životního prostředí* [online]. Vydáno: 2004. Dostupné z: <http://www.recetox.muni.cz/ivan-holoubek/index.php?pg=prednasky>

[7] HEAL, M. R; et al. *Particles, air quality, policy and health.* Chemical Society Reviews, 19, 2012, 6606-6630.

[8] SHI, Z. et al. *Characterization of airborne individual particles collected in an urban area, a satelite city and a clean air area in Beijing.* Atmospheric Environment 37(29), 2003, 4047-4108.

[9] GOODMAN, J; *Tobacco in History and Culture: An Encyclopedia.* Detroit: Thomson Gale, 2005.

[10] THORNE, D; ADAMSON, J. *A review of in vitro cigarette smoke exposure systems. Experimental and Toxicologic Pathology*. 65 (2013), 1183-1193.

[11] ZORICK, T; et al. *Dual role of nicotine in addiction and cognition: A review of neuroimaging studies in humus.* Neuropharmacology 84 (2014), 111-122.

[12] VANSICKEL, A.,R; et al. *Waterpipe tobacco products: nicotine labelling versus nicotine delivery*. Tob Control, 21 (3), 377-379, 2012.

[13] CAMPAGNA, D; et al. *The emerging phenomenon of electronic cigarettes.* Expert Review of Respiratory Medicine 6(1), 63-74, 2012.

[14] BENOWITZ, N; *E-cigarettes: a scientific review*. Circulation 129 (19): 1972-86. 2014.

[15] LIPPMANN, M; *Total Suspended Particles (TSP).* Encyclopedia of Public Health. 2002. Dostupné z: <http://www.encyclopedia.com/doc/1G2-3404000854.html>

[16] SURESH, D. *Aerosol Measurement Techniques.* Mechanical and Aeronautical Engineering. Clarkson University, 2004.

[17] TSI*. Aerosol Statistics, Lognormal Distribution Applications.* SMPS manual, 2009.

[18] CERULEAN. *Smoking machines*.Molins PLC. Velká Británie. Dostupné z: <http://www.cerulean.com/>

[19] JACKSON, D; AVEYARD, P*. Waterpipe smoking in students: Prevalence, risk factors, symptoms of addiction and smoke intake.* BMC Public Health 8:174, 2008.

[20] MEILE, A; et al. *Ultrafine particle emissions from waterpipes.* Tob. Control 16, 390-393, 2007.

[21] DAHER, N; et al. *Comparison of carcinogen, carbon monoxide and ultrafine particle emissions from narghile waterpipe and cigarette smoking.* Athmospheric Environment 44, 8-14, 2010.

[22] BASSEL, M; et al. *Charcoal emissions as a source of CO and carcinogenic PAH in mainstream narghile waterpipe smoke*. Food and Chemical Toxicology 46, 2991-2995, 2008.

[23] COLE, S. K; et al. *Electronic cigarette aerosol particle size distribution measurements.* Inhalation Toxicology, 24(14), 976-984, 2012.

[24] SAHU, S.K; et al*. Particle size distribution of mainstream and exhaled cigarette smoke and predictive deposition in human respirátory tract.* Aerosol Quality and Research, 13, 324-332, 2013.

[25] JOHNSON, T.J*; Steady-state measurement of the effective particle density of cigarette smoke.* Journal of Aerosol Science, 75, 9-16, 2014.

[26] EISSENBERG, T; SHIHADEH, A. *Waterpipe Tobago and cigarette smoking: direct comparison of toxicit exposure*. American journal of preventive medicine 37 (6), 518-523, 2009.

[27] ADEME, B; et al. *Coagulation of Mainstream Cigarette Smoke in the Mouth During Puffing and Inhalation.* Aerosol Science and technology, 45,1422-1428, 2011.

[28] GOPAL, S; et al. *Nanoparticles in cigarette smoke; real-time, undiluted measurements by a scanning mobility particle sizer*. Springer, 399, 3573-3578, 2011.

[29] MCGRATH, C; et al. *Real-time measurement of inhaled and exhaled cigarette smoke: Implications for dose.* Journal of Physics, 151, 2009.