

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií



Studijní program: Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: Elektronické informační a řídicí systémy

Charakteristika pneumatického tryskového atomizéru

Characteristics of air nozzle atomizer

Bakalářská práce

Bachelor's thesis

Autor práce: Tadeáš Lenc

Author

Vedoucí práce: Ing. Darina Jašíková

Supervisor

Liberec

2011

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá vizualizací, měřením a charakteristikou sprejů. Hlavním cílem je sestavit plně funkční atomizér. Seznámíme se s pojmem atomizace, rozebereme si, jak dochází k atomizaci a na jaké základní druhy se dělí. Velký důraz bude kladen na atomizaci vzduchovou. Objasníme si principy a možnosti konstrukce atomizérů, které později využijeme při návrhu našeho atomizéru.

Dále se zabýváme možnostmi měření spreje, zaměříme se na metodu IPI. Provedeme měření našeho atomizéru a atomizéru průmyslově vyrobeného, abychom posléze mohli porovnat dosažené výsledky. V závěru práce pak vyhodnotíme náš atomizér a uvedeme si možné odvětví, kde by teoreticky bylo možné náš atomizér využívat.

Abstract

This bachelor thesis deals with visualization, measurement and characterization of spray. The main objective is construction of fully functional atomizer. We meet with the concept of atomization. We'll tell how atomization occurs and what the basic types can be divided. Mostly, we will be interested in air atomization. We'll explain the principles and possibilities of atomizer design, which we will use later in the design of our atomizer.

We also deal with possibilities of measuring spray, focus on the IPI method. We will measure our atomizer and atomizer industrially produced and then we can compare the obtained results. We evaluate our atomizer in conclusion.

Klíčová slova

Atomizace, vzduchová atomizace, konstrukce atomizéru, charakteristika spreje, velikost částic, rychlost částic

Keywords

Atomization, air atomization, atomizer construction, characteristics of sprays, particle size, particle velocity

Bibliografická citace

LENC, T. Charakteristika pneumatického tryskového atomizéru. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, 2011. 38 s.

Vedoucí bakalářské práce Ing. Darina Jašíková

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnuli licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 20.12.2011

Podpis

Poděkování

„Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé bakalářské práce Ing. Darině Jašíkové za poskytnuté informace, odborné vedení a čas strávený při konzultacích.“

Obsah

Úvod	8
1. Základní princip atomizace kapalin	8
2. Možnosti atomizace kapalin.....	9
2.1. Tlakové rozprašovače.....	9
2.2. Odstředivá atomizace	9
2.3. Elektrostatická atomizace.....	10
2.4. Ultrazvuková atomizace.....	11
2.5. Kmitající kapiláry	11
3. Princip pneumatického rozprašování	12
3.1. Výhody a nevýhody pneumatického rozprašování	13
A mezi nevýhody patří:.....	13
4. Konstrukce pneumatického atomizéru	14
4.1. Dělení podle přívodu kapaliny do atomizéru	14
4.2. Interní a externí atomizéry	15
4.2.1. Interní atomizéry	15
4.2.2. Externí atomizér	15
5. Techniky měření sprejů.....	16
5.1. Prostorová technika.....	16
5.2. Technika toku.....	16
6. Optické metody pro měření a vyhodnocování atomizace kapalin.....	18
6.1. Optické zobrazovací analýzy	18
6.2. Laserová difrakční analýza	19
6.3. Fázová analýza dopplerovských částic	20
7. Měřicí metoda IPI.....	21
7.1. Použití dvou kamer	23
7.2. Kalibrace kamer	23
7.3. Detekce částic	24
8. Měřicí systém pro vyhodnocování charakteristik pneumatického atomizéru	24
8.1. Nastavení parametru v Dynamic studiu	25
8.2. Průběh měření	25
8.3. Teoretické výsledky měření	27

8.3.1. Vyhodnocení rozdělení velikostí spreje	28
9. Navržený atomizér	30
9.1. Naměřené charakteristiky vyrobené trysky	31
9.1.1. Naměřená data	32
9.1.2. Vyhodnocení měření vyrobeného atomizéru	34
10. Zakoupená tryska	34
10.1. Možný výběr provedení atomizéru	34
10.2. Vybraný atomizér	36
10.3. Naměřená data	36
10.4. Vyhodnocení měření průmyslového atomizéru	38
11. Porovnání výsledku měření a návrh optimalizace pneumatického atomizéru	39
Závěr	40
Seznam použité literatury	41
Seznam příloh	41
Seznam zkratk, cizích slov a symbolů	42
Příloha 1:	43

Úvod

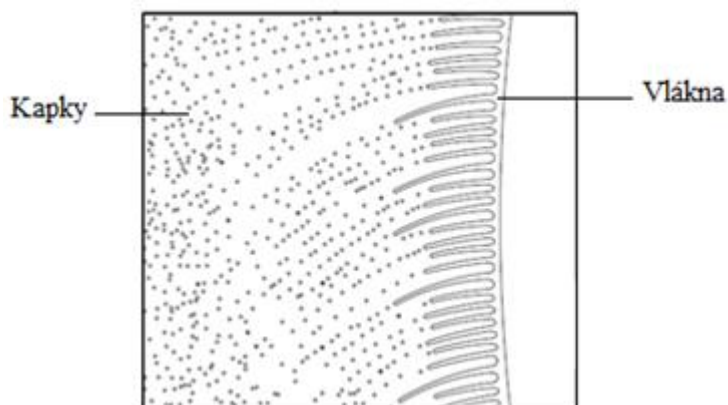
Tato práce by měla sloužit jako úvod do světa atomizace, atomizérů, měření a vyhodnocování sprejů, protože v posledních deseti letech se význam informací o velikosti kapek značně zvýšil, zejména v průmyslovém odvětví stoupá jeho důležitost. V mnohých procesech jako je například chlazení, vstřikování paliva, hašení požárů, klimatizace, zemědělství atd. se bez informací o velikosti kapek, případně o jejich rychlostech neobejdou. Je potřeba velkého rozvoje v oblasti vědy a technologií atomizace, a proto je pro inženýry stále důležitější, aby pochopili základní proces atomizace a vyhodnocovací techniky tohoto procesu.

1. Základní princip atomizace kapalin

Na kapalinu neustále působí povrchové napětí, když se toto působení přeruší vnějšími nebo vnitřními silami dojde k rozpadu kapaliny na malé částice. Tento proces se nazývá atomizace.

Kapalina za působení povrchového napětí má tendenci zaujímat energeticky nejméně náročný tvar tj. koule.

Na povrch kapky mohou působit aerodynamické síly a ty podporují rozpad kapaliny díky vnějším deformačním silám. Pokud překonají povrchové napětí, dochází k porušení kapaliny čili atomizaci. Rozlišujeme dva stavy atomizace: primární a sekundární. K primárnímu stavu dojde při prvotním rozpadu uceleného proudu kapaliny na takzvaná vlákna. Sekundární stav nastává po primárním a to kdy se vlákna dále rozpadají na daleko menší částice, kterým říkáme kapky.



Obr. 1: Sekundární rozpad kapaliny

2. Možnosti atomizace kapalin

Aby došlo k atomizaci, musíme na kapalinu působit určitou silou a typ použité síly nám umožňuje rozlišit několik druhů atomizace. Spreje mohou být produkovány různými způsoby. V podstatě vše, co je zapotřebí, je vysoký rychlostní rozdíl mezi kapalinou, která má být rozprašována, a okolním plynem. Nějaké rozprašovače vytváří vysoké rychlosti toku kapaliny do relativně pomalu se pohybujících proudů vzduchu nebo plynu. Alternací tohoto rozprašovače je vystavení relativně pomalu se pohybujícího toku kapaliny vysokorychlostnímu proudu vzduchu. Mnoho aplikací požaduje specifický tvar spreje, např. kuželový nebo plochý tvar, k docílení požadovaného výsledku. [4]

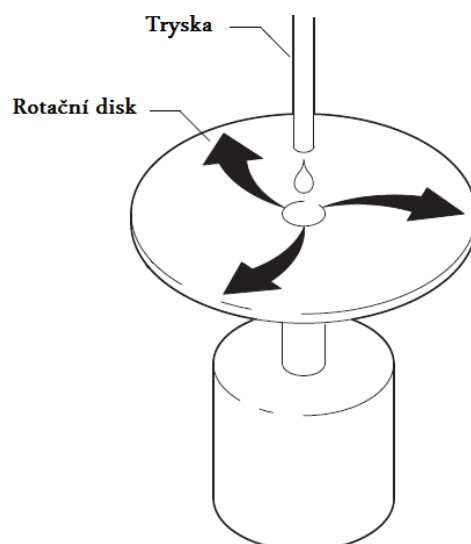
2.1. Tlakové rozprašovače

Patří mezi nejčastěji využívané způsoby rozprašování. Využívá především tlakové energie kapaliny (tlak kapaliny může být v řádu několika desítek barů), která se na výstupu atomizéru mění na kinetickou energii, a to vede k dosažení vysoké relativní rychlosti mezi kapalinou a okolním plynem. Výsledkem toho je rozprášení kapaliny. Tyto druhy atomizérů jsou jednoduché, nepotřebují přívod pomocných médií. Nejsou vhodné pro rozprašování velmi viskózních kapalin a kvalita jejich rozprášení klesá s rostoucím průtokem. Hlavní nevýhodou je vysoký tlak nutný k rozprášení. [6]

2.2. Odstředivá atomizace

V odstředivé nebo také v rotační atomizaci, tryska vstříkují tekutinu do středu točícího disku, kde odstředivá síla vytlačí kapalinu k okraji disku a posléze je kapalina vytlačena přes okraj disku. Svazky tekutiny se postupně rozpadnou na finální kapky. Obr. 2 ukazuje mechanismus odstředivé atomizace.

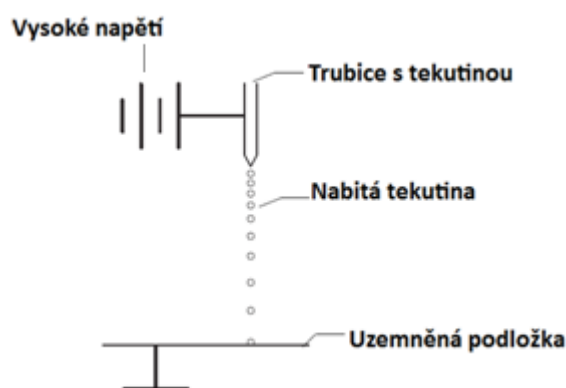
Zdroj energie pro rotační atomizaci je odstředivá síla. Kapalina má tendenci pohybovat se radiálně pryč z disku ve všech směrech (360°). U některých typů rotačních atomizérů se může přidat tryska v axiálním směru. Výhody této metody spočívají v atomizaci velmi viskózních nebo znečištěných kapalin. Můžeme také dobře kontrolovat průtok kapaliny bez ovlivnění kvality atomizace a metoda je funkční již od nízkých tlaků přiváděné kapaliny. Nevýhoda této metody je v složité konstrukci a nižší spolehlivost v důsledku použití vysokých otáček.



Obr. 2: Odstředivá atomizace[5]

2.3. Elektrostatická atomizace

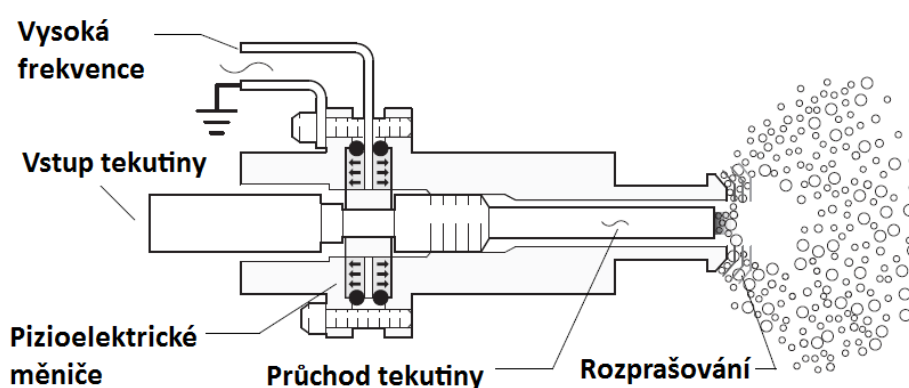
Elektrostatická atomizace vystavuje kapalinu elektrickému poli o vysoké lokální intenzitě, které vzniká mezi nabitým atomizérem a uzemněnou součástí. Přenos náboje do kapaliny a odpuzivá síla mezi nabitou kapilárou a pracovní kapilárou trhá tekutinu na malé kapky a posílá je směrem k pracovní desce viz. obr. 3. Pouze pro malé průtoky. Při této metodě jsou důležité tři faktory: intenzita elektrického pole, velikost průtoku, vlastnosti tekutiny. Tímto druhem atomizace lze vytvořit kapky o velikosti $(3 - 50) \mu\text{m}$.



Obr. 3: Elektrostatická atomizace[5]

2.4. Ultrazvuková atomizace

Ultrazvuková atomizace je postavena na základě elektromechanického zařízení, které vibruje s vysokou frekvencí. Povrch kapaliny je rozrušen vibracemi o vysoké frekvenci a dělí se na malé kapičky viz. obr. 4. Dosažená velikost kapek je (30 – 60) μm . Funguje pouze s tenkou vrstvou kapaliny, která musí být souvisle přiváděna. Složitě zařízení lze nahradit keramickou destičkou. Uplatnění této metody můžeme nalézt u lékařských nebulizérů pro inhalační terapie nebo povrchové úpravy v elektronickém průmyslu. Výhodami této metody spočívá v použití malých tlaků přiváděné kapaliny. Cena ultrazvukového generátoru a nutnost použití malých průtoků je značnou nevýhodou.



Obr. 4: Ultrazvuková atomizace[5]

2.5. Kmitající kapiláry

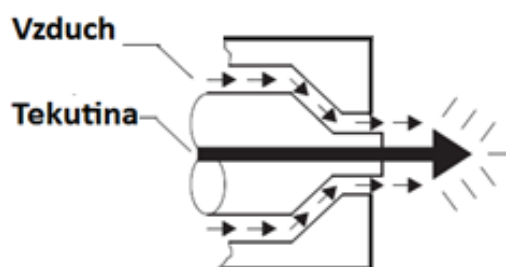
Tento typ generování vodních kapek byl poprvé použit ke studiu srážek a sloučení malých kapek vody. Rozprašování je produkováno vibrací jehly v její rezonanční frekvenci a může produkovat jednotné proudy kapek. Velikost frekvence, s kterou jsou kapky produkovány, závisí na průtokové rychlosti skrz jehlu, průměru jehly, rezonanční frekvenci a amplitudě kmitů jehly. [4]

3. Princip pneumatického rozprašování

Pneumatické atomizéry využívají k rozpadu kapaliny kinetickou energii plynu, v našem případě použijeme vzduch. Jedná se o nejstarší typ atomizéru. Nacházejí uplatnění v různých oborech průmyslu, zejména tam kde je potřeba rozprašování velmi viskózních kapalin například tekutých kovů atd.

V atomizéru dochází k interakci kapalné a plynné složky. U paralelního toku plynu a kapaliny dochází k interakci na povrchu, kapalina se rozpadá na kapky. Při přechodovém nebo vířivém toku plynu a kapaliny se za dynamického působení plynu rozpadá kapalina na kapky.

Základem pneumatické atomizace je smykové napětí na rozhraní mezi kapalinou a plynem. Kapalina může mít před kontaktem s plynem různou podobu např. list, kapky, tenký sloupec. Kapalina ve formě listu má větší kontaktní plochu s plynem, tím pádem dochází ke snadnému rozprašování. Pokud má tvar tenkého sloupce, dochází k rozpadu při relativně nízkých rychlostech. Existují dva mechanismy atomizace pomocí plynu a to odtržením kapek z povrchu kapaliny nebo rozpadem kapaliny na hraně trysky. Pokud je kapalina ve formě kapek, nastává sekundární rozpad při působení proudění plynu.[6]



Obr. 5: Pneumatická atomizace

3.1. Výhody a nevýhody pneumatického rozprašování

Mezi výhody pneumatického rozprašování patří následující:

- atomizace velmi viskózních kapalin (za dostatečně vysoké kinetické energie plynu) použitím přehřáté páry nebo předeřhřátím kapaliny klesá její viskozita
- kvalita atomizace a rychlost proudění kapaliny je menší než u tlakových atomizérů, energie plynu může být libovolně vysoká, proto je možné dosáhnout vysokého regulačního rozsahu průtoku s dobrou kvalitou atomizace
- atomizéry mohou mít různý tvar (ploché, kónické) a různý rozprašovací úhel na trysce
- podle potřeby je k atomizaci možné použít různé plyny (argon, helium)
- se zvyšující se relativní rychlostí plynu se zvyšuje kvalita atomizace, ale nad 80 m/s je toto zlepšení méně významné
- kapalina je přiváděna nižším tlakem většími průřezy, z tohoto důvodu mají pneumatické atomizéry nižší tendenci se ucpávat[6]

A mezi nevýhody patří:

- potřeba zdrojů stlačeného plynu (vzduchu) nebo zdrojů páry
- vyšší spotřeba energií
- díky rozsáhlosti pomocných zařízení jsou celkové pořizovací náklady vyšší[6]

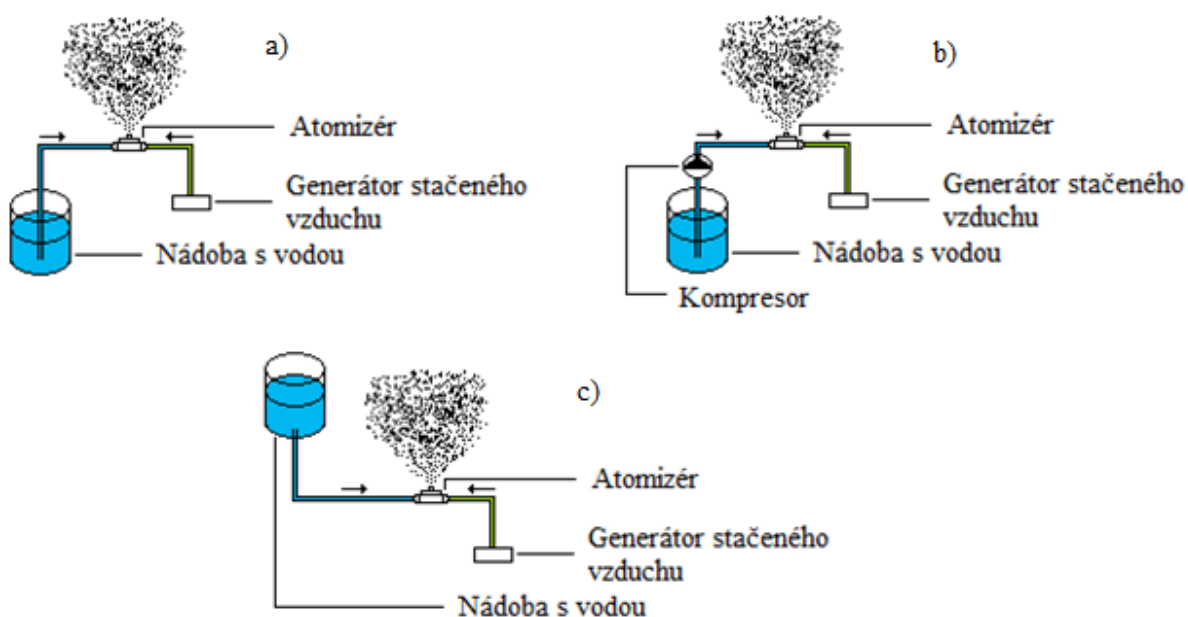
4. Konstrukce pneumatického atomizéru

Jedním z bodů této práce bylo navrhnutí a sestrojení pneumatického tryskového atomizéru. Návrh a konstrukce atomizéru byla vytvořena na základě rešerše a studia těchto atomizérů, funkčním principu, teoretické podstaty konstrukce a vzniku sprejů.

4.1. Dělení podle přívodu kapaliny do atomizéru

Podle způsobu dodávání kapaliny můžeme vzduchovou atomizéry rozdělit na sifonový, gravitační a tlakovou. Při zvolení tlakové konstrukce musíme kapalinu přivádět do systému pod určitým tlakem, je tedy potřeba zařízení, které nám toto zprostředkuje (čerpadlo). U gravitační konstrukce postačí nádobu s tekutinou umístit dostatečně vysoko a díky spádu kapaliny dostaneme potřebný tlak.

Sifonová konstrukce nepotřebuje žádné zařízení a nemusíme upevňovat nádobu do určité výšky. Vzduch o velké rychlosti proudí kolem trubice s tekutinou, vyvolá podtlak a ten způsobí nasátí kapaliny do trysky.



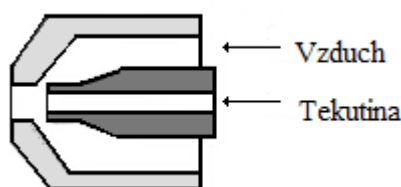
Obr. 6: a) Sifonová konstrukce b) Tlaková konstrukce c) Gravitační konstrukce

4.2. Interní a externí atomizéry

Další možností rozdělení atomizéru je podle místa, kde dojde ke smíchání vzduchu a kapaliny. Máme dvě možnosti a to externí a interní.

4.2.1. Interní atomizéry

Principem interního atomizéru je mísení kapaliny a vzduchu o vysoké rychlosti uvnitř mísící komory. Atomizér je zásoben kapalinou přidavným dávkovacím zařízením. Při interakci mezi rychlým proudem vzduchu a pomalou kapalinou dojde k rozkladu kapaliny na kapky. Tato konstrukce dokáže produkovat sprej o vysokých rychlostech. Při zvýšení tlaku vzduchu dojde k zvýšení průtoku a k jemnější atomizaci. Často se používá u atomizace topných olejů.



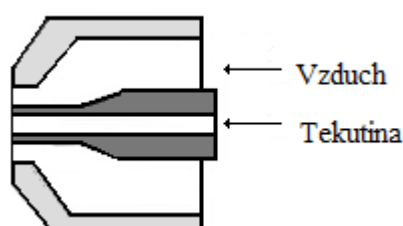
Obr. 7: Interní provedení

4.2.2. Externí atomizér

Kapalina a vzduch se míchají mimo trysku. Protože kapalina a vzduch vycházejí ze samostatných otvorů, lze regulovat velikosti tlaků a tím můžeme průtoky lépe kontrolovat.

Provedení je vhodné pro viskózní kapaliny nebo pro kapaliny, které při smíchání se vzduchem inklinují k zhuštění. Není zde komora, ve které dochází ke smíchání kapaliny a vzduchu, tím je tedy riziko ucpání výrazně sníženo.

Navíc je možné dosáhnout jemnější atomizace než s vnitřním provedením, protože je zde možnost zvýšení tlaku vzduchu při zachování požadovaného průtoku.



Obr. 8: Externí provedení

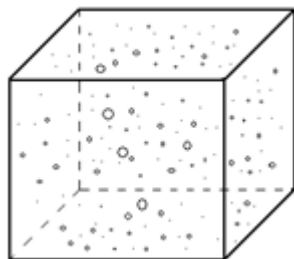
5. Techniky měření sprejů

Dále se seznámíme se možnostmi měření spreje, abychom později byli schopni vyhodnotit funkčnost našeho atomizéru.

Máme dvě různé techniky měření. První se nazývá prostorová technika a druhá je technika toku (nebo také časová technika).

5.1. Prostorová technika

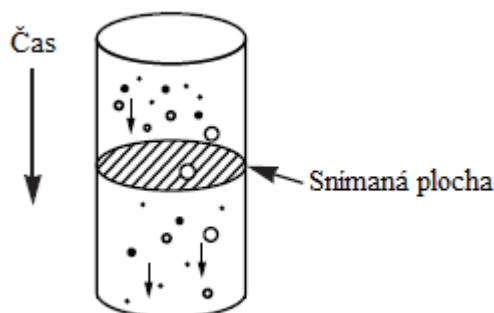
Prostorová technika je založena na okamžitém zaznamenání snímaného prostoru, ve kterém je obsažena distribuce částic. Obecně platí, že prostorová měření jsou zaznamenávána za pomoci holografických prostředků, nejčastěji za pomoci vysokorychlostní fotografie daného prostoru, nebo také za pomoci rozptylu světla. Tato technika je citlivá na počet částic v prostoru, který měříme. Touto metodou nemůžeme měřit rychlost částic.



Obr. 9: Zaznamenaná oblast[1]

5.2. Technika toku

Technika toku (nebo také distribuce toku) je technika, při níž částice procházejí přes snímanou oblast, kterou po časových intervalech zaznamenáváme. Měření provádíme za pomoci optických přístrojů, ty jsou schopné zaznamenat jednotlivé částice. Tento typ měření je citlivý na tok částic.



Obr. 10: Zaznamenání měřené oblasti[1]

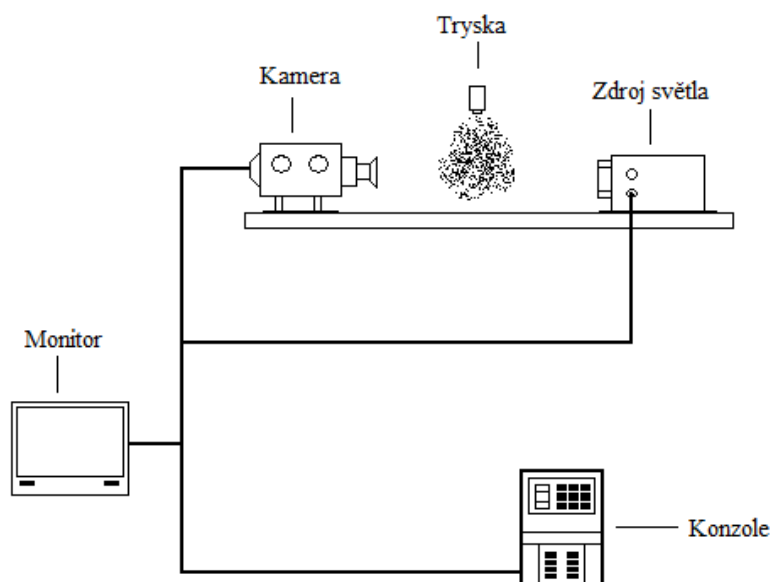
Zvolená technika má vliv na konečný výsledek, protože s každou technikou dostaneme trochu jiná data, například částice měřené prostorovou technikou budou mít výslednou průměrnou hodnotu velikostí menší než ty samé částice měřené technikou toku. Technika toku není schopná obsáhnout i ty nejmenší částice a díky tomu se průměr nepatrně zvětší. Proto při porovnávání dat musíme znát zvolené techniky měření. Dále musíme výběr techniky přizpůsobit dané oblasti měření, například v oborech jako jsou chlazení, klimatizace nebo podobné procesy, kde jsou velikosti kapek menší, je lepší zvolit prostorovou techniku a v oblastech kde je důležité znát rozložení spreje jako v zemědělství, malířství a podobné, je lepší zvolit techniku toku.

6. Optické metody pro měření a vyhodnocování atomizace kapalin

Dnešní trh nabízí mnoho možností analýzy v oblasti charakteristiky spreje, většina těchto analýz využívá optických metod. Tyto metody se rozdělují do dvou kategorií: zobrazovací a nezobrazovací. Zobrazovací zahrnuje fotografie a holografie. Kategorii nezobrazovací metody můžeme rozdělit do dvou tříd, do první spadají měření o velkém počtu částic najednou a ty se nazývají ensemble, do druhé třídy spadají měření, kde měříme každou jednotlivou částici samotnou, toto měření se nazývá single particle counters. Optické metody nemají vliv na chování spreje během měření.

6.1. Optické zobrazovací analýzy

Tyto analýzy patří do prostorových technik a řadí se do kategorie zobrazovacích metod. K provedení těchto analýz potřebujeme zdroj světla (nejčastěji se používá stroboskopické světlo), dále video kameru a počítač. Zdroj světla slouží k osvětlení spreje, který je zaznamenáván kamerou. Pořízený obraz je pak naskenován a částice jsou rozděleny do různých velikostních tříd. V rané fázi vývoje docházelo k různým chybám měření hlavně k rozmazání obrazu, špatná hloubka ostroty a k nesprávné velikosti vzorku. Tyto chyby byly postupně minimalizovány.



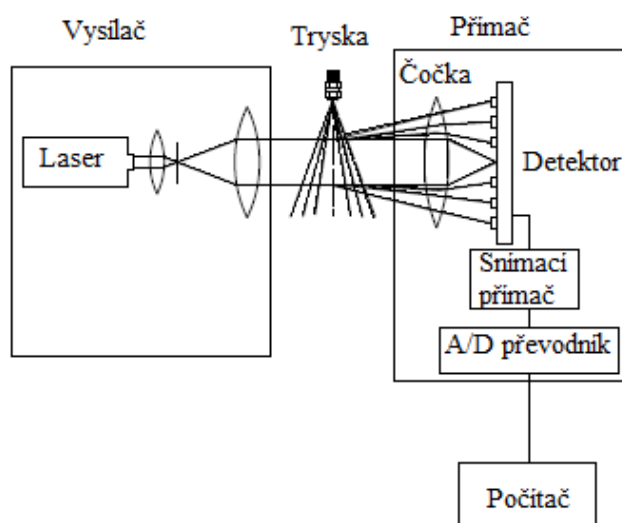
Obr. 11: Schéma zapojení[1]

6.2. Laserová difrakční analýza

Tato analýza patří do prostorových technik a spadá do nezobrazovací (ensemble) kategorie. Metoda se skládá z vysílače, přijímače a počítače. Princip metody je založen na měření intenzity světla, které je rozptýleno kapkami procházejícími přes měřenou oblast. K měření intenzity rozptýleného světla se používají půlkruhové fotodiody, které jsou umístěny vedle sebe v řadě v přijímači.

Velikostní rozsah měřených částic se pohybuje od 1.2 do 1 800 μm , někteří výrobci už tento rozsah zvětšili na 3 000 μm .

Tato metoda je vhodná k měření malých kapacit, například pro vzduchovou nebo hydraulickou atomizace či ploché trysky. Metoda je velice užitečná při porovnávání výsledků měření nebo pro rychlé vyhodnocení prototypu trysky. Největší omezení této metody je mnohonásobný rozptyl. Mnohonásobný rozptyl vzniká při velkém přesycení spreje. Světlo může být rozptýleno jinými kapkami ještě před dosažením detektoru.

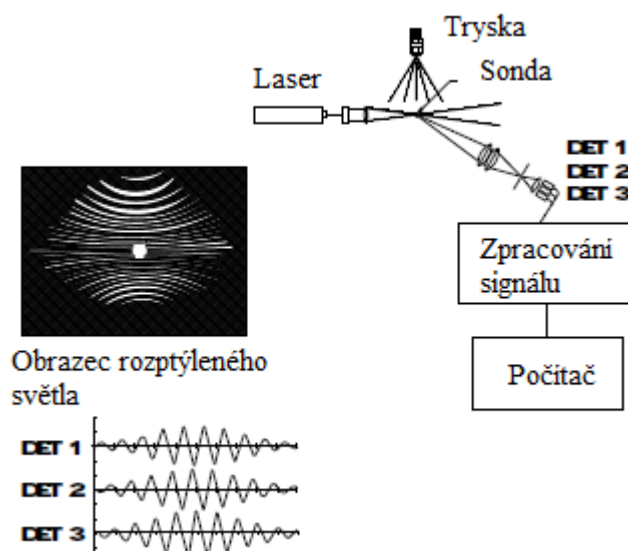


Obr. 12: Schéma zapojení[1]

6.3. Fázová analýza dopplerovských částic

Fázová analýza dopplerovských částic (PDPA - Phase Doppler Particle Analyzer) patří do technologie toku a dále spadá do nezobrazovací (single particle counter) kategorie. Tato analýza se skládá z vysílače, přijímače, signálového procesoru a počítače. PDPA využívá jako zdroj světla laser s nízkým výkonem, který je rozdělen na dva paprsky pomocí rozdělovače a frekvenčního modulu. Tyto dva paprsky se sbíhají v místě, kde je umístěná sonda. Když částice projde skrz sondu a rozptýlí světlo, dostaneme interferenční proužky.

Měřicí velikostní rozsah PDPA je $(0.5 - 10\,000) \mu\text{m}$. PDPA analýza je vhodná pro měření malých, středních, ale i velkých kapacit trysky. Dále je vhodná pro vzduchovou a hydraulickou atomizaci a pro ploché spreje. Tato analýza nám podává kompletní výsledek charakteristiky spreje včetně hodnot rychlostí.



Obr. 13: Schéma metody[1]

Každý druh analýzy se hodí pro určité druhy měření. Je prakticky nemožné srovnávání dat z různých analýz bez řádného pochopení metodiky daných analýz.

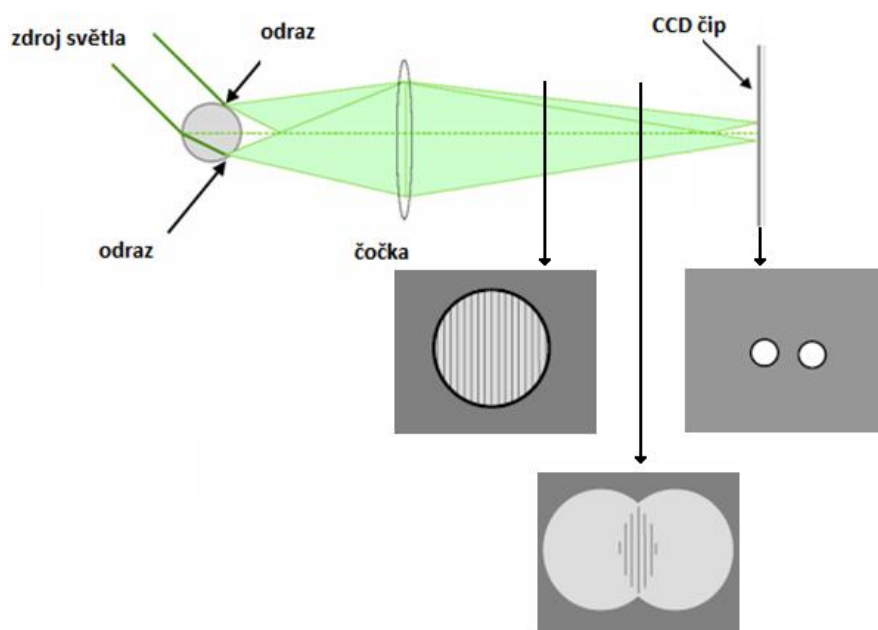
Stejně tak je velmi obtížné porovnávat trysky od různých výrobců, protože i když použijeme stejné měřicí metody, velmi záleží na zvolené konfiguraci, a proto se můžou naměřená data lišit. Je velice důležitá správná kalibrace, ale i údržba měřicího zařízení nesmí být opomenuta.

Údaje o velikosti částic se zaznamenávají ve formě matematického znázornění. Matematické znázornění je často závislé na používané analýze.

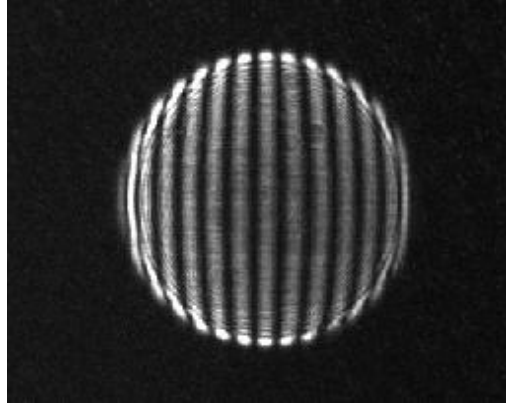
7. Měřicí metoda IPI

Metoda, kterou bylo prováděno měření, se jmenuje interferometric particle imaging, dále jen IPI, je to relativně nová metoda k měření velikosti částic. Její výhodou je schopnost měřit okamžitou velikost a rychlost prostorově distribuovaných kapiček. Patří do techniky toku a je to zobrazovací metoda.

Metoda IPI umožňuje měřit velikost průhledných částic kulovitého tvaru (kapky tekutiny, skleněné kuličky, vzduchové bubliny atd.). Metoda je založena na počítání interferometrických proužků, které jsou možné detekovat na snímku zachyceném CCD kamerou. Interferometrické proužky jsou výsledkem rozostření dvou jasných bodů, které vzniknout jednak odrazem světla od částice a jednak lomem světla při průchodu částicí. Při větším rozostření kamery se začnou oba body překrývat a vytvoří tak charakteristické interferenční svislé proužky. Tento jev se nazývá Youngova interference. Pro optimální optické nastavení je nezbytné, aby světelná intenzita odraženého světla od částice a intenzita světla procházejícího částicí byla stejná. Počet vzniklých interferenčních proužků závisí na velikosti částice a na nastavení parametrů.



Obr. 14: Vzorky podle rozostření kamery



Obr. 15: Interferenční proužky

Na obr. 15 Můžeme vidět interferenční proužky. Světlé proužky nastávají při konstruktivní interferenci světelných vln a jde vlastně o lokální interferenční maxima. Tmavé proužky jsou důsledkem destruktivní interference a zde jsou lokální minima světelné vlny.

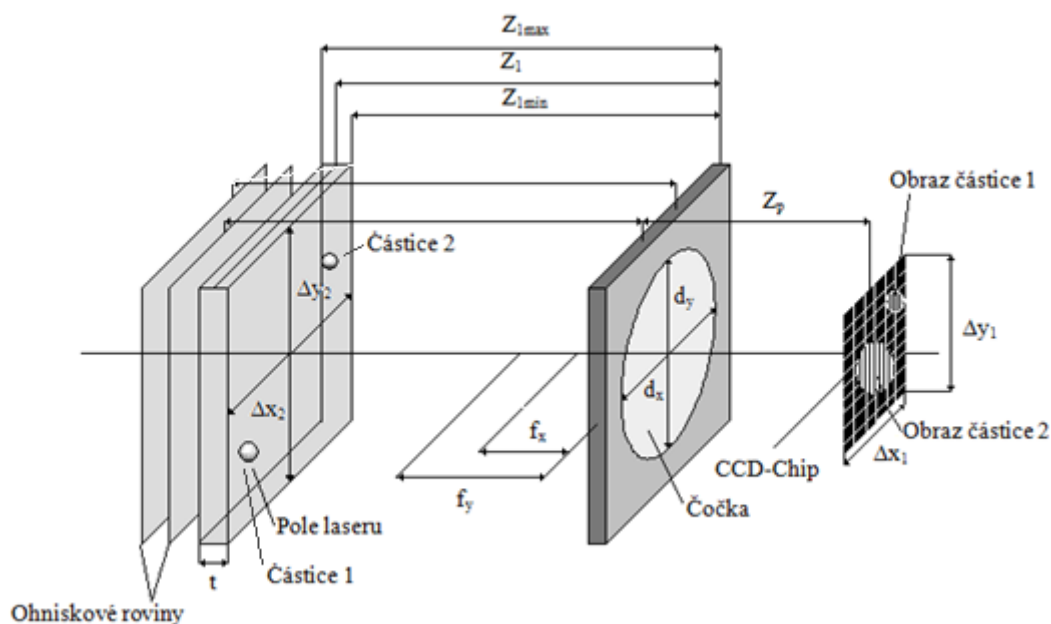
Pro vyhodnocení velikosti částic je třeba nejdříve pomocí snímků kalibračních terčů najít počátek měřené roviny společný pro obě kamery. Počátek je definován polohou středového bodu (největší bod kalibračního terčů) obklopeného čtyřmi menšími body. Detekujeme-li pozici značkovací částice a určíme-li počet interferenčních proužků (N_{fr}) na částici, pak pro velikost částice platí:

$$N_{fr} = k \cdot d_p \quad (1)$$

Pro částice jejichž, poměrný index lomu $m > 1$ počítáme součinitel k dle rovnice:

$$k = \frac{\arcsin\left(\frac{d_a}{2Z}\right)}{\lambda} \cdot \left(m \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) - \frac{m \cdot \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{m^2 + 1 - 2 \cdot m \cdot \cos\left(\frac{\phi}{2}\right)} \right) \quad (2)$$

$$d_{min} = \frac{n_x}{2k\Delta x} \left[1 - z_r \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{z_1} \right) \right] \quad (3)$$



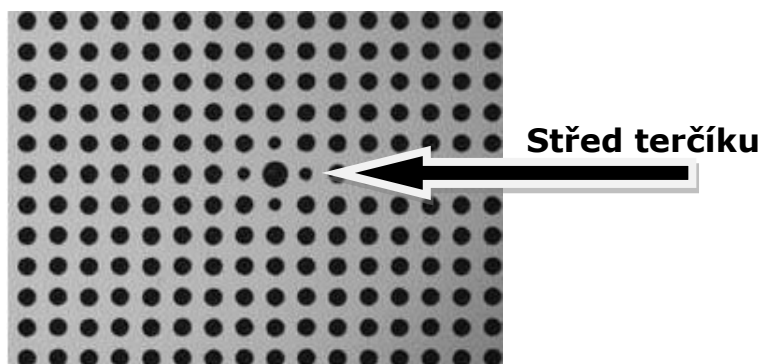
Obr. 16: Schéma metody

7.1. Použití dvou kamer

Tato metoda vyžaduje použití dvou kamer, které snímají stejnou oblast. První kamerou vytváříme rozostřený obraz, ten umožňuje detekci částic a jejich rychlosti. Druhá kamera se rozostří, aby vznikly interferenční proužky, tento obraz slouží k určení velikosti částic a vyhodnocení pohybu částic.

7.2. Kalibrace kamer

U metody IPI je velice důležité, aby obě kamery snímaly stejnou oblast, pouhým umístěním kamer do speciálního držáku docílíme shodných oblastí, a proto je důležité kalibrovat kamery. Ke kalibraci je potřeba kalibračního terčíku, který vyfotíme oběma kamerami a z polohy středu terčíku na fotografiích dostaneme jejich vzájemné posunutí.



Obr. 17: Kalibrační terčik

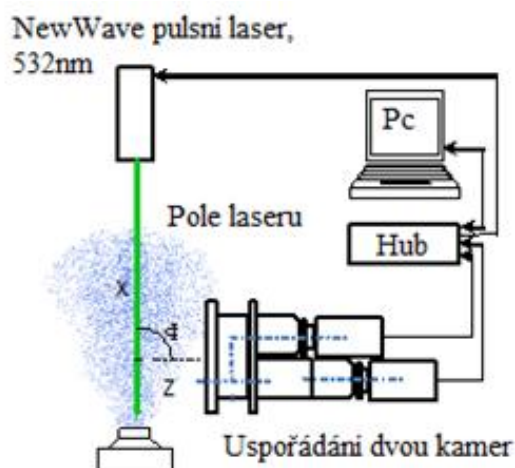
7.3. Detekce částic

Detekce částic zahrnuje identifikaci jednotlivých částic. Protože obrazy často obsahují šum, musí být použity filtry odstranění nebo snížení šumu. K odstranění šumu v pozadí se používá prahování. Uživatel si může prahování nastavit a měnit.

Po detekci a identifikaci částice je nutné odstranit sousedící částice, které jsou v bezprostřední blízkosti. Protože v některých případech může docházet k překrytí částic a tím i k vzájemnému vyrušení částic. Zvolenou částici identifikuje a odstraníme částice, které s ní sousedí v námi zvoleném okruhu. Poté co jsou částice rozpoznány na zaostřeném obrázku, musí se najít tato částice i na rozostřeném obrázku.[3]

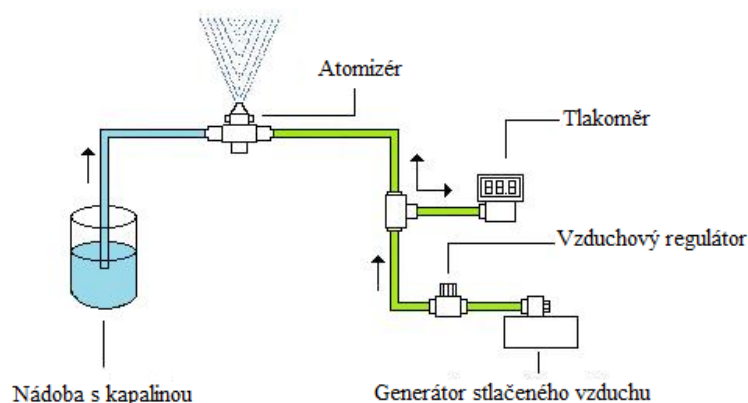
8. Měřicí systém pro vyhodnocování charakteristik pneumatického atomizéru

Při měření metodou IPI byl použit pulzní laser NewWave Gemini Nd:YAG. Každý pulz trvá 10 ns a energie jednoho pulzu je 120 mJ. Šířka pole laseru byla zvolena 3 mm. Dále byly použity dvě CCD kamery s rozlišením 1280x1024px. Jak již bylo zmíněno dříve, tyto kamery musí mít stejnou optickou osu, aby bylo docíleno snímání stejné oblasti. Museli jsme použít speciální držák na kamery pro IPI metodu. Držák kamer je konstruován tak, aby se použitý filtr umístil před objektiv a bylo ho možné bez demontáže objektivu kdykoli vyjmout či vyměnit. Uvedená funkce je důležitá především při kalibraci, kterou je nutné provést bez filtrů. Každá kamera je vybavena objektivem o ohniskové délce 60 mm s otvorem 15mm. Tyto kamery svírají úhel $\phi=90^\circ$ s laserovým paprskem. Schéma zapojení celého systému můžete vidět na obr 18.



Obr. 18: Měřicí systém

Na obr. 19 je znázorněno schéma zapojení atomizéru. Je zde nádoba, ze které si atomizér přisává kapalinu. Dále je zapotřebí vzduchový regulátor a tlakoměr pro regulaci tlaku vzduchu a samozřejmě generátor stlačeného vzduchu. Celý systém je spojen plastovými hadičkami. Všechny závitové spoje jsou obaleny teflonovou páskou pro lepší utěsnění.



Obr. 19: Schéma zapojení atomizéru

8.1. Nastavení parametru v Dynamic studiu

Pro přesné vyhodnocení měření je důležité korektní nastavení parametrů. V našem případě byl použit od firmy Dantec program Dynamic studio, v kterém probíhalo celé měření i s výpočty.

V Dynamic studio v záložce optické nastavení nadefinujeme úhel kamer s laserem, která byl 90° , dále index lomu média v našem případě vody 1.001 a index lomu částic 1.334. Průměr otvoru objektivu 15mm a vzdálenost kamer od atomizéru 670 mm.

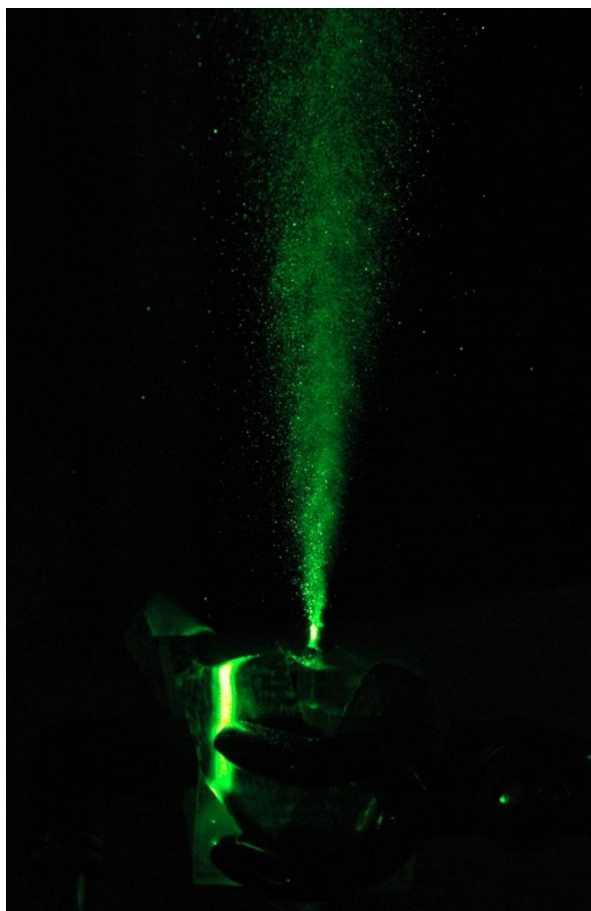
V záložce obecné nastavení jsme vybrali, která z kamer je rozostřená nebo zaostřená.

V záložce rychlostní nastavení jsme zvolili míru odstranění šumu na pozadí na 10% a maximální překryv částic 50%.

8.2. Průběh měření

Po zapojení celého měřicího systému včetně atomizéru podle obr. 18 a 19 jsme ověřili správnou funkčnost zapojení a zda probíhá atomizace. Důležitá je i kontrola utěsnění celého systému, aby nedocházelo k unikání kapaliny. Umístili jsme obě kamery do připraveného držáku, který byl nastaven tak, aby kamery snímaly požadovanou oblast. Kamery byly zaostřené na kalibrační terčík, jedině tak lze v programu Dynamic studio provést kalibraci obou obrazů, jak bylo uvedeno již dříve. Když byly kamery kalibrované, mohli jsme jednu rozostřit, aby vznikly interferenční proužky. Až poté co bylo všechno

správně nastaveno, mohlo se začít s měřením. Nastavili jsme tlak vzduchu a každých půl sekundy byla měřená oblast vyfocena. Těchto snímků jsme pořídili 400 pro každou změnu tlaku. Program Dynamic studio pak následně vypočítá rychlost částic vzhledem ke změně jejich pozice na snímcích a díky interferenčním proužkům i jejich velikost. Na obr. 20 lze vidět laserem osvětlený sprej.



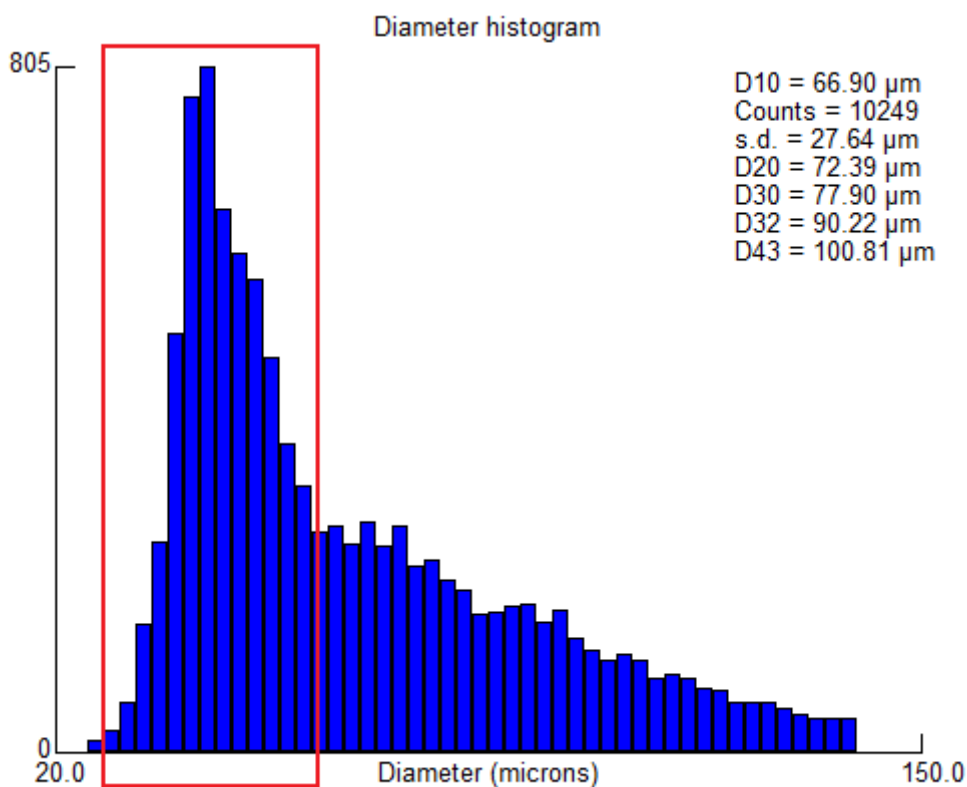
Obr. 20: Sprej osvětlený laserem

8.3. Teoretické výsledky měření

Jak již bylo zmíněno, měření spočívá v zachycení měřené oblasti formou fotografie z obou kamer. Příklad této fotografie můžeme vidět na obr. 21, kde bílé tečky jsou právě osvětlené částice. Po ukončení měření máme tedy k dispozici několik set fotografií pro daný tlak vzduchu. Tím je manuální část u konce a dále se pracuje již pouze v programu Dynamic studio. Nastavíme hodiny tak, jak jsme si uvedli, následně program spočítá velikost částic a výsledek je vyobrazen pomocí histogramu. Příklad histogramu je na obr. 22.



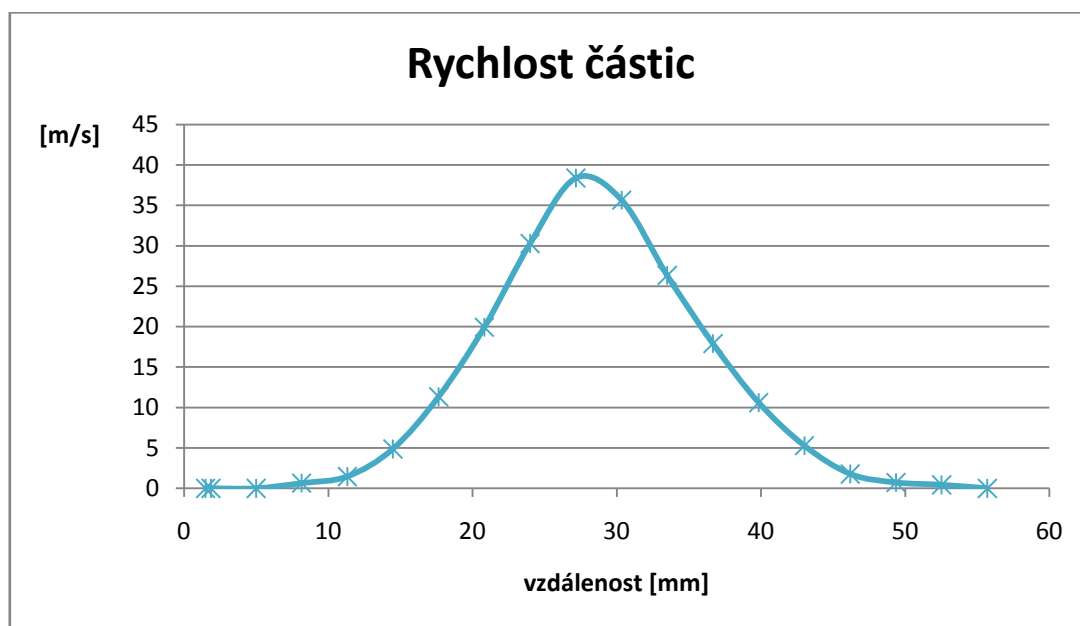
Obr. 21: Pořízená fotografie



Obr. 22: Příklad histogramu

Na ose x je znázorněna velikost částic a na ose y jejich četnost. Oblast v červeném čtverci je zkreslená a vzniká díky mnohonásobnému rozptylu světla. Dále vpravo jsou uvedeny hodnoty středního průměru, jejich význam si dále vysvětlíme.

Dalším směrodatným údajem je rychlost částic. Na grafu 1 je rychlosti částic, můžeme i poznat, v jakém místě jsou částice nerychlejší, protože na ose x je znázorněna vzdálenost od jednoho okraje spreje k druhému.



Graf 1: Rychlost částic (ukázka)

8.3.1. Vyhodnocení rozdělení velikostí spreje

Střední průměry se používají v praxi pro jednotlivé technické aplikace. Jeden z nejběžnějších středních průměrů je D_{10} , kde:

$$D_{10} = \frac{\int_{D_o}^{D_m} D \left(\frac{dN}{dD} \right) dD}{\int_{D_o}^{D_m} \left(\frac{dN}{dD} \right) dD} [m] \quad (4)$$

Jiné střední průměry zahrnují povrchové střední průměry:

$$D_{20} = \left[\frac{\int_{D_o}^{D_m} D^2 \left(\frac{dN}{dD} \right) dD}{\int_{D_o}^{D_m} \left(\frac{dN}{dD} \right) dD} \right]^{\frac{1}{2}} [m^2] \quad (5)$$

Objemové střední průměry:

$$D_{30} = \left[\frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 \left(\frac{dN}{dD} \right) dD}{\int_{D_0}^{D_m} \left(\frac{dN}{dD} \right) dD} \right]^{\frac{1}{3}} [m^3] \quad (6)$$

Obecně lze tedy napsat:

$$D_{ab} = \left[\frac{\sum N_i D_i^a}{\sum N_i D_i^b} \right]^{\frac{1}{a-b}} \quad (7)$$

kde i značí rozsah průměrů, N_i je počet kapek rozsahu průměrů i a D_i je střední průměr rozsahu průměrů i . Proměnné a i b mohou nabývat hodnot korespondujících k jednotlivým aplikacím a součet $a+b$ je nazván pořadí středních průměrů. Například D_{10} je průměrná lineární hodnota celých kapek spreje. D_{30} je průměr kapky, jehož objem vynásobený počtem kapek se rovná celkovému objemu. D_{32} (SMD) je průměr kapky, jehož poměr objemu k ploše povrchu je stejný jako celého spreje. Přehled středních průměrů je uveden v tabulce 1.[2]

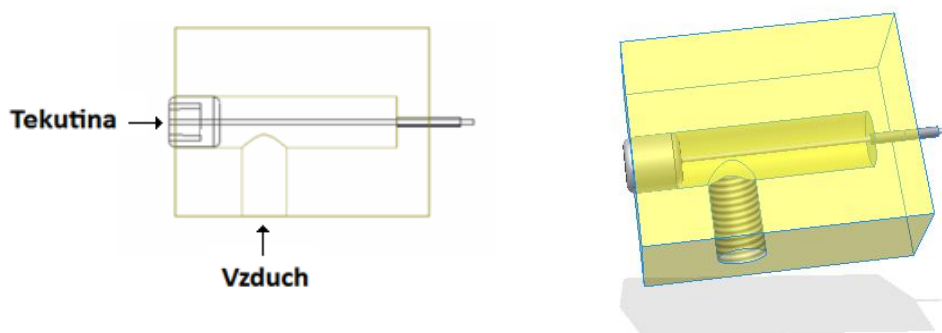
Tabulka 1: Přehled středních průměrů

a	b	a + b	Symbol	Jméno středního průměru	Vzorec	Aplikace
1	0	1	D_{10}	Vzdálenost	$\frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i}$	Srovnání
2	0	2	D_{20}	Plocha	$\left[\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i} \right]^{\frac{1}{2}}$	Povrchová kontrola
3	0	3	D_{30}	Objem	$\left[\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i} \right]^{\frac{1}{3}}$	Objemová kontrola, Hydrologie
2	1	3	D_{21}	Plocha - vzdálenost	$\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i D_i}$	Vstřebávání
3	1	4	D_{31}	Objem - vzdálenost	$\left[\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i} \right]^{\frac{1}{2}}$	Vypařování, molekulární rozptyl
3	2	5	D_{32}	Sauter (SMD)	$\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$	Přenos hmoty, reakce
4	3	7	D_{43}	Herdan nebo De Brouckere	$\frac{\sum N_i D_i^4}{\sum N_i D_i^3}$	spalování

9. Navržený atomizér

Jak už bylo zmíněno, jedním z bodů práce je navrhnout a zkonstruovat pneumatický atomizér. Pro jeho konstrukci byla vybrána sifonová varianta s výhodou nepotřeby dávkovacího zařízení. Kvůli lepší regulovatelnosti a zmenšení rizika ucpání bylo zvoleno externí provedení. A naše tryska měla vytvářet sprej o tvaru plného kužele.

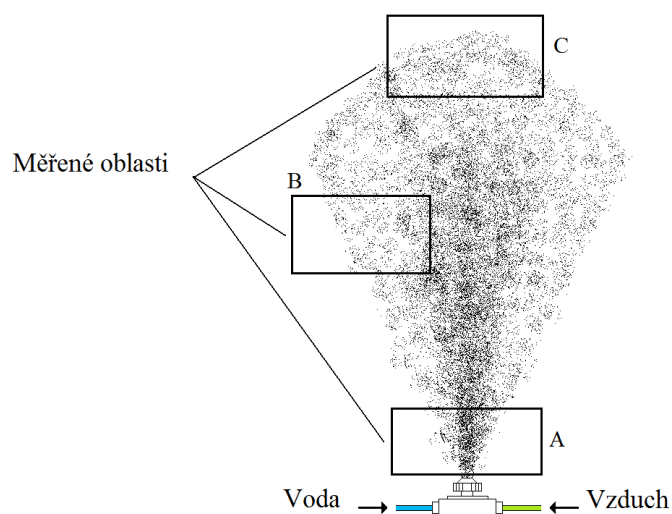
Jako vnější obal atomizéru bylo vybráno plexisklo, tento materiál je dostatečně pevný a zároveň dobře obrobitelný. Do plexiskla byly vyvrtány dva na sebe kolmé otvory. Jeden na přívod vzduchu a druhý na přívod kapaliny jak je vidět na obr. 23. Delším otvorem prochází jehla o průměru 0.8 mm, kterou je přiváděna kapalina. Konec této jehly je vložen do kratší jehly o průměru 2 mm, která umožní proudění vzduchu kolem místa výstupu kapaliny a tím vznikne žádaný podtlak a přisávání kapaliny. Model byl navržen v programu AutoCad Inventor vs. 11 Educational Edition



Obr. 23: Navržený atomizér

9.1. Naměřené charakteristiky vyrobené trysky

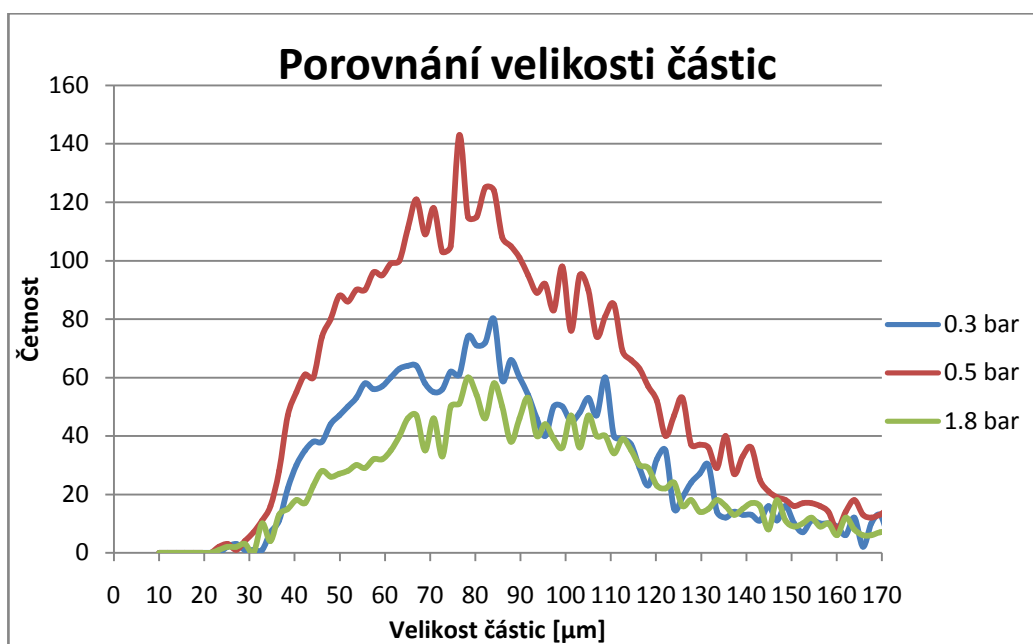
Provedli jsme měření ve třech oblastech A, B, C. Rozdělení těchto oblastí můžeme vidět na obr. 24. Výsledky velikosti částic z oblasti A zde nebudou uvedeny z důvodu přesycení částic u ústí trysky a tím znehodnocení výsledku měření. Zvolená metoda neumožňuje vyhodnotit danou oblast s tak velkým počtem částic. V oblasti B jsme se rozhodli provádět vyhodnocení spíše na levé straně spreje, protože středové proudění tzv. main stream stále, obsahoval velké přesycení částic.



Obr. 24: Měřené oblasti

9.1.1. Naměřená data

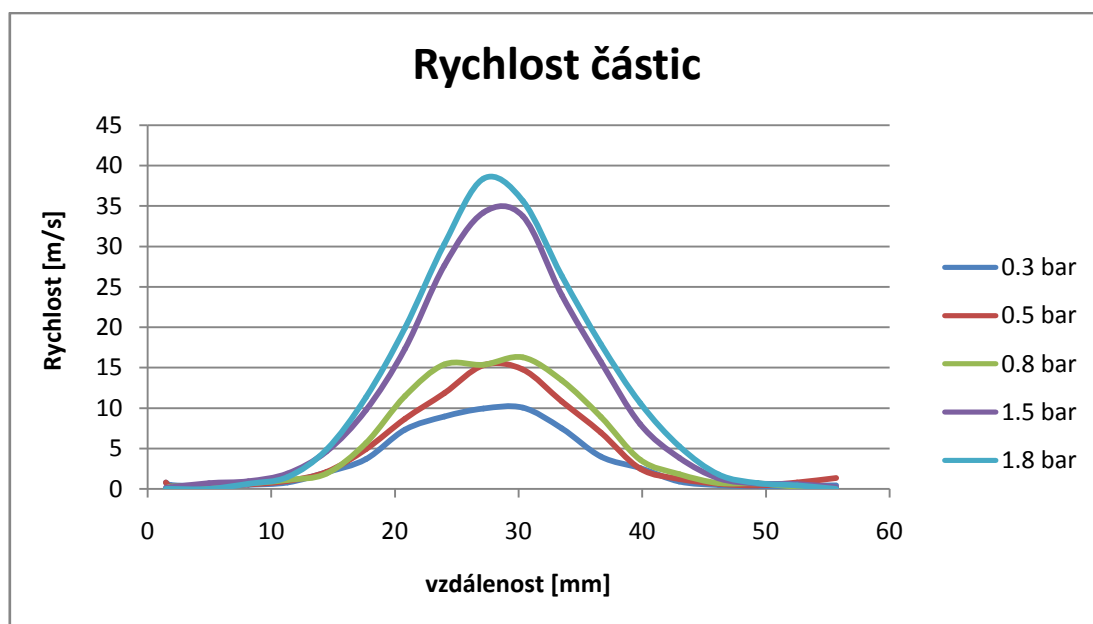
Na grafu 2 můžeme vidět porovnání atomizace trysky při tlacích 0.3, 0.5 a 1.8 baru. Pro lepší přehlednost byl odstraněn překmit mnohonásobného rozptylu. Tryska byla schopna již od velice nízkých tlaků dobře pracovat, ale nejlepší funkčnost je při tahu 0.5 baru, kde průměrná velikost částic je mezi 70 a 90 μm při četnosti okolo 120. Tryska naopak není stavěná pro vysoké tlaky, takže se zvyšováním tlaku se horšila i atomizace. Nejlepší tlakový rozsah tedy je mezi 0.5 a 1.3 barů, v tomto intervalu tryska pracovala bez problémů.



Graf 2: Velikost částic

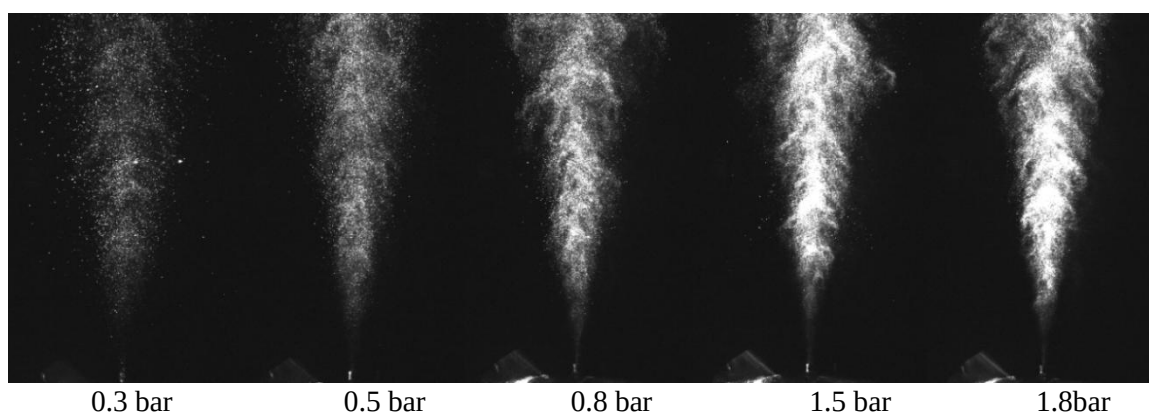
Na dalším grafu je rychlostní profil trysky pro stejné tlaky vzduchu jako v předchozím grafu. Z grafu lze poznat i v jakých místech spreje je rychlost největší a to v oblasti main streamu. Rychlost kapek je, jak jsme předpokládali závislá na tlaku vzduchu, to znamená, že čím větší tlak vzduchu tím rychlejší částice. Z toho vyplývá, že největší rychlost jsme zaznamenali pro tlak 1.8 barů a to 137 km/h. Při tlaku 1.8 barů ale dochází k špatné atomizaci, a proto je důležité vybrat nejvhodnější kompromis a ten se nachází mezi 1 a 1.2 barů.

Tento graf byl zhotoven na základě údajů z měření v oblasti A, kde je rychlost nejvyšší, protože vlivem tření, rozpadem (sekundární proces) a změnou kinetické na potenciální energii ztrácejí částice rychlost, čím víc jsou vzdáleny od ústí trysky.



Graf 3: Rychlost částic

Na obrázku 25 vidíme vývoj spreje v závislosti na tlaku vzduchu. Nejlepšího tvaru spreje jsme docílili s tlakem 0.5 barů. U vyšších tlaků docházelo k velkým turbulencím. Turbulence vznikají, když main stream má větší rychlost než částice po okrajích. Tento efekt může zavinit špatná geometrie nebo netěsnosti v konstrukci trysky.



Obr. 25: Vývoj spreje

9.1.2. Vyhodnocení měření vyrobeného atomizéru

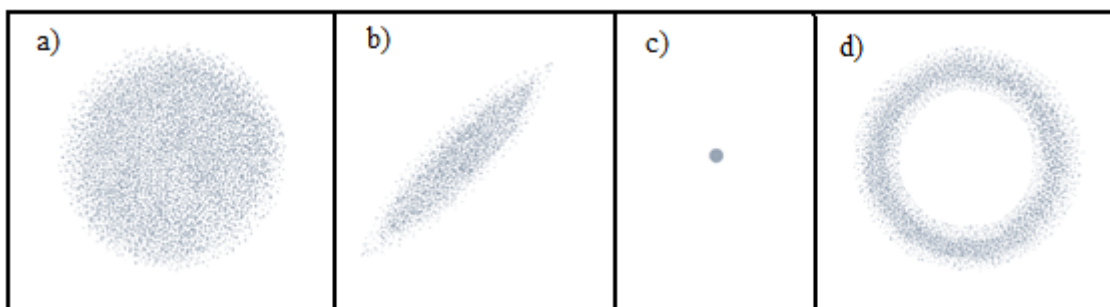
Atomizér vykazuje dobrou atomizaci již v malých hodnotách tlaku. Rychlost částic je při tlaku nad 1 bar také velice dobrá. Náš atomizér má však velmi malý tlakový rozsah díky zvolenému provedení konstrukce. Dále je tryska sestavena pro menší kapacity kapaliny řádově desítkách litrů za hodinu. Další nežádoucí efekt jsou turbulence ve spreji. Tento atomizér bude vyhovující pro aplikace, kde se pracuje s malým tlakem vzduchu a kde není silné okolní proudění, které by způsobovalo zanášení kapek jako například v zemědělství (zavlažování atd.)

10. Zakoupená tryska

Dostalo se nám možnosti zakoupit průmyslově vyrobený atomizér a porovnat výsledné charakteristiky s naším atomizérem. Dnešní výrobci nabízejí nepřeberné množství typů atomizérů. My jsme trysku zakoupili u firmy Sprays.com. Uvedeme si zde možnosti, které jsme měli při nákupu trysky.

10.1. Možný výběr provedení atomizéru

Samozřejmostí je výběr mezi provedením externím či interním a sifonovým, gravitačním nebo tlakovým. Dále vybíráme konstrukci atomizéru podle průtoku kapaliny, ty se dělí na nízko kapacitní, kde se průtok pohybuje od 0.49 až do 280 l/h u středních kapacit od 15.5 do 1158 l/h a poslední vysoko kapacitní mají průtok od 90 do 6420 l/h. Další možnost volby máme u tvaru spreje, který bude atomizér vytvářet, nejběžnější tvary jsou plný kužel, dutý kužel, plochý sprej a pevný proud spreje. Každý tvar spreje se hodí na jinou činnost, například dutý kužel je nejvhodnější pro aplikace, kde je potřeba použití malých tlaků, pevný proud spreje se používá zejména pro čisticí aplikace atd.



Obr. 26: Nejběžnější tvary spreje: a) plný kužel, b) plochý, c) pevný proud, d) dutý kužel[1]

Můžeme mít i speciální tvary trysek, například miniaturní atomizéry o velikostech nepřesahujících 2 cm nebo prodloužené trysky, kde probíhá atomizace hned na několika místech, dále dvojité trysky.



Obr. 27: a) dvojité tryska, b) prodloužená tryska, c) miniaturní tryska[1]

Kapalinu a vzduch můžeme přivádět rovnoběžně z jedné strany nebo každou z jiné strany. Další možností konstrukce je upevnění atomizéru. Atomizér můžeme připevnit šrouby nebo speciálními držáky do silných zdí a do slabých zdí.

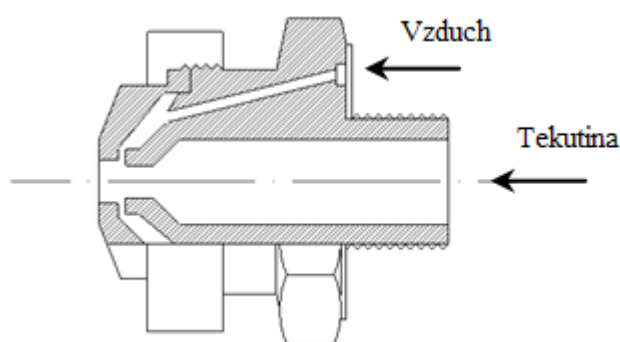


Obr. 28: Upevnění: a) do tlusté zdi, b) do tenké zdi, c) upevnění šrouby[1]

Posledním a nejdůležitějším kritériem jsou samotné atomizační vlastnosti atomizéru, prodejci nabízí různé velikosti úhlů kužele spreje, pracovní vzdálenosti nebo rychlost spreje. Atomizér, který jsme vybrali, byl podobný naší trysce, abychom dosáhli co možná nejlepšího porovnání.

10.2. Vybraný atomizér

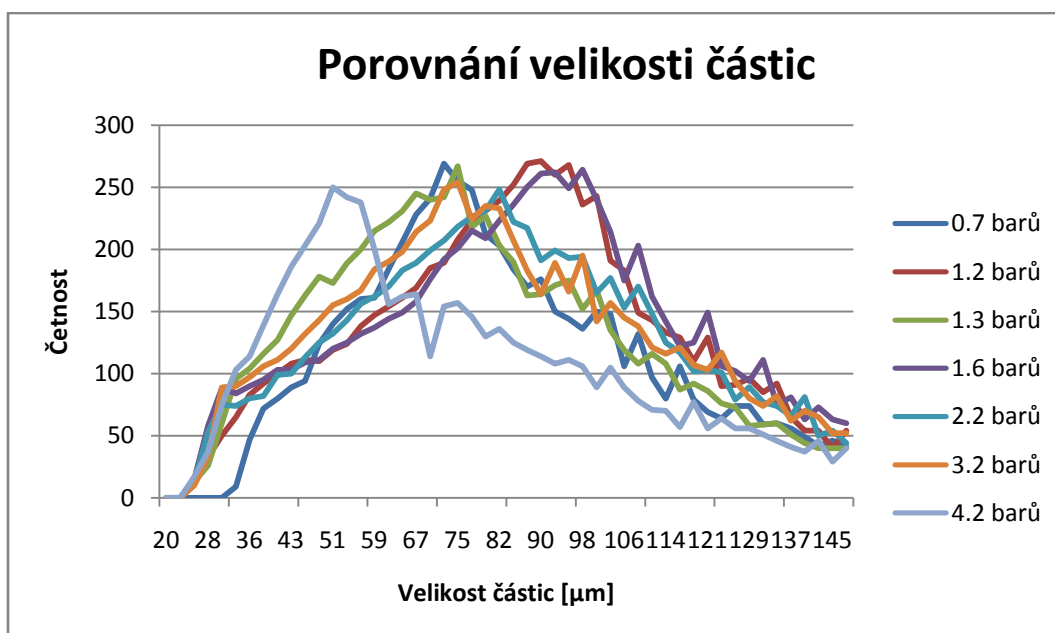
Zakoupená tryska nese označení SU1A 1/4J. označení 1/4J znamená, že naše tryska patří do kategorie nízkokapacitních trysek. Značka SU1A udává použití vzdušné a kapalinové hlavice a zvolenou konstrukci, my jsme zvolili stejně jako u naší postavené trysky externí. Zakoupená tryska by měla mít nejlepší atomizační vlastnosti mezi 0.7 a 4 bary a při tlaku vzduchu 4 bary projde tryskou 36 l/min vzduchu. Úhel spreje je 18° a k turbulencím by mělo docházet asi ve 30 cm od ústí trysky. Sprej může dosáhnout velikosti 2.6 m při velikosti tlaku vzduchu 4 bary.



Obr. 29: Zakoupená tryska

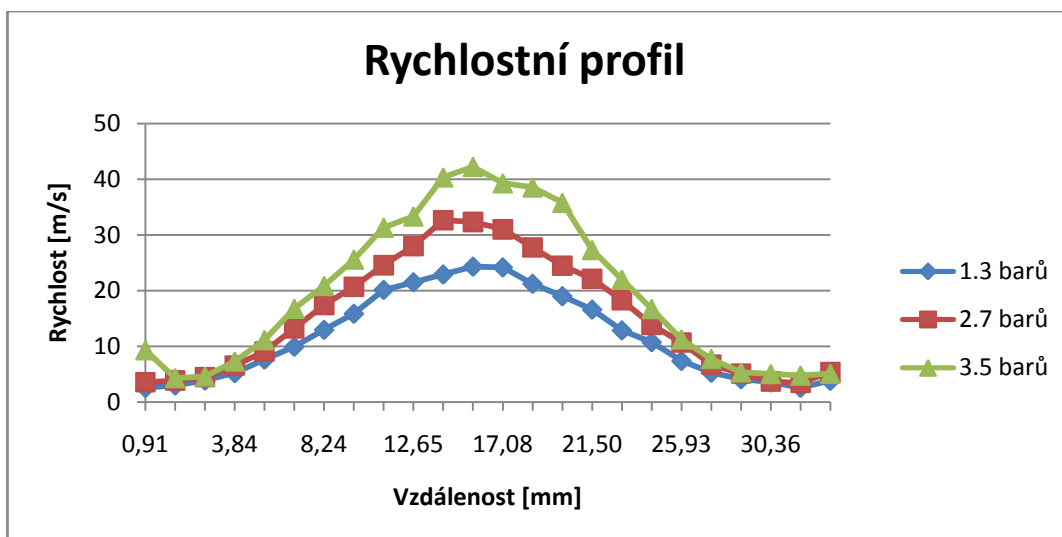
10.3. Naměřená data

Stejně jako u vyrobené trysky jsme sprej měřili v oblastech A, B a C, jak je uvedeno na obr. 24. Tryska začíná správně pracovat od tlaků větších než 0.5 barů. Tato tryska je zhotovena ze železa, a proto jsme si mohli dovolit vystavit jí větším tlakům, měření proběhlo až do tlaku vzduchu 4.2 barů. Jak je vidět na grafu 4. Tryska v celém měřeném rozsahu pracovala velice konstantně a tlakové změny se projevovaly nepatrně. Co se týká velikosti kapek a jejich četností, lze považovat jako nejlepší pracovní rozsah 0.7 až 4 bary. Průměrný rozsah velikosti kapek je od 65 až do 90 μm při četnosti kolem 260. Střední průměry se rovnaly: $D_{10}=63.61\mu\text{m}$, $D_{20}=68.74\mu\text{m}$, $D_{30}=74.17\mu\text{m}$, $D_{32}=86.34\mu\text{m}$, $D_{43}=97.69\mu\text{m}$. Počet částic na snímku, které byl program schopen vypočítat, se pohybovala kolem 8 000.



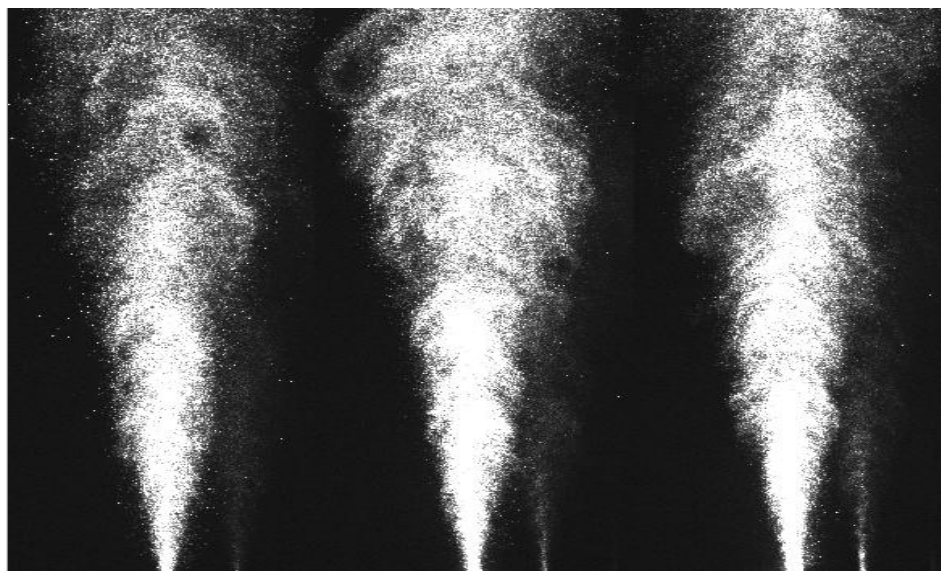
Graf 4: Velikost částic

U rychlosti částic ve spreji se taktéž projevila závislost na tlaku vzduchu. Největší rychlosti dosáhneme s nejvyšším tlakem, v tomto případě byl tlak vzduchu roven 3.5 barů a dosažená rychlost byla přes 40 m/s. Na grafu 5 můžeme vidět, že rozložení částic je o polovinu užší než u předchozí trysky, a z toho můžeme usuzovat, že i úhel spreje je o polovinu menší.



Graf 5: Rychlost částic

Na obr. 30 je znázorněn proud spreje pro tlak vzduchu 1.3, 2.7 a 3.5 barů. I zde dochází k lehkým turbulencím, u kterých ale nedochází k velkému zhoršení v závislosti na tlaku kapaliny, jak to bylo u naší vyrobené trysky.



1.3 bar

2.7 bar

3.5 bar

Obr. 30: Vývoj spreje

10.4. Vyhodnocení měření průmyslového atomizéru

Průmyslový atomizér vytváří konstantní sprej v celku velkém rozsahu (0.7 – 4) bar. Velikost částic se pohybuje v rozmezí (60 – 90) μm . Rychlost částic dosahuje velikosti 40 m/s. Na okraji spreje vznikají malé turbulence, jejich závislost na tlaku je však velice malá.

11. Porovnání výsledku měření a návrh optimalizace pneumatického atomizéru

Naše vyrobená tryska byla schopna lépe pracovat při velmi nízkých tlacích vzduchu, prokazovala dobrou atomizaci i v celku vysokou rychlost částic, průmyslová tryska byla schopná pracovat až od 0.7 barů. Další výhodou naší trysky byla v rychlejším nárůstu velikosti rychlostí. Při tlaku 1.5 baru částice vyprodukované naší tryskou dosahovali rychlosti 35 m/s, naproti tomu rychlost částic při totéž tlaku u průmyslové trysky nepřesáhli hranici 26 m/s. Hodnota nejvyšší dosažené rychlosti je pro oba atomizéry stejná a to 40 m/s.

U obou atomizérů docházelo k turbulencím, avšak u našeho atomizéru byly tyto turbulence větší a byly více závislé na tlaku. V oblasti velikosti částic jsme dosáhli prakticky totožného výsledku a to že nejvíce částic měřilo kolem 80 μm . Co se týká četnosti částic, byl na tom podstatně lépe průmyslový atomizér, vzhledem k většímu průtoku byla tato hodnota 260 nežli u vyrobeného atomizéru pouhých 150. Další výhodou průmyslové trysky je rozsah tlaků, který můžeme použít vzhledem ke kvalitnějšímu zpracování a použití lepších materiálů nedochází tak brzo k poškození atomizéru nebo netěsnostem. Vyrobený atomizér nemůžeme vystavit tlakům přes 1.5 baru, při vyšším tlaku dochází právě k netěsnostem a při velkém překročení této hranice může dojít k poškození atomizéru.

Náš atomizér má jednu velkou výhodu a to je cena, která se pohybuje v desítkách korun na rozdíl od zakoupené, kde je cena v tisících korun.

Možným vylepšením by mohlo být použití pevnější konstrukce těla trysky, lepších materiálů a přesnější zpracování trysky. Tyto vylepšení by se ale projeví na ceně atomizéru, a tak bychom prakticky smazali její největší výhodu.

Závěr

Hlavním tématem této práce je atomizace. Práce je rozdělena do rešeršní části a praktické části. Část rešeršní je tvořena ze tří okruhů.

V prvním okruhu je uveden základní popis atomizace se zaměřením zejména na vzduchovou atomizaci.

Protože zadání obsahovalo návrh a konstrukci pneumatického atomizéru v dalším okruhu jsme si vysvětlili, na jakém principu pracují vzduchové atomizéry a jaké jsou možnosti jejich konstrukce.

Třetím a posledním okruhem rešeršní části byly způsoby měření a vyhodnocení spreje, který atomizéry produkují. Zaměřili jsme se na metodu IPI nebo-li interferometric particle imaging, protože touto metodou probíhalo celé měření atomizérů.

To nás přivádí k druhé, praktické části práce. Zde jsme se zabývali už samotným návrhem atomizéru a změřením jeho charakteristik. Protože jsme mohli náš vyrobený atomizér porovnat s průmyslově vyrobeným, jsou zde i výsledky z měření pro tento atomizér.

Z výsledných rychlostních profilů pro obě trysky můžeme vyvodit závěr, že rychlost částic obsažených ve spreji závisí na tlaku vzduchu. Přesněji tak, že s rostoucím tlakem vzduchu roste i rychlost částic. V závěru práce je samotné porovnání atomizérů a možné návrhy pro vylepšení.

Seznam použité literatury

- [1]Schick, R. J. *An Engineer's Practical Guide to Drop Size*;
- [2]Beinstein, Z. *Nestabilita spreje u trysek typu effervescent*;Brno, 2009.
- [3]*Dantec Dynamics, FlowMap Particle Sizer*; Skovlunde Denmark, 2003.
- [4]Buzík, J. *Mechanismy atomizace kapalných paliv*;Brno, 2011.
- [5]Greco company, *atomizacion*;Minneapolis, 1995.
- [6]Suchánek, P. *Zkoušky rozprašovacích hlav kapalných paliv*;Brno, 2010.

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulka charakteristik zakoupené trysky od výrobce

Seznam zkratek, cizích slov a szmbolů

Externí	vnější
Interní	vnitřní
IPI	Interforometric particle imaging
PDPA	Phase Doppler Particle Analyzer
Ensemble	měření souboru částic
Single particle counters	samostatné měření částice
CCD	Charge-coupled device
Px	pixel
Main stream	hlavní proud

Symbol	Jednotka	Význam
D/d_p	[m]	průměr kapky
k	-	geometrický součinitel
d_a	[m]	průměr optiky
N	-	počet kapek
N_{fr}	-	počet interferenčních proužků
M	-	poměrný index lomu
D_a	[m]	průměr otvoru
λ	[m]	vlnová délka
ϕ	[°]	úhel pohledu
Z	[m]	vzdálenost k poli laseru

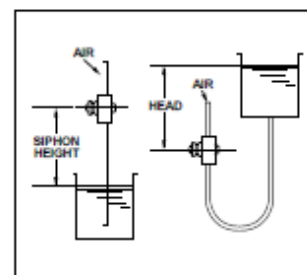
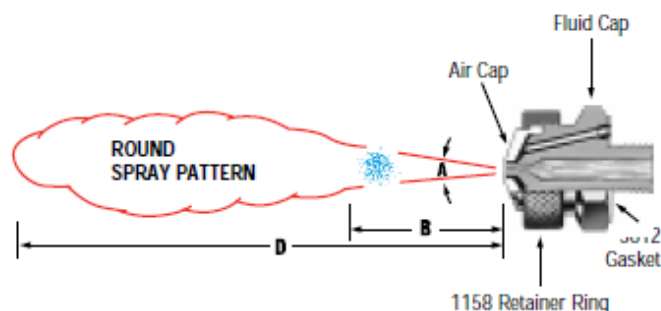
Příloha 1:

Air Atomizing SIPHON/GRAVITY-FED SPRAY SET-UPS

DESIGN FEATURES

For the Round and Flat Sprays, angle "A" is maintained throughout distance "B". Beyond "B", the spray becomes turbulent and will project out to distance "D".

When using a Siphon or Gravity-Fed Liquid System, the liquid is supplied by either a liquid siphon or gravity feed. These Set-ups are designed to draw liquid through the feed line into the air flow where it is atomized.



ROUND SPRAY AND FLAT SPRAY AIR CAPS

Air Caps used in these Spray Set-ups produce round spray and flat spray patterns.

Note: The No. 1158 Retainer Ring and 3612 Gasket must be ordered separately from the Spray Set-up, but are included in the standard nozzle assembly. **SEE PAGE D3 FOR ORDERING INFORMATION.**

ROUND SPRAY

Spray Set-up No.	Spray Set-up Consists of Fluid and Air Cap Combination	ATOMIZING AIR		LIQUID CAPACITY l/h									SPRAY DIMENSIONS At 20 cm Siphon Height			
		Air Press. bar	Air Capacity l/min	Gravity Head			Siphon Height					Air bar	Spray Angle A degrees	B cm	D m	
				45 cm	30 cm	15 cm	10 cm	20 cm	30 cm	60 cm	90 cm					
SU1A	Fluid Cap 1650 + Air Cap 64	0.7	11.3	1.5	1.3	1.1	0.87	0.68	0.53			0.7	18°	28	1.8	
		1.5	17.0	1.8	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1	0.62		1.5	18°	28	1.9	
		3.0	28	2.1	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.1	0.76	3.0	18°	30	2.3	
		4.0	36	2.2	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2	0.87	4.0	18°	36	2.6	
SU1	Fluid Cap 2050 + Air Cap 64	0.7	13.3	2.4	2.1	1.7	1.5	1.2	0.79			0.7	18°	30	2.1	
		1.5	20	2.8	2.6	2.4	2.1	1.9	1.6	0.91		1.5	18°	33	2.3	
		3.0	32	3.4	3.1	2.9	2.8	2.6	2.4	1.7	1.1	3.0	18°	38	2.6	
		4.0	41	3.7	3.4	3.3	3.1	2.9	2.7	2.1	1.5	4.0	19°	43	3.0	
SU2A	Fluid Cap 2050 + Air Cap 70	0.7	23	2.5	2.3	2.0	1.6	1.4	1.1			0.7	18°	30	2.4	
		1.5	36	2.9	2.8	2.5	2.2	2.0	1.7	0.89		1.5	18°	33	2.7	
		3.0	58	3.4	3.3	3.2	2.9	2.8	2.5	1.9	1.2	3.0	19°	38	3.4	
		4.0	74	3.7	3.6	3.5	3.4	3.3	3.0	2.5	2.0	4.0	20°	43	4.0	
SU2	Fluid Cap 2850 + Air Cap 70	0.7	19.3	4.5	4.0	3.4	2.1	1.8	1.4			0.7	21°	38	3.0	
		1.5	31	5.3	4.9	4.4	3.5	2.9	2.7	1.8		1.5	21°	41	3.4	
		3.0	50	6.0	5.6	5.0	4.4	4.0	3.4	2.4	1.2	3.0	21°	46	4.0	
		4.0	65	5.7	5.4	5.0	4.2	3.9	3.5	2.8	1.9	4.0	22°	51	4.6	
SU4	Fluid Cap 60100 + Air Cap 120	1.5	58	22	19.9	16.3	12.3	10.5	8.3	2.8		1.5	17°	46	3.7	
		3.0	88	25	23	19.5	16.7	14.2	11.5	6.4	2.8	3.0	18°	51	4.3	
		4.0	111	26	24	21	18.4	15.7	12.9	7.9	4.5	4.0	18°	53	4.9	
		5.6	147	26	24	22	19.7	17.0	14.6	9.8	6.1	5.6	19°	58	5.5	
SU5	Fluid Cap 100150 + Air Cap 180	2.0	144				27	22	16.8			2.0	20°	51	6.7	
		3.0	190				30	26	21			3.0	20°	53	7.0	
		4.0	240		43	40	31	28	23	11.0		4.0	21°	58	7.6	
		5.6	315	44	42	39	31	28	24	16.7	8.3	5.6	22°	63	8.2	