

## Semirealistický segmentový model plic pro studie transportu aerosolu

**Apollo ID:** 25414

**Datum:** 17. 8. 2011

**Typ projektu:** G – funkční vzorek

**Autoři:** Jedelský Jan, Ing., Lízal František, Ing., Elcner Jakub, Ing., Jícha Miroslav, prof. Ing., CSc.

### Obecný popis

Tvar vnitřní geometrie modelu vychází z dat geometrie realistického modelu, který byl vytvořen na OTTP, FSI v Brně [1]. Zjednodušený model umožňuje oproti realistickému modelu snadnější přístup pro optické metody měření pohybu částic. Nově navržený zjednodušený model reprezentuje horní dýchací trakt od ústní dutiny do třetí až čtvrté generace větvení bronchiálního stromu. Model se skládá z realistické geometrie ústní dutiny a hrtanu, trachey a 17 větví, jejichž geometrie je zjednodušena na tvar válce, a 8 bifurkací, které byly vytvořeny s ohledem k úhlům větvení na realistickém modelu. Hlavními rysy modelu je jednoduše definovaná geometrie průhledných stěn, snadná rozebíratelnost a současně geometrická podobnost a kompatibilita s již dříve použitými realistickými modely. Fyzikální model je v této podobě používán jak pro měření proudění a transportu částic pomocí optických metod [4, 5], tak pro depoziční studie různými metodami. Umožní porovnání s výsledky získanými na již zmíněných realistických modelech. Na rozdíl od jiných zjednodušených modelů jde o model s nesymetrickým větvením (rozdílné úhly, průměry a délky dceřiných větví), větvení jsou ve 3D a složité tvary vstupní části, které generují laryngální (glottální) proud zůstaly zachovány.

## Podrobný technický popis

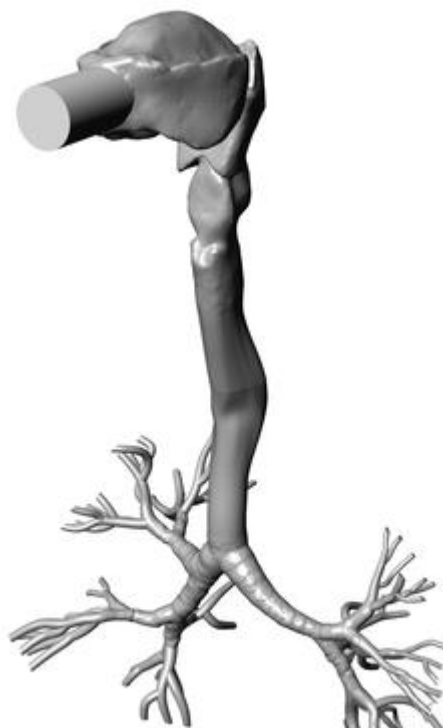
Tvar vnitřní geometrie zjednodušeného modelu vychází z dat geometrie realistického modelu, který byl vytvořen na OTTP, FSI v Brně (obr. 1). Tento model se skládá z ústní dutiny, hrtanu, trachey a bronchiálního stromu do sedmé generace větvení. Geometrická data pro konstrukci tohoto modelu byla získána ze tří zdrojů:

a) geometrie ústní dutiny, hrtanu a části trachey byla získána z Lovelace Respiratory Institute, Albuquerque, New Mexico, USA od Dr. Yung-Sung Chenga, ředitele programu Aerosol & Respiratory Dosimetry a ředitele Inhalation Drug Delivery Centre na základě dlouhodobě udržovaných kontaktů s tímto pracovištěm. Jedná se o voskový odlitek z mrtvolky [6], který byl na našem pracovišti následně pomocí 3D skeneru převeden do datové podoby.

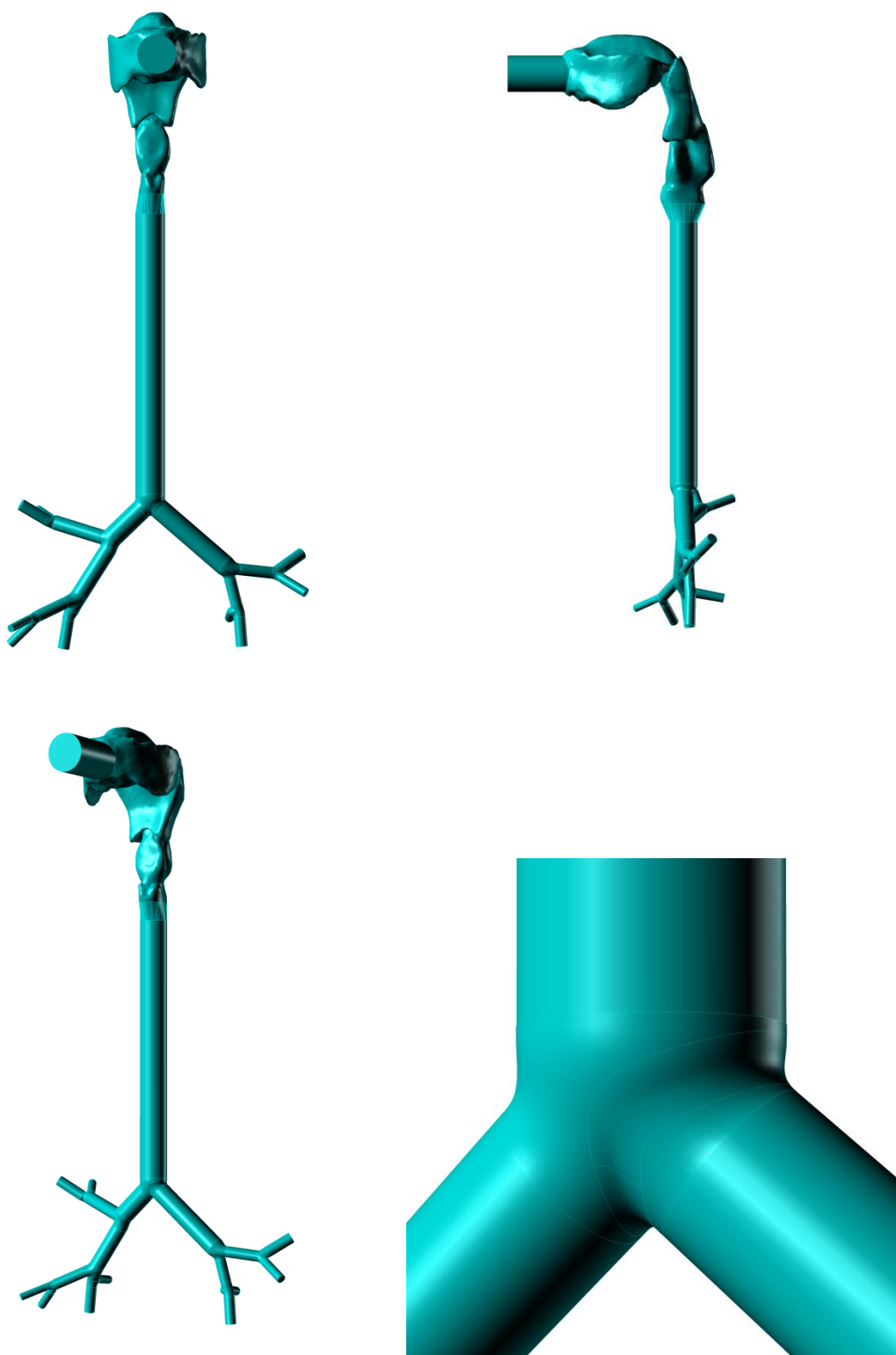
b) data pro zbylou část průdušnice (trachey) byla získána ve spolupráci s Klinikou zobrazovacích metod fakultní nemocnice U Svaté Anny v Brně provedením 3D CT In-vivo měření mužského dospělého dobrovolníka.

c) geometrie bronchiálního stromu do 7. generace větvení pochází z Institutu anatomie a buněčné biologie na Justus-Liebig university v Giessenu (Německo). Data jsme získali od prof. Kriete z Drexel University v USA. Tato digitální referenční data získaná CT s vysokým rozlišením z in-vitro vzorku plic dospělého muže se vyznačují vysokou přesností, vysokým počtem generací větvení a podrobným statistickým popisem morfologie [6].

Digitální data těchto tří zdrojů byla zkombinována a modely byly na sebe pečlivě napojeny, tak aby fyziologicky navazovaly. Dále byla provedena vektorizace metodou Marching Cubes a vyhlazení získaného geometrického modelu. Výsledkem je vektorový model ve formě polygonální trojúhelníkové sítě popisující geometrii vnitřního povrchu dýchacích cest. Tento vektorový model byl nakonec uložen ve vhodných formátech pro export do navazujících systémů (STL, VRML atd.) pro Rapid Prototyping.



Obr. 1: Geometrie realistického modelu



Obr. 2: Screeny vnitřní geometrie modelu

Realistický model umožňuje in vitro napodobit podmínky ve skutečném dýchacím traktu a charakter transportu a depozice aerosolu jsou velmi podobné realitě. Takovýto model však poskytuje velmi omezený přístup pro nám dostupné optické metody měření pohybu částic. Snahou v tomto projektu

je tedy provést takové zjednodušení geometrie, které umožní zachovat základní tvary modelu, zajistí shodu průtočných charakteristik a současně umožní snadný přístup pro laserová měření.

Nově navržený zjednodušený model (obr. 2) reprezentuje horní dýchací trakt od ústní dutiny do třetí až čtvrté generace větvení bronchiálního stromu. Model se skládá z realistické geometrie ústní dutiny a hrtanu, trachey a 17 větví, jejichž geometrie je zjednodušena na tvar válce, a 8 bifurkací, které byly vytvořeny s ohledem k úhlům větvení na realistickém modelu.

## Tvorba experimentálního modelu

Vnitřní geometrie modelu a následně i jeho jednotlivé díly byly vytvořeny v programu Rhinoceros 4.0 od firmy McNeel. Modelována byla část s ústní dutinou a hrtanem a dále bifurkace, které spojují jednotlivé větve. Pro zajištění optického přístupu do modelu, tak aby bylo možno provádět měření pomocí laserových metod a vizualizace proudění, bylo nutné zjednodušit geometrii stěn v porovnání s původní velmi realistickou geometrií. Současně byla ale snaha o co nejlepší zachování modelu, jak kvůli možnému porovnání výsledků s dřívějšími měřeními, tak pro zajištění co největší věrnosti při proudění, transportu i depozici částic. Dále bylo nutné model konstruovat tak, aby byl snadno a opakovaně rozebíratelný kvůli čištění a vyhodnocování depozičních testů. Navíc předpokládáme obměňování některých částí z důvodu upgrade, modifikaci geometrie, připojování snímačů, výměně opotřebovaných částí a případnému rozšíření modelu v jeho dolní části.

Snahou bylo minimalizovat počet dílů a současně zajistit i maximální optický přístup do modelu. Optická měření nebudou běžně prováděna ve vstupní části modelu ústní dutina – hltan – hrtan+hlasivky, ty proto mohly zůstat původní, odpovídají realistickému modelu, a byly vyráběny jako celek - díl 1 (viz obr. 3 a-c). Vstup do ústní dutiny byl opatřen sacím nástavcem o průměru 20 mm kvůli připojení přívodní hadice a pro snadnější předepsání okrajových podmínek. Na konci hrtanu se nachází přechodová část z realistické geometrie na kruhový průřez, kde je napojena trubice nahrazující tracheu. Díl byl vyráběn metodou Rapid Prototyping na stroji Fortus 400mc. Povrch stěn byl následně mechanicky vyhlazován na Finishing station. Zvolená metoda vyhlazování zajistí 15x nižší drsnost povrchu oproti původní drsnosti bez výrazné změny rozměrové přesnosti dílu. Použitý termoplast ABS-M30i je dostatečně pevný, otěruvzdorný a zajišťuje průsvitnost stěn, což je vhodné kvůli sledování stavu vnitřního povrchu modelu. Díly bifurkací 2 – 9 byly vyráběny stejným způsobem. Navíc byl vytvořen i průhledný model dílu 1 ze silikonu, pomocí upravené techniky popsané v [7]. Jako stavěcí materiál jádra modelu (negativu) byla použita tzv. vyplavitelná podpora. Tento model bude použit pro vizualizační experimenty.

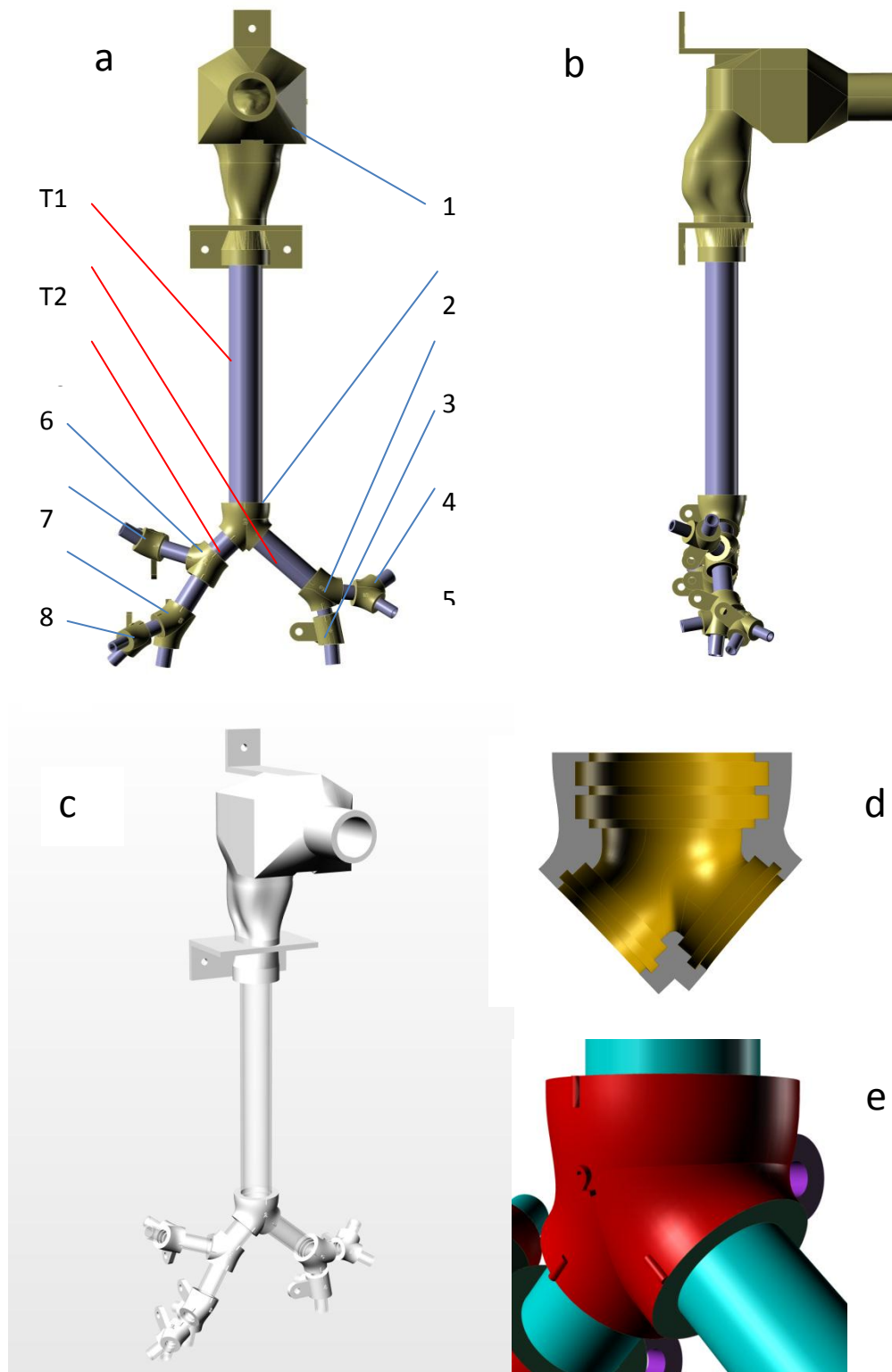
Jako nejjednodušší a současně dostatečně geometricky věrná varianta pro náhradu reálných trubic byla zvolena rotační válcová geometrie. Pro minimalizaci optických deformací při průchodu světelných paprsků stěnou bylo nutné volit tenkostěnné trubice. Kvůli dobré optické čistotě a možnosti snadného čištění a dostatečné tvrdosti povrchu bylo použito laboratorní sklo. Trachea a bronchiální větve T1 – T18 byly tedy nahrazeny skleněnými trubicemi s válcovou geometrií o daném průměru a délce (viz Tab. 1). Protože větve na realistickém modelu nemají konstantní průměr (průřez) po celé své délce, bylo nutné jejich rozměry nějak zobecnit a aplikovat na větve zjednodušeného modelu. Toho bylo dosaženo na základě podobnosti objemů větví, kdy byly voleny rozměry (průměr a délka) válců tak, aby objem ohraničený stěnou válce nahrazujícího větev a bifurkací odpovídal objemu větve mezi bifurkacemi na realistickém modelu. Průměry trubic byly

vybrány z existujících rozměrových řad dle katalogu firmy VERKON (17, 13, 11, 9, 8, 7 a 6 mm) a délky poté dopočítány aby byla splněna podmínka odpovídajícího objemu. K délce trubice bylo dále přičteno 2 x 4,2 mm (délka trubice, která bude vložena v bifurkaci) a rozměr byl zaokrouhlen na jednotky mm.

Bifurkace byly vytvořeny tak, aby respektovaly úhly větvení realistického modelu. Pro jejich vytvoření bylo nutné zjistit osu mateřské větve a osy z ní vystupujících dceřiných větví. Osy byly zjišťovány tak, že na každé z větví byly vytvořeny kontury kolmé na předpokládanou osu větve. Tyto kontury měly tvar přibližný tvaru kružnice. Kontury byly poté proloženy kružnicí a středy kružnic byla interpolována přímkou, která vytvořila osu větve. Kolmo k těmto osám byly vždy vytvořeny kružnice o průměru odpovídajícímu vnitřnímu rozměru skleněné trubice, která měla nahrazovat danou větev. Tímto postupem vznikly tři kružnice rozmístěné s ohledem na větvení realistické geometrie, které určovaly oblast, kde byla vytvořena bifurkace. Samotná bifurkace byla vytvořena tak, aby co nejvíce připomínala tvar skutečné bifurkace na realistickém modelu a jak samotná bifurkace, tak pozvolné a hladké přechody do trubic co nejméně narušovaly proudění vzduchu. Při návrhu dílu bifurkací bylo nutné optimalizovat konstrukční délku vystupujících trubic; co nejkratší, tak aby byl zajištěn optický přístup v co největším rozsahu modelu, ale současně dostatečnou pro zajištění tuhosti spojení se skleněnými trubicemi.

Naše dřívější zkušenosti ukazují, že zejména pro depoziční experimenty je nutné zajistit dobrou těsnost trubic v bifurkacích. To je řešeno pomocí o-kroužků z materiálu Viton® o rozměrech odpovídajících dané trubici (viz. Tab. 1). Každá bifurkace je na vstupu (výstup z mateřské větve) a výstupech (vstupy do dceřiných větví) opatřena hrdlem s drážkou na o-kroužek (obr. 3d). Dále jsou bifurkace opatřeny výstupkem s dírou pro šroub o průměru 4 mm pro uchycení do rámu v měřicí trati. Na každé bifurkaci je označení zamezující záměně při opakované montáži a značky, které určují vzájemné natočení bifurkace a připojené trubice (obr. 3e).

Koncové trubice jsou opatřeny přechodkami pro připojení hadic a pro uchycení do rámu modelu, aby nedošlo vlivem manipulace a sil od těžkých např. uzemněných hadic k poškození trubic nebo změně geometrie modelu.



Obr. 3: Screensy experimentálního modelu: a) čelní pohled (trubice 3 – 18 nejsou značeny), b) boční pohled, c) perspektiva, d) řez bifurkací, e) větvení.

Tab. 1: Rozměry větví

část	Realistický model		Zjednodušený model				
	objem větve	délka větve	Odpovídající válec	vnitřní průměr trubice	vnější průměr trubice	odpovídající délka trubice	zvolená délka trubice
	mm <sup>3</sup>	mm	mm	mm	mm	mm	mm
g1	24510	117	16,33	15,2	18	135,07	143
g2	3089	38	10,17	10,7	12,8	34,35	43
g3	201	6	6,53	6	8	7,11	16
g4	107	3,3	6,43	6	8	3,78	12
g5	28	1	5,97	6	8	0,99	15
g6	79	4,1	4,95	4,8	6,8	4,37	15
g7	117	5,6	5,16	4,8	6,8	6,47	15
g8	209	7,5	5,96	6	8	7,39	15
g9	992	8	12,57	10,7	12,8	11,03	19
g10	749	15,2	7,92	7,5	9	16,95	25
g11	96	3,7	5,75	6	8	3,40	15
g12	126	6,5	4,97	4,8	6,8	6,96	15
g13	1022	17,1	8,72	8,7	10,9	17,19	26
g14	78	2,3	6,57	6	8	2,76	15
g15	237	8,2	6,07	6	8	8,38	17
g16	57	3,9	4,31	4	6	4,54	15
g17	36	2	4,79	4,8	6,8	1,99	15
g18	87	4,3	5,08	4,8	6,8	4,81	15

## Základní technické parametry

průhledný model,

do 3.-4. generace větvení,

vstupní průměr modelu - vnější 30 mm, výstup - deset větví, vnější průměr 10 mm,

délka 310 mm, šířka 150 mm,

max. průtok 100l/min.



## Způsob realizace

Vyroben funkční vzorek, na kterém realizován další vývoj a ověřování

## Výsledky zkoušek, použití

Výsledek je využíván na pracovišti řešitele pro studium transportu a depozice aerosolu v dýchacím traktu člověka. Byly provedeny experimenty zaměřené na:

- zjištění průtoků vzduchu jednotlivými větvemi modelu pro několik stacionárních a cyklických režimů dýchání [3],
- měření rychlostí při transportu kapalného aerosolu pomocí fázového Dopplerovského analyzátoru (velikost kapek, rychlost), rozsah velikosti částic 1 – 10 mikronů pro tři stacionární a tři cyklické režimy dýchání v cca 10 průřezech [4-5]
- a měření usazování kapalného aerosolu pro výše uvedené podmínky.

[ 1 ] Frantisek Lizal, Jakub Elcner, Philip K Hopke, Jan Jedelsky, and Miroslav Jicha, Development of a realistic human airway model, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, March 2012; vol. 226, 3: pp. 197-207., first published on December 16, 2011. doi: 10.1177/0954411911430188.

[ 2 ] JEDELSKÝ, J.; LÍZAL, F.; JÍCHA, M. Characteristics of Turbulent Particle Transport in Human Airways under Steady and Cyclic Flows. International Journal of Heat & Fluid Flow. 2011, in print.

[ 3 ] Lizal, R.; Měření průtoku vzduchu na semi-realistickém modelu plic, (zpráva) Brno: Odbor termomechaniky a techniky prostředí EÚ FSI VUT v Brně, 2011. 13 s.

[ 4 ] J. Jedelsky, F. Lizal, J. Elcner and M. Jicha, Comparison of Particle-Laden Air Flow in Realistic and Semi-realistic Model of Human Airways, ETMM9: 9th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, (in print).

[ 5 ] J. Jedelsky, F. Lizal, J. Elcner and M. Jicha, Experimental study of aerosol transport in semi-realistic human airway model, European Aerosol Conference EAC 2012, (in print).

[ 6 ] Schmidt, A., Zidowitz, S., Kriete, A., Denhard, T., Krass, S. & Peitgen, H.-. 2004, "A digital reference model of the human bronchial tree", Computerized Medical Imaging and Graphics, vol. 28, no. 4, pp. 203-211.

[ 7 ] Lizal, F.; Výroba opticky průhledného modelu plic. (zpráva) Brno: Odbor termomechaniky a techniky prostředí EÚ FSI VUT v Brně, 2008. 9 s. 2. verze.

## Vazba na projekt

COST: OC10052 Experimentální výzkum transportu a depozice částic v oscilujícím turbulentním proudu

## Umístění

adresa: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Technická 2896/2, 61669 Brno, místnost A2/310

e-mail: [jedelsky@fme.vutbr.cz](mailto:jedelsky@fme.vutbr.cz)



## Klíčová slova

model plic, depozice částic v plicích, zjednodušený model

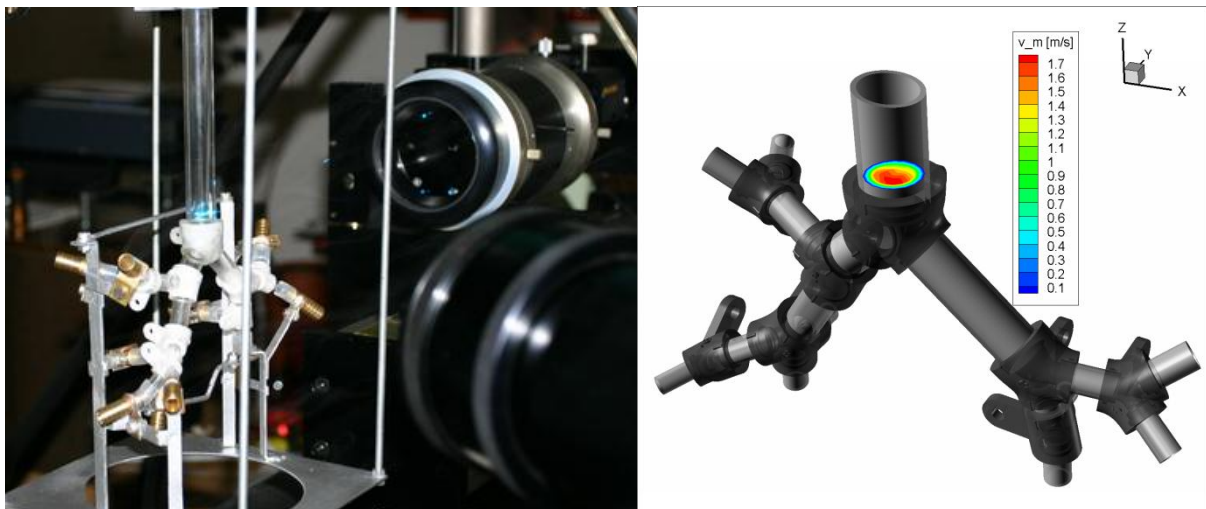
## Licenční podmínky

Využití výsledku jiným subjektem je možné po uzavření licenční smlouvy

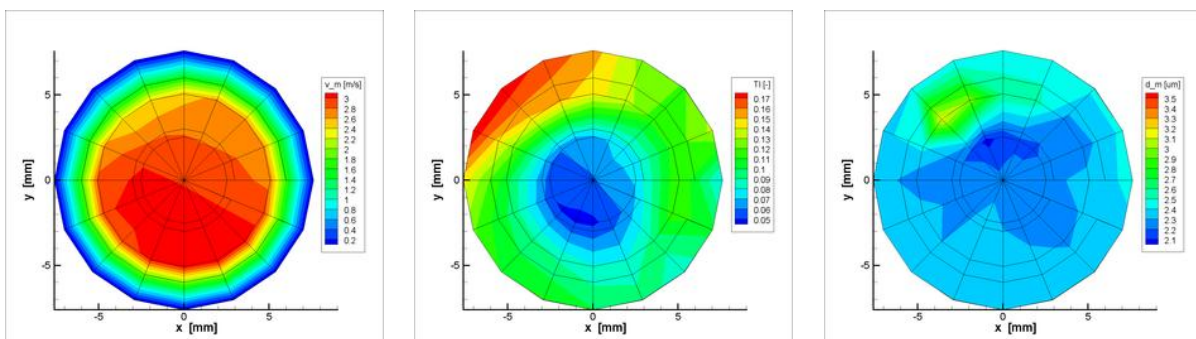
## Kontaktní osoba

Ing. Jan JEDELSKÝ, Ph.D., +420541143266, [jedelsky@fme.vutbr.cz](mailto:jedelsky@fme.vutbr.cz)

## Obrazová dokumentace



Obr. 4: Model v rámu při předběžných experimentech s PDPA (vlevo), střední axiální rychlost proudění v trachei: řez A, nádech 15l/min (vpravo).

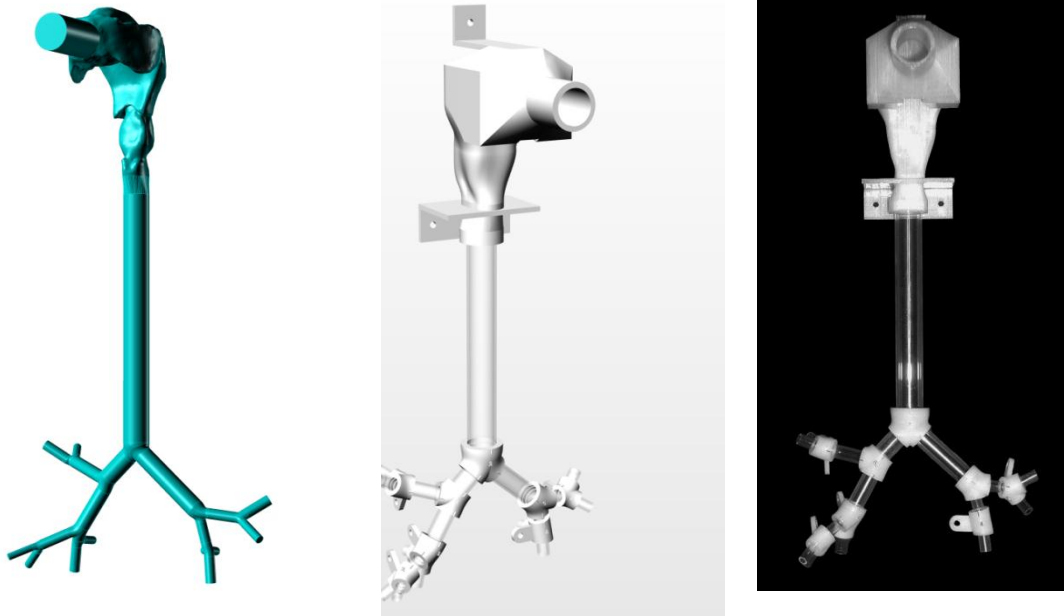


Střední rychlost

Intenzita turbulence

Průměr částic

Obr. 5: Ukázka výsledků měření v trachei: řez A, nádech 30 l/min.



Obr. 6: Vnitřní geometrie zjednodušeného experimentálního modelu (vlevo), screen vnějšího tvaru (uprostřed), fotografie skutečného modelu (vpravo).

Prohlašuji, že popsaný výsledek naplňuje definici uvedenou v Příloze č. 1 Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje v roce 2008 a že jsem si vědom důsledků plynoucích z porušení § 14 zákona č. 130/2002 Sb. (ve znění platném od 1. července 2009). Prohlašuji rovněž, že na požádání předložím technickou dokumentaci výsledku.

Ing. Jan Jedelský, Ph.D.