



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**VIZUALIZACE PROUDĚNÍ VLÁKEN Z IZOLAČNÍ
MINERÁLNÍ VATY**

VIZUALIZATION OF FLOW OF FIBERS FROM INSULATION MINERAL WOOL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Kedajová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Lízal, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Studentka: **Kristýna Kedajová**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. František Lízal, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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:

Vizualizace proudění vláken z izolační minerální vaty

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Izolační vata ze skleněných a minerálních vláken nahradila dříve používaný azbest. Otázkou však zůstává, zda tato vlákna jsou bezpečná pro lidské zdraví. K lepšímu porozumění mechanice proudění vláken je nutné provést statistické vyhodnocení chování vlákna při proudění válcovými kanály, které připomínají dýchací cesty. Student/ka provede vizualizaci a vyhodnotí úhly natočení vláken při proudění vláken v kanále.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši dostupné literatury v oblasti transportu a usazování vláken v lidských dýchacích cestách.

Sestavit experimentální trať a provést vizualizaci proudění vláken v trubici.

Statisticky vyhodnotit úhly natočení vláken při proudění.

Seznam doporučené literatury:

HINDS, W. C.: Aerosol Technology: Properties, Behavior, And Measurement Of Airborne Particles, Wiley-Interscience, 1999, 504 p.

BĚLKA, M. In vitro výzkum vlivu vlastností částic a průtoku vzduchu na regionální depozici v dýchacích cestách člověka. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 121 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.

PAVELEK, M., ŠTĚTINA, J.: Experimentální metody v technice prostředí. Skripta VUT, Brno, 2007.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Jedním z nejpoužívanějších izolačních materiálů dnešní doby je minerální vata. Podobně jako tomu bylo u dříve používaného azbestu ani u minerální skelné vaty nejsou zcela známé zdravotní dopady při vdechování jejich částic. Cílem bakalářské práce je shrnout teoretické poznatky týkající se transportu aerosolů a jejich depozice v dýchacích cestách člověka a získat a statisticky zhodnotit experimentální data z vizualizace proudění vláken minerální vaty v trubici připomínající dýchací cesty člověka. Tato data mohou napomoci lepšímu porozumění vztahu mezi působením částic skelných vláken a možným dopadem na lidské zdraví.

Klíčová slova

Proudění vláken, minerální vata, aerosoly, vizualizace, usazování

Abstract

One of the most used insulation materials of our time is mineral wool. As with formerly used asbestos, not all the health impacts of mineral wool fibers inhalation are known. The aim of this thesis is to gather findings relating to the transport of aerosols, their deposition in human airways and to obtain and statistically evaluate experimental data from the visualization of fibres in the glass tube resembling human airways. This data can improve understanding of the relation between glass fibres action and possible health hazard.

Key words

Fiber flow, mineral wool, aerosols, visualization, deposition

Bibliografická citace

KEDAJOVÁ, Kristýna. *Vizualizace proudění vláken z izolační minerální vaty* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117140>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. 51 s. Vedoucí práce František Lízal.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vizualizace proudění vláken z izolační minerální vaty vypracovala samostatně pod vedením Ing. Františka Lízala, Ph.D. s použitím citované literatury a zdrojů.

Datum

Jméno a příjmení

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Ing. Františku Lízalovi, Ph. D. za jeho čas a poskytnuté materiály. Ing. Milanu Malému děkuji za pomoc a poskytnuté informace o rychlokameře. Velké poděkování patří Ing. Matouši Cabalkovi za jeho ochotu, čas, rady a pomoc při analýze vláken. Poděkování za jejich podporu patří také mé rodině a mému příteli. Samotné uskutečnění experimentu by nebylo možné bez měřící trati, která byla pořízena z prostředků projektu Grantové agentury ČR GA18-25618S. Tímto děkuji za umožnění uskutečnění experimentální části mé práce.

Obsah

Abstrakt	5
Obsah	9
Úvod	11
1 Základní teorie a principy	12
1.1 Aerosoly	12
1.1.1 Druhy aerosolů	12
1.1.2 Velikost a tvar částic	13
1.1.3 Proudění aerosolů	13
1.1.4 Vlákná	14
1.2 Lidská dýchací soustava	15
1.2.1 Zdravotní rizika inhalace vláken skelné minerální vaty	17
1.3 Mechanismy usazování	18
2 Stav poznání v oblasti výzkumu usazování vláken v plicích	20
2.1 In vitro	20
2.2 Mikroskopie	21
2.2.1 Optická mikroskopie	21
2.2.2 Elektronová mikroskopie	22
2.3 Experimentální metody	23
2.3.1 PIV	23
2.3.2 LDV	24
2.3.3 Dielektroforetická klasifikace vláken	25
3 Experimentální část	27
3.1 Použité přístroje	27
3.2 Popis experimentu	32
3.2.1 Snímání v rovné skleněné trubici	32
3.2.2 Snímání v bifurkaci	33
3.3 Použitý software	35
3.4 Analýza získaných dat	36
3.5 Výsledky	36
3.5.1 Rovná trubice, průtok 2 l/min	37
3.5.2 Rovná trubice, průtok 6 l/min	38
3.5.3 Rovná trubice, průtok 12 l/min	39
3.5.4 Rovná trubice, průtok 24 l/min	40
3.5.5 Rovná trubice, průtok 36 l/min	41
3.5.6 Rovná trubice, průtok 48 l/min	42
Diskuze	43
Závěr	44
Seznam použitých zdrojů	45
Seznam použitých symbolů a zkratek	49

Seznam obrázků	50
Seznam tabulek	51

Úvod

Skelná vlákna lze bez nadsázky považovat za nástupce dříve používaného azbestu. Pro jejich stálost a izolační vlastnosti jsou hojně využívaným izolačním materiálem. Faktem zůstává, že mimo dobrých izolačních vlastností sdílejí skelná vlákna s azbestem další společné znaky, a to především skutečnost, že tvoří dlouhá tenká vlákna. Jemný aerosol těchto azbestových vláken se ukázal být fatálně škodlivým pro dýchací soustavu člověka. První studie zabývající se škodlivostí azbestu byly zveřejněny již na přelomu 19. a 20. století, přesto se od jeho používání začalo upouštět pomalu a mnohdy až s legislativním omezením [1]. Na území ČR byl azbest zařazen mezi prokázané karcinogeny pro člověka až v roce 1984 [2]. Lze si jen obtížně představit, kolik případů poškození zdraví mohl azbest při tak dlouhém a rozšířeném používání způsobit. Bohužel tak, jak tomu kdysi bylo u azbestu, není ani u minerální vaty působení prachu skelných vláken na lidské zdraví důkladně prověřeno. Cílem této práce je získat a zhodnotit experimentální data o chování skelných vláken v modelu odpovídajícím dýchacím cestám člověka. Významem těchto dat je, že by mohla posloužit pro další studium proudění skelných vláken, pomoci odhalit možnou míru zdravotních rizik a tím zvýšit kontrolu bezpečnosti pracovního prostředí při manipulaci se skelnými vlákny. Dalším přínosem může být také využití naměřených dat jako validačních dat pro provádění počítačových simulací obdobných virtuálních experimentů.

1 Základní teorie a principy

1.1 Aerosoly

Pojem aerosol označuje látku, kterou můžeme popsat jako směs kapalných nebo pevných částic s plynem, v našem případě výlučně se vzduchem [3]. Tyto látky vznikají přirozeným způsobem i jako hlavní a vedlejší produkty lidské činnosti. Běžně se s nimi setkáváme ve všech jejich formách v každodenním životě. Mohou se objevovat v podobě kouře, mlhy, dýmu, prachu, smogu, spreje či bioaerosolu a jiných. Mnoho z těchto aerosolů je schopno navázat pro člověka toxické či karcinogenní látky, jiné aerosoly mohou lidskému zdraví být prospěšné a mít terapeutické účinky. Aerosoly můžeme rozdělit podle dvou kritérií – jejich druhu a podle velikosti a tvaru jejich částic, oba tyto faktory hrají roli ve vlivu na lidské zdraví. Druh může rozhodnout o nebezpečnosti nebo prospěšnosti na základě chemického složení, velikost částic a jejich tvar ovlivňuje distribuci a depozici v dýchací soustavě, což může indikovat míru rizik.

1.1.1 Druhy aerosolů

Pro lepší pochopení struktury aerosolů a jejich chemického složení je třeba si definovat základní formy aerosolů, které se běžně vyskytují. Základní rozdělení můžeme provést podle složení aerosolu. Může se jednat o směs kapaliny a plynu nebo pevných částic a plynu. V tabulce níže můžeme vidět jednotlivé kombinace, které tvoří různá skupenství média a různá skupenství rozptýlených částic.[3]

Tab. 1 Typy částicových suspenzí [3]

Suspendační médium	Typ suspendovaných částic		
	Plynné	Kapalné	Pevné
Plynné	-	Mlha, opar, sprej	Dým, prach
Kapalné	Pěna	Emulze	Koloid, suspenze, kal
Pevné	Pórovitá látka	Gel	Příměs

Definice některých aerosolů: [4]

- **Sprej** je možno popsat jako aerosol obsahující kapalné částice, které byly získány mechanickým rozstříknutím kapaliny.
- **Kouř** je viditelný aerosol, vyprodukovaný neúplným spalováním, obsažené částice mají pevné nebo kapalné skupenství.
- **Mlha** je aerosol obsahující kapalné částice vznikající kondenzací rozstříkované kapaliny.
- **Dým** je aerosol obsahující pevné částice vytvořené kondenzací par nebo plyných produktů spalování.
- **Smog** je aerosol obsahující pevné nebo kapalné částice, vzniká fotochemickou reakcí.
- **Bioaerosol** je aerosol obsahující suspenzi biologického původu (například viry, bakterie, spóry).
- **Prach** je aerosol s pevnými částicemi vytvořený rozpadem původního materiálu.

1.1.2 Velikost a tvar částic

Ideální částici si můžeme představit jako kulatou, její velikost lze snadno definovat průměrem. Bohužel tvarů částic je mnoho a ne vždy se jedná o tvary takto ideální a jednoduché. Proto byl zaveden tzv. ekvivalentní průměr částice, který představuje průměr koule se stejnými fyzikálními vlastnostmi jako by měla daná částice složitěji definovatelného tvaru [4]. V případě částic specifického tvaru, jako jsou dlouhá vlákna, se částice uvažují jako částice nekulového zjednodušeného tvaru s určitým směrem orientace.

Velikost částic aerosolu ovlivňuje do jisté míry všechny jeho vlastnosti. Velikost částic aerosolu nemusí být jednotná, potom mluvíme o polydisperzním aerosolu, naopak pokud je velikost částic stejná, mluvíme o monodisperzním aerosolu. Většina vyskytujících se aerosolů má polydisperzní charakter, částice těchto aerosolů mohou mít rozptýl velikostí lišící se až o dva nebo více řádů [4].

Aerosol s výskytem největších částic můžeme popsat jako aerosol s hrubými částicemi, jejich velikost se pohybuje mezi 1 až 100 μm . Středním stupněm velikosti částic jsou aerosoly s částicemi jemnými, jejichž velikost se pohybuje mezi 0,1 do 1 μm . Malé částice potom najdeme u aerosolů s ultrajemnými částicemi, kde se velikost pohybuje pouze mezi 0,001 až 0,1 μm [4].

1.1.3 Proudění aerosolů

K pochopení transportu aerosolu je třeba popsat, jakým způsobem se jeho částice pohybují v prostoru. Aerosol se skládá z částic a plynu, ve kterém jsou částice rozptýlené. Na mikroskopické úrovni každá částice svými fyzikálními vlastnostmi ovlivňuje proudící plyn okolo. Na makroskopické úrovni právě charakteristiky proudění plynu ovlivňují, jak je částice přemísťována z místa na místo [5]. Pojmy popisující proudění plynného média i chování částic jsou základem k porozumění přenosu aerosolu.

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (1)$$

Reynoldsovo číslo (1) je bezrozměrné číslo, kde U představuje rychlost plynu reprezentující celý systém, ν zastupuje kinematickou viskozitu a d je charakteristický rozměr [5]. Pro studium aerosolů je nutné odlišit dvě Reynoldsova čísla, Reynoldsovo číslo pro proudění Re a Reynoldsovo číslo částice Re_p . Pokud je výpočet zaměřen na proudění například v kulaté trubce, potom je charakteristickým rozměrem průměr trubky a je získáno Reynoldsovo číslo pro proudění v trubce Re_f . Pokud je výpočet zaměřen na částici, potom je charakteristickým rozměrem d průměr částice a rychlostí U je relativní rychlost částice, potom je získáno Reynoldsovo číslo částice Re_p . Reynoldsovo číslo je často definováno jako poměr setrvačných a viskózních sil pro proudění tekutiny a je užíváno k posuzování laminárního nebo turbulentního proudění tekutin.

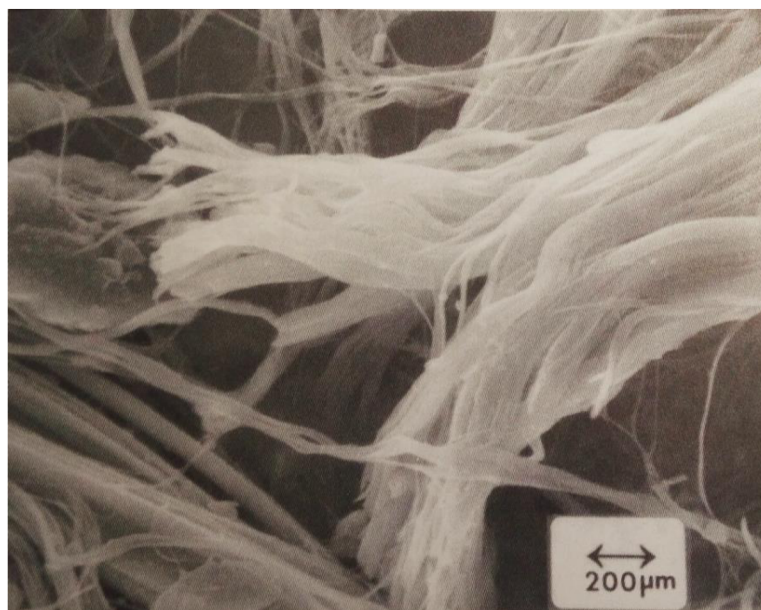
$$Stk = \frac{S}{d} \quad (2)$$

Stokesovo číslo (2) je definováno jako poměr brzdné dráhy částice S k charakteristickému rozměru d [5]. Charakteristický rozměr je uvažován na základě konkrétní aplikace. Například při filtraci vláken je jako charakteristický rozměr uvažován průměr vlákna, v jiném případě může představovat charakteristický rozměr třeba průměr trysky impaktoru. Stokesovo číslo je používáno jako indikátor podobnosti chování částic při obtékání překážek [6].

1.1.4 Vlákná

Vláknem rozumíme částici podlouhlého tvaru, která má jeden rozměr výrazně větší než ten druhý. Vzhledem ke svému specifickému tvaru mohou mít vlákna odlišnou aerodynamiku a jiné další vlastnosti [7].

Mnoho materiálů má z hlediska aerosolů potenciál uvolňovat vlákna. Velmi používaným materiálem byl azbest a to především pro svoje dobře využitelné vlastnosti jako je chemická odolnost, pružnost v tahu a výborné teplotní a akustické izolační vlastnosti. Snímek vláknité struktury azbestu je na obr.1. Bohužel v případě azbestu byla podceněna míra zdravotních rizik, jaká vdechování jeho vláken přináší, pojí se s ním onemocnění jako je azbestóza a rakovina plic. Právě zdravotní hrozba, kterou představují vlákna azbestu vstupující do respiračního systému, vedla k vývoji a zpřesnění technologií detekce a vyčíslení vzdušných koncentrací vláken, které známe dnes. Mimo azbestu existují další minerální vlákna vyskytující se v přírodě. Mnoho přírodních vláken, se kterými se setkáváme, tvoří organická vlákna jako je vlna, dřevo nebo materiály na bázi celulózy. Materiály jako je sklo se taví a následně spřádají do vláken. Využívány jsou i keramické materiály, které mohou být spřádány do vláken nebo se vlákna vytvářejí chemickou nebo parní krystalizací. Například uhlíková a grafitová vlákna jsou využívána pro vysokopevnostní produkty. Některé studie, které zkoumaly působení jiných vláken než azbestových na dýchací soustavu člověka nebo zvířete, naznačují potenciální zdravotní rizika [7]. Lze tedy dojít k závěru, že i jiná vlákna než vlákna azbestu mohou způsobovat onemocnění dýchací soustavy.



Obr. 1 Snímek vláknité struktury azbestu pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem [7]

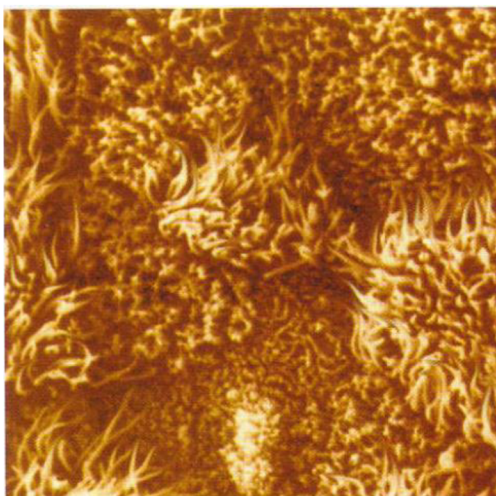
Chování vláken rozptýlených v plynu závisí na jejich velikosti a tvaru. Nejčastěji uvažovaný tvar vlákna je válcový nebo kulovitý protáhlý. Zpravidla je vlákno definováno svou délkou a průměrem, i když se reálný tvar částic od idealizovaného často liší. Vlákná mohou být zakřivená po délce, jejich průřez nemusí být konstantní, mohou se zužovat a rozšiřovat a konce vlákna často mohou být zakřivené nebo roztřepené. Například skelná vlákna se většinou ideálnímu válcovému tvaru blíží [7]. Průměr a délka přirozených vláken je jenom vzácně monodisperzní, u délky je to ještě nepravděpodobnější, většinou se vlákna stejného materiálu neshodují v průměru ani délce. Míra nesourodosti délky a průměru vláken je jedním z faktorů, který poměrně znesnadňuje měření velikostí aerosolu a kalibraci nástrojů.

Natočení vlákna při pohybu v plynu je většinou vertikální, kolmé k proudění plynu, nebo horizontální, vodorovné s prouděním plynu. Stabilita natočení je ovlivněna Reynoldsovým číslem, vlákno s nižším Reynoldsovým číslem má větší stabilitu a menší tendenci měnit svou orientaci vlivem posunutí. Větší vlákna s vyšším Reynoldsovým číslem mají větší sklon se natáčet do vertikální polohy, naproti tomu malé částice, které jsou ovlivněny difuzními silami, mohou mít natočení poměrně náhodné [7]. Vlákná, která jsou vodivá se natáčejí paralelně s elektrickým polem. Vlákná reagující na magnetické pole se natáčejí paralelně k jeho siločarám.

1.2 Lidská dýchací soustava

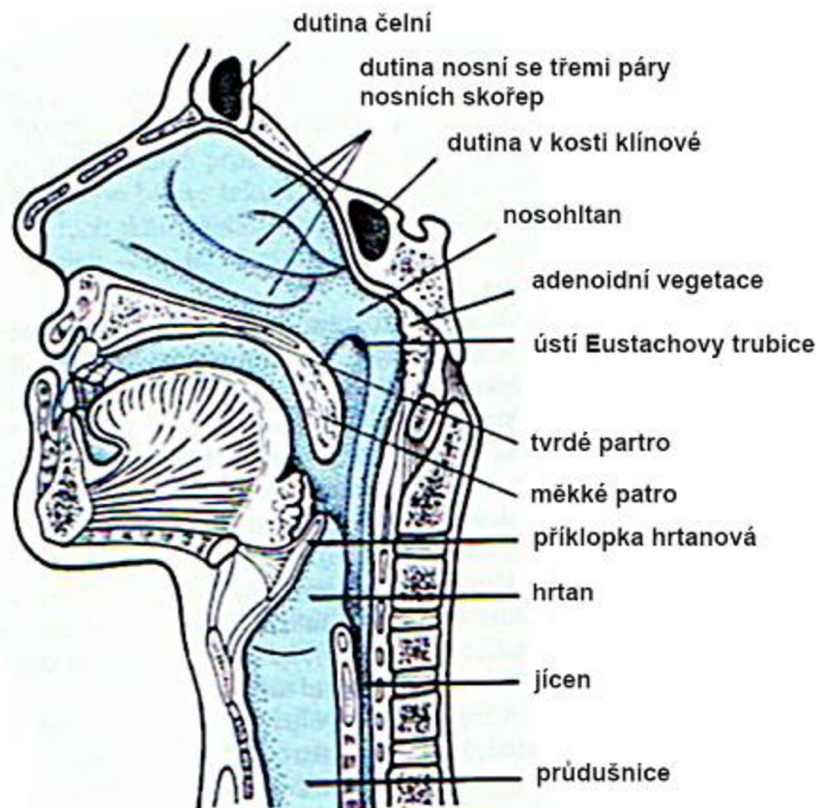
Hlavním účelem dýchací soustavy je zajistit okysličení krve a odvod oxidu uhličitého z těla. S každým nádechem vdechneme asi 0,5 l vzduchu v závislosti na dispozicích a tělesné aktivitě jedince [4]. Snadno si lze představit, že objem, který projde dýchacími cestami za pouhý den, není zanedbatelný. S přijímaným vzduchem se do dýchacích cest dostává mnoho nečistot, na což jsou dýchací cesty do určité míry uzpůsobeny. Další jejich důležitá funkce je tedy filtrační.

Dýchací soustavu můžeme rozdělit na horní a dolní cesty dýchací. Horní dýchací cesty můžeme dále rozdělit na nosní dutinu, vedlejší dutiny nosní a nosohltan, jednotlivé části a jejich uspořádání je vyobrazeno na obr.3. V horní části nosní dutiny se nachází čichový epitel, který umožňuje rozpoznávání pachů a vůní čichem [8]. Jeho snímek najdeme na obr.2.



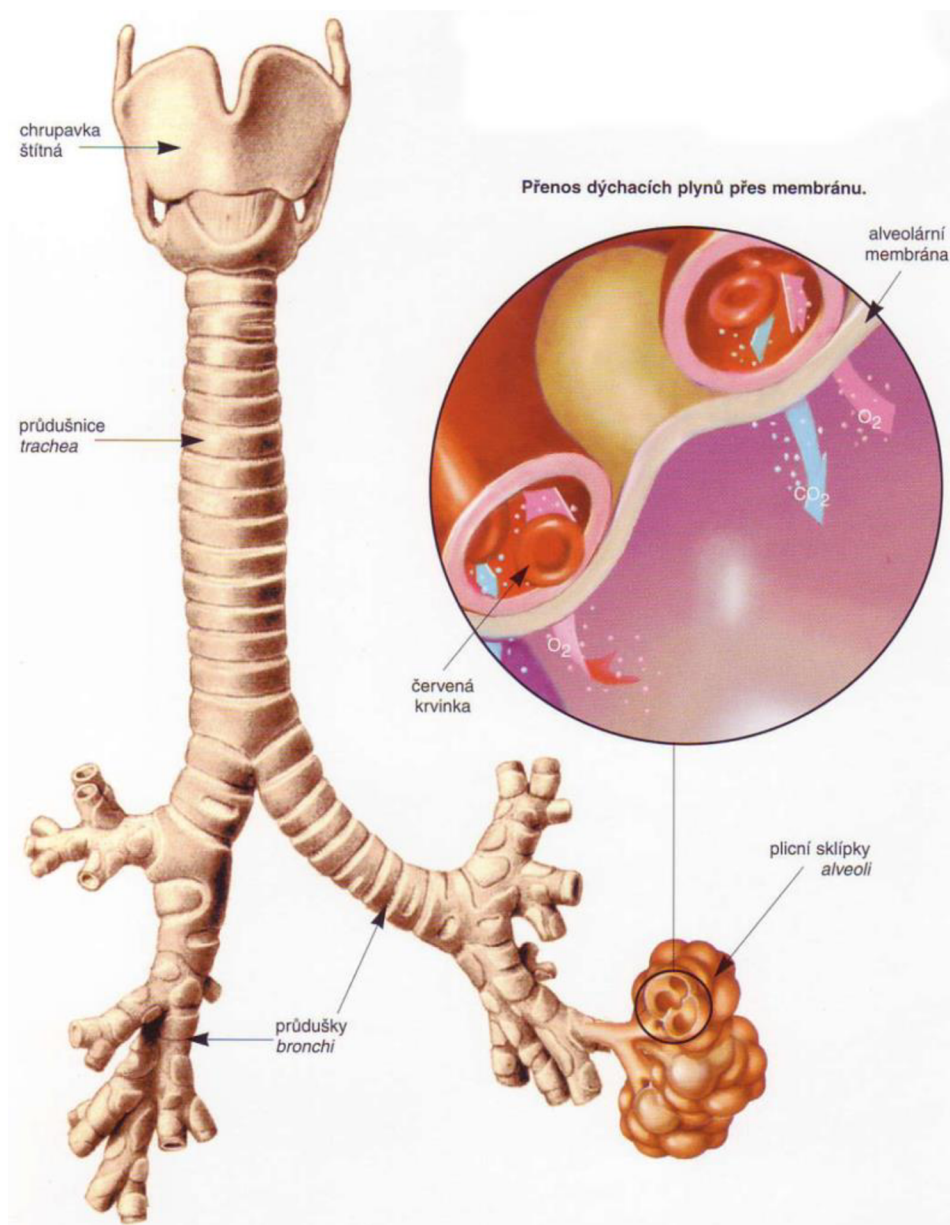
Obr. 2 Řasinkový epitel nosní sliznice [9]

Dolní cesty dýchací tvoří hrtan a průdušnice, která se rozvětňuje na průdušky. Stavbu a větvení průdušnice můžeme vidět na obr.4. Sliznice je pokryta řasinkovým epitelem. V hrtanu se nacházejí hlasivky, sloužící k tvorbě hlasu. Průdušky vstupují do plic, kde se dále dělí a vytvářejí tzv. bronchiální strom. Když se průměr průdušek dělením zmenší na menší než 1 mm, nazýváme je již průdušinky. Průdušinky se dále dělí až dosáhnou své konečné velikosti o průměru asi 0,5 mm, označují se jako průdušinky terminální [10]. Tyto se ještě dále dělí na 2-3 respirační průdušinky s velikostí průměru 0,3mm. Respirační průdušinky ústí ve sklípkové chodbičky a ty v plicní sklípky.



Obr. 3 Horní cesty dýchací [11]

Počet plicních sklípků jedince může přesahovat půl miliardy a jejich celková plocha podílející se na výměně plynů může být asi 80 m^2 [9]. Mají členitý tvar a průměr asi mezi 0,2-0,3 mm. Výstelku plicních sklípků tvoří tři druhy buněk a to pneumocyty I. a II. druhu a makrofágy. Makrofágy jsou zajímavé v souvislosti s depozicí aerosolů, protože mají schopnost zachytávat částice nečistot a spolu s hlenem je vylučovat. Tato výstelka plicních sklípků je nejčastěji popisována jako respirační epitel.



Obr. 4 Přenos dýchacích plynů přes membránu [9]

Vzduch je vdechován nosní dutinou nebo ústní dutinou a proudí celým popsaným systémem až dosáhne plicních sklípků (obr.4), kde dochází s pomocí především pneumocytů I. a II. druhu k výměně O₂ a CO₂ mezi krví a vzduchem [8].

1.2.1 Zdravotní rizika inhalace vláken skelné minerální vaty

Hlavní vlastnosti určující zda jsou vlákna schopna dosáhnout, zůstat a akumulovat se v dýchací soustavě jsou rozměr vlákna, dávka a životnost vlákna. Vlákna daného rozměru, v určitém množství, s danou životností mohou způsobit patologické změny tkáně. Na inhalovatelnost vláken můžeme pohlížet z hlediska různých částí dýchací soustavy. Inhalovatelná vlákna schopná dosáhnout plicní epitelové tkáně jsou popsána jako vlákna s průměrem menším 3 μm a délkou větší 5 μm [12]. Vlákna s větším průměrem mohou být inhalována, ale většinou se zastaví v horních cestách dýchacích. Dávku můžeme v souvislosti s plicní tkání popsat jako množství vláken, která plicní tkáně dosáhnou a mohou zde působit

patologicky, pokud jejich koncentrace překoná schopnosti obranných mechanismů. Životnost nebo bioperzistence popisuje dobu, po kterou může být vlákno usazeno v plicní tkáni, než je rozloženo. Životnost vlákna či obecně částice souvisí s chemickým složením výchozího materiálu.

Experimentální studie prováděné na hlodavcích při intraperitoneálním¹ podání vysokých koncentrací vláken minerální vaty prokázaly vývoj mezoteliomu². Ovšem několik studií prováděných na hlodavcích při podávání inhalací neprokázalo tvorbu novotvarů ani vznik plicní fibrózy³ [12]. Epidemiologické studie u pracovníků vystavených skelné minerální vatě neprokázaly souvislost mezi expozicí vláknům a rakovinou plic nebo mezoteliomem. U pracovníků vystavených skelným vláknům byly zaznamenány izolované případy plicní fibrózy. Výjimku tvoří biopersistentní vlákna typu E a 475, která při intrapleurálním⁴ i inhalačním podání vedla ke vzniku mezoteliomu a v případě typu E rakoviny plic. Vlákna typu E a 475 jsou považována za možné karcinogeny spadající do skupiny 2B dle mezinárodní agentury pro výzkum rakoviny IARC (INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER) [13]. Vlákna minerální skelné vaty jsou považovány za látky s neklasifikovatelnou karcinogenitou u lidí dle IARC.

1.3 Mechanismy usazování

Velikost, tvar částice i jiné vlastnosti jako třeba rychlost proudění ovlivňují způsob, jakým se částice budou usazovat. Je možné popsat několik mechanismů, které řeší specifický způsob depozice [4]. Způsoby depozice jsou znázorněny na obr.5.

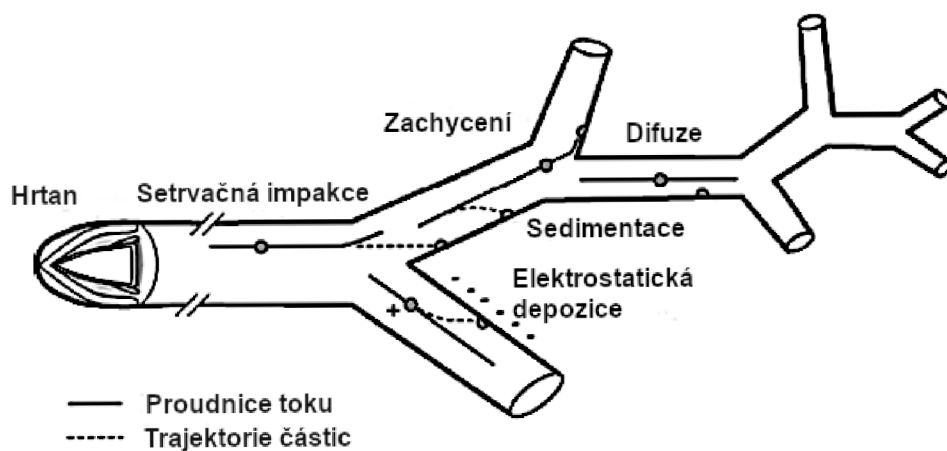
Mezi nejdůležitější mechanismy patří vliv setrvačné impakce, která se posuzuje na základě Stokesova čísla. Pokud je přesažena kritická hodnota Stokesova čísla, částice se odchýlí ze své trasy a usadí se na stěně dýchacích cest. Čím vyšší Stokesovo číslo je, tím snáze se částice odchýlí. Předpokládaná velikost částice ovlivňované tímto mechanismem je větší než $0,5\mu\text{m}$, nejčastějším místem depozice je nosní dutina nebo jiná část horních cest dýchacích. Další podstatný mechanismus usazování je gravitační sedimentace založená na působení gravitace, je uvažována mikronová velikost částic a předpokládáno usazování v oblasti plicních sklípků a sklípkových chodbiček. Neopomenutelným mechanismem je Brownova difuze, kde je hlavním principem interakce proudění plynu a Brownova pohybu částic, uvažuje se pro velikost částic menších $0,5\mu\text{m}$ s předpokladem usazování opět v oblasti plicních sklípků a chodbiček. Další mechanismy jako je elektrostatická depozice nebo zachycení mají význam pro specifické tvary částic [4].

¹ Intraperitoneální podání je podání do břišní dutiny. [30]

² Mezoteliom je rakovina výstelky plic a hrudníku nebo břišní dutiny. Je známo, že vývoj tohoto onemocnění může trvat desetiletí. [2]

³ Plicní fibróza je onemocnění, při kterém se plicní epitel mění na pojivovou tkáň, zjizvená plicní tkáň se nemůže rozpínat a dochází k omezení dýchání. [1]

⁴ Intrapleurální podání je podání do pohrudniční dutiny. [30]



Obr. 5 Depozice částic – upraveno z článku [14]

2 Stav poznání v oblasti výzkumu usazování vláken v plicích

Ke studiu mechanismů usazování částic můžeme zvolit jeden ze tří způsobů přístupu. První způsob se nazývá *in vivo* a jak již název napovídá (*vivo* = žít) využívá k měřením živého člověka jako svůj subjekt. Další způsob se nazývá *in vitro* (*vitro* = sklo) a využívá upravené modely, které se snaží napodobovat části lidské dýchací soustavy. Posledním způsobem přístupu je *in silico* (*silico* = křemík) a jde o metodu na rozdíl od předchozích prováděnou virtuálně a využívající matematických modelů nebo numerických modelů k přiblížení proudění a usazování částic. Vzhledem k obsahu této bakalářské práce je rozvedena pouze metoda *In vitro* [4].

Vizualizace částic aerosolů je možná díky optické a elektronové mikroskopii, vzhledem k jejich často velmi malým rozměrům. Použití optických mikroskopů lze zařadit mezi dostupnější z možností zobrazení, lze s nimi studovat částice až do $0,3\mu\text{m}$. Pokud jsou studované částice menší, potom jejich zobrazení lze dosáhnout pomocí elektronových mikroskopů. Elektronové mikroskopy mají rozlišení umožňující studovat částice o velikosti až $0,001\mu\text{m}$ [3]. Základní typy optických i elektronových mikroskopů budou uvedeny v podkapitole Mikroskopie. Přestože mikroskopie není nástrojem, který by sám o sobě umožňoval studium částic za pohybu, lze s její pomocí určit koncentraci částic v prostředí na základě získaných vzorků. Toho bylo využito při studiu azbestu.

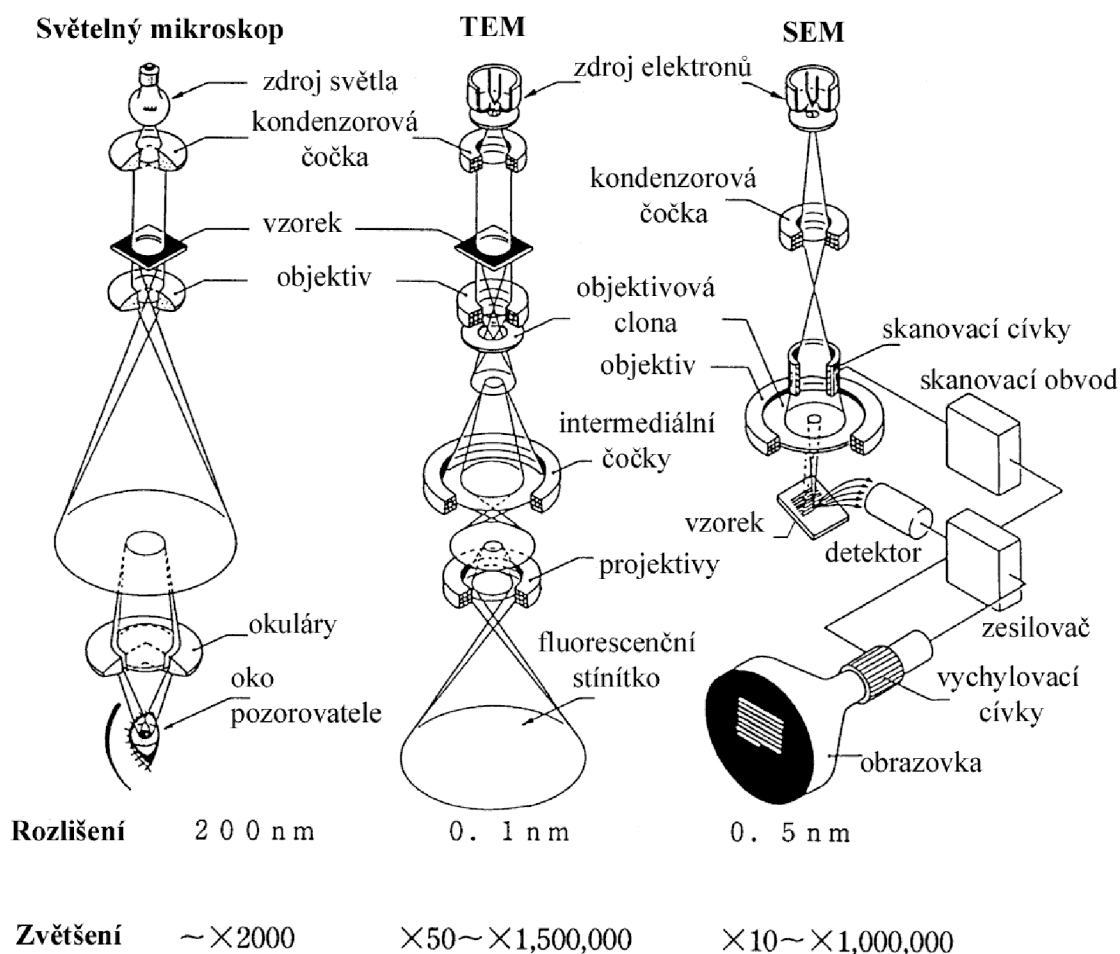
Experimentální metody snímající částice za pohybu jsou uvedeny tři. První metodou je Particle Image Velocimetry, což je metoda k měření rychlosti proudových polí. Její variace Particle Tracking velocimetry se zabývá sledováním částic aerosolů v takových koncentracích, ve kterých jsou jednotlivé částice rozeznatelné. A druhou metodou je Laser Doppler Velocimetry, což je metoda využívající Dopplerova efektu k určení rychlosti proudění na základě měření rychlosti jednotlivých částic. Poslední metodou je dielektroforetická klasifikace vláken, tato metoda je využita v experimentální části práce. Narozdíl od předchozích zmíněných metod se jedná o metodu, která není určena k měření rychlosti proudění, ale zabývá se klasifikací částic. Pro všechny metody je možné využití rychlokamery.

2.1 In vitro

Metody *in vitro* využívají modelů zhotovených nejčastěji ze skla nebo silikonu, jejichž geometrie je buď reálná nebo idealizovaná. Modely s reálnou geometrií jsou získávány přímo z plicní tkáně formou odlitku, zatím není možno takto komplexní model vytvořit uměle, překážku představuje jak množství morfologických dat, tak i technologie takové výroby samotná. Výhodou takových modelů je velká členitost, nevýhodou ovšem je, že právě díky této vlastnosti je často model po provedení experimentu zničen a je třeba vytvořit nový. Modely s idealizovanou geometrií jsou vytvářeny na základě dostupných morfologických dat ze skenů, zubních negativů, nebo přímo získány z tkáně dýchací soustavy [4]. Výhodou modelů s idealizovanou geometrií je, že jsou opětovně použitelné, což u realistických modelů nemusí být vždy možné, lze je vyrábět produktivněji, nevýhodou je, že nejsou dokonale realistické.

2.2 Mikroskopie

Zobrazení částic aerosolů je prováděno pomocí optické mikroskopie nebo za použití elektronové mikroskopie, schéma uspořádání jednotlivých typů je na obr.6. Optické mikroskopy představují dostupnější variantu, se kterou je možné analyzovat částice v rozptýlu velikostí 0,3-20 μm a větší v závislosti na možném rozlišení daného přístroje [3]. K určování velikosti částic a jejich analýze jsou používány speciální optické mikroskopy využívající temného pole, fázového kontrastu nebo mikroskopy polarizační. Tam, kde je analýza částic limitována rozlišením, jsou potom využívány mikroskopy elektronové. Koncentrace částic v prostředí může být vyhodnocována právě pomocí mikroskopie na základě vzorků z filtrů, proto bude popsána základní metodika.



Obr. 6 Schématické znázornění jednotlivých typů mikroskopů [15]

2.2.1 Optická mikroskopie

Jednou z metod pro vyhodnocování množství koncentrace vláknitých aerosolů v prostředí je optická mikroskopie s využitím fázového kontrastu – fázová kontrastní mikroskopie. Touto metodou byl například stanoven americký standard pro koncentraci azbestu v prostředí [3]. Metoda je prováděna pomocí membránových filtrů z nitrocelulózy, umístěných v držáku na konci experimentální trati, do které je vháněn vzduch s rozptýlenými částicemi aerosolu. Filtr je schopen pojmout pouze určitou koncentraci vláken, proto musí být

filtry měněny. Vzduch je vhnán tak, aby bylo možné simulovat různé režimy dýchání. Filtr je nataven za použití horkých par acetonu na pevný průhledný film a následně zafixován v triacetinu. Samotná vlákna jsou při zvětšení 400-450x počítána pomocí fázové kontrastní mikroskopie, započítávána jsou pouze taková vlákna, která vyhovují stanovené velikosti a tvaru. Kontrastní fázová mikroskopie je založená na principu indexu lomu, který se blíží indexu lomu nosného média, díky čemuž je možné zvýšit kontrast hledaných vláken. Vyhodnocení bylo uskutečňováno manuálním sčítáním vláken, což je však zatíženo chybou lidského faktoru. Vzhledem k náročnosti manuálního sčítání byla snaha tento proces zrychlit a usnadnit pomocí automatizovaného sčítání. Automatizované sčítání se však potýká s řadou problémů jako je nízký kontrast obrazu, projevující se nejasnými okraji částic, nebo křížení jednotlivých částic, případně šum na pozadí a možnost nechtěného zahrnutí otvorů membránového filtru do analýzy. Všechny tyto defekty pořízeného snímku vedly k nutnosti kalibrace snímku a zpomalení analýzy [3]. Dnes již existují automatizované metody, které oproti manuálnímu sčítání omezují možnost lidské chyby a jsou schopny eliminovat některé defekty snímků. Práce týmu vědců z FSI VUT publikovaná v Engineering MECHANICS v roce 2013 popisuje automatizovanou analýzu obrazu na základě zpracování snímků z kamery s vysokým rozlišením pomocí vlastního softwaru [16]. Vyvinutý software je schopný kalibrovat obraz, upravit kontrast a rozlišit mezi částicemi, která odpovídá tvaru vlákna a jiným objektem, tyto částice odstranit a následně upravený obraz vyhodnotit. Limitujícím faktorem této metody je vlastní rozlišení mikroskopu, vzhledem k malým rozměrům některých částic aerosolů není možné je započítat.

2.2.2 Elektronová mikroskopie

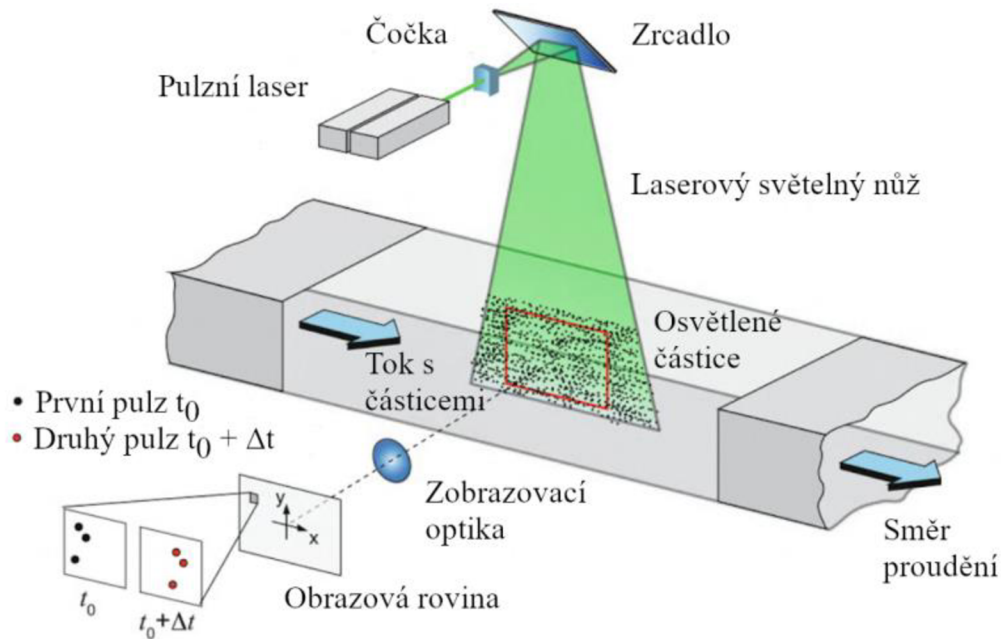
Mezi elektronové mikroskopy využívané k analýze patří skenovací elektronové mikroskopy SEM nebo transmisní elektronové mikroskopy TEM. Způsob využití elektronů v případě TEM mikroskopů se podobá využití fotonů optickými mikroskopy, svazek elektronů je usměřován pomocí elektromagnetické čočky obdobným způsobem jako je proud fotonů u optického mikroskopu usměřován přes čočku [3]. Limitujícím rozlišením TEM je velikost částice menší než 0,001 μm , pro metodu SEM je to velikost menší 0,01 μm . Omezením analýzy s využitím těchto mikroskopů je teplotní stálost a odolnost částic aerosolu. Vzhledem k efektům působení vakua a paprsku elektronů, je možné studovat pouze pevné částice. Pozorovaný obraz je vlastně projekcí elektronového obrazu na fluorescenční clonu. Částice jsou uloženy na speciálně připravené mřížky, což jsou pokovené clony s velmi tenkým filmem uhlíku překrývajícím otvory clony. Mřížky jsou usazené v držáku, takto je vzorek umístěn do mikroskopu. Vzhledem k velmi malé tloušťce filmu dochází pouze k malému utlumení elektronového paprsku. Částice vystavené elektronovému paprsku jsou zobrazeny s vysokým kontrastem. Samotné umístění částic na mřížku může být provedeno elektrostatickým odlučovačem, nebo v jsou použity replikační a přenosové procesy pro přemístění z jiného povrchu na mřížku. Velikost částic je posuzovaná na základě snímků, které byly vytvořeny zvětšením negativu elektronového obrazu v mikroskopu. Elektronová mikroskopie dále poskytuje možnost pomocí tzv. energeticky disperzní analýzy potvrdit materiálový původ vlákna [3].

2.3. Experimentální metody

Metody snímající částice aerosolu často slouží k určení rychlostí proudových polí a rychlosti a směru proudění v daném místě proudící tekutiny. Existuje mnoho jiných metod zabývajících se prouděním a množství metod vizuálních, pouze některé metody však umožní sledovat transport částice v médiu a mohou tak sloužit ke studiu orientace a úhlů natočení. Metody zde uvedené dovolují snímání konkrétní částice. Pro zhodnocení orientace je vhodná metoda dielektroforetické klasifikace vláken s využitím rychlokamery.

2.3.1 PIV

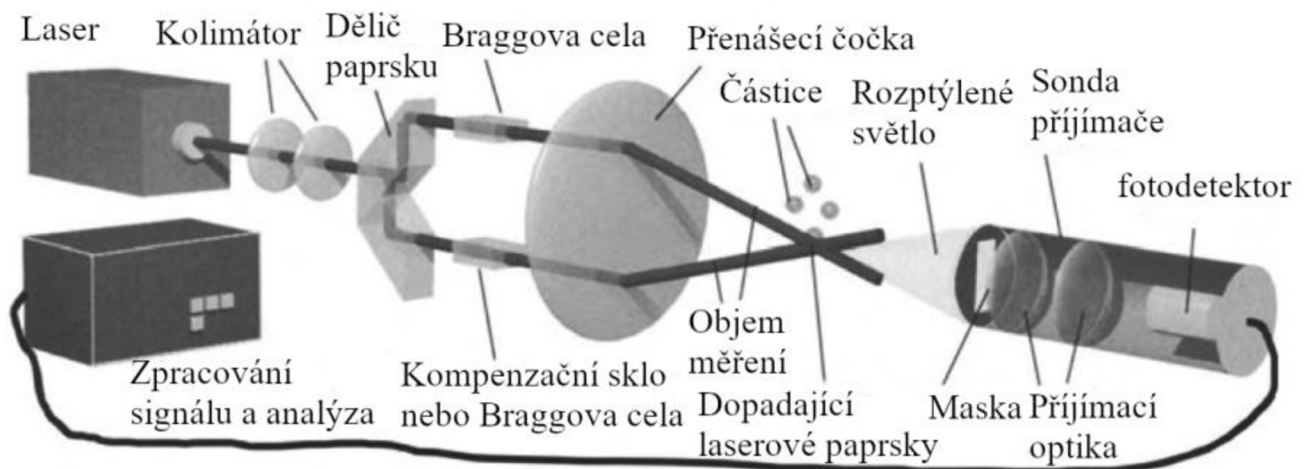
Primárním účelem metody particle image velocimetry (PIV) je získání vektorové mapy rychlostí proudového pole [17]. Částice jsou zavedeny do tekutiny a pomocí jejich snímání je softwarem vyhodnoceno a vykresleno chování látky jako celku. Moderní kamery jsou schopny vytvořit až 100 záznamů za minutu [18]. K zavádění částic do tekutiny jsou používány tzv. generátory částic, pokud není možné jednodušší provedení, jako například vmíchání částic do kapaliny. Množství částic v tekutině by mělo být dostatečné, rovnoměrné ve zkoumané části toku, ale nikoliv natolik velké, aby docházelo k častému překrývání částic. Částice mapující tok média musí být nasvětleny, aby bylo možné je vyhodnotit, k tomu se často využívá laserů, které mají monochromatické světlo o vysoké intenzitě. Pomocí dvou či více krátkých pulzů je možné získat snímky v požadovaných časových intervalech. V případě, že je množství částic na snímku malé a rozlišíme pohyb jednotlivých částic na snímcích, můžeme mluvit také o particle tracking velocimetry (PTV), je tedy možné pomocí této metody studovat chování jednotlivých částic [18]. Očekávaným výstupem ovšem je spíše zobrazení rychlosti proudění v různých místech tekutiny a jiných vlastností toku, než zhodnocení chování a parametrů konkrétní částice. Vývoj PIV začal v 80. letech 20. století, první uplatnění mimo laboratoře našla metoda ve vzdušných tunelech. Od počátků rozvoje PIV došlo k vývoji softwaru i kamer, laserů, optiky a dalšího vybavení, což posunulo možnosti využití dále. V posledních 10 letech došlo především k rozvoji vysokorychlostního měření a také objemových technik schopných zaznamenat okamžitě všechny tři složky vektorů rychlosti. Omezení metody mohou představovat lesknoucí se obtékané objekty, odražené světlo znemožní snímání obrazu, což se dá následně řešit změnou úhlu osvětlení nebo nanesením fluorescenční barvy, která je blokována pomocí interferenčních filtrů.



Obr. 7 Stručné schéma typické experimentální PIV sestavy zaznamenávající dva vektory rychlosti v proudovém poli v jedné rovině uvnitř vzdušného tunelu [18]

2.3.2 LDV

Laser Doppler velocimetry (LDV) je neinvazivní metoda měření rychlosti proudění. LDV měří rychlosti částic zavedených do tekutiny a využívá k tomu rozptylu světla a Dopplerova efektu. Schéma základního uspořádání sestavy je na obr.8. Částice jsou většinou do toku zavedeny, ale je možné využít i částice vyskytující se přirozeně. K osvětlení bývají použity lasery s nejčastěji koherentním monochromatickým světlem. Paprsek bývá dělen na dva svazky, které se kříží jak je naznačeno na obr.8. Rozptýlené světlo dopadá na částice, světlo odražené od částic je shromažďováno přijímací optikou a zaostřeno na fotodetektor, software je následně schopný na základě Dopplerova posunutí vyhodnotit rychlost částice. Metoda je vysoce přesná a hlavní využití má ve vývoji a výzkumu, časté uplatnění má v oblasti lékařství [19].



Obr. 8 Schéma dvou paprskového Dopplerovského anemometru [19]

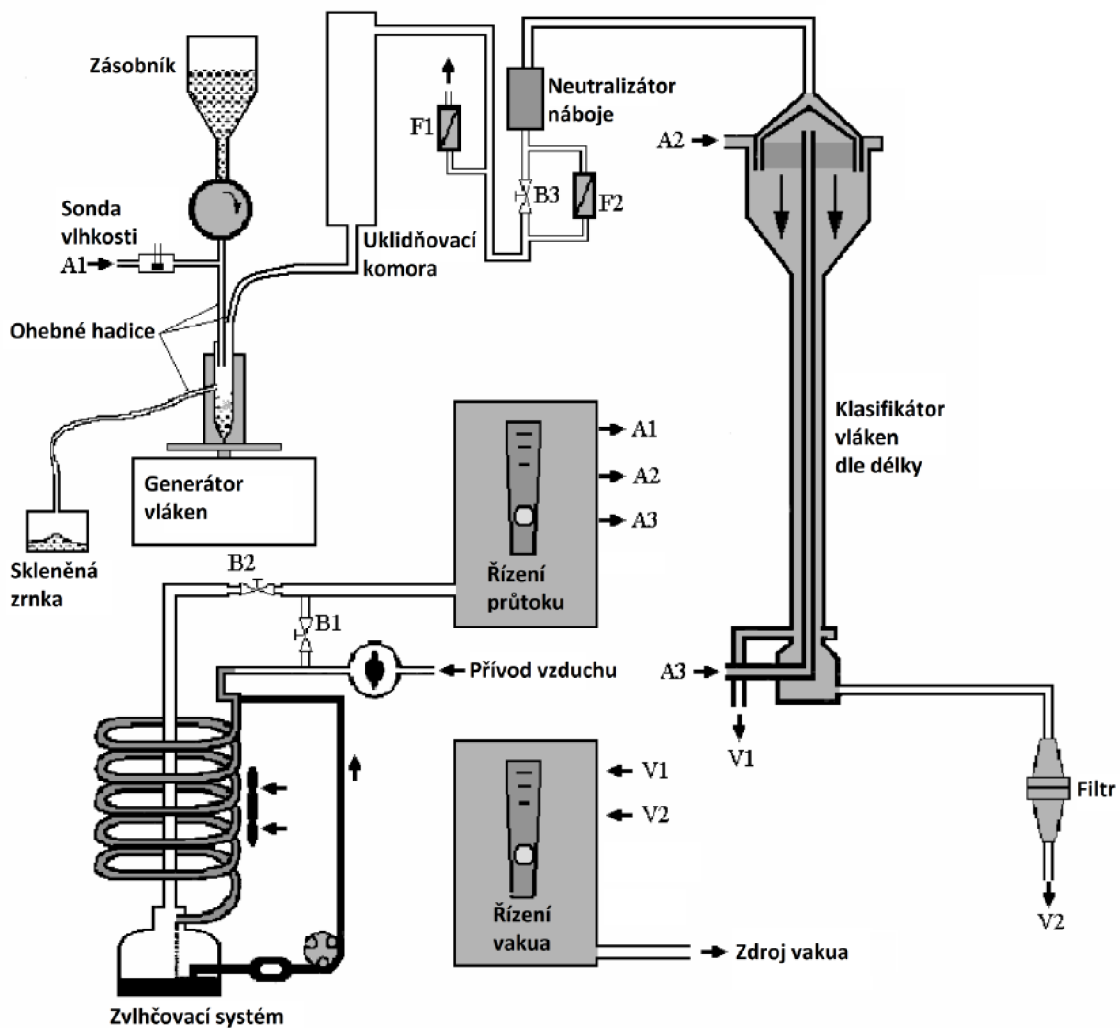
Vzhledem k zaměření metody na konkrétní částice nabízí metoda v kombinaci s využitím vysokorychlostní kamery možnost studovat orientaci částic v toku, příkladem toho je publikovaný článek v časopise *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* z roku 2006 zabývající se vlivem turbulence na orientaci vláken s využitím vysokorychlostního snímání [20]. Práce je zaměřena na problematiku papírenského průmyslu, kde orientace vláken kompozitu může ovlivňovat výsledné mechanické vlastnosti konečného produktu. Článek představuje příklad využití studia vláken s aplikací LDV k optimalizaci v oblasti průmyslu.

2.3.3 Dielektroforetická klasifikace vláken

Dielektroforetická klasifikace vláken s využitím vysokorychlostní kamery je metodou umožňující vizuální detekci vláken aerosolu a klasifikaci jejich velikosti. Základem dielektroforezy je vstup vlákna bez elektrického náboje do neuniformního elektrického pole [21]. Narozdíl od elektroforezy částice je elektricky neutrální a nenesení náboj. Dielektroforeza je efektivnějším nástrojem pro klasifikaci velikostí než elektroforeza. Elektrické pole působí na částice silami, které ovlivňují jejich pohyb. To je využito pro filtraci nebo klasifikaci. Elektrická vodivost vláken má velký význam z hlediska separace částic. Přestože některá vlákna nejsou vodivá, je možné dosáhnout dostatečné vodivosti pro klasifikaci těchto vláken. Zvýšením relativní vlhkosti na hodnotu okolo 50 % lze docílit vodivosti u některých vláken, jejichž materiál sám o sobě není vodivý.

Článek publikovaný v *Experimental Fluid Mechanics* v roce 2018 [21] popisuje aplikaci dielektroforetické klasifikace vláken včetně principů, popisu sestavy a výsledků. Metoda byla využita ke klasifikaci vláken minerální vaty. Snímání vláken bylo provedeno pomocí vysokorychlostní kamery. Prvním krokem bylo získání vláken. Vlákna byla rozlámána mechanickým tlakem, jejich průměry se pohybovaly mezi 3 až 6 μm . Shluk vláken musel být rozdělen, za tímto účelem byly přidány skleněné kuličky. K zajištění vodivosti vláken byl využit zvlhčovač s automatickou regulací řízený Arduinem. Přes podavač vláken tvořený DC motorem směs pokračovala dále do třepačky, kde jsou odděleny skleněné kuličky od vláken. Vlákna se uvolnila do zvlhčeného vzduchu. Následně procházela vlákna přes neutralizátor náboje do klasifikátoru. Sestavu můžeme vidět na obr.9.

Tato metoda tvoří teoretický základ pro provedení experimentální části.



Obr. 9 Schématické zobrazení klasifikátoru vláken využívajícího dielektroforézy [22]

3 Experimentální část

První část této kapitoly tvoří popis nejdůležitějších použitých přístrojů a vybavení. Mimo níže uvedeného, byla experimentální trať pro aerosol tvořena pomocí silikonových hadic různého průměru, kterými byly propojeny jednotlivé části. Oblast snímání byla tvořena dlouhou skleněnou trubicí a skleněnou bifurkací. Tyto dvě oblasti představovaly část dýchací soustavy člověka. Použitá vlákna jsou Supafil Loft se součinitelem tepelné vodivosti 0,045 W/m·K od firmy Knauf Insulation. Dále byl použit neutralizér náboje NEKR-10 od firmy Eckert & Ziegler Cesio, směšovač vláken a podavač vláken.

Použité přístroje a vybavení:

- Třepačka Wisd VM-10
- Vývěva Busch typu PA 0008 C 000
- Filtr Millipore Opticap XL 4 Capsule
- Teplotní, vlhkostní a tlakový datalogger Extech SD700
- Průtokoměry TSI 4000 series a 4100 series
- Kamera Photron SA-Z
- Pulzní LED dioda Lightspeed Technologies HPLS-36DD18B

V druhé části kapitoly je popsán experiment, základní uspořádání a princip fungování experimentální trati. Zde jsou obsaženy informace k jednotlivým měřením a polohám snímání. Najdeme zde podmínky laboratoře, jednotlivé režimy snímání, popis nastavení přístrojů a schématické zobrazení snímání.

V další části je shrnut použitý software a následně krátký popis prostředí pro zpracování snímků. V návaznosti na to jsou zařazeny výsledky a diskuze získaných dat.

3.1 Použité přístroje

- **Třepačka Wisd VM-10**

Jedná se o zařízení primárně používané k promíchávání vzorků ve zkumavkách a baňkách rotačně oscilačním pohybem, příkladem takového použití je kultivace média. Třepačka je schopna plynulého přechodu při změně rychlosti. Je schopna vyvinout frekvenci až 3300 otáček za minutu bez vytváření vysokého hluku nebo nežádoucích vibrací [23]. Rotačně oscilačního pohybu třepačky bylo využito pro promísení vláken přicházejících z podavače s nosným médiem – vzduchem přicházejícím z kompresoru. Konkrétní použitou třepačku můžeme vidět na obr.9 umístěnou v nosném rámu na měkké podložce tlumící šíření vibrací.



Obr. 10 Třepačka upevněná ve stojanu na molitanu tlumícím vibrace

- **Vývěva Busch typu PA 0008 C 000**

Vývěva vytváří podtlak v připojeném systému, čímž dochází k nasávání vzduchu. Pohonem vývěvy je elektromotor, podtlak je vytvářen pomocí vakuového čerpadla. Odvádění kompresního tepla a mazání je zde zajištěno cirkulací oleje. Jmenovitý sací výkon udávaný výrobcem je $7.8 \text{ m}^3/\text{h}$ a maximální tlak 1 hPa [24]. Vývěva tvořila výstupní článek systému.



Obr. 11 Vývěva Busch a vlevo od ní Filtr millipore Opticap

- **Filtr Millipore Opticap XL 4 Capsule**

Filtr byl vyroben s PTFE (polytetrafluoroethylen) hydrofobickou membránou, póry mají velikost 0,2 μm . Maximální tlak na vstupu je výrobcem udáván dle teploty, pro teplotu 23 $^{\circ}\text{C}$ je maximální tlak na vstupu 5.5 baru. Na straně filtru je šipka značící směr proudění pro usnadnění zapojení. Tento filtr sloužil ke zpětnému odstranění vláken před výstupem vzduchu ze systému [25].

- **Teplotní, vlhkostní a tlakový datalogger Extech SD700**

Pro každé prováděné měření byly zaznamenány provozní podmínky laboratoře pomocí tohoto přístroje. Přesnost měření teploty tohoto dataloggeru je $\pm 0,8$ $^{\circ}\text{C}$, přesnost měření tlaku je $\pm 0,3$ hPa, přesnost měření vlhkosti je výrobcem udávána pro relativní vlhkost do 70 % jako $\pm 4\%$ RH (relativní vlhkost) [26].



Obr. 12 Datalogger Extech v laboratoři aerosolů na FSI VUT v Brně

- **Průtokoměry TSI 4000 series a 4100 series**

Průtokoměry série 4000 určené pro měření plynů mají rozsah měřeného průtoku až v rozmezí 0-300 l/min. Udávaná přesnost činí 2 % z naměřené hodnoty. Jsou schopny zaznamenávat i teplotu a tlak proudícího plynu. Typy ze série 4100 nemají možnost měření teploty a tlaku, jejich rozptýl měřeného průtoku je 0,01-20 l/min a udávaná přesnost je stejná. Přes omezení v průtoku na 20 l/min byly průtokoměry dostačující ke kontrole průtoků při vytváření trasy. Dominantní část měření byl využíván průtokoměr ze série TSI 4000 [27].



Obr. 13 Průtokoměr TSI 4000 series

- **Kamera Photron SA-Z**

Kamera je určena pro použití ve výzkumu a vývoji. Maximální rychlost snímání je 480 000 snímků za sekundu. Ultra citlivý obrazový snímač je schopný zaznamenávat i za nízké intenzity světla, jeho maximální rozlišení je 1024 x 1024 pixelů. Omezením rozlišení snímků může být dosaženo rychlejšího snímání. Pro plné rozlišení snímků je rychlost snímání 20 000 snímků za sekundu. Manuál kamery obsahuje přehlednou tabulku možných rychlostí snímání k možnému rozlišení snímků. Software kamery umožňuje operativní ovládání přímo prostřednictvím počítače. Propojení je umožněno přes gigabitové ethernetové rozhraní, které umožňuje kontrolu kamery i přímé stahování dat do počítače. Další možností přenosu dat jsou SD paměťové karty. Ke kameře byl použit objektiv Long-range microscope lens 12X Zoom od firmy Navitar, byl nastaven na nejvyšší přiblížení, Při rozlišení kamery 1024 x 1024 pixelů byla velikost zorného pole asi 1,4x1,4 mm. Použitá snímkovácí frekvence byla obvykle 10 000 snímků za sekundu, rychlost závěrky kamery obvykle 1000 ns [28].



Obr. 14 Rychlostní kamera Photron SA-Z

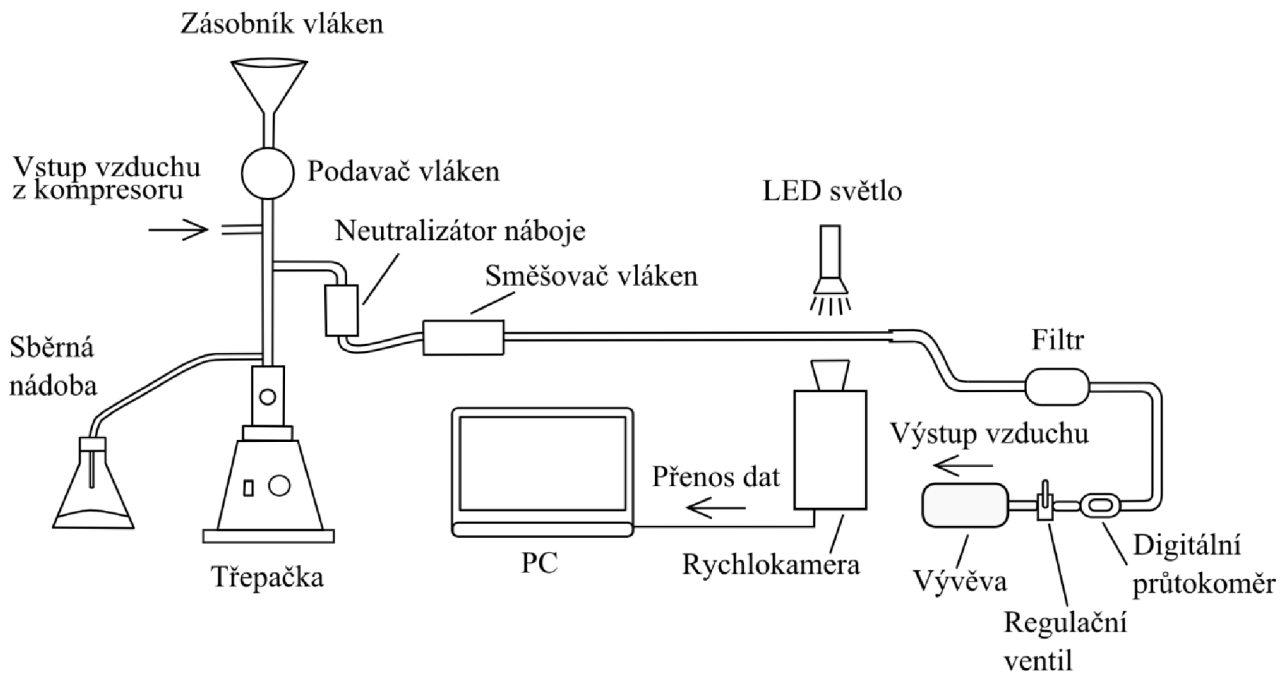
- **Pulzní LED dioda Lightspeed Technologies HPLS-36DD18B**

Výrobce je LED dioda přímo určena k vysokorychlostnímu snímání, je synchronizovatelná s kamerou. Tato pulzní dioda byla použita při pulzech délky zpravidla 500-600 ns. Zaměnitelné LED hlavy umožňují použití různých vlnových délek a barevné teploty světla. Použita byla bílá LED s 5500K [29].



Obr. 15 Pulzní LED dioda

3.2 Popis experimentu



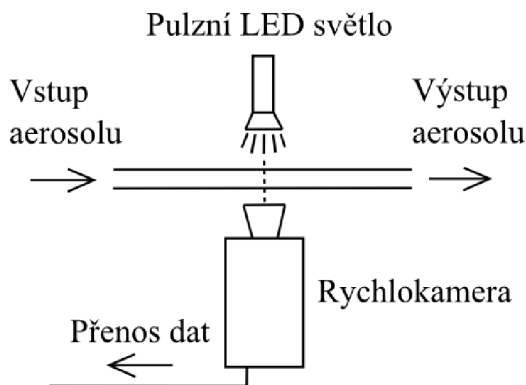
Obr. 16 Schéma experimentální trati

Na schématickém obrázku experimentální trati výše je zobrazena vytvořená trať včetně použitého vybavení. Vlákná byla umístěna v zásobníku tvaru trychtýře, mimo vláken zásobník obsahoval skleněné kuličky, sloužící k separaci vláken. Ze zásobníku vlákna padala do podavače vláken. Při spuštění podavače docházelo k oddělování vláken pomocí rotačního pohybu podavače. Vzduch proudící z kompresoru zajistil nosné médium pro vlákna. Rotačně oscilační pohyb třepačky zajišťoval, že se vlákna dostala do vznosu. Skleněné kuličky dále směřovaly do sběrné nádoby. Vzniklý aerosol se v důsledku podtlaku vyvolaného vývěvou přesouval do neutralizéru, pokračoval do směšovače částic a následně do dlouhé skleněné trubice, kde byl snímán vysokorychlostní kamerou s využitím pulzního LED světla. Zaznamenané snímky byly přímo přenášeny do počítače. Aerosol, který byl nasnímán, dále mířil do filtru, kde byl zbaven vláken. Digitální průtokoměr a regulační ventil sloužily k regulaci a kontrole průtoku soustavou. Vzduch proudící přes vývěvu byl zpětně uvolněn do laboratoře.

3.2.1 Snímání v rovné skleněné trubici

Prvním krokem měření bylo zaznamenání podmínek laboratoře pomocí dataloggeru:

- Vlhkost: 29.4 %RH
- Teplota: 22.2 °C
- Tlak: 996.9 hPa



Obr. 17 Schéma snímání v rovné trubici, pohled na experimentální trať shora

Před samotným měřením proběhla kalibrace vysokorychlostní kamery a očištění skleněné trubice lihem pomocí rýžového papíru. První pokusná vizualizace proběhla při výstupním průtoku 1 l/min, nebylo možné zachytit vlákna, proto samotné měření začalo na výstupním průtoku 2 l/min, následně při 6, 12, 24, 36, 48 l/min. Pro průtoky vyšší 24 l/min byl využit směšovač částic. Měření při každém průtoku probíhalo třikrát.

Nastavení rychlosti podavače vláken bylo mezi 3 – 5, s vyšším průtokem bylo třeba mírně navýšit podávání. Nastavení třepačky zhruba díl za polovinou stupnice intenzity. Nastavení vstupního průtoku z kompresoru asi 10 l/min.



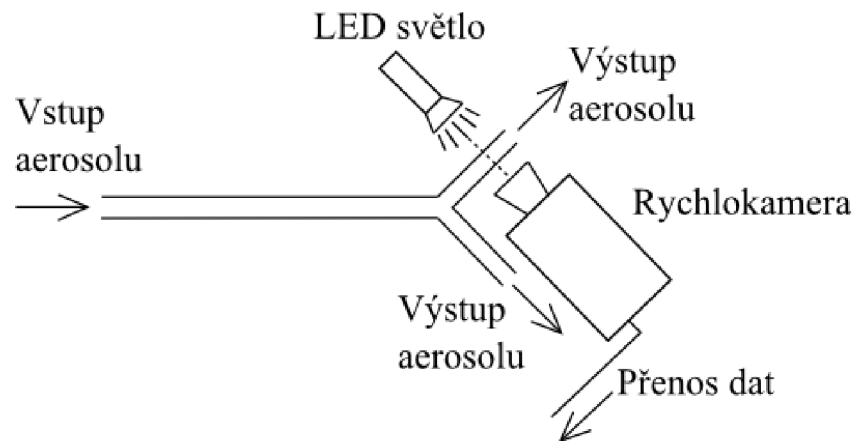
Obr. 18 Fotografie ze snímání v rovné trubici

3.2.2 Snímání v bifurkaci

Zaznamenané podmínky laboratoře pomocí dataloggeru:

- Vlhkost: 28.3 %RH
- Teplota: 22.3 °C
- Tlak: 977.8 hPa

Snímání v bifurkaci bylo provedeno ve dvou rovinách, které byly označeny jako předozadní a rovina levo-pravá. V obou případech snímání proběhlo asi 10 mm od kraje bifurkace. Vnitřní průměr bifurkace byl 11 mm. Průtok v obou větvích bifurkace byl kontrolně změřen, aby bylo zajištěno, že průtok větvemi se nebude výrazně lišit. Měření prováděno při 6, 24, 36 l/min každé s počtem tři opakování, při vyšší rychlosti průtoku nebylo možné vlákna zachytit, proto bylo měření zastaveno na 36 l/min na počtu 2 opakování (levo-pravá rovina), koncentrace vláken již byla malá. K zachycení částic bylo nutné zvolit vyšší stupně nastavení třepačky, zhruba mezi polovinou až třemi čtvrtinami stupnice, poměrně bylo nastavení na vyšších stupních než při měření rovné trubice.

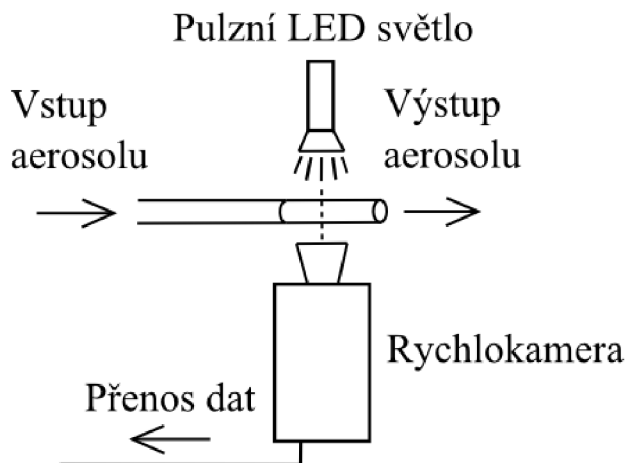


Obr. 19 Schéma snímání v rovině předozadní, pohled na experimentální trať shora

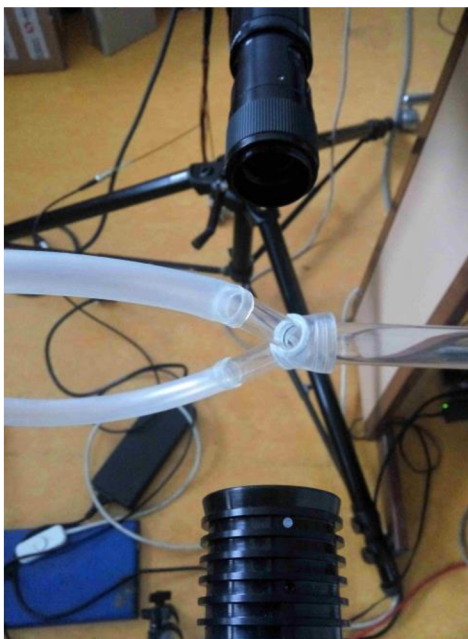


Obr. 20 Snímání v bifurkaci – rovina předozadní

Pro měření v levo-pravé rovině byla bifurkace otočena o 90°. Při změně polohy byla znovu provedena kalibrace kamery. První měření proběhlo pro horní větev. Zachycení dostatečného množství vláken při průtocích vyšších 24 l/min se ukázalo být problematictější než pro měření v rovině předo-zadní. Kontrolně byla provedena kalibrace k vyloučení chyby, ale pro průtoky vyšší 36 l/min byla koncentrace vláken v horní větvi neznatelná.



Obr. 21 Schéma snímání v rovině levo-pravé, pohled na experimentální trať shora



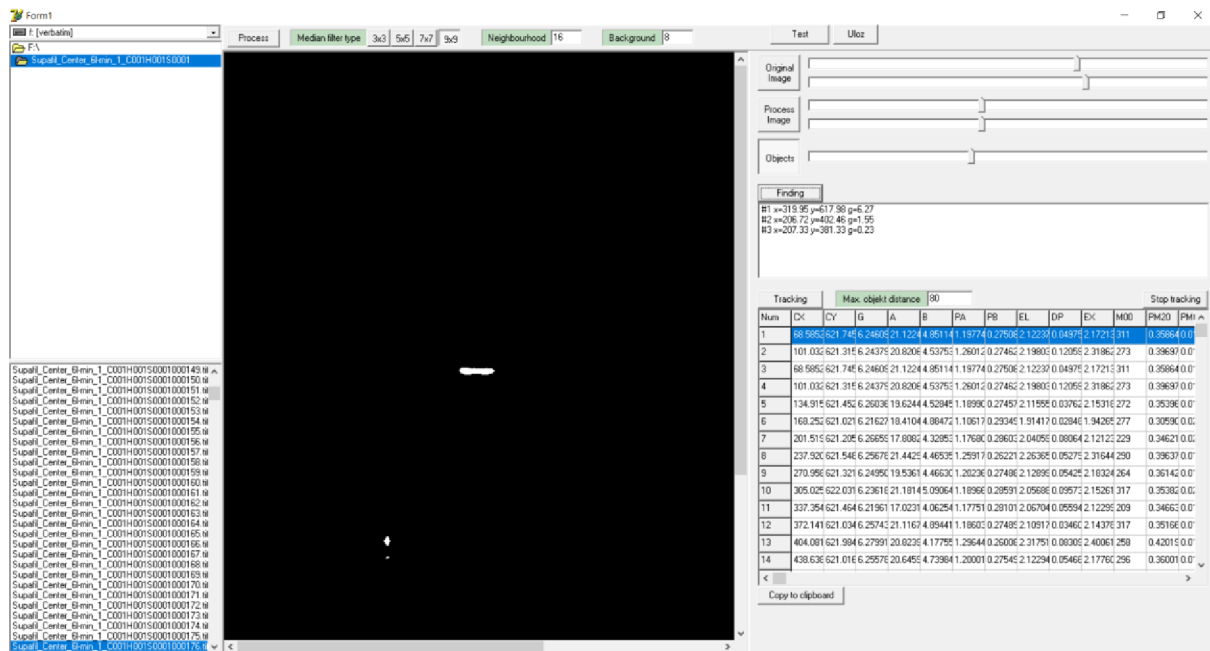
Obr. 22 Bifurkace – snímání v rovině levo-pravé (kamera nahoře, LED dioda dole)

3.3 Použitý software

- Microsoft Office Word
- Microsoft Office Excel
- Photron FASTCAM Viewer
- Fiber Analyzer
- Inkscape

3.4 Analýza získaných dat

Analýza získaných snímků byla provedena pomocí programu Fiber Analyzer vytvořeného na FSI VUT v Brně. Základní rozhraní programu umožňuje nahrání celé sady snímků, jejich procházení a následně úpravu. Pro zpracování obrazu je možno si volit jednotlivé velikosti mediánových filtrů. Jakmile je úprava obrazu dostatečná pro jednoznačné rozpoznání vlákna a jeho trackování, vlákno je třeba označit. Program následně zaznamenává parametry vlákna jako je poloha v osách, natočení a další při pohybu snímaným polem. Získaná data je možno z programu přímo přenést do Excelu k dalšímu zpracování.



Obr. 23 Pracovní prostředí Fiber Analyzeru

3.5 Výsledky

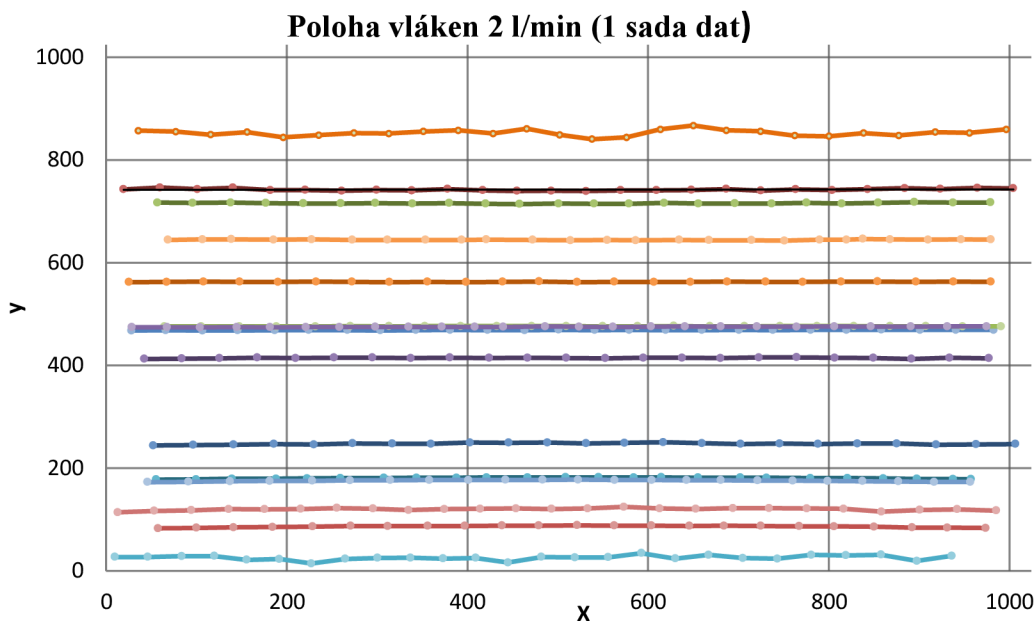
Zpracována byla data pro proudění v rovné trubici pro jednotlivé průtoky 2, 6, 12, 24, 36, 48 litrů za minutu. Natočení vláken odpovídalo teorii, jejich poloha byla svislá nebo vodorovná. Pro každý průtok je vytvořena tabulka četností natočení a graf změny polohy v čase pro 15 vláken. Počet všech zaznamenaných vláken pro konkrétní průtok a sadu dat je v tab.2. Zpracování snímků bifurkace z důvodu velké časové náročnosti není kompletní, proto jsou uvedeny výsledky dat ze snímání v rovné trubici a data ze snímání v bifurkaci bohužel není možné přiložit.

Počet zaznamenaných vláken						
Q [l/min]	2	6	12	24	36	48
sada 1	15	27	27	37	29	20
sada 2	20	31	42	54	38	25
sada 3	29	26	29	60		41

Tab. 2 Počet všech zaznamenaných vláken

3.5.1 Rovná trubice, průtok 2 l/min

Pro průtok 2 l/min bylo pro jednotlivé sady zpracováno 5000, 5500 a 5000 snímků.



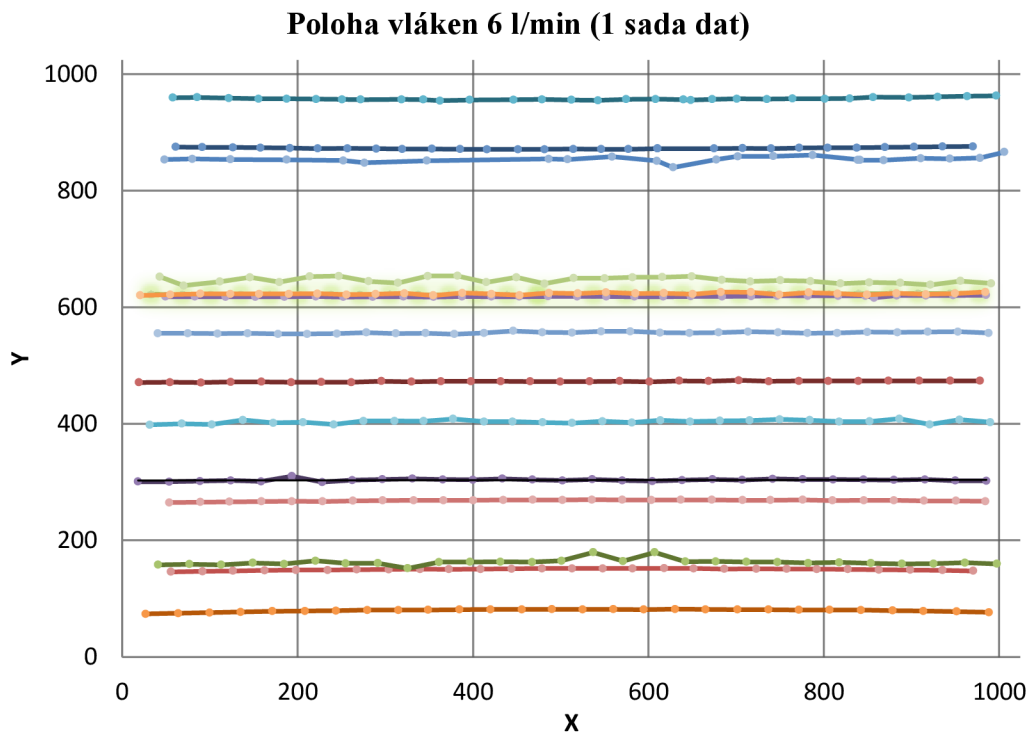
Obr. 24 Změna polohy vláken v čase pro průtok 2 l/min

2 l/min	Svislá	Vodorovná
Sada dat 1	6	9
Sada dat 2	8	12
Sada dat 3	8	21

Tab. 3 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 2 l/min

3.5.2 Rovná trubice, průtok 6 l/min

Pro průtok 6 l/min bylo pro první dvě sady zpracováno 2000 a pro třetí sadu 2100 snímků.



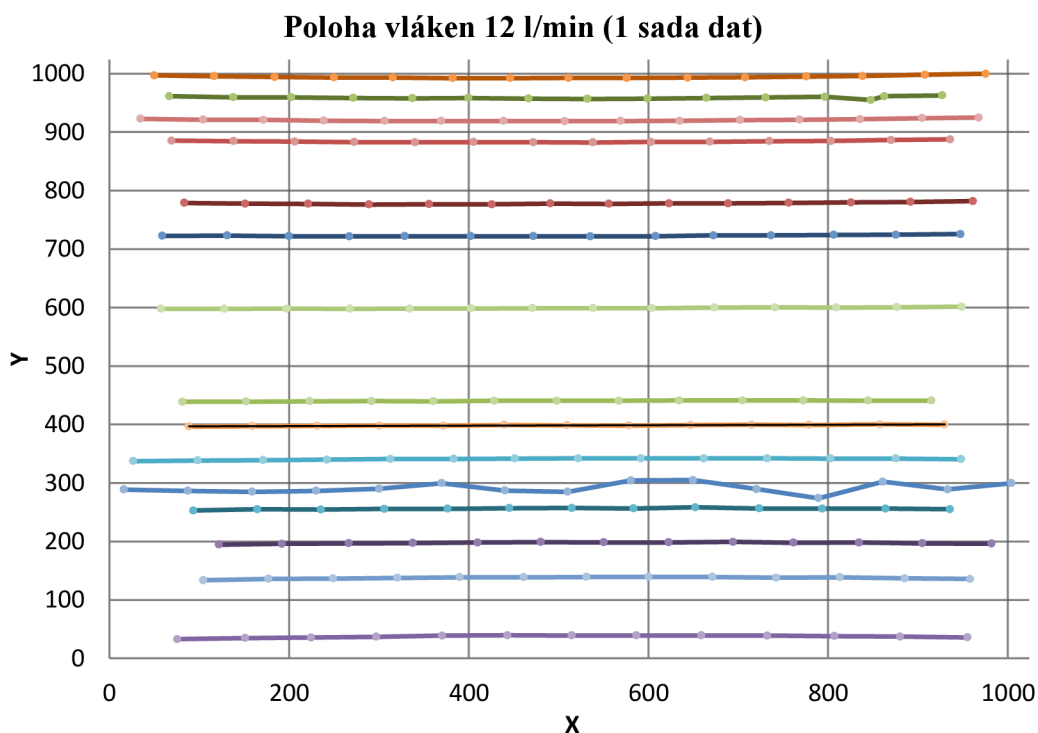
Obr. 25 Změna polohy vláken v čase pro průtok 6 l/min

6 l/min	Svislá	Vodorovná
Sada dat 1	15	12
Sada dat 2	14	17
Sada dat 3	15	11

Tab. 4 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 6 l/min

3.5.3 Rovná trubice, průtok 12 l/min

Pro průtok 12 l/min bylo pro jednotlivé sady zpracováno 1000, 1030 a 1250 snímků.



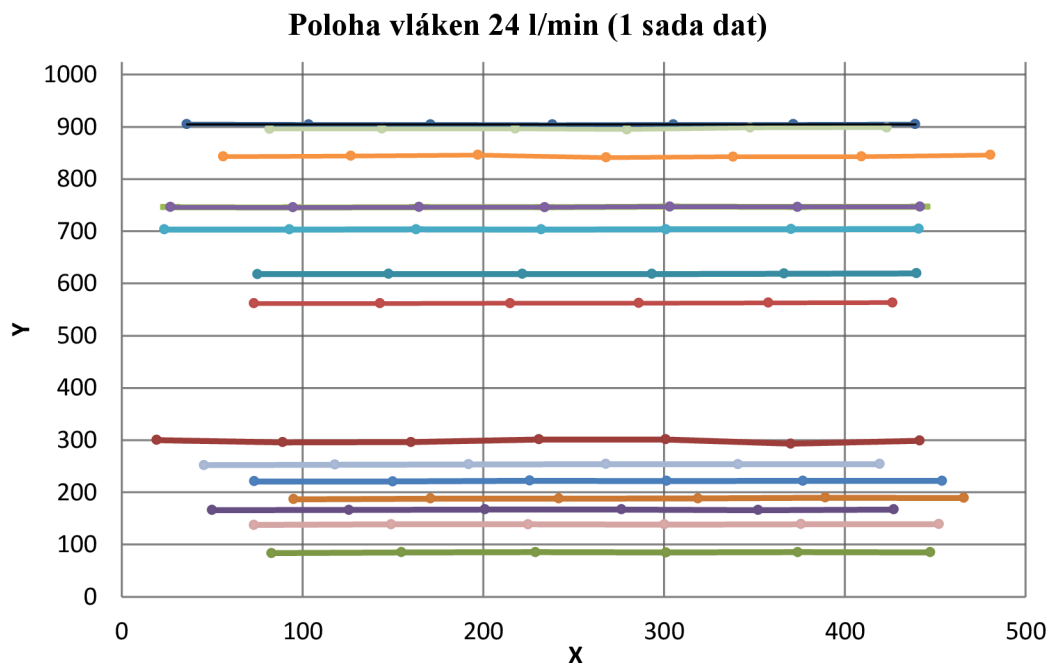
Obr. 26 Změna polohy vláken v čase pro průtok 12 l/min

12 l/min	Svislá	Vodorovná
Sada dat 1	12	15
Sada dat 2	28	14
Sada dat 3	10	19

Tab. 5 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 12 l/min

3.5.4 Rovná trubice, průtok 24 l/min

Pro průtok 24 l/min bylo pro první dvě sady zpracováno 3000 a pro třetí sadu 2000 snímků.



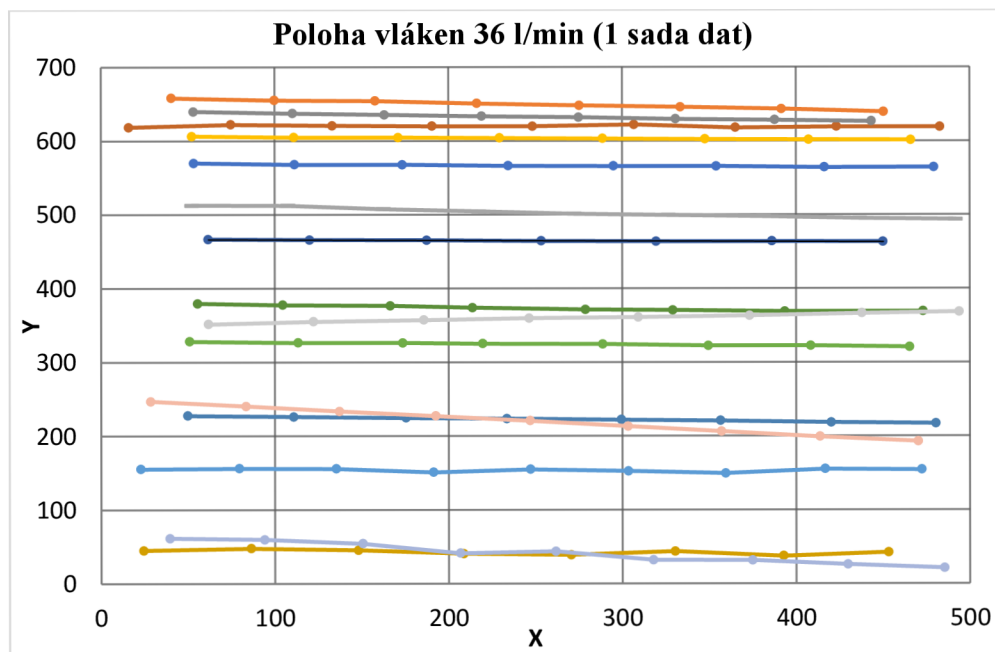
Obr. 27 Změna polohy vláken v čase pro průtok 24 l/min

24 l/min	Svislá	Vodorovná
Sada dat 1	14	23
Sada dat 2	29	25
Sada dat 3	27	33

Tab. 6 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 24 l/min

3.5.5 Rovná trubice, průtok 36 l/min

Pro průtok 36 l/min bylo pro jednotlivé sady zpracováno 5500 a 5000 snímků.



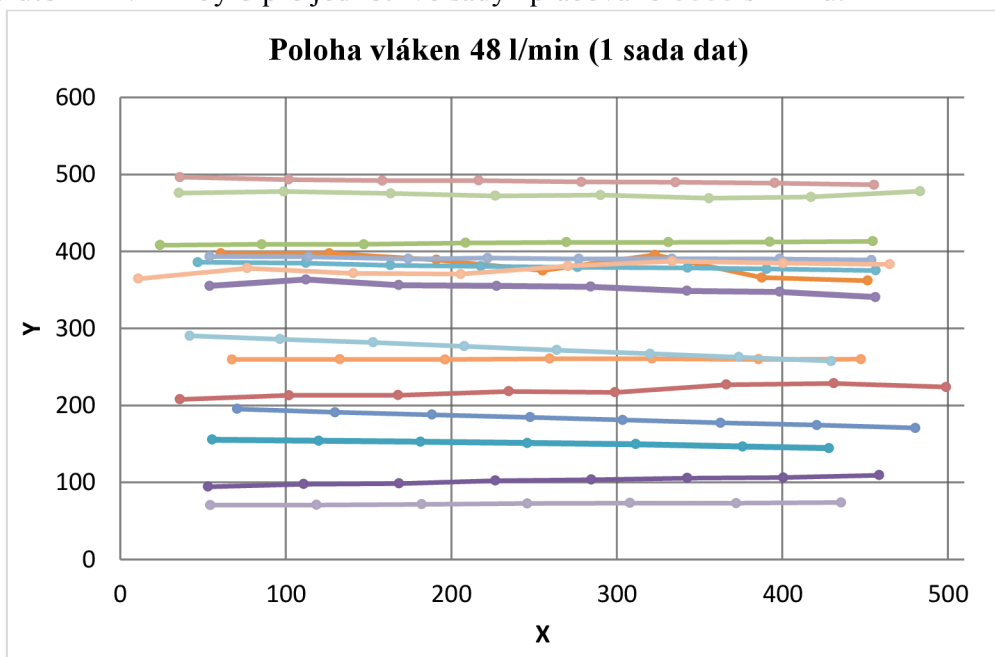
Obr.28 Změna polohy vláken v čase pro průtok 36 l/min

36 l/min	Svislá	Vodorovná
Sada dat 1	10	19
Sada dat 2	19	19

Tab. 7 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 36 l/min

3.5.6 Rovná trubice, průtok 48 l/min

Pro průtok 48 l/min bylo pro jednotlivé sady zpracováno 8000 snímků.



Obr. 29 Změna polohy vláken v čase pro průtok 48 l/min

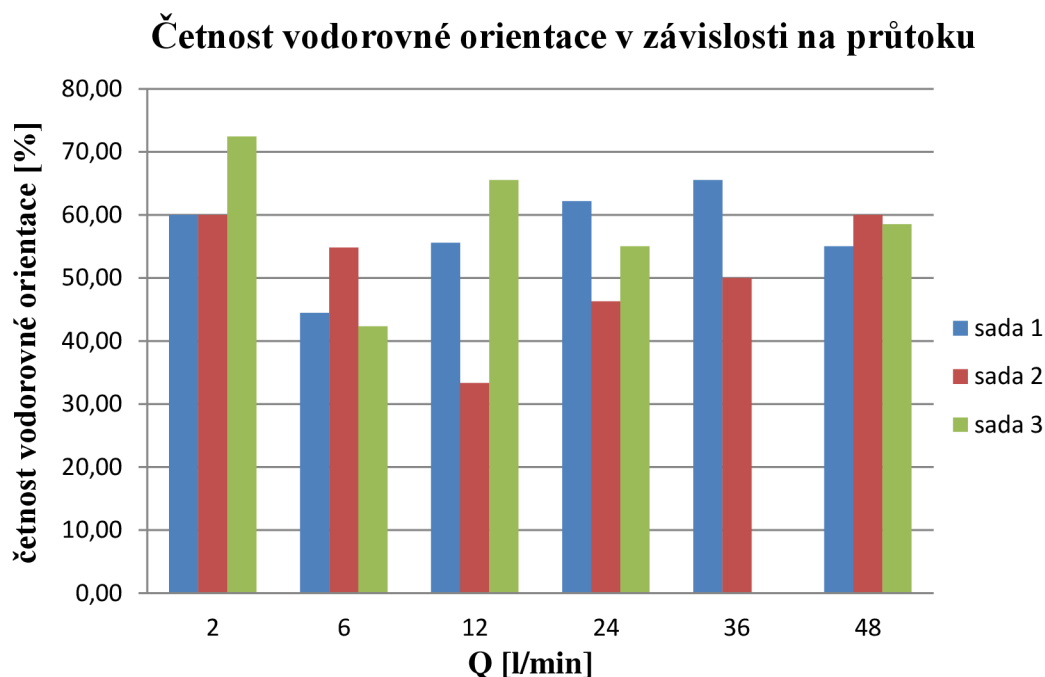
48 l/min	Svislá	Vodorovná
Sada dat 1	9	11
Sada dat 2	10	15
Sada dat 3	17	24

Tab. 8 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 48 l/min

Diskuze

Úhel natočení vláken odpovídá teoretickým předpokladům, vlákna jsou orientována svisle nebo vodorovně. Při procházení snímků byla jejich orientace jednoznačná. Pohyb vláken patrný z příložených grafů ukazuje, že se částice pohybují ve směru proudnice s malými výchylkami do kolmého směru y .

Rozdíl mezi počtem vodorovných a svislých vláken se zdá být nahodilý, nelze říct, že by se se změnou průtoku jednoznačně měnil počet jednoho zastoupení orientace. V jedné sadě dat pro daný průtok může převažovat vodorovná orientace vláken, ale v druhé sadě se poměr opět změní, jak je patrné z grafu na obr.30. Podstatné také je, že nebylo možné vyhodnotit všechna vlákna, vzhledem k nejasnosti některých vláken a někdy také velkému množství nečistot. Pro vyšší průtoky tak byl problém získat snímky s dostatečným počtem použitelných vláken. Již při snímání při průtoku 36 l/min bylo patrné, že bude koncentrace vláken malá.



Obr. 30 Graf četnosti vodorovné orientace vláken v závislosti na objemovém průtoku

Z celového počtu všech zaznamenaných vláken převažuje vodorovná orientace, jak je patrné z obr.30. Pokud se část experimentální tratě, kde probíhalo snímání, přibližuje lidským dýchacím cestám, potom můžeme pohlížet na orientaci vláken v této perspektivě. Vlákna, která mají vodorovnou orientaci, mají potenciál dostat se hlouběji a usadit se v plicích. U vláken se svislou orientací existuje větší šance, že dojde k zachycení vlákna, než se dostane hlouběji do dolních cest dýchacích. Pokud byla celkově vodorovná orientace hojnější, lze říct, že je zde větší zastoupení částic s potenciálem vniknout a usadit se v dolních cestách dýchacích.

Závěr

Skelná minerální vata je hojně využívaným materiálem, který v současné době není považován za významnou hrozbu pro lidské zdraví. Studie účinků vláken minerální vaty na dýchací soustavu člověka a dýchací soustavu zvířat svými výsledky škodlivost jednoznačně nepotvrdila. Přestože některé studie prokázaly vznik patologických změn tkáně, jiné studie tvorbu novotvarů nepotvrdily. Nelze tak s jistotou tvrdit, že vlákna nepředstavují zdravotní riziko. Pouze další výzkum zdravotních důsledků působení skelné minerální vaty může jejich potenciální škodlivost potvrdit či vyvrátit. Jsou to však právě aerodynamické vlastnosti těchto aerosolů, které mají vliv na usazování částic, proto studium chování aerosolů představuje přínos i pro další mezivědní odvětví a další studie inhalace skelných vláken.

V experimentální části této práce byla sestavena měřicí trať, v níž proudil vláknitý aerosol. Samotná vlákna byla snímána při proudění skleněnými trubicemi, které se podobaly dýchacím cestám člověka. Snímání probíhalo pomocí rychlokamery. K analýze byl využit software Fiber Analyzer vytvořený na FSI VUT v Brně. Získaná data byla následně statisticky zpracována.

Vlákna se v souladu s teoretickými poznatky pohybovala s vodorovnou a svislou orientací. Při různých průtocích se orientace vláken jevila nahodilá. Z celkového počtu pozorovaných vláken převažovala vlákna letící vodorovně. Tato vlákna při vstupu do dýchacích cest, které skleněná trubice napodobuje, představují větší riziko usazení částice v plicích než vlákna s orientací svislou.

Přínosem práce je souhrn informací o vláknitých aerosolech a možných metodách k jejich studiu a data popisující chování vláken v trubici, která napodobuje část dýchací soustavy. Tato data a jejich zhodnocení mohou posloužit dalšímu výzkumu a tvořit základ pro obdobné počítačové simulace.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ŠTÍPEK, Radek. *VYUŽITÍ AZBESTU, SANACE ZAMOŘENÝCH PROSTOR A RIZIKO VLIVU NA LIDSKÝ ORGANIZMUS*. Praha, 2013, 69 s. Bakalářská práce. UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Jiří Bendl, CSc.
- [2] *Nakládání s odpady obsahujícími azbest: Národní referenční laboratoř a oddělení pro hygienu půdy a odpadů* [online]. STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/puda/legislativa_odpady/odpady_azbest.pdf
- [3] HINDS, William C. *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. 2nd. New York: Wiley, 1999, 504 s. ISBN: 978-0-471-19410-1.
- [4] BĚLKA, M. *In vitro výzkum vlivu vlastností částic a průtoku vzduchu na regionální depozici v dýchacích cestách člověka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 121 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [5] KULKARNI, Pramod, Paul A. BARON a Klaus WILLEKE. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*,. 3rd Ed. Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-38741-2.
- [6] DOHÁNYOSOVÁ, Pavla, Lena KUBINCOVÁ, Jiří SMOLÍK, Jaroslav SCHWARZ, Vladimír ŽDÍMAL, P. A. BARON a K. WILLEKE. *VÝKLADOVÝ SLOVNÍK AEROSOLOVÝCH TERMÍNŮ* [online]. Praha: Česká aerosolová společnost, 2007 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://cas.icpf.cas.cz/download/Aerosolovnik.pdf>
- [7] BARON, Paul A. a Klaus WILLEKE. *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. 2nd. Wiley, 2005, 1160 s. ISBN 978-0471784920.
- [8] HANZLOVÁ, Jitka a Jan HEMZA. *Dýchací soustava (apparatus respiratorius, systema respiratorium). ZÁKLADY ANATOMIE soustavy dýchací, středně cévní, lymfatického systému, kůže a jejich derivátů* [online]. Masarykova univerzita, Fakulta sportovních studií, 2013 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://is.muni.cz/do/fsps/e-learning/zaklady_anatomie/zakl_anatomieIII/pages/dychaci_soustava.html
- [9] TROJAN, Stanislav a Michael SCHREIBER. *Atlas biologie člověka: 430 modelových otázek k přijímacím zkouškám na medicínu : 100 obrazových podkladů k opakování a procvičování*. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-7183-257-X.
- [10] NAŇKA, Ondřej, Miloslava ELIŠKOVÁ a Oldřich ELIŠKA. *Přehled anatomie*. 2., dopl. a přeprac. vyd. Praha: Galén, c2009. ISBN 978-80-7262-612-0. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:20ee05a0-dad4-11e5-984e-005056827e52>

- [11] MACHOVÁ, Jitka. Biologie člověka pro učitele. Druhé vydání. Praha: Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum, 2016. ISBN 978-80-246-3357-2. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:0aceb040-ebf6-11e8-a5a4-005056827e52>
- [12] COSTA, Roser a Ramon ORIOLS. Man-Made Mineral Fibers and the Respiratory Tract. *Archivos de Bronconeumologia* [online]. Elsevier, 2012, December 2012, , 9 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1016/j.arbr.2012.04.004. Dostupné z: <https://www.archbronconeumol.org/en-man-made-mineral-fibers-respiratory-tract-articulo-S157921291200198X>
- [13] IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans. Man-made Vitreous Fibres. Lyon (FR): International Agency for Research on Cancer; 2002. (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 81.) Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK396444/>
- [14] MOSSMAN, Brooke T., Morton LIPPMANN, Thomas W. HESTERBERG, Karl T. KELSEY, Aaron BARCOWSKY a James C. BONNER. Pulmonary Endpoints (Lung Carcinomas and Asbestosis) Following Inhalation Exposure to Asbestos. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part B, Critical Reviews* [online]. 09 Jun 2011, 2011, 45 [cit. 2019-05-21]. DOI: 10.1080/10937404.2011.556047. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3118517/>
- [15] Elektronová mikroskopie transmisní a rastrovací. Společná laboratoř optiky [online]. Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého v Olomouci a Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://jointlab.upol.cz/~soubusta/OSYS/El_mikr/El_mikr.html
- [16] LÍZAL, F., ELCNER, J., BĚLKA, M., JEDELSKÝ, J., HOPKE, P., ŠTARHA, P., DRUCKMÜLLEROVÁ, H., JÍCHA, M. Measurement of Fiber Deposition in a Human Lung Model by Phase Contrast Microscopy with Automated Image Analysis. *Engineering Mechanics*, 2013, roč. 20, č. 3/ 4, s. 187-194. ISSN: 1802- 1484
- [17] PAVELEK, Milan a Josef ŠTĚTINA. *Experimentální metody v technice prostředí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3426-4.
- [18] RAFFEL, Markus, Christian E. WILLERT, Fulvio SCARANO, Christian KÄHLER, Steve T. WERELEY a Jürgen KOMPENHANS. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. 3rd. Springer, 2018, 669 s. ISBN 978-3-319-68852-7. DOI: 10.1007/978-3-319-68852-7.
- [19] ALBRECHT, H.-E., Nils DAMASCHKE, Michael BORYS a Cameron TROPEA. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. Springer, 2003, 738 s. ISBN 978-3-662-05165-8. DOI: 10.1007/978-3-662-05165-8.

- [20] PARSHEH, Mehran, Matthew I. BROWN a Cyrus K. AIDUN. Investigation of closure approximations for fiber orientation distribution in contracting turbulent flow. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* [online]. Elsevier B.V, 2006, **136**(1), 38-49 [cit. 2019-04-03]. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2006.03.001. ISSN 0377-0257.
- [21] LÍZAL, František, Milan MALÝ, Jakub ELCNER, Arpad FARKAS, Ondřej PECH, Ondřej MIŠÍK, Jan JEDELSKÝ a Miroslav JÍCHA. Dielectrophoretic classification of fibres: principles and application to glass fibres suspended in air. *Experimental Fluid Mechanics*[online]. Praha, 2018, 16 Nov 2018 [cit. 2019-05-21].
- [22] LÍZAL, František. *Experimentální výzkum transportu a depozice aerosolů v dýchacím traktu člověka*. Brno, 2012. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Miroslav Jícha.
- [23] *Třepačka Wisd VM-10, typ vortex*. Verkon: Společnost pro vaši laboratoř [online]. VERKON, 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.verkon.cz/trepacka-wisd-vm-10-typ-vortex/#>
- [24] *BUSCH: Instalation and Operating Instructions* [online]. Busch Produktions [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://adara-bg.com/wp-content/uploads/2017/02/R5-PA-0008-C.pdf>
- [25] Opticap XL capsule with Aervent filter, 0.2 µm. *MERCK* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://www.merckmillipore.com/CZ/cs/product/Opticap-XL-capsule-with-Aervent-filter-0.2-m,MM_NF-KTGRA04TT3#anchor_COQ
- [26] Barometric Pressure / Humidity and Temperature Datalogger. *EXTECH INSTRUMENTS: USER GUIDE* [online]. Extech Instruments Corporation, 2012 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/100000-124999/103826-an-01-en-EXTECH_SD700_LUFTD__TEMP_FEUCHTE_DATALOG.pdf
- [27] *TSI SERIES 4000/4100 HIGH PERFORMANCE LINEAR OEM MASS FLOWMETER (TSI MODELS 4021, 4024, 4121, AND 4122): DESIGN GUIDE*. 2016. U.S.A.: TSI Incorporated, 2016, 75 s. Dostupné také z: <https://www.tsi.com/getmedia/53b953c3-efb4-4ee9-81bc-0e43b4626254/1980430-4000-4100-Design-Guide-web?ext=.pdf>
- [28] *FASTCAM_SA-Z_HW_Manual: Revision 1.00 USEU*. Tokyo: PHOTRON LIMITED, 2013. Dostupné také z: http://www.highspeedimaging.com/media/photron_manuals/FASTCAM_SA-Z_HW_Manual.pdf
- [29] HPLS-36 Series Single Emitter with Built in Driver. *Light-speed-tech.com* [online]. Lightspeed Technologies, 2018 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <http://www.light-speed-tech.com/hpls-36-3-2/>

- [30] *Medical Dictionary Online* [online]. BROADER TECHNOLOGIES, 2018 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.online-medical-dictionary.org/>
- [31] Úprava diplomových a bakalářských prací. *ENERGETIKÝ ÚSTAV* [online]. FSI VUT v Brně, 2019 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://www.eu.fme.vutbr.cz/odbor-energetickeho-inzenyrstvi/uprava-diplomovych-a-bakalarskych-praci-v-roce-2011-2012>
- [32] *CITACE PRO* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com>

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Veličina	Jednotka
Re	Reynoldsovo číslo	-
Re _f	Reynoldsovo číslo proudění v trubici	-
Re _p	Reynoldsovo číslo částice	-
Stk	Stokesovo číslo	-
U	Rychlost	$m \cdot s^{-1}$
d	Charakteristický rozměr	m
ν	Kinematická viskozita	m^2/s
S	Brzdná dráha částice	m
Q	Objemový průtok	$l \cdot min^{-1}$

Seznam obrázků

Obr. 1 Snímek vláknité struktury asbestu pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem [7].....	14
Obr. 2 Řasinkový epitel nosní sliznice [9].....	15
Obr. 3 Horní cesty dýchací [11].....	16
Obr. 4 Přenos dýchacích plynů přes membránu [9].....	17
Obr. 5 Depozice částic – upraveno z článku [14]	19
Obr. 6 Schématické znázornění jednotlivých typů mikroskopů [15].....	21
Obr. 7 Stručné schéma typické experimentální PIV sestavy zaznamenávající dva vektory rychlosti v proudovém poli v jedné rovině uvnitř vzdušného tunelu [18].....	24
Obr. 8 Schéma dvou paprskového Dopplerovského anemometru [19]	24
Obr. 9 Schématické zobrazení klasifikátoru vláken využívajícího dielektroforézy [22].....	26
Obr. 10 Třepačka upevněná ve stojanu na molitanu tlumícím vibrace.....	28
Obr. 11 Vývěva Busch a vlevo od ní Filtr millipore Opticap	28
Obr. 12 Datalogger Extech v laboratoři aerosolů na FSI VUT v Brně.....	29
Obr. 13 Průtokoměr TSI 4000 series	30
Obr. 14 Rychlostní kamera Photron SA-Z.....	31
Obr. 15 Pulzní LED dioda.....	31
Obr. 16 Schéma experimentální trati	32
Obr. 17 Schéma snímání v rovině trubici, pohled na experimentální trať shora	33
Obr. 18 Fotografie ze snímání v rovině trubici	33
Obr. 19 Schéma snímání v rovině předozadní, pohled na experimentální trať shora.....	34
Obr. 20 Snímání v bifurkaci – rovina předozadní	34
Obr. 21 Schéma snímání v rovině levo-pravé, pohled na experimentální trať shora.....	35
Obr. 22 Bifurkace – snímání v rovině levo-pravé (kamera nahoře, LED dioda dole).....	35
Obr. 23 Pracovní prostředí Fiber Analyzeru	36
Obr. 24 Změna polohy vláken v čase pro průtok 2 l/min	37
Obr. 25 Změna polohy vláken v čase pro průtok 6 l/min	38
Obr. 26 Změna polohy vláken v čase pro průtok 12 l/min	39
Obr. 27 Změna polohy vláken v čase pro průtok 24 l/min	40
Obr. 28 Změna polohy vláken v čase pro průtok 36 l/min	41
Obr. 29 Změna polohy vláken v čase pro průtok 48 l/min	42
Obr. 30 Graf četnosti vodorovné orientace vláken v závislosti na objemovém průtoku.....	43

Seznam tabulek

Tab. 1 Typy částicových suspenzí [3]	12
Tab. 2 Počet všech zaznamenaných vláken.....	36
Tab. 3 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 2 l/min	37
Tab. 4 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 6 l/min	38
Tab. 5 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 12 l/min	39
Tab. 6 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 24 l/min	40
Tab. 7 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 36 l/min	41
Tab. 8 Četnost svislé a vodorovné polohy u pohybu vláken 48 l/min	42