



Experimentální výzkum transportu a depozice aerosolů v dýchacím traktu člověka

Ing. František Lízal

Školitel: prof. Ing. Miroslav Jícha, CSc.

Motivace:

Pozitivní efekty aerosolů – terapeutické aerosoly

- neinvazivní metoda
- okamžitá absorpce do krve na velkém povrchu



Cílená dodávka léků

Negativní efekty aerosolů – škodlivé aerosoly

- emitovány průmyslem a dopravou
- nutnost odhadnout a zmírnit riziko působení inhalovaného škodlivého aerosolu



Ochrana dýchacích cest

Přístupy:

- in vivo – na lidských dobrovolnících či zvířatech
- + reálné živé objekty



- přísná legislativa
- finanční náročnost
- nemožnost optické kontroly
- nutnost získat informovaný souhlas
- inter- a intrasubjektová variabilita

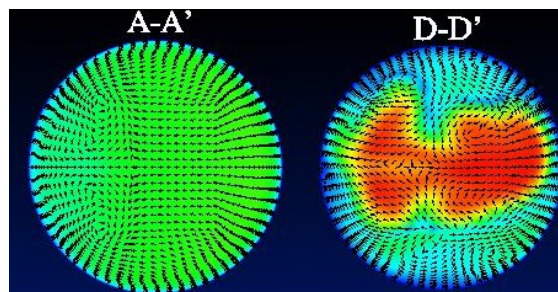
Přístupy:

- in vitro – na fyzických modelech
- + nižší cena
- + snazší manipulace
- + možnost vizualizace
- + lepší opakovatelnost
- zjednodušení oproti reálnému stavu

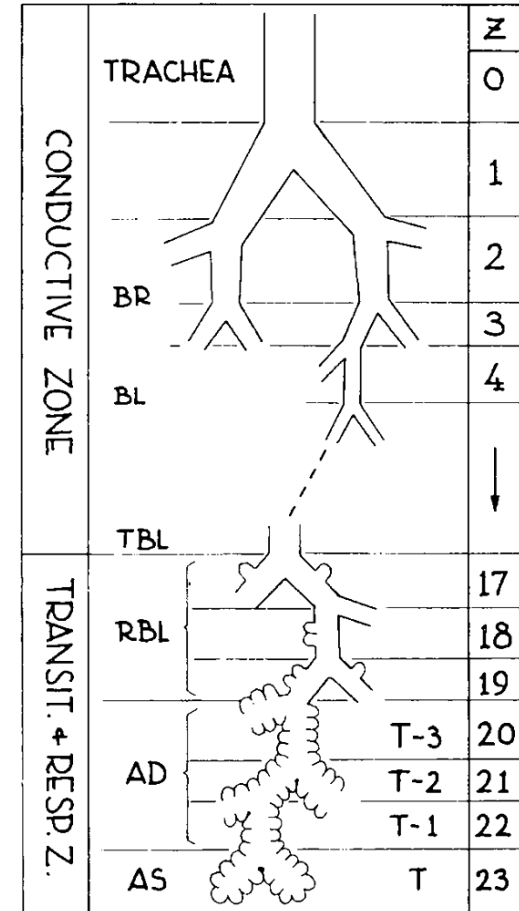
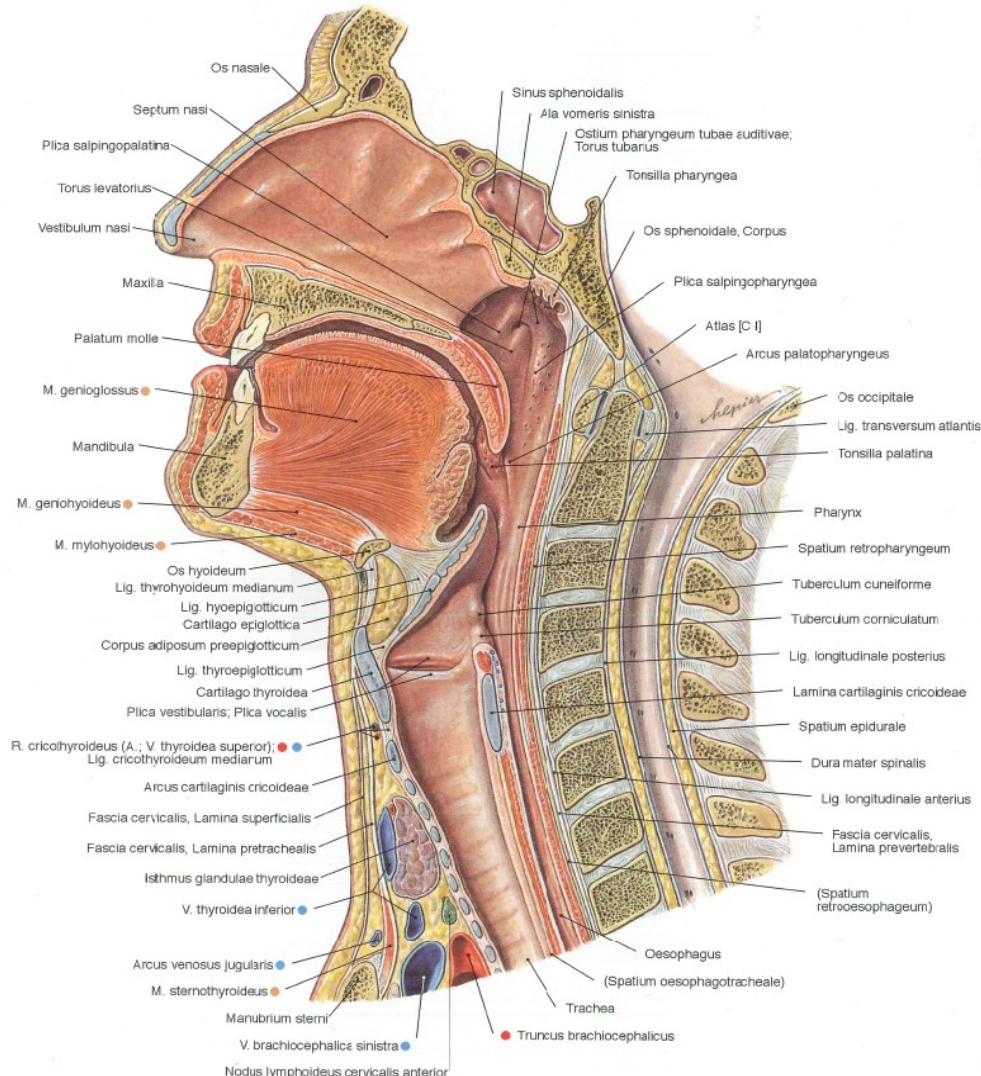


Přístupy:

- in silico – numerické modelování
- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> + bez náročných měření + libovolné nastavení okrajových podmínek + informace o rychlostním poli i depozici | <ul style="list-style-type: none"> - zjednodušení oproti reálnému stavu - výsledky silně závislé na počátečních a okrajových podmínkách a použité numerické metodě |
|--|--|



Anatomie plic:



Morfologie plic a používané modely:

- Weibelův A model – symetrický, číslování shora
- Horsfieldův model – nesymetrický, číslování od terminálních bronchiolů

• Raabe a další  **Idealizované**

• Odlitky z mrtvol  **Realistické**

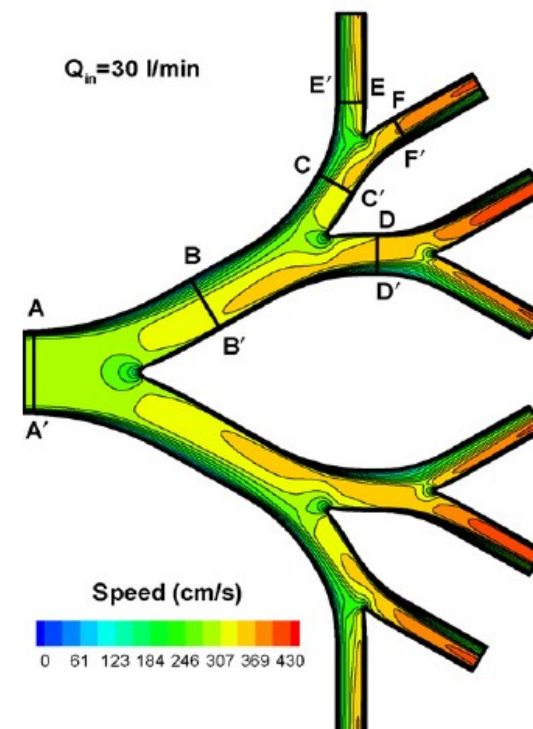
- MRI a CT modely ze živých dobrovolníků
- MRI a CT odlitků plic z mrtvol

• Schmidt a kol.  **Realistické Digitalizované**

• Visible Human

Experimentální výzkum proudového pole:

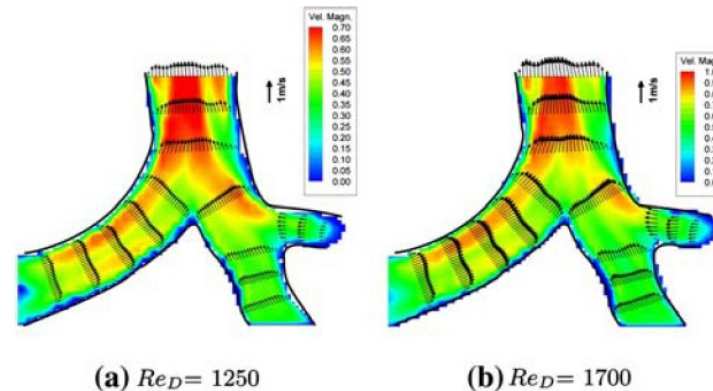
- Proudění v plicích je **ovlivňováno řadou parametrů**: průřez a zakřivení dýchacích trubic, úhel odklonu větví ve dvou směrech, dechový objem, dechová frekvence, způsob dýchání a další
- Popsáno několik charakteristických jevů, zejména: „**steady streaming**“ a „**pendelluft**“



Experimentální výzkum proudového pole:

Používané metody:

- Žárová anemometrie
- PIV, PTV, LIF
- LDA, PDA



Hlavní bezrozměrné parametry:

$$Re = \frac{V \cdot L}{\eta}$$

$$\alpha = R \sqrt{\frac{\omega \rho}{\eta}}$$

V (m/s) ... rychlost vzduchu

L (m) ... charakteristický rozměr

η (Pa.s) ... dynamická viskozita vzduchu

R (m) ... poloměr trubice

ω (rad/s) ... úhlová frekvence oscilací průtoku

Womersleyho číslo = poměr frekvence pulzací proudění k viskózním účinkům

Experimentální výzkum depozice aerosolu:

Mechanismy depozice:

- Zachycení (interception)
- Setrvačný mechanismus (inertial impaction)
- Sedimentace (sedimentation)
- Difuze (diffusion)
- Elektrostatická precipitace (electrostatic precipitation)

Hlavní parametr:

$$Stk = \frac{d_p^2 \cdot V}{18\eta}$$

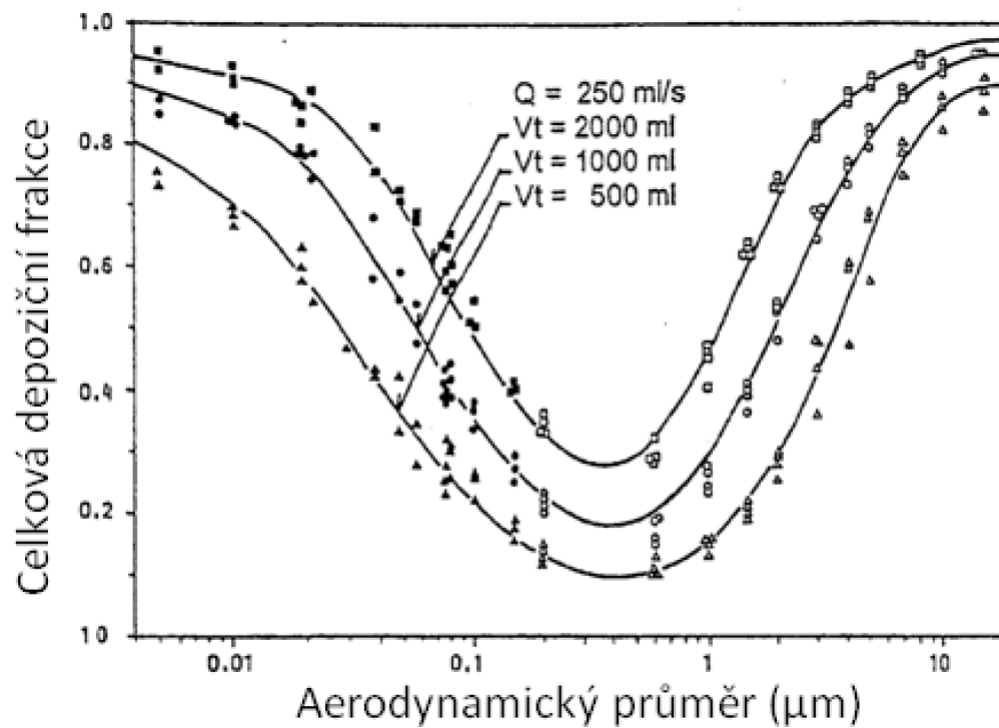
d_p (μm) ... aerodynamický
průměr částice

V (m/s) ... rychlost vzduchu

η (Pa.s) ... viskozita vzduchu

Experimentální výzkum depozice aerosolu:

Křivka depoziční frakce:

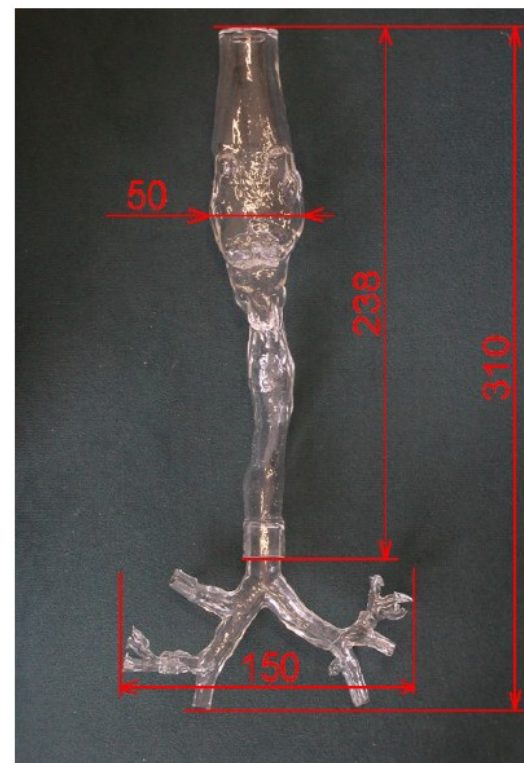


Zhodnocení výsledků řešerše:

- Otevřená otázka vlivu rychlostního pole (zejm. laryngálního proudu) a turbulence na depozici
- Realistické X idealizované modely
- Perspektiva měření PDA (LDA) se vzduchem – měření transportu aerosolu, nikoli proudění vody
- Depozice – perspektivní metody: PET, gravimetrie, fluorescenční metoda, optický čítač
- Vláknové a porézní aerosoly
- CFD - pravděpodobný vývoj

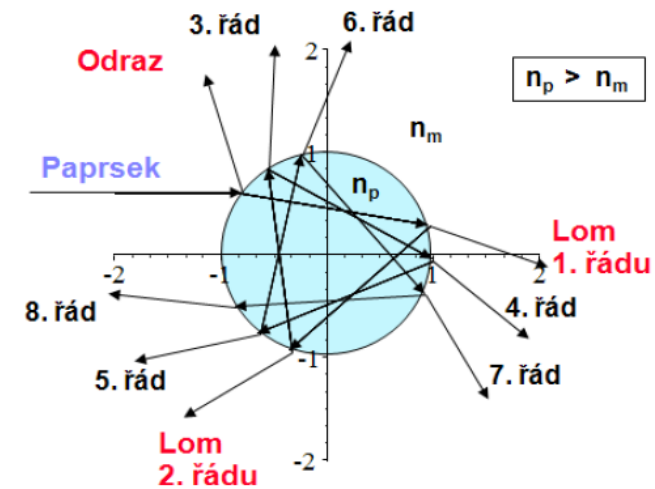
Současný stav řešení disertační práce:

- Vyvinuta metodika výroby a vyroben realistický model pro optická měření



Použití PDA pro měření rychlostí a velikostí částic aerosolu v modelu plic:

- Průsečík 2 laserových paprsků tvoří měřicí objem
- Při průletu částice se část světla odrazí, část se láme
- Frekvence změn intenzity světla zachycená detektory je úměrná rychlosti částice a rozdíl fází mezi jednotlivými detektory je úměrný velikosti částice

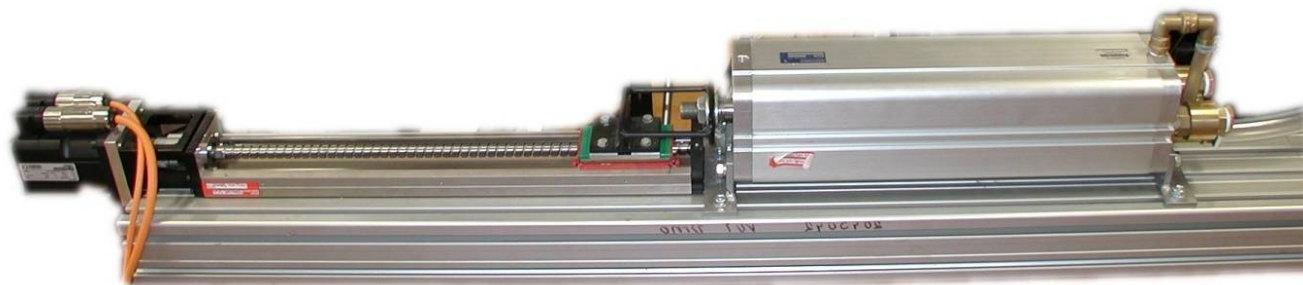


$$U = \frac{\lambda}{2 \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} f_D$$

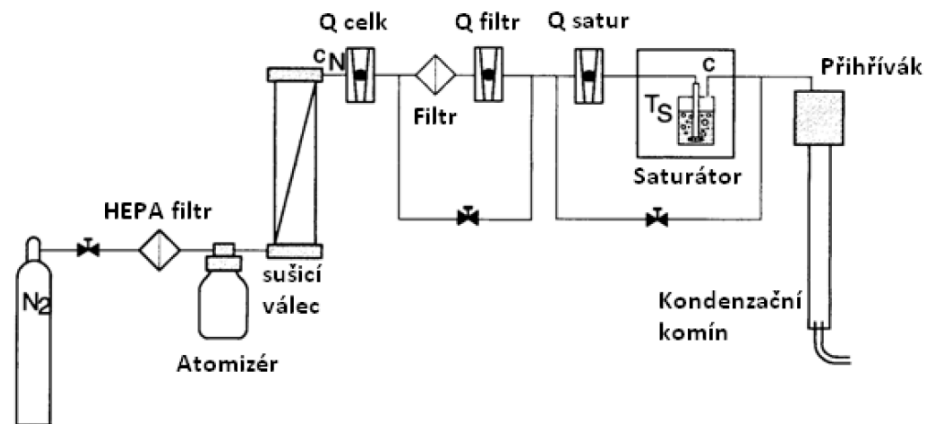
$$\Phi = \frac{2\pi d_p}{\lambda} \frac{\sin \theta \sin \psi}{\sqrt{2(1 - \cos \theta \cos \psi \cos \phi)}}$$

Zprovoznění měřicích přístrojů a sestavení experimentální tratě:

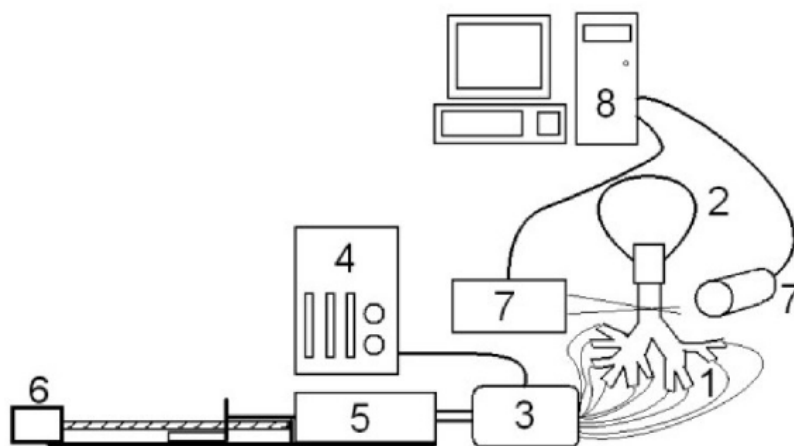
- Mechanismus pro simulaci dýchání



- Kondenzační generátor monodisperzního aerosolu



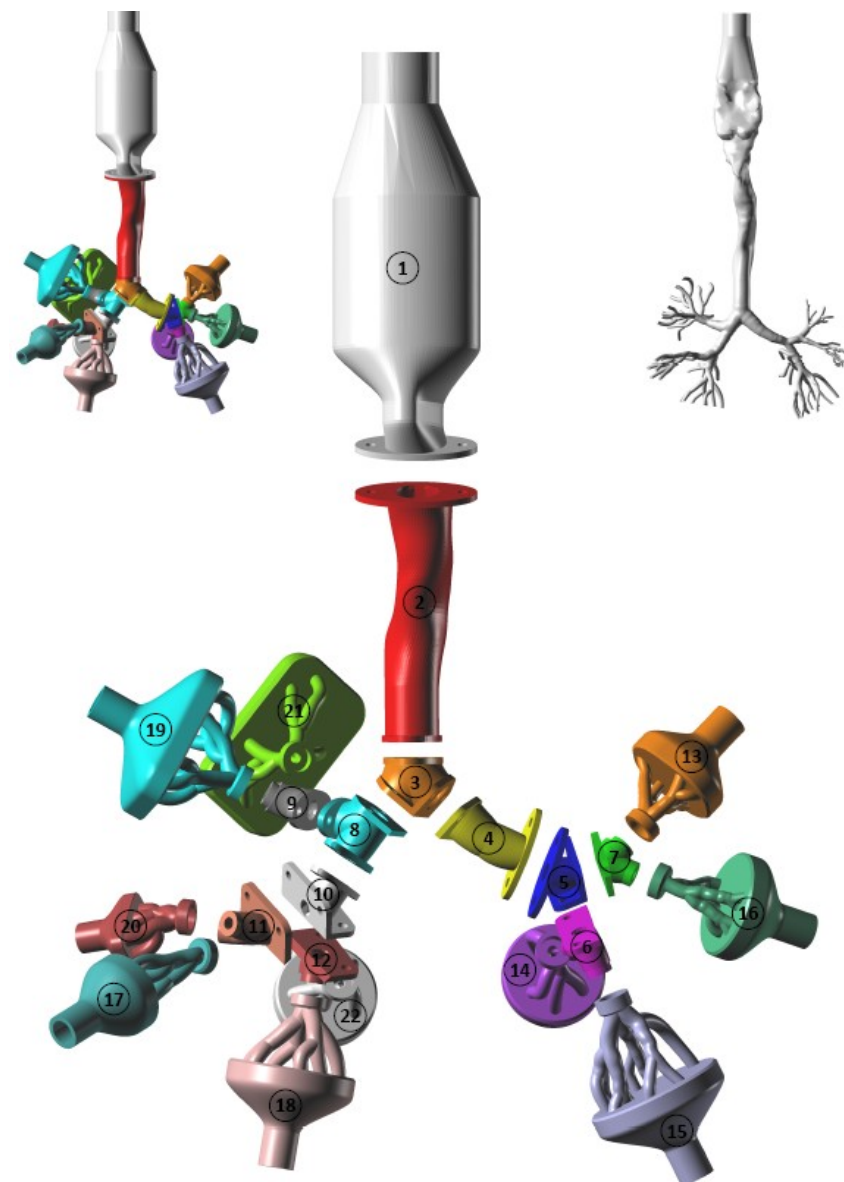
Sestavení experimentální tratě:



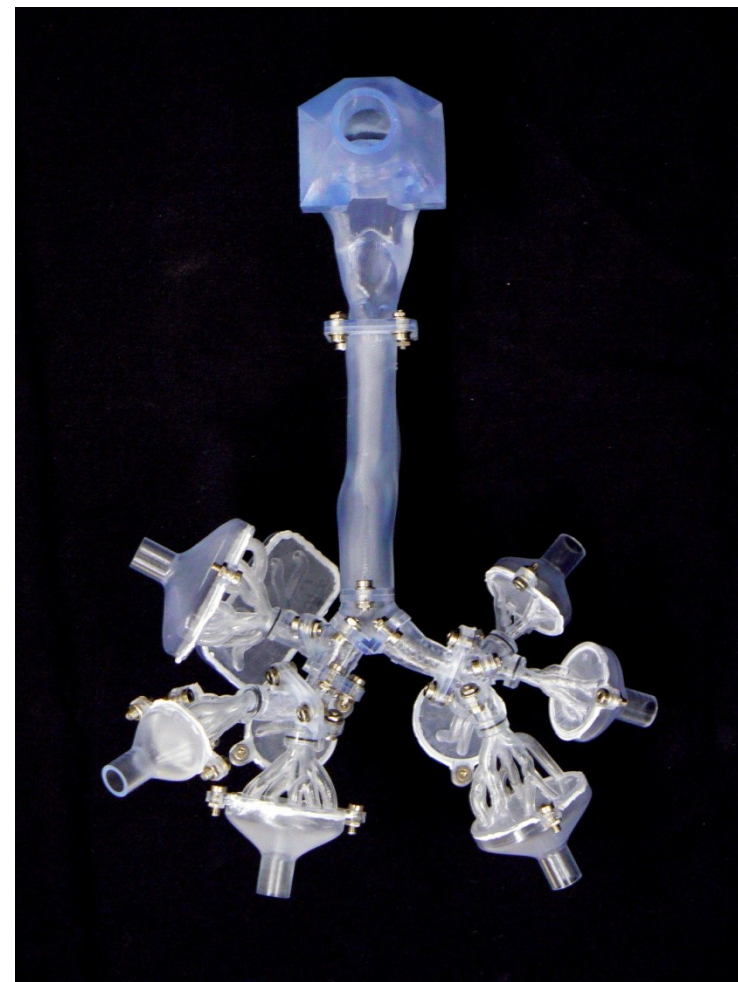
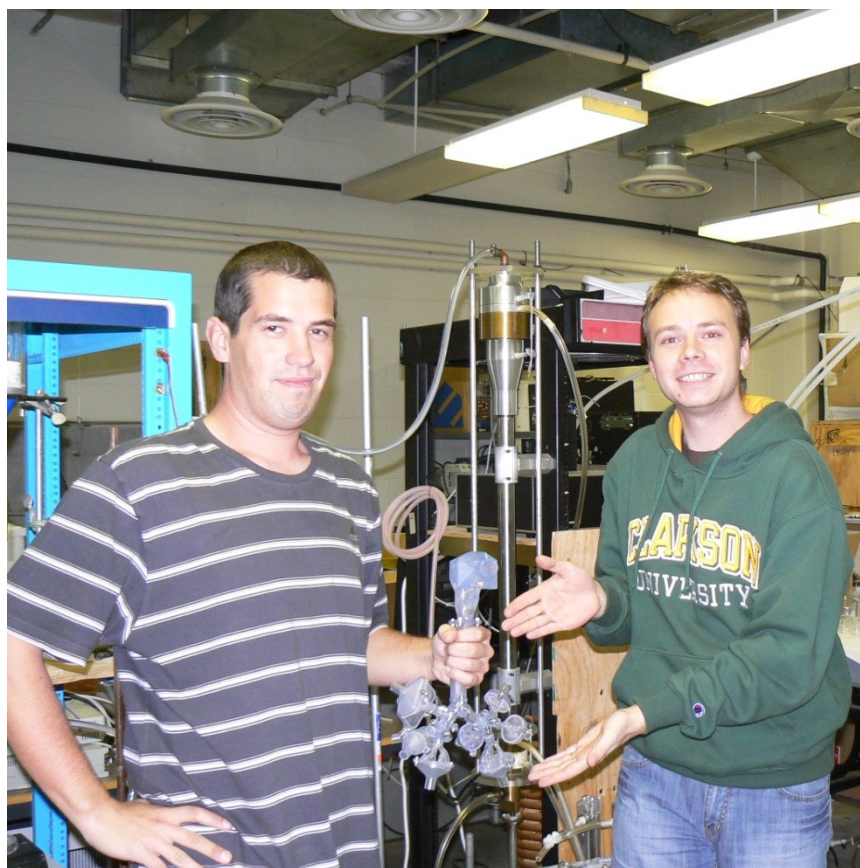
- 1 model plic
- 2 elastický vak
- 3 statický mixér
- 4 generátor aerosolu
- 5 pneumatický válec
- 6 elektromotor
- 7 vysílací a přijímací optika
- 8 počítač

- Dále provedeno měření průtoků vzduchu modelem a měření dechových režimů u dobrovolníků
- Proveden výpočet optických korekcí pro měření PDA
- Měření vlivu zapojení dýchacího mechanismu k modelu shora nebo zdola

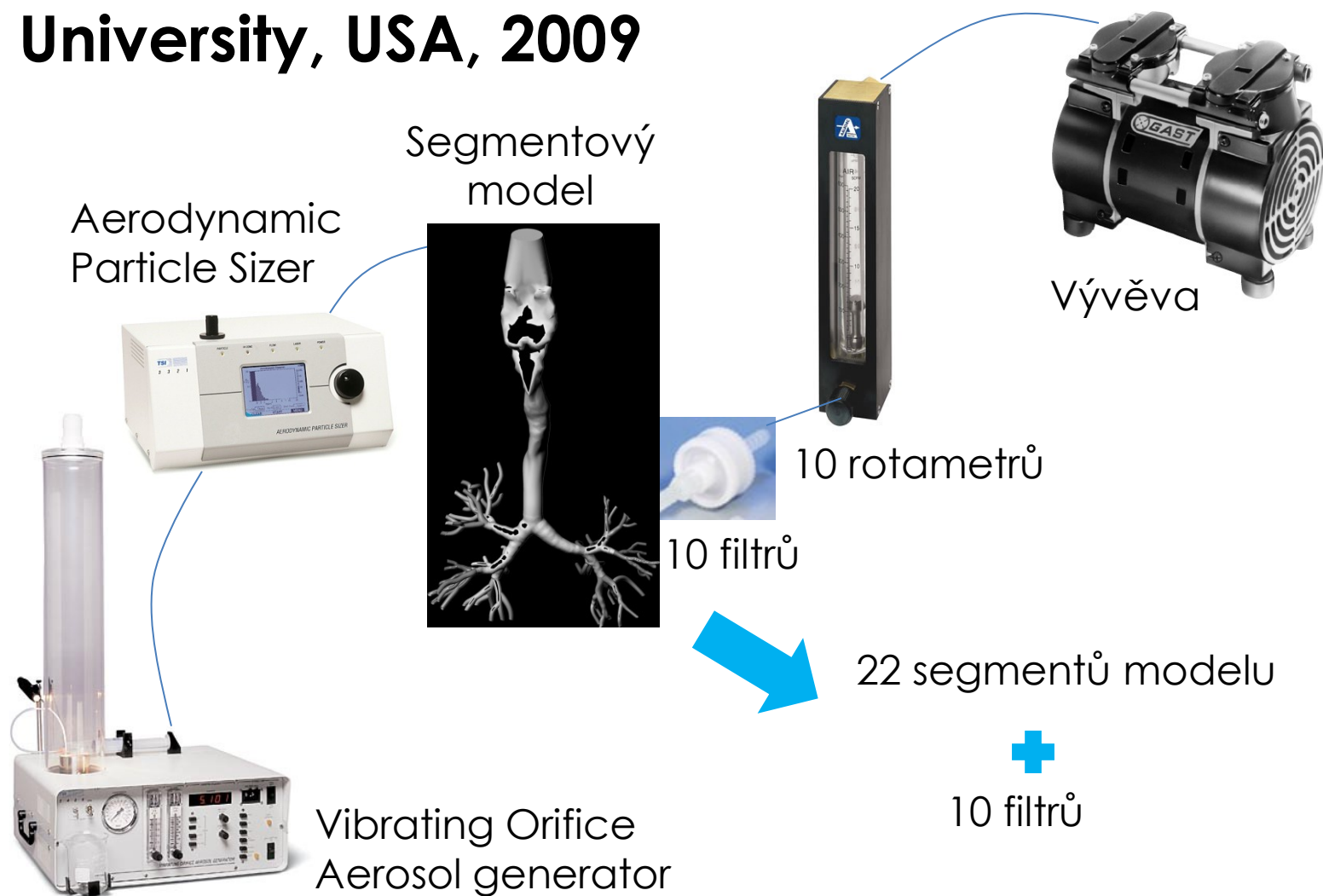
- Výroba modelu pro měření depozice



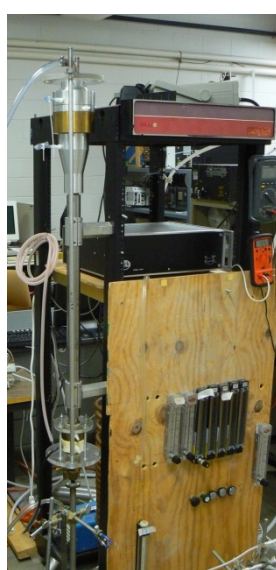
- Výroba modelu s ústní dutinou pro měření depozice



Měření depozice: stáž na Clarkson University, USA, 2009



Měření depozice: stáž na Clarkson University, USA, 2010



Generátor vláknitého aerosolu s neutralizátorem



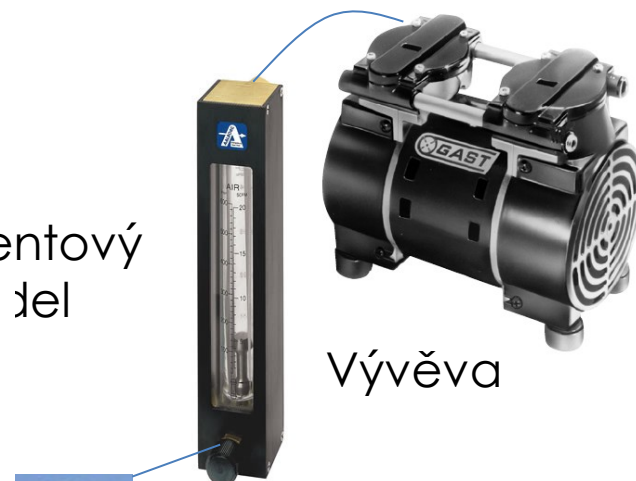
Dilutor



Klasifikátor vláken



Segmentový del



Vývěva



0 filtrů

10 rotametrů

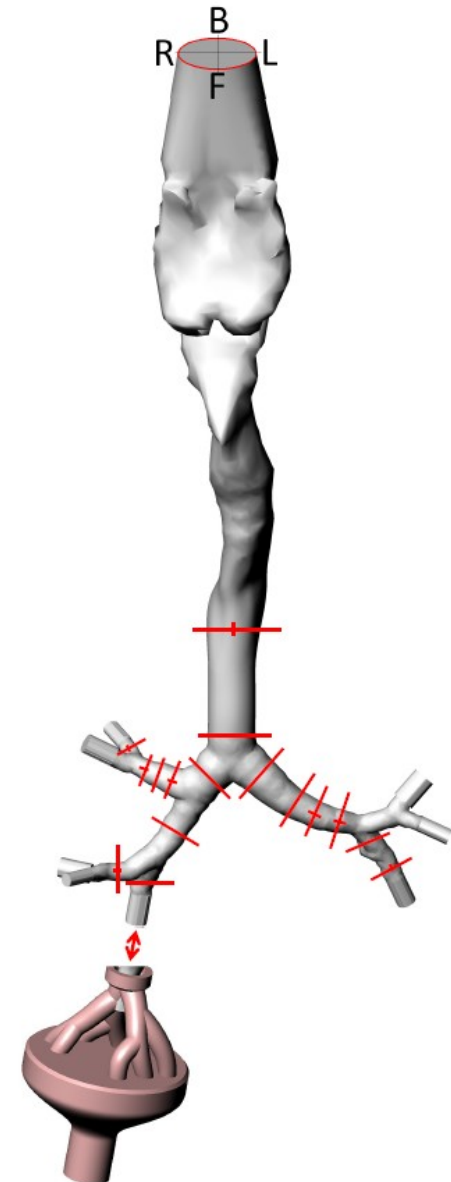
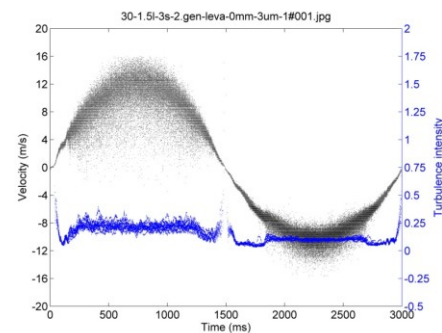
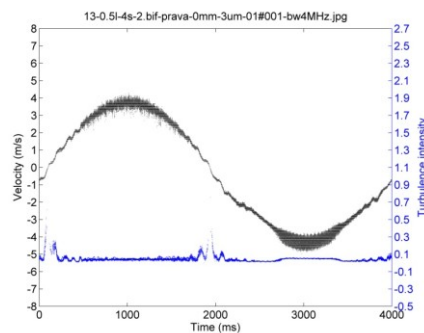
22 segmentů modelu



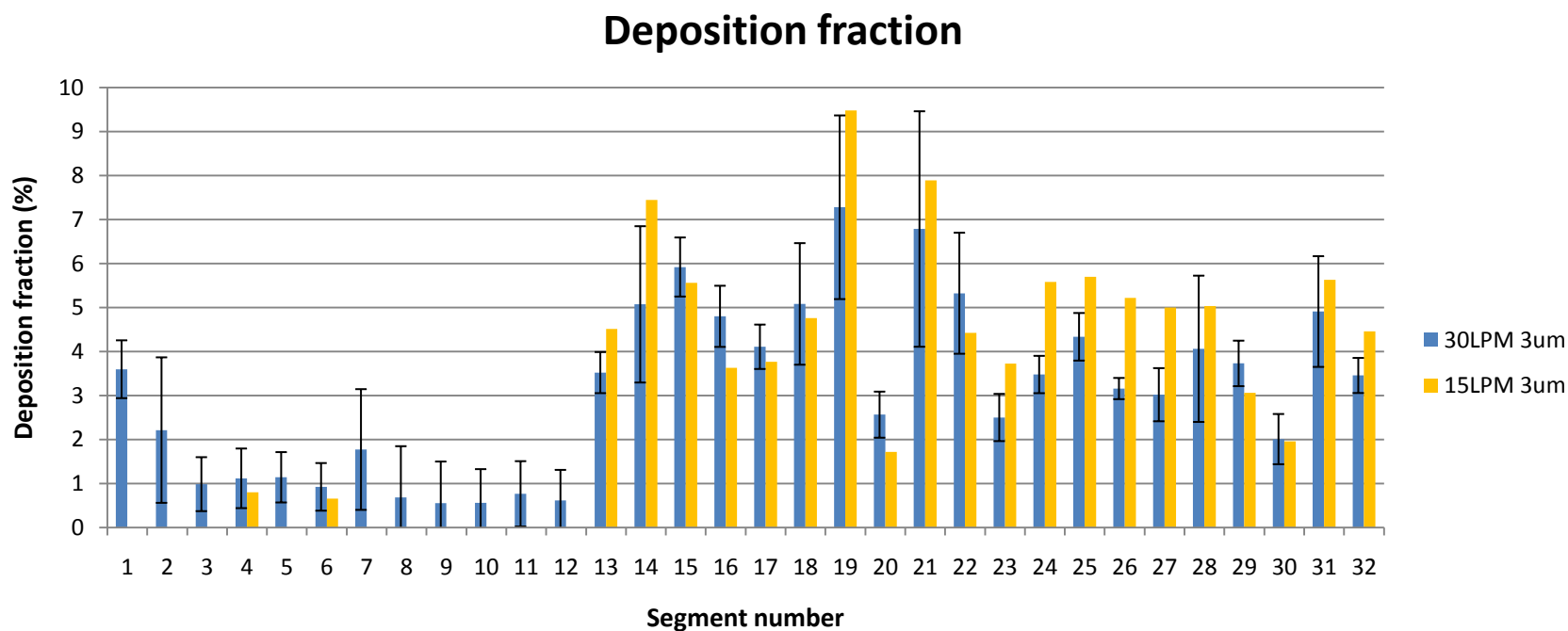
16 x 10 filtrů

Výsledky – transport aerosolu

- Proměřen realistický model v 16 řezech pro cyklické dýchání při třech režimech (klidné dýchání, lehká a střední zátěž)
- Stacionární nádech změřen ve 2 řezech pro 3 velikosti částic a tři režimy dýchání
- Celkem naměřeno cca 500 souborů o 10 dechových cyklech

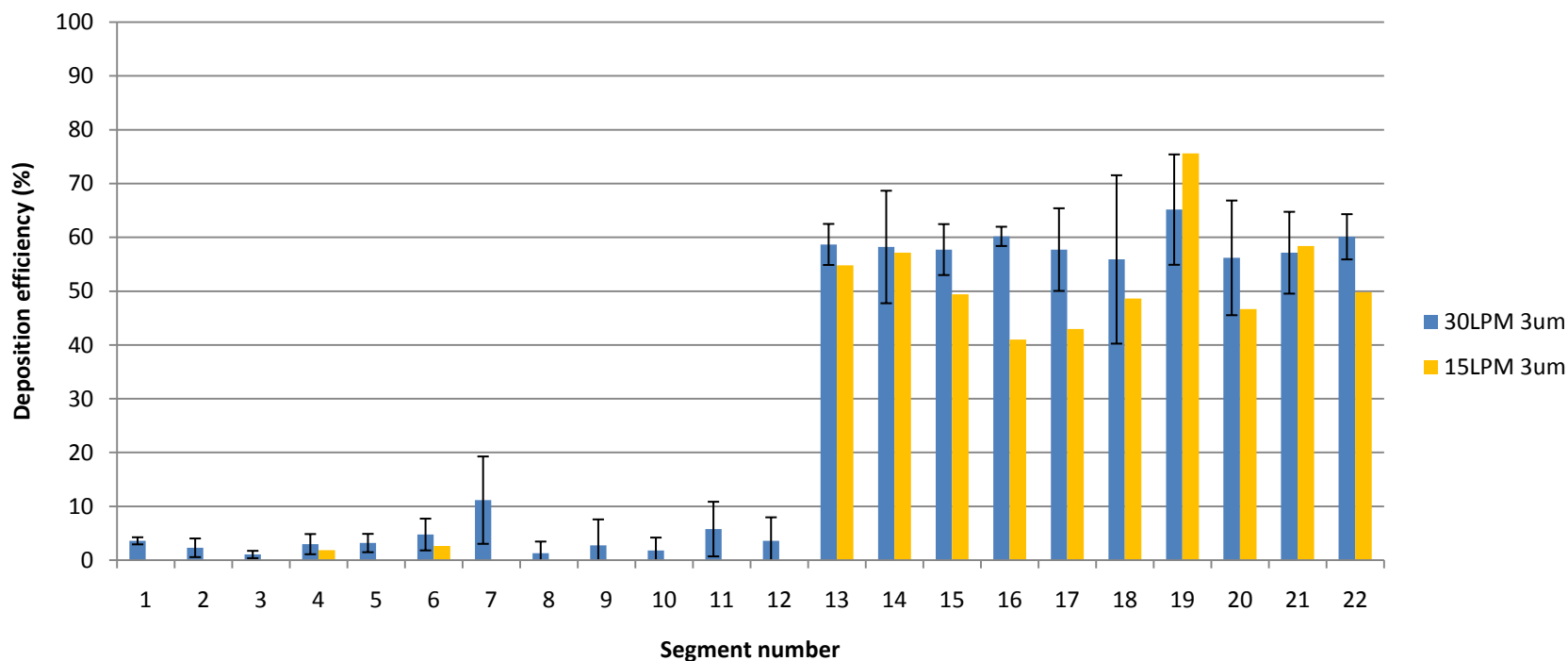


Výsledky – depozice aerosolu



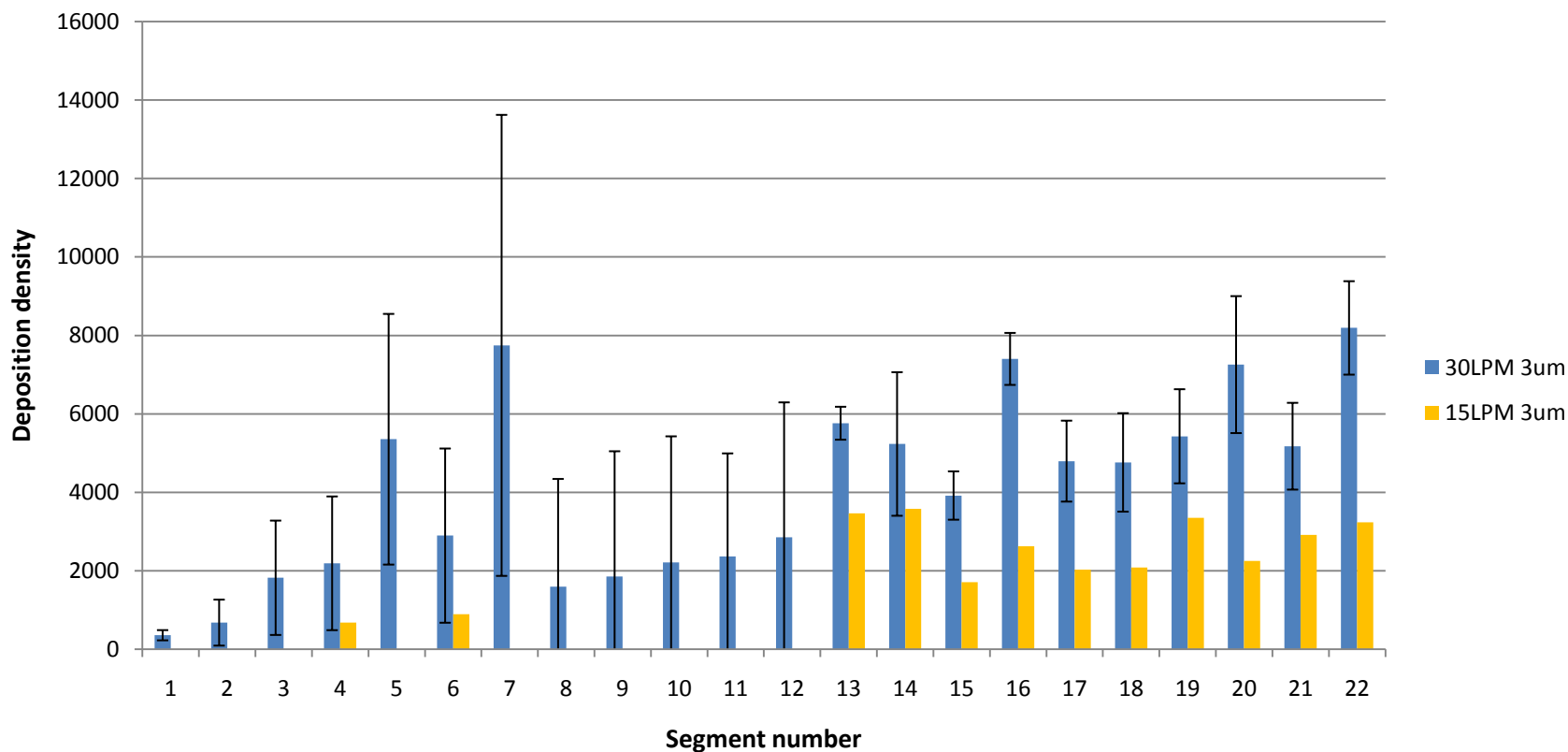
Výsledky – depozice aerosolu

Deposition efficiency



Výsledky – depozice aerosolu

Deposition density



Zhodnocení a nejbližší postup prací:

- ✓ Provedena rešerše tématu disertační práce
- ✓ Vyrobeny fyzické modely pro optické měření transportu aerosolu a pro měření depozice
- ✓ Ukončena fáze měření s pomocí PDA, pokračují depoziční měření
- ✓ Vyroben model s ústní dutinou
 - Prováděno měření depozice vláknitých aerosolů (stáž na Clarkson University, USA)
 - Analýza a korelování výsledků PDA a depozice
 - Příprava měření porézních aerosolů

Děkuji za pozornost

