www.mzp.cz

т

Č

R



# DC 5.1 Zpráva o SEM/EDX analýzách (morfologie a chemického složení) individuálních suspendovaných částic vybraných emisních zdrojů

Obsahem předkládaného dokumentu jsou analýzy a hodnocení individuálních suspendovaných částic emitovaných z vybraných zdrojů znečišťování ovzduší pomocí kombinované techniky skenovacího elektronového mikroskopu a energiově disperzní rentgenové spektroskopie (SEM/EDX).

Projekt: SS02030031-V62: Integrovaný systém výzkumu, hodnocení a kontroly kvality ovzduší Autoři: Ing. Martina Brenčič, Mgr. Jáchym Brzezina, Ph.D., Mgr. Alžběta Oujezdská Datum: 13, 12, 2024





















### Obsah

т

Č

Α

R

1.	Úvod	3
2.	Literární rešerše	4
2.1.	Metoda SEM/EDX	4
2.2.	Analýza suspendovaných částic pomocí SEM/EDX	6
3.	Databáze emisí a zdroje vzorků	11
3.1.	Architektura databáze	11
3.2.	Příprava a analýza dat	14
4.	Výsledky	14
4.1.	Kategorie zdrojů	14
4.2.	Morfologie částic	16
4.3.	Složení částic	21
6.	Závěr	77
7.	Poděkování	78
8.	Literatura	79













www.mzp.cz

Č

R

т



### 1. Úvod

Předkládaná zpráva volně navazuje na závěrečnou zprávu projektu TAČR: TITSMZP704 Screening území ČR z hlediska morfologie a složení částic. Uvedená závěrečná zpráva primárně zahrnovala popis práce se skenovacím elektronovým mikroskopem a zabývala se analýzou a vyhodnocením imisních vzorků v laboratoři elektronové mikroskopie brněnské pobočky Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ). Předkládaná Zpráva o SEM/EDX analýzách (morfologie a chemického složení) individuálních suspendovaných částic vybraných emisních zdrojů obsahuje ovšem ve srovnání s předcházející zprávou několik změn a odlišných přístupů, jelikož se primárně zaměřuje na vzorky emisní a nikoli imisní. Důvodem pro tuto změnu byla potřeba nejprve popsat charakter a složení částic pocházejících z konkrétních zdrojů, aby pak bylo možné v imisních vzorcích, kde se běžně nachází částice z různých zdrojů znečišťování ovzduší, identifikovat konkrétní zdroje s co největší přesností. Paralelně s předkládanou zprávou vznikl i Metodický manuál pro odběr a analýzu suspendovaných částic pomocí CCSEM/EDX, který mimo jiné obsahuje praktické informace a tipy co se odběru a přípravy emisních vzorků týče, dále o možnostech nastavení parametrů analýz či o problematice kontaminace vzorků aj. Předkládaná zpráva obsahuje a shrnuje výsledky analýz suspendovaných částic z ovzduší pomocí kombinované techniky SEM/EDX a mohla by sloužit jako podklad a inspirace pro další práce a studie, které se zabývají problematikou identifikace zdrojů znečišť ování ovzduší pomocí této metody.

















www.mzp.cz



### 2. Literární rešerše

т

Č

R

Vzhledem k tomu, že problematika kvality ovzduší se celosvětově dostává do popředí zájmu, existuje již poměrně široká škála studií, které se zabývají analýzou suspendovaných částic z ovzduší pomocí SEM/EDX. Řada z nich se zaměřuje na konkrétní emisní zdroje, například lokální topeniště, silniční dopravu, průmysl či energetiku. Nicméně analýza suspendovaných částic pomocí SEM/EDX se potýká s několika výzvami, které se nejčastěji týkají samotné metody vzorkování ovzduší, ale též použití vhodných filtrů pro analýzu či optimalizace metodických nástrojů elementární analýzy pro získání přesnějších výsledků. Hlubší studium si taktéž žádá problematika mechanismu vzniku suspendovaných částic, která je poměrně komplikovaná.

Níže je popsán princip fungování skenovacího elektronového mikroskopu a dále jsou uvedeny příklady některých studií zaměřujících se na analýzu suspendovaných částic z ovzduší pomocí SEM/EDX.

#### 2.1. Metoda SEM/EDX

Principem skenovací (rastrovací) elektronové mikroskopie je interakce primárního elektronového svazku emitovaného katodou se zkoumaným vzorkem, přičemž vzniká několik typů signálů, které jsou detekovány a dále zpracovávány. Výhodou oproti klasické optické mikroskopii, která k zobrazování využívá vlnové délky světla, je vysoká rozlišovací schopnost elektronového mikroskopu (dle konkrétního modelu mikroskopu se jedná o desetiny, jednotky či desítky nanometrů) dána velmi krátkou vlnovou délkou elektronů. Poskytuje tedy velké zvětšení (až milionkrát). Vlnová délka elektronů je vyjádřena vztahem:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2eUm_e}}$$

kde h představuje Planckovu konstantu (6,626 070 15×10<sup>-34</sup> J·s), e představuje náboj elektronu, U urychlovací napětí a me klidovou hmotnost elektronu.

Pozn.: Pro napětí větší než  $10^5$  V je třeba započítat relativistickou korekci, jelikož elektron dosahuje v tomto poli rychlostí větších, než je poloviční rychlost světla.

Elektrony generovány elektronovou tryskou (nejčastěji se jedná o wolframové vlákno) jsou urychlovány vysokým napětím (které elektronům uděluje energii v rozpětí cca 0,1 keV - 30 keV), prochází systémem optické soustavy (elektrostatické a magnetické čočky, kvadrupóly, stigmátory atd.) a dopadají na vzorek, kde dochází k jeho rastrování. Na obrázku 1 je uvedeno zjednodušené schéma skenovacího elektronového mikroskopu:



















Obrázek 1 – Zjednodušené schéma skenovacího elektronového mikroskopu (převzato od: Ul-Hamid et al., 2018).

Během interakce primárního svazku elektronů se vzorkem vznikají především:

- Sekundární elektrony: jedná se o elektrony z valenčních pásů atomů vzorku, které při nepružné srážce s primárními či sekundárními elektrony přijali kinetickou energii dostatečnou pro jejich emisi. Pocházejí z hloubky vzorku řádově jednotek nm, primárně poskytují informaci o topografii povrchu a jsou detekovány detektorem sekundárních elektronů (SE). Nejčastěji se jedná o typ Everhart-Thornley (E-T) detektor. Emise SE závisí na použitém urychlovacím napětí, ale i morfologii vzorku.
- Zpětně odražené elektrony: pocházejí z hloubky cca 1-2 µm a nesou informaci o materiálovém složení vzorku. Závisí na protonovém čísle a úhlu dopadu svazku elektronů a jsou detekovány detektorem zpětně odražených elektronů (BSE), přičemž nejčastěji je používán polovodičový detektor.
- Charakteristické rentgenové záření: dopadající elektrony primárního svazku "vyrážejí" z nižších energetických hladin atomů (K, L, M) vzorku elektrony, na jejichž místo dopadají elektrony z vyšších energetických hladin a díky čemuž dochází k uvolnění (určitého kvanta) energie ve formě fotonu rentgenového záření, přičemž energiový rozdíl (tedy energie vzniklého fotonu) mezi danými hladinami je charakteristický pro každý prvek a slouží tedy k identifikaci prvků ve vzorku. Tento typ signálu je snímán detektorem EDX (energiově disperzní spektrometr).

Kromě toho dochází i k uvolňování Augerových elektronů, katodoluminescenci, fluorescenčnímu rentgenovému záření atp. Obrázek 2 představuje zjednodušené schéma interakce elektronů s pevnou látkou:















Obrázek 2 – Schéma interakce elektronů s pevnou látkou (převzatu od: Bernardi, 2021).

Primární elektrony pronikají s určitou mírou zároveň do hloubky vzorku, kde se mohou dále laterálně šířit. Tato oblast, kam mohou elektrony penetrovat, se nazývá interakční objem a jeho tvar a objem je závislý na použitém urychlovacím napětí, protonovém čísle atomu (materiálu), ale závisí i na natočení vzorku. Platí, že s rostoucí hodnotou urychlovacího napětí a klesajícím protonovém čísle atomů vzorku interakční objem roste.

Detektory mikroskopu převádějí zachycené signály na elektrické a ty jsou dále zpracovány a převedeny na obraz.

Celý systém mikroskopu musí být ve vakuu, aby se elektrony při své cestě nesrážely např. s molekulami vzduchu. K tomu slouží systém několika typů vývěv, z nichž každá má na starosti jinou část mikroskopu, resp. každá část splňuje jiné nároky na požadované vakuum. Nejčastěji se používají olejové rotační vývěvy, turbomolekulární, iontové atd.

Díky SEM/EDX jsme schopni sledovat jak morfologii částic, tak i jejich chemické složení, což představuje velkou výhodu, jelikož se dá s jistým zjednodušením říci, že konkrétní emisní zdroje emitují charakteristické typy částic. Nicméně i tato technika má svá omezení, která jsou podrobněji popsána v Metodickém manuálu pro odběr a analýzu suspendovaných částic pomocí CCSEM/EDX, který vznikal paralelně s předkládanou zprávou.

### 2.2. Analýza suspendovaných částic pomocí SEM/EDX

V následujících odstavcích jsou uvedeny příklady studií, které se zabývají analýzou částic v ovzduší pomocí SEM/EDX.

Güney a kol. (2020) studovali chemické složení a morfologii výfukových plynů motorových vozidel, konkrétně se jednalo o emise z dieselových motorů. Pevné částice byly detekovány v řádech nm (50 nm a méně) a SEM/EDX analýza odhalila amorfní i krystalickou fázi částic. Částice obsahovaly kromě uhlíku, kyslíku a dusíku a jeho oxidů ještě dalších 24 prvků.

Jasinski a kol. (2021) porovnávali emise pevných částic z dieselového a benzínového motoru. Zjistili, že částice ze spalování benzínu mají větší tendenci tvořit aglomeráty, kdežto částice vzniklé spalováním nafty mají menší rozměr a je jich méně. Oba typy částic obsahovaly uhlík vzniklý spalováním



т

R











т

Č

R



organických sloučenin a také obsahovaly ve srovnatelných koncentracích síru. Naopak železo bylo detekováno pouze u částic ze spalování nafty. U obou typů částic tvořili majoritní složku uhlíkaté částice, dále bylo přítomno ještě asi 20 dalších prvků.

Liati a kol. (2019) zkoumali nevýfukové emise, a to konkrétně částice vzniklé z opotřebení brzd automobilů. Pomocí SEM/EDX byla zkoumána jejich morfologie a chemické složení. Výsledky odhalily široké spektrum velikosti částic řádově od nanometrů až po mikrometry. Nejčastěji se vyskytovaly ve formě agregátů tvořených částicemi o různém chemickém složení, jednotlivé neaglomerované částice byly pozorovány spíše u jemné a ultrajemné frakce. V důsledku tření při procesu brždění často vykazovaly částice zaoblené hrany. Sférický či eliptický tvar částic byl pozorován nejvíce u ultrajemných částic. Ve všech velikostních frakcích bylo prevalentní železo. Často se také vyskytoval hliník, cín, hořčík, chrom, křemík nebo wolfram.

Kärkela a kol. (2022) porovnávali emise z cigaret (typ 3R4F) a elektronických cigaret typu IQOS. Zjistili, že IQOS obsahovaly v kouři výrazně méně pevných částic. Elementární analýza aerosolu z IQOS odhalila hlavně uhlík, kyslík a VOC – těkavé organické látky. U kouře z cigaret byly navíc zjištěny kupříkladu i draslík, vápník a křemík (ten se vyskytoval i u IQOS, pochází totiž z tabákových listů). Pomocí SEM bylo zjištěno, že pevné částice měly v případě IQOS tvar aglomerovaných kapiček, což napovídá, že během skenování docházelo nejspíše k evaporaci primárních částic citlivých na elektronový paprsek mikroskopu. V případě cigarety SEM odhalilo krystalické částice bohaté na draslík uložených v uhlíkatém nekrystalickém materiálu.

Yang a kol. (2021) se ve své studii zaměřili na emise ze spalování různých druhů uhlí, biomasy a tuhého komunálního odpadu. Zkoumali také mechanismus vzniku pevných částic, který sestává ze série fyzikálních procesů, jako jsou evaporace, kondenzace, agregace, fragmentace a chemických reakcí sloučenin vznikajících během spalování. Nicméně doposud není mechanismus vzniku pevných částic ze spalování vzhledem ke své složitosti stoprocentně objasněn. Bylo zjištěno, že vzhledem k odlišnému složení vstupního paliva se složení a distribuce částic spalin v některých případech výrazně lišila. Nejvíce hrubé frakce vznikalo spalováním uhlí. Naopak ultrajemné a jemné částice vznikaly větší měrou spalováním biomasy. Ultrajemné částice vznikaly hlavně homogenní a heterogenní kondenzací těkavých solí alkalických kovů a jemné částice se skládaly převážně z roztaveného hlinitokřemičitanu a nízkotavitelných aglomerátů solí alkalických kovů. Hrubé částice vznikaly fúzí a koalescencí jemných částic a fragmentací nespálených částic uhlíku a minerálních částic. Chemická analýza pevných částic spalin odhalila primárně Cl, S, Na, K, Si, Al, Ca, Fe, Mg a poměr těchto prvků se u spalin jednotlivých typů paliv výrazně lišil. Např. u černého uhlí těženého v Číně se u hrubé frakce vyskytovaly prvky v tomto pořadí: Ca > S > Si > Al, u jemné frakce: Ca > S > Na > Si > Al a u ultrajemné: Na > S > S. U spalin ze slámy měla hrubá frakce složení: Si > K > P > Ca, jemná frakce: Cl > K > Si a ultrajemná frakce: Cl > K. Např. spalováním tuhého komunálního odpadu se uvolňovala i celá řada dalších látek sloučeniny mědi, zinku, olova či chromu. Z uvedeného navíc vyplývá, že charakter částic vznikajících spalováním pevných paliv závisí např. i na velikosti částic samotného paliva, typu chemických vazeb atomů tvořících palivo, ale také na parametrech spalování (koncentrace kyslíku, teplota, tlak aj.)

Křůmal a kol. (2023) porovnávali emise u novějších typů kotlů (zplyňovací, automatický) na pevná paliva a u starších typů kotlů (prohořívací, odhořívací), přičemž se spalovalo smrkové a dubové dříví při jmenovitém výkonu kotlů (85 - 100 %) a dvou snížených výkonech (60 - 70 % a 35 – 45 %). Množství znečišťujících látek emitovaných z kotlů je vždy závislé na kvalitě spalovacího procesu, a tedy primárně na kvalitě obsluhy kotle, ale také velmi záleží na typu kotle a druhu a kvalitě použitého paliva. Nejlepšího spalovacího procesu (nejnižší koncentrace produktů nedokonalého spalování – CO, pevné částice, organické plynné látky) bylo dosaženo u kotle automatického, a to díky minimalizaci obsluhy a automatickému dávkování paliva. Naopak nejhorších výsledků dosáhl kotel nejstaršího typu (prohořívací), kde je obecně spalovací proces nestabilní. Emisní faktory (EF) celkových













R



suspendovaných částic se pohybovaly mezi 562 až 2150 mg.kg<sup>-1</sup> (buková polena, nejstarší kotel) a 69,1 až 118 mg.kg<sup>-1</sup> (smrk na pelety, kotel moderního typu). Bylo zjištěno, že u automatického kotle se s rostoucím výkonem kotle zvyšovaly EF celkových suspendovaných částic, což bylo poměrně překvapivé.

V souvislosti s rostoucím tlakem na omezování používání fosilních paliv se celá řada studií zaměřuje na spalování biomasy. Fernández a kol. (2012) zkoumali spalovací procesy např. mandlových skořápek, vinných výlisků, dřevních pelet aj. Obecně lze říci, že ve srovnání s klasickými fosilními palivy dochází k nižším emisím NOx a SO<sub>2</sub>. Bylo zjištěno, že např. dřevní pelety potřebují ke svému spalování ze všech použitých vzorků nejvyšší množství kyslíku. Nicméně ve srovnání s např. vinnými výlisky, které po sobě zanechaly cca 10 % popela, dřevěné pelety téměř 0 %. Byla studována tepelná konverze vzorků a bylo zjištěno, že během procesu tepelné přeměny se uvolňuje z materiálu velké množství VOC, což má za následek změnu povrchu částic, ale i celkově změnu jejich morfologie. Na začátku lze pozorovat např. u dřevních pelet typickou vláknitou strukturu, která se po dosažení teploty 950 °C postupně přemění na strukturu plnou "kanálků" a cestiček, kterými plyny proudily z materiálu ven.

Studie Szweda a kol. (2023) se zaměřila na emise z polské cementárny Ozarów. Vzorkování probíhalo pasivní formou, přičemž k SEM/EDX analýze a také k analýze vybraných prvků pomocí ICP-MS-TOF bylo použito jehličí z borovice lesní ze stromů z okolí cementárny. Pozorování pomocí SEM poukázalo na fakt, že částice nerovnoměrně pokrývaly povrch jehličí a vyplňovaly jeho průduchy. Částice vykazovaly široké spektrum tvarů a velikosti. Uvnitř stomat se vyskytovaly sférické částice velikosti 2,5–3,8  $\mu$ m, ale v okolí stomat se hojně vyskytovaly větší a ostře ohraničené částice velikosti 3,1–6,05  $\mu$ m tvořící konglomeráty. EDX analýza částic uzavírající stomata jehličí odhalila prvky v sestupné koncentraci C > O > Fe > Si > Ca > Al, přičemž kyslík a uhlík pocházel ze samotného jehličí. Pomocí analýzy ICP-MS-TOF byla zjištěna přítomnost prvků v sestupné sekvenci dle koncentrace: Fe > Al > Mn > Zn > Cu > Pb > Cr > Ni.

Významným zdrojem emisí pevných částic je i průmysl spjatý se zpracováním železa a oceli (ocelárny, slévárny, koksovny atp.). Většina dřívějších studií se zaměřovala na emise z komínů těchto výrobních závodů, kdežto studie Zhanga a kol. (2022) zkoumala emise fugitivní, konkrétně jejich fyzikální a chemické vlastnosti. Ve studii figuruje několik zdrojů fugitivních pevných částic (FPM) – měření probíhalo v aglomeračním závodě, koksovně, železářském závodě a ocelárně. Nejvyšší koncentrace FPM byly obecně zjištěny u fyzikálních procesů ve srovnání s procesy chemickými. Nejvyšší emisní faktor FPM byl zjištěn u ocelárny s hodnotou 58,1 g/t, následovalo slinování a výroba železa s hodnotami 44,1 g/t, respektive 15,9 g/t. Nejnižší emisní faktor FPM byl zjištěn u koksovny s hodnotou 15,5 g/t. Velikost částic se pohybovala v rozmezí  $0,1-716 \,\mu\text{m}$ . Co se morfologie týče, byly pozorovány nepravidelné minerální částice bohaté na Fe, Si, Ca a Mg, které většinou vznikají fyzikálními procesy jako např. mechanickým drcením, během pásové dopravy či vykládáním materiálu. Dále byly pozorovány kulovité částice – vysokoteplotní roztavené částice bohaté na Si, Al a Fe. Řetízkovité a flokulentní částice tvořily agregáty vzniklé polymerací z vysokoteplotních plynů a VOC. Laminární tvar vykazovaly uhlíkaté částice vzniklé mechanickým drcením a spalováním. Fe dosahovalo relativně vysokého hmotnostního podílu v FPM emitovaném při slinování, výrobě železa a oceli s hmotnostním podílem v rozmezí 1,4 % až 57,79 %. C dosahoval nejvyššího hmotnostního podílu FPM u drtících mlýnů, kde tvořil 69,80 %. Ca, Mg a Si se vyskytovaly hlavně v emisích FPM z výroby oceli. Al a S uvolňující se při slinování, také v koksovnách a železárnách, pocházely hlavně z drtících mlýnů, ploch koksárenských pecí a z transferních věží. Jejich nejvyšší hmotnostní zlomky dosahovaly hodnot 1,70 %, 0,81 %, 2,01 %, 0,98 %, 0,96 % a 0,37 %. V ocelárně byly hlavními zdroji Al a Mn primárně procesy sanace metalurgických pánví a hmotnostní zlomky měly hodnoty 6,31 %, resp. 1,28 %.

Předmětem studie autorů Shao a kol. (2022) byl přehled metodiky měření a analýzy atmosférických částic a zkoumání jejich přímých i nepřímých účinků na klima a lidské zdraví. Ke klasifikaci













т

Č

R



atmosférických částic byly použity techniky SEM i TEM (transmisní elektronová mikroskopie) a pomocí nich byly částice rozděleny na uhlíkaté (saze, biologické, organické), neuhlíkaté (minerální, kovové, polétavý prach, částice bohaté na síru a draslík a částice soli) a smíšené. Částice sazí tvořily řetízkovité agregáty velikosti 10 až 100 nm emitované primárně spalováním fosilních paliv a biomasy, obsahovaly příměsi Si a K. Primární organické částice vykazovaly spíše sférický tvar s velikostí 30 až 500 nm a sekundární částice byly spíše nepravidelného tvaru a pod SEM se vyznačovaly nestabilitou. Biologické částice byly velmi variabilní co se tvaru týče, velikostně se pohybovaly mezi 1,8 až 10 µm. Minerální částice typické svou tvarovou variabilitou, jejichž zdrojem byl hlavně silniční prach, stavebnictví nebo přírodní zdroje, obsahovaly primárně Ca, Si, Al, Fe ve formě živců, uhličitanů, křemičitanů, síranů, jílů. Pozorované kovové částice byly bohaté na Fe, Zn, Pb, a vznikaly například spalováním fosilních paliv, otěrem pneumatik, opotřebením kolejnic, těžkým průmyslem. Částice vzniklé abrazí měly nepravidelný tvar, ty vzniklé spalováním naopak tvar pravidelný. Pomocí TEM bylo možné spatřit inkluze kovů. Částice polétavého prachu byly většinou sférické, často aluminosilikáty se stopami Ca, Fe, Mn, Ti. Částice bohaté na síru se pod elektronovým paprskem rozkládaly do pěnových struktur, některé vlivem času tvořily tzv. core-shell strukturu, obecně se jednalo o sírany, dusičnany, soli, organické látky. Částice bohaté na draslík, které slouží i jako marker pro spalování biomasy, byly nepravidelné a obsahovaly K, Cl, S. Pokud se vyskytovaly v kombinaci K a Cl a měly pravidelný tvar, jednalo se o částice KCl. Pokud osahovaly ještě dusík, bylo to z důvodu jejich reakcí v atmosféře. Cástice mořské soli vznikající evaporací moří a oceánů obsahovaly primárně Na, Cl, S. Bylo zjištěno, že časem mohou měnit tvar na amorfní formu. Smíšené částice obecně vznikají mísením s ostatními typy částic. Ze studie vyplývá i doporučení pro další výzkum jako je například optimalizace metodických nástrojů elementární analýzy, práce na mohutné databázi částic či hlubší studium zdrojů částic včetně zmapování klíčových emisních zdrojů.

Zajímavé výsledky přinesla studie Rao a kol. (2017), která se zaměřila na emise z 3D tiskáren využívajících jako materiál k tisku ABS (akrylonitrilbutadienstyren). Částice byly zachytávány na nanovlákenné membráně a následně byly zkoumány pomoci SEM/EDX. Bylo zjištěno, že částice frakce PM<sub>2,5</sub> vykazovaly prvkové složení: C (61,09 %), O (35,85 %), Ca (2,88 %), S (0,11 %), Si (0,08 %) a vyšlo najevo, že některé částice pocházejí ze samotného materiálu – ABS, který částice emituje během tavení. 3D tiskárny se tedy řadí mezi poměrně významný zdroj emisí v interiérech.

V poslední době se hojně diskutuje téma ohňostrojů a jejich dopadů na kvalitu ovzduší. Tímto tématem se zabývala studie Wanga a kol. (2024), ve které zkoumali emise ze silvestrovských ohňostrojů v údolí na severu Číny. Maximální hodinová koncentrace  $PM_{2,5}$  dosahovala 1200 µg.m<sup>-3</sup>. Chemická analýza ukázala, že organická hmota (24,5 % hmotnostních z celkového  $PM_{2,5}$ ) byla nejhojněji zastoupenou, následovaly K<sup>+</sup> (15,3 %), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (12,3 %) a Cl<sup>-</sup> (9,9 %). Hmotnostní koncentrace K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cu, Sr a Ba byly 22,0 až 41,4krát vyšší než před silvestrovskou nocí. Koncentrace elementárního uhlíku, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a Ti byly 3,7 až 12,3krát vyšší než před silvestrem. Další analýza pomocí SEM/EDX ukázala, že uhlíkové částice během silvestrovských oslav obsahovaly více S, Cl, K a těžkých kovů ve srovnání s obdobím před Silvestrovskou nocí. Většina neuhlíkových částic během Silvestra byla bohatá na K, Mg, Al a Ba, se sférickým tvarem, což se výrazně lišilo od částic před Silvestrem, které měly nepravidelný tvar. Výše uvedené výsledky naznačují, že koncentrace PM<sub>2,5</sub> v údolích během silvestrovských oslav byla v krátkém čase extrémně vysoká a v budoucím politickém rozhodování by měla být věnována větší pozornost vlivu ohňostrojů na kvalitu ovzduší, potažmo lidské zdraví.

Zdroj suspendovaných částic v ovzduší ovšem nemusí být vždy pouze antropogenní. Částice mohou být i přírodního původu, anebo vznikat kombinací. Během zimní a letní sezóny v Agře (Indie) byly odebírány vzorky suspendovaných částic (Pachauri a kol., 2013). Jejich průměrné sezónní koncentrace činily:  $273,4 \pm 85,5 \ \mu g.m^{-3} v$  létě a  $338,6 \pm 89,1 \ \mu g.m^{-3} v$  zimě. Analýza částic pomocí SEM/EDX odhalila, že částice měly ve většině případů ekvivalentní průměr 2-70 µm. Částice byly klasifikovány do tří skupin: biogenní, geogenní a antropogenní. Biogenní částice měly velikost mezi 20 až 50 µm a













т

Č

R



byly tvarově rozmanité. Majoritně u nich převládal C a O, ostatní prvky jako Na, Mg, K, Ca and Cl se vyskytovaly ve velmi malé míře. Geogenní částice, jejichž zdrojem je nejčastěji půda či horniny, měly ekvivalentní průměr od 2 do 70 µm a zahrnovaly aluminosilikáty, křemen, oxidy titanu a železa, částice bohaté na vápník a chloridové částice, přičemž skupina aluminosilátů byla ze všech analyzovaných částic nejhojněji zastoupena. Antropogenní částice se dělily na částice pocházející z průmyslu a uhlíkaté částice. Částice typické pro průmysl (nebo resuspenzi silničního prachu) obsahovaly kovy: Cr (> 41 %), Mn (> 50 %) a Ni (> 10 %) v kombinaci stopově s Fe, Si a O a typická pro ně byla hrubá struktura. Uhlíkaté částice byly morfologicky různorodé, ať už to byly řetízky sazí či složitější shluky částic. Vždy totiž záleží na použitém palivu, podmínkách spalování či atmosférických procesech. Byly pozorovány sférické částice bohaté na C a O (> 90 %), které byly produkovány spalováním biomasy či biopaliva. Tento typ částic snadno absorbuje IČ záření a předpokládá se zde vliv na klima.

Jednou z výzev týkající se analýzy suspendovaných částic z ovzduší pomocí SEM/EDX je nalézt takový typ filtru, který bude mít nejvhodnější vlastnosti v ideálním případě jak pro samotné vzorkování, tak i pro analýzu částic na něm zachycených. Yin a kol. (2020) mezi sebou porovnávali tři typy filtrů, které se nejčastěji v současné době používají v rámci identifikace a klasifikace atmosférických částic. Jedná se o filtr křemenný, acetátový (acetát celulózy) a polykarbonátový. Křemenný filtr se vyznačuje vysokou tepelnou odolností, taktéž odolností proti korozi, má dobrou propustnost vzduchu a s tím souvisí i kvalitní vzorkování. Mezi jeho negativa patří fakt, že pozorování částic je nepřehledné, jelikož částice se implementují mezi vlákna samotného filtru. Acetátový filtr je tenčí než křemenný, opět vyniká dobrou propustností vzduchu, ale částice se i zde mohou dostávat do struktury filtru, i když ne v takové míře, jako u křemenného filtru. Polykarbonátový filtr má výborné vlastnosti pro pozorování atmosférických částic díky svému planárnímu povrchu. Nicméně má nižší propustnost a kvůli malým otvorům vyžaduje nižší průtok vzduchu při vzorkování a také delší čas vzorkování. Problémem je zde i fakt, že samotný filtr obsahuje uhlík a kyslík, a není tedy z tohoto hlediska příliš vhodný pro analýzu organických částic, jelikož v rámci EDX analýzy není možné za daných podmínek s jistotou odlišit signál pocházející z filtru od signálu pocházejícího ze samotných částic.

Casuccio a kol. (2017) řešili obdobný problém – jak zamezit snímání a analýze polykarbonátového filtru, když jsou středem zájmu pouze částice na něm ulpělé. Prováděli pokusy s nánosem paladia, který pokrýval povrch polykarbonátového filtru. Bylo zjištěno, že to přineslo přesnější výsledky, co se chemického složení týče, jelikož zde nedocházelo k zanášení chyby do výsledků skrze snímání a analýzu polykarbonátového filtru. Problémem zde ovšem zůstává mimo jiné finanční náročnost této metody.

Substrát z boru zkoumal Choël a kol. (2005). Bylo zjištěno, že tento typ substrátu minimálně interferuje s charakteristickým rentgenovým zářením pocházejícím z částic. Navíc bylo zřejmé, že poskytuje dostatečný kontrast k částicím. Jedná se tedy o jednu z vhodných alternativ, nicméně finančně poměrně nákladnou.

















т

R



### 3. Databáze emisí a zdroje vzorků

V rámci předchozího projektu (TAČR: TITSMZP704 Měření a analýza znečištění ovzduší s důrazem na vyhodnocení podílu jednotlivých skupin zdrojů, Screening území ČR z hlediska morfologie a složení částic: Metodika odběru a analýz částic z ovzduší skenovacím elektronovým mikroskopem) byly získávány a analyzovány vzorky imisí (částic zachycených na filtrech vzorkovačů z konkrétních lokalit v konkrétním čase). Imisní vzorky obsahují částice z velkého počtu různých zdrojů. Pro jejich identifikaci je tedy nutné znát charakter a složení částic z různých konkrétních zdrojů, které se potom v imisním vzorku hledají. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k získávání a analýzám vzorků emisí (vzorků odebraných z konkrétního a známého zdroje), a to tak, aby bylo možné co nejlépe popsat konkrétní emisní zdroj, také aby bylo umožněno srovnání jednotlivých zdrojů mezi sebou a do budoucna se tak ulehčila identifikace konkrétních zdrojů znečišťování ovzduší ve vzorcích imisních.

Aby bylo možné shromažďovat data a výstupy analýz vzorků emisí, vznikla nová databáze emisí. Ta je svou strukturou podobná již vzniklé databázi imisí, nicméně liší se primárně v tom, že zde není kladen důraz (z povahy emisních vzorků) na lokalitu či délku vzorkování. Naopak je tato databáze rozšířena o parametry analýz (meta data), které úzce souvisejí s přesností měření a zejména pak informacemi o samotném zdroji (kategorie, délka vzorkování, jakékoliv další informace o zdroji). Cílem databáze je přehledně ukládat získaná data z měření pomocí SEM/EDX s možností filtrovat a stahovat data dle aktuálních požadavků.

### 3.1. Architektura databáze

Databáze byla vytvořena ve volně dostupném a open-source objektově-relačním databázovém systému PostreSQL s nástavbou phpPgAdmin.

Emisní databáze spočívá v 10 vzájemně propojených tabulkách, z nichž některé jsou sdílené s databází imisní, vytvořenou v rámci předchozího projektu pro vzorky imisí.

#### Seznam tabulek a jejich popis

- Emissions základní tabulka, kde jsou uložena data o jednotlivých analyzovaných částicích, která je skrze další pole napojena na ostatní relační tabulky databáze.
- Analysis parameters tabulka obsahující parametry SEM analýzy (nastavení SEM)
- Sources tabulka obsahující informace o jednotlivých zdrojích, které byly v rámci analýz použity jako zdroje emisí
- Source main types hlavní kategorie zdrojů znečišť ování ovzduší
- Source subtypes podkategorie hlavních zdrojů znečišť ování ovzduší
- Source subsubtypes podkategorie podkategorií zdrojů znečišť ování ovzduší
- Analysis by seznam osob, které prováděly analýzy SEM/EDX u jednotlivých vzorků (jednotné s imisní databází)
- Analysis department oddělení/pracoviště, které provádělo analýzu SEM/EDX u jednotlivých vzorků (jednotné s imisní databází)
- Sampled by seznam osob, které prováděly vzorkování u jednotlivých vzorků (jednotné s imisní databází)
- Sampled by department oddělení/pracoviště, které provádělo vzorkování u jednotlivých vzorků (jednotné s imisní databází)















Obrázek 3 – Vzájemné propojení dílčích relačních tabulek v emisní databázi.

Seznam níže uvádí dílčí databázová pole pro jednotlivé tabulky:

- Emissions
  - o locationID ID lokality odběru (propojení na tabulku sources)
  - o duration délka odběru v min
  - sampledBy ID osoby zodpovědné za vzorkování (propojení na tabulku sampledBy)
  - sampledByDpt ID pracoviště zodpovědného za vzorkování (propojení na tabulku sampled by department)
  - o fraction vzorkovaná frakce částic (např. PM<sub>10</sub>)
  - analysisBy ID osoby zodpovědné za analýzu SEM/EDX (propojení na tabulku analysisBY)
  - o analysisByDpt ID pracoviště zodpovědného za SEM/EDX analýzu
  - o notes poznámky ke vzorku
  - o area plocha částice
  - o shape index tvaru částic
  - o ECD Equivalent Circle Diameter ekvivalentní obvod kruhu o stejné ploše
  - $\circ$  Perimeter obvod
  - Length délka částice
  - Breadth šířka částice
  - o flowRate průtok odběru
  - o sampler vzorkovač
  - o keywords klíčová slova (např. název projektu)
  - o analysisParameters ID analýzy (propojeno na tabulku anaylsisParameters)















- o source ID zdroje (propojeno na tabulku zdrojů)
- Pole hmotnostních procent prvků v dané částice pole pro každý z analyzovaných prvků + pole nejistoty (sigma): Na, Mg, Al, K, Si, P, S, Cl, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba, Pb, B, N, F, V, Co, U, Bi, Nb, Mo, As, Sn, O, Se, Rb, Cs, Ag, W, Br, Ra
- analysisBy
  - o ID
    - o name jméno osoby zodpovědné za analýzu
  - o lastName příjmení osoby zodpovědné za analýzu
- analysisByDpt
  - o ID
  - Organization organizace/společnost zodpovědná za analýzu
  - o Location lokalita oragnizace/společnosti zodpovědné za analýzu
- sampledBy
  - o ID
  - o name jméno osoby zodpovědné za vzorkování
  - o lastName příjmení osoby zodpovědné za vzorkování
- sampledByDpt
  - o ID
  - o Organization organizace/společnost zodpovědná za vzorkování
  - o Location lokalita oragnizace/společnosti zodpovědné za vzorkování
- Sources
  - o ID
  - o mainCat ID hlavní kategorie
  - $\circ$  subcat ID podkategorie
  - o subsubcat ID podpodkategorie
  - o operator obsluha zdroje
  - o sourceSize relativní velikost zdroje
  - o originalSampleLabel původní ID vzorku
  - o notes poznámky
  - o lat zeměpisná šířka
  - o lon zeměpisná délka
  - alt nadmořská výška
  - $\circ$  region region
  - $\circ \quad city-m\check{e}sto$
  - o name název provozu
  - sourceMainTypes
    - o ID
    - o Type název kategorie
  - sourceSubtypes
    - o ID
    - o mainType ID hlavní kategorie, do které tato podkategorie patří
    - subtype název podkategorie
- sourceSubSubtypes
  - o ID
  - o mainType ID hlavní kategorie, do které tato podkategorie patří
  - $\circ \quad subtype-ID \ podkategorie, do \ které \ tato \ podpodkategorie \ patří$
  - o subsubtype název podpodkategorie
- analysisParameters
  - o ID















Č

R

т

т

R



- o Hv urychlovací napětí určující energii primárních elektronů ve svazku
- beamIntensity počet elektronů v elektronovém svazku dopadající na vzorek za jednotku času
- o fieldsNumber počet analyzovaných polí
- o featuresNumber počet analyzovaných částic v rámci vzorku
- magnification zvětšení
- thresholds prahové hodnoty vztahující se k nastavení úrovní šedi a sloužící k obrazovému oddělení částic ve vzorku v programu AZtec
- analysisSubstrate typ použitého filtru při analýze
- o samplingSubstrate typ použitého filtru při vzorkování

### 3.2. Příprava a analýza dat

Před následnou datovou analýzou bylo potřeba připravit data do vhodného formátu. Data byla z databáze exportována skrze příslušné SQL příkazy, které propojily data z různých relačních tabulek a vytvořily hromadný export dat vhodných pro následnou analýzu. Data byla z databáze exportována ve formátu CSV.

Surová data ve formátu CSV byla použita jako vstupní data pro následnou statistickou analýzu a roztřídění částic do příslušných kategorií vytvořených v rámci tvorby metodiky SEM/EDX analýzy.

Datová (statistická) analýza byla provedena prostřednictvím programovacího jazyka R, webových skriptů v jazyce PHP a kancelářském balíku MS Excel. Roztřídění částic do jednotlivých kategorií dle klasifikačních kritérií bylo provedeno prostřednictvím PHP skriptů na lokálním serveru, které byly pro tento účel vytvořeny.

Výsledkem přípravy a analýzy dat byly tabulky s výsledky dílčích analýz, které byly importovány do kancelářské aplikace MS Excel, kde byly dále zpracovávány.

## 4. Výsledky

### 4.1. Kategorie zdrojů

Níže je uvedena kategorizace vzorků. Uvedený výčet nepředstavuje kompletní seznam možných kategorií vzorků, ale pouze kategorie a podkategorie vzorků, které byly odebrány a analyzovány v rámci hodnocení emisí.

- 1. Průmysl
  - 1.1. Strojírenský průmysl
    - 1.1.1.Automobilka
  - 1.2. Hutní (železo i neželezné kovy) průmysl
    - 1.2.1.Slévárna
  - 1.3. Dřevozpracující průmysl
    - 1.3.1.Papírna
    - 1.3.2. Výroba celulózy
  - 1.4. Chemický průmysl
    - 1.4.1. Průmysl stavebních hmot
      - 1.4.1.1. Vápenka
      - 1.4.1.2. Cementárna















www.mzp.cz

Č

R

т



- 1.4.2.Chemička
- 1.5. Elektroenergetika
  - 1.5.1.Černouhelná teplárna
  - 1.5.2. Teplárna
  - 1.5.3. Spalování biomasy
  - 1.5.4. Mazutový kotel
  - 1.5.5.Elektrárna na hnědé uhlí
- 1.6. Provozovna
- 2. Zemědělství
  - 2.1. Pole
  - 2.2. Polní cesta
- 3. Doprava
- 4. Domácnosti
  - 4.1. Prohořívací kotel
    - 4.1.1.Spalování dřeva (buk)
    - 4.1.2. Spalování koksu
    - 4.1.3. Spalování černého uhlí
    - 4.1.4. Spalování dřeva (smrk)
  - 4.2. Odhořívací kotel
    - 4.2.1.Spalování černého uhlí
    - 4.2.2.Spalování hnědého uhlí
    - 4.2.3.Spalování dřeva (smrk)
    - 4.2.4. Spalování dřeva (buk)
    - 4.2.5.Spalování dřeva (jasan)
    - 4.2.6. Spalování dřeva (dub)
    - 4.2.7. Spalování dřeva (jabloň, hrušeň)
  - 4.3. Automatický kotel
    - 4.3.1. Spalování černého uhlí
    - 4.3.2. Spalování hnědého uhlí
    - 4.3.3.Spalování dřevních pelet
    - 4.3.4. Spalování slunečnicových pelet
  - 4.4. Zplyňovací kotel
    - 4.4.1.Spalování hnědého uhlí
    - 4.4.2.Spalování dřeva (smrk)
    - 4.4.3. Spalování dřeva (buk)
    - 4.4.4.Spalování dřeva (směs)
    - 4.4.5.Spalování dřeva (jasan)
    - 4.4.6. Spalování dřeva (dub)
- 5. Stavební práce
- 5.1. Rekonstrukce bytu
- 6. Lidské aktivity
  - 6.1. Cigareta
  - 6.2. Ohňostroj
  - 6.3. Kreativní činnost
    - 6.3.1. Práce se dřevem řezání, broušení

- 7. Indoor
  - 7.1. Školní chodba
  - 7.2. Školní třída
  - 7.3. Laserová tiskárna
  - 7.4. 3D tiskárna















V případě některých kategorií dává smysl hodnotit zdroje jako celek, v případě jiných jsou zdroje v dané kategorii zahrnuté tak různorodé, že dává smysl hodnotit tyto zdroje pouze po příslušných podkategoriích nebo podpodkategoriích. Příkladem kategorií, které lze v případě této analýzy hodnotit jednotně je např. doprava, zemědělství nebo domácnosti (kam v rámci této analýzy bylo zahrnuto pouze vytápění v různých typech kotlů a různými palivy). Naopak velmi různorodé jsou kategorie lidských aktivit, průmysl a indoor, které jako celek jednotně hodnotit nelze.

### 4.2. Morfologie částic

Hodnocení morfologie částic zahrnuje hodnocení plochy, tvaru, ale například i poměru výšky a šířky částic, tedy hodnocení jejich vnějšího vzhledu. V případě tohoto hodnocení je třeba upozornit na možné chyby způsobené nesprávnou identifikací částice obrazovou analýzou, která je prováděna automaticky softwarem. Například velmi malé kulovité částice z dopravy, které se shlukují do struktur, které připomínají řetízky, mohou touto analýzou být vyhodnoceny jako jedna velká částice, která má větší plochu a nepravidelný tvar, přestože je složena z velkého počtu velmi malých a pravidelných částic.

Pro jednotlivé kategorie, podkategorie i podpodkategorie byly spočítány statistické parametry (průměr, medián, směrodatná odchylka, počet) pro dílčí parametry plochy, tvaru a poměru mezi délkou a šířkou částice. Byly zjištěny relativně značné rozdíly mezi hodnotou aritmetického průměru a mediánu, což ukazuje na vícero extrémních hodnot, které průměr navyšují (jedná se o vliv několika velmi velkých částic ve vzorku). Vhodnější je tedy použití mediánu jako indikátoru střední hodnoty vzorku.

#### Plocha

т

R

Speciální kategorii v tomto případě tvoří zemědělství. Vzorky v rámci této kategorie byly odebrány z půdy a v laboratoři pak byly přeneseny na filtr. Neproběhla zde tedy žádná cílená selekce částic pouze určité velikosti, tak jak tomu bylo v případě jiných vzorků. Plocha těchto částic je tedy oproti ostatním výrazně vyšší, což je dáno nikoliv charakterem tohoto zdroje, ale způsobem odběru. Do analýzy plochy nejsou tyto vzorky níže zahrnuty, stejně jako vzorek Lidské aktivity – kreativní činnost a Stavební práce –Rekonstrukce bytu ze stejného důvodu.

Graf níže ukazuje medián velikosti plochy pro jednotlivé podkategorie částic.

















Obrázek 4 – Medián velikosti plochy pro jednotlivé podkategorie částic.

Následující grafy ukazují medián velikost plochy částic v jednotlivých vybraných podpodkategoriích.



Obrázek 5 – Medián velikosti plochy částic v jednotlivých vybraných podpodkategoriích.













www.tacr.cz

www.mzp.cz





Obrázek 6 - Medián velikosti plochy částic v jednotlivých vybraných podpodkategoriích.

#### Tvar

т

R

Částice vznikající během spalovacích procesů bývají většinou pravidelného (nejčastěji kulovitého) tvaru. Naopak částice vznikající mechanicky (typicky ty, jejichž zdrojem je zemědělství nebo stavební činnost) mívají spíše tvar nepravidelný. V rámci níže uvedeného hodnocení je tvar vyjádřen indexem. Zcela kulovitá částice by měla teoreticky index roven 1, čím je číslo vyšší, tím je částice nepravidelnější.

Problematická může být v tomto případě skutečnost, že některé malé částice mohou tvořit shluky. Shluky pravidelných částic mohou být klasifikovány automatickou obrazovou analýzou jako jedna velká nepravidelná částice. Typicky k tomuto dochází například u částic z dopravy.



![](_page_17_Figure_8.jpeg)

![](_page_17_Picture_10.jpeg)

![](_page_17_Picture_11.jpeg)

![](_page_17_Picture_12.jpeg)

![](_page_17_Picture_13.jpeg)

![](_page_17_Picture_14.jpeg)

т

Č

Δ

R

![](_page_18_Picture_1.jpeg)

Jak ukazuje výše uvedený graf, právě u částic z dopravy byly částice vyhodnoceny jako nejvíce nepravidelné, což souvisí s výše uvedeným shlukováním těchto částic do řetízkovitých struktur. Nejnižší medián indexu tvaru byl pozorován u částic z průmyslu a vytápění domácností. Nepravidelnější částice byly pozorovány v případě stavebních prací a zemědělství, což odpovídá teoretickému předpokladu mechanického vzniku těchto částic, například erozí půdy či různým pracím v rámci stavby (broušení, řezání apod.).

![](_page_18_Figure_3.jpeg)

Obrázek 8 – Index tvaru pro jednotlivé podkategorie částic.

Následující grafy ukazují medián indexu tvaru částic v jednotlivých vybraných podpodkategoriích.

![](_page_18_Picture_6.jpeg)

![](_page_18_Picture_7.jpeg)

![](_page_18_Picture_8.jpeg)

![](_page_18_Picture_9.jpeg)

![](_page_18_Picture_10.jpeg)

![](_page_18_Picture_11.jpeg)

![](_page_18_Picture_12.jpeg)

www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

R

![](_page_19_Picture_1.jpeg)

![](_page_19_Figure_2.jpeg)

![](_page_19_Figure_3.jpeg)

![](_page_19_Figure_4.jpeg)

*Obrázek 10 - Index plochy pro jednotlivé podpodkategorie částic.* 

![](_page_19_Picture_6.jpeg)

![](_page_19_Picture_7.jpeg)

![](_page_19_Picture_8.jpeg)

![](_page_19_Picture_9.jpeg)

![](_page_19_Picture_10.jpeg)

![](_page_19_Picture_11.jpeg)

![](_page_19_Picture_12.jpeg)

![](_page_19_Picture_13.jpeg)

**ARAMIS**)

#### Poměr stran

т

R

Z hodnot délky a šířky byl pro každou částici spočítán poměr stran délka/šířka. Čím vyšší je tento poměr, tím více částice připomíná svým tvarem podlouhlou tyčinku, čím je poměr nižší, tím je částice více podobná kouli či je čtvercovitá.

Medián poměru stran částic v rámci jednotlivých kategorií, podkategorií a podpodkategorií se pohyboval od 1,42 (Průmysl – chemický průmysl – průmysl stavebních hmot – cementárna) až po 1,91 (Lidské aktivity – Kreativní činnost – Práce se dřevem – řezání, broušení).

![](_page_20_Figure_5.jpeg)

Obrázek 11 – Poměr stran pro jednotlivé podpodkategorie částic.

### 4.3. Složení částic

Výhodou SEM/EDX analýzy je zejména možnost stanovování složení částic, tedy zastoupení jednotlivých chemických prvků a jejich hmotnostní procento v jednotlivých částicích. Na základě této informace můžeme částice rozřazovat do kategorií a sledovat nejen absolutní zastoupení prvků, ale i jejich kombinace v jednotlivých částicích, což konvenčním měřením nelze a tato informace může být klíčová při identifikaci zdroje znečišťování ovzduší.

Hodnocení bylo provedeno jak z pohledu zastoupení jednotlivých prvků v částicích z konkrétního emisního zdroje, tak z pohledu kategorizace částice podle jejího složení. Jedna částice může být zařazena do více kategorií, pokud splní více kritérií.

![](_page_20_Picture_10.jpeg)

![](_page_20_Picture_11.jpeg)

![](_page_20_Picture_12.jpeg)

![](_page_20_Picture_13.jpeg)

![](_page_20_Picture_14.jpeg)

Č

R

т

![](_page_21_Picture_2.jpeg)

### Kategorizace částic

Částice byly rozřazeny do následujících kategorií:

- Al částice obsahující hliník •
- Si částice obsahující křemík
- C částice obsahující uhlík •
- Only C+ O organická částice, obsahující pouze uhlík a kyslík
- PM<sub>1</sub> částice PM<sub>1</sub> (přibližně, dle ekvivalentního obvodu kruhu)
- Fe rich Al-silicates na železo bohaté hlinitokřemičitany •

www.mzp.cz

- Mixed Al-silicates smíšené hlinitokřemičitany •
- PM<sub>10</sub> částice PM<sub>10</sub> (přibližně, dle ekvivalentního obvodu kruhu) •
- Nezařazená částice nesplnila kritéria žádné z kategorií •
- Fe částice obsahující železo •
- PM<sub>2,5</sub> částice PM<sub>2,5</sub> (přibližně, dle ekvivalentního obvodu kruhu) •
- Si-Ca-Fe částice obsahující křemík, vápník a železo
- C-O-Si částice obsahující uhlík, kyslík a křemík •
- Ti rich Al-silicates na titan bohaté hlinitokřemičitany •
- Na-Al-Si částice obsahující sodík, hliník a křemík •
- Ca částice obsahující vápník •
- Ca-Si částice obsahující vápník a křemík •
- Quartz - křemen
- Ca rich Al-silicates na vápník bohaté hlinitokřemičitany
- Mastek •
- Fe rich na železo bohatá částice •
- Al rich na hliník bohatá částice •
- S částice obsahující síru •
- Ti rich částice bohatá na titan •
- S rich částice bohatá na síru •
- Ca and S rich částice bohatá na vápník a síru
- Ca rich částice bohatá na vápník •
- Ca and Mg rich částice bohatá na vápník a hořčík •
- Ti-Fe částice obsahující titan a železo •
- Mg částice obsahující hořčík •
- F částice obsahující fluor •
- Popílek
- Mg-Si částice obsahující hořčík a křemík
- Tungsten •
- Cr částice obsahující chrom •
- C-O-Na částice obsahující uhlík, kyslík a sodík •
- Ca-F- částice obsahující vápník a fluor •
- Zn částice obsahující zinek •
- Salt-NaCl - sůl
- Cr-Fe částice obsahující chrom a železo
- K částice obsahující draslík •
- Ba částice obsahující baryum •
- Na-S částice obsahující sodík a síru
- K-Cl částice obsahující draslík a chlor •

![](_page_21_Picture_49.jpeg)

![](_page_21_Picture_50.jpeg)

![](_page_21_Picture_51.jpeg)

![](_page_21_Picture_52.jpeg)

![](_page_21_Picture_53.jpeg)

![](_page_21_Picture_54.jpeg)

![](_page_21_Picture_55.jpeg)

![](_page_22_Picture_1.jpeg)

• Mn – částice obsahující mangan

www.tacr.cz

www.mzp.cz

- Mn rich částice bohatá na mangan
- F-Ti částice obsahující fluor a titan
- Cu rich částice bohatá na měď
- Zn rich částice bohatá na zinek
- Cu částice obsahující měď
- Ni částice obsahující niob
- Cr rich částice bohatá na chrom
- Sn částice obsahující cín
- Pb rich částice bohatá na olovo
- K and S rich částice bohatá na draslík a síru
- Ca-Cl částice obsahující vápník a chlor
- Bi částice obsahující bismut
- Sr částice obsahující stroncium
- Cd částice obsahující kadmium
- V částice obsahující vanad
- Sb částice obsahující antimon
- Na částice obsahující sodík
- Ag částice obsahující stříbro
- Ti částice obsahující titan
- Al-Zr-Cl částice obsahující hliník, zirkon a chlor
- K and P rich částice bohatá na draslík a fosfor

### Doprava

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z dopravy (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice bohaté na uhlík, kyslík a křemík
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující železo
- Částice obsahující uhlík, kyslík a sodík
- Částice obsahující draslík
- Částice obsahující vápník
- Částice obsahující chrom a železo
- Částice obsahující hliník

Částice obsahující uhlík a částice obsahující pouze uhlík a kyslík představují převážně částice ze spalování nafty. Částice obsahující křemík, železo, chrom a hliník pochází pravděpodobně z otěru brzdových destiček a kotouče (nevýfukové emise). Frikční materiály, které se používají u brzdového obložení, jsou zdrojem širokého spektra látek (abraziva, lubrikanty, plniva), přičemž složení je velmi variabilní. Mezi typické látky frikčních kompozitů patří např.: SiC, Cu<sub>2</sub>S, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a další (Grigolatos a kol., 2015).

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 8914 částic, které byly ze vzorku z dopravy analyzovány, ukazuje následující graf.

![](_page_22_Picture_38.jpeg)

![](_page_22_Picture_39.jpeg)

![](_page_22_Picture_40.jpeg)

![](_page_22_Picture_41.jpeg)

![](_page_22_Picture_42.jpeg)

![](_page_22_Picture_43.jpeg)

č

R

т

www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

R

![](_page_23_Picture_1.jpeg)

![](_page_23_Figure_2.jpeg)

#### Obrázek 12 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z dopravy.

Částice z dopravy obecně pochází jak z výfukových emisí (výsledek spalovacího procesu), tak i z nevýfukových emisí (otěry brzdových destiček, pneumatik, resuspenze). U moderních vozů jsou dokonce nevýfukové emise v případě částic převažujícím zdrojem a u elektromobilů výhradním (Liati a kol., 2019).

Obrázek 13 představuje snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu. Na snímku jsou patrné uhlíkaté částice pocházející ze spalování nafty, které tvoří typické "řetízky".

![](_page_23_Picture_6.jpeg)

![](_page_23_Picture_7.jpeg)

![](_page_23_Picture_8.jpeg)

![](_page_23_Picture_9.jpeg)

![](_page_23_Picture_10.jpeg)

![](_page_23_Picture_11.jpeg)

![](_page_23_Picture_12.jpeg)

![](_page_24_Picture_0.jpeg)

т

Č

R

![](_page_24_Picture_1.jpeg)

![](_page_24_Picture_2.jpeg)

Obrázek 13 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu představující částice pocházející ze spalování nafty.

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

•	$PM_{10}$	99,97	%
---	-----------	-------	---

- PM<sub>2,5</sub> 95,08 %
- PM<sub>1</sub> 73,15 %

 Poměr  $PM_{2,5}/PM_{10}$ :
 0,951

 Poměr  $PM_1/PM_{2,5}$ :
 0,769

 Poměr  $PM_1/PM_{10}$ :
 0,732

Výše uvedené podíly znamenají, že přibližně tři čtvrtiny částic z emisí z dopravy spadají do nejmenší kategorie částic s velikostí přibližně do 1 mikrometru ( $PM_1$ ). Naopak částice v hrubé frakci ve velikostním rozpětí 2,5 až 10 mikrometrů tvořily jen necelých 5 % celkového počtu částic.

### Zemědělství (vzorky půdy)

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí ze zemědělství (s výjimkou kategorií PM):

- Částice na železo bohatých hlinitokřemičitanů
- Částice smíšených hlinitokřemičitanů

![](_page_24_Picture_15.jpeg)

![](_page_24_Picture_16.jpeg)

![](_page_24_Picture_17.jpeg)

![](_page_24_Picture_18.jpeg)

![](_page_24_Picture_19.jpeg)

www.tacr.cz

![](_page_25_Picture_1.jpeg)

Částice křemene

т

R

- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující sodík, hliník a křemík

www.mzp.cz

- Částice obsahující uhlík, kyslík a sodík
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík
- Částice obsahující křemík, vápník a železo
- Částice obsahující vápník a křemík

V rámci těchto vzorků byly jednoznačně nejvíce zastoupené částice hlinitokřemičitanů, což je pro půdy typické. V lokalitách, kde byly vzorky odebírány, obsahovaly půdy také významné množství železa, což je pro některé typy půd charakteristické.

Obecně nejzastoupenějšími prvky byl křemík, hliník, železo, vápník, uhlík a sodík (Shao a kol., 2022).

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 11025 částic, které byly ze vzorku ze zemědělství (půdy) analyzovány, ukazuje následující graf.

![](_page_25_Figure_13.jpeg)

Obrázek 14 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z půdy.

![](_page_25_Picture_15.jpeg)

![](_page_25_Picture_16.jpeg)

![](_page_25_Picture_17.jpeg)

![](_page_25_Picture_18.jpeg)

![](_page_25_Picture_19.jpeg)

![](_page_25_Picture_20.jpeg)

т

Č

R

![](_page_26_Picture_1.jpeg)

Na obrázku 15 lze pozorovat půdní částici nepravidelného tvaru, která (dle výstupu z bodové analýzy v programu AZtec) obsahuje 68,03 % C, 25,01 % O, 2,43 % Si, 1,27 % Al, 0,98 % K, 0,87 % Fe, 0,72 % Ca, 0,48 % Mg a 0,21 % Ti.

![](_page_26_Picture_3.jpeg)

Obrázek 15 – Snímek půdní částice pořízený ze skenovacího elektronového mikroskopu.

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

- PM<sub>10</sub> 72,74 %
- PM<sub>2,5</sub> 30,53 %
- PM<sub>1</sub> 12,90 %

 Poměr  $PM_{2,5}/PM_{10}$ :
 0,420

 Poměr  $PM_1/PM_{2,5}$ :
 0,422

Poměr  $PM_1/PM_{10}$ : 0,177

Podíl částic  $PM_{10}$  je zde výrazněji nižší než 100 %. To je dáno faktem, že byl tento vzorek odebrán nikoliv selektivním vzorkováním frakce  $PM_{10}$ , ale prostým odebráním vzorku půdy, tedy vzorek obsahoval i značné množství výrazně větších částic. Poměr počtu částic v jednotlivých frakcích ukazuje na výrazně vyšší podíl větších částic hrubší frakce. Jen necelá polovina částic  $PM_{10}$  je tvořena menšími částice  $PM_{2,5}$  a necelá pětina ještě menšími částicemi  $PM_1$ .

![](_page_26_Picture_12.jpeg)

![](_page_26_Picture_13.jpeg)

![](_page_26_Picture_14.jpeg)

![](_page_26_Picture_15.jpeg)

![](_page_26_Picture_16.jpeg)

![](_page_26_Picture_17.jpeg)

![](_page_26_Picture_18.jpeg)

![](_page_27_Picture_0.jpeg)

Č

R

т

![](_page_27_Picture_2.jpeg)

### Domácnosti (vytápění)

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z vytápění domácností (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující draslík
- Částice obsahující uhlík, kyslík a sodík
- Částice obsahující vápník
- Částice bohaté na draslík a síru
- Částice obsahující síru
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující sodík a síru
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík

Lokální topeniště (domácí vytápění) se nejen v České republice řadí k nejvýraznějším znečišť ovatelům ovzduší. Množství tuhých znečišť ujících látek emitovaných z kotlů na pevná paliva vždy závisí na celé řadě faktorů (např. na konkrétním typu kotle – prohořívací, odhořívací, zplyňovací, automatický, dále na druhu a kvalitě použitého paliva, ale hlavně na kvalitě obsluhy). Nejméně tuhých znečišť ujících látek ve srovnání se staršími typy kotlů emitují kotle automatické, a to hlavně díky minimalizaci vlivu obsluhy (Křůmal a kol., 2023).

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 192 120 částic, které byly ze vzorku z vytápění domácností analyzovány, ukazuje následující graf.

![](_page_27_Picture_17.jpeg)

![](_page_27_Picture_18.jpeg)

![](_page_27_Picture_19.jpeg)

![](_page_27_Picture_20.jpeg)

![](_page_27_Picture_21.jpeg)

![](_page_27_Picture_22.jpeg)

![](_page_27_Picture_23.jpeg)

www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

Δ

R

![](_page_28_Picture_1.jpeg)

![](_page_28_Figure_2.jpeg)

Obrázek 16 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z vytápění.

Jednoznačně nejvyšší podíl mají v případě částic z vytápění organické částice. Výrazněji zastoupen je například také draslík, který je poměrně hojně obsažen v biomase a je to tedy jeden z hlavních ukazatelů spalování biomasy. Dále je výrazněji obsažena síra, kterou může obsahovat např. uhlí.

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

- PM<sub>10</sub> 99,94 %
- PM<sub>2,5</sub> 98,27 %
- PM<sub>1</sub> 88,66 %

 Poměr PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>:
 0,983

 Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>2,5</sub>:
 0,902

 Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub>:
 0,887

Nejmenší částice PM<sub>1</sub> tvoří téměř 90 % veškerých analyzovaných částic. Zdrojem je v tomto případě spalovací proces, který právě tyto menší částice vytváří. Z pohledu zdravotních dopadů se tedy jedná o potenciálně velmi problematický zdroj (čím menší částice jsou, tím hlouběji penetrují do dýchacího

![](_page_28_Picture_11.jpeg)

![](_page_28_Picture_12.jpeg)

![](_page_28_Picture_13.jpeg)

![](_page_28_Picture_14.jpeg)

![](_page_28_Picture_15.jpeg)

NIVERZITA

![](_page_28_Picture_16.jpeg)

![](_page_29_Picture_1.jpeg)

soustavy). Podíl částic v hrubší frakci velikostního rozmezí 2,5 až 10 mikrometrů činí dokonce jen necelá 2 % všech analyzovaných částic.

Částice ze souhrnné kategorie zdrojů vytápění domácností můžeme dále analyzovat dle příslušných podkategorií, tedy z kotlů prohořívacích, odhořívacích, zplyňovacích a automatických separátně.

Výraznější rozdíl byl zaznamenán u částic obsahujících síru. Těch bylo výrazně více v případě emisí z prohořívacích kotlů. U těch bylo do kategorie částic obsahujících síru zařazeno téměř 8 % částic. U ostatních typů kotlů to byla ani ne polovina. Naopak oproti ostatním typům kotlů obsahovaly částice z emisí prohořívacícho kotle méně částic obsahujících draslík.

Grafy níže ukazují procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic ve vzorcích z vytápění v různých typech kotlů.

#### Prohořívací kotel

т

Č

R

![](_page_29_Figure_7.jpeg)

Obrázek 17– Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z prohořívacích kotlů.

Obrázek 18 představuje snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu, kde je patrný shluk velmi malých uhlíkatých kulovitých částic pocházejících ze spalování černého uhlí v prohořívacím kotli.

![](_page_29_Picture_10.jpeg)

![](_page_29_Picture_11.jpeg)

![](_page_29_Picture_12.jpeg)

![](_page_29_Picture_13.jpeg)

![](_page_29_Picture_14.jpeg)

![](_page_29_Picture_15.jpeg)

![](_page_30_Picture_0.jpeg)

![](_page_30_Picture_1.jpeg)

![](_page_30_Picture_2.jpeg)

www.tacr.cz www.mzp.cz

![](_page_30_Picture_4.jpeg)

Obrázek 18 – Snímek částic pocházejících ze spalování černého uhlí v prohořívacím kotli pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem.

![](_page_30_Picture_6.jpeg)

![](_page_30_Picture_7.jpeg)

![](_page_30_Picture_8.jpeg)

![](_page_30_Picture_9.jpeg)

![](_page_30_Picture_10.jpeg)

![](_page_30_Picture_11.jpeg)

![](_page_30_Picture_12.jpeg)

![](_page_30_Picture_13.jpeg)

www.tacr.cz

www.mzp.cz

ČR

Α

т

![](_page_31_Picture_3.jpeg)

#### Odhořívací kotel

C	)%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10											99.94%
PM2.5											98.77%
C											97.05%
PM1										90	).85%
only C+O						49.	28%				
Ŕ		8.20	%								
C-O-Na	3.	38%									
Ca	1.8	1%									
C-O-Si	1.8	0%									
Si	1.31	1%									
K-CI	0.65	%									
K and S rich	0.63	%									
Salt-NaCl	0.45	%									
Ca rich	0.219	%									
Ca-F	0.20	%									
F	0.20	%									
S	0.179	%									
AI	0.16	%									
Ca and Mg rich	0.149	%									
Zn	0.099	%									
Al rich	0.099	%									
Fe	0.089	%									
Mixed Al-silicates	0.089	%									
Na-S	0.069	%									
Ca-Si	0.069	%									
Mg	0.059	%									
Cr	0.059	%									
Quartz	0.049	%									
Fe rich	0.029	%									
Mg-Si	0.029	%									
Ni	0.029	%									
Nezařazená	0.029	%									
Na-Al-Si	0.019	%									
Ca and S rich	0.019	%									
Mn	0.019	%									
Cr-Fe	0.019	%									
Si-Ca-Fe	0.019	%									

#### Obrázek 19 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z odhořívacích kotlů.

Na obrázku 20 jsou zřetelné shluky částic pocházející ze spalování hnědého uhlí v odhořívacím kotli, kromě shluků lze pozorovat i drobné individuální částice.

![](_page_31_Picture_8.jpeg)

![](_page_31_Picture_9.jpeg)

![](_page_31_Picture_10.jpeg)

![](_page_31_Picture_11.jpeg)

![](_page_31_Picture_12.jpeg)

![](_page_31_Picture_13.jpeg)

![](_page_31_Picture_14.jpeg)

![](_page_32_Picture_0.jpeg)

т

Č

Α

R

![](_page_32_Picture_1.jpeg)

![](_page_32_Picture_2.jpeg)

Obrázek 20 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu představující částice pocházející ze spalování hnědého uhlí v odhořívacím kotli.

![](_page_32_Picture_4.jpeg)

![](_page_32_Picture_5.jpeg)

![](_page_32_Picture_6.jpeg)

![](_page_32_Picture_7.jpeg)

![](_page_32_Picture_8.jpeg)

![](_page_32_Picture_9.jpeg)

![](_page_32_Picture_10.jpeg)

![](_page_32_Picture_11.jpeg)

![](_page_32_Picture_12.jpeg)

www.tacr.cz

www.mzp.cz

R

Δ

т

Č

![](_page_33_Picture_2.jpeg)

#### Zplyňovací kotel

![](_page_33_Figure_4.jpeg)

#### Obrázek 21 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí ze zplyňovacích kotlů.

Na obrázku 22 lze pozorovat shluk částic pocházející ze spalování smrkového dřeva ve zplyňovacím kotli. Tento shluk tvoří zvláštní strukturu připomínající krychli.

![](_page_33_Picture_7.jpeg)

![](_page_33_Picture_8.jpeg)

![](_page_33_Picture_9.jpeg)

![](_page_33_Picture_11.jpeg)

![](_page_33_Picture_12.jpeg)

![](_page_33_Picture_13.jpeg)

www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

Α

R

![](_page_34_Picture_1.jpeg)

![](_page_34_Picture_2.jpeg)

Obrázek 22 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu představující částice ze spalování smrkového dřeva ve zplyňovacím kotli.

![](_page_34_Picture_4.jpeg)

![](_page_34_Picture_5.jpeg)

![](_page_34_Picture_6.jpeg)

![](_page_34_Picture_7.jpeg)

![](_page_34_Picture_9.jpeg)

![](_page_34_Picture_10.jpeg)

![](_page_34_Picture_11.jpeg)

![](_page_34_Picture_12.jpeg)

R

Α

Т

Č

www.tacr.cz www.mzp.cz

![](_page_35_Picture_3.jpeg)

#### Automatický kotel

	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10											99.93%
PM2.5	5										98.49%
C											93.36%
PM1	1									89.	17%
only C+C				26.09%	6						
k				24.22%							
C-O-Na	a 📕	7.19%									
S	6	3.35%									
Na-S	5	2.65%									
S	i I	1.98%									
K and S rich	)	1.88%									
C-O-S	i L	1.39%									
Ca	a	1.00%									
K-C		0.96%									
A		0.60%									
Fe Mixed AL allianter		0.47%									
IVIIXed AI-SIIICates	5	0.45%									
Ca-r		0.22%									
Calici		0.22%									
Fo rick		0.14%									
		0.12%									
Solt NoC		0.12%									
Fo rich Al-silicator		0.10%									
Ca-S	i	0.07%									
Quartz	-	0.06%									
C	r	0.00%									
Ca and Mg rich		0.00%									
Si-Ca-Fe	÷	0.04%									
Zr		0.03%									
Nezařazená	á	0.03%									
Ca and S rich	n	0.02%									
Mg	a 🛛	0.02%									
Ň	i	0.01%									
Ca rich Al-silicates	s	0.01%									
Cr-Fe	9	0.01%									
Ti rich Al-silicates	s	0.01%									
Mg-S	i	0.01%									
Zn rich	n 📘	0.01%									
Mr	n	0.01%									
Ti rich	n 📘	0.01%									

#### Obrázek 23 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z automatických kotlů.

Na obrázku 24 lze pozorovat shluk částic pocházejících ze spalování koksu v automatickém kotli. Tento shluk je tvořen kanálkovitou strukturou, která mohla být částečně způsobena např. prouděním těkavých organických látek a jiných plynů během spalování z vnitřní struktury ven.

![](_page_35_Picture_8.jpeg)

![](_page_35_Picture_9.jpeg)

![](_page_35_Picture_10.jpeg)

![](_page_35_Picture_11.jpeg)

![](_page_35_Picture_12.jpeg)

![](_page_35_Picture_13.jpeg)

![](_page_35_Picture_14.jpeg)
www.tacr.cz

т

Č





Obrázek 24 – Snímek částic pocházejících ze spalování koksu v automatickém kotli pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem.

Co do poměrů zastoupení frakcí  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$  a  $PM_1$  nebyly mezi jednotlivými typy kotlů výraznější rozdíly. Ve všech případech byl velmi vysoký podíl menších částic. Částice  $PM_{2,5}$  tvořily u všech typů kotlů mezi 97,4 a 98,8 % celkového počtu analyzovaných částic pro emise daného typu kotle. Podíl částic  $PM_1$  se pohyboval mezi 86,5 a 90,9 %. Lze tedy říci, že devět z deseti částic ve vzorcích odebraných z domácích kotlů bylo z frakce  $PM_1$ .

V rámci dělení na podpodkategorie byly zvlášť analyzovány vzorky spalování dřeva, koksu a černého uhlí ve stejných typech kotle.

Například ze srovnání vzorků spalování smrkového dřeva, koksu a černého uhlí v prohořívacím kotli vyplynuly následující závěry:

- Vzorek ze spalování koksu a dřeva obsahoval výrazně vyšší podíl částic s obsahem draslíku (24,6 % v případě koksu, 13,4 % v případě spalování dřeva oproti pouze 1,8 % v případě spalování černého uhlí).
- Vzorek ze spalování koksu obsahoval výrazně více částic obsahujících síru než vzorky ze spalování černého uhlí a smrkového dřeva (20,2 % u koksu oproti pouze 0,02 % u černého uhlí a 0 % u smrkového dřeva).
- Částice obsahující kombinaci prvků síra a sodík tvořily téměř 16,5 % v případě částic ze spalování koksu, v případě spalování dřeva a černého uhlí nebyla takto klasifikována ani jedna částice.
- Poměry počtu částic ve frakcích PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub> a PM<sub>10</sub> jsou u všech vzorků velmi podobné.
- Vzorek ze spalování koksu obsahoval více než 6 % částic zařazených do kategorie částic bohatých na draslík a síru. V případě spalování černého uhlí to bylo pouze 0,3 %, u spalování smrkového dřeva jen 0,03 %.















č

R

**ARAMIS**)

Z analýzy dalších vzorků odebraných z kombinace různého typu kotle a paliva, lze vyčíst následující skutečnosti:

- Významný podíl částic obsahujících síru byl dále zaznamenán u vzorku ze spalování černého (9,7 %) a hnědého (4,9 %) uhlí u automatického kotle.
- Při spalování uhlí byly vyšší podíly částic obsahujících kombinaci prvků uhlík, kyslík a sodík.
- Spalování dřeva ve zplyňovacím kotli vedlo u několika typů dřeva (směs, smrk, jasan) k vyššímu podílu částic obsahujících vápník. Téměř 5 % částic bylo kategorizováno jako částice obsahující vápník také ve vzorku z odhořívacího kotle při spalování ovocných dřevin.

# Stavební práce (rekonstrukce bytu)

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí ze stavebních prací (rekonstrukce bytu) (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující vápník
- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující uhlík a křemík
- Částice bohaté na vápník
- Částice smíšených hlinitokřemičitanů
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující křemík, vápník a železo
- Částice hlinitokřemičitanů bohaté na železo
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík

Vápník hraje na stavbách klíčovou roli (je součástí malt, betonu a jiných stavebních hmot), proto není překvapující, že právě částice obsahující tento prvek byly velmi hojně zastoupené ve vzorku odebraném v bytovém prostředí, kde probíhala rozsáhlá rekonstrukce. Dále byly výrazně zastoupeny například křemík, hliník nebo železo, což jsou opět prvky hojně se vyskytující ve stavebních materiálech.

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

- PM<sub>10</sub> 96,17 %
- PM<sub>2,5</sub> 71,49 %
- PM<sub>1</sub> 30,49 %

Poměr  $PM_{2,5}/PM_{10}$ : 0,743

Poměr  $PM_1/PM_{2,5}$ : 0,426

Poměr  $PM_1/PM_{10}$ : 0,317

Částice ze stavebních prací vznikají primárně mechanicky a více bývá zastoupena hrubší frakce částic. To potvrzují jak například měření imisí poblíž staveb, tak výsledky SEM/EDX analýzy. Jen přibližně 30 % z celkového počtu částic byly částice spadající do nejmenší hodnocené frakce PM<sub>1</sub>. Poměr mezi počtem částic PM<sub>2,5</sub> a PM<sub>10</sub> je přibližně 0,75. Výrazná část částic spadala velikostně do rozmezí 1 až 2,5 mikrometru.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 33 842 částic, které byly ze vzorku ze stavebních prací analyzovány, ukazuje následující graf.















Т

Č

Α

R



0	% 10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10										96.17%
PM2.5							71	.49%		
Ca				37.96%	6					
PM1			30.	49%						
			28.64	1%						
Ca-Si Ca rich			22.04%							
		1/ 77%	22.4770							
Si		12 49%								
only C+O	9	26%								
Si-Ca-Fe	4.95%	2070								
Fe rich Al-silicates	4.73%									
C-O-Si	4.22%									
Ca rich Al-silicates	2.61%									
Na-Al-Si	1.77%									
Quartz	1.64%									
AI	1.56%									
Fe	1.07%									
Ca and Mg rich	0.93%									
Nezarazena Eo rich	0.56%									
	0.43%									
Ma-Si	0.34%									
Cr	0.22%									
Ma	0.20%									
Mastek	0.14%									
S	0.12%									
Ca-F	0.06%									
Zn	0.05%									
Ti rich Al-silicates	0.04%									
Ti-Fe	0.04%									
Li rich	0.04%									
CI-Fe Zn rich	0.03%									
Alrich	0.02%									
Tungsten	0.02%									
F	0.01%									
Mn	0.01%									
Cu rich	0.01%									
Cu	0.01%									
Ni	0.01%									
K	0.01%									
Ba	0.01%									
Mn rich	0.01%									
Cr rich	0.01%									
Srich	0.01%									
C-O-Na	0.01%									

Obrázek 25 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí ze stavebních prací v rámci rekonstrukce bytu.

Obrázek 26 představuje částici nepravidelného tvaru obsahující (dle výstupu z bodové analýzy v programu AZtec): 56,15 % O, 29,39 % Si a 14,46 % C.















www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

č

R





*Obrázek* 26 – *Snímek částice pocházející z rekonstrukce bytu pořízený pomocí skenovacího elektronového mikroskopu.* 

# Průmysl

V rámci kategorie zdrojů Průmysl jsou zdroje velmi odlišného charakteru, proto je nemá smysl hodnotit souhrnně jako Průmysl, ale hodnoceny jsou pouze dílčí podpodkategorie.

### Průmysl - Strojírenský průmysl – Automobilka

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z automobilky v rámci strojírenského průmyslu (s výjimkou kategorií PM):

- Částice bohaté na uhlík
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující železo
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík
- Částice obsahující vápník
- Částice bohatá na titan
- Částice bohatá na železo
- Částice obsahující mangan
- Částice obsahující chrom a železo















Ve vzorcích z automobilky se vyskytují částice kovů, ale i organické částice. Zastoupen je například titan, chrom, mangan nebo železo. Částice bohaté na tyto prvky mohou pocházet např. z obrábění, broušení či leptání používaných materiálů a to jak kovových, tak např. i plastových. Těkavé organické látky (VOC) pocházející např. z ředidel či nátěrů, mohou tvořit řetízkovité struktury.

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

• PM<sub>10</sub> 99,86 %

т

č

Δ

R

- PM<sub>2,5</sub> 96,05 %
- PM<sub>1</sub> 82,34 %

Poměr PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,962

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>2,5</sub>: 0,857

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,825

Ve vzorcích z automobilky jednoznačně převažovaly částice menší, poměr počtu částic  $PM_{2,5}$  ku  $PM_{10}$  je více než 95 %, tedy necelých 5 % tvořily částice velikosti 2,5 až 10 mikrometrů. I podíl částic  $PM_1$  byl vysoký, tedy se jednalo o primárně nejmenší částice.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 5799 částic, které byly ze vzorku z automobilky analyzovány, ukazuje následující graf.















Obrázek 27 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z automobilky.

Obrázek 28 představuje částice pocházející z automobilky. Na první pohled je zřejmé, že se jedná o heterogenní směs částic o rozmanitém složení.















www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

R





Obrázek 28 – Snímek částic pocházejících z automobilky pořízený pomocí skenovacího elektronového mikroskopu.

# Průmysl - Dřevozpracující průmysl – výroba celulózy

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z výroby celulózy v rámci dřevozpracujícího průmyslu (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující síru
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující sodík a síru
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující hořčík
- Částice obsahující vápník
- Částice obsahující chrom
- Částice obsahující uhlík, kyslík a sodík















Poměrně vysoké zastoupení síry v částicích souvisí se samotnou technologií výroby celulózy, kdy se využívá sulfátového či sulfitového způsobu výroby. Během procesu výroby se používá např. sulfid sodný, který slouží k extrakci celulózy.

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

• PM<sub>10</sub> 99,75 %

т

Č

Δ

R

- PM<sub>2,5</sub> 93,56 %
- PM<sub>1</sub> 64,93 %

 Poměr PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>:
 0,938

 Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>2,5</sub>:
 0,694

 Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub>:
 0,651

Relativní poměry počtu částic různých velikostních frakcí ukazují na relativně významný podíl částic nejen nejmenších PM<sub>1</sub>, ale i částic v rozsahu velikosti 1 až 2,5 mikrometru.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 2033 částic, které byly ze vzorku z výroby celulózy analyzovány, ukazuje následující graf.

















Č

Α

R



0	%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10											99.75%
PM2.5											93.56%
PM1								64.93%			
С							61	1.09%			
S				23.17%							
Si		1	2.49%								
Na-S		11	.12%								
C-O-Si		9.10	%								
only C+O		6.39%									
Mg		5.31%									
Ca	4	.38%									
Cr	3	.89%									
C-O-Na	3.	30%									
Ca rich	2.4	11%									
Ca-Si	17	7%									
Ni	1.38	8%									
Ca-Cl	1.08	3%									
Ma-Si	0.79	9%									
Fe	0.73	0/2									
Quartz	0.04	0/_									
Si-Ca-Ea	0.33	70 0/_									
Caland Sirich	0.33	70 0/									
Eo rich	0.34	0/									
re non	0.30	70 0/									
Fo rich Al silicatos	0.25	70 0/									
Mixed AL silicates	0.20	70 0/									
Witted Al-Silicates	0.20	70 07									
r and 5 nch	0.15	% ^/									
Al Co. and Maurich	0.10	%									
Ca and Mg rich	0.10	%									
Cr-Fe	0.10	%									
Cu	0.10	%									
Na-Al-Si	0.10	%									
I rich Al-silicates	0.10	%									
F	0.059	%									
Nezařazená	0.05	%									
Ti rich	0.05	%									
Al rich	0.059	%									
Cr rich	0.05	%									
Ba	0.05	%									
Tungsten	0.05	%									
Popílek	0.05	%									

Obrázek 29 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z výroby celulózy.

Obrázek 30 představuje snímek částice pocházející z výroby celulózy.



















Č

R





Obrázek 30 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu představující částice z výroby celulózy.

### Průmysl – Chemický průmysl – Průmysl stavebních hmot (vápenka)

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z vápenky (s výjimkou kategorií PM):

- částice obsahující vápník
- částice obsahující uhlík
- částice bohaté na vápník
- částice obsahující měď
- částice obsahující křemík
- částice obsahující železo
- částice hlinitokřemičitanů obsahující železo
- částice smíšených hlinitokřemičitanů
- částice obsahující uhlík, kyslík a křemík
- částice obsahující vápník a křemík

















Vysoký podíl částic obsahujících vápník a uhlík souvisí pravděpodobně s procesem výroby vápna, které vzniká tepelným rozkladem vápence. Vzniká tím oxid vápenatý, který se následně drtí, mele či třídí. Během těchto procesů dochází k emisi velkého množství prachových částic.

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

• PM<sub>10</sub> 99,75 %

т

č

Δ

R

- PM<sub>2,5</sub> 93,56 %
- PM<sub>1</sub> 64,93 %

 Poměr  $PM_{2,5}/PM_{10}$ :
 0,721

 Poměr  $PM_1/PM_{2,5}$ :
 0,413

 Poměr  $PM_1/PM_{10}$ :
 0,298

Z výše uvedených poměrů počtu částic v jednotlivých velikostních frakcích je patrný výrazný podíl větších částice hrubší frakce velikostního rozmezí 2,5 až 10 mikrometrů. Naopak nejmenších částic  $PM_1$  je relativně nízký podíl (necelých 30 %) oproti například spalovacím zdrojům.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 2118 částic, které byly ze vzorku z vápenky analyzovány, ukazuje následující graf.

















Č





Obrázek 31 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z vápenky.

Na obrázku 32 lze pozorovat převážně shluky částic pocházejících z vápenky. Částice jsou bohaté na vápník a patrný je jejich nepravidelný tvar.















www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

R





Obrázek 32 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu představující částice pocházející z vápenky.

### Průmysl – chemický průmysl – cementárna

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z cementárny (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující vápník
- Částice obsahující vápník a křemík
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující křemík
- Částice bohaté na vápník
- Částice obsahující síru
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík
- Částice obsahující železo
- Částice bohaté na vápník a síru

















Vysoké zastoupení částic obsahujících vápník a uhlík, případně křemík v kombinaci s vápníkem, souvisí pravděpodobně se samotným procesem výroby cementu, kdy se jako vstupní surovina používá vápenec a jíl. Tato směs se při teplotách kolem 1450 °C vypaluje v rotační peci, následně vyrobený slínek se pak (po přidání příměsí – křemík aj.) rozemílá. Během těchto procesů je využíváno různých druhů filtrů, nicméně záchyt pevných částic nemusí být 100% (Szwed a kol, 2023).

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

• PM<sub>10</sub> 99,97 %

т

Č

Α

R

- PM<sub>2,5</sub> 96,35 %
- PM<sub>1</sub> 72,95 %

 Poměr  $PM_{2,5}/PM_{10}$ :
 0,964

 Poměr  $PM_1/PM_{2,5}$ :
 0,757

 Poměr  $PM_1/PM_{10}$ :
 0,730

Částice v rozmezí 2,5 až 10 mikrometrů tvořily jen malou část z celkového počtu analyzovaných částic. Tři čtvrtiny částic spadaly do frakce PM<sub>1</sub>.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 2983 částic, které byly ze vzorku z cementárny analyzovány, ukazuje následující graf.















www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

Α

R





Obrázek 33 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z cementárny.

Na obrázku 34 lze pozorovat částice pocházející z cementárny. Na první pohled je zřejmé, že částice jsou tvarově i rozměrově odlišné.















www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

č

R





Obrázek 34 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu představující částice z cementárny.

# Průmysl – Chemický průmysl – Chemička

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z chemičky (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice smíšených hlinitokřemičitanů
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující hliník
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík
- Částice obsahující vápník a křemík
- Částice obsahující vápník
- Částice hlinitokřemičitanů bohatých na železo
- Částice obsahující křemík, vápník a železo

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

- PM<sub>10</sub> 99,23 %
- PM<sub>2,5</sub> 78,78 %
- PM<sub>1</sub> 42,66 %

Poměr PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,794

















Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>2,5</sub>: 0,542 Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,423

т

Č

Ve vzorku byly ve větší míře zastoupeny i větší částice velikostního rozmezí 2,5 až 10 mikrometrů. Většinu však tvořily částice do 2,5 mikrometru.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 5576 částic, které byly ze vzorku z chemičky analyzovány, ukazuje následující graf.

0	)%	10%	20	)%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10												99.23%
PM2.5										78.7	8%	
С							45.41%					
PM1							42.66%					
Mixed Al-silicates				40.00	26.87	%						
only C+O				18.96	% 0/							
31 A1		0.0	70/	10.71	70							
C-O-Si		6.64	0/ 10 0/									
Ca-Si		6 159	70 %									
Ca		4.64%	/0									
Fe rich Al-silicates		3.25%										
Si-Ca-Fe	= 2	2.40%										
Ca and S rich	2	.15%										
Ca rich Al-silicates	1	.78%										
Na-Al-Si	1.	.52%										
Fe	1.	.49%										
Ca rich	1.	02%										
C-O-Na	1.	00%										
Ferich	0.	97%										
Cr	0.	77%										
INI Ti rich Al cilicatos	0.0	02% 060/										
Ouartz	0.0	00 /0 00%										
S	0.2	_ <u>3</u> /0 7%										
Ca and Mg rich	0.1	4%										
Nezařazená	0.1	4%										
Na-S	0.1	4%										
Salt-NaCl	0.1	4%										
Mg-Si	0.1	3%										
Al rich	0.0	9%										
Ca-F	0.0	)5%										
Mg	0.0	)5%										
F	0.0	14%										
Cr-Fe	0.0	14%										
Cu rich	0.0	14% \										
	0.0	121/0 120/2										
Popílek	0.0	12 /0 12%										
1 oplicit	0.0	/U										

Obrázek 35 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z chemičky.

Na obrázku 36 lze pozorovat částice pocházející z chemičky. Konkrétně tento chemický závod se zabývá výrobou hnojiv. Částice, resp. shluk částic, je bohatý na železo a obsahuje také síru a vápník.















č

R





Obrázek 36 – Snímek částic pocházejících z chemického závodu pořízený pomocí skenovacího elektronového mikroskopu.

# Průmysl – Černouhelná teplárna

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z černouhelné teplárny (s výjimkou kategorií PM):

- Částice smíšených hlinitokřemičitanů
- Částice obsahující uhlík
- Částice hlinitokřemičitanů obsahujících železo
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující uhlík a kyslík
- Částice obsahující hliník
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík
- Částice křemene
- Částice obsahující křemík, vápník a železo
- Částice obsahující sodík, hliník a křemík

















Chemické složení pevných částic vznikajících spalováním černého uhlí se liší dle konkrétního druhu použitého paliva (záleží např. i na lokalitě, kde se uhlí těžilo). Hojně zastoupené mohou být např. hlinitokřemičitany, ale i oxidy kovů (CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aj.), uhličitany (např. CaCO<sub>3</sub>), sírany (např. CaSO<sub>4</sub>) a někdy mohou být přítomné i stopy těžkých kovů (As aj.).

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

• PM<sub>10</sub> 99,59 %

т

Č

Α

R

- PM<sub>2,5</sub> 75,96 %
- PM<sub>1</sub> 43,51 %

Poměr PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,763

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>2,5</sub>: 0,573

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,437

Hrubá frakce částic od 2,5 do 10 mikrometrů tvořila ve vzorcích z černouhelné teplárny přibližně 25 % částic. Nejmenší částice PM<sub>1</sub> pak necelých 45 %.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 5576 částic, které byly ze vzorku z černouhelné teplárny analyzovány, ukazuje následující graf.

















Č

Α

R





Obrázek 37 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z černouhelné teplárny.

Obrázek 38 představuje částice z emisí z černouhelné teplárny. Hrubší částice vznikaly pravděpodobně fúzí a koalescencí jemných částic a fragmentací nespálených částic uhlíku a minerálních částic (Yang a kol., 2021). Částice 1 na obrázku (dle výstupu z bodové analýzy v programu AZtec) obsahovala: 33,88 % Fe, 33,33 % C, 30,83 % O, 1,36 % Si a 0,59 % Al.

















*Obrázek 38 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu znázorňující částice pocházející z emisí z černouhelné teplárny.* 

# Průmysl – Spalování biomasy

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí ze spalování biomasy (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující draslík
- Částice obsahující uhlík
- Částice bohaté na draslík a síru
- Částice obsahující vápník
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující síru
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující draslík a chlor
- Částice obsahující vápník a křemík
- Částice obsahující zinek

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

- PM<sub>10</sub> 100,00 %
- PM<sub>2,5</sub> 95,11 %
- PM<sub>1</sub> 77,20 %















Draslík patří mezi markery pro spalování biomasy. Ve dřevě či částech rostlin se kromě draslíku taktéž nachází další důležité prvky jako např. vápník, síra nebo hořčík, což koresponduje s uvedenými výsledky.

Poměr $PM_{2,5}/PM_{10}$ :	0,951
Poměr PM <sub>1</sub> /PM <sub>2,5</sub> :	0,812
Poměr PM <sub>1</sub> /PM <sub>10</sub> :	0.772

т

Č

R

Přibližně tři čtvrtiny částic z emisí ze spalování biomasy tvořily malé částice PM<sub>1</sub>. Jen malá část částic spadala do velikostního rozmezí 2,5 až 10 mikrometru.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 2066 částic, které byly ze vzorku ze spalování biomasy analyzovány, ukazuje následující graf.



Obrázek 39 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí ze spalování biomasy.

Na obrázku 40 lze pozorovat drobné částice pocházející ze spalování biomasy. Tyto částice jsou bohaté na draslík a mají tendenci se shlukovat do větších celků.



















Obrázek 40 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu představující částice pocházející ze spalování biomasy.

# Průmysl – mazutový kotel

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z mazutového kotle (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující síru
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující hliník
- Částice smíšených hlinitokřemičitanů
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík
- Částice na železo bohatých hlinitokřemičitanů
- Částice obsahující sodík a síru
- Částice obsahující uhlík, kyslík a sodík













Mazut (těžký topný olej) vzniká jako zbytkový produkt při frakční destilaci ropy. Jeho chemické složení se může lišit v závislosti na druhu ropy i procesu rafinace, nicméně kromě uhlovodíků v něm můžeme najít i síru či stopy kovů (železo, vanad aj.)

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

• PM<sub>10</sub> 84,16 %

т

Č

R

- PM<sub>2,5</sub> 40,58 %
- PM<sub>1</sub> 0,13 %

 Poměr  $PM_{2,5}/PM_{10}$ :
 0,482

 Poměr  $PM_1/PM_{2,5}$ :
 0,003

 Poměr  $PM_1/PM_{10}$ :
 0,002

Na první pohled je zřejmý velmi nestandardně nízký podíl částic menších než 1 mikrometr (PM<sub>1</sub>). V tomto případě se ale pravděpodobně jedná o zkreslení vlivem automatické analýzy obrazu. Ve skutečnosti byl podíl těchto částic vysoký, ale částice společně tvořily velké shluky, které automatická analýza obrazu identifikovala jako velké částice. Tomu odpovídá i skutečnost, že částice PM10, které by s ohledem na vzorkování částic PM10 měly mít podíl velmi blízký 100 %, v tomto případě mají nízký podíl.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 2329 částic, které byly ze vzorku z mazutového kotle analyzovány, ukazuje následující graf.















www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

Δ

R





#### Obrázek 41 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z mazutových kotlů.

Na obrázku 42 lze pozorovat částici pocházející z mazutového kotle, která je velmi specifická svým vzhledem. Jedná se o uhlíkatou částici s krystalky síry. Bodová analýza této částice v programu AZtec specifikovala prvkové složení: 98,48 % C, 1,23 % S a 0,29 % Al.

















R





Obrázek 42 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu představující částici z mazutového kotle.

### Průmysl – Energetika – Elektrárna na hnědé uhlí

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z elektrárny na hnědé uhlí (s výjimkou kategorií PM):

- Částice smíšených hlinitokřemičitanů
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující sodík a síru
- Částice obsahující uhlík
- Částice hlinitokřemičitanů bohatých na železo
- Částice obsahující sodík, hliník a křemík
- Částice bohaté na železo
- Částice obsahující železo
- Částice obsahující hliník
- Částice obsahující síru

Hlinitokřemičitany jsou poměrně běžnou součástí popeloviny ze spalování uhlí. Chemické složení pevných částic vznikajících spalováním hnědého uhlí závisí vždy na konkrétním druhu použitého paliva. Částice mohou dále obsahovat např. oxidy (CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aj.), uhličitany (např. CaCO<sub>3</sub>) nebo sírany (např. CaSO<sub>4</sub>).

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

• PM<sub>10</sub> 100,00 %









www.mzp.cz



PM<sub>2.5</sub> 91,85 %

т

Č

Δ

R

54,08 %  $PM_1$ 

Poměr PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,918

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>2.5</sub>: 0,589

Poměr  $PM_1/PM_{10}$ : 0,541

Více než 90 % částic analyzovaných ze vzorku z elektrárny spalující hnědé uhlí mělo velikost menší než 2,5 mikrometrů. Více než polovina pak spadala do frakce PM1.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 1999 částic, které byly ze vzorku z elektrárny na hnědé uhlí analyzovány, ukazuje následující graf.



Obrázek 43 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z elektrárny na hnědé uhlí.

Obrázek 44 představuje částice z elektrárny spalující hnědé uhlí. Patrné jsou zde kulovité částice, podobně jako tomu je u vzorku z teplárny spalující černé uhlí.













www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

č

R





Obrázek 44 – Snímek částic pocházejících z elektrárny na hnědé uhlí pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem.

# Lidské aktivity

V rámci hlavní kategorie Lidské aktivity se nachází velmi odlišné typy zdrojů, proto nemá význam je hodnotit souhrnně a budou hodnoceny individuálně.

### Lidské aktivity – cigaretový kouř

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z cigarety (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující vápník
- Částice obsahující zinek
- Částice obsahující hliník
- Částice obsahující železo
- Částice obsahující křemík















т

Č

Δ

R



- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík •
- Částice obsahující chrom •
- Částice bohaté na vápník •

Chemické složení pevných částic vznikajících spalováním tabáku cigaret může být velmi variabilní. Kromě širokého spektra organických látek s většinou karcinogenními účinky se nejčastěji vyskytují v částicích draslík, křemík, vápník a další prvky, které jsou obsažené i v samotných tabákových listech (Kärkela a kol.,2022).

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

www.mzp.cz

- $PM_{10}$ 99,86 % •
- PM<sub>2.5</sub> 98,13 %
- $PM_1$ 92,21 % •

Poměr  $PM_{2,5}/PM_{10}$ : 0,983

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>2,5</sub>: 0,940

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,923

Vzorek z cigarety obsahoval velmi vysoký podíl malých částic, částice frakce PM1 tvořily více než 90 % všech analyzovaných částic. Částic ve velikostním rozmezí 2,5 až 10 mikrometrů bylo naprosté minimum, v celkovém počtu analyzovaných částic jen necelá 2 %.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 2941 částic, které byly ze vzorku z cigarety analyzovány, ukazuje následující graf.













www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

Α

R



0	%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10											99.86%
PM2.5											98.13%
С											94.25%
PM1											92.21%
only C+O							59.	30%			
Ca		7.419	%								
Zn		3.67%									
AI		3.30%									
Fe		2.14%									
Si	<u> </u> -	1.53%									
C-O-Si	<b> </b> 1	.46%									
Cr	1	.39%									
Ca rich	1	.19%									
Cr-Fe	0	.75%									
Al rich	0	.61%									
Fe rich	0	.58%									
Mixed Al-silicates	0	.44%									
Zn rich	0	.44%									
Ti rich	0.	31%									
F	0.	24%									
S	0.	17%									
Mg-Si	0.	17%									
Mg	0.	17%									
Na-S	0.	17%									
Ni	0.	14%									
Ca-Si	0.	10%									
Ca and S rich	0.	10%									
C-O-Na	0.	07%									
Ca-F	0.	07%									
K	0.	03%									
Ca and Mg rich	0.	03%									
Cu	0.	03%									
Quartz	0.	03%									
Mn	0.	03%									
Bi	0.	03%									

Obrázek 45 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z cigaretového kouře.

Na obrázku 46 lze pozorovat částice cigaretového kouře. Dle bodové analýzy v programu AZtec obsahuje částice 2: 45,22 % O, 39,43 % Ca, 14,63 % C, 0,46 % Si, 0,26 % Al.

















Obrázek 46 – Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu představující částice vznikající spalováním tabáku cigarety.

# Lidské aktivity – Odpalování pyrotechniky

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z odpalování pyrotechniky (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující vápník
- Částice obsahující draslík
- Částice bohaté na vápník
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující chrom
- Částice bohaté na draslík a síru
- Částice obsahující síru
- Částice obsahující draslík a chlor
- Částice bohaté na vápník a hořčík

Částice vznikající odpalováním pyrotechniky zpravidla obsahují draslík a síru, což jsou prvky přítomné ve střelném prachu. Dále mohou obsahovat široké spektrum prvků způsobujících barevný efekt ohňostrojů, jako např. stroncium, baryum, měď, vápník aj. (Wanga a kol., 2024).

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

• PM<sub>10</sub> 99,93 %













www.mzp.cz



PM<sub>2,5</sub> 96,83 % •

Т

Č

Α

R

75,35 %  $PM_1$ 

Poměr PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,969

Poměr  $PM_1/PM_{2,5}$ : 0,778

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,754

Velmi vysoký byl podíl částic velikostní frakce PM2,5, nejmenší frakce PM1 byla ve vzorku zastoupena přibližně ze tří čtvrtin.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 2966 částic, které byly ze vzorku z odpalování pyrotechniky analyzovány, ukazuje následující graf.

0	%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10											99 93%
PM2.5											96.83%
С									77.7	8%	
PM1									75.35%	/ 0	
Ca						42.62%					
K		9.4	7%								
Ca rich		9.3	7%								
only C+O		7.05%	6								
Cr		4.18%									
K and S rich	2	2.43%									
S	1	.96%									
K-CI	1	.79%									
Ca and Mg rich	1.	05%									
C-O-Si	0.	91%									
Si	0.	81%									
Fe	0.	74%									
Mg	0.	71%									
Na-S	0.	57%									
Salt-NaCl	0.4	47%									
C-O-Na	0.3	37%									
Fe rich	0.2	27%									
Ba	0.2	24%									
Ni	0.2	20%									
Mixed Al-silicates	0.1	3%									
AI	0.1	3%									
Ca-Si	0.1	3%									
Ca and S rich	0.1	3%									
Cr-Fe	0.1	0%									
Cu	0.1	0%									
Zn	0.1	0%									
Mg-Si	0.0	)7%									
Zn rich	0.0	)7%									
Mn	0.0	)7%									
F	0.0	)3%									
Quartz	0.0	)3%									
Na-Al-Si	0.0	)3%									
Si-Ca-Fe	0.0	)3%									
Ca rich Al-silicates	0.0	)3%									

Obrázek 47 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z odpalování pyrotechniky.

Obrázek 48 představuje snímek částic pocházejících z odpalování pyrotechniky. Tyto částice jsou bohaté na draslík, vápník a obsahují také síru.















Č

R





Obrázek 48 – Snímek částic pocházejících z odpalování pyrotechniky pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem.

### Lidské aktivity – kreativní práce se dřevem (broušení, řezání)

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z kreativní práce se dřevem (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující jen uhlík a kyslík
- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující draslík
- Částice obsahující vápník
- Částice obsahující draslík a chlor
- Částice obsahující uhlík, kyslík a sodík
- Částice soli
- Částice obsahující měď
- Částice obsahující chrom
- Částice obsahující křemík

















Ve vzorku převažují organické částice a částice obsahující draslík nebo vápník aj., jelikož tyto prvky jsou obsaženy ve dřevu. Každý druh dřeva nicméně může obsahovat mírně odlišné kombinace prvků (záleží na druhu dřeva, podmínkách růstu a dalších faktorech).

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

• PM<sub>10</sub> 93,31 %

т

Č

Δ

R

- PM<sub>2,5</sub> 57,88 %
- PM<sub>1</sub> 9,34 %

 Poměr  $PM_{2,5}/PM_{10}$ :
 0,620

 Poměr  $PM_1/PM_{2,5}$ :
 0,161

 Poměr  $PM_1/PM_{10}$ :
 0,100

Částice spadajících do velikostní frakce  $PM_1$  bylo velmi málo, v celkovém podílu z analyzovaných částic jen přibližně 10 %. Většina částic v rámci práce se dřevem vznikala mechanicky, a tak se jednalo většinou spíše o větší částice spadající do frakcí  $PM_{10}$ , popř.  $PM_{2,5}$ .

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 2944 částic, které byly ze vzorku z kreativní činnosti se dřevem analyzovány, ukazuje následující graf.















www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

Δ

R



0	)%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10											93.31%
PM2.5							57.8	8%			
only C+O							56.49	%			
С						46.30%	D				
PM1		9.3	4%								
К	2.	99%									
Ca	2.3	31%									
Nezařazená	1.7	7%									
K-CI	1.12	2%									
C-O-Na	1.09	9%									
Salt-NaCl	0.92	2%									
Cu	0.88	8%									
Cr	0.75	5%									
Si	0.65	%									
C-O-Si	0.58	%									
Ni	0.44	%									
Cu rich	0.37	%									
Fe	0.27	%									
Ca-Cl	0.24	%									
Mixed Al-silicates	0.20	%									
Fe rich	0.17	%									
Ca rich	0.17	%									
Ca-Si	0.14	%									
Cr-Fe	0.10	%									
Mg-Si	0.10	%									
Zn	0.10	%									
Ca rich Al-silicates	0.10	%									
Ca-F	0.07	%									
Mg	0.07	%									
Quartz	0.07	%									
Na-Al-Si	0.07	%									
Fe rich Al-silicates	0.03	%									
S	0.03	%									
F	0.03	%									
Si-Ca-Fe	0.03	%									

Obrázek 49 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z kreativní práce se dřevem.

# Vnitřní prostředí

V rámci hlavní kategorie Vnitřní prostředí se nachází velmi odlišné typy zdrojů, proto nemá význam je hodnotit souhrnně a budou hodnoceny individuálně.

### Vnitřní prostředí – laserová tiskárna

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z laserové tiskárny (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující vápník
- Částice bohatá na vápník a síru
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující síru











т

Č

R



- Částice obsahující železo •
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík •
- Částice bohatá na vápník •
- Částice obsahující uhlík, kyslík a sodík •

Jedním z příkladů emisních zdrojů pocházejících z interiéru jsou laserové tiskárny. Při tisku jsou částice toneru nejprve elektrostaticky naneseny na papír, kde jsou vlivem tepla a tlaku pevně spojeny s povrchem papíru. Převážně během tisku může docházet k emisím velmi malých částic toneru (částice obsahující uhlík, železo, TiO<sub>2</sub> aj.), ale i dalších látek (VOC) (Wang a kol., 2011).

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:

www.mzp.cz

- PM<sub>10</sub> 99,64 %
- PM<sub>2,5</sub> 67,97 %
- 58,65 %  $\mathbf{PM}_1$

Poměr PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,682

Poměr  $PM_1/PM_{2,5}$ : 0,863

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,589

Vzorek obsahoval většinu částice velikostní frakce PM1, nicméně podíl větších částic byl také významný. Přibližně třetina analyzovaných částic spadala do velikostního rozmezí 2,5 až 10 mikrometrů.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 2779 částic, které byly ze vzorku z laserové tiskány analyzovány, ukazuje následující graf.










Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

Α

R

ARAN

0	% 10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10										99.83%
PM2.5										95.49%
С									87.7	%
PM1						50 500/			84.88%	
only C+O		<b>0</b> 0/				53.52%				
Ca	8.66	6%								
Ca and S rich	2.80%									
SI	2.66%									
5	2.63%									
Fe	1.92%									
C-O-SI Co.rich	1.89%									
	1.30%									
Fe rich	0.00%									
Mixed Al-silicates	0.71%									
Ca-Si	0.01%									
AI	0.37 %									
Zn	0.34%									
Quartz	0.24%									
Na-Al-Si	0.24%									
K-CI	0.20%									
Ca and Mg rich	0.17%									
Mg-Si	0.17%									
Mg	0.17%									
Si-Ca-Fe	0.17%									
Ca rich Al-silicates	0.13%									
Cr-Fe	0.10%									
Salt-NaCl	0.10%									
K and S rich	0.07%									
Fe rich Al-silicates	0.07%									
F	0.07%									
Ca-⊢	0.07%									
Nezarazena	0.07%									
INA-S	0.07%									
Cu Ti rich	0.07%									
Curich	0.07%									
Zn rich	0.07%									
Mastek	0.03%									
Masler	0.0370									

Obrázek 50 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z laserové tiskárny.

Obrázek 51 představuje částici z tonerového prášku, kde světlé kulovité útvary na povrchu představují oxidy železa. Bodová analýza v programu AZtec specifikovala prvkové složení této částice: 59,84 % C, 29,49 % Fe, 8,99 % O a 1,69 % Si.

















т

Č

R





Obrázek 51 – Snímek částice pocházející z emisí z laserové tiskárny pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem.

## Vnitřní prostředí – 3D tiskárna

Níže je uvedených 10 nejčastěji zastoupených kategorií částic ze vzorku z emisí z 3D tiskárny (s výjimkou kategorií PM):

- Částice obsahující uhlík
- Částice obsahující pouze uhlík a kyslík
- Částice obsahující křemík
- Částice obsahující vápník
- Částice obsahující železo
- Částice obsahující uhlík, kyslík a křemík
- Částice smíšených hlinitokřemičitanů
- Částice obsahující uhlík, kyslík a sodík
- Částice obsahující síru
- Částice obsahující vápník a křemík

Dalším příkladem emisního zdroje z interiéru je 3D tiskárna. Jako materiál k tisku se často využívá např. ABS (akrylonitrilbutadienstyren). Mezi typické prvky, které částice emitované z 3D tiskárny obsahují, patří uhlík, vápník, síra a křemík. Některé částice pocházejí ze samotného materiálu – ABS, který částice emituje během tavení (Rao a kol., 2017).

Kategorizace na základě velikosti dává následující poměry frakcí:













Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz

www.mzp.cz



- PM<sub>10</sub> 100,00 %
- PM<sub>2,5</sub> 99,39 %

т

Č

Δ

R

• PM<sub>1</sub> 92,90 %

Poměr PM<sub>2,5</sub>/PM<sub>10</sub>: 0,994

Poměr PM<sub>1</sub>/PM<sub>2,5</sub>: 0,935

Poměr  $PM_1/PM_{10}$ : 0,929

Částice ve vzorku z 3D tiskárny byly z naprosté většiny částice velikostní frakce PM<sub>1</sub>. V celkovém počtu analyzovaných částic tvořily více než 90 %.

Procentuální zastoupení jednotlivých kategorií částic z celkového počtu 5916 částic, které byly ze vzorku z 3D tiskány analyzovány, ukazuje následující graf.

C	)%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
PM10											100 00%
PM2.5											99.39%
PM1											92.90%
С										85.43%	, D
only C+O		- 10	040/		38.2	7%					
SI		10	.21%								
Ca Fe		0.00% 2 / 20/									
C-O-Si		3.36%									
Mixed Al-silicates	2	.64%									
C-O-Na	2	.54%									
S	1.2	22%									
Ca-Si	1.0	8%									
K	1.0	)5%									
Zn Eo rich	0.9	0%									
Fe rich Al-silicates	0.0	3%									
Al	0.7	3%									
Ca rich	0.6	6%									
Na-S	0.3	9%									
F	0.3	5%									
Ca-F	0.3	0%									
Mg-Si	0.2	9%									
Ma	0.2	/ % 5%									
Na-Al-Si	0.2	370 0%									
Si-Ca-Fe	0.2	0%									
Ca and S rich	0.20	0%									
Cu	0.14	4%									
Quartz	0.12	2%									
Ca and Mg rich	0.12	2% 10/									
Zn rich		J /0 2%									
Ba	0.08	3%									
Cr-Fe	0.05	5%									
Ca rich Al-silicates	0.05	5%									
Mastek	0.05	5%									
Ni	0.03	3%									
Mn Kond Srich	0.0	5% 20/									
Ti rich	0.02	<u>~</u> /0 2%									
Al rich	0.02	2%									
Sn	0.02	2%									
Pb rich	0.02	2%									

Obrázek 52 – Procentuální podíl jednotlivých kategorií částic ve vzorku z emisí z 3D tiskárny.

Na obrázku 53 je patrná tvarová i velikostní variabilita částic ve vzorku z 3D tiskárny.













Tento projekt je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR a Ministerstva životního prostředí v rámci **Programu Prostředí pro život**.

www.tacr.cz

www.mzp.cz

т

Č

Δ

R





Obrázek 53 – Snímek částic pocházejících z 3D tiskárny pořízený skenovacím elektronovým mikroskopem.



















www.mzp.cz



## 6. Závěr

т

Č

R

V rámci této zprávy byly prezentovány výsledky SEM/EDX analýzy vzorků odebraných z různých typů emisních zdrojů. Díky skenovacímu elektronovému mikroskopu v kombinaci s EDX detektorem byly sledovány jak morfologické parametry částic (tvar, velikost), tak jejich chemické složení.

Cílem analýz bylo genericky popsat jednotlivé kategorie zdrojů, které byly rozděleny do několika hlavních kategorií, dále podkategorií a v některých případech i podpodkategorií.

Emisní vzorky zahrnovaly vzorky částic například z dopravy, zemědělství, různých typů kotlů na pevná paliva, stavební činnosti, ale i některých specifických zdrojů, jako je například odpalování pyrotechniky, kouření cigarety nebo laserová a 3D tiskárna.

Částice byly dle navržených klasifikačních kritérií rozděleny do různých kategorií dle svého složení, velikosti a tvaru. Statisticky byly popsány i morfologické parametry.

Cílem těchto hodnocení je co nejlépe popsat charakteristiky různých známých emisních zdrojů a na základě těchto znalostí potom umožnit identifikaci těchto zdrojů v neznámých vzorcích imisí.

Do budoucna by bylo vhodné rozšířit seznam analyzovaných emisních vzorků. Příležitostí je také využití dalších metod pro popsání vzorků, například s využitím umělé inteligence. V některých případech bude také potřeba odebrat více vzorků konkrétního zdroje, aby byly výsledky statisticky významné.

















## 7. Poděkování

т

č

Α

R

Na tomto místě bychom jménem celého autorského týmu rádi poděkovali všem, kteří nám poskytli vzorky či se jinak podíleli na jejich odběru:

VŠB – Ing. F. Hopan, Ph.D., Ing. J. Horák, Ph.D., Ing. Vladimír Ulman, Ph.D., Ing. Tomáš Martinovič, Ph.D,

ČHMÚ Ostrava - Ing. R. Seibert

TOP-Envi Tech - Ing. B. Svozil

VUT - Ing. V. Adamec

ČHMÚ Brno – M. Komárek, T. Šťavík, I. Bajerková















www.mzp.cz



## 8. Literatura

т

Č

R

Bernardi, J. (2021). Energy-dispersive X-ray spectroscopy. In Imaging Modalities for Biological and Preclinical Research: A Compendium, Volume 1: Part I: Ex vivo biological imaging (pp. I-9). Bristol, UK: IOP Publishing.

Casuccio, G. S., Lersch, T. L., Schlaegle, S. F., & Martello, D. V. (2002). Characterization of ambient carbonaceous particles using electron microscopy techniques. Fuel Chem Div Preprints, 47(2), 624-626.

Choël, M., Deboudt, K., Osán, J., Flament, P., & Van Grieken, R. (2005). Quantitative determination of low-Z elements in single atmospheric particles on boron substrates by automated scanning electron microscopy- energy-dispersive x-ray spectrometry. Analytical Chemistry, 77(17), 5686-5692.

Fernández, R. G., García, C. P., Lavín, A. G., & de las Heras, J. L. B. (2012). Study of main combustion characteristics for biomass fuels used in boilers. Fuel Processing Technology, 103, 16-26.

Grigoratos, T., & Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: a review. Environmental Science and Pollution Research, 22(4), 2491-2504.

Güney, B., & Öz, A. (2020). Microstructure and chemical analysis of NOx and particle emissions of diesel engines. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, 9(2), 105-112.

Jasiński, R., Strzemiecka, B., Koltsov, I., Mizeracki, J., & Kurzawska, P. (2021). Physicochemical analysis of the particulate matter emitted from road vehicle engines. Energies, 14(24), 8556.

Kärkelä, T., Tapper, U., & Kajolinna, T. (2022). Comparison of 3R4F cigarette smoke and IQOS heated tobacco product aerosol emissions. Environmental Science and Pollution Research, 1-19.

Křůmal, K., Mikuška, P., Horák, J., Jaroch, M., Hopan, F., & Kuboňová, L. (2023). Gaseous and particulate emissions from the combustion of hard and soft wood for household heating: Influence of boiler type and heat output. Atmospheric Pollution Research, 14(7), 101801.

Liati, A., Schreiber, D., Lugovyy, D., Gramstat, S., & Eggenschwiler, P. D. (2019). Airborne particulate matter emissions from vehicle brakes in micro-and nano-scales: Morphology and chemistry by electron microscopy. Atmospheric Environment, 212, 281-289.

Shao, L., Liu, P., Jones, T., Yang, S., Wang, W., Zhang, D., ... & BéruBé, K. (2022). A review of atmospheric individual particle analyses: Methodologies and applications in environmental research. Gondwana Research, 110, 347-369.

Szwed, M., Żukowski, W., Misztal, K., & Kozłowski, R. (2023). High-energy transformations of fossil fuels in the cement industry. Energies, 16(9), 3634.

Ul-Hamid, Anwar. A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy. Springer Nature Switzerland AG, 2018. ISBN 978-3-319-98482-7.

Wang, W., Zhou, H., Gao, Y., Shao, L., Zhou, X., Li, X., ... & Lyu, R. (2024). Chemical composition and morphology of PM2. 5 in a rural valley during Chinese New Year's Eve: Impact of firework/firecracker display. Atmospheric Environment, 318, 120225.

Wang, Z. M., Wagner, J., & Wall, S. (2011). Characterization of laser printer nanoparticle and VOC emissions, formation mechanisms, and strategies to reduce airborne exposures. Aerosol Science and Technology, 45(9), 1060-1068.













Т

Č

Α

R



Yang, W., Pudasainee, D., Gupta, R., Li, W., Wang, B., & Sun, L. (2021). An overview of inorganic particulate matter emission from coal/biomass/MSW combustion: Sampling and measurement, formation, distribution, inorganic composition and influencing factors. Fuel Processing Technology, 213, 106657.

Yin, C., Cheng, X., Liu, X., & Zhao, M. (2020). Identification and classification of atmospheric particles based on SEM images using convolutional neural network with attention mechanism. Complexity, 2020(1), 9673724.

Zhang, H., Sun, W., Li, W., & Wang, Y. (2022). Physical and chemical characterization of fugitive particulate matter emissions of the iron and steel industry. Atmospheric Pollution Research, 13(1), 101272.











