



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# KONDENZAČNÍ GENERÁTOR AEROSOLU – ROZSAH A PROVOZNÍ PARAMETRY

CONDENSATION AEROSOL GENERATOR - RANGE OF OPERATION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**MICHAL SÚKENÍK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. FRANTIŠEK LÍZAL, Ph.D.**

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Michal Súkeník

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Kondenzační generátor aerosolu – rozsah a provozní parametry**

v anglickém jazyce:

### **Condensation aerosol generator - range of operation**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro tvorbu aerosolových částic o malém rozsahu velikostí lze použít několik různých metod. Jednou z nejlepších je heterogenní kondenzace par na jádrech submikronové velikosti. Cílem bakalářské práce je popsat metody tvorby aerosolu a ověřit použitelný rozsah a provozní parametry tzv. kondenzačního generátoru aerosolu

Cíle bakalářské práce:

Rešerše metod pro generování aerosolu

Experimentální ověření rozsahu, provozních parametrů a citlivosti kondenzačního generátoru aerosolu na různé vstupní parametry

Zpracování tabulek závislosti vystupujícího aerosolu na vstupních parametrech

Seznam odborné literatury:

[1] Hinds, William C.: Aerosol Technology: Properties, Behavior, And Measurement Of Airborne Particles, Wiley-interscience, 1999, 504 p.

[2] PAVELEK, M. - ŠTĚTINA, J.: Experimentální metody v technice prostředí. Skripta VUT, Brno 1997, 2001, 2007

[3] články z vědeckých časopisů

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Lízal, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 26.11.2014

L.S.

---

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

---

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

## **Abstrakt:**

V tejto bakalárskej práci sa zaoberám kondenzačným generátorom aerosólu a jeho prevádzkovými parametrami. Prístroj pracuje na princípe kontrolovanej heterogénnej kondenzácie a nachádza hlavné uplatnenie pri štúdiách depozície častíc v dýchacom trakte, ako aj testovaní filtrov či kalibrácii meracích prístrojov. Hlavným cieľom práce je overiť kvalitu vystupujúceho aerosólu a to ako závisí na nastavení vstupných parametrov. Ďalej sa zaoberám metódami tvorby aerosólov, ako aj ich štatistickým popisom.

## **Abstract:**

In this bachelor thesis I deal with condensation aerosol generator and its range of operation. This device is based on controlled heterogenous condensation and is widely used in different fields such as inhalation studies, testing filters or calibration of measuring devices. The primary aim of the thesis is to verify the quality of producing aerosol and the dependance on the operation conditions. I also deal with methods of generated aerosols as well as their statistical description.

**Bibliografická citácia:**

SÚKENÍK, M. *Kondenzační generátor aerosolu – rozsah a provozní parametry*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 40 s. Vedoucí bakalářské práce  
Ing. František Lízal, Ph.D.

## **PodĎakovanie:**

Chcel by som sa poĎakovať vedúcemu mojej práce Ing. Františkovi Lízalovi, PhD. za jeho odborné rady a skúsenosti, ústretovosť pri konzultáciách a celkový čas, ktorý mi bol ochotný venovať aj mimo svojej pracovnej doby. Taktiež projektu LO1202 NETME CENTRE PLUS s finančnou podporou z Ministerstva školstva, mládeže a telovýchovy Českej republiky v rámci Národného projektu udržateľnosti I, cez ktorý boli zakúpené prístroje využité pri meraní. Ďalej by som sa rád poĎakoval svojim rodičom, za ich veľkú podporu v celom doterajšom štúdiu. Veľká vĎaka patrí aj mojej snúbenici Terezke.

## **Prehlásenie:**

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracoval samostatne a všetky využité informačné zdroje v práci uviedol.

Brno 25. mája 2015

.....  
Michal Súkeník



# Obsah:

<b>1. ÚVOD</b>	<b>2</b>
<b>2. TEORETICKÉ ZÁKLADY</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Aerosól a jeho popis</b>	<b>3</b>
2.1.1. Veľkosť a tvar častíc	3
2.1.2. Hustota a koncentrácia častíc	5
2.1.3. Štatistický popis aerosólu	6
2.1.4. Lognormálne rozdelenie	11
<b>2.2. Laboratórna príprava aerosólov</b>	<b>13</b>
2.2.1. Spôsoby prípravy aerosólov	13
2.2.1.1. Atomizácia kvapaliny	13
2.2.1.2. Atomizácia pomocou suspenzie monodisperzných častíc v kvapaline	15
2.2.1.3. Disperzia suchého prášku	15
2.2.1.4. Kondenzačné metódy	15
<b>3. CMAG 3475 – KONDENZAČNÝ GENERÁTOR AEROSÓLU</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Základné parametre</b>	<b>16</b>
<b>3.2. Časti prístroja</b>	<b>17</b>
<b>4. EXPERIMENTÁLNE MERANIE GENERÁTORU AEROSÓLU CMAG</b>	<b>20</b>
<b>4.1. Meracia trať</b>	<b>20</b>
<b>4.2. Prístroje použité k meraniu aerosólu</b>	<b>21</b>
4.2.1. PAM - Process aerosol monitor	21
4.2.2. APS - Aerosol particle sizer	23
4.2.3. SMPS - Scanning mobility particle sizer	24
<b>4.3. Podmienky merania</b>	<b>25</b>
4.3.1. Voľba vstupných parametrov	25
4.3.2. Priebeh merania	26
<b>4.4. Spracovanie dát</b>	<b>26</b>
<b>4.1. Výsledky merania</b>	<b>30</b>
<b>5. DISKUSIA</b>	<b>36</b>
<b>6. ZÁVER</b>	<b>37</b>
<b>PRÍLOHA</b>	<b>38</b>
<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV</b>	<b>38</b>



# 1. Úvod

Jadrom mojej bakalárskej práce je prístroj na tvorbu aerosólových častíc americkej značky TSI, CMAG 3475. Už jeho názov nám prezrádza o prístroji veľa. CMAG je skratkou z anglického Condensation Monodisperse Aerosol Generator, čo v preklade znamená Kondenzačný Generátor Monodisperzného Aerosólu. Ide teda o generátor, produkujúci monodisperzný aerosól, na ktorého tvorbu využíva proces kondenzácie, čiže fázovej premeny pary na kvapalinu.

V prvej časti sa zameriavam na problematiku popisu aerosólových častíc ako takých. Spôsob, ako sa kvantifikujú ich vlastnosti z pohľadu štatistiky a ktoré charakteristiky aerosólov sú pre ich ďalšie štúdium, či využitie kľúčové. Ďalej sa zaoberám stručnou charakterizáciou rôznych spôsobov a metód prípravy aerosólov.

V experimentálnej časti je mojím cieľom premerať prevádzkové parametre už spomenutého prístroja a jeho rozsah. K meraniu kvality vystupujúceho aerosólu som použil tri prístroje: APS, SMPS a PAM. Každý z nich pracujú na inom princípe, preto sa ho snažím aj v krátkosti popísať.

Na priloženom CD si môžete prezrieť výsledky merania, spracované do tabuliek, ako aj výsledné grafy, znázorňujúce distribúciu častíc generátora (váženú počtom a hmotnosťou) v celom rozsahu nastavenej citlivosti prístrojov, čo bolo od 20 nm do 20  $\mu$ m.

## 2. Teoretické základy

### 2.1. Aerosól a jeho popis

Aerosólom označujeme heterogénnu zmes pevných alebo kvapalných častíc, rozptýlených v plynnom médiu. Ide teda o dvojfázový systém častice a plynu. Aerosól je prítomný takmer všade okolo nás a s jeho rôznymi podobami sa stretávame každý deň, od príjemne voňajúcich sprejov, cez ranú hmlu, až po cigaretový dym, či výfukové plyny áut. Aerosól môže byť stabilný rôzne dlhú dobu, niekoľko sekúnd až rokov a veľkosť častíc sa pohybuje v rozmedzí 0,002 - 100  $\mu\text{m}$ . Z foriem prítomných v prírode môžeme bližšie charakterizovať nasledujúce [2]:

- oblak, hmla - voda prítomná vo vzduchu v rôznych výškach nad zemským povrchom, v skupenstve kvapalnom i pevnom
- dym - pevné i kvapalné častice, ktoré vznikli nedokonalým spaľovaním, sú menšie ako 1  $\mu\text{m}$
- smog - slovo vzniklo spojením anglických slov smoke a fog, ide o dobre viditeľné znečistenie vzduchu, čoraz častejšie sa vyskytuje v mestách, častice sú zvyčajne menšie ako 2  $\mu\text{m}$
- prach - pevné častice, vzniknuté ako produkt mechanického pôsobenia na materiál a jeho eróziou

Pre bližšie štúdium aerosólov je však nevyhnutné, uviesť termíny a veličiny, presnejšie popisujúce stav aerosólu.

#### 2.1.1. Veľkosť a tvar častíc

Práve veľkosť častice má na správanie aerosólov zásadný vplyv. Pre sférické častice je ich charakteristickým rozmerom *priemer*. Častice nepravidelných tvarov, ako napr. vlákna či sadze, je ťažko popísať univerzálnym rozmerom, ktorý by vystihoval ich veľkosť, a tak, podľa použitej techniky ich merania, existuje viacero spôsobov, ako popísať ich veľkosť. Najčastejšie ju vyjadrujeme veličinou *ekvivalentný priemer*, ktorá predstavuje priemer takej gule, aby hodnota jej špecifickej fyzikálnej vlastnosti (hmotnosť, objem, povrch) bola rovnaká, ako častice s nepravidelným tvarom. Podľa špecifickej fyzikálnej vlastnosti zavádzame nasledujúce ekvivalentné priemery [1]:

*aerodynamický ekvivalentný priemer* je priemer gule o štandardnej hustote ( $1 \text{ g/cm}^3$ ), ktorej sedimentačná rýchlosť<sup>1</sup> je totožná s rýchlosťou sedimentácie pozorovanej častice

---

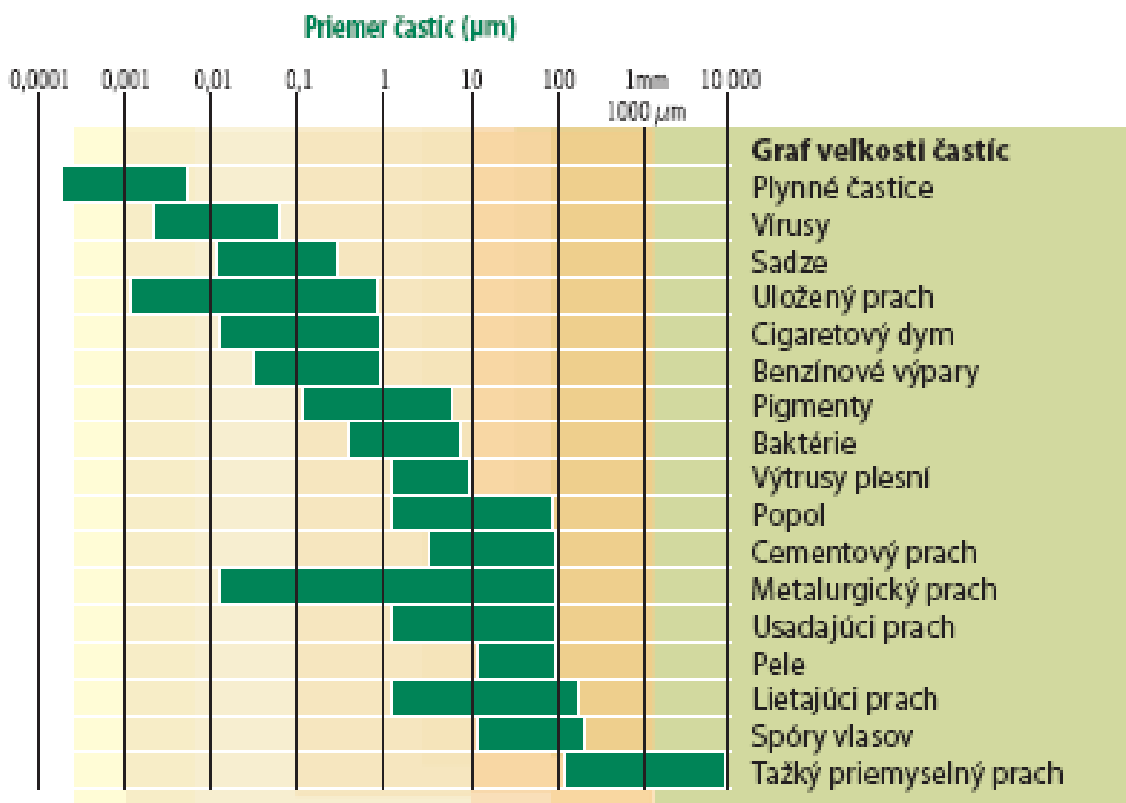
<sup>1</sup> sedimentačná rýchlosť - rýchlosť, ktorú častica dosiahne v prípade, že sily pôsobiace na časticu (tiažová sila, vztlaková sila, odpor prostredia) sú v rovnováhe [7]

*ekvivalentný priemer pohyblivosti* určuje priemer guľovej častice s rovnakou pohyblivosťou<sup>2</sup>, ako príslušná častica

*objemový ekvivalentný priemer* predstavuje priemer gule s rovnakým objemom, ako skúmaná častica, obdobne zavádzame hmotnostný či povrchový ekvivalentný priemer

*Sauterov stredný priemer* vyjadruje priemer takej kvapky, aby pomer jej povrchu a objemu bol rovný strednej hodnote tohto pomeru všetkých kvapiek v danom rozdelení veľkostí, čo sa využíva napr. pri posúdení kvality rozprášených kvapiek paliva v spaľovacích procesoch motorov.

Pre popis častíc môže byť zavedených množstvo ďalších ekvivalentných priemerov podľa toho, akou vlastnosťou chceme aerosól veľkostne charakterizovať, t.j. vážiť. Veľkosť častíc sa najčastejšie udáva v mikrometroch ( $\mu\text{m}$ ). Vo všeobecnosti môžeme povedať že prach, čiastočky zeme či peľ sú veľké v jednotkách mikrometrov, kým dym obsahuje častice menšie než 1  $\mu\text{m}$ , čo si môžeme všimnúť aj na Obr. 1.



Obr. 1: Porovnanie veľkostí častíc vyskytujúcich sa vo vzduchu [8].

<sup>2</sup> pohyblivosť - rýchlosť dosiahnutá vonkajšou silou jednotkovej veľkosti [7]

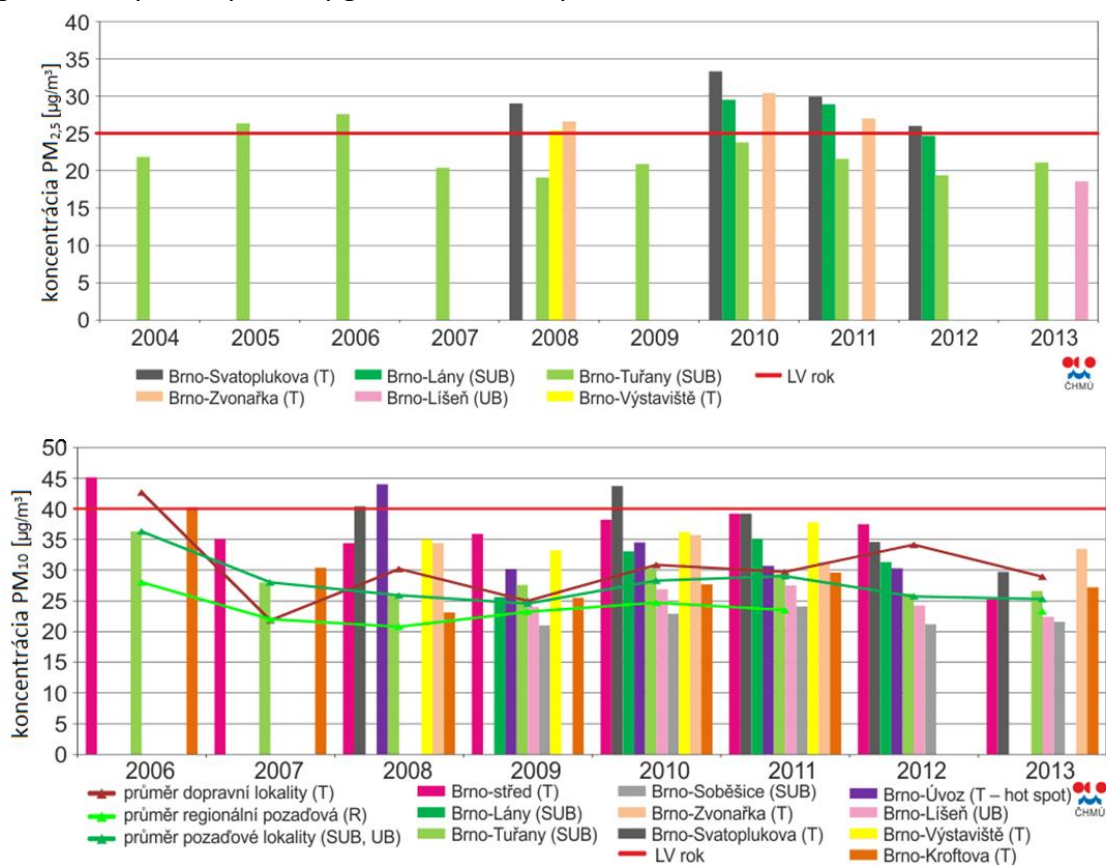
## 2.1.2. Hustota a koncentrácia častíc

Hustotu častíc zvyčajne vyjadrujeme v jednotkách  $\text{kg}/\text{m}^3$ , resp.  $\text{g}/\text{cm}^3$ , kde sa hmotnosť i objem vzťahujú na samotné častice, nie aerosól ako celok. Častice majú približne rovnakú hustotu ako materiál, z ktorého vznikli. To platí aj pre častice, vzniknuté v procese spaľovania, napríklad dym. Avšak tým, že častice tvoria zhluky, obsahujú veľa voľného priestoru, a tak sa ich zdanlivá hustota javí výrazne menšia.

Koncentráciou rozumieme priestorové rozdelenie určitej špecifickej vlastnosti v jednotkovom objeme plynu, ktorá je typická pre aerosól a podobne ako v prípade ekvivalentného priemeru by sme mali bližšie špecifikovať, o akých vlastnostiach hovoríme. V tejto práci budem rozlišovať dve hľadiská koncentrácie: koncentráciu častíc a hmotnostnú koncentráciu.

Koncentrácia častíc vyjadruje počet častíc v objeme plynu (vzduchu) a väčšinou sa používa pri posudzovaní kvality ovzdušia. V oblastiach málo ovplyvnených priemyslom a s relatívne čistým vzduchom, sa celková koncentrácia častíc pohybuje v rádoch  $10^4/\text{cm}^3$ . Ovzdušie v tesnej blízkosti priemyselných parkov dosahuje koncentrácie častíc až  $10^7/\text{cm}^3$  a viac. Pre porovnanie, priestory na výrobu mikroelektroniky vyžadujú, aby hodnota koncentrácie častíc do priemeru  $0,1 \mu\text{m}$  neprekročila hodnotu  $10^3/\text{m}^3$ , čo predstavuje  $0,001/\text{cm}^3$ .

Ako som už spomenul, hľadisko koncentrácie môže byť aj hmotnostné. Hodnota hmotnostnej koncentrácie častíc sa pre ovzdušie pohybuje približne v rozmedzí hodnôt od  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  v čistých, až po  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  v znečistených oblastiach. [1]



Obr. 2: Priemerné ročné koncentrácie častíc PM<sub>2,5</sub> a PM<sub>10</sub> v lokalitách Brna [9].

### 2.1.3. Štatistický popis aerosólu

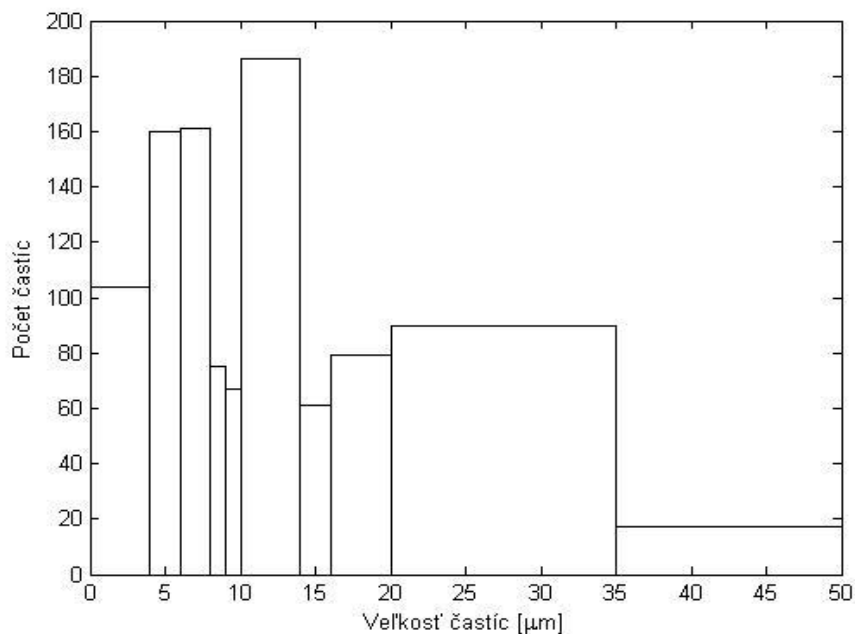
V nasledujúcej podkapitole by som chcel stručne priblížiť spôsob, akým sa aerosól popisuje z hľadiska matematiky. Pretože vzorka aerosólu obsahuje obrovský počet častíc rôznych veľkostí a rôznych koncentrácií, vzniká tak veľké množstvo informácií, ktoré musíme nejakým spôsobom spracovať. Jednou z možností je údaje jednoducho usporiadať do tabuľky. Tá by však potom mala nepoužiteľné rozmery a takmer žiadnu informáciu o konkrétnom aerosóle by nám neposkytla. Preto sa pri popise aerosólov využíva jedna z matematických disciplín, a to matematická štatistika, ktorej základnou úlohou je informácie z daného súboru vlastností skúmaného javu zovšeobecniť, či usporiadať tak, aby bolo možné vyvodiť z nich určitý záver. Na priblíženie problematiky štatistického popisu aerosólu použijem príklad z knihy *Aerosol technology* [2].

Zoberme do úvahy vzorku 1000 sférických častíc ľubovoľného aerosólu, (napríklad produktu ľudského kýchnutia), ktorú sme analyzovali prístrojom, určeným k meraniu ich veľkosti. Výstupom prístroja je súbor dát, napr. tabuľka, ktorá každej detekovanej častici priradí príslušnú charakteristickú veličinu, v našom prípade priemer  $d_p$ . Získavame tak tabuľku o rozmeroch 1000 x 2. Pre sprehľadnenie týchto informácií môžeme častice rozdeliť do veľkostných tried, ktorých bude menej, pretože každá pokrýva určitý veľkostný interval, ktorý je spojitý a medze intervalov na seba nadväzujú. Dáta následne spracujeme to tabuľky, ktorá môže vyzerať napríklad takto:

Rozsah	od	0	4	6	8	9	10	14	16	20	35
veľkostí [ $\mu\text{m}$ ]	do	4	6	8	9	10	14	16	20	35	50
Počet častíc		104	160	161	75	67	186	61	79	90	17

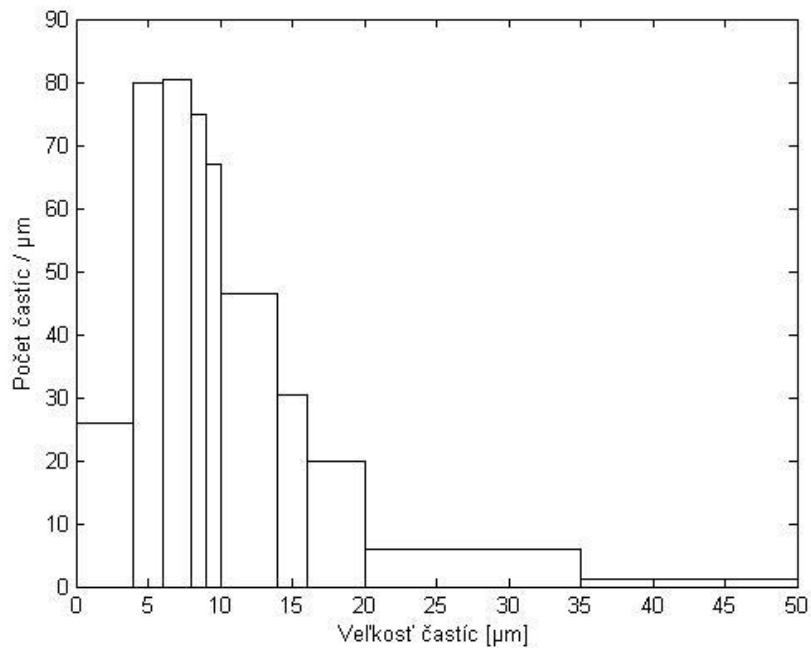
Tab. 1: Usporiadanie častíc do veľkostných tried. Upravené z [2].

Jedným zo spôsobov ako dáta vykresliť je pomocou histogramu, ktorý som podľa Tab. 1 vykreslil v Matlabe:



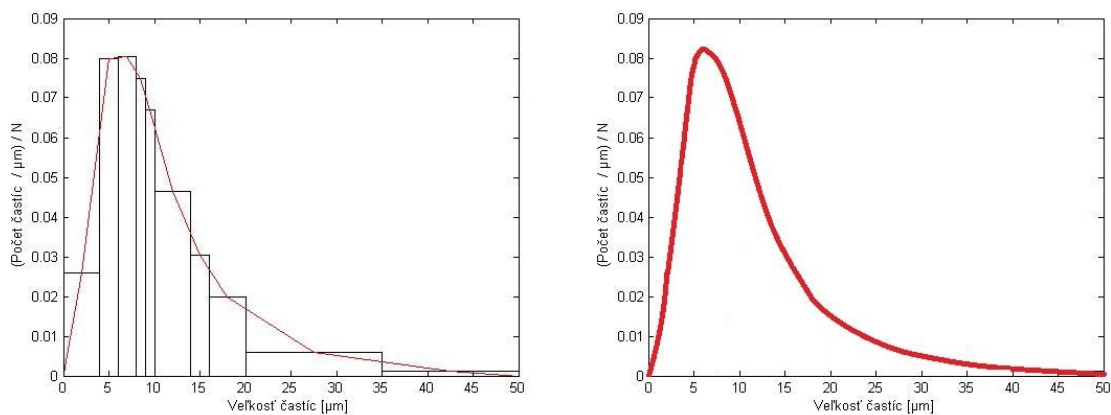
Obr. 3: Histogram počtu častíc

Keď sa nad grafom zamyslíme, zistíme, že je skreslený, pretože počet častíc v každej triede je závislý od jej šírky. Aby sme tomu predišli, podelíme jednotlivé počty častíc v triede šírkou danej triedy. Výsledný graf bude mať takúto podobu:



Obr. 4: Histogram počtu častíc podelených šírkou triedy v závislosti na ich veľkosti.

Na osi y je vykreslený pomer počtu častíc k šírke triedy, resp. počet častíc, vztahujúci sa na interval (triedu) o jednotkovej veľkosti a tak sú teraz stĺpce s rôznymi šírkami porovnateľné. Plocha histogramu - súčet malých obdĺžnikov - tak udáva celkový počet detekovaných častíc, t.j.  $N=1000$ . Graf môžeme upraviť ešte ďalej. Pomer počtu častíc k šírke triedy podelíme celkovým počtom častíc  $N$ . Nasledovne početnosti stredov tried preložíme spojitou krivkou (polygónom početnosti), ktorú vyhladíme zvýšením počtu tried, čím sa opäť dostávame k väčšiemu súboru dát:



Obr. 5: Histogramy početností častíc preložené spojitou krivkou.

Znázornená krivka je distribučnou funkciou veľkostného rozdelenia častíc skúmanej vzorky aerosólu a označíme ju  $f(d_p)$ . Pre plochu pod grafom potom platí:

$$\int_0^{\infty} f(d_p) dd_p = 1 \quad (1)$$

Deskriptívna štatistika pre popis distribučných funkcií zavádza viacero číselných charakteristických, bližšie určujúcich polohu, rozptyl či šikmosť (všeobecne tvar) funkcie. K najčastejšie používaným charakteristikám polohy patria priemer, medián, modus a geometrický priemer. V súvislosti s vyššie uvedeným príkladom by sa počítali takto [2]:

*Priemer* - alebo aj *aritmetický priemer* častíc

$$\bar{d} = \frac{\sum d_p}{N} = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} = \frac{(104 * 2) + (160 * 5) + \dots}{1000} \cong 11,18 \mu\text{m} \quad (2)$$

kde:  $n_i$  - počet častíc v i-tej triede  
 $d_i$  - stred i-tej triedy,  $1 \leq i \leq 10$   
 $d_p$  - priemer p-tej častice,  $1 \leq p \leq N$

*Medián* - označovaný aj ako *CMD (count median diameter)*, je to stredná hodnota usporiadaného štatistického súboru, delí ho na dve polovice, teda je to priemer takej častice, pre ktorú platí, že 50% častíc je väčších a 50% menších, v prípade párneho počtu uvažujeme priemer dvoch stredných hodnôt:

$$CMD = \frac{d_{i=N/2} + d_{i=(N/2)+1}}{2} = \frac{d_{500} + d_{501}}{2} = \frac{8,5 + 9,5}{2} = 9 \mu\text{m} \quad (3)$$

*Modus* - je priemer častice prislúchajúci najpočetnejšej triede. V našom prípade je najviac častíc v tretej triede, ktorá má rozsah od 6 do 8  $\mu\text{m}$ , modus je jej stred, čiže 7  $\mu\text{m}$ .

*Geometrický priemer*  $d_g$  - definujeme ako N-tú odmocninu súčinu priemerov N-častíc

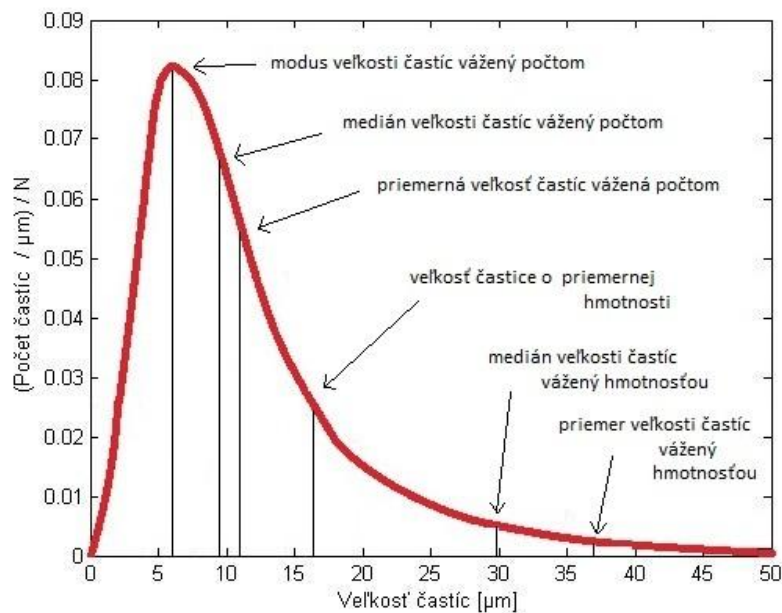
$$\begin{aligned} d_g &= \sqrt[N]{(d_1 d_2 d_3 \dots d_N)} = \left( \prod_{p=1}^N d_p \right)^{1/N} = \left( \prod_{i=1}^{10} d_i^{n_i} \right)^{1/1000} = \\ &= (2^{104} * 5^{160} \dots)^{1/1000} \cong 8,76 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (4)$$

Štandardná odchyľka  $\sigma$  - je v [1] definovaná podľa vzorca:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i (d_i - \bar{d})^2}{N - 1}} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{104 * (2 - 11,18)^2 + 160 * (5 - 11,18)^2 \dots}{1000 - 1}} = 7,99 \mu\text{m}$$

Niektoré veličiny pre názornosť zobrazím do grafu a doplním ďalšími charakteristikami rozloženia:



Obr. 6: Rozloženie veľkosti častíc s príslušnými charakteristikami, upravené z [2].

Doteraz sme sa zaoberali veličinami, popisujúcimi distribúciu častíc, ktoré boli vážené počtom (*counts*), preto aj os y, v prípade všetkých grafov, vyjadrovala počet častíc. Do grafu však pribudli aj charakteristiky vážené hmotnosťou (*mass*). Ide teda o veličiny, ktoré by sme získali z grafu závislosti veľkosti častíc na osi x a hmotnosti častíc na osi y. Problémom však je ako tieto hmotnosti častíc o rozmere pár mikrometrov, či dokonca desiatok nanometrov „odvážiť“ a tak tieto grafy vykresliť. Matematickou úpravou vzťahov si môžeme ukázať, že to ide pomerne jednoducho, a častice vážiť vôbec nemusíme. Tento prístup sa preto označuje aj ako nepriame meranie veľkosti častíc [2]. Pripomeniem, že všetky častice uvažujeme sférického tvaru.

Priemernú hmotnosť častice vypočítame rovnako ako priemer v rovnici (2). Nahradíme symbol priemeru  $d$  symbolom hmotnosti  $m$ :

$$\bar{m} = \frac{\sum m_p}{N} = \frac{\sum n_i m_i}{N} \quad (6)$$

- kde:  $m_i$  - stredná hmotnosť i-tej triedy
- $m_p$  - hmotnosť každej častice
- $n_i$  - počet častíc v i-tej triede



Hmotnosť častice môžeme vyjadriť aj inak, pomocou jej objemu a hustoty:

$$\begin{aligned}\bar{m} &= \rho V \\ \frac{\sum m_p}{\rho N} &= \rho \frac{4}{3} \pi r_p^3 \\ \frac{\sum m_p}{\rho N} &= \frac{1}{6} \pi d_p^3\end{aligned}\tag{7}$$

Vyjadríme priemer  $d_p$  a preznačíme ho na  $d_m$ , pretože je počítaný cez hmotnosť a označuje veľkosť častice o priemernej hmotnosti. Hmotnosť jednej častice  $m_p$  ďalej vyjadříme jej hustotou a priemerom  $d_p$ :

$$\begin{aligned}d_m^3 &= \frac{6 * \sum \rho \frac{1}{6} \pi d_p^3}{\pi \rho N} \\ d_m^3 &= \frac{\sum d_p^3}{N} \\ d_m^3 &= \frac{\sum n_i d_i^3}{N}\end{aligned}\tag{8}$$

$$d_m = \left( \frac{\sum n_i d_i^3}{N} \right)^{1/3} = \left( \frac{\sum 104 * 2^3 + 160 * 5^3 \dots}{1000} \right)^{1/3} \cong 16,32 \mu\text{m}$$

Takto dostávame veľkosť častice o priemernej hmotnosti, zakreslenú aj na Obr. 6. Týmto príkladom z [2] som chcel zjednodušene načrtnúť súvislosti medzi distribučnými funkciami váženými počtom a hmotnosťou. Stačí poznať počet častíc (a ich priemer), z ktorého potom distribučnú funkciu hmotnosti vieme vypočítať. Celkovú hmotnosť všetkých častíc následne určíme úpravou rovnice (7):

$$M = N\bar{m} = N \frac{1}{6} \rho \pi d_m^3\tag{9}$$

Rovnako, ako sme definovali *CMD*, definujeme aj medián vážený hmotnosťou *MMD* (*mass median diameter*). Ide o taký priemer častice, ktorý rozdeľuje celkovú hmotnosť vzorky na dve polovice s rovnakou hmotnosťou.

Funkcií, popisujúcich rozloženie častíc, môže byť viacero. Okrem už spomenutých možností môžu byť funkcie vážené aj objemom, povrchom či priemerom. Súvislosť medzi nimi však bude fungovať na podobnom princípe, ako je uvedené vyššie.

## 2.1.4. Lognormálne rozdelenie

Doteraz sme sa zaoberali popisom častíc tzv. normálnym rozdelením. Pre aerosóly je však vhodnejší iný typ rozdelenia. „Lognormálne rozdelenie veľkosti častíc je v aerosólových vedných disciplínach a technológii viac používané ako normálne“ (Kulkarni et al., 2011, str. 484).

Prečo je tomu tak, vyplýva z doterajších poznatkov o aerosóle, z pozorovania a skúmania jeho zloženia mnohými odborníkmi a vedcami v tejto oblasti. Pre toto distribučné rozdelenie a jeho charakteristiky budú v podstate platiť rovnaké definície aké som spomenul v predošlej kapitole. Hlavný rozdiel bude v tom, že musíme uvažovať logaritmy hodnôt. Teda všetky veličiny vnesené do grafov nahradíme ich dekadickým logaritmom. Uvediem konkrétny príklad. Zlogaritmovaním rovnice (4), jej úpravou a využitím pravidiel pri úprave logaritmu,  $\log b^c = c \cdot \log b$ , resp.  $\log(e \cdot f) = \log e + \log f$ , dostaneme:

$$\log(d_g) = \log\left(\prod_{p=1}^N d_p\right)^{1/N} = \frac{1}{N} \log\left(\prod_{i=1}^{10} d_i^{n_i}\right) \quad (10)$$

$$\log(d_g) = \frac{\sum_{i=1}^{10} n_i \log(d_i)}{N}$$

Kde výraz  $\log(d_g)$  je logaritmus *geometrického priemeru*. Ten vstupuje do rovnice (5), na výpočet veličiny, ktorou sa aerosól popisuje azda najčastejšie. Ide o *geometrickú štandardnú odchýlku*  $\sigma_g$ . Aritmetický riemer  $\bar{d}$  nahradíme geometrickým priemerom  $\log(d_g)$  a výsledkom je:

$$\log(\sigma_g) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N n_i (\log(d_i) - \log(d_g))^2}{N - 1}} \quad (11)$$

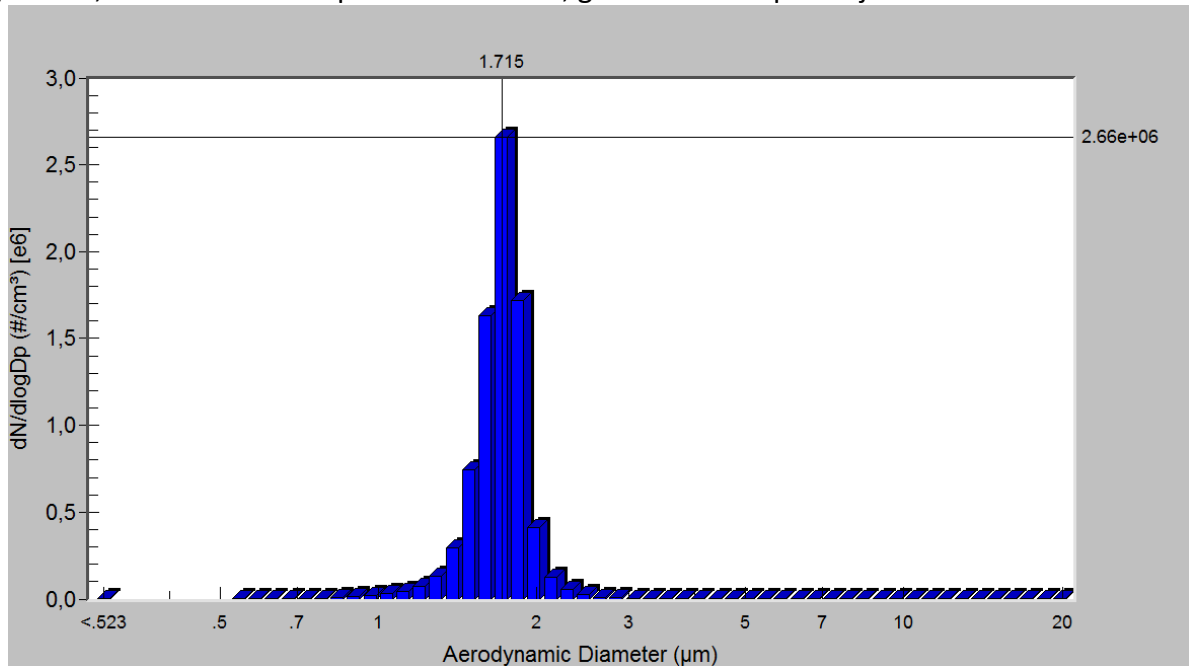
Častice aerosólu majú rôznu veľkosť. Na základe pomeru ich zastúpenia rozdeľujeme aerosól na *monodisperzný* a *polydisperzný*. Disperzia aerosólu sa kvantifikuje spomenutou veličinou  $\sigma_g$ , ktorá nám hovorí, aký rozptyl veľkosti častíc, vzhľadom k ich množstvu, môžeme očakávať. Pre ideálne monodisperzný aerosól platí  $\sigma_g = 1$ , čo by znamenalo, že všetky častice sú rovnaké, resp. spadajú do rovnakej triedy (s rozmerom od - do) [10]. V praxi je to však dosiahnuteľné veľmi obtiažne a v prípade potreby vysokých koncentrácií nemožné. Presná hranica medzi mono a polydisperzným aerosólom nie je striktne daná. V súlade s [1] ju preto budem uvažovať pri hodnote  $\sigma_g = 1,2$ . Znamená to rozptyl v hodnotách odchýlky do 20 % od ideálneho stavu. Manuál generátora aerosólu CMAG [4] stupne disperzie interpretuje trochu inak:

$\sigma_g < 1,15$	pre monodisperzný
$1,15 < \sigma_g < 1,5$	kvazimonodisperzný
$1,5 < \sigma_g$	polydisperzný aerosól

Geometrickú štandardnú odchýlku môžeme rovnako ako všetky predchádzajúce charakteristiky vážiť počtom, hmotnosťou, povrchom, objemom atď.

Keby som výpočet  $\sigma_g$  z rovnice (5) aplikoval na príklad v kapitole 2.1.3, výsledok by bol 2,06, čo hovorí o značnej polydisperzii častíc. Ak by sme ale počet častíc v tretej triede zvýšili 10-násobne (na 1610 častíc),  $\sigma_g$  by činila 1,60. Ak 100-násobne, mala by už len hodnotu 1,20 a pri 1000-násobnom navýšení pôvodného počtu len 1,06. Pri takom vysokom počte častíc v jednej triede sú ostatné, i keď oveľa väčšie, štatisticky zanedbateľné.

Doteraz zmienené veličiny, popisujúce aerosól, by som ešte raz chcel ilustrovať na jednom, teraz už reálnom príklade aerosólu, generovaného prístrojom CMAG.



Obr. 7: Veľkostné rozloženie častíc aerosólu produkovaného prístrojom CMAG. Vyhodnotené softvérom Aerosol instrument manager.

Graf vznikol vykreslením dát z prístroja APS, ktorý meria aerodynamický priemer častíc. To, na čo chcem poukázať je mierka osi y s jednotkou počet častíc/log priemeru, čím docielime vzájomnú porovnateľnosť všetkých stĺpcov, pretože tak budú jednotkovej šírky. V nasledujúcej tabuľke môžeme vidieť výsledok z merania.

	Number	Surface	Mass
	Particle Size	Particle Size	Particle Size
Median ( $\mu\text{m}$ )	1.70	1.73	1.76
Mean ( $\mu\text{m}$ )	1.69	1.81	2.28
Geo. Mean ( $\mu\text{m}$ )	1.68	1.75	1.91
Mode ( $\mu\text{m}$ )	1.72	1.72	1.72
Geo. St. Dev.	1.14	1.22	1.53
Total Conc.	2.51e+05(#/cm3)	2.31e+06( $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ )	698.4(mg/m3)

Tab. 2: Výsledná tabuľka merania aerosólu

Prvý riadok uvádza medián a jeho hodnoty, vážené počtom, povrchom a hmotnosťou. Za ním nasleduje priemer, geometrický priemer, mód a geometrická štandardná odchýlka. Z grafu na Obr. 7 ešte môžeme odčítať aj koncentráciu častíc modálneho priemeru v  $1 \text{ cm}^3$ .

## 2.2. Laboratórna príprava aerosólov

Príprava aerosólov je dôležitá v mnohých oblastiach. Pri testovacích zariadeniach na čistenie vzduchu, prístrojoch na odber vzoriek z ovzdušia, ale i pri vývoji nových filtrov, či výskume depozície častíc v dýchacej sústave. Na kalibráciu prístrojov, merajúcich veľkosť častíc aerosólu sa používa monodisperzný aerosól. Na druhej strane polydisperzný aerosól je dôležitý pri rôznych simuláciach. Ako som už uviedol, za hranicu medzi mono a polydisperzným aerosólom budem považovať hodnotu  $\sigma_g = 1,2$ .

Vo výskume aerosólov hrá významnú rolu práve monodisperzný aerosól, „pretože väčšina vlastností aerosólu je výrazne závislých na veľkosti častíc, ktorá sa najlepšie kontroluje použitím monodisperzného aerosólu.“ (Hinds, 1991, str.428). Generovanie aerosólu, či už poly alebo monodisperzného, je možné mnohými spôsobmi. V nasledujúcich kapitolách by som chcel bližšie priblížiť niektoré princípy a metódy, ako i zariadenia, vhodné na ich tvorbu.

### 2.2.1. Spôsoby prípravy aerosólov

Na prípravu aerosólu sa dá vo všeobecnosti použiť mnoho rôznych spôsobov. V stručnosti sa preto pokúsím priblížiť len tie základné. Pri písaní som sa opieral o dva zdroje informácií [2] a [13].

#### 2.2.1.1. Atomizácia kvapaliny

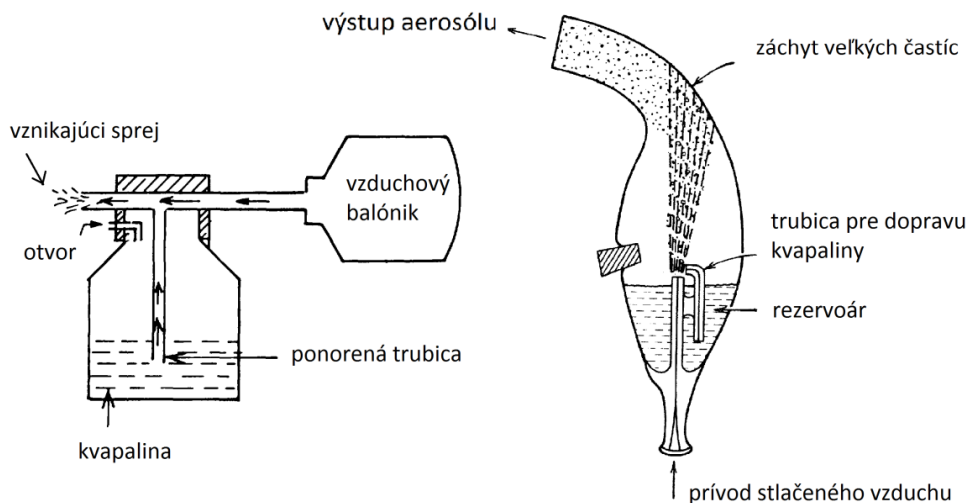
Pojmom atomizácia vo všeobecnosti rozumieme rozpad hmoty na menšie čiastočky. V oblasti aerosólov bude teda predstavovať mechanické rozptýlenie (disperziu) kvapaliny na drobné kvapky. Tento proces prebieha v prístrojoch, všeobecne označovaných ako *atomizátory*. Podľa typu energie, ktorú zariadenia využívajú na disperziu kvapaliny rozlišujeme atomizátory [2]:

- a) tlakové: tlak kvapaliny premieňajú na jej kinetickú energiu, tá ju vďaka odporu prostredia rozruší na menšie kvapky; patria sem napr. vstrekovacie trysky spaľovacích motorov, vírové trysky
- b) plynové: na disperziu kvapaliny používajú kinetickú energiu stlačeného vzduchu (či iného plynu) a Venturiho efektu; zaraďujú sa tu napr. rozprašovače a spreje
- c) rotačné: energiu, potrebnú na rozrušenie kvapaliny, dodávajú rotačnými časťami, využívajú sa pri tzv. sprejovom sušení
- d) ultrazvukové, elektrostatické

Zo spomenutých sa v technike aerosólov na výrobu kvapôčok veľmi používajú atomizátory plynové v ktorých nosným plynom býva najčastejšie vzduch, prípadne aj iný plyn, napr. dusík. Dva konkrétne príklady prevedenia atomizátorov, sú znázornené na Obr. 8. V medicíne na podobnom princípe fungujú inhalačné prístroje, tzv. nebulizátory<sup>3</sup>.

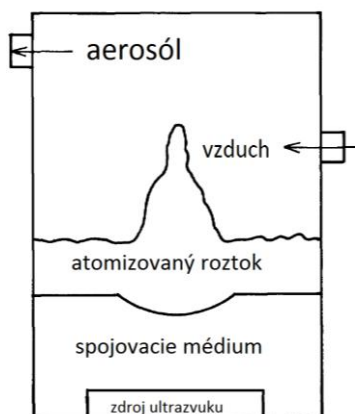
---

<sup>3</sup> nebulizátor - zariadenie, kde sa kvapôčky aerosólu tvoria disperziou kvapaliny [7], v medicíne to je suspenzia lieku



Obr. 8: Schéma ručného rozprašovača (vľavo) a nebulizátora DeVilbiss 40 (vpravo).  
Upravené z[2] a [12].

Nebulizátory, alebo aj „rozprašovače“ či „zhmlievače“, podľa [2] pracujú so vzduchom, ako hnacím médiom pod tlakom 35 až 340 kPa a dokážu produkovať aerosól o hmotnostnej koncentrácii 5 - 50 g/m<sup>3</sup>. Kvapalina je zo zásobníka nasávaná podtlakom, vznikajúcim rýchlym prúdom vzduchu v hlavnej trubici (tzv. Venturiho alebo Bernoulliho efekt). Kinetickou energiou vzduchu sa kvapalina roztriešti a v prípade typu DeVilbiss 40, krátko po atomizácii a vzniku prvotného aerosólu dôjde na sklenených stenách k vyselektovaniu veľkých a teda aj ťažkých častíc, ktoré sa vracajú späť do rezervoára, aby boli opätovne použité na tvorbu aerosólu. Tento model dokáže produkovať 16 g/m<sup>3</sup> častíc s GSD = 1,8 a MMD = 4,2 μm pri prietoku 12l/min. Telo nebulizátora je sklenené a vzduch sa doň vháňa balónikom. Ešte koncom minulého storočia sa tento model používal pri testovaní citlivosti dýchacích ciest za účelom prevencie astmy [13]. Trochu iný atomizátor je na Obr. 8 vľavo, ktorý nám určite pripomína známe, dnes už málo používané, zariadenia na aplikáciu parfumov. Princíp nasávania kvapaliny je rovnaký. K samotnej atomizácii dochádza až po výstupe z trysky vďaka náporu vonkajšieho vzduchu, ktorému je prúd vystavený. V súčasnosti sa používajú pri liečbe ochorení, či už dýchacích ciest, ale i jednoduchej aplikácie účinnej látky neinvazívnou cestou, sofistikovanejšie zariadenia, v ktorých hlavnú rolu začína preberať elektronika, princíp fungovania je však veľmi podobný.



Obr. 9: Ultrazvukový atomizátor, upravené z [12].

Ultrazvukové atomizátory produkujú aerosóly s MMD = 1 - 10 μm [2]. Potrebnú energiu prístroj získava pôsobením striedavého elektrického poľa z vysoko frekvenčného oscilátora na piezoelektrický kryštál [12].

#### 2.2.1.2. Atomizácia pomocou suspenzie monodisperzných častíc v kvapaline

Kalibrácia prístrojov na meranie častíc si vyžaduje častice o vysokej monodisperzite. Najčastejšie sa získavajú atomizáciou roztoku, v ktorom sú častice už obsiahnuté. Materiálom pevných častíc býva polystyrénový latex (PSL) alebo latex polystyrén-divinylbenzénový (PS-DVB). Ich priemer sa pohybuje v škále od 20 nm do 1 mm s odchýlkou zväčša 1 - 3 % od nominálneho priemeru. Kvapalina, v ktorej sú častice rozptýlené, je voda obohatená o stabilizátory, aby sa zabránilo nožnej koagulácii častíc. Po atomizácii sa častice zbavia prebytočnej vody vysušením a vzniknutý aerosól pevných častíc je pripravený na kalibráciu, či iné použitie. [2], [14]

#### 2.2.1.3. Disperzia suchého prášku

Táto metóda generovania aerosólov sa používa pri testovaní filtrov, zariadení na čistenie vzduchu, či pri toxikologickom výskume u zvierat. Koncentrácia aerosólov, ktoré sa takouto metódou dosahujú sa pohybuje až v desiatkach gramov na m<sup>3</sup>. Dôležité pri tejto metóde je zabezpečiť stály prísun materiálu a tiež jeho priebežná disperzia do finálnej podoby aerosólu.

Konkrétne zariadenie pracujúce na tomto princípe je tzv. Wrightov generátor prachu. V hlavnej komore tohto prístroja dochádza ku kumulácii drobných čiastočiek tak, že povrch pôvodného materiálu častíc je mechanický rozrušovaný ostrými škrabkami. Materiál, z ktorého častice vznikajú (*dust cake*), sú prevažne oxid kremičitý a uraničitý (SiO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>). Takto vzniknutý prach je následne prúdom vzduchu vyfúknutý von. [1], [2]

#### 2.2.1.4. Kondenzačné metódy

Kondenzačné metódy sú založené na fázovej premene látky medzi plynným a kvapalným skupenstvom. Využívajú sa tu teda pomerne vysoké teploty oproti metódam, spomenutým doteraz. Preto, aby bol vzniknutý aerosól použiteľný a stabilný, musia sa použiť také látky, ktoré sú neprchavé, teda s vyššou teplotou varu. Ide o organické zlúčeniny uhlíka s rozvetveným reťazcom, napr. dioktylfthalát (DOP) a di-2-etyl hexyl sebakát (DEHS). Dôležité pri týchto metódach je, aby kondenzácia prebiehala kontrolovane s rovnakými „počiatočnými podmienkami“. Toho dosiahneme obohatením pár týchto látok o tzv. kondenzačné jadrá. Zmes pár a jadier sa postupne a pomaly ochladzuje, pary kondenzujú a vzniká tak aerosól o vysokej stabilite. Nosným plynom je najčastejšie N<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub>. Bližšie detaily o tejto metóde uvediem v nasledujúcej kapitole.

### 3. CMAG 3475 – Kondenzačný generátor aerosólu



Obr. 10: Prístroj CMAG [10]

Jadrom mojej bakalárskej práce je prístroj na tvorbu aerosólu - CMAG 3475. Už samotné označenie skrýva v sebe typ a v podstate i použitie tohoto prístroja. Skratka „CMAG“ v anglickom jazyku znamená – Condensation Monodisperse Aerosol Generator, čiže kondenzačný generátor monodisperzného aerosólu. Číselný údaj označuje model. V nasledujúcich kapitolách sa budem venovať detailnejšiemu opisu tohto prístroja a jeho jednotlivých častí. Použitá literatúra, z ktorej som čerpal informácie je výrobcom dodávaný manuál [4].

#### 3.1. Základné parametre

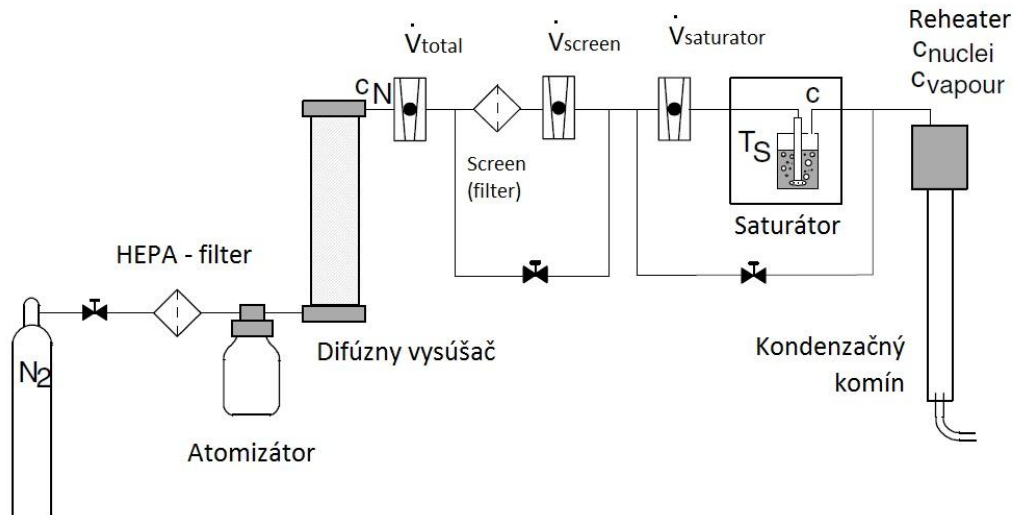
Kondenzačný generátor monodisperzného aerosólu (ďalej len CMAG) k samotnému tvorbe aerosólu využíva proces tzv. kontrolovanej heterogénnej kondenzácie. Heterogénnej preto, lebo ku kondenzácii aerosólových pár dochádza v prítomnosti veľmi malých zrníčok NaCl, ktoré plnia úlohu kondenzačných jadier. Technické parametre prístroja sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

aerodynamický priemer častíc	0,1 - 8 $\mu\text{m}$
geometrická štandardná odchýlka	< 1,5 pri priemere 0,1 - 0,5 $\mu\text{m}$ < 1,10 pri priemere 0,5 - 8 $\mu\text{m}$
koncentrácia častíc	> $10^6$ častíc/cm
celkový prietok	3,5 - 4 l/min
elektrické napájanie	230 V, 50 Hz
Rozmery	250 x 300 x 500 mm (d x š x v)
Váha	17 kg

Tab. 3 Technické parametre prístroja [4]

### 3.2. Časti prístroja

Na Obr. 11 je prístroj schematicky znázornený i s jeho najdôležitejšími funkčnými časťami. Z obrázku je dobre znázornený sled jednotlivých častí za sebou.



Obr. 11: Schéma generátoru aerosólu. Upravené z [4]

CMAG na svoju prevádzku potrebuje plyn, ktorý slúži ako nosné médium pre celý proces tvorby aerosólu. Pre tento typ prístroja sa používa stlačený dusík, uschovaný v plynovej bombе. Tlak nosného plynu možno regulovať, čo má vplyv na následne vzniknutý aerosól. Samotný prístroj začína rýchlospojku pre vstup  $N_2$  za ktorou ďalej nasledujú tieto časti:

#### Hepa filter:

Slúži k tomu, aby bol nosný plyn pre celý proces tvorby aerosólu čo najčistejší.

#### Atomizátor:

Malá nádoba s vodným roztokom NaCl, ktorá je zásobárňou nukleačných jadier. Princíp atomizácie funguje podobne ako na Obr. 8. Rozdiel je v tom, že roztok je po nasatí plynom rozptýlený ešte v samotnej nádobe nad hladinou. Vznikajú tak kvapôčky o rozmere 1 až 3  $\mu\text{m}$ .

#### Difúzny vysúšač:

Pomerne objemná valcovitá nádoba, naplnená hygroskopickou látkou - silikagélom. Kvapky vzniknuté v atomizátore obsahujú veľa vody, tu sa jej zbavujú vysušením. Vek silikagélu, čiže to, koľko vody už pohltil a je schopný ešte pohltiť, nám indukuje jeho farba: tehlovočervená pre suchý silikagel, ktorá pohlcovaním vlhkosti postupne bledne. Prechodom kvapôčok cez vysúšač ich rozmer klesne na 10 až 100 nm.



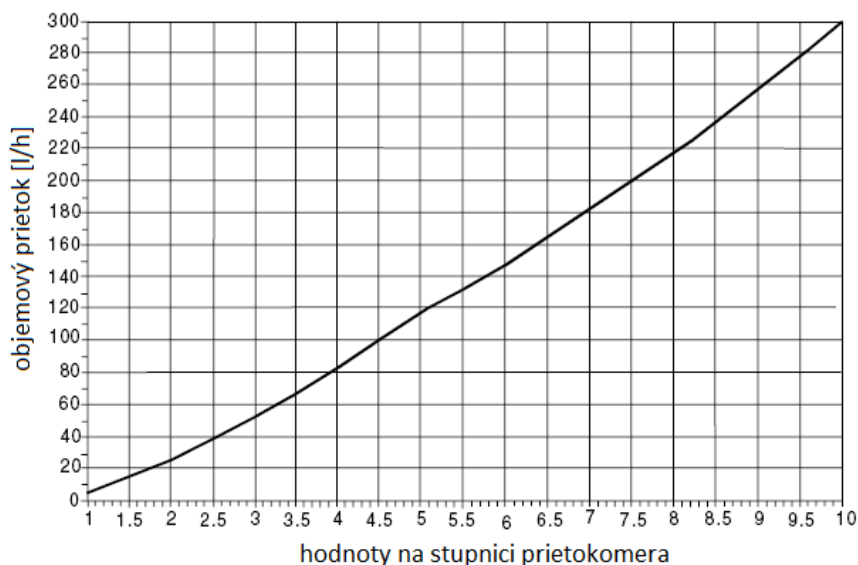
### Screen (filter):

Za vysúšačom je umiestnený prietokomer, merajúci celkový tok plynu prístrojom. Za ním dochádza k rozdeleniu buď na vetvu, prechádzajúcu cez filter, pre lepšiu zrozumiteľnosť sa budem pridržať anglického *screen*, alebo na vetvu, ktorá filter obchádza, tzv. *by-pass*, čiže obtok. Jednoducho tak môžeme regulovať výslednú koncentráciu častíc aerosólu, presnejšie nukleačných jadier. Ak chceme menej častíc, nastavíme vyšší prietok cez filter. Ak viac, prietok cez filter znížime, aby nám tak viac častíc prechádzalo obtokom. Zmenami koncentrácie nukleačných jadier aj nepriamo vplyvame na výslednú veľkosť aerosólových častíc vystupujúcich z prístroja. Ak potrebujeme častice väčšie, počet nukleačných jadier musíme znížiť, odfiltrovať ich - na jedno nukleačné jadro tak bude pripadať väčšie množstvo pár aerosólového materiálu. Zo schémy je patrné, že ventil sa nachádza vo vetve obtoku.

### Saturátor:

Podobné vetvenie ako za difúznym vysúšačom, je i pred saturátorom. Úlohou saturátora je obohatiť zmes dusíka a kryštálikov soli o pary aerosólového materiálu, ktorým je v tomto prípade látka di-2-ethylhexyl sebakát (DEHS). Ten sa v saturátore ohrieva až na teploty blízke varu. Množstvo zmesi prechádzajúcej saturátorom ukazuje merač prietoku, umiestnený pred saturátorom. Regulácia toku cez, alebo mimo saturátor je riešená rovnako, a to ventilom umiestneným v obtoku.

Pre úplnosť pripomeniem, že prietokomery saturátora aj screenu majú stupnicu škálovanú od 1 do 10 bez konkrétnych objemových jednotiek. Na prevod medzi hodnotou prietokomeru a objemovým prietokom slúži tabuľka z manuálu, ktorú uvádzam aj na nasledujúcom obrázku:



Obr. 12: Závislosť toku prietokomerom od objemového prietoku. Upravené z [4].

Pre lepšiu orientáciu v tom aký prietok som zvolil, budem vo výsledných tabuľkách vždy uvádzať hodnoty odčítané priamo z prietokomerov s jednotkou scale (sc.).

**Reheater:**

Predtým, ako dôjde k samotnej kondenzácii pár DEHS-u na kryštálikoch soli, je dôležité, aby bola zmes čo najviac homogénna a ku kondenzácii dochádzalo od rovnakého okamžiku. Keďže len ťažko zabrániť tomu, aby kondenzácia pár neprebíhala ešte pred kondenzačným komínom, reheater zmes soli a DEHS-u opätovne zahreje, čím sa prípadne skondenzované častice vyparia, celú zmes zhomogenizuje a vytvorí tak priaznivé podmienky pre heterogénnu nukleáciu.

**Kondenzačný komín:**

Sklenená trubica, v ktorej sa zmes ochladzuje laminárnym prúdením. Vzniká tu presýtený roztok pár kondenzujúcich na zrnkách soli. Výsledkom je monodisperzný aerosól, ktorého vlastnosti budem merať.

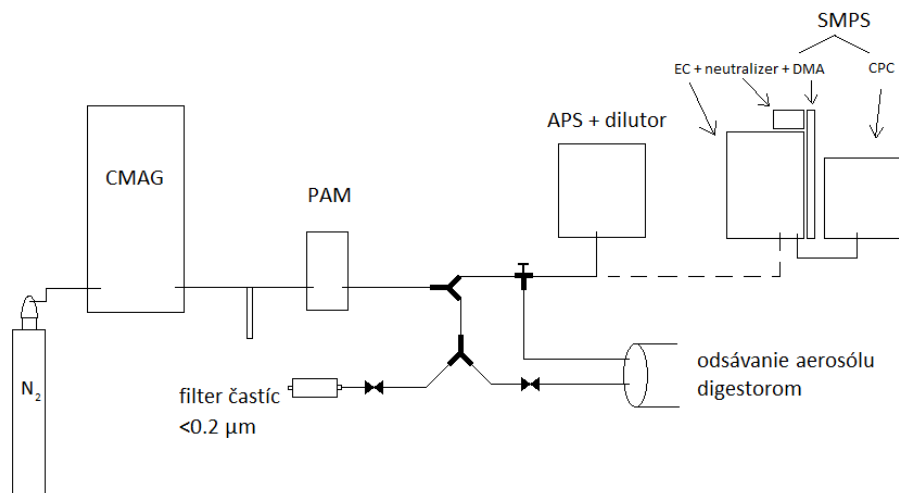
## 4. Experimentálne meranie generátoru aerosólu CMAG

Cieľom práce je preveriť prevádzkové parametre, kvalitu výstupného aerosólu a popísať, ako jednotlivé zmeny vstupných parametrov vplyvajú na aerosól, vznikajúci v generátore. V nasledujúcich kapitolách sa preto pokúsím priblížiť, ako sme pri meraní postupovali.

### 4.1. Meracia trať

Aby bolo meranie čo najefektívnejšie a obsluha jednoduchá, prístroje sme umiestnili do meracej trate podľa Obr. 13.

Dusík, uschovaný v tlakovej bombe, zásoboval generátor cez redukčný ventil s dvomi manometrami. Aerosól z generátora prúdil cez užší výstupný otvor. Za CMAG bol umiestnený malý prepad, slúžiaci na záchyt prebytočného kondenzátu.



Obr. 13: Schéma meracej trate

Nasledoval prístroj PAM, ktorý mi detekoval okamžitú zmenu vo veľkosti a koncentrácii častíc aerosólu a slúžil aj ako verifikátor toho, že aerosól zo CMAG sa po zmene parametrov dostatočne stabilizoval a môžem začať samotné meranie. Za PAM sa trať delila na dve vetvy, hlavnú a vedľajšiu. Vedľajšia vetva plnila dve funkcie. Buď trať zásobovala čistým vzduchom, čoho sme dosiahli umiestnením membránového filtra zachytávajúceho častice väčšie ako  $2 \mu\text{m}$ , alebo naopak, aerosól, ktorý bol počas merania prebytočný, odvádzala do digestora. Reguláciu medzi týmito funkciami zabezpečovali dva ventily a spojka Y. Hlavná trať sa pomocou trojcestného ventila tiež delila na dve vetvy. Jedna slúžila k odberu vzoriek aerosólu prístrojmi APS a SMPS. Druhá opäť k záchytu aerosólu do digestora, ktorú som využíval počas zmeny parametrov CMAG a doby potrebnej na ustálenie aerosólu. Prísun aerosólu medzi prístrojmi APS a SMPS som už prepínal ručne.

## 4.2. Prístroje použité k meraniu aerosólu

Na meranie vznikajúceho aerosólu som používal tri prístroje, každý z nich pracoval na inom princípe. V krátkosti by som sa preto pokúsil priblížiť základné rysy a vlastnosti týchto prístrojov a to, akým spôsobom vzorky aerosólu vyhodnocujú.

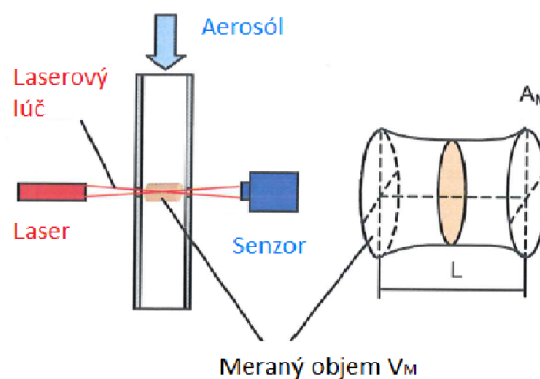
### 4.2.1. PAM - Process aerosol monitor

Prístroj PAM, model 3375, je priamo určený k rýchlemu vyhodnoteniu aerosólu, vystupujúceho z prístroja CMAG. Ako vidieť aj na Obr. 15, prístroj je veľmi jednoduchý tak po vizuálnej stránke, ako aj v nárokoch na obsluhu. Aerosól zariadením prechádza cez nerezovú trubicu, v strede ktorej je uložené čítacie zariadenie, pozostávajúce z lasera na jednej a detektora na opačnej strane. Prístroj pracuje ako „online“ merač, takže pripojením do trate sa stáva jej súčasťou a výsledky nám v reálnom čase zobrazuje na displeji. PAM dokáže vyhodnotiť okamžitý stav aerosólu dvoma veličinami - priemernou veľkosťou častíc a ich koncentráciou.

Princíp merania tohto prístroja je založený na priepustnosti svetla. Častice aerosólu prechádzajúce cez trubicu znižujú intenzitu svetla dopadajúceho na detektor, ktorá je úmerná veľkosti častíc a ich koncentrácii. Prístroj sníma aerosól podľa schémy na Obr. 14.



Obr. 15: Prístroj PAM



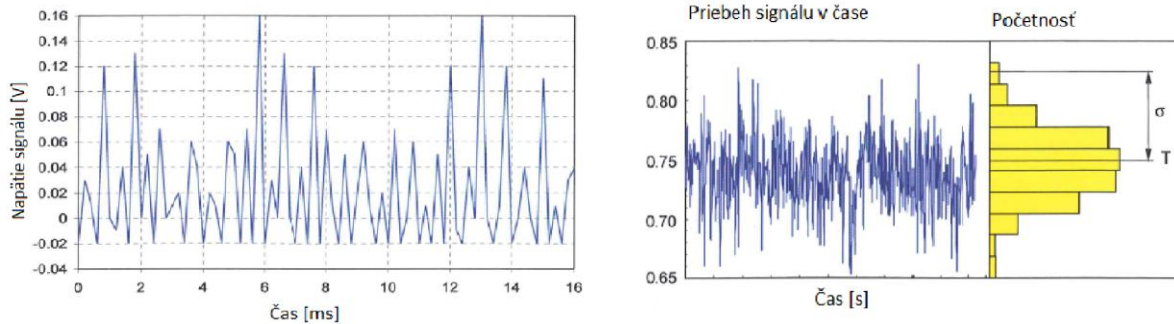
Obr. 14: Schéma merania aerosólu prístrojom.  
Upravené z [5].

Na popis tohto javu sa využíva Lambert-Beerov zákon, ktorý vyjadruje závislosť medzi vlastnosťami materiálu a absorpciou elektromagnetického žiarenia. Prístroj PAM v prípade monodisperzného aerosólu využíva tento vzťah:

$$T = \exp \left[ \frac{-N \frac{\pi}{4} x_m^2 K(x_m)}{A_m} \right] \quad (12)$$

kde:  $T$  - transmitancia svetla dopadajúceho na fotodetektor  
 $N$  - priemerný počet častíc v snímanom objeme  
 $K$  - koeficient rozptylu  
 $x_m$  - priemerná veľkosť častíc  
 $A_m$  - plocha snímanej oblasti

Zmeny v intenzite spôsobia zmenu v analógovom signáli vystupujúcom z detektora. Veľkosť častíc prechádzajúcich čítacou zónou určuje výška píkov analógového signálu. Koncentrácia častíc je úmerná hustote signálu (tieto veličiny sníma „čítač impulzov“) a strednej hodnote vystupujúceho napätia, okolo ktorého konkrétne výchylky oscilujú. Na Obr. 16 môžeme pozorovať rozdiely medzi signálom vystupujúcim z detektora pri nízkej a vysokej koncentrácii častíc.



Obr. 16: Pribeh výstupného signálu z detektora. Vľavo pri nízkej , vpravo pri vysokej koncentrácii častíc. Upravené z [5].

Prístroj je kalibrovaný na meranie aerosólových častíc vznikajúcich z látky DEHS a všetky výpočty, ktoré zabudovaný mikroprocesor počíta, sa opierajú o jeho index lomu  $n = 1,45$  pri vlnovej dĺžke svetla  $\lambda = 780 \text{ nm}$ .

Prístroj bolo nutné pred každým meraním nakalibrovať. To spočívalo v jednoduchom výbere tejto možnosti na prístroji, po ktorej kalibrácia prebehla buď úspešne, alebo ju bolo nutné zopakovať. V prvotných meraniach bola kalibrácia viac-menej bezproblémová a podarila sa zväčša na prvýkrát. No postupom času a pribúdajúcou dobou prístroja v činnosti bolo treba kalibrovať častejšie, čo bolo aj komplikovanejšie a niekedy to nevyšlo ani na 5. či 6. pokus.

Výstupné údaje prístroja PAM o veľkosti častíc a ich koncentrácii slúžia len orientačne a sú približné. Pri vyšších koncentráciách môžu väčšie častice prekryvať menšie, čo skresľuje výslednú celkovú koncentráciu. Naopak, viacero menších častíc spolu, môže robiť dojem jednej veľkej a skresliť tak priemernú veľkosť častíc.

#### 4.2.2. APS - Aerosol particle sizer

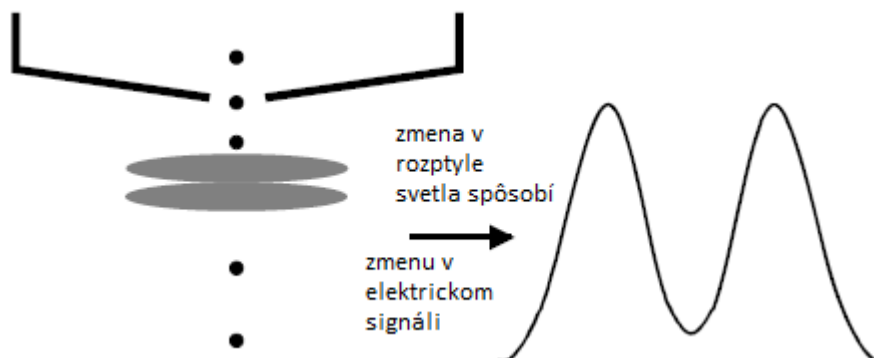


Obr. 17: Prístroj APS [3]

Ďalším prístrojom, ktorý som pri meraní používal, je Aerosol particle sizer, model 3321. Tento typ spektrometra meria veľkostné rozloženie častíc s aerodynamickým priemerom v rozsahu od 0,5 do 20  $\mu\text{m}$ . Aerodynamický priemer je v oblastiach inhalačných, atmosférických, či toxikologických štúdií azda najdôležitejším parametrom, pretože vyjadruje, ako sa daná častica správa vo vzduchu. Pripomeniem, že ide o priemer častice s jednotkovou hustotou ( $1 \text{ g/cm}^3$ ), ktorá by mala rovnakú sedimentačnú rýchlosť, ako práve

meraná častica (jej hustota závisí od konkrétneho typu látky použitej na generovanie aerosólu, hustota DEHS je  $\rho = 0,9119 \text{ g/cm}^3$ ).

Prístroj meria dobu letu častíc (*time of flight*), čo spočíva v zrýchlení toku aerosólu pomocou trysky a pozorovaní odozvy samotných častíc na toto zrýchlenie. Väčšia častica zrýchli pomalšie, malá naopak rýchlo. Za výstupom z trysky sa odmeria doba letu častíc medzi dvoma zväzkami laserových lúčov.

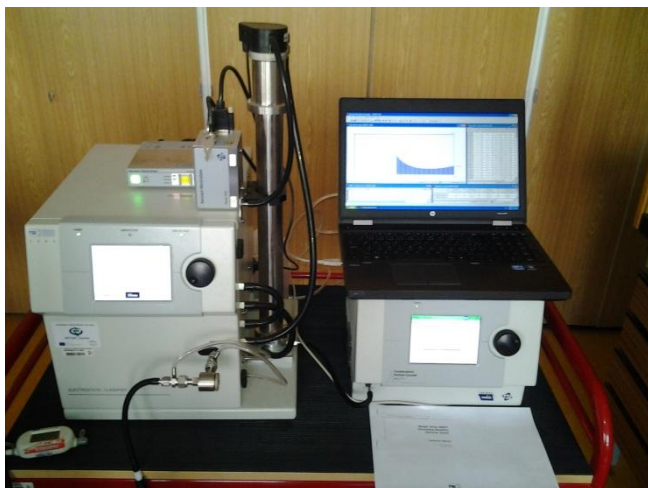


Obr. 18: Častice prechádzajúce cez laser spôsobujú zmenu v elektrickom signáli [3]

Iba niektoré častice z aerosólu, približne 1/5, prechádza optickou komorou. Tento tok sa označuje ako *sample flow*. Zvyšný tok prechádza cez filter, aby sa prečistil a následne sa použije na sústredenie častíc do jedného zväzku práve počas prechodu cez optickú komoru, čím plní úlohu štítu (*sheath flow*). Optické vybavenie prístroja je pomerne zložitá, preto nebudem zachádzať príliš do detailov. Základom je laserová dióda, ktorej lúč sa po polarizácii a následnom natočení rozdelí na dva zväzky. Vrchný lúč je polarizovaný horizontálne, spodný vertikálne. Prechádzajú cez viaceré šošovky a clony, aby boli dobre zaostrené na tok častíc. Rozptyl svetla zachytáva veľké eliptické zrkadlo, ktoré odrazené lúče sústreďuje na fotodetektor lavínového typu (APD). Ten ich prevedie na výstupný elektrický signál, ktorý sa ďalej spracováva v analógovom a digitálnom module [3]. K prístroju bol pripojený aj dilútor AD 3302A, ktorý aerosól ešte pred vstupom riedil v pomere 100:1.

### 4.2.3. SMPS - Scanning mobility particle sizer

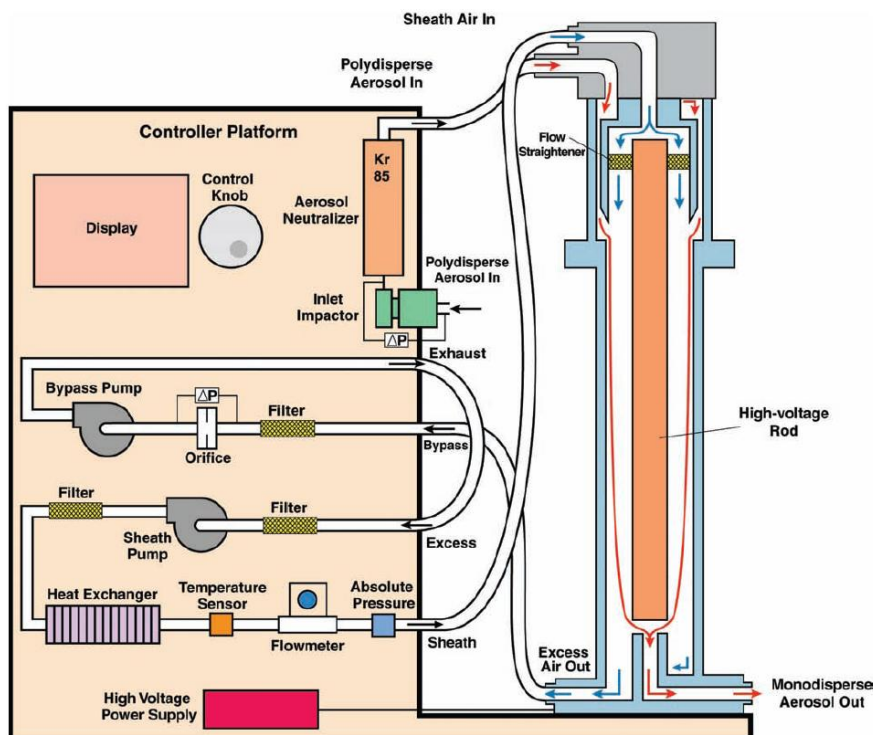
Najzložitejším z použitých prístrojov bol SMPS 3936. Tento jeden funkčný celok tvorí viacero prístrojov. Boli nimi: elektrostatický klasifikátor - EC 3080, ku ktorému bol pripojený neutralizátor aerosólu 3087 a DMA 3081 long - diferenčný analyzátor mobility (dlhá nerezová trubica). Dôležitou súčasťou bol CPC 3775 - kondenzačný čítač častíc. Rozlišiteľná



Obr. 19: Fotka z merania, SMPS 3936.

schopnosť tohto prístroja je od jednotiek nanometrov až do 1  $\mu\text{m}$  mobilného priemeru častíc, ktorý je vyjadrením pohyblivosti. Aerosól do prístroja vstupuje cez impaktor, na ktorom sa veľké častice zachytia, aby zbytočne nenarušovali meranie. Ďalej je nutné častice pred vstupom do DMA zbaviť elektrického náboja, ktorý si nesú. V DMA sa nachádzajú dve elektródy a pomocou zmeny napätia v medzi nimi (až tisícky voltov) dokáže prístroj segregovať častice o želanom rozmere, následne poslať do CPC, kde sa zráajú a vyhodnotí ich koncentrácia. Výstupom je graf celého spektra častíc. Vzorkovaciu dobu som mal v prípade APS nastavenú

na 60 s. SMPS si vyžadovalo na analýzu takmer 3x dlhšiu, bolo to 175 s a rozsah spektra, ktorý pri takomto nastavení dokázal zmerať, bol 19 - 1000 nm. Zjednodušenú schému prístroja uvádzam na nasledujúcom obrázku:



Obr. 20: Schematický náčrt EC3080 (vľavo) a DMA 3081 long (vpravo). [6]

### 4.3. Podmienky merania

Pri meraní aerosólu som sa snažil postupovať rovnako, aby boli merania čo najviac relevantné a porovnateľné medzi sebou.

#### 4.3.1. Voľba vstupných parametrov

Vznikajúci aerosól je možné meniť a regulovať viacerými parametrami: tokom cez saturátor a screen, teplotou reheatra a saturátora, ako aj vstupným tlakom N<sub>2</sub>. Na vznikajúci aerosól vplýva aj kvalita silikagélu. Po konzultácii s pánom doktorom sme sa rozhodli tieto parametre meniť nasledovne:

##### **Tlak N<sub>2</sub>:**

Hodnotu vstupného tlaku dusíka a teda celkový tok plynu generátorom sme na začiatku zvolili na hodnote 5 bar. Keďže však spotreba dusíka bola pri tomto tlaku dosť vysoká, a hrozilo že sa rýchlo minie, pre kombinácie s nižším pretokom cez saturátor a reheater sme znížili tlak na 3 bar. Pre kombinácie vyžadujúce tok v jednej alebo druhej vetve vyšší sme vstupný tlak nechali na pôvodnej hodnote 5 bar. Tlak 3 bary, nastavený na plynovej bombe N<sub>2</sub> manometrom, zodpovedal celkovému prietoku v generátore 7,2 resp. 9,7 scale pri tlaku 5 bar. Tieto prietoky podľa referenčného grafu na Obr. 12 zodpovedajú hodnotám 193 a 290 l/h.

##### **Prietok screenom a saturátorom:**

Aby sme obsiahli čo najširšie spektrum generovaného aerosólu, toky screenom a saturátorom sme rovnomerne rozdelili vzhľadom k rozsahu prietokomerov. Zvolili sme hodnoty: 0 - 3 - 6 - 9 jednotiek scale, čo zodpovedá prietokom 0 - 53 - 150 - 260 l/h. Pre screen sme neuvažovali 0 l/h, takže jadrá boli vždy, v určitej miere, odfiltrované.

##### **Teplota saturátora:**

Zvyšovaním teploty saturátora zvyšujeme tlak sýtych pár DEHS-u nad hladinou, a tým aj jeho množstvo pripadajúce na jedno nukleačné jadro. Pre teplotu saturátora sme si zvolili štyri hodnoty a to: 140, 175, 205 a 240 °C.

##### **Koncentrácia roztoku NaCl:**

Doporučená koncentrácia NaCl v roztoku je 20 mg/l, čo predstavuje 1,6 mg na 80 ml destilovanej vody (objem atomizéra). K tejto koncentrácii sme pridali aj 200 mg / l čo predstavuje 16 g na 80 ml vody.

##### **Teplota reheatra, kvalita silikagélu a DEHS-u:**

Teplotu reheatra sme nemerili a počas všetkých meraní bola 300 °C. Podchytiť kvalitu silikagélu a jeho absorpčnú schopnosť je dosť zložitý problém, pretože sa určuje vizuálnym posúdením jeho farby a ťažko ju kvantifikovať nejakým konkrétnym číslom alebo vzorcom, sú to len hrubé odhady. Aby sme sa tomu vyhli, na začiatku každého merania som silikagél vymenil za zregenerovaný (vysušený v peci pri teplote 140°C po dobu 3,5 h). Ten som používal počas merania kombinácií tokov screenom a saturátorom pri jednej a tej istej teplote saturátora.



Pre lepšiu ilustráciu priebehu merania uvádzam nasledujúcu stručnú tabuľku, pričom meranie, pri ktorom som používal ten istý silikagél, je zvýraznené. Ide o 12 kombinácií (tlakom 5 bar som len doplnil chýbajúce prietoky). To mi trvalo, ak išlo meranie bez problémov a meral som oboma prístrojmi, cca 3 až 4 h čistého času, čo je teda približne maximálna doba, ako dlho bol prístroj v činnosti pri použití jednej dávky silikagélu. Celkový počet kombinácií bol 96.

T(reheater)	c(NaCl)	T(saturátora)	p(N <sub>2</sub> )	V'(screen)	V'(saturator)
[°C]	[mg/l]	[°C]	[bar]	[scale]	[scale]
300	20	140	3 a 5	3	0
	200	175		6	3
		205		9	6
		240			9

Tab. 4: Výsledné kombinácie vstupných parametrov

#### 4.3.2. Priebeh merania

Samotné meranie prebiehalo tak, že po rozostavení meracej trate, zapnutí všetkých prístrojov, nastavení CMAG a pustení N<sub>2</sub>, som po každej zmene parametrov chvíľu počkal aby, sa vznikajúci aerosól stabilizoval (asi 2 min). Či je aerosól už ustálený, som si overil prístrojom PAM. Následne som veľkostné spektrum častíc zmeral najprv prístrojom APS, potom SMPS a pre vylúčenie chyby, túto dvojicu meraní ešte raz zopakoval. Takže jednu kombináciu, napr. c = 200 mg/l, T(sat) = 205 °C, p(N<sub>2</sub>) = 5 bar, V'(scr) = 6 sc., V'(sat)= 9 sc., som premeral aspoň 2x prístrojom APS a 2x prístrojom SMPS. Ak bolo niečo na výstupe z prístrojov medzi prvým a druhým meraním niečo zvláštne, napr. veľká nezhoda vo výslednom spektre častíc, pridal som ďalšie merania.

#### 4.4. Spracovanie dát

SMPS aj APS som ovládal cez softvér AIM - Aerosol Instrument Manager [16], ktorý číselné dáta z prístrojov zaznamenával, vykresľoval z nich príslušné grafy a dopočítaval charakteristiky distribučného rozdelenia častíc ako medián, modus, geometrická štandardná odchýlka a mnoho ďalších.

Po zmeraní všetkých stanovených kombinácií, ktoré mi trvalo niekoľko dní, som začal výsledky spracovávať. Najprv som všetky dáta spojil v softvéry Data Merge [15]. Bolo treba vyhľadať dáta zodpovedajúce rovnakej kombinácii z oboch prístrojov a následne ich spojiť do jedného. Výsledky v podobe grafov a tabuliek sú zaznamenané na priloženom CD.

Ako však meranie celého veľkostného spektra ukázalo, v aerosóle sú takmer vždy prítomné aj malé častice soli (pravdepodobne bez DEHS-u) a to v dosť výrazných koncentráciách i pri veľkých tokoch saturátorom. Z toho dôvodu geometrická štandardná odchýlka  $\sigma_g$  vychádzala výrazne vyššia. V najlepších prípadoch, čo boli kombinácie nízkych teplôt saturátora a aj nízkych tokov cezeň, sa  $\sigma_g$  pohybovala okolo hodnoty 1,35. Pri naopak

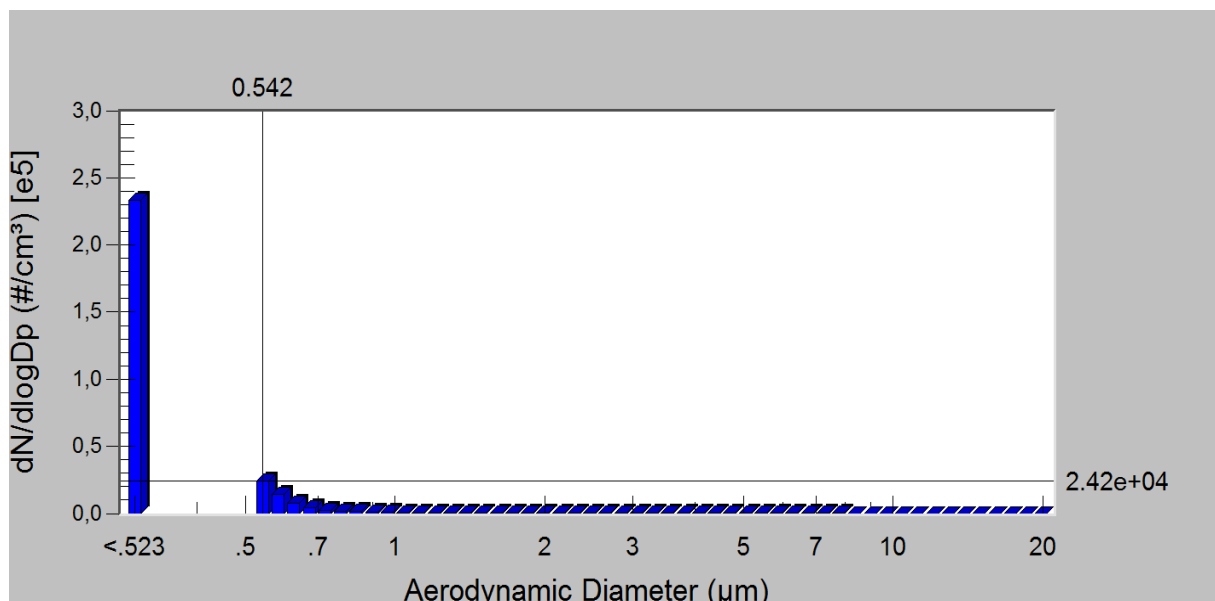
vyšokých tokoch a teplotách saturátora bola podstatne horšia a dosahovala hodnôt aj okolo 7-8.

Poznať zloženie celého spektra a jeho vlastností však nie je až také žiaduce pri používaní CMAG. Podstatnejšie je poznať kvalitu produkovaného aerosólu o väčších rozmeroch, teda uvažovať častice len s parami DEHS-u, ktorých distribúcia je hlavnou úlohou prístroja. V ďalšej analýze dát som preto postupoval nasledovne. Za prioritné som považoval údaje zaznamenané prístrojom APS. Ak spektrum aerosólu bolo v meracom rozsahu APS, potom som tieto údaje považoval za výsledné a prioritné. Ak však zasahovalo mimo, musel som príslušné grafy spojiť v Data Merge, a výsledok je kombinácia dát z oboch prístrojov. Pri nízkych teplotách saturátora a nízkych tokoch screenom, APS často nameralo zanedbateľne malé koncentrácie častíc (radovo desiatky až stovky). V takýchto prípadoch som za prioritné uvažoval dáta len z SMPS. Bez použitia Data Merge to však nešlo, pretože bolo nutné prepočítať elektromobilitný priemer meraný SMPS na aerodynamický, ktorým bol pre nás referenčným a všetky údaje sme vzťahovali k nemu. Prepočty medzi týmito priemermi sa podľa [6] riadia vzťahom:

$$d_a = d_m \left[ \frac{C(d_m)}{C(d_a)} \right]^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\rho_p}{\chi \rho_o} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

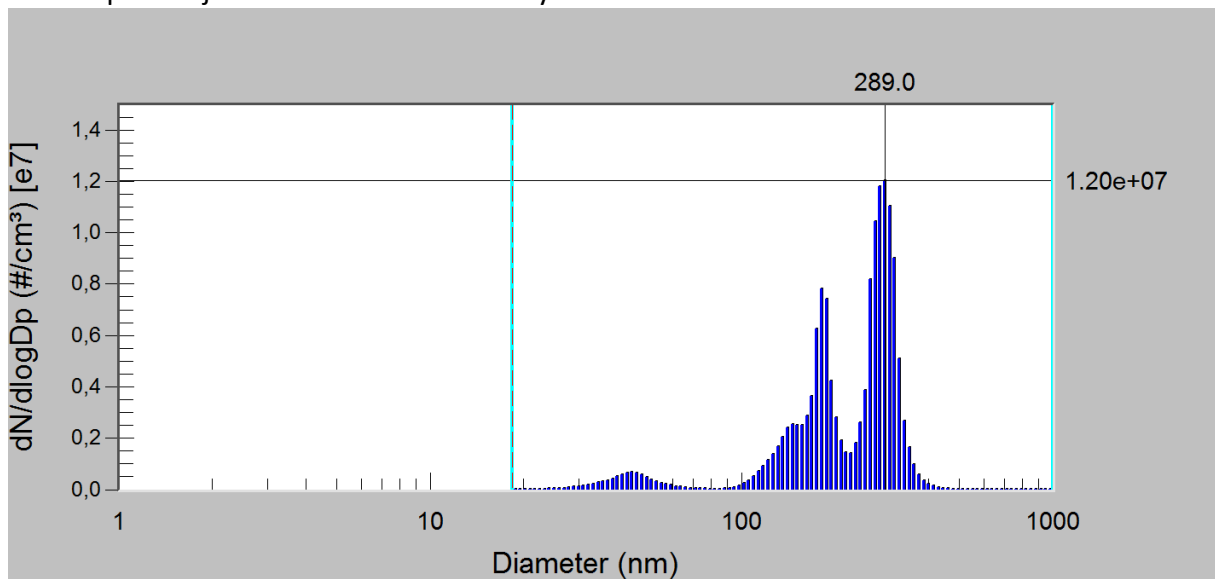
kde:  $\rho_p$  - hustota častice, čiže DEHS-u  
 $\rho_o$  - jednotková hustota 1 g/cm<sup>3</sup>  
 $\chi$  - faktor tvaru, pre sférické častice  $\chi = 1$   
 $C(d)$  - korekcie strát  
 $d_m$  - mobilitný priemer  
 $d_a$  - aerodynamický priemer

Ako som postupoval v prípade nutnosti spojiť dáta by som chcel ilustrovať na nasledujúcich obrázkoch. Ide o kombináciu  $c = 20$  mg,  $T(\text{sat}) = 140^\circ\text{C}$ ,  $V'(\text{scr}) = 6$ ,  $V'(\text{sat}) = 3$ ,  $p(\text{N}_2) = 3$  bar. Výsledný graf z APS po vzorkovacej dobe 60 s, mal takúto podobu:



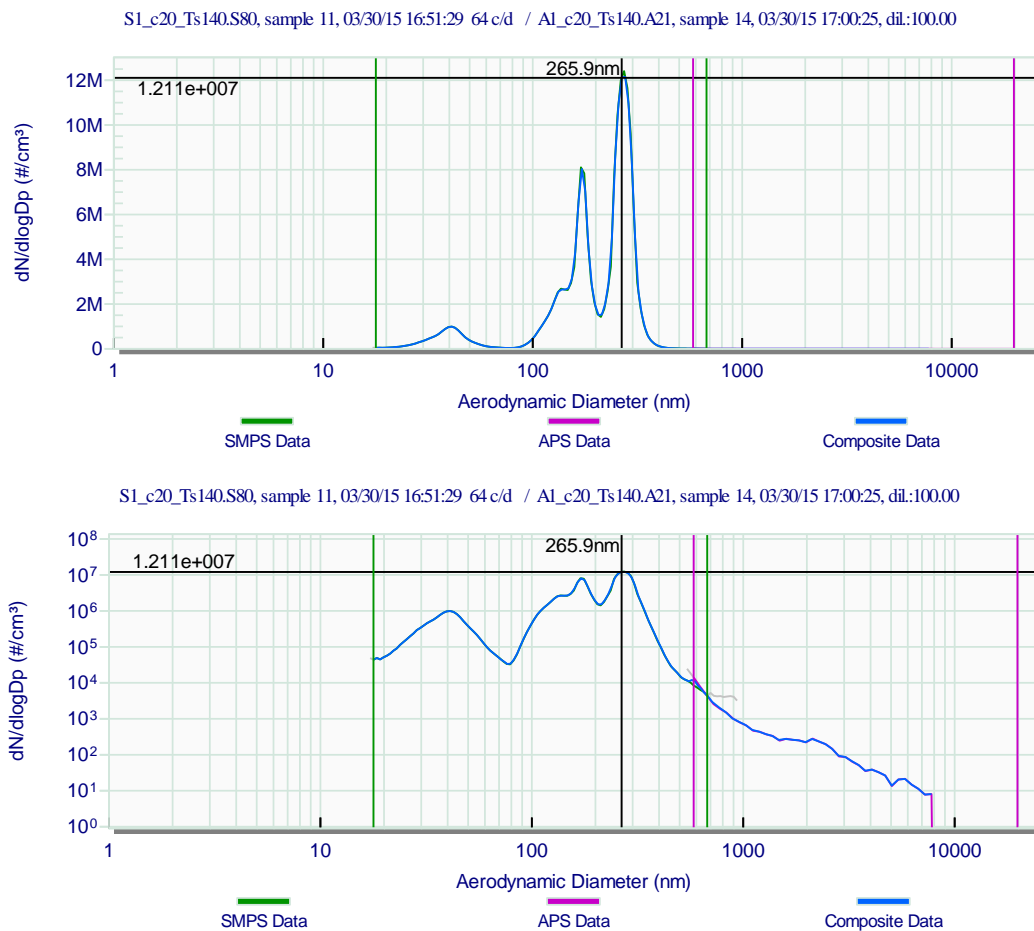
Obr. 21: Graf z APS

Graf odpovedajúceho aerosólu u SMPS vyzeral takto:



Obr. 22: Graf z SMPS

Následne som dáta spojil v Datamerge. Ak to bolo nutné tak som konce mierne orezal aby výsledný graf, vykreslený modrou farbou lepšie nadväzoval. Pridávam aj graf v logaritmickej mierke v ktorom je dobre vidieť častice o nižších koncentráciách.



Obr. 23: Výsledné grafy zo softvéru Data Merge.

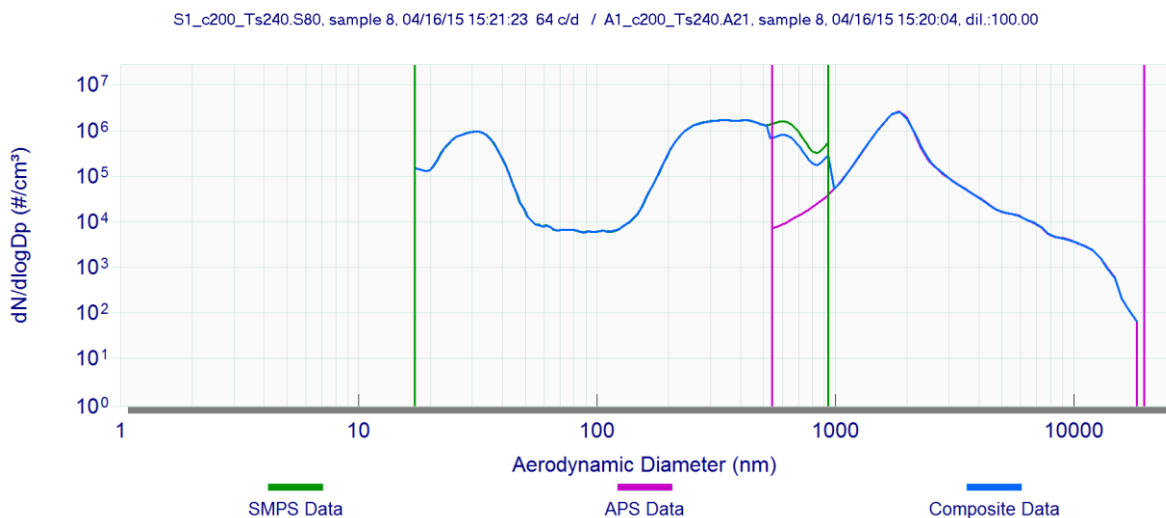
Výsledné parametre získané spojením dát z oboch prístrojov zachytáva nasledujúca tabuľka:

Composite Statistics Calculated from Data					
Diam. unit: Aerodynamic	Number Particle Size	Diameter Particle Size	Surface Particle Size	Volume Particle Size	Mass Particle Size
Median (nm)	234	259	269	280	280
Mean (nm)	211	242	284	1013	1013
Geo. Mean (nm)	188	229	255	357	357
Mode (nm)	276	276	276	287	287
Geo. Std Dev.	1.75	1.43	1.40	2.66	2.66
Total Conc.	2.51e+06 (#/cm <sup>3</sup> )	5.62e+02 (mm/cm <sup>3</sup> )	4.53e+11 (nm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )	2.27e+13 (nm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	2.07e+04 (µg/m <sup>3</sup> )

Tab. 5: Štatistické vyhodnotenie vystupujúceho aerosólu

Z tejto tabuľky som vybral určité parametre. Boli nimi CMAD, MMAD, GSD a MODUS, vyznačené sú farebne. Koncentráciu módu som získal odčítaním z grafu.

Pomerne veľa z odpovedajúcich si dátových dvojíc, však nenadväzovalo tak, ako by som očakával. Medzi grafmi na prekrývajúcom sa území boli výrazné, niekedy až rádové, rozdiely. Ako aj vo všetkých predošlých prípadoch softvér spoločné územie preložil pomocou aritmetických priemerov hodnôt z oboch prístrojov. Uvádzam príklad:



Obr. 24: Príklad  $c = 200$  mg,  $T(\text{sat}) = 240^\circ\text{C}$ ,  $V'(\text{scr}) = 3$ ,  $V'(\text{sat}) = 3$ ,  $p(N_2) = 3$  bar

## 4.1. Výsledky merania

Na nasledujúcich stranách uvádzam 8 tabuliek, ktoré vyjadrujú závislosť medzi vstupnými parametrami prístroja CMAG a príslušnými vlastnosťami vznikajúceho aerosólu, ako aj grafy závislostí GSD. Riadky, ktoré nie sú zvýraznené pochádzajú len z prístroja APS. Farebné odlišené kombinácie vznikli preložením dát z oboch prístrojov, alebo len z SMPS. Ide najmä o nízke teploty saturátora.

Na ďalšej strane sú dáta odchýliek, zoradené podľa koncentrácie roztoku a teploty saturátora. Tu sa ukázalo, že ak porovnáme odchýlky namerané prístrojom APS s prístrojom SMPS, výrazne sa líšia. Z grafov SMPS, ktoré niekedy ukazovali aj tri výrazné píky, sa nedalo jednoducho vyselektovať, ktoré častice sú obalené DEHS-om a ktoré nie, teda ktoré sú predmetom nášho záujmu. Ak však toto skreslenie nebudem uvažovať, tak najnižšie GSD sa ukázali pri kombináciách s obsahom soli  $c=20$  mg/l a  $T(\text{sat})= 205^{\circ}\text{C}$ , resp.  $175^{\circ}\text{C}$ , kde sa viackrát pohybovali okolo hodnoty 1,15, čiže aerosól bol monodisperzný. Celkové hľadisko monodisperzity bolo pri použití koncentrácie 200 mg/l horšie. To však samotné čísla odchýliek až tak nedeklarujú. Pri analýze dát som si všimol, že pri koncentrácií 200 mg/l, spektrum obsahuje v mnohých prípadoch aj častice výrazne väčšie, ako častice, ktoré sú prístrojom generované prioritne (častice hlavného píku), viď aj Obr. 24. Čísla odchýliek neukazujú až také zásadné zhoršenie disperzie (ktoré ale je), pravdepodobne aj z toho dôvodu, že celkové koncentrácie častíc DEHS-u sú pri koncentracii  $c=200$  mg/l vyššie zastúpenie rozdielných častíc konečnú odchýlku neovplyvní až tak. Výsledný aerosól však už nepovažujeme za monodisperzný.

Na priloženom CD sú k dispozícii v podobe tabuliek a grafov výsledky celkovej distribúcie častíc vznikajúceho aerosólu z oboch prístrojov, teda v škále aerodynamického priemeru od 19 nm do 20  $\mu\text{m}$ , ktoré vznikli pospájaním celých spektier v softwéru Data Merge.

c = 20 mg/l									
T (sat) = 140 °C									
T (reheater) = 300 °C									
p [bar]	V'(screen)	V'(saturator)	CMAD	MMAD	GSD ( $\sigma_g$ )	MODUS	koncentrácia MÓDU (dN/dlogDp)/cm <sup>3</sup>	údaje z PAM $\mu\text{m}$	p/cm <sup>3</sup>
3	3	0	0,09	0,13	1,40	0,10	1,53E+07	-	-
3		3	0,18	0,20	1,34	0,19	4,00E+07	-	-
3		6	0,29	0,45	1,50	0,44	3,30E+07	0,4-0,5	2,5-4 e6
5		9	0,44	0,51	1,57	0,51	2,02E+07	0,5-0,6	3-6 e6
3	6	0	0,07	0,10	1,36	0,07	3,93E+06	-	-
3		3	0,23	0,28	1,75	0,28	1,22E+07	-	-
3		6	0,35	0,56	1,61	0,55	1,21E+07	0,5-0,6	1,3-2e6
5		9	0,09	0,57	1,88	0,09	4,30E+07	0,6	2-4,4e6
5	9	0	0,04	0,75	1,64	0,04	1,69E+06	-	-
5		3	0,10	0,27	1,65	0,11	1,00E+07	-	-
5		6	0,09	0,20	1,52	0,09	6,78E+07	-	-
5		9	0,12	0,21	1,52	0,12	1,03E+08	0,6-0,7	1,3-2 e6

Tab. 6: Vlastnosti vystupujúceho aerosólu pri c = 20 mg/l a T(sat) = 140 °C.

c = 20 mg/l									
T (sat) = 175 °C									
T (reheater) = 300 °C									
p [bar]	V'(screen)	V'(saturator)	CMAD	MMAD	GSD ( $\sigma_g$ )	MODUS	koncentrácia MÓDU (dN/dlogDp)/cm <sup>3</sup>	údaje z PAM $\mu\text{m}$	p/cm <sup>3</sup>
3	3	0	0,06	0,63	1,44	0,06	5,40E+06	-	-
3		3	0,37	0,62	1,70	0,62	1,28E+07	0,6 - 0,7	1,5 - 1,7 e6
3		6	1,60	1,66	1,15	1,60	3,47E+06	2,2 - 2,4	1,4 - 2,0 e6
5		9	1,29	1,38	1,16	1,29	3,17E+06	2,2 - 2,4	2,2 - 3,4 e6
3	6	0	0,08	0,48	1,47	0,09	2,45E+06	-	-
3		3	1,12	1,16	1,13	1,11	2,00E+06	0,9 - 1,0	5,6 - 6,5 e5
3		6	1,88	1,94	1,16	1,84	1,88E+06	1,8 - 2,0	8,5 - 15 e5
5		9	1,50	1,56	1,14	1,49	3,85E+06	2,2 - 2,4	2,2 - 2,8 e6
5	9	0	0,10	0,70	1,56	0,11	2,35E+06	-	-
5		3	0,14	0,83	1,76	0,14	1,00E+07	0,6 - 0,8	1,3 - 2,5 e5
5		6	1,62	1,67	1,15	1,72	2,18E+06	1,3 - 1,9	8,0 - 14 e6
5		9	2,02	2,09	1,29	1,98	2,17E+06	1,3 - 1,9	1,1 - 1,7 e6

Tab. 7: Vlastnosti vystupujúceho aerosólu pri c = 20 mg/l a T(sat) = 175 °C.

c = 20 mg/l									
T (sat) = 205 °C									
T (reheater) = 300 °C									
							koncentrácia MÓDU	údaje z PAM	
p [bar]	V'(screen)	V'(saturator)	CMAD	MMAD	GSD ( $\sigma_g$ )	MODUS	(dN/dlogDp)/cm <sup>3</sup>	$\mu$ m	p/cm <sup>3</sup>
3	3	0	0,13	0,19	1,44	0,12	1,05E+07	-	-
3		3	1,66	1,78	1,19	1,72	3,40E+06	2-2,2	1,7-1,9e6
3		6	2,62	2,78	1,20	2,64	4,54E+06	2,7-3,1	1,1-1,6e6
5		9	2,35	2,53	1,21	2,29	4,70E+06	2,5-3	1,7-2e6
3	6	0	0,08	0,35	1,52	0,07	2,48E+06	-	-
3		3	1,70	1,76	1,14	1,72	2,66E+06	2	6-7e5
3		6	3,08	3,27	1,19	3,05	2,07E+06	2,8-3,2	7-9,8e6
5		9	2,58	2,74	1,21	2,64	5,16E+06	2,9-3,0	1,5-2e6
5	9	0	0,09	0,49	1,59	0,09	2,80E+06	-	-
5		3	1,44	1,49	1,15	1,49	2,14E+06	1,4-1,8	4,8-5,5e5
5		6	2,50	2,63	1,19	2,64	2,09E+06	2,2-2,4	8-15e5
5		9	3,17	3,45	1,22	3,28	1,70E+06	2,6-2,8	8,5-12e5

Tab. 8: Vlastnosti vystupujúceho aerosólu pri c = 20 mg/l a T(sat) = 204 °C.

c = 20 mg/l									
T (sat) = 240 °C									
T (reheater) = 300 °C									
							koncentrácia MÓDU	údaje z PAM	
p [bar]	V'(screen)	V'(saturator)	CMAD	MMAD	GSD ( $\sigma_g$ )	MODUS	(dN/dlogDp)/cm <sup>3</sup>	$\mu$ m	p/cm <sup>3</sup>
3	3	0	0,10	0,93	1,47	0,12	1,32E+07	-	-
3		3	1,50	1,70	1,23	1,49	2,35E+06	2-2,2	1,6-2,2e6
3		6	4,37	5,27	1,34	4,37	2,10E+06	6-6,4	7,5-9e5
5		9	4,07	5,53	1,32	4,07	2,86E+06	5,6	0,9-1,2e6
3	6	0	0,06	0,23	1,63	0,06	2,06E+07	-	-
3		3	1,83	1,92	1,16	1,84	2,24E+06	1,8-2,2	7,5-8,5e5
3		6	4,16	4,76	1,25	4,70	1,05E+06	4-5,4	6,2-7,5e5
5		9	4,40	5,40	1,30	4,37	2,58E+06	2,2-2,7	6-8e6
5	9	0	0,04	0,48	1,74	0,04	1,15E+06	-	-
5		3	1,80	1,90	1,19	1,84	1,75E+06	1,8-1,9	3,5-4,5e5
5		6	3,15	3,76	1,36	3,79	1,10E+06	3-3,3	7-12e5
5		9	4,60	5,40	1,28	4,70	8,93E+05	5-5,5	7-9e5

Tab. 9: Vlastnosti vystupujúceho aerosólu pri c = 20 mg/l a T(sat) = 240 °C.

c = 200 mg										
T (sat) = 140 °C										
T (reheater) = 300 °C										
p [bar]	V'(screen)	V'(saturator)	CMAD	MMAD	GSD ( $\sigma_g$ )	MODUS	koncentrácia MÓDU (dN/dlogDp)/cm <sup>3</sup>	údaje z PAM $\mu$ m	p/cm <sup>3</sup>	
3	3	0	0,07	0,12	1,45	0,07	2,90E+07	-	-	
3		3	0,19	0,23	1,37	0,22	7,30E+07	-	-	
3		6	0,27	0,33	1,43	0,32	6,65E+07	0,3-0,4	2,5-5e6	
5		9	0,24	0,31	1,43	0,30	8,20E+07	0,4-0,5	2-4e6	
3	6	0	0,06	0,10	1,40	0,06	1,06E+07	-	-	
3		3	0,20	0,23	1,36	0,22	2,61E+07	-	-	
3		6	0,29	0,42	1,49	0,40	2,20E+07	0,4-0,5	2,5-3e6	
5		9	0,26	0,36	1,45	0,34	5,72E+07	0,4-0,5	5-8e6	
5	9	0	0,04	0,31	1,40	0,04	4,50E+06	-	-	
5		3	0,12	0,18	1,45	0,12	1,05E+07	0,1	8-10e8	
5		6	0,15	0,39	2,30	0,38	1,04E+07	0,1-0,3	1-3e8	
5		9	0,08	0,54	1,71	0,08	6,30E+07	0,5	3-4e6	

Tab. 10: Vlastnosti vystupujúceho aerosólu pri c = 200 mg/l a T(sat) = 140 °C.

c=200 mg/l										
T(sat) = 175 °C										
T(reheater) = 300 °C										
p [bar]	V'(screen)	V'(saturator)	CMAD	MMAD	GSD ( $\sigma_g$ )	MODUS	koncentrácia MÓDU (dN/dlogDp)/cm <sup>3</sup>	údaje z PAM $\mu$ m	p/cm <sup>3</sup>	
3	3	0	0,07	0,12	1,47	0,07	2,90E+07	-	-	
3		3	0,30	0,50	1,53	0,29	4,80E+07	0,6	3-4e6	
3		6	0,85	7,70	1,24	0,90	2,16E+06	1,9-2,5	2-3,5e6	
5		9	0,80	6,14	1,43	0,78	1,13E+06	2-2,5	2-3,5e6	
3	6	0	0,06	0,62	0,06	1,42	1,30E+07	-	-	
3		3	0,33	0,53	1,62	0,51	3,00E+07	0,5-0,7	1,5-2e6	
3		6	1,02	1,12	1,18	1,04	2,77E+06	1,8-2,2	1,5-2,5e6	
5		9	0,88	7,01	1,30	0,90	1,83E+06	2-2,4	2-4e6	
5	9	0	0,05	0,64	1,37	0,05	6,80E+06	-	-	
5		3	0,31	0,50	1,55	0,5	1,50E+07	0,4-0,5	9-13e5	
5		6	1,03	1,10	1,16	1,04	3,43E+06	0,9-1,5	1,3-2e6	
5		9	1,39	1,47	1,16	1,38	2,78E+06	2-2,2	2,5-3e6	

Tab. 11: Vlastnosti vystupujúceho aerosólu pri c = 200 mg/l a T(sat) = 175 °C.

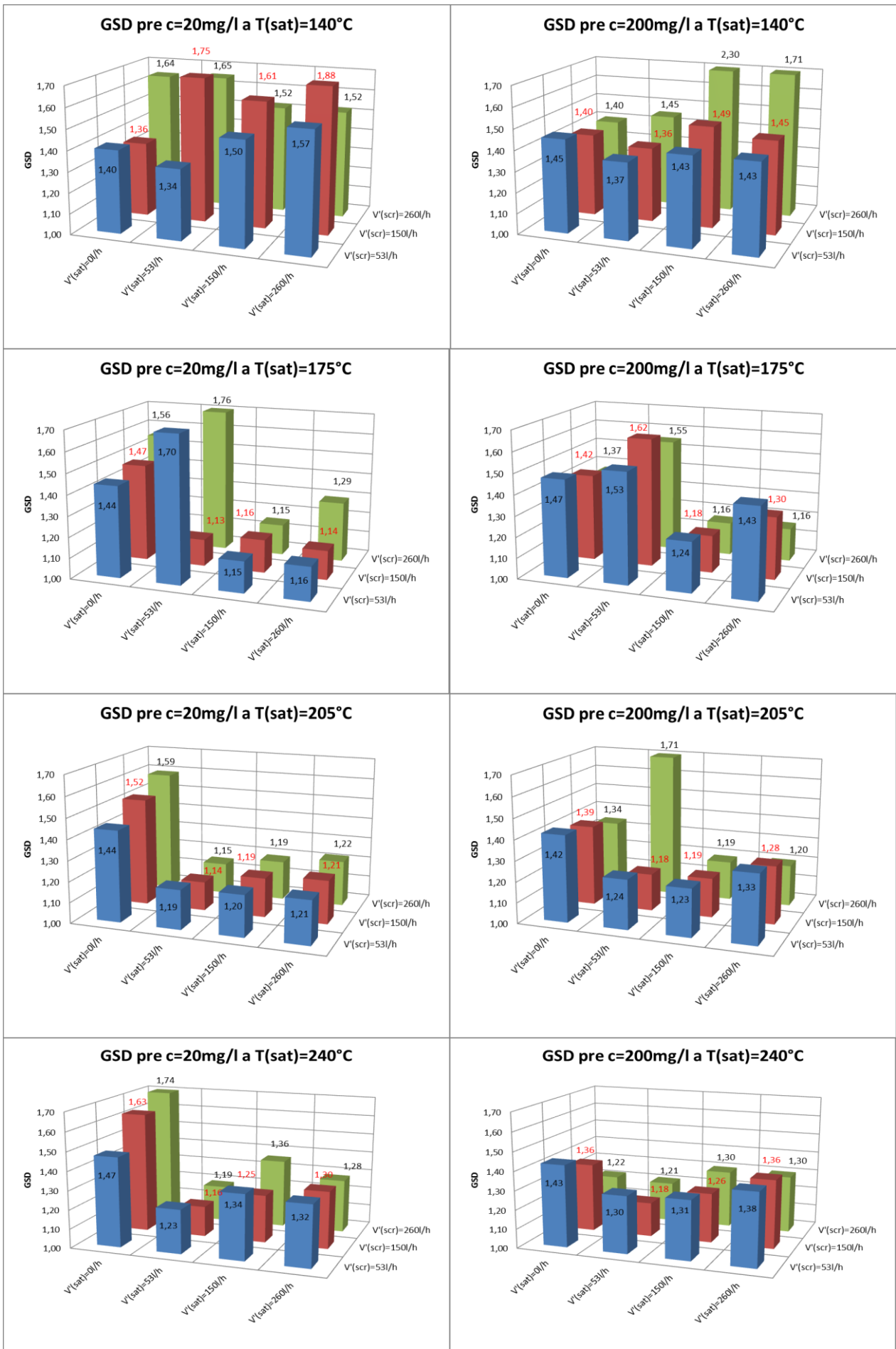


c=200 mg/l T(sat) = 205 °C T(reheater) = 300°C										
p [bar]	V'(screen)	V'(saturator)	CMAD	MMAD	GSD ( $\sigma_g$ )	MODUS	koncentrácia MÓDU (dN/dlogDp)/cm <sup>3</sup>	údaje z PAM $\mu$ m	$\rho$ /cm <sup>3</sup>	
3	3	0	0,05	0,08	1,42	0,05	2,45E+07	-	-	
3		3	1,30	1,86	1,24	1,29	2,76E+06	2-3	3-5e6	
3		6	1,76	2,03	1,23	1,72	3,36E+05	2,5-3	2,3-4e6	
5		9	1,61	3,54	1,33	1,60	2,73E+06	3-3,7	2,5-3,5e6	
3	6	0	0,08	0,11	1,39	0,08	1,25E+07	0,1	5-10e8	
3		3	1,03	1,12	1,18	1,04	3,07E+06	0,9-1,3	2,3-3,2e6	
3		6	2,00	2,15	1,19	1,98	3,03E+06	2,3-2,6	1,8-3,2e6	
5		9	1,78	2,45	1,28	1,84	3,22E+06	2,9-3,1	1,8-2,6e6	
5	9	0	0,07	0,13	1,34	0,07	1,27E+07	-	-	
5		3	0,43	0,77	1,71	0,76	1,57E+07	0,5-0,6	1,2-1,9e9	
5		6	1,72	1,85	1,19	1,72	3,11E+06	2-2,2	1,8-2,7e6	
5		9	2,26	2,45	1,20	2,29	3,56E+06	2,4-2,5	1,5-2,5e6	

Tab. 12: Vlastnosti vystupujúceho aerosólu pri c = 200 mg/l a T(sat) = 205 °C.

c=200 mg/l T(sat) = 240 °C T(reheater) = 300°C										
p [bar]	V'(screen)	V'(saturator)	CMAD	MMAD	GSD ( $\sigma_g$ )	MODUS	koncentrácia MÓDU (dN/dlogDp)/cm <sup>3</sup>	údaje z PAM $\mu$ m	$\rho$ /cm <sup>3</sup>	
3	3	0	0,06	0,09	1,43	0,06	2,85E+07	-	-	
3		3	1,80	2,50	1,30	1,84	2,58E+06	2,2-2,5	2,5-3,5e6	
3		6	3,25	4,50	1,31	3,05	3,93E+06	5-7	1,4-1,7e6	
5		9	3,20	5,00	1,38	3,05	2,77E+06	5,6-6,5	1,8-2,3e6	
3	6	0	0,14	0,18	1,36	0,17	1,78E+07	-	-	
3		3	1,26	1,36	1,18	1,29	2,83E+06	2-2,1	1,5-1,8e6	
3		6	3,20	3,71	1,26	3,28	2,66E+06	3,3-3,4	1-2e6	
5		9	3,32	5,20	1,36	3,05	3,33E+06	4,5-6	1,7-2e6	
5	9	0	0,12	0,19	1,22	0,12	1,00E+07	-	-	
5		3	0,92	1,10	1,21	0,97	2,25E+06	0,8-1,2	1,8-2,2e6	
5		6	2,40	2,82	1,30	2,64	2,20E+06	2,2-2,6	1-1,7e6	
5		9	3,75	4,70	1,30	3,79	2,17E+06	4-5,5	0,9-1e6	

Tab. 13: Vlastnosti vystupujúceho aerosólu pri c = 200 mg/l a T(sat) = 240 °C.



Obr. 25: Prehľad zmien v GSD pri meraných kombináciách

## 5. Diskusia

Problémy pri meraní samozrejme nastali a nebolo ich málo. Najmä v začiatkoch som si niekedy nebol istý, či mám prístroj SMPS správne nastavený. Ak zjavne meral niečo iné ako by mal (a ako aj z nastavenia CMAGU vyplývalo), radšej som meral iba jedným prístrojom a chýbajúce údaje domeral dodatočne, v iný deň. To do určitej miery vnieslo trochu neistoty pri vyhodnocovaní dát z oboch prístrojov, najmä v prípade ak som musel následne spektrá spájať. Nastaviť vstupné parametre CMAG-u sa dalo pomerne presne, problém však spočíval v tom, aby výstup z prístroja bol rovnaký, ako pred niekoľkými dňami. Nenávaznosť meraní oboma prístrojmi sa týkala koncentrácie  $c = 20 \text{ mg/l}$  pri teplotách saturátora 205 a 240 °C.

Ďalším zistením vhodným na diskusiu je zistenie neustálej prítomnosti drobných častíc. Či ide o častice soli, alebo soli a DEHS-u len ťažko povedať. To, aké procesy prebiehajú v reheatri pri opätovnom vyparení a následnej kondenzácii na jadrá, či sa pary nabalia len na väčšie zrná, ktoré sú potom ešte viac dominantné pri kondenzácii zhodnotiť nedokážem. Vyžadovalo by si to pravdepodobne iný prístup a môže to byť zaujímavá téma ďalších prác. No presnejšie určiť, ktoré častice sú obalené DEHS-om a ktoré nie, som pomocou použitých prístrojov nedokázal.

Ďalšou problematikou, ktorou by sa mohli zaoberať ďalšie práce, je i presnosť meracích prístrojov SMPS a APS a ich vzájomná nadväznosť. Pri vyšších koncentráciách častíc (nad  $10^4$ ) sa grafy na spoločnom území prekrývali v celku dobre. Avšak ak boli koncentrácie nižšie, prekrytie často vyzeralo ako „zlom“ a APS ukazovalo takmer vždy nižšie hodnoty. Navyše APS nízke priemery (0,5 - 0,9  $\mu\text{m}$ ) akoby nemeralo až tak dobre, aspoň v konfrontácii s SMPS. Tu musím ešte pripomenúť, že koncentrácia častíc zo CMAG bola niekedy príliš vysoká a riedenie dilútorom 100:1 niekedy nepostačovalo. Prístroj signalizoval príliš vysokú koncentráciu. Navyše dilútor, som musel viackrát čistiť a nastavenie tlakových rozdielov niekedy presne nezodpovedalo doporučeným hodnotám. Rovnako to platí aj v prípade SMPS, kde prietok „sheat flow“ často kolísal, i keď nastavenie v počítači bolo nezmenené a tieto odchýlky som si nevedel vysvetliť.

## 6. Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo poskytnúť údaje o aerosóle vystupujúcom z prístroja CMAG. Verím, že zistené hodnoty charakterizujúce jeho veľkostné rozloženie, prispievajú k rýchlejšiemu a zároveň presnejšiemu nastaveniu požadovaných vlastností.

Samotné meranie bolo pre mňa veľkou skúsenosťou. Sám som sa mohol presvedčiť o tom, že spracovať a vyhodnotiť namerané dáta je často zložitejšie a časovo náročnejšie, ako ich odmerať.

Poznatky z meraní ukázali, že problematika generovania aerosólu prístrojom CMAG je skutočne veľmi komplexná a vyžaduje si zahrnutie množstva faktorov, ktoré vplyvajú na jeho generovanie. Nezaoberal som sa napríklad vplyvmi zo strany kvality silikagélu ani veku a degradácie DEHS-u, na čo by bolo potrebných množstvo ďalších meraní.

Zistený nesúlad medzi meraniami prístrojmi APS a SMPS by si tiež vyžadovalo podrobnejšiu analýzu a prípadne ich konfrontovať s viacerými meracími prístrojmi. Rovnako ako i detailnejšie skúmanie procesov prebiehajúcich počas heterogénnej či homogénnej nukleácie.

Na koniec by som rád dodal, že bakalárska práca mi umožnila pracovať s prístrojmi na špičkovej úrovni a jej tvorba ma obohatila i po jazykovej stránke, čo považujem za veľmi cenné skúsenosti.

## Zoznam použitých zdrojov:

- [1] KULKARNI, P., BARON, P. A., WILLEKE, K. Aerosol measurement: principles, techniques, and applications. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. Third edition. ISBN 978-0-470-38741-2.
- [2] HINDS, William C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. New York: John Wiley & Sons, 1999. Second edition. ISBN 0-471-19410-7.
- [3] TSI. Model 3321 Aerodynamic particle sizer. Operation and service manual. In. TSI incorporated, Shoreview, USA, 2006.
- [4] TSI. Model 3475 Condensation monodisperse aerosol generator. Instruction Manual. In. TSI incorporated, Shoreview, USA, 2004.
- [5] TSI. Model 3375 Process aerosol monitor. Operation and service manual. In. TSI incorporated, Shoreview, USA, 2005.
- [6] TSI. Series 3080 Electrostatic Classifiers. Operation and Service Manual. In. TSI incorporated, Shoreview, 2012.
- [7] DOHÁNYOSOVÁ, P., L. KUBINCOVÁ, J. SMOLÍK, J. SCHWARZ, a kol. Výkladový slovník aerosolových termínů - volně přeloženo dle BARON P. A., WILLEKE K. (2001), Aerosol Measurement: Principles, Techniques and Applications, 2.vydání, J. Wiley & Sons, New York. Edition ed. Praha: Česká aerosolová společnost, 2007.
- [8] Chestreal Progress. Normy a predpisy vzduchových filtrov. 2012. Dostupné z: <[http://www.chestrealprogress.sk/filtre/?page\\_id=23](http://www.chestrealprogress.sk/filtre/?page_id=23)>
- [9] Ostalická, J., L. Vlasáková a kol. Grafická ročenka 2013. Dostupné z: <[http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/13groc/gr13cz/Autor\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/13groc/gr13cz/Autor_CZ.html)>
- [10] Jedelsky, Jan. Condensation monodisperse aerosol generator TSI - CMAG 3475. Dostupné z: <<http://www.energetickeforum.cz/faculty-of-mechanical-engineering-of-brno-university-of-pristrojove-vybaveni/aerosol-generator>>
- [11] Horton, K. D., et al. CHARACTERIZATION OF A CONDENSATION-TYPE MONODISPERSE AEROSOL GENERATOR (MAGE). Journal of Aerosol Science, 1991, 22(3): 347-363.
- [12] Bahk, Y. W. and Isawa T. Radioaerosol imaging of the lung. Korea: Benedict Press Korea, 1994, Dostupné z: <[http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/32/006/32006535.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/006/32006535.pdf)>

- [13] Hartleysharpe, C. J., et al. Differences in aerosol output and airways responsiveness between the devilbiss-40 and devilbiss-45 hand-held nebulizers. *Thorax*, 1995, 50(6): 635-638.
- [14] Jung, H., Mulholland, G. W., Pui, D. Y. H., & Kim, J. H. Re-evaluation of the slip correction parameter of certified PSL spheres using a nanometer differential mobility analyzer (NDMA). *Journal of Aerosol Science*, 2012, 51(0), 24-34.
- [15] TSI. Model 390069 Data Merge Software Module (for merging and fitting of SMPS™ and APS™ data files). TSI incorporated, Shoreview, USA, 2011.
- [16] TSI. Aerosol Instrument Manager Software Module (for Scanning Mobility Particle Sizer and Aerosol Particle Sizer). TSI incorporated, Shoreview, USA, 2010
- [17] Manager® Software (for merging and fitting of SMPS™ and APS™ data files). TSI incorporated, Shoreview, USA, 2011.

## Príloha:

### Vysvetlenie k súborom na priloženom CD:

Disk obsahuje 3 excelovské súbory:

DM\_20mg - výsledné tabuľky vznikli spojením dát z APS a SMPS v celom rozsahu ich citlivosti, štatistické vyhodnotenie spektra celého generovaného aerosólu pri koncentrácii 20 mg/l

DM\_200mg - rovnako ako už spomenutý súbor, avšak pre koncentráciu 200 mg/l

BP\_tabuľky - tabuľky uvedené v prílohe bakalárskej práce

Na disku je ďalej aj zložka s názvom Grafy, v ktorej sú priečinky zoradené podľa teploty saturátora. Grafy v nich obsiahnuté boli získané softvérom Data Merge a zachytávajú spektrá, ktoré sú číselne popísané tabuľkami v súboroch DM\_20mg a DM\_200mg. Slúžia teda ako obrazová dokumentácia k spomenutým tabuľkám aby sme si tak mohli lepšie vytvoriť predstavu o spektre generovaného aerosólu. Osi y sú v logaritmickej mierke aby boli rozoznateľné aj častice pri nízkych koncentráciách.

Aby bolo zrejmé pri akom nastavení CMAG-u príslušný distribučný graf vznikol, štruktúra jeho názvu je nasledovná:

c200\_Tr300\_Ts240\_Vsc3\_Vsa9\_p5\_M

kde: c - koncentrácia NaCl v mg  
Tr - teplota reheatra  
Ts - teplota saturátora  
Vsc - tok cez screen  
Vsa - tok cez saturátor  
p - tlak dusíka  
M - graf je vážený hmotnosťou, N vyjadruje váženie počtom