

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 750

ISSN 1213-418X

Jiří Pospíšil

**EMISE A ROZPTYL
AEROSOLOVÝCH ČÁSTIC**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Energetický ústav

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

EMISE A ROZPTYL AEROSOLOVÝCH ČÁSTIC

EMISSION AND DISPERSION OF AEROSOL PARTICLES

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ



BRNO 2023

KLÍČOVÁ SLOVA

Aerosol, částice, jemné částice, nanočástice, disperze, znečištění atmosféry, emise, spalování, biomasa, velikost částic, koncentrace částic, výpočtové modelování, resuspenze, 3D tisk, doprava.

KEYWORDS

Aerosol, particles, fine particles, nanoparticles, dispersion, air pollution, emissions, combustion, biomass, particle size, particle concentration, computational modeling, resuspension, 3D printing,

© Jiří Pospíšil, 2023

ISBN 978-80-214-6140-6

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1 ÚVOD.....	5
2 AEROSOLOVÉ ČÁSTICE – TEORETICKÝ VHLED.....	6
3 EMISE AEROSOLOVÝCH ČÁSTIC	8
3.1 SPALOVÁNÍ BIOMASY	8
3.2 TEPELNÁ DEKOMPOZICE PALIVA	11
3.3 EMISE ČÁSTIC Z 3D TISKU	13
4 VÝPOČTOVÉ MODELY ROZPTYLU ČÁSTIC	15
4.1 ZDROJE DOPRAVNÍCH ČÁSTIC	15
4.2 TRANSPORT ČÁSTIC VE VZDUCHU	16
4.3 ZAHRNUTÍ POHYBU AUTOMOBILŮ.....	17
4.4 VÝPOČET ROZPTYLU V OKOLÍ DOPRAVNÍ KOMUNIKACE.....	18
4.5 RESUSPENZE ČÁSTIC	19
5 AKTUÁLNĚ ROZVÍJENÉ OBLASTI.....	22
6 ZÁVĚR.....	23
7 VÝZKUMNÝ TÝM.....	24
8 CHRONOLOGICKÝ PŘEHLED MILNÍLŮ AUTORA	25
10 LITERATURA	26
ABSTRAKT	29

PŘEDSTAVENÍ AUTORA

Jiří Pospíšil se narodil v roce 1974 v Novém Městě na Moravě. Po maturitě na Střední průmyslové škole strojnické ve Žďáře nad Sázavou nastoupil studium na VUT FSI. Vysokoškolské vzdělání získal v roce 1997 absolvováním magisterského studijního oboru Tepelné a jaderné stroje a zařízení. Studium ukončil s vyznamenáním obhajobou diplomové práce na téma *Optimalizace proudění spalin v kolenu před kotlem na odpadní teplo*. Následně na Energetickém ústavu VUT FSI nastoupil doktorské studium v studijním programu Aplikované vědy v inženýrství, studijní obor Inženýrská mechanika. Studium zakončil v roce 2003 obhajobou disertační práce *Řešení rozptylu emise produkovaných automobily v městské zástavbě* a byl mu přiznán titul doktor. V roce 2007 se habilitoval na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně prací *Numerické modelování transportu suspendovaných částic generovaných silniční dopravou* a byl jmenován docentem pro obor Konstrukční a procesní inženýrství.



V roce 2003 nastoupil na Energetickém ústavu FSI VUT na pozici odborného asistenta a od roku 2007 zde působí jako docent. V letech 2007-2014 zastával funkci tajemníka Odboru energetického inženýrství, v rámci které se začal podílet na organizačním zabezpečení chodu pracoviště. V roce 2014 byl pověřen vedením Energetického ústavu FSI VUT a funkci ředitele Energetického ústavu FSI VUT vykonává dosud.

Pedagogickým zaměřením je oblast zdrojů energie a technologií pro jejich efektivní využívání, včetně hodnocení dopadů na životní prostředí. Aktuálně je garant a vyučující předmětů: *Zdroje a přeměna energie, Jaderná energetika a alternativní zdroje, Energetické stroje, Základy energetiky I, Obnovitelné zdroje energie*. V rámci pedagogického působení se aktivně věnuje podpoře praktického a názorného vzdělávání. V tomto směru sehrál klíčovou roli při vytvoření *Laboratoře paliv a spalovacích charakteristik* na EÚ FSI. K rozvoji vzdělávacích aktivit na FSI VUT přispěl i jako koordinátor vzdělávacích projektů: *Absolvent-energetik připraven pro trh práce* (OPVK, 2011-2013, hlavní řešitel), *Středoevropský energetický institut* (OPVK, 2013-2015, řešitel za VUT). Jako pedagog úspěšně vedl 103 diplomových prací, 35 bakalářských prací a pod jeho vedením obhájilo 5 studentů disertační práce. Od roku 2020 působí jako garant návazného magisterského studijního programu N0713A070008 *Energetické a termofluidní inženýrství*.

Výzkumným zaměřením je široké spektrum problémů aplikované termomechaniky v energetice. Značná část výzkumných aktivit je spojena s užíváním nástrojů výpočtového modelování (CFD) při hodnocení přenosu tepla v energetických aplikacích a řešení rozptylu znečištění v atmosféře. Již v době doktorského studia se začal věnovat výpočetnímu řešení disperze znečišťujících látek v ovzduší a následně výzkumu zdrojů jemných spalovacích a nespalovacích částic. V průběhu let koordinoval zbudování výzkumné *Laboratoře jemných spalovacích částic* a vytvořil související výzkumný tým. Byl hlavním řešitelem projektu MPO: *Solární chladičí jednotka využívající tepla solárních kolektorů*, GA: *Přenos tepla na skrápěných trubkových svazcích v podtlaku*, MO: *Termoelektrický generátor - přenosný zdroj elektrické energie*, OP VVV: *Výpočtové simulace pro efektivní nízkoemisní energetiku*.

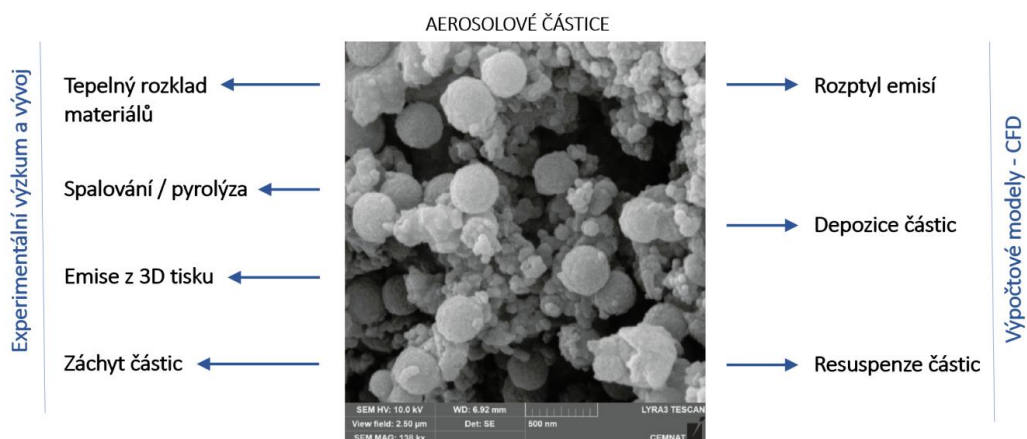
Výsledky jeho vědecké činnosti jsou prezentovány v 65 publikacích dle WoS, 78 publikací dle Scopus, přičemž 31 původních článků bylo otištěno v časopisech s IF, z čehož u 10 vystupuje Jiří Pospíšil jako hlavní autor. Mezinárodní ohlas dokládá 421 citací (bez autocitací) dle Scopus, 332 citací dle WoS. Jeho současný H-index dosahuje hodnoty 10 dle WoS, 11 dle Scopus.

1 ÚVOD

Znečištění ovzduší je jedním z nejvýznamnějších environmentálních problémů dnešní doby. V této souvislosti je značná pozornost věnována v ovzduší rozptýleným aerosolovým částicím s rozměrem menším než 10 μm , které mohou být vdechovány a potenciálně působit významné zdravotní riziko [1]. Dominantní antropogenní zdroje jemných částic v ovzduší jsou spalovací procesy a silniční doprava [2]. Jemné částice dále produkují i výrobní procesy (např. 3D tisk) a přírodní zdroje (např. mořský aerosol). Problému emise jemných částic se věnuje zvýšená pozornost posledních 30 let, kdy se drobné frakce částic v ovzduší začaly systematicky monitorovat. V roce 2000 imisní monitoring běžně sledoval frakci částic velikosti 10 μm , aktuálně sleduje frakci 1 μm . Posun k ještě menším frakcím lze očekávat v následujících letech. Aktuální výzkumné studie označují za potenciálně největší riziko pro lidské zdraví částice o velikosti 50-300 nm [3].

Společenský zájem o snižování imisních koncentrací jemných frakcí částic v atmosféře se promítl do technických opatření, která byla uplatněna v jednotlivých odvětvích. Nejrychleji byla opatření implementována v automobilovém průmyslu, omezením koncentrace aerosolových částic unášených výfukovými plyny. S odstupem řady let se požadavek na snížení emise aerosolových částic přenesl na lokální spalovací technologie, které dnes často využívají paliva na bázi biomasy. Právě lokální zdroje spalující biomasu aktuálně představují často nejvýznamnější emisní zdroj jemných částic v městských aglomeracích. V oboru lokálních spalovacích zdrojů se významně pomaleji daří implementovat vhodná, společensky přijatelná, technická řešení pro omezení emise jemných aerosolových částic.

Uvedené skutečnosti byly motivací pro realizaci širšího spektra výzkumných aktivit propojených tématem aerosolových částic a zasahujících především do oblastí spalování biomasy a provozu na pozemních komunikacích. Ve vztahu k automobilové dopravě se jedná konkrétně o využití SW nástrojů pro detailní popis rozptylu částic v okolí dopravních komunikací. V oboru energetického využití biomasy se jedná o experimentální hodnocení spalovacího procesu z pohledu emise jemných částic a omezení jejich produkce. Následující kapitoly prezentují přehled dílčích poznání, dosažených v průběhu realizovaných výzkumných aktivit.



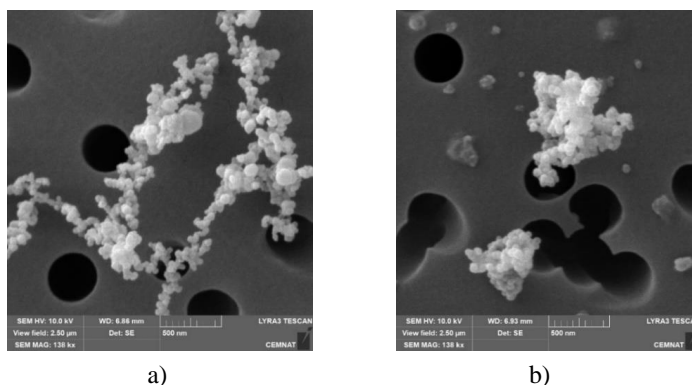
Obr. 1 Oblasti realizace výzkumných aktivit

2 AEROSOLOVÉ ČÁSTICE – TEORETICKÝ VHLED

Lidská činnost, stejně jako řada přírodních procesů, souvisí s produkcí drobných částic rozmanité velikosti. Částice větších rozměrů ($> 100 \mu\text{m}$) vznikají nejčastěji mechanicky otěrem, abrazí, rozpadem, atd. [4]. Pro tyto částice je charakteristická významná sedimentační rychlost a jejich doba setrvání v atmosféře je relativně krátká. Na druhé straně velikostního spektra částic se nachází ultrajemné částice ($< 100 \text{nm}$), které vznikají jako shluky molekul, typicky např. v průběhu počáteční fáze kondenzačního procesu (nukleace). Částice této velikosti přírodního původu jsou spojovány nejčastěji s lesními požáry nebo sopečnou činností. Nejjemnější částice produkované lidskou činností pochází dominantně z procesů, které jsou svázány s vysokou teplotou, kdy dochází k uvolňování plynných složek z ohřátého materiálu do chladnějšího prostředí. Typickým představitelem je spalovací proces, realizovaný v lokálním topeništi nebo spalovacím motoru [5]. Ultrajemné částice nesedimentují a jsou ovlivňovány Brownovým pohybem okolních molekul plynné fáze [6]. Ultrajemné částice v ovzduší setrvávají hodiny až dny a mohou být transportovány na velké vzdálenosti. Velikost částic je hlavní parametr, který ovlivňuje jejich pohyb v plynném prostředí.

V plynném prostředí rozptýlené jemné částice nejsou okem pozorovatelné a jejich přítomnost můžeme detekovat pouze pomocí vhodné měřicí aparatury. To způsobuje přirozené omezení pro poznání a ověření dílčích dějů, které se v důsledku vzájemné interakce částic odehrávají. Stejně tak není snadné najít souvislost mezi přítomností částic a jejich vlivem na ostatní děje v našem okolí. Příkladem může být kondenzace vodní páry v atmosféře při formování dešťových kapek, kdy jemné částice rozptýlené v atmosféře slouží jako kondenzační jádra. V znečištěné atmosféře vzniká větší množství menších dešťových kapek, než v atmosféře méně znečištěné [7]. Bez přítomnosti jemných částic v atmosféře, by vznik kondenzačních jader kapek vyžadoval větší podchlazení vodní páry.

Pro částice rozptýlené ve vzduchu po delší dobu je užívána řada pojmů: polétavý prach, suspendované částice, jemné částice, aerosolové částice, nanočástice aj. Různorodost těchto pojmů souvisí s oborově zaměřeným pojmenováním konkrétního spektra částic. V tomto směru se jako základní názvosloví užívá pojem aerosolové částice. Aerosol obecně zahrnuje plynné prostředí s přítomnými kapalnými a tuhými částicemi velikosti 1 nm až cca $100 \mu\text{m}$ [8]. Tato velikost částic zajišťuje významnou dobu setrvání částice v atmosféře. Vzhledem k průběžné depozici částic, vzniku částic nových a transportu částic, představuje každý aerosol dynamický systém. V případě, že jsou částice v aerosolu po určitou dobu homogenně rozloženy, označujeme aerosol jako stabilní.



Obr. 2 Ukázka částic produkovaných při spalování biomasy: a) spalování plamenem, b) žhnutí tuhého zbytku

Částice aerosolu se vyznačují velkou tvarovou rozmanitostí. Primární částice vzniklé kondenzací jsou blízké kulovému tvaru v důsledku působení povrchového napětí kapalné fáze. Tyto částice následně mohou vytvářet větší shluky řetězením a vzájemnými kolizemi, čímž vzniká nepravidelná struktura větších částic. Naproti tomu částice vzniklé krystalizací jsou typicky bez vnitřních dutin pravidelného nekulového tvaru. Pro potřeby popisu pohybu částic v plynném prostředí je nezbytné definovat charakteristický rozměr částice, který vhodně zohledňuje aerodynamický odpor a hustotu částice. Pro tento účel je užíván tzv. aerodynamický průměr, který odpovídá průměru kulové částice o hustotě 1000 kg/m^3 , která má stejnou pádovou rychlost jako skutečná částice. Jako hrubé aerosolové částice jsou označovány částice s aerodynamickým průměrem menším než $10 \text{ }\mu\text{m}$ (PM₁₀). Částice menší jak $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ (PM_{2,5}) jsou nazývány jemné částice, pojmem ultrajemné částice označujeme částice menší než $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ (PM_{0,1}) a částice s velikostí pod 50 nm jsou nazývány nanočástice. [9].

I přes skutečnost, že legislativa sleduje nejčastěji hmotnostní koncentraci částic, je základní charakteristikou aerosolů početní koncentrace částic vztažená na jednotku objemu plynu. U nejjemnějších částic je často hmotnostní koncentrace sice zanedbatelná, ale jejich počet a specifický povrch nabývá významných hodnot. V tomto ohledu je pro jemné částice charakteristická dobrá korelace mezi specifickým povrchem částic a zdravotními riziky souvisejícími s jejich vdechnutím [10], [11]. Částice s aerodynamickým průměrem menším než $10 \text{ }\mu\text{m}$ (PM₁₀) pronikají do dýchacích cest člověka [12]. Částice s rozměrem menším než $1 \text{ }\mu\text{m}$ jsou schopné pronikat do plic a nanočástice mohou cestou plicních sklípků (přes alveolokapilární membránu) přecházet společně s plyny do krevního oběhu [13], [14]. Zdravotním důsledkem vdechování jemných částic mohou být různé typy respiračních a kardiovaskulárních onemocnění. Zdravotní rizika jemných částic jsou spojena se složením částic (těžké kovy, PAHy) a tvarem částic (kuličky, vlákna, jehlice).

Typickým chováním částic je shlukování do větších celků – koagulace. Při vzájemném kontaktu dvou menších částic dochází vlivem působení van der Waalsových adhezních sil a elektrostatických sil k vytvoření větší částice. Rychlost koagulace roste se zvětšující se početní koncentrací částic a nárůstem intenzity turbulence proudu. Nárůst velikosti částic může být dále podpořen kondenzací par na povrchu částic. Částice se mohou ale i rozpadat. K rozpadu dochází při vzájemných kolizích částic větších rozměrů (dostatečná hybnost), v důsledku působení odstředivých sil při intenzivní rotaci částic, nebo v důsledku vibrací.

Přirozeně vyskytující se aerosoly v ovzduší jsou polydisperzní a vyskytují se v nich částice z celého velikostního intervalu aerosolových částic. Existují však velikosti, které se v důsledku probíhajících procesů vyskytují pravidelně s větší četností než jiné [6], viz módy v obr. 4. Tato pravidelnost souvisí s mechanismy vzniku částic a následnými růstovými a transformačními mechanismy.

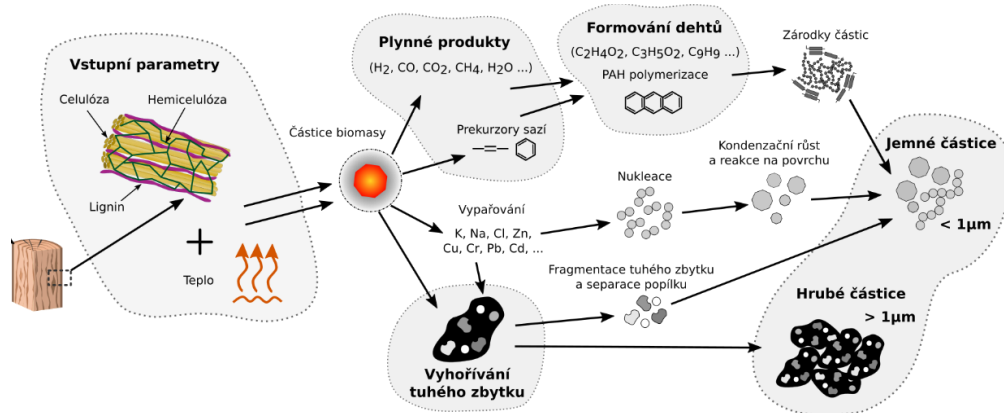
Částice rozptýlené v plynném prostředí jsou unášeny proudem pohybující se kontinuální fáze (advekcí) a intenzivně rozptylovány turbulentním charakterem proudění. Molekuly kontinuální fáze jsou v neustálém Brownově pohybu a narážejí na částice. Pohyb částic je v takovém případě ovlivněn difuzí, která představuje nejdůležitější transportní mechanismus na krátké vzdálenosti pro částice menší než $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ [15]. S narůstající velikostí částic se zvětšuje význam gravitace, která se projevuje růstem pádové (sedimentační) rychlosti. Gravitace je nejvýznamnější transportním mechanismem v klidném prostředí pro částice o velikosti $1 \text{ }\mu\text{m}$ a více. Při změně relativní vlhkosti prostředí dochází ke změnám vlhkosti částic, což se projevuje změnou hmotnosti případně i velikosti částic [16].

3 EMISE AEROSOLOVÝCH ČÁSTIC

Hlavními antropogenními zdroji jemných částic v našem okolí jsou spalovací procesy, silniční doprava a výrobní procesy významně ohřívající zpracovávaný materiál. Spalování biomasy v lokálních topeništích se v posledních letech nejvýznamněji podílí na znečištění městského ovzduší jemnými aerosolovými částicemi v zimním období.

3.1 SPALOVÁNÍ BIOMASY

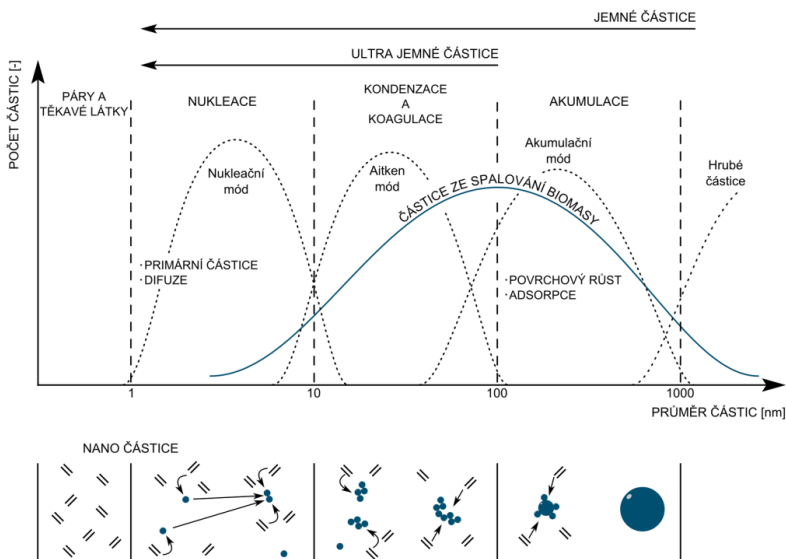
Spalovací aerosolové částice vznikající v souvislosti se spalováním biomasy jsou ovlivněny typem spalovacího zařízení, druhem spalované biomasy a podmínkami spalovacího procesu (teplota, distribuce vzduchu). Nejvýznamnější prvky tvořící biomasu jsou C, O, H, N a S. Další prvky se vyskytují v biomase pouze ve velmi malém množství a jsou součástí anorganických sloučenin tvořících popelovinu, typicky Si, K, Ca, Mg, Al [17]. Z pohledu struktury lze biomasu rozdělit na celulózu, hemicelulózu a lignin.



Obr. 3 Vznik aerosolových částic při spalování biomasy [18]

Hrubé částice přítomné v proudu spalin vznikají úletem vyhořelých částic paliva a popeloviny. Jemné frakce částic vznikají kondenzací odpařených složek paliva při ochlazení spalin. Další proces tvorby částic souvisí s nedokonalostí spalování, kdy odpařené uhlovodíky při ochlazení formují drobné dehtové částice a saze. Produkci částic významně ovlivňuje voda obsažená v palivu, která snižuje teplotu spalování. Nižší teplota spalování přispívá k nedokonalosti spalovacího procesu a přítomnost vyššího podílu vodní páry ve spalinách podporuje růst jemných částic v důsledku absorpce a kondenzace.

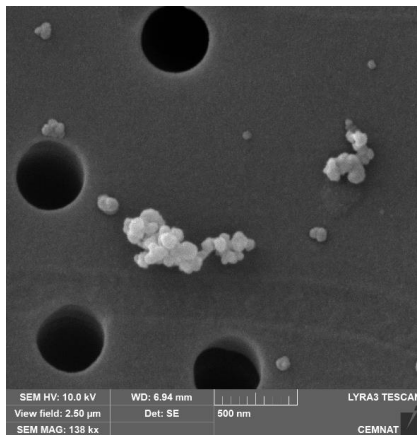
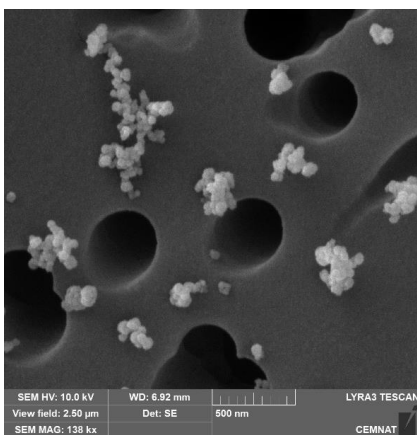
Hlavním stavebním prvkem většiny spalovacích aerosolových částic je uhlík. V této souvislosti se daří hmotnostní emisi spalovacích částic redukovat dostatečně vysokou teplotou v ohništi, přítomností odpovídajícího množství kyslíku a dostatečně dlouhým setrváním částic v těchto podmínkách [19]. Úspěšnost uvedené redukce je nesporná, především při snižování hmotnostní koncentrace částic větších než 0,5 μm. Postupný vývoj spalovacích technologií v tomto směru snížil hmotnostní koncentraci aerosolových částic především redukcí počtu částic větších než 1 μm. Moderní nízkoemisní spalování biomasy se vyznačuje malou hmotnostní emisí aerosolových částic, ale velkou početní koncentrací částic v rozsahu velikostí 30-300 nm, viz obr. 4.



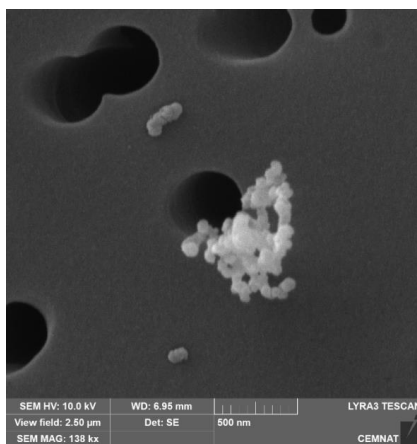
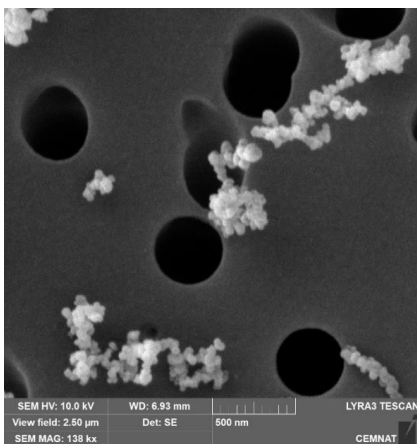
Obr. 4 Velikostní distribuce spalovacích částic moderních biomasových kotlů, upraveno z [20]

Početní koncentrace ultrajemných částic moderních biomasových kotlů mohou být paradoxně i vyšší než u kotlů starších konstrukcí. Tomu přispívá potlačení fáze kondenzačního růstu částic při vyhoření většiny prchavé hořlaviny (těkavých složek paliva). Efektivnost vyhoření prchavé hořlaviny souvisí významně se způsobem distribuce spalovacího vzduchu, kterému je věnována hlavní pozornost vývoje moderních spalovacích komor. Způsob distribuce vzduchu má přímou souvislost s produkcí jemných frakcí částic. Na jedné straně částice vznikají v prostředí s velkým podílem par prchavé hořlaviny i v prostředí vysokých teplot a opožděný přívod spalovacího vzduchu umožňuje zformování větší hmotnosti částic. Na straně druhé, chladnější proud spalovacího vzduchu pronikající do spalin podporuje intenzivní kondenzaci přítomných par na okraji pronikajícího proudu vzduchu. Čehož důsledkem je nukleace velkého počtu částic. Koncentraci a velikostní distribuci emitovaných částic ovlivňuje dále teplota spalovací komory. Při poklesu teploty pod cca 500 °C dochází k výrazně větší produkci částic, jako důsledek snížení účinnosti spalování tuhé i plynne hořlaviny, ochlazované zářivým tepelným tokem. Ze stejného důvodu jsou produkovány zvýšené koncentrace částic při zapalování nebo vyhasínání topeniště. Z detailní analýzy produkce submikronových částic v průběhu spalování kusového dřeva je možné identifikovat dvě odlišné fáze spalovacího procesu: 1. fázi spalování s viditelným plamenem a 2. fázi spalování odplyněného zbytku paliva. V průběhu 1. fáze spalování jsou dominantně emitovány částice s velikostí 50-350 nm, které jsou běžně tvořeny až z 95 % uhlíkem. Ve 2. fázi spalování jsou produkovány nižší početní koncentrace částic, které jsou velikostně významně menší, 30-150 nm, s podílem uhlíku do 85 % [21].

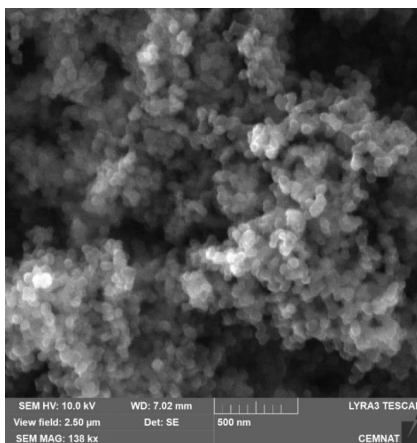
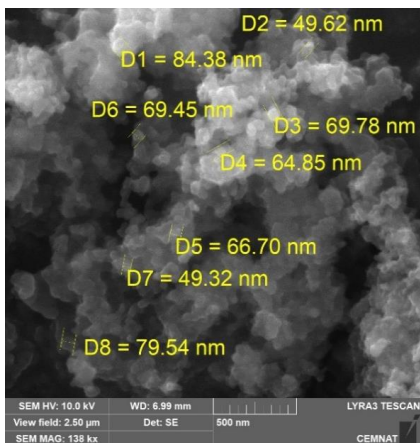
Uvedený popis dokládá relativně dobrou úroveň poznání spalovacího procesu s ohledem na emisi aerosolových částic při energetickém využití biomasy. To se může zdát ve značném rozporu s vysokým emisním zatížením řady obydlí, ať již městských či venkovských sídel. Tento stav je důsledkem nedostatku vhodných technických řešení, která by byla společensky přijatelně implementována ve spojení s používanými lokálními zdroji, vyznačujícími se značnou technickou rozmanitostí. Nejedná se však pouze o emise do venkovního prostředí, ale významná je i emise z těchto zdrojů do vnitřního prostředí budov.



a) částice ve spalínách při 350 °C



b) částice ve spalínách při 250 °C

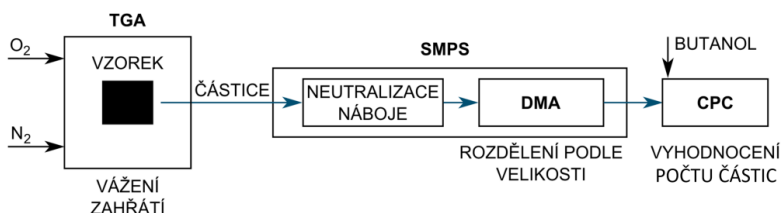


c) nános částic zachycený na filtru při teplotě okolí

Obr. 5 Ukázka morfologie submikronových spalovacích částic zachycených při spalování bukového dřeva: levý sloupec – 1. fáze spalování, pravý sloupec – 2. fáze spalování

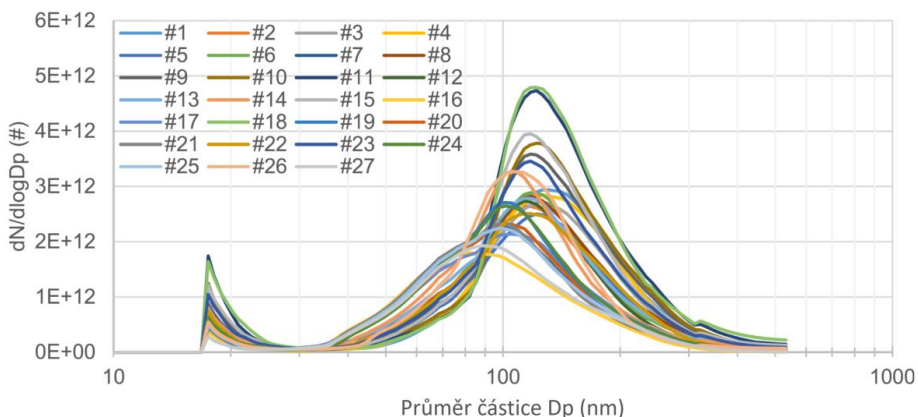
3.2 TEPELNÁ DEKOMPOZICE PALIVA

Spalování v reálném spalovacím zařízení je komplexní proces, ve kterém je obtížné korektně identifikovat vliv vybraného parametru na tvorbu a růst aerosolových částic. Pro eliminaci vlivů nesledovaných parametrů jsou využívány různé laboratorní přístupy. Jedním z přístupů je propojení termogravimetrická analýzy s detekcí vznikajících částic. Tento přístup využívá řízený ohřev malého vzorku paliva, což umožňuje předpokládat jeho téměř homogenní prohřátí. Vzorek je umístěn v plynném prostředí o známém složení a nepřetržitě vážen. Vztah mezi hmotností vzorku a teplotou vzorku identifikuje uvolňování prchavých složek a průběh tepelné dekompozice vzorku. Proud protékajícího plynu obohacený o produkty spalování, těkavé složky a aerosolové částice je veden z termogravimetru do analyzátoru částic. Částice jsou v elektrostatickém poli rozříděny dle velikosti a následně dochází k identifikaci jejich početního zastoupení v jednotlivých velikostních třídách.



Obr. 6 Propojení termogravimetrická analýzy a identifikace emitovaných částic

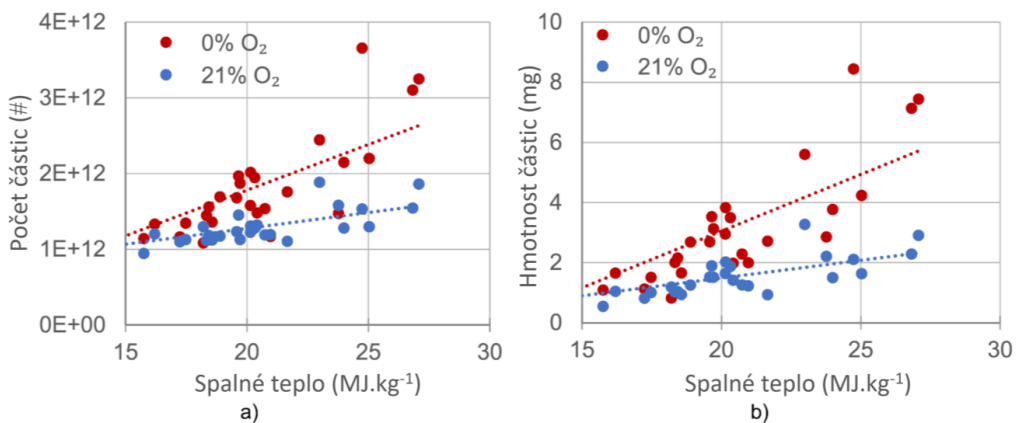
Uvedený postup identifikuje koncentraci emitovaných částic a jejich velikostní distribuci v závislosti na teplotě vzorku. Vzhledem k blízké podobnosti prvkového složení různých typů suché palivové biomasy je blízká i podobnost distribuce emitovaných submikronových částic. Obr. 7 prezentuje velikostní distribuci a počet částic uvolněných při ohřevu většího počtu vzorků biomasy, zahrnujících energeticky využívané byliny i dřeviny. Ohřev byl realizován rovnoměrně z teploty 20 °C na teplotu 600 °C, s teplotním nárůstem 10 °C/min. Uvedený počet částic odpovídá ve všech případech vzorkům paliva s hmotností 50 mg. Ze závislosti na obr. 7 je patrné, že submikronové částice jsou dominantně produkovány ve velikostním rozsahu 30-300 nm s maximální produkcí v rozsahu 100-200 nm [22]. Na uvedené závislosti je dále patrný zvýšený počet částic s rozměrem menším než 20 nm.



Obr. 7 Velikostní distribuce částic emitovaných v průběhu termogravimetrická analýzy vzorků různých druhů biomasy [22]

Tento trend je získán na dolní hranici detekovatelnosti použitou aparaturou a ve shodě s poznatky jiných autorů naznačuje lokálně zvýšenou koncentraci částic vznikajících v nukleačním módu. Přítomnost kyslíku v atmosféře obklopující vzorek způsobuje po překročení zápalné teploty spalování vzorku.

V inertní atmosféře výsledky odpovídají pyrolýze paliva, kdy oxidační procesy jsou umožněny pouze v omezené míře, kyslíkem obsaženým ve vzorku. Důsledkem je významné zvýšení hmotnostní i početní koncentrace submikronových částic při tepelném rozkladu paliva v inertní atmosféře (0 % O₂) v porovnání s běžnou atmosférou (21 % O₂), viz obr. 8. Velikostní distribuce částic je v obou porovnávaných případech blízká. Zobrazený trend nárůstu počtu částic se zvyšující se výhřevností vzorku biomasy souvisí s větším podílem hořlaviny u výhřevnějších vzorků. Vzhledem ke komplexnosti spalovacího procesu, zahrnuje spalování biomasy současně zóny spalování i zóny pyrolýzy. Reálnou hodnotu emise submikronových částic je tedy možné pro spalovací zařízení očekávat v intervalu ohraničeném emisí spalovacího procesu a emisí pyrolýzního procesu. Zcela opačný trend vykazuje závislost množství emitovaných částic a obsah popelu v palivu. Zvyšující se obsah popelu snižuje počet emitovaných submikronových částic jak při pyrolýze, tak i při spalování. Příčinou je vyšší teplota spalování povrchové vrstvy paliva chráněné popelem. Vrstva popela dále slouží jako přirozený „filtr“ pro záchyt částic odcházejících z paliva.



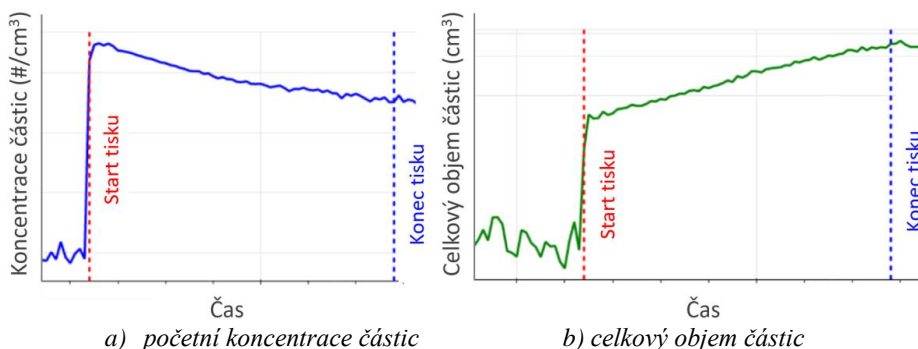
Obr. 8 Závislost počtu částic (a) a hmotnosti částic (b) na spalném teple vzorků biomasy [22]

Produkcí částic identifikovanou v laboratorních podmínkách není snadné zobecnit pro reálný spalovací proces [21]. Početní emise částic uvolněná z jednotkové hmotnosti paliva v termogravimetru vychází obecně výrazně vyšší (cca 200 %) než emise reálného spalovacího zařízení. Příčinou je paradoxně vysoká čistota plynu vstupujícího do laboratorního zařízení, kdy jsou formovány velké početní koncentrace částic nukleací. U reálných spalovacích zařízení již přiváděný spalovací vzduch částice obsahuje a kondenzující páry se přednostně podílí na růstu velikosti existujících částic. V laboratorních podmínkách vzhledem k omezené velikosti ohřívání části přístroje dochází k rychlému ochlazení odcházejícího proudu plynu s částicemi. To opět přispívá k přítomnosti velkého množství drobných částic. Reálná spalovací zařízení naproti tomu nabízí delší dobu setrvání plynných látek v oblasti zvýšené teploty, výrazně turbulentnější charakter proudění plynu a větší pravděpodobnost kontaktu částice se stěnou. Dobrá korelace dále existuje mezi úbytkem částic depozicí a plochou povrchů spalovací komory a spalinové cesty.

3.3 EMISE ČÁSTIC Z 3D TISKU

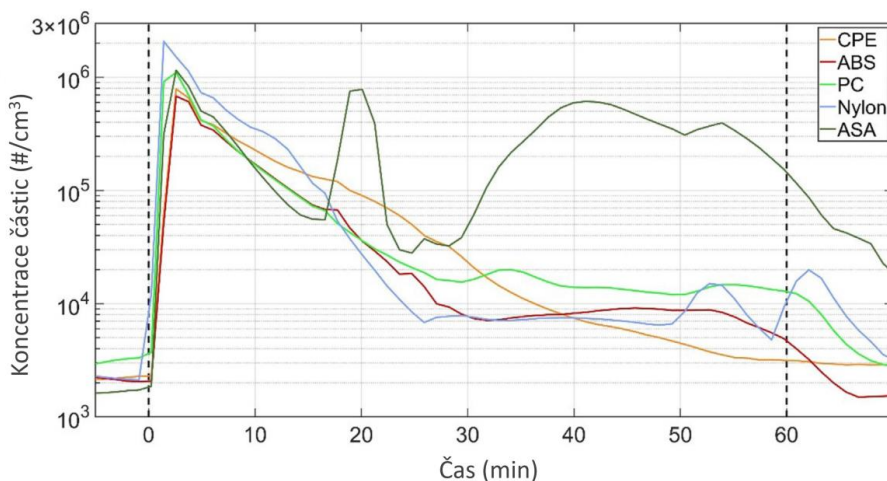
3D tiskárny představují moderní progresivní aditivní technologii založenou na postupném nanášení ohřátého tiskového materiálu (FDM tisk). Vstupující filament tiskového materiálu prochází tiskovou hlavou, kde je před vlastním nanesením ohřát na teplotu 150-270 °C [23]. Tato teplota způsobuje emisi aerosolových částic, jejichž množství souvisí s teplotní a chemickou odolností tiskového materiálu [24]. Produkované částice jsou složeny především z částečně těkavých organických sloučenin [25]. Velikost vznikajících částic je ovlivněna jejich složením, koncentrací a podmínkami prostředí. Růst částic souvisí s mechanismy polymerizace, koagulace, aglomerace a kondenzace [26]. Dále je velikost emitovaných částic ovlivněna aditivou, která tvoří stabilizátory, barviva a antioxidanty [25]. Řada studií potvrzuje, že 3D tisk (FDM) emituje až 95 % částic velikosti menší než 100 nm [27]. Uvedené skutečnosti naznačují potenciální zdravotní rizika související s vdechováním emitovaných částic rozptýlených ve vnitřním prostředí.

Emise aerosolových částic se v průběhu 3D tisku významně mění. Při její kvantifikaci sledujeme koncentraci v prostoru tiskárny uzavřené v hermetickém krytu. Pro 3D tisk jsou charakteristické vysoké početní koncentrace částic krátce po zahájení tisku [28]. To je způsobeno uvolněním těkavých látek do „čistého“ vzduchu, což vede k nukleaci velkého počtu ultrajemných částic. Omezené množství těkavých par neumožňuje nárůst větší velikosti částic v úvodní fázi tisku. V průběhu tiskové úlohy následně dochází k významnému poklesu počtu částic. Současně dochází k nárůstu velikosti částic [29]. To odpovídá růstové fázi částic způsobené především koagulací a kondenzací na povrchu částic. Fáze poklesu počtu částic při kontinuálním tisku probíhá typicky cca 30 min. Po fázi snížení početní koncentrace dochází k ustálení koncentrace a velikostní distribuce částic. V ustáleném stavu se emise a depozice částic na povrchových plochách pod krytem dostávají do rovnováhy.



Obr. 9 Charakteristické průběhy koncentrace částic v průběhu tiskové úlohy, měřeno pod krytem tiskárny, použit tiskový materiál PET-G, upraveno z [31]

Trendově odlišný charakter má hmotnostní (objemová) koncentrace částic. Hmotnostní koncentrace emitovaných částic v průběhu tisku narůstá v důsledku zvětšujícího se průměru částic od počátku tisku po vytvoření rovnováhy. Nárůst hmotnosti částic v této etapě je natolik významný, že dostatečně kompenzuje i početní úbytek částic. Porovnání početní koncentrace částic pod krytem FDM 3D tiskárny realizující testovací tiskovou úlohu s různými typy tiskových materiálů je znázorněno na obr. 10. Počet částic velikosti menší než 600 nm vztahený na 1 g tiskového materiálu byl pro testované tiskové materiály identifikován v rozsahu 10^7 - 10^{11} částic/g. V rámci testovaného souboru tiskových materiálů, byla pod krytem tiskárny identifikována velikostní distribuce částic s mediánem v intervalu 26-56 nm a početní koncentrace částic v intervalu 10^3 - 10^6 částic/cm³ [30].



Obr. 10 Početní koncentrace částic pod krytem tiskárny, v průběhu 3D tisku různými tiskovými materiály [30]

Doporučená teplota ohřátí materiálu v tiskové hlavě je výrobcí uváděna v rozsahu přibližně 20 °C. Uvedený teplotní rozsah se nachází těsně nad teplotou měknutí tiskového materiálu, kde každé zvýšení teploty přispívá ke zvýšení emise částic. Realizované studie ukazují, že maximální koncentrace částic nezávisí dominantně na hmotnostním toku tiskového materiálu, ani na rychlosti tisku. Významně větší vliv mají na emisi částic parametry trysky tiskové hlavy. Vliv teploty byl již zmíněn, ale zanedbatelný není ani vliv průmětu trysky. Zvětšující se průměr trysky tiskové hlavy vede u většiny tiskových materiálů k nárůstu emise částic. Některé materiály se ale v tomto parametru chovají opačně [31].

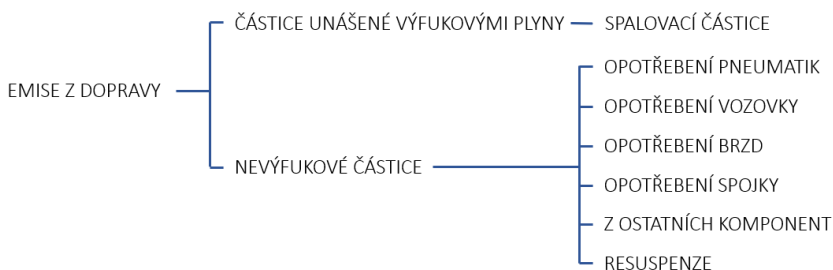
Poměrně dobře lze emisi submikronových částic z 3D tisku predikovat na základě emise identifikované laboratorně z termogravimetrické analýzy doplněné o identifikaci vznikajících částic. Emise částic příslušná jednotkové hmotnosti tiskového materiálu je v obou případech blízká, pokud je při termogravimetrické analýze realizován rychlý ohřev materiálu na tiskovou teplotu a po krátkém zdržení je teplota snížena. Tím jsou navozeny teplotní podmínky odpovídající tisku.

Emise částic představuje nežádoucí parametr, na který výrobcí reagují vývojem tiskových materiálů se sníženou emisí částic. Nízkoemisní filameny se ve většině případů vyznačují horšími mechanickými vlastnostmi. Nejefektivnější cestou k omezení emise částic z 3D tisku je použití krytů zamezujících pronikání částic z tiskárny do okolí. Částice setrvávající pod krytem, vlivem zvýšené koncentrace narůstají, přichází do kontaktu s povrchy krytu, kde deponují. A při dostatečném nárůstu velikosti sedimentují. K úniku částic z krytu dochází pouze při otevření krytu po ukončení tiskové úlohy. I tuto nežádoucí emisi je možné významně omezit použitím vnitřní cirkulace vzduchu přes HEPA filtr (high efficiency particulate arrestance). Separční povrchy jsou u filtrů tvořeny vlákny, která při dostatečném počtu vrstev a vhodné rychlosti proudění plynné fáze zajišťují vysokou účinnost filtrace jemných částic, až 99,95 %. Zvýšením rychlosti proudění skrz filtr dochází k zlepšení podmínek pro záchyt větších částic v důsledku zvýšení vlivu setrvačných sil (impakční záchyt). Snížení rychlosti proudění zvyšuje efektivnost záchytu částic nejmenších rozměrů, v důsledku delší doby setrvání a separace v důsledku difuze částic.

4 VÝPOČTOVÉ MODELY ROZPTYLU ČÁSTIC

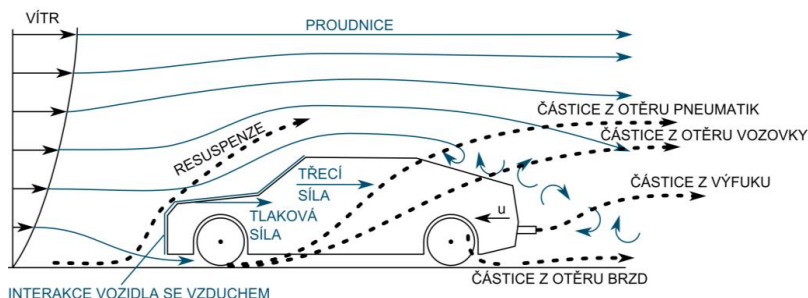
4.1 ZDROJE DOPRAVNÍCH ČÁSTIC

Silniční doprava představuje významný zdroj aerosolových částic v těsné blízkosti chodců a budov. Částice emitované silniční dopravou lze rozdělit do dvou kategorií: 1) *částice unášené výfukovými plyny* – vznikají dominantně v důsledku nedokonalého spalování paliva a odpařování maziv, 2) *nevýfukové částice* – vznikají mechanickými procesy (otěrem brzd, spojky, pneumatik, vozovky a korozi) nebo zvířením částic deponovaných na vozovce (resuspenzi) v důsledku pohybu automobilů.



Částice související s výfukovými plyny spadají dominantně do velikostní frakce PM_{2,5}. Částice vznikající abrazí představují hrubší frakci, pokud vznikají za teplot blízkých okolí. V případě významného zvýšení pracovní teploty (intenzivní činnost brzd, spojky) dochází i při abrazivním opotřebením k produkci významného množství jemných částic.

Nezbytným krokem pro pochopení zákonitostí transportu suspendovaných částic v ovzduší, zviditelnění jejich toků, identifikaci rizikových oblastí se zvýšenou koncentrací a testování vlivu navržených opatření je vytvoření odpovídajících matematických modelů. Modelování transportu aerosolových částic představuje komplexní problém vyžadující korektní řešení pohybu spojité fáze (vzduchu) a diskretní fáze (aerosolových částic). S výhodou jsou využívány komerční výpočtové kódy založené na metodě konečných objemů (CFD). Tyto nástroje s vysokou korektností v geometricky složitých oblastech popisují: proudové pole, unášení částic vzduchem (advektivní transport), transport molekulární difúzí, transport turbulentní difúzí, vliv setrvačných a tíhových sil. Nad rámec uvedeného je komerční výpočtové nástroje nutné doplnit o zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů, depozici částic na povrchových plochách a resuspenzi částic z povrchových ploch. Zahrnutí uvedených vlivů dává dobré předpoklady pro přiblížení řešení reálné situaci, ale stále je nutné respektovat, že se jedná o výpočtový model a interpretace dosažených výsledků musí zůstat realisticky konzervativní.



Obr. 11 Hlavní zdroje částic spojené s pohybem automobilů

4.2 TRANSPORT ČÁSTIC VE VZDUCHU

Řešení pohybu aerosolových částic s využitím CFD simulačních nástrojů umožňuje volbu mezi Eulerovským a Lagrangeovským přístupem pro popis transportu částic. Oba přístupy využívají řešení soustav diferenciálních rovnic respektujících zákony zachování energie, hybnosti a hmoty, doplněné vhodným modelem turbulence. Matematický popis kontinuální fáze (vzduchu) obecně vychází z Navierovy-Stokesovy rovnice vyjadřující silovou rovnováhu na elementu tekutiny. Při užití Eulerovského přístupu je koncentrace aerosolových částic identifikována jednou průměrnou hodnotou pro příslušný kontrolní objem výpočetní sítě. Sledován je hmotnostní tok částic mezi sousedícími objemovými elementy bez detailní identifikace trajektorií částic. Naproti tomu Lagrangeovský přístup detailně sleduje trajektorie částice pohybující se ve známém rychlostním poli vzduchu. Pro každou částici je v tomto přístupu korektně řešeno silové působení okolního vzduchu, které formuje reálnou podobu její trajektorie.

Výpočetní náročnost Lagrangeovského řešení roste se zvyšujícím se počtem sledovaných částic v modelové oblasti, což vyvolává potřebu rozumných kompromisů při volbě počtu sledovaných částic. Lagrangeovské řešení nachází uplatnění při detailním sledování pohybu omezeného množství částic větších rozměrů ($> 1 \mu\text{m}$). Naopak Eulerovské řešení je vhodné pro menší částice a pro postižení velkého počtu částic sledovaných numerickým modelem.

Relativní pohyb aerosolových částic vůči vzduchu vyvolává působení odporové síly, která je dána součtem tlakových a třecích sil působících na povrch částic. Vzhledem k malým rozměrům aerosolových částic se proudění kolem částice odehrává v oblasti velmi nízkých hodnot Reynoldsova čísla ($\text{Re} < 1$). Oblast takto malých Reynoldsových čísel je oblastí platnosti Stokesova zákona, kde se dominantně projevuje působení třecích (viskózních) sil. K vyjádření teoretické velikosti odporové síly vycházející ze Stokesova zákona je pro kulovou částici užíván teoretický vztah [32]

$$F_D = 3\pi\mu d_p u . \quad (1)$$

Pro vyjádření skutečné velikosti odporové síly působící na částici je nutné teoretickou hodnotu odporové síly korigovat zahrnutím vlivu vlastního pohybu molekul plynné fáze pomocí Cunningham faktoru C_c . V případě nekulových částic přistupuje korekce tvarového faktoru částice χ . Výslednou odporovou sílu působící na reálnou částici je potom možno zapsat ve tvaru [32]

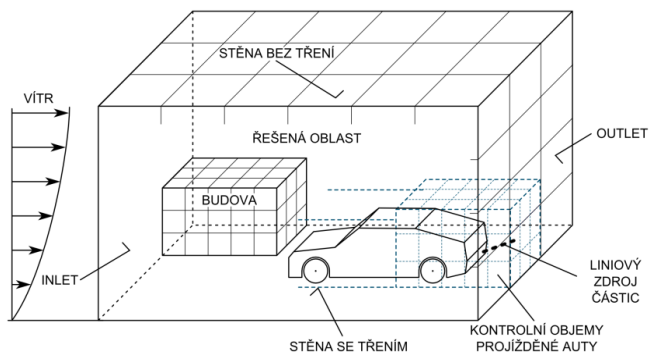
$$F_D = \frac{3\pi\mu d_p u}{C_c} \cdot \chi . \quad (2)$$

Pohyb aerosolových částic ve vzduchu je ovlivněn řadou transportních mechanismů, z nichž advektivní transport tvoří základní mechanismus přenosu a musí být zahrnut v řešení vždy. Rozhodující pro tento mechanismus přenosu je rychlost a směr proudění vzduchu. Přenos turbulentní difuzí probíhá v závislosti na množství, velikosti a intenzitě turbulentních vírů. Turbulentní difuzí způsobený hmotnostní tok částic závisí dále na gradientu koncentrace částic a turbulentním charakteru proudu. Turbulentní difuzi je nutné zohlednit vždy, pokud se nejedná o striktně laminární proudění. Brownova difuze, vyvolaná neuspořádaným pohybem molekul, hraje významnou roli při transportu částic s rozměrem pod $0,2 \mu\text{m}$. U částic s rozměrem větším jak $0,5 \mu\text{m}$ se Brownova difuze prakticky neprojevuje. Hmotnostní tok částic vyvolaný difuzí závisí na gradientu koncentrace částic a difuzivitě. Tok částic je orientován z místa o vyšší koncentraci částic do místa s koncentrací nižší. Vliv působení tíhové síly na částice se projevuje velikostí pádové rychlosti, která nabývá nezanedbatelných hodnot u částic větších jak $0,5 \mu\text{m}$. Forézní mechanismy transportu částic, kterými jsou termoforéza a difuzoforéza, se při rozptylu aerosolových částic ve vzduchu za běžných podmínek zanedbávají. Velice malé částice se značně velkým specifickým

povrchem vytváří dobré podmínky pro přítomnost elektrického náboje na povrchu částice. Tento náboj částice získávají kontaktem s elektricky nabitými povrchy a kolizí s ionty pohybujícími se ve vzduchu. Pokud částice elektrický náboj nese, přistupuje do výčtu silového působení elektrostatické síly.

4.3 ZAHRNUTÍ POHYBU AUTOMOBILŮ

Pokročilé výpočtové nástroje termofluidní mechaniky umožňují detailní řešení rychlostního a tlakového pole kolem vozidla, jehož geometrie je zpracována do podoby odpovídající výpočetní sítě. Pro simulaci pohybu vozidla ve výpočtové síti existuje řada přístupů. Detailní popis geometrie automobilu však není možné využít při řešení disperze znečišťujících látek na rozsáhlých oblastech zahrnujících desítky automobilů. Hlavním omezením je limitovaný počet výpočtových kontrolních objemů a výpočtový čas, který i přes výrazný nárůst parametrů HW zůstává v tomto směru hlavním omezením. Pro účely tvorby rozsáhlých disperzních modelů je nezbytné využít zjednodušené zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů.



Obr. 12 Koncept výpočetní sítě umožňující zjednodušené zahrnutí pohybu automobilů

V takovém případě je vhodné využít přístup virtuálního automobilu, kdy výpočetní síť nezohledňuje detailně geometrii automobilu. Ve výpočetní síti jsou identifikovány kontrolní objemy projížděné automobily (viz obr. 12) a v těchto objemech je předepsán vliv pohybu automobilů v následujících dvou krocích:

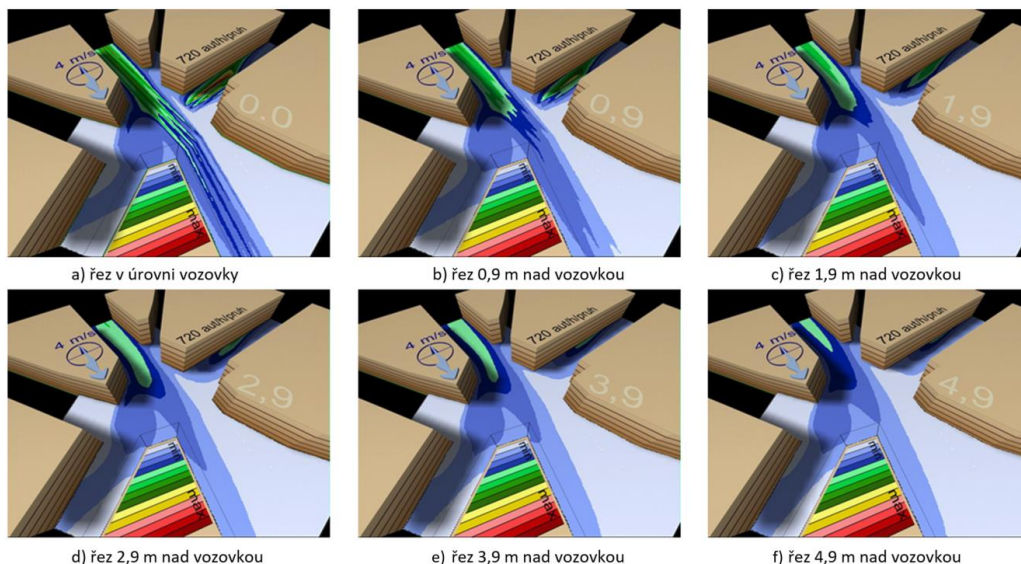
- *zahrnutí silového působení automobilů na vzduch* – v každém okamžiku je vypočteno jako reakce k aerodynamické odporové síle a prostřednictvím objemového zdroje přeneseno do projížděných objemových elementů,
- *zahrnutí produkce kinetické energie turbulence* – pohybující se automobily generují ve svém okolí velké množství turbulentních vírů, kdy většina turbulence vzniká v úplavu za automobilem [33]. Z uvedeného důvodu je turbulence zahrnuta také formou objemového zdrojového členu do automobilem projížděných kontrolních objemů [34].

Zdroj částic je zadán do kontrolních objemů projížděných automobily. Kvantifikace zdroje vychází z emisního faktoru automobilů. Hodnota emisního faktoru odráží typ automobilu, druh paliva, rychlost jízdy, rok výroby, sklon vozovky, charakteristiky pneumatik, parametry vozovky a brzd. Pokud je dostupný emisní faktor strukturovaný na výfukové a nevýfukové emise částic, je zdroj příslušný výfukové emise částic umístěn do kontrolních objemů odpovídajících poloze výfuků. Rozptyl těchto částic je velmi citlivý na poloze předepsání zdroje částic v proudovém poli vytvořeném jedoucimi automobily.

4.4 VÝPOČET ROZPTYLU V OKOLÍ DOPRAVNÍ KOMUNIKACE

Stěnám numerického modelu nahrazujícího sledovanou část ovzduší je nutné předepsat okrajové podmínky, které věrně popisují pohyb vzduchu v přízemní části atmosféry. Stěně, kterou vzduch vstupuje do modelové oblasti, je vhodné předepsat předpokládaný rychlostní profil vzduchu. Na ostatních stěnách je nejčastěji předepsána podmínka konstantního tlaku nebo podmínka „outlet“, viz obr. 12. Vlastní řešení disperze částic, využívající v rozsáhlých modelech Eulerovský přístup k řešení transportu částic, poskytuje pro jemné aerosolové částice koncentrační mapy s přijatelnou přesností. Realizace řady parametrických studií na větším počtu modelových oblastí umožňují formulovat obecně platné zákonitosti disperze jemných částic ze silničních komunikací do blízkého okolí. V městském prostředí je disperze částic dominantně ovlivněna geometrií budov v okolí komunikace, které formují rychlostní pole vzduchu. Vítr vanoucí nad střechami budov předává hybnost vzdušné mase pohybující se mezi budovami a současně se s touto znečištěnou vzdušnou masou v úrovni střech promíchává a částečně proniká mezi budovy.

Pohyb automobilů vnáší do prostoru nad komunikací výrazný turbulentní příspěvek. Maximální hodnoty kinetické energie turbulence se vyskytují mezi protijedoucími jízdními pruhy. Turbulentní charakter proudění způsobuje dodatečnou turbulentní viskozitou, která přispívá k intenzivnějšímu zpomalování pohybujícího se vzduchu o stěny budov a povrch terénu. V důsledku této skutečnosti intenzivní pohyb automobilů v ulicích snižuje intenzitu výměny vzduchu, což vede ke zvýšení maximálních imisních koncentrací. Při porovnání vlivu protisměrného a jednosměrného provozu na rozptyl částic v uličním „kaňonu“ vychází případ s jednosměrným provozem jako lépe větraná situace v porovnání s protisměrným provozem. Zvyšování intenzity turbulence v okolí automobilů přispívá na druhé straně k intenzivnějšímu rozptylu jemných částic ve směru kolmém na směr pohybu automobilů. Toto chování souvisí s intenzivnějším rozptylem částic v místě jejich produkce a všesměrovým rozptylem v turbulentním prostředí. Množství částic emitovaných na jednotku délky komunikace souvisí s rychlostí jízdy automobilů, ale pro rychlosti pod 100 km/h nejsou rozdíly zásadně významné.



Obr. 13 Ukázka vypočtených koncentračních polí obecné emise v městské zástavbě, vyobrazeny koncentrační mapy pro severním vítr 4 m/s, intenzitu dopravy 720 aut/(h.pruh)

4.5 RESUSPENZE ČÁSTIC

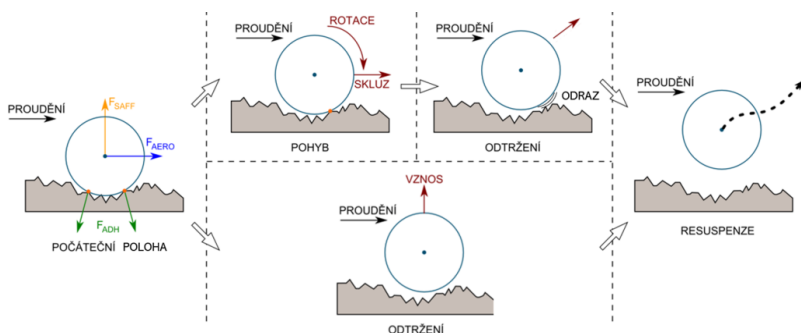
V souvislosti s přechodem automobilové dopravy od spalovacích motorů k e-mobilitě se v oboru čistoty ovzduší přesouvá pozornost od spalovacích částic k nevýfukovým částicím [35]. Resuspenze představuje nejméně probádaný zdroj nevýfukových částic i přes skutečnost, že je často odpovědná za více jak 50 % částic zatěžujících městské ovzduší v souvislosti s pozemní dopravou. Aktuální výzkum resuspenze je možné rozdělit do dvou směrů: a) resuspenze způsobená větrem [36], b) resuspenze způsobená pohybujícími se automobily [37].

4.5.1 Proces ztráty kontaktu částice s povrchem

Resuspenze částic je proces, kdy částice deponované na povrchové ploše ztrácí kontakt s touto plochou, jsou „strženy“ proudícím vzduchem a následně ve vzduchu rozptýleny. Ztráta kontaktu částice s povrchem je nejčastěji vyvolána působením aerodynamických nebo mechanických sil, případně vibracemi [38]. Statická teorie vychází z předpokladu, že částice opouští povrch, pokud vnější působení na částici překoná adhezní síly a tíhovou sílu [39]. Zatímco kinetická teorie předpokládá vibrace jemných částic na povrchu a jejich uvolnění přenosem výrazně menší energie z proudu na částici [40]. Po uvolnění částice z klidové polohy nastává ve většině případů fáze valení nebo smýkání po povrchu, zakončená ztrátou kontaktu částice s povrchem, viz obr. 14.

Teoretické odvození mezní rychlosti proudění způsobující resuspenzi představuje komplexní úkol, který je dále komplikován nesnadností detailního popisu rychlostního pole v mezní vrstvě. Mezní vrstva je tvořena laminární podvrstvou, přechodovou vrstvou a turbulentní částí mezní vrstvy, na níž navazuje plně vyvinuté turbulentní proudění. Množství částic deponovaných na povrchu je dáno koncentrací částic ve vzduchu, jejich pádovou rychlostí, difúzním transportem a časem, po který k depozici dochází. Ve většině případů je na povrchu deponováno velké množství částic a proces resuspenze částice z povrchu odstraňuje postupně. Pouze v případech náhlého porывu vzduchu dochází ke stržení všech částic v průběhu krátkého časového okamžiku.

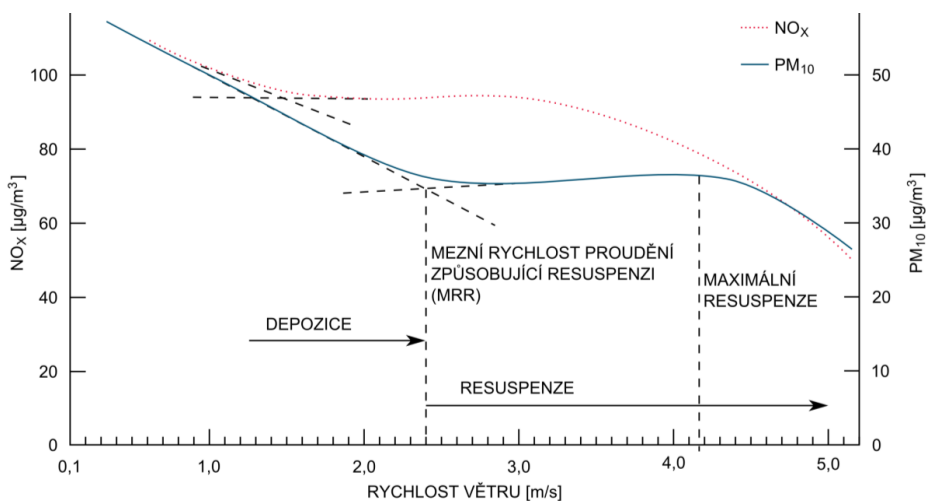
Detailní výpočtové řešení resuspenze jemných částic je prakticky nerealizovatelné a používaná řešení se opírají o kombinaci CFD modelování a empirických vztahů získaných na základě experimentů [37]. Vlastní popis resuspenze vyžaduje tři kroky: 1. detailní identifikaci rychlostního pole vzduchu v mezní vrstvě u povrchu – využití CFD, 2. empirické vyjádření mezní rychlosti proudění, která v daných podmínkách (typ částic, drsnost povrchu, atd.) způsobí resuspenzi, 3. na základě výstupů analytického modelu resuspenze zanesení resuspendovaných částic do CFD modelu a pokračování v řešení rychlostního pole s částicemi. Kritickým okamžikem numerického modelování resuspenze částic je korektní určení mezní rychlosti vzduchu způsobující resuspenzi na povrchových plochách.



Obr. 14 Způsoby ztráty kontaktu resuspendované částice s povrchem [41]

4.5.2 Mezní rychlost větru způsobující resuspenzi

Pro identifikaci mezní rychlosti větru způsobující resuspenzi je využíván přístup založený na vyhodnocení dlouhodobého měření koncentrací částic systémem imisního monitoringu [42]. Postup vyhodnocení je založen na vytvoření závislosti koncentrace příslušné frakce částic v ovzduší a rychlosti větru, viz obr. 15. Zvyšování rychlosti proudění větru obecně způsobuje „ředění“ emisních látek produkovaných zdroji v dané oblasti. Tomu odpovídá předpoklad snižování koncentrace částic v ovzduší při zvyšování rychlosti větru. V případě konstantní produkce všech zdrojů, by pokles koncentrace částic měl být lineární. Specifika transportu částic však způsobují značnou nelinearitu skutečného průběhu. Významným příspěvkem nelinearity je proměnlivost vydatnosti emisního zdroje částic spojeného s resuspenzí deponovaných částic.



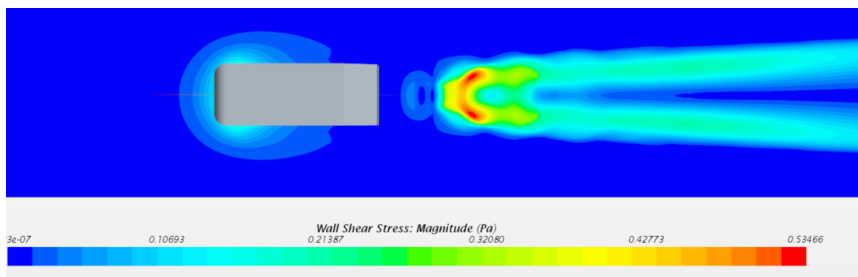
Obr. 15 Ukázka závislosti koncentrace částic PM₁₀ na rychlosti větru, získaná vyhodnocením dlouhodobých měření v centrální části Brna

Na průběhu závislosti uvedené na obr. 15 je patrné, že do rychlosti větru označované jako mezní rychlost způsobující resuspenzi (MRR) dochází ke snižování koncentrace částic vlivem převládajícího ředění „čistým“ vzduchem. Převládajícím transportním mechanismem na povrchové ploše je v této fázi depozice částic. Při nárůstu rychlosti větru nad MRR pokles koncentrace částic v ovzduší zpomaluje a s dalším nárůstem rychlosti větru koncentrace částic v ovzduší narůstá. Tento charakter průběhu odráží přítomnost resuspenze v sledované oblasti. Intenzita resuspenze se s dalším nárůstem rychlosti proudění zvyšuje v důsledku překročení MRR na dalších plochách. Maximální intenzity resuspenze dosahuje přibližně při rychlosti proudění odpovídající dvojnásobku MRR, kdy se koncentrace částic s dalším nárůstem rychlosti větru začne opět snižovat. Vyhodnocená MRR je příslušná konkrétní geometrii terénu, typu povrchu, parametrům částic a charakteru proudění v blízkosti povrchů. Experimentálně identifikovaná MRR je pouze omezeně zobecnitelná a vyžaduje korektní hodnocení v místních podmínkách. Experimentálně identifikované hodnoty MRR se nejčastěji pohybují v intervalu rychlostí větru od 0,5 m/s (resuspenze z vegetace) do 2 m/s (hrubý pevný povrch) [43].

4.5.3 Resuspenze vyvolaná automobily

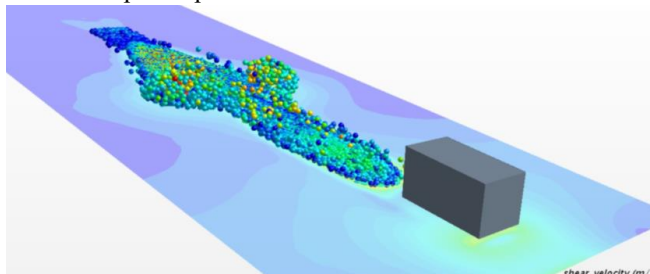
Studium resuspenze způsobené pohybujícími se automobily se obecně dělí na resuspenzi způsobenou pohybem kol automobilů a resuspenzi způsobenou prouděním za automobilem. Výpočtová pozornost je věnována především druhému uvedenému fenoménu. Resuspenze vyvolaná prouděním za automobilem je charakterem blízká resuspenzi působené větrem a s výhodou je mezi těmito oblastmi využito přenosu poznatků o podmínkách proudění způsobujících resuspenzi. Resuspenzi za automobilem ovlivňuje charakter proudění vzduchu, který se v tomto případě vyznačuje přítomností velkého počtu vírů [44]. Při studiu resuspenze za automobilem není účelné pro identifikaci podmínek pro vnos částic z povrchu užívat rychlost proudění. Vhodnější je využít vztahu mezi smykovým napětím na povrchové ploše τ_0 a resuspenzí částic [45].

Smykové napětí na povrchu je identifikováno v rámci CFD výpočtu proudového pole. Geometrie automobilu je pro výpočtové simulace resuspenze často zjednodušena do podoby kvádra, případně testového zjednodušení geometrie osobního automobilu, tzv. „Ahmed body“ [46]. Pohyb automobilu v numerickém modelu je pro korektnost řešení resuspenze potřeba zohlednit co nejméně, s užitím vzájemně pohybujících se výpočetních sítí. Detailní identifikace proudění v mezní vrstvě vyžaduje užití jemné výpočetní sítě u povrchu a volbu vhodného modelu turbulence.



Obr. 16 Smyková napětí na vozovce za osobním automobilem jedoucím rychlostí 50 km/h

V místech, kde na povrchové ploše hodnota smykového napětí přesahuje mezní smykové napětí způsobující resuspenzi, jsou identifikovány podmínky pro vznik resuspenze. Mezní hodnota smykových napětí je příslušná k MRR, viz popis v předchozí kapitole. Návazný model resuspenze rozhodne o zahrnutí odpovídajícího množství částic do modelu. Částice jsou „vypuštěny“ v modelu v malé vzdálenosti nad povrchem, v centrálním bodě kontrolního objemu výpočetní sítě přiléhajícího k povrchu. Charakter místního proudění formuje výslednou trajektorii konkrétní částice. V případě kontaktu částice s povrchem může být částice deponována, nebo při splnění podmínek resuspenze stržena zpět do proudícího vzduchu.



Obr. 17 Ukázka výpočtu resuspendovaných částic PM10 v úplavu za pohybujícím se objektem

5 AKTUÁLNĚ ROZVÍJENÉ OBLASTI

Výzkum v oblasti emise aerosolových částic se v posledních letech posouvá stále k menším rozměrům částic. Do značné míry je to důsledek vývojem dostupné měřicí techniky, kde je za celosvětově uznávaný etalon považována měřicí technika společnosti TSI. Firma v současné době nabízí elektrostatické třídiče částic se spodní hranicí identifikovatelných částic od 1 nm. Velikost částic v jednotkách nanometrů odpovídá dalšímu lokálnímu maximu početní koncentrace částic, jehož probádání je možné v dalších letech očekávat. Aktuální výzkumný zájem ale nepolevuje ani v oblasti ultrajemných částic, jejichž chování není zdaleka dostatečně prozkoumáno a vývoj nových technologií (např. aditivních) vyžaduje realizaci dalšího souvisejícího výzkumu.

V oblasti emise spalovacích částic emitovaných lokálními zdroji se pozornost výzkumu zaměřuje na částice menší než 1 μm . Větší částice jsou dostupnými technologiemi uspokojivě separovatelné. Pro separaci menších částic se jako perspektivní nabízí synergické využití mokré separace částic a kondenzace vodní páry ve spalinách pro zvýšení energetické efektivity využití paliva. Další trend v separaci spalovacích submikronových částic představuje optimalizace struktury porézních keramických filtrů, umožňujících vysokou účinnost separace a mnohonásobnou regenerovatelnost filtračního média. Další výzvu představuje výzkum vlivu přítomnosti popele při spalování biomasy na separaci jemných frakcí částic, kde dílčí pozitivní závěry vychází pouze z omezeného množství dostupných studií.

Zcela novou oblast představuje výzkum aerosolových částic emitovaných do okolí při havarijním hoření bateriových článků elektromobilů a elektrochemických uložitelů energie. Tento příležitostný zdroj částic vytváří potenciální zdravotní riziko při havarijních stavech, především pro osoby zasahující při požáru. V menším rozsahu může tento zdroj částic ovlivnit každého uživatele elektrochemických akumulátorů.

V oboru výpočtového modelování spalovacího procesu je aktuální snahou vytvořit simulační modely schopné s dostatečnou přesností predikovat koncentraci a velikost emitovaných spalovacích částic. Toto řešení je běžně založeno na empirických vztazích, které byly původně vytvořeny pro popis spalování uhlí. Pro podmínky spalování biomasy se výpočtové postupy modifikují na základě dostupných experimentálních dat. Postupné kroky bude na tomto poli vhodné realizovat především pro detailnější postihnutí fáze nukleace a úvodního růstu částic, a jejich následné implementace do používaných termofluidních simulačních nástrojů.

Rozvoj výpočtových modelů postihujících resuspenzi částic z povrchových ploch je vzhledem k výpočtové náročnosti zásadním způsobem ovlivněn zvyšováním dostupných HW a SW parametrů. Nejmenější aerosolové částice jsou velikostí blízké molekulám. V takovémto měřítku je fyzikálně korektní detailní popis pohybu částic vzdálený od reálných možností dnešních simulačních nástrojů. Ve výhledu je tedy zpřesňování modelů kombinujících detailní řešení rychlostního pole vzduchu a empirické modely resuspenze usazených částic. Pozornost bude vhodně v této oblasti věnovat především zpřesnění popisu ztráty kontaktu částic s povrchem.

Do prostředí výzkumu technických univerzit patří i měřicí aparatura pro záchyt částic, která je v řadě případů založená na mechanickém principu s využitím pokročilých poznatků o chování proudění. V tomto oboru jsou modelově i experimentálně posouvány hranice možností především kaskádových a virtuálních impaktorů.

6 ZÁVĚR

Výzkum aerosolových částic prošel v uplynulých třiceti letech zásadním rozvojem. Aerosolové částice jsou aktuálně považovány za jedno z hlavních zdravotních rizik dnešní doby, související se znečištěním atmosféry lidskou činností. Postupný vývoj v této oblasti posouvá výzkumný zájem stále k menším a menším rozměrům částic. Aktuálně sledované rozměry částic jsou v řádu stovek a desítek nanometrů. Nejmenší aerosolové částice představují největší zdravotní riziko a jsou produkovány procesy spojenými s vysokou teplotou. Typickým představitelem jsou spalovací procesy tuhých a kapalných paliv. Velmi přísný společenský „pohled“ je v tomto směru směřován na výfukové částice pocházející ze spalovacích motorů automobilů. V oblasti biomasových stacionárních tepelných zdrojů je vhodné řešení pro omezení produkce jemných aerosolových částic stále hledáno a zatím nemá finální, technicky a společensky akceptovatelnou podobu.

Problematické emise aerosolových částic je na VUT FSI věnována pozornost posledních 20 let. Předkládané teze je v tomto směru možno považovat za materiál prezentující dílčí aktivity a závěry výzkumné skupiny působící na Energetickém ústavu VUT FSI. Zastřešujícím tématem výzkumné skupiny jsou emise aerosolových částic. V rámci experimentálního výzkumu je pozornost věnována částicím emitovaným při spalování biomasy a částicím emitovaným z 3D tisku. Další související aktivity spadají do oblasti výpočtového modelování disperze aerosolových částic emitovaných silniční dopravou v městském prostředí. Teze dále představují další výhledy experimentálního výzkumu a výpočtového modelování v uvedených oblastech.

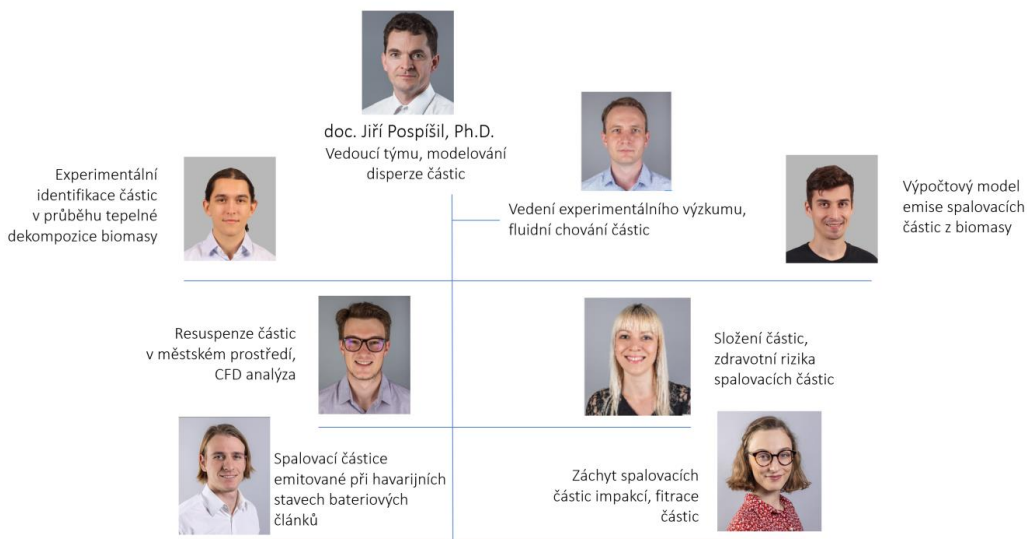
Systematická činnost postupně vedla k vytvoření výzkumné laboratoře spalovacích částic, která v průběhu let získala a vzájemně propojila přístroje pro termogravimetrickou analýzu, identifikaci koncentrace a velikostní distribuce částic a analýzu plynné části aerosolu. Společně s růstem laboratoře byl vytvořen související výzkumný tým, opírající se především o studenty doktorského studia.

Přenos poznatků z oblasti výzkumu emise aerosolových částic do výuky je velmi intenzivní s ohledem na zaměření předmětů vyučovaných na Energetickém ústavu FSI. Související poznatky jsou z různého pohledu využívány v předmětech: Zdroje a přeměna energie, Obnovitelné zdroje energie, Paliva a spalování, Experimentální metody. Velkým přínosem pro pracoviště je národní i mezinárodní povědomí o aktivitách laboratoře spalovacích částic, které tvoří významný pilíř základního výzkumu na EÚ FSI. Vzhledem k společenské aktuálnosti tématu emise spalovacích částic, přispívají výzkumné aktivity i k atraktivnosti studia energetiky na FSI.

Realizovaný výzkum aerosolových částic emitovaných stacionárními spalovacími zdroji je do značné míry nadčasový a předbíhá aktuální legislativní požadavky. To dává této výzkumné oblasti dobrou perspektivu. Vyvíjená opatření ke snížení emise jemných částic ze stacionárních zdrojů se mohou v řadě případů inspirovat zkušenostmi, které byly získány při vývoji emisních opatření v automobilovém průmyslu. Souvislost mezi aerosolovými částicemi a zdravím obyvatel je další zárukou dlouhodobého zájmu o tuto oblast. V neposlední řadě jde o téma silně mezioborové, což vedlo k pozitivnímu propojení výzkumné skupiny FSI s dalšími fakultami a výzkumnými organizacemi.

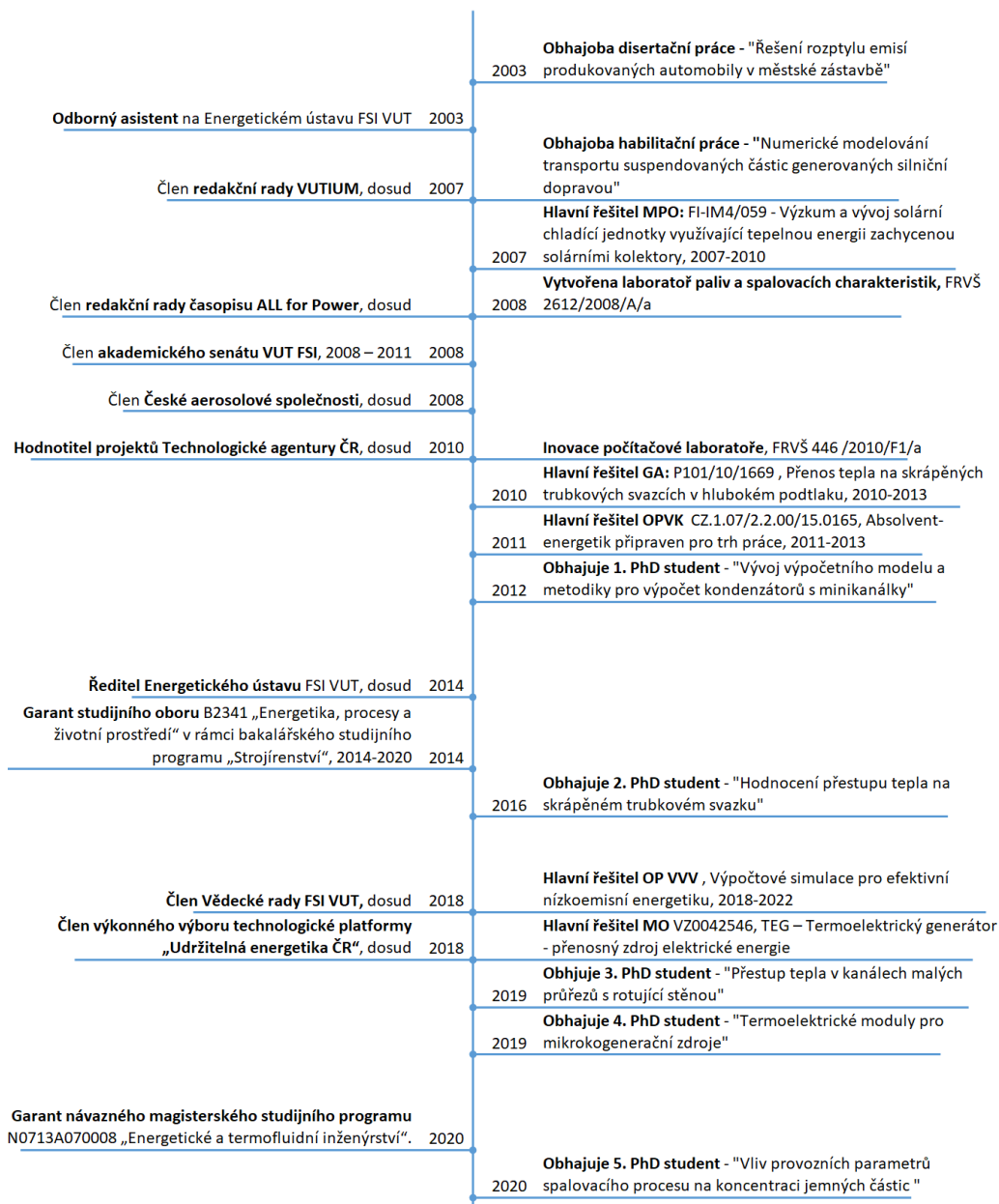
7 VÝZKUMNÝ TÝM

Uvedené poznatky a výsledky jsou výsledkem týmové práce výzkumné skupiny „Particle team“, která se problematice aerosolových částic věnuje od roku 2012. Činnost Particle týmu se opírá o existenci laboratoře spalovacích částic na EÚ FSI, která vznikla v roce 2012 pořízení prvního analyzátoru částic, a od té doby se její přístrojové vybavení významně rozrostlo. Činnost skupiny je založena primárně na výzkumných aktivitách studentů doktorského studijního programu. Výzkumná témata jsou volena tak, aby na sebe navazovala a posouvala činnost skupiny k novým, společensky aktuálním a výzkumně atraktivním směrům. Z počátku byly aktivity orientovány pouze na studium vlivu parametrů spalovacího procesu na produkci jemných částic. Tento výzkum byl realizován na kotlích a kamnech malých výkonů spalujících dřevo. Na základě dosažených výsledků vyvstala řada nezodpovězených otázek. To bylo motivací pro propojení termogravimetrická analýzy a identifikace jemných částic, umožňující studovat parametry jemných částic v průběhu teplotně řízeného spalovacího procesu v laboratorním měřítku. Tato problematika byla zpracována v rámci řešení tématu „Identifikace částic v průběhu tepelné dekompozice biomasy“. Experimentální měření jsou doplněna tvorbou poloempirického popisu umožňujícího predikci tvorby částic v průběhu spalování. Z výrobních technologií je pozornost skupiny věnována emisi jemných částic vznikajících při 3D tisku. Částice generované silniční dopravou jsou studovány s využitím CFD modelování v rámci zpracování tématu „Resuspenze částic v městském prostředí“. Snaha o zodpovězení dotazů směřovaných na škodlivost aerosolových částic, dala vzniknout tématu „Zdravotní rizika spalovacích částic“, které je řešeno ve spolupráci s FCH. Dílčí aktivity Particle teamu jsou orientovány do oblasti testování způsobů separace částic ze spalin lokálních spalovacích zařízení. Nově rozvíjeným tématem v tomto směru je použití keramických filtrů s modifikovanou strukturou pórů pro záchyt spalovacích částic. Nejnovějším tématem je výzkum jemných částic vznikajících při havarijním zahoření elektrochemických bateriových článků.



Obr. 18 Výzkumná skupina „Particle Team“ (2022)

8 CHRONOLOGICKÝ PŘEHLED MILNÍLŮ AUTORA



Obr. 19 Chronologický přehled hlavních akademických a výzkumných milníků autora

10 LITERATURA

- [1] Schraufnagel, D.E. The Health Effects of Ultrafine Particles. *Experimental & Molecular Medicine*. 2020, 52, p. 311–317.
- [2] Karagulian, F.; Belis, C.A.; Dora, C.F.C.; Prüss-Ustün, A.M.; Bonjour, S.; Adair-Rohani, H.; Amann, M. Contributions to Cities' Ambient Particulate Matter (PM): A Systematic Review of Local Source Contributions at Global Level. *Atmospheric Environment*. 2015, 120, 475–483.
- [3] Schraufnagel, D.E. The health effects of ultrafine particles. *Experimental & Molecular Medicine*. 2020, 52, p. 311–317.
- [4] Alves, C.A.; Vicente, A.M.P.; Calvo, A.I.; Baumgardner, D.; Amato, F.; Querol, X.; Pio, C.; Gustafsson, M. Physical and Chemical Properties of Non-Exhaust Particles Generated from Wear Between Pavements and Tyres. *Atmospheric Environment*. 2020, 224 (117252).
- [5] Amato, F.; Schaap, M.; Reche, C.; Querol, X. Road Traffic: A Major Source of Particulate Matter in Europe. In *Urban Air Quality in Europe*; Viana, M., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2013. ISBN: 978-3-642-38450-9.
- [6] Kulkarni, P.; Baron, P.; Willeke, K. Aerosol measurement: Principles, Techniques, and Applications. 3rd. Hoboken, New Jersey, Wiley. 2011. ISBN 978-0-470-38741-2.
- [7] Seinfeld, J.; Pandis, S. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, Bd. 3rd edition, Wiley. 2016, pp. 1152. ISBN: 978-1-118-94740-1.
- [8] Hinds, W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles, New York: Wiley. 1999. ISBN: 978-1-119-49404-1.
- [9] Nzihou, A. Handbook on Characterization of Biomass, Biowaste and Related By-products. 1st ed. Cham: Springer. 2020. ISBN 978-3-030-35019-2.
- [10] Bruckmann, P.; Eikmann, T. „Feinstäube und menschliche Gesundheit,“ *Chemie in unserer Zeit*, Bd. 2007, 41, p. 248-253.
- [11] Tsuda, A.; Gehr, P. Nanoparticles in the Lung : Environmental Exposure and Drug Delivery. 1st ed. Boca Raton: CRC Press. 2015. ISBN 978-1-4398-9280-0.
- [12] Schraufnagel, D.E. The Health Effects of Ultrafine Particles. *Experimental & Molecular Medicine*. 2020, 52, p. 311-317.
- [13] Rogers, K. The respiratory system: The human body. První. New York: Britannica Educational Publishing in association with Rosen Educational Services, LLC, 2011. ISBN 978-1-61530-147-8.
- [14] Ladou, J. a Harrison R. Current occupational & environmental medicine. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-0-07-180816-3.
- [15] Einstein, A. „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen,“ *Annalen der Physik*. 1905, 322, pp. 549-560.
- [16] Ahlawat, A.; Wiedensohler, A.; Mishra, S. An overview on the role of relative humidity in airborne transmission of SARS-CoV-2 in indoor environments. *Aerosol and Air Quality Research*. 2020, 20, p. 1856-1861.
- [17] Rowell, R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2013. ISBN 978-1-4398-5381-8.

- [18] Šnajdárek, L.; Chýlek, R.; Pospíšil, J. Slow thermal decomposition of lignocelluloses compared to numerical model: Fine particle emission, gaseous products analysis. *Energy*. 2022, 261, p. 1-11.
- [19] Loo, v S.; Koppejan J. The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. 1st ed. Londýn: Earthscan, 2008. ISBN 978-1-84407-249-1.
- [20] Špiláček, M.; Poláček, J.; Pospíšil, J.; Šnajdárek, L.; Sitek, T. Fine Particles Emission from Controlled Combustion of Beech Wood in Laboratory Conditions. *Chemical Engineering Transactions*. 2018, 70 (1), p. 1945-1950. ISSN: 2283-9216.
- [21] Poláček, J.; Sitek, T.; Pospíšil, J.; Šnajdárek, L.; Lisý M. Emission of fine particles from residential combustion of wood: Comparison of automatic boiler, manual log feed stove and thermo-gravimetric analysis. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2021, 279 (123664).
- [22] Sitek, T.; Pospíšil, J.; Poláček, J.; Chýlek, R. Thermogravimetric analysis of solid biomass fuels and corresponding emission of fine particles. *Energy*, 2021, 237, p. 121609-121609.
- [23] Floyd, E.L.; Wang, J.; Regens, J.L. Fume emissions from a low-cost 3-D printer with various filaments. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2017, 14, p. 523-533.
- [24] de Leon, A.C.; Palaganas, N.B.; Chen, Q.; Advincula, R.C.; Palaganas, J.O.; Manapat, J. High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications. *Reactive & Functional Polymers*. 2016, 103, p. 141-155.
- [25] Gu, J.; Wensing, M.; Uhde, E.; Salthammer, T. Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer. *Environment International*. 2019, 123, p. 476-485.
- [26] Tomasi, C.; Fuzzi, S.; Kim, G.R. Atmospheric Aerosols: Life Cycles and Effects on Air Quality and Climate, 1 edition. Wiley-VCH, 2017.
- [27] Kim, Y.; Yoon, C.; Ham, S.; Park, J.; Kim, S.; Kwon, O.; Tsai, P.-J. Emissions of Nanoparticles and Gaseous Material from 3D Printer Operation. *Environmental Science & Technology*. 2015, 49 (20), p. 12044–12053.
- [28] Azimi, P.; Zhao, D.; Pouzet, C.; Crain, N.E.; Stephens, B. Emissions of Ultrafine Particles and Volatile Organic Compounds from Commercially Available Desktop Three-Dimensional Printers with Multiple Filaments. 2016, 50(3), p. 1260-1268.
- [29] Vance, M.E.; Pegues, V.; Van Montfrans, S.; Leng, W.; Marr, L.C. Aerosol Emissions from Fuse-Deposition Modeling 3D Printers in a Chamber and in Real Indoor Environments. 2017, 51 (17), p. 9516–9523.
- [30] Chýlek, R.; Kudela, L.; Pospíšil, J.; Šnajdárek, L. Fine particle emission during fused deposition modelling and thermogravimetric analysis for various filaments. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 237 (117790), p. 1-10.
- [31] Chýlek, R.; Kudela, L.; Pospíšil, J.; Šnajdárek, L. Parameters Influencing the Emission of Ultrafine Particles during 3D Printing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021, 18 (21), p. 11670-11670.
- [32] Crowe, C.; Sommerfeld, M.; Tsuji, Y. Multifase flow with droplets and particles. Boca Raton, CRC Press, 1998, 1st ed. 471 p. ISBN 0-8493-9469-4.
- [33] Eskridge, R.E.; Hunt, J.C.R. Highway modelling. Part I: Prediction of velocity and turbulence fields in the wake of vehicles. *J. of Applied Meteorology*. 1979, 18, p. 387-392.
- [34] Sedefian, L.; Rao, S. T.; Czapski, U. Effects of traffic-generated turbulence on near-field dispersion. *Atmospheric Environment*, 1981, 15, p. 527-535.

- [35] Harrison, R.M.; Allan, J.; Carruthers, D.; Heal, M.R.; Lewis, A.C.; Marnier, B.; Murrells, T.; Williams, A. Non-Exhaust Vehicle Emissions of Particulate Matter and VOC from Road Traffic: A Review. *Atmospheric Environment*. 2021, 262, 118592.
- [36] Panagos, P.; Katsoyiannis, A. Soil Erosion Modelling: The New Challenges as the Result of Policy Developments in Europe. *Environ. Res.* 2019, 172, p. 470–474.
- [37] Nicholson, K.W.; Branson, J.R.; Giess P; Cannell, R.J. The effects of vehicle activity on particle resuspension. *Journal of Aerosol Science*. 1989, 20 (8), p. 1425-1428.
- [38] Ziskind, G.; Fichman, M.; Gutfinger, C. Adhesion moment model for estimating particle detachment from a surface. *Journal of Aerosol Science*. 1997, 28 (4): p. 623-634.
- [39] Ibrahim, A.H.; Dunn, P.F.; Brach, R.M. Microparticle detachment from surfaces exposed to turbulent air flow: controlled experiments and modeling. *Journal of Aerosol Science*. 2003, 34, p. 765-782.
- [40] Zhang, F.; Reeks, M.; Kissane, M.T. Particle resuspension in turbulent boundary layers and the influence of non-Gaussian removal forces. *Journal of Aerosol Science*. 2012, 58, p. 103-128.
- [41] Henry, Ch. Particle resuspension from complex surfaces: current knowledge and limitations. *arXiv*. 2018, 1802.06448.
- [42] Pospíšil, J.; Jícha, M. Mezní Rychlost Resuspenze Částic PM10 v Prostředí Městské Zástavby. Česká Aerosolová Společnost, *Sborník výroční conference ČAS*, Praha, Česká republika. 2007, pp. 33–34.
- [43] Loosmore, G. A. Evaluation and development of models for resuspension of aerosols at short times after deposition. *Atmospheric environment*. 2003, 37 (5), p. 639-647.
- [44] Ziskind, G.; Gutfinger, C. Shear and gravity effects on particle motion in turbulent boundary layers. *Powder technology*. 2002, 125 (2-3), p. 140-148.
- [45] Massey, B. S.; Ward-Smith, J. *Mechanics of fluids*. Crc Press, 2018. ISBN: 9781315272542.
- [46] Banga, S.; Zunaid; Ahmad A. N.; Sharma S.; Singh D. R. CFD simulation of flow around external vehicle: Ahmed body. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2017, 12 (4), p. 87-94.

ABSTRAKT

Tato práce představuje část výzkumu autora, který je orientován do oblasti emise aerosolových částic ze spalovacích procesů a silniční dopravy. V oboru spalovacích částic je pozornost konkrétně věnována částicím emitovaným lokálními zdroji tepla spalujícími biomasu. Experimentální identifikace je zaměřena na submikronové částice a hodnocení jejich koncentrace a velikostní distribuce v závislosti na parametrech spalovacího procesu. Detailní studium termické dekompozice paliva v laboratorních podmínkách je užito pro bližší pochopení produkce částic v závislosti na teplotě procesu a složení okolní atmosféry. Ve vztahu k výrobním procesům je představeno hodnocení emise submikronových částic produkovaných 3D tiskem při užití různých typů tiskových materiálů. Nasazení numerického modelování je užito pro predikci disperze aerosolových částic v okolí dopravních komunikací. Pozornost je zaměřena na věrné zahrnutí vlivu pohybujících se automobilů a zohlednění resuspenze částic deponovaných na vozovce. Výpočtová studie je doplněna originálním přístupem k identifikaci mezní rychlosti větru způsobující resuspenzi na základě vyhodnocení dlouhodobých záznamů imisního monitoringu.

ABSTRACT

This thesis represents a part of the author's research, which is oriented in the field of aerosol particulate emissions from combustion processes and road transport. In the field of combustion particulates, the focus is on particulates emitted by biomass burning. Experimental identification focuses on submicron particles and assessing their concentration and size distribution as a function of combustion process parameters. A detailed study of the thermal decomposition of the fuel under laboratory conditions is used to further understand the particle production as a function of process temperature and composition of the ambient atmosphere. In relation to manufacturing processes, an assessment of the emission of submicron particles produced by 3D printing using various printing materials is presented. Numerical modelling is used to predict the dispersion of aerosol particles around traffic roads. The main focus is on faithfully incorporating the effect of moving cars and the resuspension of particles deposited on the roadway. The computational study is complemented by an original approach to identify the threshold wind speed causing resuspension based on the evaluation of long-term imission monitoring records.