

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Analýza produkce pevných částic

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

Autor práce: Filip Matzner

PRAHA 2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Filip Matzner

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Analýza produkce pevných částic

Název anglicky

Analysis of the production of particulate matter

Cíle práce

Cílem práce bude provést analýzu a experimentální měření produkce pevných částic různých druhů spalovacích motorů v laboratorních podmínkách, případně v reálném provozu.

Metodika

1. prostudovat základní literaturu v oblasti tvorby pevných částic spalovacích motorů
2. návrh postupu měření (měření pevných částic emisním analyzátozem)
3. výsledky a diskuze
4. závěr

Doporučený rozsah práce

50-60 stran

Klíčová slova

pevné částice, emise, výfukové plyny

Doporučené zdroje informací

EASTWOOD, Peter. Particulate emissions from vehicles. [Online-Ausg.]. Chichester, England: John Wiley, 2008. ISBN 9780470986509.

HROMÁDKO, J. – ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE. TECHNICKÁ FAKULTA. *Speciální spalovací motory*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2168-7.

HROMÁDKO, J. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.

ŠMERDA, T. – ČUPERA, J. – FAJMAN, M. *Vznětové motory vozidel: biopaliva, emise, traktory*. Brno: CPress, 2013. ISBN 978-80-264-0160-5.

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Jakub Mařík, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 16. 1. 2017

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 1. 2017

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan

V Praze dne 06. 11. 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: *Analýza produkce pevných částic* vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne 26.3.2018

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval Ing. Jakubovi Maříkovi Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za dohled, připomínky, cenné rady a konzultace během zpracování celé práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinovi Pechoutovi Ph.D. za pomoc a odborný výklad k měření praktické části práce.

Analýza produkce pevných částic

Souhrn

Tato diplomová práce je zaměřena na mechanismy tvorby pevných částic ve spalovacích motorech a jejich obecnou klasifikaci. Dále se práce zabývá jejich vlivem na lidské zdraví a případnými možnostmi jejich redukce. Následně jsou v textu uvedeny evropské emisní limity, a to od jejich počátku až do současného stavu, se související tematikou jízdních cyklů, včetně jejich současných a nadcházejících změn. Pro homologaci vozidel jsou zde popsány nejnovější metody pro měření počtu a hmotnosti pevných částic. Praktická část je zaměřena na měření počtu pevných částic tří použitých paliv během NEDC a porovnání emisí částic. Uvedeny jsou použité měřicí zařízení a software, následné zpracování dat a výsledky z měření.

Klíčová slova: pevné částice, EURO normy, jízdní cykly, metody měření, redukce částic, filtr pevných částic, lidské zdraví

Analysis of the production of particulate matter

Summary

This diploma thesis focuses on the mechanisms of particulate matter formation in combustion engines and their general classification. Further, the thesis deals with their influence on human health and possibilities of their reduction. The European emission limits are listed in the text, from the beginning to the present situation, with related driving cycles, including their current and forthcoming changes. For vehicle homologation, the latest methods for measuring the number and weight of particulate matter are described here. The practical part is focused on measuring the number of particulate matter of the three fuels used during the NEDC and comparing the particulate emissions. Used measuring equipment and software, post-data processing and measurement results are listed in the end of this thesis.

Keywords: particulate matter, emission standards, driving cycles, measurement methods, PM reduction, DPF, human health

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce	2
3	Metodika práce.....	2
4	Pevné částice	3
4.1	Složení částic a jejich klasifikace	3
4.2	Tvorba pevných částic	5
4.2.1	Tvorba rozpustných organických frakcí a sulfátů.....	5
4.2.2	Tvorba sazí	5
4.2.2.1	Pyrolýza	6
4.2.2.2	Nukleace	6
4.2.2.3	Růst povrchu	6
4.2.2.4	Koalescence a aglomerace	7
4.2.2.5	Oxidace	7
5	Redukce pevných částic	8
5.1	Metody snižování pevných částic před spalováním paliva	8
5.1.1	Bionafta jako palivo ke snížení pevných částic	8
5.1.2	Okysličená palivová aditiva.....	9
5.1.3	Vodou emulgovaná motorová nafta.....	9
5.1.4	Časování vstřikování	9
5.1.5	Vstřikovací tlak	9
5.1.6	Více vstřiků v jednom cyklu.....	10
5.2	Metody snižování pevných částic po spalování paliva	10
5.2.1	Filtr pevných částic.....	10
5.2.1.1	Pasivní regenerace	12
5.2.1.2	Aktivní regenerace	15
5.2.1.3	Pasivní a aktivní regenerace – kombinace	18
6	Vliv pevných částic na lidské zdraví.....	19
7	Evropské emisní limity	24
7.1	Vývoj norem EURO.....	24
7.2	Souhrn emisních norem.....	28
7.3	Homologační zkoušky	30
7.4	Jízdní cykly	32
7.4.1	New European Driving Cycle (NEDC)	33
7.4.2	Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles (WLTC)	34
7.4.3	Common Artemis Driving Cycles (CADC).....	36
7.5	Vývoj produkce pevných částic v České republice	37

8	Metody měření emisí pevných částic vozidel	41
8.1	Gravimetrická metoda.....	42
8.1.1	Metodika měření.....	42
8.1.2	Chyby měření	44
8.2	Systémy čítačů pevných částic.....	45
8.2.1	Kondenzační čítač pevných částic CPC.....	46
8.3	Přenosné systémy pro měření emisí (PEMS).....	48
8.3.1	Systém PEMS PM	49
8.3.2	Systém PEMS PN.....	49
9	Praktická část	51
9.1	Přístrojové vybavení	51
9.1.1	Velikostní klasifikátor pevných částic Engine Exhaust Particle Sizer Model 3090	51
9.1.2	Plynový analyzátor FTIR MATRIX MG-5	52
9.1.3	Válcová zkušebna	53
9.1.4	Laboratorní váha VIBRA AJ-6200CE.....	55
9.2	Softwarové vybavení	55
9.2.1	VAG-COM VCDS Standard	56
9.2.2	OPUS GA	56
9.2.3	ControlWeb	57
9.2.4	EEPS Software	57
9.3	Zkušební vozidlo	58
9.4	Zkoušená paliva.....	59
9.5	Metodika měření	59
9.5.1	Zpracování dat a postup výpočtu produkce sledovaných složek výfukových plynů	60
9.6	Výsledky a diskuze	63
10	Závěr.....	69
11	Seznam použité literatury.....	71
12	Seznam obrázků	80
13	Seznam tabulek	81
14	Seznam grafů	82

1 Úvod

Vznětové a zážehové motory jsou široce používány, a to především v pozemní automobilové a nákladní dopravě. Navzdory všeobecné popularitě mají své nevýhody, do kterých se řadí i emise látek znečišťujících ovzduší. Jsou jimi jak plynné emise, tak i pevné částice. Jejich nepříznivý efekt dopadá především na lidské zdraví a jsou označovány jako karcinogeny. Dále také kontaminují ovzduší a okolní přírodu. Pro jejich eliminaci jsou do moderních vozů instalovány různé technologie, které zamezují jejich vzniku či je následně odstraňují.

Pro zamezení emisí těchto látek, z legislativního hlediska, jsou zavedeny emisní limity, které se pro různé světové regiony liší. V rámci Evropské unie se zavedly emisní limity EURO, které musí vozidla splňovat, aby byla schválena k provozu na pozemních komunikacích. Neustálý vědecký pokrok a výzkum vede k lepším systémům, které mohou zabránit vzniku částic či jejich emitování do ovzduší. Na tento vývoj reagují evropské zákonodárné orgány, které kladou důraz na stále zpřísnování emisních limitů. V současné době se dle platné legislativy stanovuje jak hmotnost emitovaných pevných částic v gramech na kilometr, tak jejich počet na kilometr. Tento přístup může být považován za nástroj pro omezení vysoce jemných částic, o kterých je známo, že mají největší dopad na lidské zdraví.

Vývoj se netýká pouze limitů a systémů pro omezení emisí, ale také celé metodiky jejich měření. Do roku 2017 se jízdní cyklus NEDC, používaný pro laboratorní měření při schvalování vozidel, změnil, jelikož nerefletoval skutečnou jízdu v provozu. Byly jím také velmi zvýhodněny vozy používající Start-Stop systém, což se neprojevovalo pouze na produkci pevných částic, ale i na celém spektru plynných složek a na spotřebě paliva. Tento cyklus byl nahrazen procedurou WLTP, která nejen stanovuje všechny podmínky pro měření, ale především vylepšuje jízdní cyklus WLTC, který se blíží současným jízdním profilům reálného provozu. Jelikož je tento postup pouhou simulací jízdy v laboratorních podmínkách, je snahou vyvinout relevantní metodu pro měření pevných částic v reálném provozu.

Jiný přístup, vedoucí ke snižování emisí částic, je využívání alternativních paliv. Do pojmu alternativní jsou zahrnuta paliva jiná než konvenčně prodáváná a používaná. Jejich širší využití by se nemuselo projevit pouze na snižování koncentrace částic vypouštěných do ovzduší, ale i na snižování ostatních plynných emisí. Což by v konečném důsledku mohlo vést ke zkvalitnění životního prostředí.

2 Cíl práce

Cílem rešeršní části práce je vytvořit ucelený přehled týkající se pevných částic emitovaných spalovacími motory. Základem této problematiky je popis částic a základní klasifikace dle specifikovaných kritérií, kde dále navazují popsané procesy, vedoucí k jejich vzniku. Vzhledem k tomu, že pevné částice jsou produktem nedokonalého spalování současných spalovacích motorů a současná dostupná technologie neumožňuje jejich úplnou eliminaci, je součástí této práce také shrnutí možností částečných redukcí emise pevných částic do ovzduší. Současně je také popsán, dle několika lékařských studií, vliv částic na lidské zdraví.

Součástí této práce je také přehled legislativních opatření, která se zabývají emisními limity (např. jízdní cykly a metody měření), a jejich popis v rámci států Evropské unie. V práci jsou popsány nejnovější metody, které se používají v procesu schvalování nových typů vozidel, i nástup nových metod měření v reálném provozu.

Praktická část práce je cílena na měření počtu pevných částic a spotřeby pohonných hmot v závislosti na třech druzích vybraných paliv. Snahou je vytvořit kvalitní podmínky pro měření pomocí dostupných měřicích zařízení v laboratořích ČZU, zpracovat relevantní data a porovnat vliv jednotlivých paliv na produkci pevných částic při použití NEDC.

3 Metodika práce

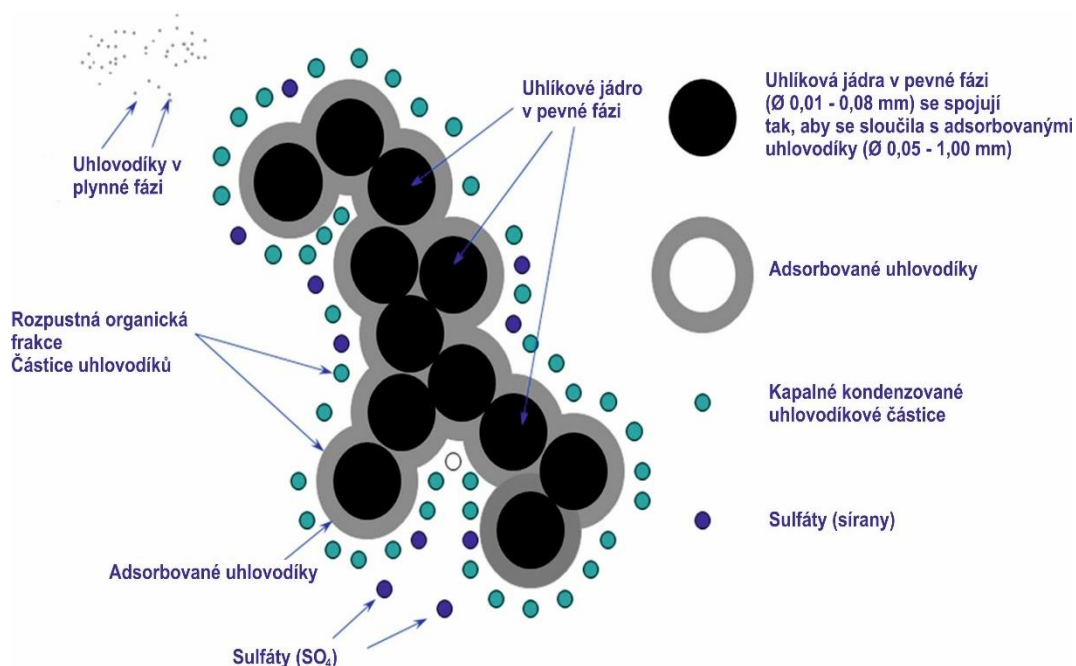
Jako podklady pro zpracování rešeršní části práce jsou použity zdroje odborné literatury, týkající se spalovacích motorů a problematiky emisí znečišťujících látek z výfukového potrubí vozidel. Dále jsou použity a zpracovány nejnovější dostupné vědecké studie, české i zahraniční, které popisují a vysvětlují tvorbu pevných částic, současné metody pro jejich redukcí, legislativní požadavky a nové metody měření pevných částic. Nedílnou součástí je i zpracování lékařských studií, které jsou přímo zaměřeny na vliv pevných částic na lidské zdraví.

Pro měření praktické části byly využity prostory, prostředky a zařízení laboratoří České zemědělské univerzity v Praze, Katedry vozidel a pozemní dopravy. Pro samotné měření bylo využito zkušební vozidlo ČZU, umístěné na válcové zkušební. Dále jsou, jako měřicí zařízení, použity analyzátory plyných emisí a pevných částic. Stanovení spotřeby paliva je zaznamenáváno laboratorní vahou a chlazení vozu řešeno pomocí ventilátoru umístěného těsně před vozem. Přesný postup a metodika měření je uveden v kapitole 9.5 *Metodika měření*.

4 Pevné částice

4.1 Složení částic a jejich klasifikace

Pevné částice vznikají především jako exhalace u vznětových motorů. Tvoří komplexní aerosolový systém, který je kombinací sazí a dalších kapalných či pevných složek. Částice mohou být rozděleny na rozpustnou a nerozpustnou organickou frakci. Saze se obvykle tvoří u bohaté směsi paliva při zvýšené teplotě bez dostatečné koncentrace kyslíku. Téměř 50 % pevných částic je složeno ze sazí. Kapalně složky aerosolu a uhlovodíky jsou adsorbovány na povrchu sazí v závislosti na provozních podmínkách motoru. Rozpustná frakce přítomná v částicích se skládá z nespáleného paliva, a to hlavně z aldehydů, alkanů, alkenů, alifatických uhlovodíků, polycyklických uhlovodíků a jeho derivátů. Různé další složky, jako je mazací olej a částečně oxidované palivo, se řadí také k rozpustné organické frakci. Na **Obr. 1** je schematicky zobrazena pevná částice (saze) s adsorbovanými částicemi na jejím povrchu. [1],[2]



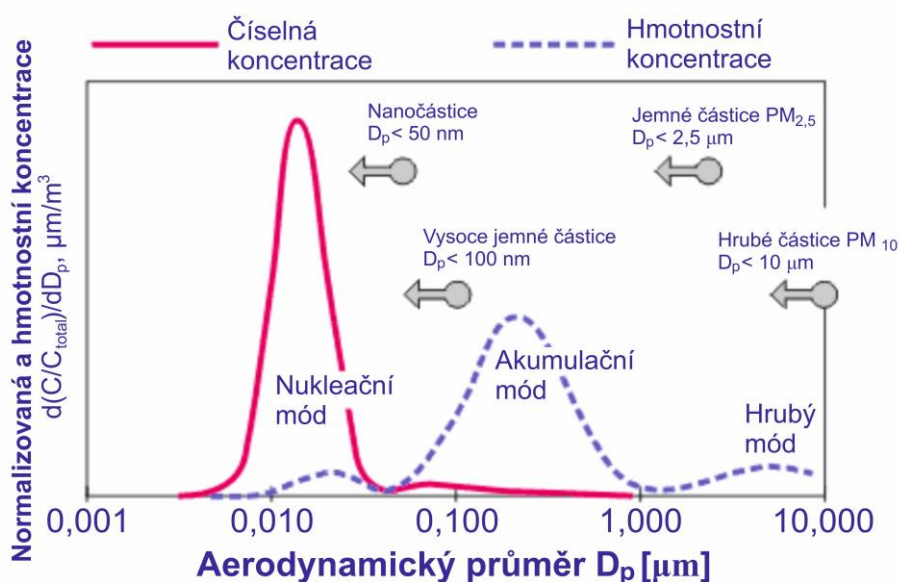
Obr. 1 Schéma pevné částice [2]

Stanovení velikosti a počtu částic je mnohem citlivější na měřicí techniky a parametry než kvantifikace emisí hmoty částic. Metody ředění a odběru vzorků jsou klíčové proměnné, které je třeba vzít v úvahu, aby se zajistily přesné a opakovatelné výsledky. Částice jsou rozděleny, dle většiny autorů, do následujících kategorií na základě jejich aerodynamického průměru (aerodynamický průměr je definován jako průměr kulové částice o hustotě 1 g/cm³, která má

stejnou ustálenou rychlost způsobenou gravitační silou v klidném ovzduší, jako sledovaná částice) [3],[4]:

- *Hrubé částice* PM₁₀ s aerodynamickým průměrem $\leq 10 \mu\text{m}$
- *Jemné částice* PM_{2,5} s aerodynamickým průměrem $\leq 2,5 \mu\text{m}$
- *Vysoce jemné částice* s aerodynamickým průměrem $0,1 \mu\text{m} - 100 \text{ nm}$
- *Nanočástice* s aerodynamickým průměrem menším než 50 nm

Typické rozložení velikosti částic výfukových plynů vznětových motorů je uvedeno na **Obr. 2** (pro aerodynamický průměr částic se používá logaritmická stupnice). Téměř všechny částice nafty mají velikost podstatně menší než $1 \mu\text{m}$. Představují tedy směs jemných částic, vysoce jemných částic a nanočástic. Rozložení velikosti částic nafty má bimodální charakter, který odpovídá mechanismům nukleace a aglomerace částic, přičemž odpovídající typy částic jsou označovány jako *nukleační* a *akumulační mód*. Na **Graf 1** jsou vytvořeny normální logaritmické distribuční křivky, které znázorňují hmotnost (hmotnostní koncentraci – PM - particle mass) a počet (číselnou koncentraci – PN particle number) částic [4],[5]. Částice motorové nafty jsou převážně tvořeny malými částicemi s malou hmotností, které jsou smíchány s s malým počtem větších částic, které představují většinu celkové hmotnosti. Malá část částic vznětového motoru se nachází ve třetím, *hrubém módu*.



Graf 1 Rozdělení velikosti částic motorové nafty [4]

4.2 Tvorba pevných částic

4.2.1 Tvorba rozpustných organických frakcí a sulfátů

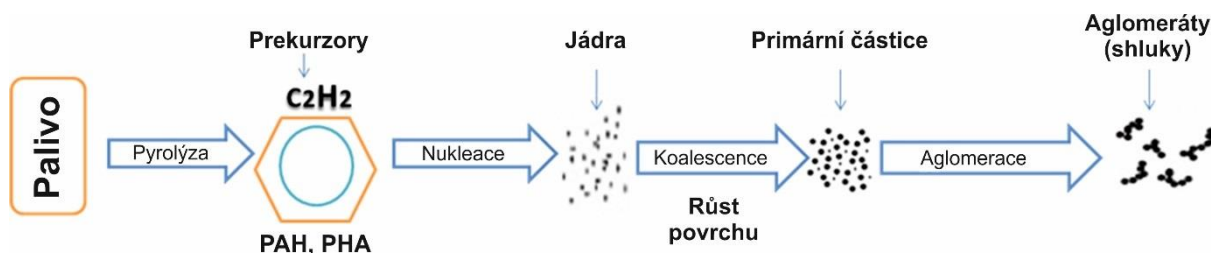
Rozpustné organická frakce se vytváří v místech, kde jsou motorové palivo či mazací olej zachyceny ve štěrbině válce nebo v jeho chladnějších místech, ve kterých nemůže plně probíhat proces oxidace či pyrolýzy. Při vysokých teplotách ve výfukovém potrubí jsou tyto frakce v plynné fázi, a po ochlazení a zředění se mohou adsorbovat na povrch částic. Některé složky, které se nemohou uchytit na povrchu částic (např. z důsledku málo adsorbčních míst), mohou kondenzovat na kyselinu sírovou a vytvořit jádra nanočástic.

Tvorba sulfátů závisí na obsahu síry v palivu a mazacím oleji. Síra je emitována ve formě SO_2 . Okolo 2-3 % je přeměněna na SO_3 . Při použití oxidačního katalyzátoru dojde k oxidaci 70 % SO_2 na SO_3 . To má za následek, že při použití oxidačního katalyzátoru a spalování nafty s 5 ppm síry může dojít až ke zdvojnásobení emisí sulfátů. [6]

4.2.2 Tvorba sazí

Tvorba sazí je proces, při kterém se vytvářejí pevné částice z kapiček paliva během několika málo mikrosekund. Proces spalování ve vznětových motorech má jiný průběh než u zážehových. U vznětových motorů je koncentrace sazí významnější. Nafta má větší obsah polycyklických aromatických uhlovodíků a vyšší hodnotu bodu vznícení. Tvorba sazí probíhá v oblastech válců motoru bohatých na palivo při teplotě 1100 až 2500 °C. [5]

Přeměna uhlovodíků kapalné fáze na saze, a nakonec na plynnou fázi, se děje v šesti krocích, a to pyrolýza, nukleace, růst povrchu, koalescence, aglomerace a oxidace, jak je schematicky zobrazeno na **Obr. 2**. Fyzikální proces tvorby sazí závisí na různých podmínkách, jako je tlak, teplota, vstřikovací parametry a struktura paliva. Tvorba sazí a rychlost oxidace závisí hlavně na teplotě a tlaku reakce. [2]



Obr. 2 Schematické zobrazení tvorby částic [2]

4.2.2.1 Pyrolýza

Pyrolýza je proces, při kterém organické sloučeniny, jako jsou paliva, procházejí změnou molekulární struktury při vysoké teplotě bez dostatečné koncentrace kyslíku. Palivová pyrolýza vede ke vzniku prekurzorů neboli stavebních kamenů sazí. V závislosti na druhu spalování se liší průběh pyrolýzy a rychlost oxidace. Při kinetickém spalování (premix) se tvoří méně sazí, protože obsahuje více kyslíku, zatímco při difúzním spalování (nonpremix) se tvorba sazí zvyšuje v důsledku menšího obsahu kyslíku. Při zvyšování teploty se rychlost oxidace zvyšuje. Tato fakta jasně vedou k závěru, že tvorba sazí závisí zejména na teplotě a koncentraci kyslíku.

Nenasycené uhlovodíky, polyhydroxyalkanoáty (PHA) a polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH - např. naftalen, anthracen, pyren, benz(a)antracén, chrysen či benzo(a)pyren) jsou typické produkty pyrolýzy. Za další produkty pyrolýzy při difúzním spalování laminárním plamenem jsou považovány C_2H_2 , C_2H_4 , CH_4 , C_3H_6 a C_6H_6 . [2],[7]

4.2.2.2 Nukleace

Nukleace je proces, při kterém se částice vytvářejí z reakčních složek v plynné fázi. Velikost jader vytvořených při spalování paliva je zpočátku v rozmezí 1,5-2 nm. Při tomto procesu, který zahrnuje přidávání velkého množství uhlovodíků o malém rozměru, se některé uhlovodíky kombinují a vznikají velké aromatické molekuly. Tento proces obvykle probíhá při teplotách v rozmezí 1000-1300 °C. Takto vytvořené částice mají menší podíl na celkové hmotnosti sazí, ale mají větší vliv na hmotu přidanou později, protože poskytují aktivní místa pro růst povrchu - adsorpci.

Proces nukleace sazí má tři hlavní kroky. Nejprve se provede přeměna otevřeného řetězce molekul na kruhovou strukturu cyklizačním procesem. Během tohoto procesu se molekuly acetyleny spojují a vzniká benzenové jádro. Poté se tyto aromatické uhlovodíky dehydrogenují (proces, při kterém dochází k odštěpení atomu vodíku ze dvou sousedních atomů uhlíku vázaných jednoduchou vazbou, která se změní na dvojnou vazbu) při nízké teplotě. Výsledkem jsou polycyklické sloučeniny. [2],[8]

4.2.2.3 Růst povrchu

Nukleačním procesem vznikne značné množství velmi malých částic, tj. nazývané jako nanočástice. Velikost částic se výrazně zvýší při procesu růstu povrchu. Dochází k ukládání

uhlovodíků na povrch jader, což vede ke zvýšení hmotnosti a velikosti sazí. Primárně jde hlavně o acetylén, který nakonec vede ke zvýšení hmotnosti sazí, zatímco počet částic zůstává konstantní. Tento proces pokračuje i přesto, že se částice pohybují z hlavní reakční zóny (válec) do méně reaktivních a chladnějších oblastí (výfukové potrubí), kde je koncentrace uhlovodíků pod mezní hodnotou tvorby sazí. Rychlost tvorby sazí během růstu povrchu závisí hlavně na počtu přítomných jader. Tento proces obvykle probíhá v několika pikosekundách až 0,05 ms po vytvoření jádra. Proto má doba tohoto procesu velký vliv na hmotnost sazí a jejich objem. Rychlost růstu povrchu je u větších částic nižší ve srovnání s menšími částicemi, protože částice malých rozměrů mají více reaktivních radikálových míst. [2]

4.2.2.4 Koalescence a aglomerace

Koalescence je děj, při kterém se kapalně částice v suspenzi spojují a vytvářejí větší částice. Aglomerace je proces vedoucí k tvorbě aglomerátů – shluků. Pohyb částic vede ke kolizím mezi jednotlivými částicemi, což způsobuje aglomeraci a koalescenci. Důsledkem je pokles počtu částic, hmotnostní koncentrace zůstává stejná a jejich velikost se zvyšuje. Tento jev se nazývá koagulace. Velikost primárních sférických částic, které následně tvoří větší sféroidy, závisí na provozních podmínkách motoru, jako je např. typ vstříkovače. Velikost vzniklých primárních částic je v rozmezí od 20 do 70 nm. Na konci spalování částice dále aglomerují a vytvářejí strukturu o velikosti od 100 nm do 2 μm . Velikost vytvořených částic může být i větší, jelikož je tento faktor ovlivněn okolními podmínkami. [2],[9]

4.2.2.5 Oxidace

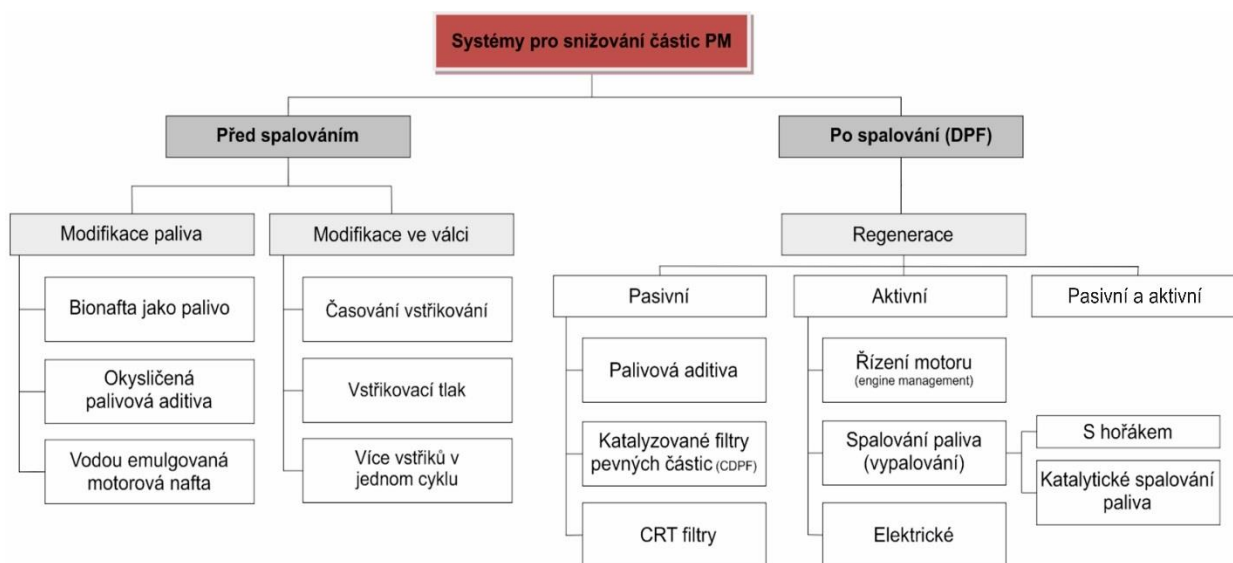
Oxidace je proces tvorby sazí, ve kterém uhlíkové nebo uhlovodíkové molekuly oxidují na produkty spalování. Uhlík se nepodílí na tvorbě sazí, dokud částečně nezoxiduje na CO i v případě bohaté směsi. Tento proces začíná kdykoli během procesu tvorby sazí od pyrolýzy po koalescenci a aglomeraci. Rychlost reakce závisí zejména na tvorbě směsi vzduchu a paliva. Volné radikály OH, O⁻ a O jsou hlavními oxidačními činidly podílejícími se na reakcích.

Oxidační reakce sazí probíhají při teplotách od 1000 °C. Vysoká odolnost vůči oxidační reakci je dána zejména grafitovou strukturou sazí. Oxidace obvykle probíhá ve dvou fázích. Nejdříve dochází k absorpci kyslíku na povrchu sazí. Ve druhém stupni probíhá desorpce kyslíku z povrchu. Volné radikály OH přispívají k oxidačním reakcím sazí v případě bohatých a stechiometrických směsí. Jak OH, tak i O₂ přispívají k oxidaci sazí v chudých směsích. Ve výfukovém potrubí se výfukové plyny ochladí. Uhlovodíky s relativně nízkým tlakem par,

sulfáty a kyselina sírová spolu s vodou kondenzují na saze, což vede ke konečné tvorbě částic. [2]

5 Redukce pevných částic

Vzhledem k nebezpečným účinkům pevných částic musí být přijata opatření k jejich potlačení, aby se omezil negativní dopad na zdraví člověka a životní prostředí. Na následujícím obrázku **Obr. 3** je znázorněn přehled různých technologií používaných před spalováním a po spalování, které jsou určeny pro redukci pevných částic.



Obr. 3 Uspořádání metod vedoucím k redukování pevných částic [2]

5.1 Metody snižování pevných částic před spalováním paliva

5.1.1 Bionafta jako palivo ke snížení pevných částic

Bionafta je alternativní palivo, které je definováno jako metylester nenasycených mastných kyselin, produkované z rostlinných olejů či odpadních živočišných tuků. Bionafta musí splňovat evropskou normu, které udává její přesné složení (EN 14214:2003). Výhodami bionafty jsou především její obnovitelnost, biologická odbouratelnost a velmi dobrá mazací schopnost. Palivo má nízký obsah síry a aromatických látek. Také obsahuje téměř 10 % kyslíku, který pomáhá palivo lépe vypálit. Při použití bionafty jako paliva se ve většině případech výzkumů snižovala koncentrace či velikost pevných částic. Jako sekundární efekt jejího použití může být i snížení jiných exhalací jako např. oxidů dusíku. [2],[10],[11],[12]

5.1.2 Okysličená palivová aditiva

Okysličená palivová aditiva jsou přísady do motorové nafty, které obsahují chemickou složku obsahující kyslík. Tyto okysličené přísady zlepšují spalování a kvalitu vznícení paliva. Dojde tedy ke zvýšení cetanového čísla nafty, čímž se sníží teplota vznícení. Různá okysličená aditiva obsahují methanol, ethanol, butanol, diethylether, difenylether, diethylenglykol, dimethylether, nitromethan, dimethylkarbonát a jiné látky. Palivo s nízkým poměrem uhlíku k vodíku ($\frac{C}{H}$) a vysokým obsahem kyslíku snižuje tvorbu pevných částic. [2]

5.1.3 Vodou emulgovaná motorová nafta

Vodou emulgovaná motorová nafta je dalším principem modifikace paliva, který se používá k regulaci emisí pevných částic a NO_x. Tato emulze obsahuje 89 % motorové nafty, 9,3 % vody a 1,7 % aditiv, která zajišťují velmi malou velikost kapek rozptýlené vody. Emulze se vytvoří, když primární tekutina (voda) disperguje v sekundární nemísitelné tekutině (motorová nafta), obvykle ve formě sférických kapiček. Hlavním důvodem snížení emisí pevných částic a oxidů dusíku je to, že kapičky vody mají nižší bod varu než okolní palivo a rychleji se vypaří - explodují. Tento proces se nazývá mikroexploze. To vede ke zpoždění zapálení směsi a vytvoří se tím více času pro promíchání paliva a vzduchu, což zapříčiňuje snížení tvorby částic. Odpařené kapičky vody snižují také maximální teplotu cyklu. To vede ke snížení emisí oxidů dusíku. [2],[13]

5.1.4 Časování vstřikování

Emise částic může být do jisté míry řízena změnou parametru časování vstřikování - délka a moment otevření vstřikovací trysky. Když je časování vstřikování posunuto vpřed, emise částic se sníží. Tato úprava má za následek zpoždění vznícení směsi. Tím, že dojde k posunutí časování vstřikování vpřed, což vede k prodloužení doby spalování částečně předmíchané směsi, se zlepší jemné promíchání paliva se vzduchem, a tím se dosáhne snížení produkce emisí pevných částic. Nicméně se tímto zvýší emise oxidů dusíku. Emise částic vzroste, když se časování vstřikování posune zpět a produkce oxidů dusíku klesne. [2]

5.1.5 Vstřikovací tlak

Další metodou před spalováním, používanou pro redukci částic, je změna vstřikovacího tlaku. Hlavním důvodem je zvýšení vstřikovacího tlaku, což vede k jemné atomizaci a zmenšení velikosti kapiček paliva. Tímto způsobem se dosáhne lepšího prohoření paliva. Dalším

faktorem je, že rozprašovací schopnost se zvyšuje při vysokém vstřikovacím tlaku, což zlepšuje míru míšení paliva a vzduchu. [2]

5.1.6 Více vstříků v jednom cyklu

Další technologií před spalováním pro kontrolu částic je použití více injekcí v rámci jednoho cyklu. Výhodou této technologie je, že sníží obsah oxidů dusíku a pevných částic formou kontinuální regenerace filtru pevných částic.

Díky technologii přímého vstřikování Common Rail, která umožňuje kratší dobu vstřikování a variabilní časování vstřikování, je možné provést více vstříků během jednoho cyklu. Toto přesné ovládání vstřikování je možné díky řídicí jednotce motoru a elektromagnetickému ovládacímu ventilu. Využívají se tři typy vstříků, a to pilotní, hlavní a následný vstřík. Pilotním vstříkem je před hlavním vstříkem injektováno malé množství paliva pod malým tlakem, díky kterému se zvýší teplota a tlak ve válci. To má za následek menší zpoždění vznícení a snižuje klepání motoru tím, že se sníží rozdíl tlaků ve válci a vstřikovací tlak. I přes výhodu plynulejšího chodu motoru, vede pilotní vstřík většinou ke zvýšení emisí pevných částic. Zvýšení pevných částic nastává z důvodu uvolnění produktů z pilotního vstříku (částečně spálené palivo), které mají vysokou teplotu a obsahují menší množství kyslíku. Do prostoru válce nemůže být nasáto větší množství vzduchu, jelikož prostor pro něj již vyplňují tyto produkty.

Hlavní výhodou vícenásobných vstříků je následný vstřík. Probíhá po hlavním vstříku, kdy je injektováno určité množství paliva (cca 10 % celkového množství). Toto palivo se díky zbytkovému teplu pouze odpaří a odchází do výfukového potrubí. Část odpařeného paliva prochází přes systém recirkulace výfukových plynů zpět do válce, což má pozitivní vliv na snižování obsahu oxidů dusíku. Zbytek odpařeného paliva prostoupí dále do výfukového potrubí a zvyšuje teplotu plynů, čímž napomáhá regeneraci filtru pevných částic. [2],[14]

5.2 Metody snižování pevných částic po spalování paliva

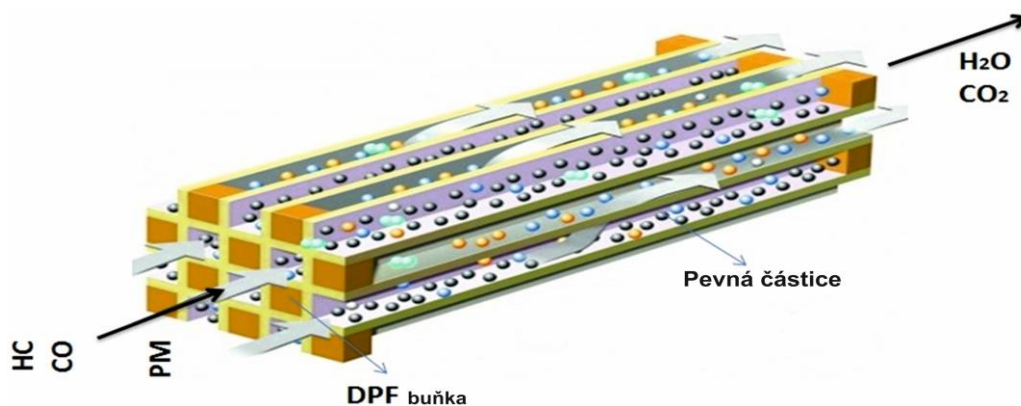
5.2.1 Filtr pevných částic

Filtry pevných částic (DPF – diesel particulate filter) jsou zařízení, která fyzicky zachycují pevné částice, aby se zabránilo jejich uvolnění do atmosféry. Současné filtry vykazují filtrační účinnost nad 90 % a také dobrou mechanickou a tepelnou odolnost. Filtry pevných částic se staly nejúčinnější technologií pro řízení emisí částic nafty – jak hmotnosti částic, tak

i jejich počtu. DPF jsou konstruovány tak, aby mohly být instalovány v blízkosti motoru a udržela se tak vysoká teplota filtru a výfukových plynů, což vede ke zlepšení funkce pasivní regenerace filtru.

Vzhledem k mechanismu ukládání částic v těchto zařízeních jsou filtry neúčinnější při sběru pevného podílu částic nafty (elementárního uhlíku – saze). Mohou mít ale omezenou účinnost nebo mohou být zcela neúčinné při zachytávání rozpustných organických frakcí a částic síranu. K řízení celkových emisí pevných částic, včetně rozpustných organických frakcí, jsou systémy filtrů pevných částic typicky vybaveny oxidačními katalyzátory.

Existuje široké spektrum filtračních médií, které jsou využity pro filtrování částic nafty. Používají se filtry založené na keramických vinutých vláknech, pletivech pokovených hliníkem, porézních keramických monolitech apod. V současné době se pro vznětové motory nejvíce používá koncepce voštinových keramických monolitů. Výfukové plyny vstupují do buněk, které jsou otevřené, a zde se zachycují pevné částice. Dále plyny, bez pevných částic, protékají porézními stěnami do sousedních buněk. Sousední buňky jsou otevřené na protilehlém konci a odfiltrovaný plyn vystupuje z opačného konce do atmosféry. Průtok výfukových plynů voštinovým keramickým filtrem pevných částic je schematicky znázorněn na **Obr. 4**. Tento koncept stěnového průtoku má velké filtrační plochy na jednotku objemu s vysokou filtrační účinností, která dosahuje hodnot až 98 %.



Obr. 4 Filtrace výfukových plynů voštinovým keramickým filtrem [2]

Vzhledem k nízké objemové hmotnosti dieselových částic se ve filtrech rychle nahromadí značné množství sazí. Nahromaděné částice by nakonec způsobily ucpání jednotlivých buněk a následně příliš vysoký tlak před filtrem, což by negativně ovlivnilo provoz motoru. Proto existují systémy, jak odstranit částice z filtru, aby se obnovila kapacita sběru sazí. Toto odstranění částic se nazývá regenerace filtru a lze ji provádět buď nepřetržitě během pravidelného provozu filtru nebo pravidelně, po nahromadění předem stanoveného množství

sazí. V obou případech by měla být regenerace filtračních systémů "neviditelná" pro řidiče vozidla a měla by být prováděna bez jeho zásahu. [2],[15],[16]

Většina regeneračních dieselových filtračních systémů využívá tepelnou regeneraci, během níž jsou částice oxidovány za vzniku plynných produktů. Teplota výfukových plynů nafty je však příliš nízká, aby udržovala nepřetržitou regeneraci filtru. Tento problém lze řešit buď snížením požadované teploty oxidace sazí na úroveň dosaženou během běžného provozu motoru, nebo zvýšením teploty ve filtru až do okamžiku, kdy zachycená saze začne oxidovat. První přístup se používá v pasivních filtračních systémech, druhý zase v aktivních filtračních systémech. [18]

5.2.1.1 Pasivní regenerace

Pasivní regenerační systémy používají katalyzátory ke snížení teplot oxidace sazí na hladiny, které leží v normálním rozsahu teplot výfukových plynů. Katalyzátor může být buď přidán do motorové nafty ve formě aditiv, nebo může být potažen na povrchu filtračního materiálu. Další možností pro pasivní regeneraci je instalace speciálně navrženého oxidačního katalyzátoru před keramickým filtrem částic pro podporu oxidace sazí.

Katalyzátory ve formě aditiv do motorové nafty (FBC - fuel borne catalysts) jsou kovové přísady, které slouží pro usnadnění regenerace filtru pevných částic jako oxidačního katalyzátoru sazí. Když je aditivum spalováno ve válci motoru, jeho kovová složka opouští spalovací prostor ve formě odpovídajícího oxidu kovu nebo jiné anorganické sloučeniny (např. sulfátu). Tyto sloučeniny vytvářejí vlastní částice, nebo jsou začleněny do částic spálené nafty. Po shromáždění ve filtru pevných částic je katalytický kov rozprostřen v celé fázi pevných částic a může tak katalyzovat oxidaci těchto převážně uhlíkových částic. Nejúčinnější kovy pro snižování pevných částic jsou Ba, Ca, Fe, Ce a Mn. Následující rovnice popisují mechanismus použití cerového aditiva, které dokáže snížit teplotu regenerace na 300 °C:

1. *Oxidace sazí*



2. *Oxidace oxidu uhelnatého*



3. *Ce₂O₃ je nestabilní sloučenina, je převedena na Ce₂O₂*

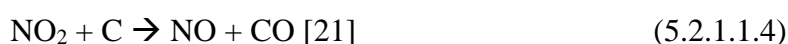


U novějších vznětových motorů (EURO III a dále) je snížení emisí pevných částic velké, což sotva zdůvodňuje použití aditiv. Při jejich použití má kov tendenci emitovat z výfuku ve formě nanočástic oxidů kovů (popílku). I když je hmotnost těchto emisí nízká, může být počet částic velmi vysoký, což vede k obavám o špatné dopady na lidské zdraví. Proto orgány ochrany životního prostředí obvykle zůstávají obezřetné ohledně používání kovových přísad do paliv, pokud není použit vysoce účinný filtr částic, který může zachytit nanočástice kovového popílku. [2],[19]

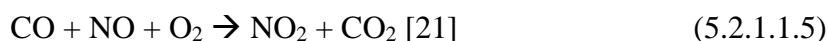
Katalyzovaný filtr pevných částic (CDPF – catalyzed diesel particulate filter) má aplikovanou vrstvu katalyzátoru na filtračním médiu tak, aby se podpořily chemické reakce mezi složkami plynné fáze a sazemi (uhlíkem) nahromaděnými ve filtru. Hlavním účelem katalyzátoru je usnadnit pasivní regeneraci filtru tím, že umožní oxidaci částic nafty pod teplotami výfukových plynů během běžné činnosti motoru. Teploty výfukových plynů se pohybují typicky v rozsahu 300-400 °C. Když není přítomen katalyzátor, mohou být částice oxidovány vyššími rychlostmi pouze při teplotách kolem 550-650 °C. Tyto teploty se vyskytují pouze při plném zatížení vznětového motoru a ve většině případů se při provozu v reálném provozu objevují jen zřídka.

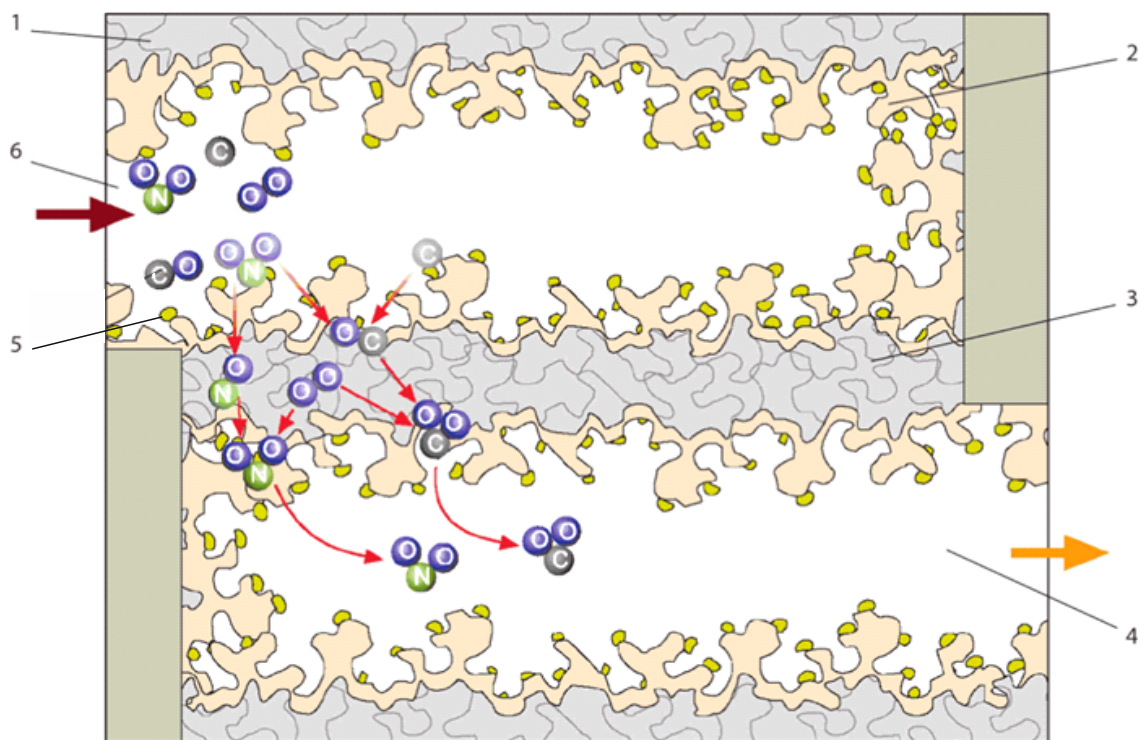
Používají se tři typy katalyzátorů, které hrají roli při regeneraci CDPF. Prvním je platina a druhým jsou oxidy kovů s kapacitou pro skladování kyslíku (OSC – oxygen storage capacity). Materiály OSC jsou oxidy, ve kterých kov může kolovat mezi dvěma valenčními stavy, čímž adsorbuje a uvolňuje kyslík. Oxid ceričitý (CeO₂) je sloučenina OSC, která je již řadu let používána ve třicetných katalyzátorech. Jiné materiály OSC jsou např. oxidy železa, manganu nebo mědi. Další důležitou skupinou CDPF katalyzátorů jsou sloučeniny s kapacitou pro skladování NO_x, jako je baryum nebo hořčík. Filtr částic je potažený NO_x adsorbérem pro řízení emisí NO_x a kontrolu pevných částic. Aktivní kyslík, uvolněný během regenerace adsorbéru, zlepšuje oxidaci sazí. [20]

Na **Obr. 5** je zobrazen průběh chemických reakcí, které probíhají při pasivní regeneraci CDPF filtrů. Dochází k reakci oxidu dusičitého a uhlíku za vzniku oxidu dusnatého a oxidu uhelnatého, tj.:



Dále, za přítomnosti kyslíku, probíhá konečná reakce, kde vzniká oxid dusičitý a oxid uhličitý. Její průběh je následující:

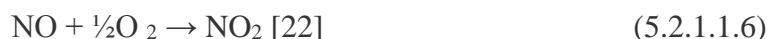




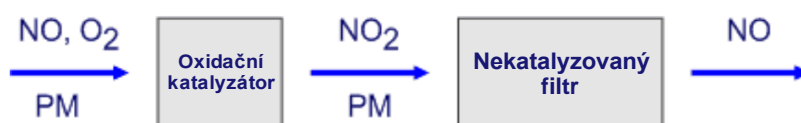
Obr. 5 Průběh chemických reakcí při pasivní regeneraci uvnitř CDPF [21]
 (1 – voštinové těleso z karbidu křemíku, 2 – nosná vrstva (oxid ceričitý), 3 – porézní stěna filtru, 4 – výstupní kanálek, 5 – katalyzátor-platina, 6 – vstupní kanálek)

CRT filtr (Continuously Regenerating Technology – neustále se regenerující technologie) je dvoustupňový systém pasivního filtru pevných částic naftového typu, kde je nekatalyzovaný filtr regenerován za použití oxidu dusičitého (NO_2), který je generován na oxidačním katalyzátoru umístěným před filtrem. Použitím oxidu dusičitého k oxidaci diesellových sazí mohou být filtry regenerovány při poměrně nízkých teplotách výfukových plynů. Ve vhodných aplikacích a při použití motorové nafty s velmi nízkým obsahem síry je CRT filtr schopen regenerace při teplotách od 250-300 °C.

V oxidačním katalyzátoru vzniká oxid dusičitý, nezbytný pro regeneraci filtru, z oxidu dusnatého (NO), který je přítomný ve výfukových plynech podle následující reakce:

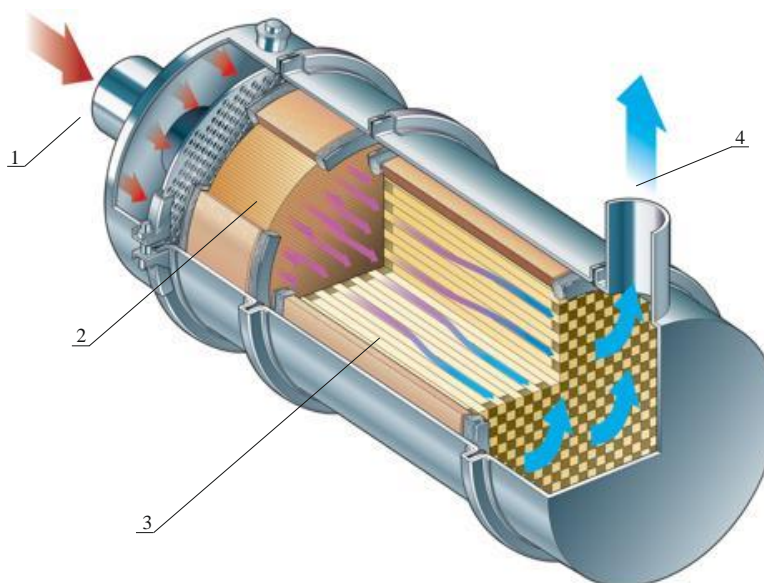


Pevné částice, které jsou zachyceny ve filtru, jsou nepřetržitě oxidovány dle reakce:



Obr. 6 Konfigurace a princip činnosti CRT filtru [22]

Správný provoz filtru vyžaduje, aby byly splněny určité podmínky, jimiž jsou teplota výfukových plynů, která by měla být v rozsahu 250-450 °C, a dále by obsah síry v palivu měl být menší než 30 ppm, aby se zabránilo poruše katalyzátoru. Poměr oxidů dusíku (NO_x) a sazí by měl být dostatečně vysoký, aby se saze dostatečně oxidovaly. Na **Obr. 7** je znázorněno rozmístění vstupu a výstupu výfukových plynů a umístění oxidačního katalyzátoru a nekatalyzovaného filtru pevných částic. [2],[22]



Obr. 7 CRT filtr [22]

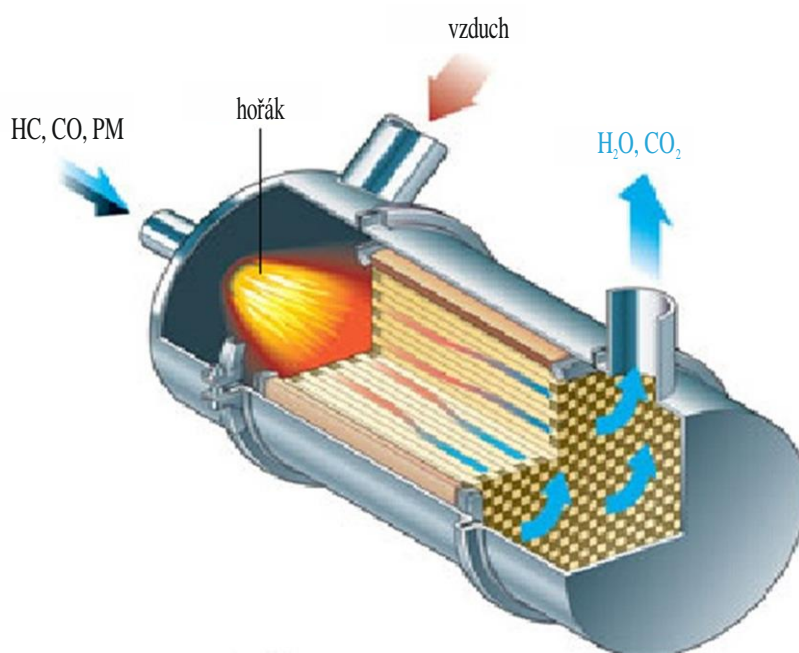
(1 – vstup výfukových plynů, 2 – oxidační katalyzátor, 3 - nekatalyzovaný filtr pevných částic, 4 – výstup z CRT filtru)

5.2.1.2 Aktivní regenerace

Když hladina sazí ve filtru pevných částic dosáhne předem stanovené úrovně zaplnění, nebo se saze hromadí větší rychlostí, než je možno zvládnout pomocí pasivní regenerace, spustí se aktivní regenerace. Během aktivní regenerace iniciuje řídicí jednotka motoru speciální dávkování paliva do válce, upravuje časování vstřikování paliva a přivírá škrticí klapku pro zvýšení teploty výfukových plynů, aby podpořila zvýšenou rychlost oxidace sazí k jejich odstranění z filtru. Teploty výfukových plynů v průběhu aktivní regenerace (od 500 °C) jsou vyšší než teploty při pasivní regeneraci (250-450 °C). Aktivní regenerace může probíhat různými způsoby, nejen pomocí motormanagementu, ale i pomocí speciálních konstrukcí filtrů pevných částic se zabudovanými technologiemi pro spalování sazí. Během této regenerace může být motor provozován normálně.

Snížení průtoku vzduchu pomocí škrticí klapky vede k poklesu celkového poměru vzduchu a paliva, což zvyšuje teplotu spalování a vede k vyšší teplotě výfukových plynů. Aby byl zachován stejný výkon motoru, musí být vstříkováno více paliva, čímž se zvýší teplota výfukových plynů. Tímto zákrokem je způsoben pokles koncentrace kyslíku ve výfukových plynech. Oxidace sazí vyžaduje 2-5 % kyslíku ve výfukových plynech, a tudíž je škrcení nasávaného vzduchu omezeno na tuto hodnotu. Hlavní nevýhodou je, že při normálních jízdních podmínkách není tato metoda schopna zvýšit teplotu výfukových plynů na dostatečnou úroveň pro regeneraci. Dalšími nevýhodami jsou zvýšené koncentrace exhalací nespálených uhlovodíků (HC), oxidu uhelnatého (CO) a zároveň zvýšená spotřeba paliva, protože motor pracuje při podstatně nižším poměru vzduchu a paliva. [2],[23]

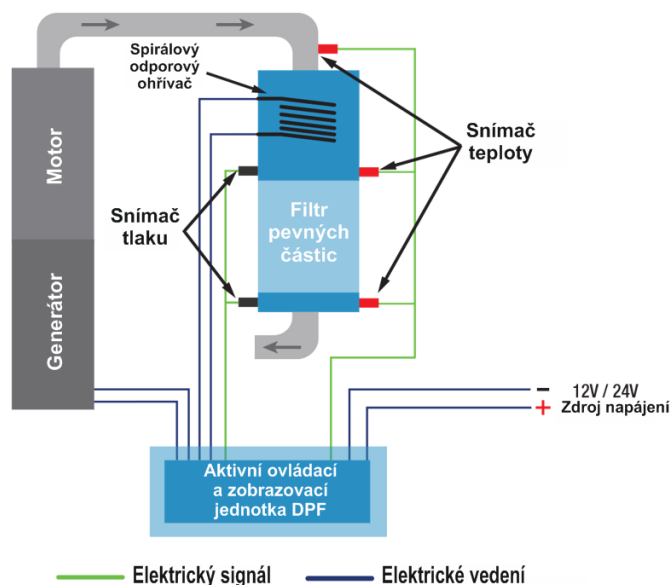
Další možností aktivní regenerace je použití *hořáku* spalující přiváděné palivo, který je umístěn před filtrem. Tento systém umožňuje provádět regeneraci při všech provozních stavech motoru, tj. při různých otáčkách a zatížení motoru. Systém se skládá ze snímače diferenčního tlaku, který sleduje hodnotu zpětného tlaku ve filtru. Tento snímač pošle signál do řídicí jednotky, když se filtr dostatečně naplní částicemi sazí na mez aktivní regenerace. Řídicí jednotka vyšle signál hořáku, který zvýší teplotu ve filtru na hodnotu okolo 650 °C. Pro lepší hoření a oxidaci sazí je přiváděn teplý vzduch. Regulace teploty během regenerace je prováděna vypínáním hořáku během regeneračního cyklu. Systém hořáku nabízí větší flexibilitu pro regeneraci na úkor složitějšího hardwaru. [2],[24]



Obr. 8 Aktivní regenerace filtru pevných částic použitím hořáku [2]

Při *katalytickém spalování paliva* je palivo vstřikováno před oxidační katalyzátor do proudu výfukových plynů, který je umístěn před filtrem pevných částic. Oxidace nespálených uhlovodíků v oxidačním katalyzátoru zvyšuje teplotu výfukových plynů na úroveň potřebnou pro regeneraci. Katalytický spalovací systém vyžaduje určitou minimální teplotu katalyzátoru. Regenerace nemusí proběhnout při volnoběhu nebo při lehkém zatížení motoru, kdy je teplota výfukových plynů nižší. Ve srovnání s regenerací pomocí úpravy motormanagementu, vstřikováním a časováním dávky paliva do válce, dochází ke snížení spotřeby paliva ve prospěch katalytického spalování, protože se teplo uvolňuje bezprostředně před filtrem, což eliminuje tepelné ztráty v motoru a v části výfukového systému mezi výfukovým potrubím motoru a filtrem pevných částic. Existuje kombinovaný systém hořáku a katalyzovaného spalování, ve kterém je malý hořák instalovaný před katalyzátorem. U tohoto systému je zajištěn aktivní provoz katalyzátoru bez ohledu na provozní podmínky motoru. [24]

Elektricky regenerované filtry nabízí nejvyšší flexibilitu oproti ostatním systémům a lze je použít v mnoha konfiguracích, a to buď zahříváním filtrační voštiny, mikrovlnným ohřevem sazí či vytápěním výfukových plynů spirálovým odporovým ohřivačem. Metoda zahřívání voštiny vyžaduje, aby filtr byl vodičem elektrické energie a sloužil jako odporový ohřivač. Tyto filtry obsahují kazety ze slinutých kovových vláken či segmenty karbidu křemíku. Voština je zahřáta na teplotu potřebnou k průběhu aktivní regenerace, kde je teplota filtru sledována pomocí teplotního čidla. Průběh výhřevu je kontrolován řídicí jednotkou, která vyhodnocuje nejen teplotu filtru, ale také stupeň jeho zaplnění. [26]



Obr. 9 Schéma elektricky regenerovaného filtru pomocí spirálového ohřivače [27]

Ohřev sazí pomocí mikrovln je založen na principu absorpce elektromagnetických vln sazí. Tento systém je ve fázi zkoumání a testování a prozatím není do vozidel sériově instalován kvůli jeho dosavadním nevýhodám. Dle laboratorních experimentů [25] se ukazuje výhoda této metody v tom, že umožňuje velmi nízkou spotřebu elektrické energie díky jejímu přímému zaměření na pevné částice ve filtru. S tím souvisí i snížení spotřeby paliva. Hlavním problémem, týkající se mikrovlnné regenerace, je v rozdělení nehomogenního elektrického pole. Výsledkem toho je, že filtry mají tendenci zobrazovat nepřesné modely pro regeneraci a tím dochází k uvolnění nadměrného tepla a následnému poškození filtrační voštiny. Pokud by bylo dosaženo uspokojivého stupně kontroly nad ukládáním elektromagnetických vln do pevných částic, mohla by být tato metoda jednou z nejflexibilnějších a nejúspornějších na poli aktivní regenerace filtrů pevných částic. [25],[26]

5.2.1.3 Pasivní a aktivní regenerace – kombinace

Při různorodých provozních podmínkách, za kterých nestačí udržet pasivní regenerace filtr čistý, musí být přidruženy prvky pro aktivní regeneraci, aby se dosáhlo efektivity pro spolehlivou regeneraci filtrů pevných částic. V pasivně aktivní regenerační kombinaci je filtr založen na bázi katalyzátoru a je také vybaven vybraným druhem aktivního regeneračního systému. Tato kombinace systémů je schopna udržet plně pasivní provoz během zvýšené teploty výfukových plynů při vysokém zatížení. V případě volnoběhu či nízkém zatížení s nízkými teplotami výfukových plynů, kdy není dosažena dostatečná teplota pro rozklad sazí ani za přítomnosti katalyzátoru, je využit systém aktivní regenerace, který teplotu zvýší.

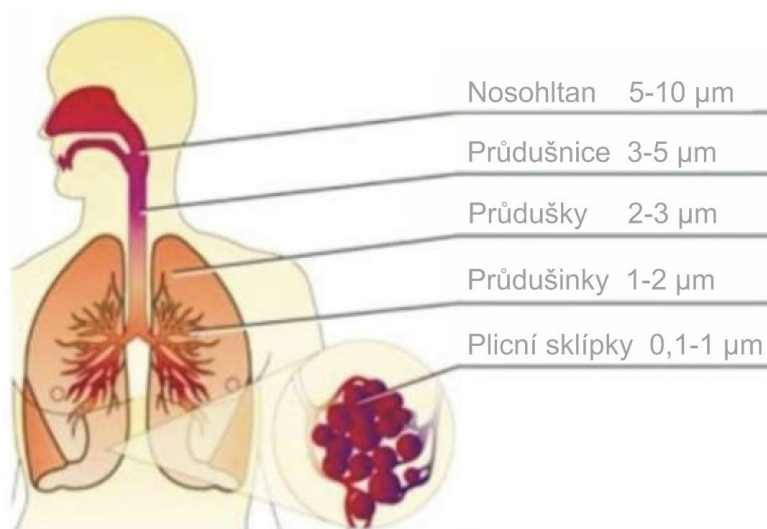
Použití katalyzátoru umožňuje regeneraci při nižší teplotě a zkrácení doby regenerace ve srovnání s nekatalytickými aktivními systémy. Regenerace při nižší teplotě snižuje tepelné namáhání filtru, čímž se prodlužuje jeho životnost. Tento systém tedy zaručuje velmi efektivní regeneraci filtrů pevných částic v celém spektru provozních podmínek a prodlužuje jeho životnost díky společným výhodám pasivní a aktivní regenerace. [28]

6 Vliv pevných částic na lidské zdraví

Vznětové motory emitují složitou směs látek znečišťujících ovzduší, a to v plynné i pevné formě. Více než 90 % pevných částic emitovaných z výfukového potrubí do ovzduší je menší než 1 μm , což je podmnožinou velikostní skupiny jemných částic s průměrem do 2,5 μm tzv. $\text{PM}_{2,5}$. Dle normy ČSN ISO 7708 je velikost částic rozdělena do tří skupin vzhledem k lidskému zdraví, a to na:

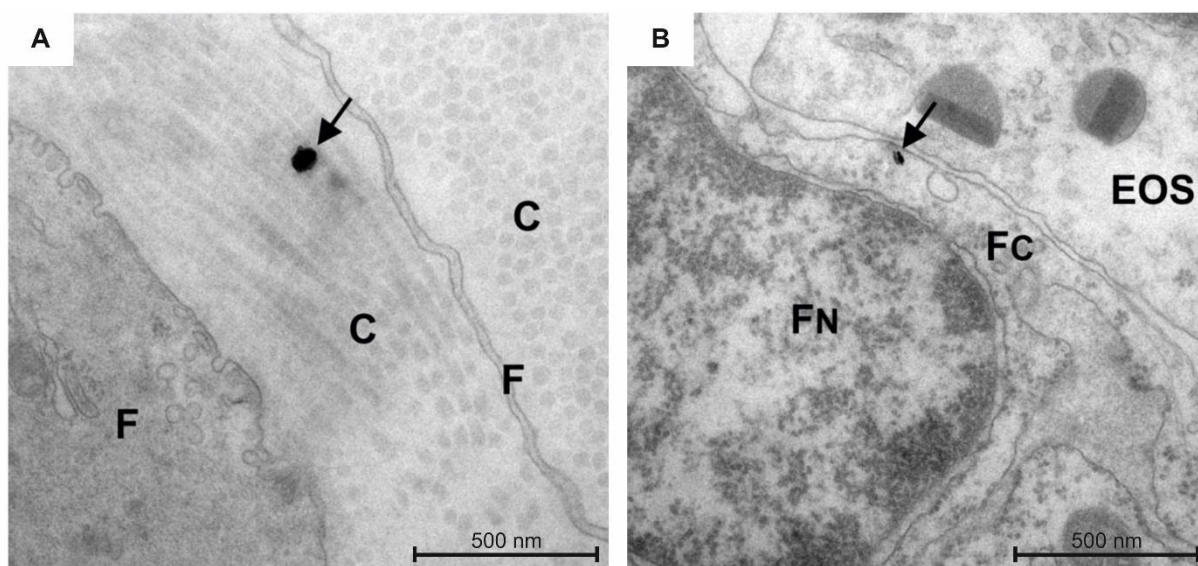
- **vdechovatelná frakce** – hmotnostní frakce polétavého prachu, která je vdechnuta nosem a ústy
- **thorakální frakce** - hmotnostní frakce vdechovaných částic pronikajících za hrtan (< 10 μm)
- **respirabilní frakce** - hmotnostní frakce vdechovaných částic, které pronikají do dýchacích cest, kde není řasinkový epitel (< 2,5 μm) [3],[29]

Většina vdechovatelných frakcí je po vdechnutí následně vydechována, ale některé se usazují na povrchu plic. Větší částice jsou zachyceny v horních částech dýchacího ústrojí a obvykle se dostanou do trávicího traktu. Většina částic je ale moc malá, aby mohla být vdechována až do plic. Největší podíl částic se ukládá v plicích při jejich velikosti od 1 až do 2 μm . Kdežto částice menší než 0,001 μm jsou téměř všechny zase vydechovány. Na následujícím obrázku **Obr. 10** je znázorněna možnost průchodu určité velikosti částice do specifické oblasti dýchacího ústrojí člověka. [34],[35]



Obr. 10 Znázornění možnosti průchodu částic dýchacím ústrojím člověka [35]

Četné epidemiologické studie zjistily silný vztah mezi expozicí a vlivem pevných částic na lidské zdraví. Krátkodobé vystavení účinků pevných částic může způsobit podráždění dýchacích cest, kašel, respirační infekci, poškození funkce plic a astmatické záchvaty. Dlouhodobá či kumulativní expozice způsobuje morbiditu, rakovinu plic, kardiovaskulární a kardiopulmonální onemocnění, snížení funkce plic až předčasnou smrt. Současný výzkum ukázal, že velikost částic a adsorbované látky na jejich povrchu mohou vyvolat zánětlivá zranění, oxidační stres a jiné biologické změny. Účinky jemných a vysoce jemných částic jsou větší, protože mohou proniknout hlouběji do dýchacích cest. Mohou dosáhnout až do plicních sklípků, v nichž až 50 % zůstane v plicním parenchymu. Na následujícím obrázku **Obr. 11** jsou mikrofotografie polystyrenových nanočástic v plicním parenchymu. Na základě výzkumu [55] byly částice lokalizovány v epiteliálních a endotelových buňkách, uvnitř fibroblastů a mezi kolagenovými fibrily v pojivové tkáni, v krevních kapilárách, a dokonce i v červených krvinkách. *Obrázek A* zobrazuje částici o průměru 85 nm v pojivové tkáni (C). Na *obrázku B* se nachází částice o průměru 41 nm ve fibroblastové cytoplazmě (FC), blízko od jejího buněčného jádra (FN). [30],[32],[55]



Obr. 11 Mikrofotografie polystyrenových nanočástic v plicním parenchymu [55]
 (C - kolagenní fibril, EOS - eosinofilní granulocyty, F - fibroblast; FC - fibroblastová cytoplazma;
 FN - fibroblastové jádro)

Adsorbované organické sloučeniny výrazně ovlivňují chemické a buněčné procesy, které mohou vést k rozvoji nežádoucího respiračního onemocnění. Organická frakce částic nafty je složitá a obsahuje stovky až tisíce rozpustných organických látek včetně polycyklických aromatických uhlovodíků, které jsou známé jako karcinogeny a jsou přímo toxické pro buňky. Výfukové plyny ze vznětových motorů jsou klasifikovány podle

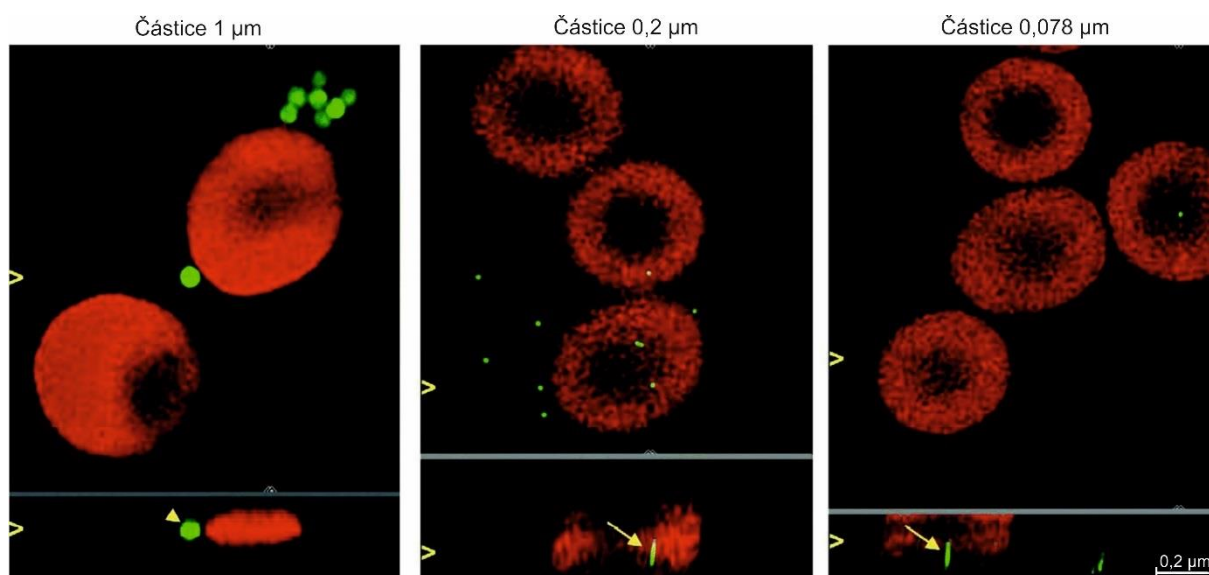
Mezinárodní agentury pro výzkum rakoviny (International Agency for Research on Cancer) jako karcinogenní pro člověka. [28]

Vybrané části populace, zejména děti a starší dospělí, jsou označeny jako potenciálně náchylnější k účinkům vyvolaným pevnými částicemi. Děti vystavené srovnatelným hladinám pevných částic jsou potenciálně citlivější než dospělí kvůli delší době strávené venku, úrovni aktivity a minutovému objemu plic na jednotku tělesné hmotnosti, což může vést ke zvýšení dávky částic na plochu plic a nepříznivým účinkům na rozvoj plic. Epidemiologické studie, zkoumající souvislost mezi částicemi a dětskými respiračními problémy, prokazují zvýšené respirační účinky částic (např. sípání, kašel, respirační hospitalizace) u krátkodobé expozice všech velikostních frakcí u dětí (tj. u osob mladších než 18 let) ve srovnání s dospělými. [31]

Starší dospělí (tj. osoby starší než 65 let) jsou obecně považováni za náchylnou část populace kvůli postupnému poklesu fyziologických procesů v lidském organismu vlivem stárnutí. Starší dospělí jsou také náchylnější ve srovnání s dětmi nebo mladšími dospělými kvůli vyšší míře dříve existujících kardiovaskulárních a respiračních onemocnění, které mohou také způsobit náchylnost k onemocněním souvisejícím se škodlivými účinky pevných částic. Ačkoli výsledky epidemiologické literatury jsou smíšené s ohledem na morbidní účinky vyplývající z expozice pevných částic, důkazy z kontrolované expozice člověka a toxikologické studie poskytují hodnověrné informace o kardiovaskulárních účincích v souvislosti s částicemi u starších dospělých. Kontrolované expoziční studie prokázaly sníženou variabilitu srdeční frekvence u starších dospělých pacientů. [31]

Vysoce jemné částice nebo nanočástice jsou dokonce schopny projít do krevního řečiště. Zde mohou interagovat s vaskulárním endotelem nebo mohou mít přímé účinky na tvorbu aterosklerotických plátů a způsobovat lokální oxidační stres a prozánětlivé účinky. Zvýšený zánět může destabilizovat koronární plaky, což může vést k trombu a což je hlavní příčinou akutních koronárních syndromů a kardiovaskulárních příhod. Dlouhodobé expozice ovzduší znečištěnému částicemi je také spojeno se zvýšeným rizikem vzniku žilní tromboembolické nemoci. Nanočástice usazené v nosní sliznici mohou vstupovat do mozku prostřednictvím čichového bulbu. Dalším vstupem nanočástic do mozku je krevním řečiště. Jak již bylo výše zmíněno, vysoce jemné částice mohou prostupovat či být zachyceny červenými krvinkami. Na **Obr. 12** je zobrazena mikrofotografie xy a xz projekce fluorescenčních polystyrenových částic (zobrazeny zelenou barvou) zachycených červenými krvinkami, a to o velikosti 1 μm , 0,2 μm a 0,078 μm . Tato projekce umožňuje jasnou diferenciaci mezi

částicemi, které jsou uvnitř červených krvinek a mimo ně. Dle výzkumu [55] a Obr. 12 je zřejmé, že se do červených krvinek dostanou částice 0,2 μm a menší, ale ne částice o velikosti 1 μm . [55]



Obr. 12 Mikrofotografie xy a xz projekce fluorescenčních polystyrenových částic (zelená barva) zachycených červenými krvinkami [55]

V mozku mohou nanočástice způsobit zánět, apoptózu (smrt buněk) a oxidační stres. Tato poškození byla experimentálně zařazena do patogeneze neurodegenerativních poruch, jako je Alzheimerova a Parkinsonova nemoc, a primárních mozkových nádorů. Důkazy, které spojují vliv pevných částic a cévní mozkové příhody, jsou rozporuplné a mechanismy jejich vzniku v souvislosti s částicemi málo prozkoumané. [28],[33]

I když je expozice částicemi přítomna všude, neexistuje přesně definovaná bezpečná úroveň. Proto by lékaři a poskytovatelé zdravotní péče s touto problematikou měli být obeznámeni a seznámit pacienty s preventivními strategiemi, které mohou omezit vznik onemocnění spojených s pevnými částicemi. K tomuto účelu slouží tzv. index kvality ovzduší, který poskytuje na svých webových stránkách pro Českou republiku Český hydrometeorologický ústav. Skládá se z vyhodnocení koncentrace jednotlivých znečišťujících složek (SO_2 , NO_2 , CO , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$) a zařazení do šesti skupin, které jsou uvedeny v **Tab. 1** (v tabulce je pouze výňatek informací týkajících se pouze pevných částic). Tyto informace mohou dále sloužit i pro zákonodárce, po zvážení i ekonomických dopadů, k prosazování či posílení stávajících právních předpisů, které omezují emitování pevných částic do ovzduší. [32],[36]

Index	Kvalita ovzduší	PM₁₀ 1h μg/m³
1	velmi dobrá	0 - 20
2	dobrá	> 20 - 40
3	uspokojivá	> 40 - 70
4	vyhovující	> 70 - 90
5	špatná	> 90 - 180
6	velmi špatná	> 180

Tab. 1 Legenda indexu kvality ovzduší z tabulky ČHMÚ [36]

Celkově epidemiologické studie s podpůrnými důkazy z kontrolované expozice člověka a toxikologických studií identifikovaly charakteristickou část populace, u které se může projevit zvýšená náchylnost na účinky částic vzhledem k jejich zdraví. Jsou to zejména děti a starší dospělí, u kterých se může expozice vyvinout v kardiovaskulární nebo respirační nemoci. Některé studie naznačují zvýšení zdravotních dopadů souvisejících s pevnými částicemi u jedinců s diabetem. K objasnění vztahu mezi částicemi a cerebrovaskulárním onemocněním je zapotřebí více podrobnějších studií zaměřených na tuto problematiku. Zkoumání vlivu částic na lidské zdraví je potřebné i k objasnění časového průběhu jejich účinků. Vzhledem k rostoucím důkazům o nežádoucích účincích a celosvětovému problému s kvalitou ovzduší, se budou muset přijmout opatření týkající se emisí pevných částic nejen pro vznětové, ale i pro zážehové motory. [31],[32]

7 Evropské emisní limity

Vzhledem k rostoucímu automobilovému průmyslu a požadavkům na kvalitu ovzduší byly zavedeny prostředky pro kontrolu emisí spalovacích motorů ve formě norem. Jejich cílem je stanovovat maximální přípustné hodnoty oxidu uhelnatého, nespálených uhlovodíků, oxidu dusíku a pevných částic. První evropská emisní norma byla přijata na základě předpisu EHK 15 a začala platit v roce 1971. Tato norma je také někdy označována jako EURO 0, tedy jako základ pro vytvoření následující normy EURO 1. Tento předpis zahrnoval čtyři jízdní cykly s měřením obsahu oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků. Dále byla tato vyhláška přepracována a nahrazena novou vyhláškou EHK 83 v osmdesátých letech. V rámci sjednocení legislativy, týkající se emisí motorových vozidel, států Evropské unie byly zavedeny na základě EHK 83 normy EURO. Tyto normy mají název EURO a číslo revize předpisu (1–6). [37],[38],[39]

7.1 Vývoj norem EURO

V roce 1992 nabyla platnosti norma EURO 1 také známá jako EC 93 či směrnice 91/441/EHS (pouze osobní automobily) nebo 93/59/EHS (osobní automobily a lehké nákladní automobily). V ostatních státech vešla v platnost v roce 1995 jako revize EHK 83 a to jako EHK 83.02. [39]

Od 1.1.1996 začal platit v zemích Evropské unie předpis 94/12/ES a 96/69/ES, označován též jako EURO 2. Norma snížila limit pro emise oxidu uhelnatého a rovněž snížila kombinovanou hranici pro nespálené uhlovodíky a oxidy dusíku u vznětových i zážehových vozidel. V ostatních státech, řídících se dle předpisů EHK, vstoupily v platnost v roce 1996. Zdokonalila se též zkušební metodika v rámci studených startů a emisí způsobených vypařováním. [39],[40]

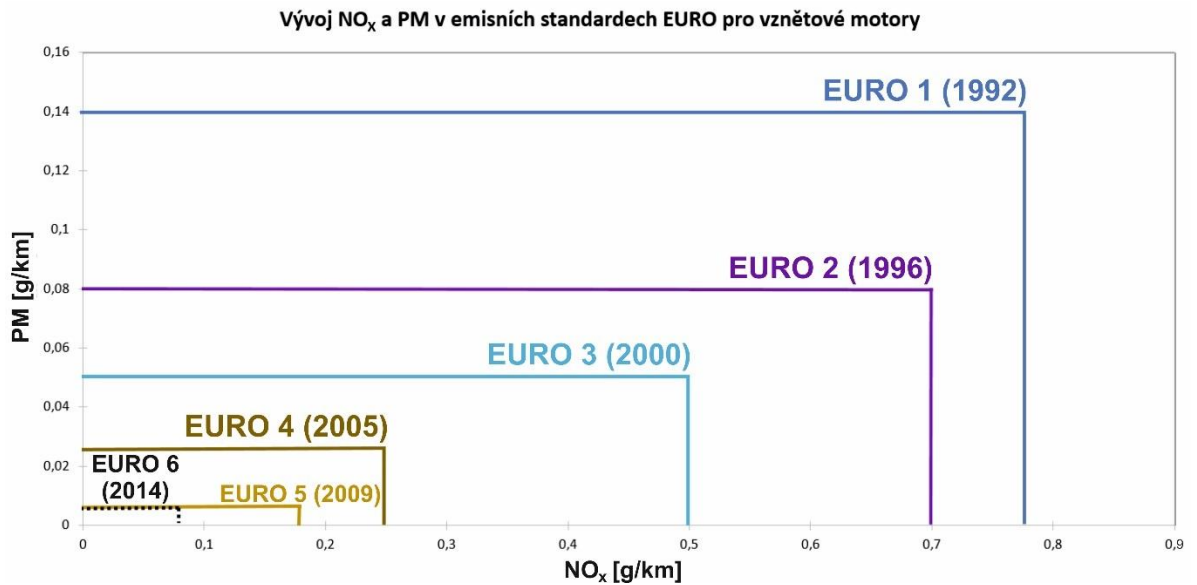
Dne 1.1.2000 začal platit předpis 98/69/ES pro státy Evropské unie tj. EURO 3. Pro státy, řídící se nařízením předpisů EHK včetně České republiky, se stala nově závazným předpisem revize EHK 83.05. Nově byly přidány samostatné limity pro oxidy dusíku (NO_x) pro vznětové motory a zavedly se samostatné limity pro nespálené uhlovodíky (HC) a oxidy dusíku (NO_x) pro zážehové motory. Metody měření se vztahovaly na měření emisí výfukových plynů při běžné i nízké teplotě okolí, emisí plynů z klikové skříně, emise způsobené vypařováním a měření životnosti zařízení, které snižují množství škodlivých látek. Dále se zpřísnil limit pro hmotnost pevných částic u vznětových motorů oproti předešlé normě EURO 2 na polovinu

tn. na 0,05 g/km. S účinností od roku 2000 s normou EURO 3 byl zkušební postup upraven tak, aby se předešlo zahřátí motoru 40 sekund před začátkem odběru vzorků. Tento modifikovaný start za studena se označuje jako NEDC, nebo jako test MVEG-B. [38],[39],[41]

V roce 2005 se stala nově závazným předpis 98/69/ES – B, tj. EURO 4. Obsahem je další zpřísnění hodnot emisí výfukových (u hmotnosti pevných částic na polovinu oproti EURO 3). Zároveň musí nové motory splňovat další výbavu jako jsou dva katalyzátory, dvě lambda sondy a palubní diagnostiku EOBD. První katalyzátor je umístěn za svody výfukového potrubí, aby se rychle ohřál na provozní teplotu a eliminoval část škodlivých látek, než se ohřeje na provozní teplotu druhý katalyzátor, který je umístěn dále od motoru. První lambda sonda je umístěna před katalyzátory a druhá za ně. První sonda má řídicí funkci a druhá je kontrolní. Zjišťuje tedy správnou činnost systému katalyzátorů. [39],[40],[41]

Dne 1.9.2009 nabyla účinnosti norma EURO 5, která dále zpřísnila limity emisí částic vznětových motorů a všechny nové vznětové jednotky musí být opatřeny filtry pevných částic, aby vyhověly novým požadavkům. Došlo také ke zpřísnění limitů NO_x (28 % snížení ve srovnání s EURO 4) a poprvé se objevilo omezení částic pro zážehové motory (použitelné pouze pro motory s přímým vstřikováním). U vznětových motorů má EURO 5 dvě sady plánovaných limitů: EURO 5a a EURO 5b. U zážehových motorů existuje pouze jeden soubor norem, označovaných jako EURO 5. Zavedení EURO 5 a EURO 5a začalo v září 2009. EURO 5b vstoupilo v platnost v roce 2011. S ohledem na účinky emisí velmi jemných částic zavedlo EURO 5 kromě limitu hmotnosti částic (PM) limit pro počet částic (PN) u vznětových motorů. Toto nařízení platí pro nové schválení typu od září 2011 a pro všechny nové vznětové automobily od ledna 2013. Dále prošly úpravou metody pro měření pevných částic, jelikož se již neměření pouze jejich hmotnost, ale i jejich počet a velikostní rozdělení. Ke snížení hodnot oxidů dusíku či nespálených uhlovodíků došlo také kvůli opatření ke vzniku prekurzorů ozonu (O₃). [38],[40],[41]

V září roku 2014 zavedla Evropská unie normu EURO 6. Posouzení dopadů na životní prostředí, provedené Evropskou komisí, zjistilo, že přísnější požadavky na oxidy dusíku v EURO 6 zvýší přínosy pro zdraví o 60 – 90 % oproti EURO 5. EURO 6 vyžaduje stejný limit počtu pevných částic (PN) pro vznětové motory, stejně jako EURO 5b. Stejný limit se nově vztahuje i na zážehové motory. Na grafu **Graf 2** je zobrazen vývoj emisních norem EURO v závislosti na zpřísnování limitů koncentrace NO_x a PM v g/km. [41]



Graf 2 Vývoj NO_x a PM v emisních standardech EURO pro vznětové motory

V případě EURO 5 i 6 se řídí dle nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 715/2007 ze dne 20. června 2007 o schvalování typu motorových vozidel z hlediska emisí z lehkých osobních vozidel a z užitkových vozidel. Nařízení 692/2008 bylo oficiální prováděcí právní úpravou. Tato nařízení zavádějí standardy pro hmotnostní emisi pevných částic (PM), které jsou stejné jak u vznětových motorů, tak i zážehových. Aby byly splněny standardy počtu částic, musí být vozidla poháněná naftou vybavena technologií filtru pevných částic (DPF). Stanovuje také přísnější limity na paliva, resp. na obsah síry v nich. Vznětové vozy EURO 6 mohou být vybaveny také:

- zásobníkovým katalyzátorem NO_x, který snižuje emitování oxidů dusíku
- systémem selektivní katalytické redukce (SCR), které používají přísady (Diesel Exhaust Fluid (DEF) nebo AdBlue) obsahující močovinu vstříkovanou do výfukového plynu pro konverzi NO_x na dusík a vodu
- použití ceru, které jako aditivum přidávané do palivové nádrže napomáhá regeneraci filtrů pevných částic a sníží teplotu potřebnou pro regeneraci filtru [41],[42]

U EURO 6c, platný od 1.9.2017, se změnil předepsaný jízdní cyklus a nové typy vozidel budou měřeny podle WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles). Na všechna nová schválení typů vozidel se bude vztahovat nový laboratorní zkušební cyklus. Během testovacího cyklu prochází zkušební vozidlo čtyřmi rychlostními profily s různými přestávkami. Vůz dosahuje maximálně 131,3 km/h. Pro srovnání, dosud používaný NEDC

(New European Driving Cycle) tj. nový evropský jízdní cyklus, je mnohem kratší a dosahuje nižších rychlostí, což je méně náročné na spotřebu paliva. [41],[43],[44]

EURO 6d-TEMP umožňuje měřit skutečné emise vozidel (RDE – Real Driving Emissions) na silnici. Emisní norma EURO 6d bude zavedena ve dvou etapách: první, označovaná jako Euro 6d-TEMP, bude platit od září 2019 do konce roku 2020 a bude obsahovat jak měření NO_x , tak i hodnoty počtu částic. Ve druhé etapě bude faktor odchylky mezi limity na silnici a laboratoři klesat na 1,5. Dle nařízení Evropské komise 2017/1151 je EURO 6d-TEMP zkoušení emisí v reálném provozu na základě přechodných faktorů shodnosti, jinak jsou požadavky na emise stejné jako u EURO 6 v plném rozsahu. Od 1.ledna 2020 se EURO 6d stane závaznou normou pro registraci nových typů vozidel, a o rok později budou muset všechny nové vozy splnit mezní hodnoty na zkušebním stanovišti a na silnici. Někteří výrobci přeskočí EURO 6c a okamžitě se etablují na EURO 6d-TEMP. Pro nastínění, norma 6c umožňuje hodnoty NO_x v laboratorních podmínkách až pětikrát nižší než v reálném provozu. [42],[43]

7.2 Souhrn emisních norem

Emisní normy EURO jsou shrnuty v následujících tabulkách (**Tab. 2, Tab. 3**). Všechny data uvedená v tabulkách se týkají nových typových schválení. V tabulkách jsou uvedeny hodnoty oxidu uhelnatého (CO), nespálených uhlovodíků (HC), smíšené koncentrace nespálených uhlovodíků a oxidů dusíku (HC + NO_x), hmotnosti pevných částic (PM) a počtu pevných částic (PN). Dle časové posloupnosti jednotlivých norem si můžeme všimnout jejich zpřísnování a postupné zavádění regulací pro oxidy dusíku, počtu a hmotnosti pevných částic nejen u vznětových motorů, ale od EURO 5 i pro motory zážehové. Jsou zde uvedeny dvě tabulky pro osobní automobily a dále pro lehká užitková vozidla. Jsou rozděleny dle typu motoru na normy pro vznětové a zážehové motory. U lehkých užitkových vozidel je tabulka rozdělena ještě do tří tříd dle hmotnosti vozidla.

Normám EURO 3 a 4 předcházelo zavedení přísnějších palivových předpisů, které vyžadovaly minimální cetanové číslo 51 a maximální obsah síry 350 ppm v roce 2000 a 50 ppm v roce 2005 pro motorovou naftu. Maximální obsah síry byl 150 ppm v roce 2000 a 50 ppm v roce 2005 pro benzin. Nafta a benzin jako bezsírné palivo (≤ 10 ppm S) musí být k dispozici od roku 2005 a od roku 2009 se stalo povinným. [38]

Fáze	datum	CO	HC	HC + NO _x	NO _x	PM	PN
		g / km					
Zážehové motory							
Euro 1 †	1992.07	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	-	-
Euro 2	1996.01	2,2	-	0,5	-	-	-
Euro 3	2000.01	2,30	0,20	-	0,15	-	-
Euro 4	2005.01	1,0	0,10	-	0,08	-	-
Euro 5	2009.09 ^b	1,0	0,10 ^d	-	0,06	0,005 ^{e, f}	-
Euro 6	2014.09	1,0	0,10 ^d	-	0,06	0,005 ^{e, f}	6,0 × 10 ^{11 e, g}
Vznětové motory							
Euro 1 †	1992.07	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	0,14 (0,18)	-
Euro 2, IDI	1996.01	1,0	-	0,7	-	0,08	-
Euro 2, DI	1996.01 ^a	1,0	-	0,9	-	0,10	-
Euro 3	2000.01	0,64	-	0,56	0,50	0,05	-
Euro 4	2005.01	0,50	-	0,30	0,25	0,025	-
Euro 5a	2009.09 ^b	0,50	-	0,23	0,18	0,005 ^f	-
Euro 5b	2011.09 ^c	0,50	-	0,23	0,18	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹
Euro 6	2014.09	0,50	-	0,17	0,08	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹

* Ve stádiích Euro 1 až 4 byla osobní vozidla > 2 500 kg schválena jako vozidla kategorie N₁
† Hodnoty v závorkách jsou limity shodnosti výroby (COP)
a. do roku 1999.09.30 (po tomto datu motory DI musí splňovat limity IDI) (DI - direct injection - přímé vstřikování, IDI - indirect injection - nepřímé vstřikování)
b. 2011.01 pro všechny modely
c. 2013.01 pro všechny modely
d. a NMHC = 0,068 g / km (NMHC - nemethanové uhlovodíky)
e. platí pouze pro vozidla používající DI motory
f. 0,0045 g / km pomocí postupu měření PMP (PMP - Particle Measurement Programme)
g. 6,0 × 10¹² 1 / km během prvních tří let od data účinnosti Euro 6

Tab. 2 Emisní limity EURO pro zážehové a vznětové motory osobních vozidel M₁, M₂ [38]

Kategorie †	Etapa	datum	CO	HC	HC + NOx	NOx	PM	PN
			g / km					
Zážehové motory								
N ₁ , třída I ≤1305 kg	Euro 1	1994.10	2,72	-	0,97	-	-	-
	Euro 2	1998.01	2,2	-	0,50	-	-	-
	Euro 3	2000.01	2,3	0,20	-	0,15	-	-
	Euro 4	2005.01	1,0	0,10	-	0,08	-	-
	Euro 5	2009.09 ^b	1,0	0,10 ^g	-	0,06	0,005 ^{e, f}	-
	Euro 6	2014.09	1,0	0,10 ^g	-	0,06	0,005 ^{e, f}	6,0 × 10 ¹¹ e, j
N ₁ , třída II 1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5,17	-	1,40	-	-	-
	Euro 2	1998.01	4,0	-	0,65	-	-	-
	Euro 3	2001.01	4,17	0,25	-	0,18	-	-
	Euro 4	2006.01	1,81	0,13	-	0,10	-	-
	Euro 5	2010.09 ^c	1,81	0,13 ^h	-	0,075	0,005 ^{e, f}	-
	Euro 6	2015.09	1,81	0,13 ^h	-	0,075	0,005 ^{e, f}	6,0 × 10 ¹¹ e, j
N ₁ , třída III > 1760 kg	Euro 1	1994.10	6,90	-	1,70	-	-	-
	Euro 2	1998.01	5,0	-	0,80	-	-	-
	Euro 3	2001.01	5,22	0,29	-	0,21	-	-
	Euro 4	2006.01	2,27	0,16	-	0,11	-	-
	Euro 5	2010.09 ^c	2,27	0,16 ⁱ	-	0,082	0,005 ^{e, f}	-
	Euro 6	2015.09	2,27	0,16 ⁱ	-	0,082	0,005 ^{e, f}	6,0 × 10 ¹¹ e, j
N ₂	Euro 5	2010.09 ^c	2,27	0,16 ⁱ	-	0,082	0,005 ^{e, f}	-
	Euro 6	2015.09	2,27	0,16 ⁱ	-	0,082	0,005 ^{e, f}	6,0 × 10 ¹¹ e, j
Vznětové motory								
N ₁ , třída I ≤1305 kg	Euro 1	1994.10	2,72	-	0,97	-	0,14	-
	Euro 2 IDI	1998.01	1,0	-	0,70	-	0,08	-
	Euro 2 DI	1998.01 ^a	1,0	-	0,90	-	0,10	-
	Euro 3	2000.01	0,64	-	0,56	0,50	0,05	-
	Euro 4	2005.01	0,50	-	0,30	0,25	0,025	-
	Euro 5a	2009.09 ^b	0,50	-	0,23	0,18	0,005 ^f	-
	Euro 5b	2011.09 ^d	0,50	-	0,23	0,18	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹
	Euro 6	2014.09	0,50	-	0,17	0,08	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹
N ₁ , třída II 1305-1760 kg	Euro 1	1994.10	5,17	-	1,40	-	0,19	-
	Euro 2 IDI	1998.01	1,25	-	1,0	-	0,12	-
	Euro 2 DI	1998.01 ^a	1,25	-	1,30	-	0,14	-
	Euro 3	2001.01	0,80	-	0,72	0,65	0,07	-
	Euro 4	2006.01	0,63	-	0,39	0,33	0,04	-
	Euro 5a	2010.09 ^c	0,63	-	0,295	0,235	0,005 ^f	-
	Euro 5b	2011.09 ^d	0,63	-	0,295	0,235	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹
	Euro 6	2015.09	0,63	-	0,195	0,105	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹
N ₁ , třída III > 1760 kg	Euro 1	1994.10	6,90	-	1,70	-	0,25	-
	Euro 2 IDI	1998.01	1,5	-	1,20	-	0,17	-
	Euro 2 DI	1998.01 ^a	1,5	-	1,60	-	0,20	-
	Euro 3	2001.01	0,95	-	0,86	0,78	0,10	-
	Euro 4	2006.01	0,74	-	0,46	0,39	0,06	-
	Euro 5a	2010.09 ^c	0,74	-	0,350	0,280	0,005 ^f	-
	Euro 5b	2011.09 ^d	0,74	-	0,350	0,280	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹
	Euro 6	2015.09	0,74	-	0,215	0,125	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹
N ₂	Euro 5a	2010.09 ^c	0,74	-	0,350	0,280	0,005 ^f	-
	Euro 5b	2011.09 ^d	0,74	-	0,350	0,280	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹
	Euro 6	2015.09	0,74	-	0,215	0,125	0,005 ^f	6,0 × 10 ¹¹

† U vozidel Euro 1/2 byly třídy referenční hmotnosti kategorie N₁ třídy I ≤ 1250 kg, třídy II 1250-1700 kg, třídy III > 1700 kg
a. do roku 1999.09.30 (po tomto datu motory DI musí splňovat limity IDI) (DI - direct injection - přímé vstřikování, IDI - indirect injection - nepřímé vstřikování)
b. 2011.01 pro všechny modely
c. 2012.01 pro všechny modely
d. 2013.01 pro všechny modely
e. platí pouze pro vozidla používající DI motory
f. 0,0045 g / km pomocí postupu měření PMP (PMP - Particulate Measurement Programme)
g. a NMHC = 0,068 g / km (NMHC - nemethanové uhlovodíky)
h. a NMHC = 0,090 g / km
i. a NMHC = 0,108 g / km
j. 6,0 × 10¹² l / km během prvních tří let od data účinnosti Euro 6

Tab. 3 Emisní limity EURO lehkých užitkových vozidel N₁, N₂ [38]

7.3 Homologační zkoušky

Pro schválení a provoz nových vozidel musí výrobci dodržet platné emisní předpisy dle platné normy, tj. v současnosti EURO 6c. Pro jejich homologaci je nutné podrobit se několika zkouškám, a ty jsou dle předpisu Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 83 – Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska emisí znečišťujících látek podle požadavků na motorové palivo následující:

1. *Vozidla se zážehovým motorem a hybridní elektrická vozidla se zážehovým motorem se podrobí následujícím zkouškám:*

- typ I (ověření průměrných výfukových emisí po studeném startu)
- typ II (emise oxidu uhelnatého při volnoběhu)
- typ III (emise plynů z klikové skříně)
- typ IV (emise způsobené vypařováním)
- typ V (životnost zařízení proti znečišťujícím látkám)
- typ VI (ověření průměrných výfukových emisí oxidu uhelnatého a uhlovodíků po studeném startu za nízké teploty okolí)
- zkouška systému OBD
- zkouška výkonu motoru

2. *Vozidla se vznětovým motorem a hybridní elektrická vozidla se vznětovým motorem se podrobí následujícím zkouškám:*

- typ I (ověření průměrných výfukových emisí po studeném startu)
- typ V (životnost zařízení k regulaci znečišťujících látek)
- zkouška systému OBD [45]

Zkouška typu I se zahájí umístěním vozidla na vozidlový dynamometr, který je opatřen zařízením k simulaci zatížení a setrvačné hmotnosti. Bez přerušení se provede zkouška, tedy jízdní cyklus. Do 31.8.2017 byl prováděn dle EURO 6b jízdní cyklus NEDC, od 1.9.2017 nastala změna a v platnost se dostala norma EURO 6c, která mění jízdní cyklus na WLTC. Při zkoušce se ředí výfukové plyny a v jednom nebo více vacích se shromažďuje proporcionální vzorek. Výfukové plyny zkoušeného vozidla se ředí, odebírají se vzorky a analyzují se níže uvedeným postupem a změří se celkový objem zředěných výfukových plynů. U vozidel vybavených vznětovými motory se musí změřit nejen emise oxidu uhelnatého, uhlovodíků a oxidů dusíku, ale také emise znečišťujících částic. Tento proces se opakuje třikrát. [39],[45]

Zkouška typu II se provádí pouze u vozidel se zážehovými motory. V případě zkoušky typu II je maximální povolený obsah oxidu uhelnatého ve výfukových plynech při volnoběhu takový, jaký uvádí výrobce vozidla. Maximální obsah oxidu uhelnatého by neměl překročit 0,3 % obj. Při zvýšených volnoběžných otáčkách nesmí překročit obsah CO 0,2 %, přičemž otáčky motoru dosahují minimálně $2\,000\text{ min}^{-1}$ a lambda (součinitel přebytku vzduchu) je $1 \pm 0,03$, či odpovídá specifikacím výrobce.

Při zkoušce typu III nesmí systém větrání klikové skříně umožňovat únik plynů z klikové skříně do ovzduší.

Při zkoušce typu IV, která stanovuje emise způsobené vypařováním z vozidel se zážehovými motory, nesmí být tyto emise při každé zkoušce větší než 2 gramy.

Zkouška typu V simuluje stárnutí na 160 000 km ujetých zkušební dráze, na silnici nebo na vozidlovém dynamometru. Následně se vyhodnocují naměřená data emisí výfukových plynů a určuje shoda s předepsaným limitem.

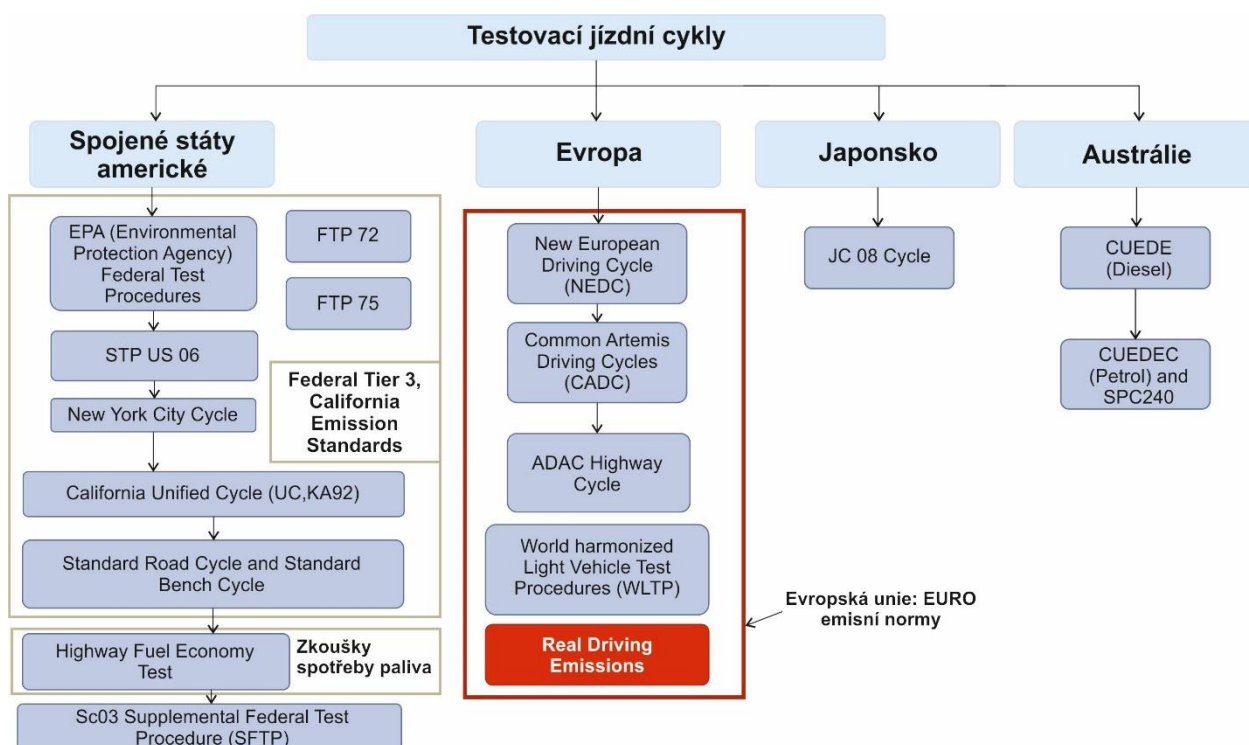
Zkouška typu VI je obdobou zkoušky I, ale za snížené teploty okolí na $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kromě toho výrobce schvalovacímu orgánu poskytne informace o strategii fungování systému recirkulace výfukových plynů (EGR), včetně informací jeho fungování za nízkých teplot.

Zkouška systémů OBD sestává z fází simulace chybné funkce součásti řídicí jednotky motoru nebo systému pro regulaci emisí, stabilizace vozidla se simulací chybné funkce, jízdy vozidla se simulací chybné funkce během cyklu zkoušky typu I a měření emisí vozidla a rozhodnutí, zda systém OBD na simulovanou chybnou funkci reaguje a odpovídajícím způsobem řidiči vozidla chybnou funkci oznamuje. [45]

Emise, pro zkoušky typu I a VI, se testují v laboratorních podmínkách na zkušebním dynamometru pomocí daného jízdního cyklu a jsou hodnoty emisí jsou vyjádřeny v g/km kromě počtu pevných částic, které jsou vyjádřeny v 1/km. Jízdní cyklus obvykle představuje soubor bodů rychlosti vozidla v čase a záznamu o emisích. Používá se také ke stanovení spotřeby paliva. V oblasti užitkových vozidel se jízdní cyklus neprovádí na dynamometru vozidla, nýbrž na dynamometru motoru a je vyhodnocen prostřednictvím souboru otáček motoru namísto bodů rychlosti vozidla. Jízdní cyklus je tedy simulací jízdního profilu a zaručuje jeho opakovatelnost. V průběhu času došlo k několika změnám jízdních cyklů a celosvětově se vyvíjí mnoho jízdních cyklů, které by nejlépe odpovídaly reálnému provozu. V následujících kapitolách jsou podrobněji popsány vybrané jízdní cykly.

7.4 Jízdní cykly

Jízdní cykly jsou rychlostní profily, které určují rychlost v určitém čase při měření emisí vozů na zkušebním válcovém dynamometru. Jsou obsaženy v emisních normách tak, aby bylo možné provést opakovatelné a srovnatelné měření emisí výfukových plynů pro různé motory nebo vozidla. Zkušební cykly specifikují podmínky, za kterých je motor nebo vozidlo provozováno během zkoušky emisí jako např. provozní teploty, převodový stupeň či zatížení. Existuje mnoho různých zkušebních jízdních cyklů, které vydaly vlády a národní nebo mezinárodní organizace, které se zabývají tímto tématem a jejich příklad je zobrazen na **Obr. 13**. [46],[49]

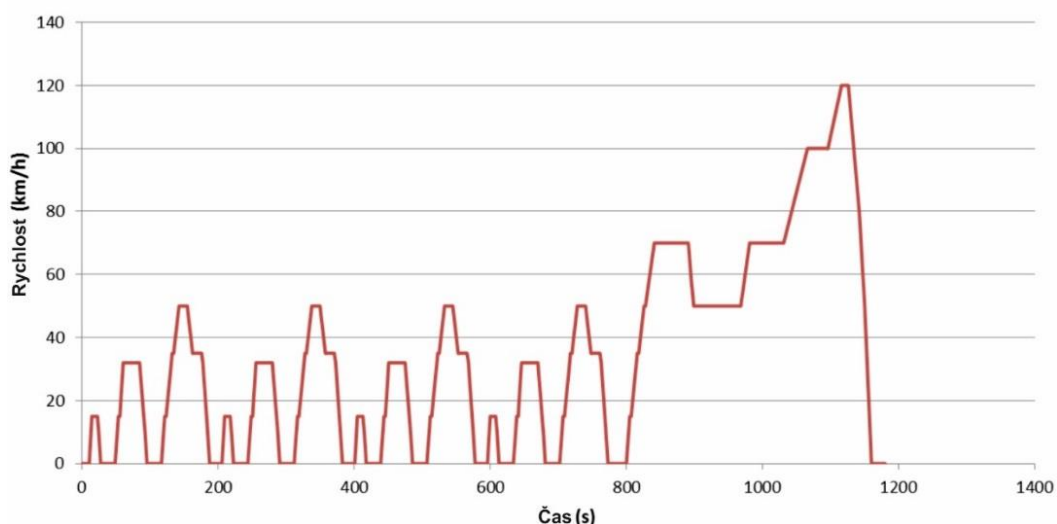


Obr. 13 Příklad rozdělení vybraných jízdních cyklů [49]

Existují dva druhy jízdních cyklů. Modální cykly jako byl evropský standard NEDC nebo japonský režim 10-15 a přechodové cykly jako cyklus WLTC, FTP-75 nebo Artemis. Hlavní rozdíl spočívá v tom, že modální cykly jsou kompilací rovných zrychlení a konstantních rychlostí a nejsou reprezentativní pro skutečné chování řidiče, zatímco přechodové cykly zahrnují mnoho změn rychlosti, typických pro jízdní podmínky na silnici. Dále jsou podrobněji popsány vybrané jízdní cykly používané ve státech Evropské unie a i jiných evropských státech. [46]

7.4.1 New European Driving Cycle (NEDC)

New European Driving Cycle, v českém překladu „Nový evropský jízdní cyklus“ je jízdní cyklus určený k posouzení úrovně emisí automobilových motorů a spotřeby paliva. Od roku 2000 (EURO 3) byl předchozí cyklus ECE 15 + EUDC upraven tak, že se zrušilo zahřátí motoru 40 s před začátkem odběru vzorků. Tento modifikovaný start za studena byl označen jako NEDC nebo jako test MVEG-B. Je složen z městské části nazvané ECE-15 (také se může nazývat pouze UDC – Urban driving cycle), která se opakuje čtyřikrát a mimoměstské části EUDC (Extra-Urban driving cycle), jak je znázorněno na **Graf 3**. NEDC se používal jako referenční cyklus pro homologaci vozidel až do normy EURO 6 v zemích Evropské unie a v některých dalších zemích. Při tomto cyklu se ujede na zkušebním dynamometru vzdálenost 11016,63 m za dobu 1180 sekund průměrnou rychlostí 33,6 km/h. Maximální dosažená rychlost při tomto cyklu je 120 km/h. [46],[48]



Graf 3 Průběh New European Driving Cycle [46]

Vzhledem k tomu, že NEDC byl zaveden již v roce 1996, je v současné době zastaralý. Poměr městské jízdy je vysoký a zrychlení jsou příliš malá. Také se nezohledňuje různorodá krajinná topografie a rychlejší jízda na dálnici. Maximální rychlost (120 km/h) je prováděna jen po dobu deseti sekund. Technologie, které byly vyvinuty v posledních letech ke snížení emisí CO₂, mají větší uplatnění při laboratorním měření na zkušebním dynamometru než v reálném provozu. Systém Start-Stop je jedním z příkladů. Při užití cyklu NEDC se snižuje spotřeba paliva o cca 10 %. To je zapříčiněno dlouhými nečinnými úseky cyklu, kdy vozidlo stojí. Ve skutečnosti je tento systém účinný pouze v těžké dopravě s mnoha zastávkami. [46]

Funkce, které jsou nyní považovány za samozřejmé, jako jsou klimatizace, rádio či vyhřívání sedadel, zde nejsou zahrnuty, protože závisí na různých uživatelských

podmínkách. Cílem tohoto právního požadavku tedy bylo poskytnout základ pro srovnání mezi různými výrobci vozidel. Ukázalo se, že ale existuje významný rozdíl mezi výsledky testovacího stanoviště a hodnotami v reálném provozu. [47]

7.4.2 Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles (WLTC)

Světově harmonizované zkušební cykly lehkých vozidel (WLTC) jsou zkoušky vozidel na dynamometru pro stanovení výfukových emisí a spotřeby paliva. Zkoušky byly vypracovány skupinou OSN ECE GRPE (Pracovní skupina pro znečištění a energetiku). Cykly WLTC jsou součástí celosvětově harmonizovaných zkušebních postupů lehkých vozidel (WLTP), zveřejněných v rámci globálního technického předpisu UNECE č.15 (GTR 15). Zkratky WLTP a WLTC jsou někdy chybně zaměňovány. WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure) definuje řadu dalších postupů a procedur, včetně testovacích cyklů WLTC, které jsou zapotřebí ke schválení typu vozidla. WLTP nahrazuje od 1.9.2017 evropský postup založený na NEDC pro schvalování typu vozidel. Všechny nové vozy by měly mít uvedeny dle nové metody WLTP-CO₂ také hodnoty oxidu uhličitého od ledna 2019. [38],[46],[50]

Postupy WLTP jsou rozděleny do tří tříd v závislosti na poměru jmenovitého výkonu (W) a pohotovostní hmotnosti (kg), viz **Tab. 4**. Tento parametr se nazývá též PMR (Power to Mass Ratio). Pohotovostní hmotnost je celková hmotnost vozidla se standardní výbavou a všemi potřebnými provozními kapalinami a materiály, jako jsou motorový olej, převodový olej, chladicí kapalina, klimatizační chladivo a palivo, bez cestujících a nákladu. Tato hmotnost je definována v ECE R83. Cykly třídy 3 jsou dále rozděleny na dvě skupiny, rozdělené dle maximální dosažitelné rychlosti vozidla (v_{max}), což je maximální rychlost vozidla deklarovaná výrobcem. [50]

Kategorie	PMR, W/kg	v_{max} , km/h	Rychlostní sekvence
Třída 3b	PMR > 34	$v_{max} \geq 120$	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + Extra High 3
Třída 3a		$v_{max} < 120$	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + Extra High 3
Třída 2	$34 \geq PMR > 22$	-	Low 2 + Medium 2 + High 2 + Extra High 2
Třída 1	$PMR \leq 22$	-	Low 1 + Medium 1 + Low 1

Tab. 4 Rozdělení jízdních cyklů WLTC [50]

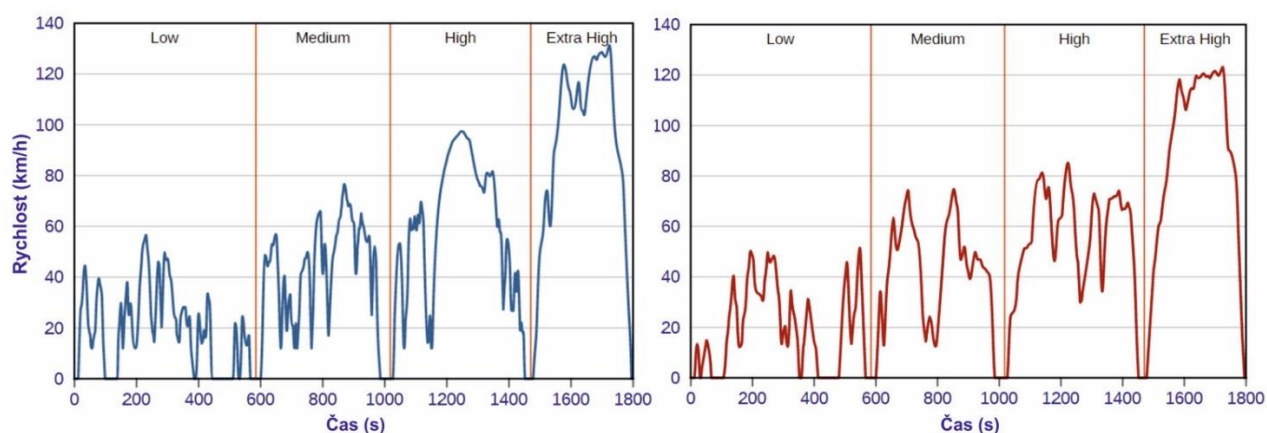
Cyklus tříd 3

Nejvyšší poměr výkonu a hmotnosti je označován jako třída 3, která je především určena pro vozidla používaná v Evropě a Japonsku. Vozidla třídy 3 jsou rozdělena do dvou podtříd, a to podle jejich maximální rychlosti na třídu 3a s maximální rychlostí vozidla, která je nižší

než 120 km/h, a třídu 3b s dosažitelnou maximální rychlostí vyšší než 120 km/h. Na **Graf 3** je vpravo uveden průběh cyklu třídy 3b. Není zde zobrazeno grafické vyjádření pro třídu 3a, jelikož je velmi podobné třídě 3b. Rozdíl mezi nimi je pouze v rychlostní sekvenci Medium a High (viz **Tab. 4**), tedy Medium 3-2 je o 35 metrů delší než Medium 3-1 a High 3-2 je delší o 38 metrů.

Cyklus třídy 2

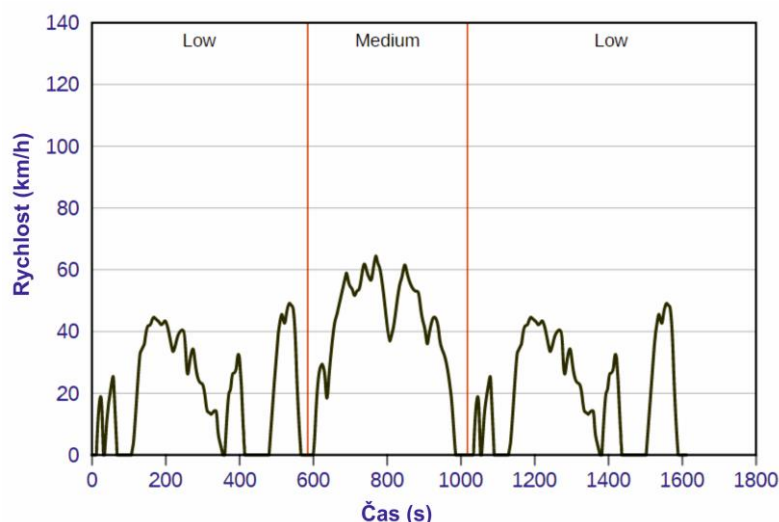
Třída 2 je cílena na vozidla řízená v Indii a vozy s nízkým výkonem v Japonsku a Evropě. Na rozdíl od třídy 3 jsou maximální rychlosti v jednotlivých fázích nižší. Pro bližší porovnání cyklů tříd 2 a 3 byly zobrazeny jejich průběhy vedle sebe na **Graf 4**.



Graf 4 Průběh cyklu WLTC třídy 3b (vlevo) a 2 (vpravo) [50]

Cyklus třídy 1

Při nejnižším poměru výkonu k hmotnosti je třída 1 určena pro vozidla provozována především v Indii. Skládá se z nízkých, středních a opět nízkých rychlostních fází, kde maximální rychlost je 64,4 km/h. Cyklus třídy 1 je znázorněna na **Graf 5**. [50]



Graf 5 Průběh cyklu WLTC třídy 1 [50]

Emise v reálných podmínkách jízdy (RDE – Real-Driving Emissions)

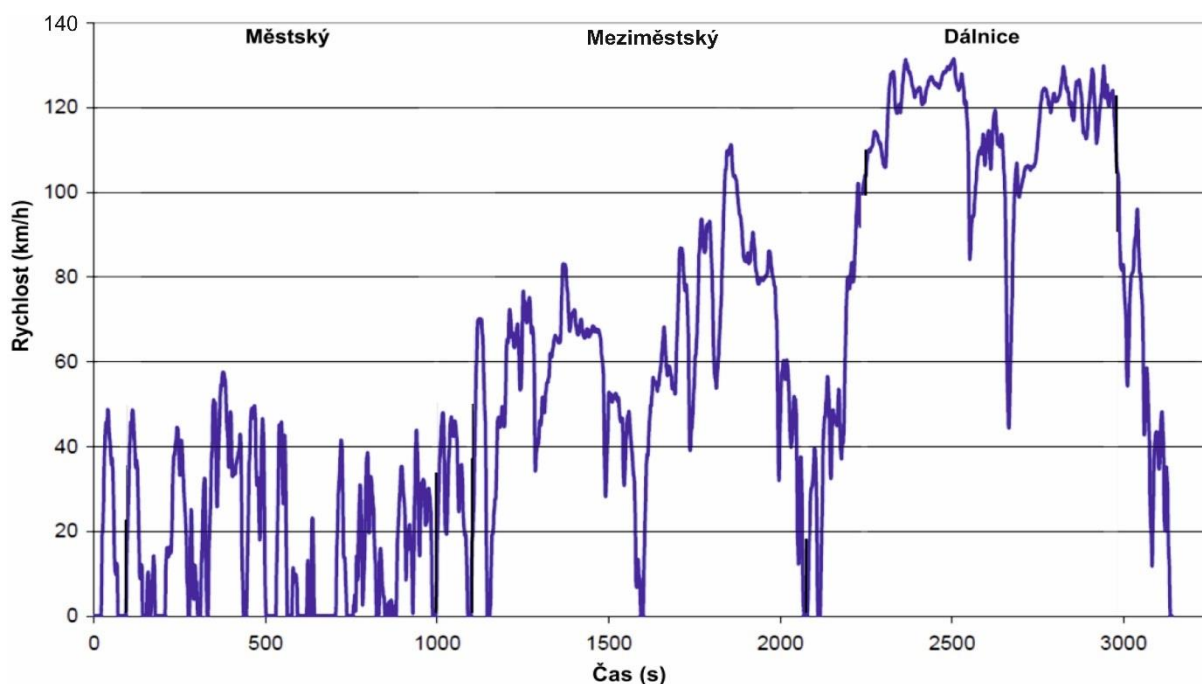
Kromě laboratorních testů musí být emise vozidel testovány také ve skutečném provozu. Požadavky na testování RDE byly zavedeny prostřednictvím několika regulačních změn (tj. nařízením Komise EU 427/2016 v březnu 2016) ve formě několika balíčků. První balíček RDE byl zveřejněn v březnu 2016, druhý v dubnu 2016 a třetí v červenci 2017. Test RDE se provádí během provozu vozidla pomocí přenosného systému pro měření emisí (PEMS). Test RDE musí trvat 90 až 120 minut. Trasa musí obsahovat tři segmenty: městský (< 60 km/h), meziměstský (60 - 90 km/h) a dálnici (> 90 km/h) v uvedeném pořadí a s příslušnými podíly jedné třetiny. Každý segment musí pokrývat vzdálenost nejméně 16 km. Povinnost měření dle RDE se nyní vztahuje na typy vozidel schválené od 1.9.2017 a dále pak na všechny nové registrace od září 2019. [49],[50]

Emise NO_x a CO musí být měřeny na všech vozidlech EURO 6. Emise PN se měří na všech vozidlech EURO 6, které mají daný limit PN. Emisní limity RDE jsou nyní definovány tak, že se vynásobí příslušný emisní limit NEDC koeficientem shody pro danou složku emisí. [38]

7.4.3 Common Artemis Driving Cycles (CADC)

Jízdní cykly Artemis (CADC) jsou postupy na válcovém dynamometru vyvinuté v rámci evropského projektu Artemis, založené na statistické analýze rozsáhlé databáze evropských vzorů řízení v reálném prostředí. Tyto zkušební cykly by tedy měly lépe simulovat provoz vozu ve skutečném provozu. Tento zkušební cyklus je charakterizován mnohem prudšími zrychleními, mnohem vyšší jízdní dynamikou a skutečnějším podílem vysokých rychlostí. Cykly zahrnují tři jízdní řady, a to městský, meziměstský a dálnici. Cyklus dálnice má dvě varianty s maximálními rychlostmi 130 a 150 km/h.

Rychlost vozidla během cyklů Artemis je znázorněna na následujícím grafu **Graf 6**. Vybrané charakteristiky cyklů Artemis jsou uvedeny v tabulce **Tab. 5**, kde jsou uvedeny hodnoty dob trvání cyklů, ujetá vzdálenost, průměrná a maximální rychlost a rozložení rychlostí v procentech do čtyř skupin. [46],[51]



Graf 6 Průběh cyklů CADC [52]

Charakteristiky	Městský	Meziměstský	Dálnice 130	Dálnice 150
Doba trvání [s]	920	1081	1067	1067
Vzdálenost [km]	4,47	17,27	28,74	29,55
Průměrná rychlost [km/h]	17,5	57,5	97,0	99,7
Maximální rychlost [km/h]	58	112	132	150
Rozložení rychlostí [%]				
- nečinnost ($v = 0$ km/h)	29	3	2	2
- nízká rychlost ($0 < v < 50$ km/h)	69	31	15	15
- střední rychlost ($50 < v < 90$ km/h)	2	59	13	13
- vysoká rychlost ($v > 90$ km/h)	0	7	70	70

Tab. 5 Charakteristiky cyklů CADC [51]

7.5 Vývoj produkce pevných částic v České republice

Ministerstvo životního prostředí ČR zadává Centru dopravního výzkumu (CDV) každý rok k vypracování studii o vývoji dopravy z hlediska životního prostředí, která podává souhrnný přehled o vývoji dopravy v České republice v návaznosti na publikace z minulých let. Tyto statistické údaje jsou vydávány již od roku 1998. Studie tvoří soubor sledovaných indikátorů komplexně popisujících vývoj dopravy ve vztahu k životnímu prostředí. Těmito ukazateli jsou např. hodnoty dopravních výkonů, emise skleníkových plynů a dalších polutantů, délka dopravní infrastruktury, zábor půdy novou výstavbou dálnic a rychlostních komunikací, počty vozidel, spotřeby paliv, energie a emisní zátěže na krajské úrovni. Jednotlivé časové řady umožňují zhodnotit jejich vývojové trendy. Studie vychází z datových podkladů různých zdrojů

– Statistická ročenka ČR, Ročenka dopravy, databáze IRTAD (Mezinárodní databáze silniční dopravy a nehodovosti), OECD (Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj), ŘSD (Ředitelství silnic a dálnic), CRV (Centrální registr vozidel), ČSÚ (Český statistický úřad) a ČPÚ (Česká plynárenská unie), ale také z výpočtů Centra dopravního výzkumu (CDV), které zahrnují vývoj emisí a energetické bilance jednotlivých druhů dopravy. Z této studie můžeme dále zjistit trend vývoje produkce pevných částic v České republice. [17]

V následující tabulce **Tab. 6** jsou zaznamenány produkce pevných částic jednotlivými druhy dopravy od roku 1993 do roku 2015. Spodní řádek zobrazuje součet všech druhů dopravy v daném roce. Z dat je zřejmé, že emise pevných částic klesá od roku 2005. Můžeme si to vysvětlovat přísnějšími emisními limity a nároky na nové komponenty vozů, které mají za úkol snižovat produkci pevné částice.

Druh dopravy <i>Transport mode</i>	Rok/Year												
	1993	1995	2000	2005	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
IAD <i>Car transport</i>	70	94	1 044	1 372	1 420	1 358	1 231	1 064	992	921	872	865	872
Silniční veřejná <i>Public road</i>	570	523	1 320	1 465	1 264	1 049	824	645	520	436	366	339	307
Silniční nákladní <i>Road freight</i>	1 125	1 847	3 123	3 015	2 570	2 237	1 833	1 374	1 181	1 009	923	894	876
Železniční <i>Motorová trakce</i> <i>Railway motor traction</i>	558	667	272	241	249	275	249	241	236	228	223	225	217
Vodní <i>Inland waterway</i>	78	85	13	13	13	10	13	10	8	13	5	8	10
Letecká <i>Air</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Doprava celkem <i>Total</i>	2 757	3 586	5 773	6 106	5 516	4 929	4 151	3 335	2 937	2 607	2 389	2 332	2 283

Tab. 6 Produkce pevných částic v tunách jednotlivými druhy dopravy v ČR [17]

V tabulce **Tab. 7** jsou uvedeny spotřeby pohonných hmot jednotlivými druhy dopravy. Jejich vývoj je sledován od roku 1993. Stále rostoucí trend lze pozorovat u motorové nafty. Její významná spotřeba je především u silniční nákladní dopravy (SND) a individuální automobilové dopravy (IAD). Jez de zaznamenán pokles spotřeby benzínu, a to od roku 2007.

Druh dopravy <i>Transport mode</i>	Rok / Year												
	1993	1995	2000	2005	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
IAD benzín <i>IAD gasoline</i>	1 336	1 521	1 835	2 026	2 067	1 987	1 922	1 742	1 671	1 557	1 462	1 443	1 454
IAD nafta <i>IAD diesel</i>	55	73	439	1 017	1 231	1 318	1 287	1 280	1 325	1 383	1 431	1 532	1 666
IAD LPG <i>IAD LPG</i>	-	-	62	70	77	78	80	76	74	71	69	75	76
IAD směsná nafta <i>IAD bio diesel</i>	-	2	35	1	17	-	-	-	-	-	-	-	-
AD nafta <i>AD diesel</i>	207	186	347	588	619	604	572	537	530	524	525	542	567
AD LPG <i>AD LPG</i>	-	-	3	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-
AD CNG <i>AD CNG</i>	-	-	2,0	2,2	2,4	2,7	2,9	2,9	3,0	3,2	3,9	5,6	8,6
AD směsná nafta <i>AD bio diesel</i>	-	2	87	4	42	-	-	-	-	-	-	-	-
SND nafta <i>SND diesel</i>	409	666	956	1 623	1 709	1 669	1 580	1 484	1 464	1 449	1 450	1 496	1 566
SND LPG <i>SND LPG</i>	-	1	39	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-
SND CNG <i>SND CNG</i>	-	3	0	0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,9
SND směsná nafta <i>SND bio diesel</i>	-	12	174	8	85	-	-	-	-	-	-	-	-
ŽD nafta <i>ŽD diesel</i>	203	242	104	92	95	105	95	92	90	87	85	86	83
ŽD směsná nafta <i>ŽD bio diesel</i>	0,2	0,2	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VD nafta <i>VD diesel</i>	28	31	5	5	5	4	5	4	3	5	2	3	4
LD lbenzín <i>VD Avgas</i>	8	9	3	2	2	2	2	2	1	2	2	2	3
LD lpetrolej <i>LD kerosine</i>	174	177	192	318	342	362	331	310	307	286	276	283	287

- ukazatel nebyl/není sledován / indicator was/is not monitored

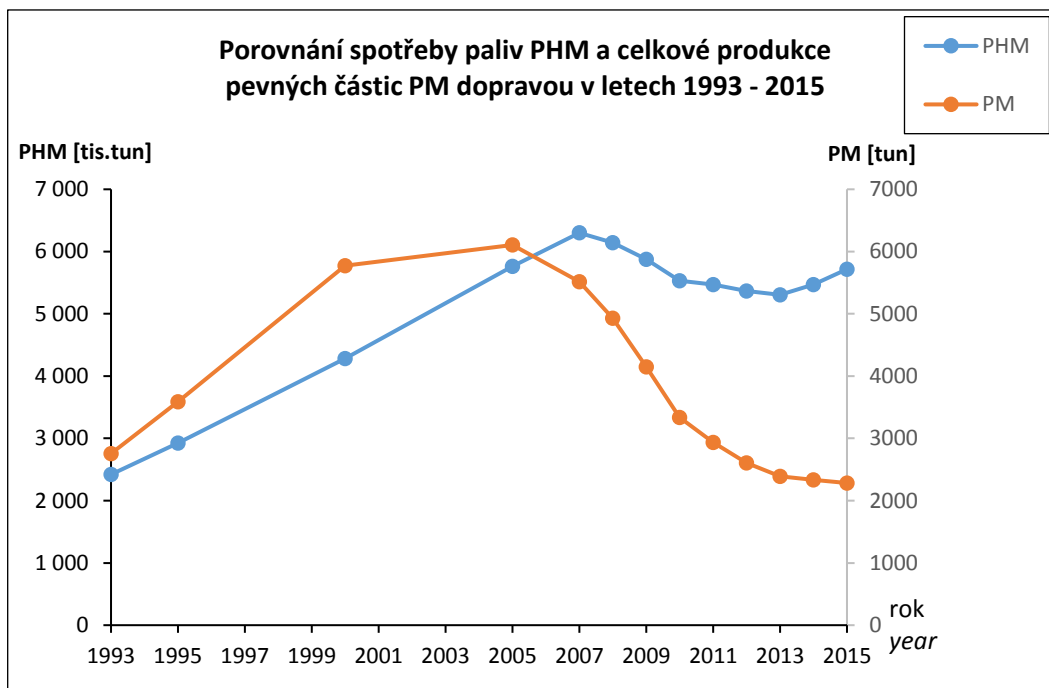
Zdroj: CDV

Tab. 7 Spotřeba pohonných hmot v tisíci tunách v dopravě ČR [17]

Z předešlých údajů lze vytvořit souhrnnou tabulku (**Tab. 8**), ukazující celkovou produkci pevných částic a celkovou spotřebu pohonných hmot na území České republiky. Její grafické znázornění (**Graf 7**) ukazuje pokles pevných částic (PM) vyprodukovaných dopravou od roku 2005. Můžeme si to vysvětlit počátkem instalování filtrů pevných částic do vozů ve větším měřítku v závislosti na plnění požadovaných norem vydaných Evropskou komisí. Lze pozorovat i mírný pokles spotřeby pohonných hmot od roku 2007 a následný růst od roku 2014. Tento jev ale není tak razantní, aby se takto projevil na příkřejším poklesu pevných částic. Z těchto údajů lze konstatovat, že výrobci automobilů se snaží vyvíjet automobily s důrazem na jejich nízké emise pomocí jejich konstrukce a různých systémů snižujících vlivy na životní prostředí, jak lze ze studie o vývoji dopravy z hlediska životního prostředí usuzovat.

Rok	1993	1995	2000	2005	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Celkem PM [t]	2757	3586	5773	6106	5516	4929	4151	3335	2937	2607	2389	2332	2283
Celkem PHM [tis.t]	2420,2	2925,2	4283,2	5763,2	6300,5	6141,8	5877	5530,2	5468,3	5367,5	5306,3	5468	5715

Tab. 8 Porovnání spotřeby paliv PHM a celkové produkce pevných částic PM dopravou v ČR [17]



Graf 7 Porovnání spotřeby paliv PHM a celkové produkce pevných částic PM dopravou v ČR

8 Metody měření emisí pevných částic vozidel

Jelikož se zpřísnují limity emisí pevných částic vozidel, tak se množství částic naměřené gravimetrickou metodou blíží ke své spodní hodnotě citlivosti a dostatečné rozlišení pro její řádné použití není snadno dosažitelné. Hmotnost částic uložená na filtračním médiu je mnohem menší než hmotnost samotného média (přibližně v poměru 1/20000). Existuje zde mnoho potenciálních zdrojů chyb měření, zahrnujících adsorpci plyných složek jako jsou uhlovodíky či přítomnost opětovně unášeného kontaminačního prachu ze stěn odběrových trubek, kde prach není přímo generován spalováním v motoru. Další chyby měření jsou spojeny s vážením samotného filtračního média. Měřicí systémy a metody byly proto zdokonalovány, aby se zlepšila přesnost měření. [54]

Jako doplňková metoda ke gravimetrickému měření byla vyvinuta Evropskou hospodářskou komisí Organizace spojených národů (UNECE) metoda pro stanovení počtu pevných částic ve výfukových plynech za účelem zlepšení citlivosti měření a rozdělení emisí částic. V důsledku toho byly od roku 2011 postupně zavedeny limity počtu částic (PN) do evropských předpisů u lehkých užitkových vozidel a těžkých motorů. Měřicí systém počtu pevných částic byl původně navržen tak, aby vzorkoval zředění výfukového plynu z CVS (Constant Volume Sampling, viz dále), protože CVS se běžně používá k měření hmotnosti částic lehkých užitkových vozidel. Systém určující počet částic byl původně vyvinut pro měření emisí vznětových motorů vybavených filtrem pevných částic. V současné době jsou regulovány také emise částic vozidel vybavených motory s přímým vstřikováním benzínu. [53],[54]

V poslední době byly zavedeny přenosné systémy pro měření emisí (PEMS - Portable Emission Measurement Systems) pro monitorování emisí za provozu vozidla, a to na základě skutečnosti, že úroveň znečištění ovzduší oxidem dusičitým (NO_2) a pevnými částicemi neklesá i přes zavedení přísnějších předpisů o emisích z vozidel. Implementace metody měření skutečných emisí z jízdy (RDE – Real Driving Emission) do předpisů je plánována především v Severní Americe a Evropě. Byly vyvinuty také přenosné systémy pro měření hmotnosti částic, které kombinují filtrační gravimetrickou metodu s odběrem vzorků částic s ředěním části toku v reálném čase. Současně se vyvíjejí systémy PEMS pro určení počtu částic. [53],[54]

8.1 Gravimetrická metoda

8.1.1 Metodika měření

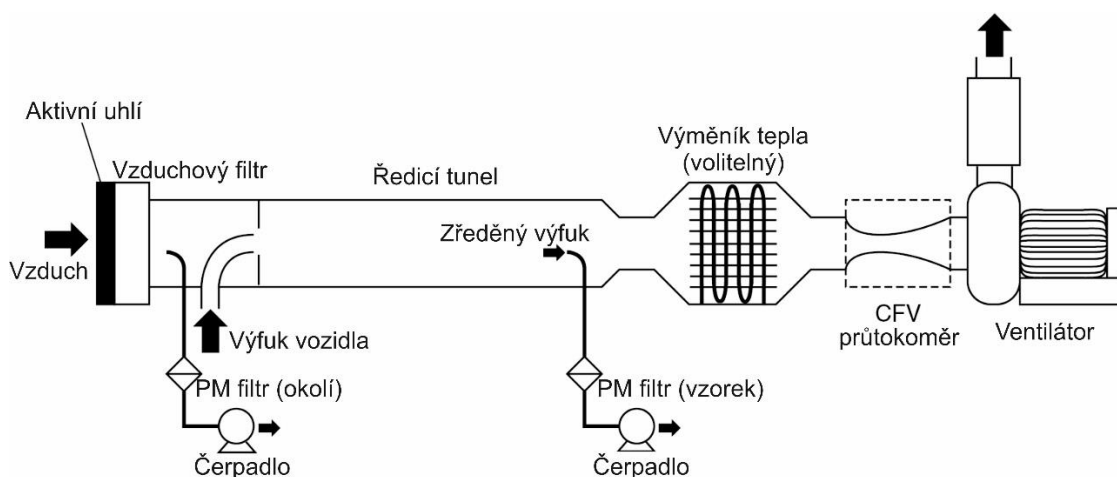
Hmotnost částic (PM) se určuje pomocí gravimetrického filtru. Surový výfukový plyn je zředěn, aby se před jeho vzorkováním a nanášením na specifikované filtrační médium snížila koncentrace neupraveného výfukového plynu na koncentraci, kterou může systém měřit, aby se snížila teplota na odpovídající hodnotu a aby se kontrolovala kondenzace a nukleační procesy tekavých látek ve výfukovém plynu. Ředění se provádí při odběru vzorků během specifikovaného zkušební cyklu, jako je například nový evropský jízdní cyklus (NEDC) na dynamometru. Hmotnost částic, uložených na filtračním médiu, je vyhodnocena rozdílem hmotností média před a po odběru vzorků. Vzorkovací médium musí být před vážením na mikrováhách kondicionováno v prostředí s konstantní teplotou a vlhkostí. Nejsou zde měřeny hmotnosti jednotlivých složek částic, protože dle nařízení (do EURO 5a) je požadována pouze celková hmotnost emisí pevných částic. Tolerance podmínek při odběru vzorků a přípravě vzorkovacích médií jsou přísně vymezeny v předpisech. Definice podmínek ředění dle nařízení Komise Evropské unie jsou uvedeny v **Tab. 9**. [53],[54]

Podmínky	Tolerance nebo specifika
Teplota ředícího vzduchu	25 ± 5 °C
Teplota povrchu filtru	47 ± 5 °C
Vstupní rychlost plynu do filtru	$90 - 100$ cm·s ⁻¹
Minimální ředící poměr	5 - 7
50 % bod řezu hrubých částic	2,5 - 10 μm
Filtrace ředícího vzduchu	filtr HEPA a aktivní uhlí
Teplota pro stabilizaci filtru	22 ± 3 °C
Teplota okolí mikrováhy	22 ± 1 °C
Rosný bod pro stabilizaci filtru	$9,5 \pm 1$ °C
Rozlišení mikrováhy	0,1 μg
Korekce vztlaku	povinná
PM vzorkovací médium	čistý PTFE membránový filtr

Tab. 9 Podmínky a přípustné odchylky ředění výfukových plynů [54]

Systém ředění plného toku (FFDS – Full Flow Dilution System) známý také jako CVS (Constant Volume Sampling) byl poprvé použit pro měření plynných emisí v roce 1972. Těkavé složky kondenzují během procesu zředění ve vzduchu a vytvářejí částice nukleačního módu. Primární částice agregují a tvoří klastry. Proces zředění je proto rozhodující pro tvorbu

částic. Výfukové plyny vozidla jsou zředěny filtrovaným okolním vzduchem v ředicím tunelu spojeném s CVS. Ředicí vzduch je kondicionován pomocí filtru částic s nízkou účinností, následně prochází zařízením s aktivním uhlím a vysoce účinným vzduchovým filtrem (HEPA - High Efficiency Particulate Air). Zařízení s aktivním uhlím stabilizuje koncentrace uhlovodíků před vstupem do ředicího tunelu. Část zředěného výfukového plynu se extrahuje vzorkovačem hmotnosti částic. Vzdálenost bodu míchání surového výfukového plynu s ředicím vzduchem k bodu vzorkování částic je stanovena tak, aby byla delší než desetinásobek průměru ředicího tunelu, aby se zajistilo homogenní promíchání v místě vzorkování. Průtok vzorku vzorkovačem se měří pomocí podzvukové Venturiho trubice (CFV - Critical Flow Venturis) nebo tepelného hmotnostního průtokoměru. Konfigurace CVS je znázorněna na **Obr. 14**. [54]



Obr. 14 Nejběžnější konfigurace systému ředění plného toku výfukových plynů (CVS) [54]

Jedná se o jednu z nejběžnějších konfigurací FFDS (CVS). CVS měří a řídí celkový průtok zředěného výfukového plynu. Výměník tepla může být instalován na vstupu CFV, aby se udržovala konstantní teplota zředěného výfukového plynu. V takovém případě může být nastavení průtoku vzorkovače konstantní, protože průtok zředěného výfukového plynu bude konstantní.

Dále se využívají systémy, které jsou vhodné především pro těžké motory. Jeden z těchto systémů je uskutečněn pomocí dvojitého ředění, aby se snížila teplota pod 52 °C, což je maximální teplota uvedená v právních předpisech pro teplotu povrchu filtru. Druhou metodou je systém s ředěním části toku (PFDS – Partial Flow Dilution System). PFDS byly vyvinuty s cílem miniaturizovat zařízení pro měření hmotnosti emisí částic pro těžké motory. V systémech PFDS se odebírá pouze část toku surového výfukového plynu z výfukového potrubí. [54]

8.1.2 Chyby měření

Při této metodě měření je důležité se vyvarovat chyb měření či je minimalizovat. Ztráty částic představují přímé příčiny chyb v měření emisí hmotnosti částic. Ztráty způsobené termoforézou zkreslují a snižují naměřená data kvůli vysokým teplotám výfuku. Je třeba se vyvarovat chlazení výfukových plynů v předávací trubici vzorku před zředěním. Proto je žádoucí lepší tepelná izolace a krátká délka přenosové trubice. Částice se také ukládají na vnitřní ploše přenosové trubice. Opětovné zachycení těchto nanesených částic do vzorku může způsobit další chybu měření. Vytápění ředicího vzduchu a stěny potrubí pro odběr vzorků poskytuje další přínos pro snížení a prevenci kontaminace vzorkovacích potrubí. Proces vyhřívání a čištění čistým vzduchem může odstranit usazené částice před emisními zkouškami. Další chyba může být způsobena uhlovodíky, které tvoří rozpustné organické frakce a které mají různé body varu. Ve výfukovém vzorku jsou některé fáze kapalné a jiné plynné. V závislosti na těchto skutečnostech se účinnost filtrace částic mění. Adsorpční procesy plyných uhlovodíků (které nejsou uvažovány v hmotnosti částic) se liší podle materiálu a struktury vzorkovacího média. [54]

Filtrační médium musí být před vážením pomocí mikrováhy stabilizováno v prostředí s konstantní teplotou a vlhkostí. Vlhkost, teplota, doba stabilizace, znečištění, statická elektřina, vibrace a vztlak jsou možné příčiny chyb při manipulaci s filtračními médii a při vážení. Vzorkovací média jsou před vážením stabilizována v místnosti či komoře. Změny teploty a vlhkosti jsou přísně regulovány. Hmotnost síranů, obsažených v pevných částicích, je snadno ovlivněna vlhkostí díky své silné afinitě k vodě. Filtrační médium musí být chráněno před kontaminací jak částicemi, tak i plynými sloučeninami. Statická elektřina může ovlivnit mikrováhu. Proto musí být vzorkovací médium před vážením elektricky neutralizováno radioaktivním zdrojem nebo ionizátorem. Mikrováha je obvykle izolována od vibrací, aby se zlepšila jak stabilita během vážení, tak její citlivost. Dále se také koriguje barometrický tlak a teplota ve vážicí komoře, a to pomocí vzorce:

$$m_f = m_{uncorr} \cdot \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_f}} \quad [54] \quad (8.1.2.1)$$

kde m_f je korigovaná hmotnost částic, m_{uncorr} je nekorigovaná hmotnost částic, ρ_a je hustota okolního vzduchu, ρ_f je hustota vzorkovacího média a ρ_w je hustota kalibračního závaží. [54]

8.2 Systémy čítačů pevných částic

V roce 2001 iniciovala PMP (Particle Measurement Programme) EHK OSN tj. program pro vývoj nových metod měření, které by mohly nahradit nebo doplnit metodu konvenčního gravimetrického měření. Existují různé druhy metod měření početní koncentrace pevných částic (PN), které jsou uvedeny v **Tab. 10.** [54]

Zkratka metody	Název metody
CPC/CNC	Condensation particle counter <i>Kondenzační čítač pevných částic</i>
DCS	Diffusion charging sensor
EDB	Electrical diffusion battery
PASS	Photo acoustic soot sensor <i>Fotoakustický snímač sazí</i>
ELPI	Electrical low pressure impactor
LII	Laser induced incandescence
PAS	Photoelectric aerosol sensor <i>Fotoelektrický aerosolový snímač</i>
TEOM	Tapered element oscillating microbalance
QCM	Quartz crystal microbalance <i>Křemenné mikrováhy</i>
DMS	Differential mobility spectrometry <i>Diferenciální mobilní spektrometrie</i>
MEXA-1370PM	PM mass by gas analysis <i>Hmotnost částic stanovaná analýzou plynů</i>
EPA 2007 style	<i>Modified gravimetric method</i> Modifikovaná gravimetrická metoda

Tab. 10 Metody určování počtu pevných částic PN [54]

Nakonec byly vybrány dvě pro schvalování nových typů vozidel dle platných norem. Jednou z nich je zdokonalená gravimetrická metoda a je definována jako referenční. Druhou je metoda měření částic pevných částic, která využívá CVS, vyhřívané ředění a kondenzační čítač částic CPC (Condensation Particle Counter). Metoda určování počtu částic pomocí CPC poskytuje mnohem vyšší citlivost než gravimetrická metoda. Na druhou stranu nukleace těkavých frakcí silně závisí na podmínkách ředění výfukových plynů a ředicím poměru. Je obtížné řídit podmínky přesného ředění výfukových plynů, aby byly striktně

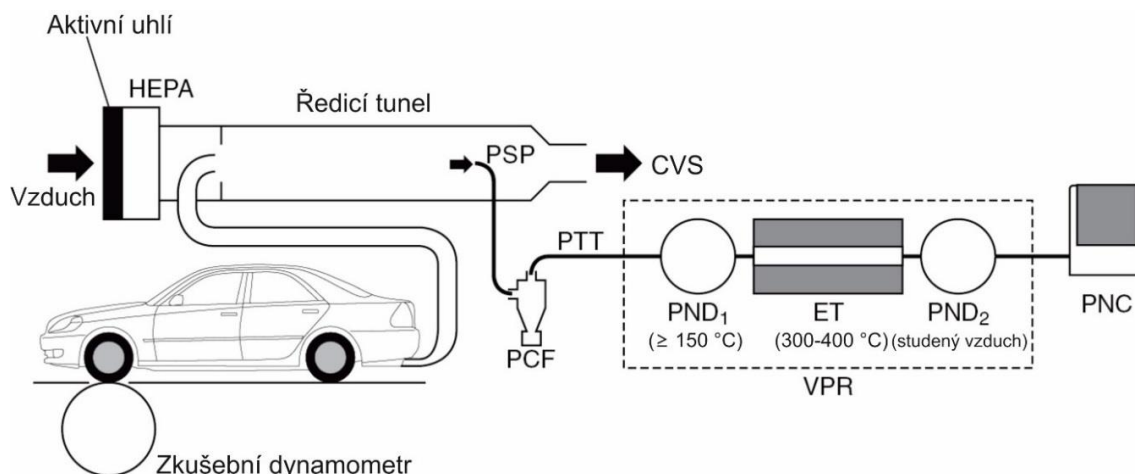
konstantní pro účely zlepšení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření. V metodě dle PMP je proto použit odstraňovač těkavých částic (VPR – Volatile Particle Remover), aby se zlepšila opakovatelnost měření. [54]

8.2.1 Kondenzační čítač pevných částic CPC

Výfukové plyny se nejdříve zředí v tunelu CVS stejným způsobem jako u gravimetrického měření hmotnosti pevných částic. Zředěný výfukový plyn se následně odebírá sondou pro vzorek částic PSP (Particle Sample Probe) v místě, kde je výfukový vzorek dostatečně promíchaný s čistým ředicím vzduchem. Poté se odstraní hrubé částice, které se obvykle nevytvářejí spalováním, předřadným filtrem PCF (Pre-Classifíer). Systém pro počítání pevných částic je připojen k ředicímu tunelu trubicí PTT (Particle Transfer Tube). PSP a PTT společně tvoří systém přenosu částic PTS (Particle Transfer System). Reynoldsovo číslo průtoku zředěného výfukového plynu a doba v PTS musí být menší než 1700 a nejvýše 3 sekundy, aby se minimalizovaly ztráty pevných částic v důsledku difúze. [54]

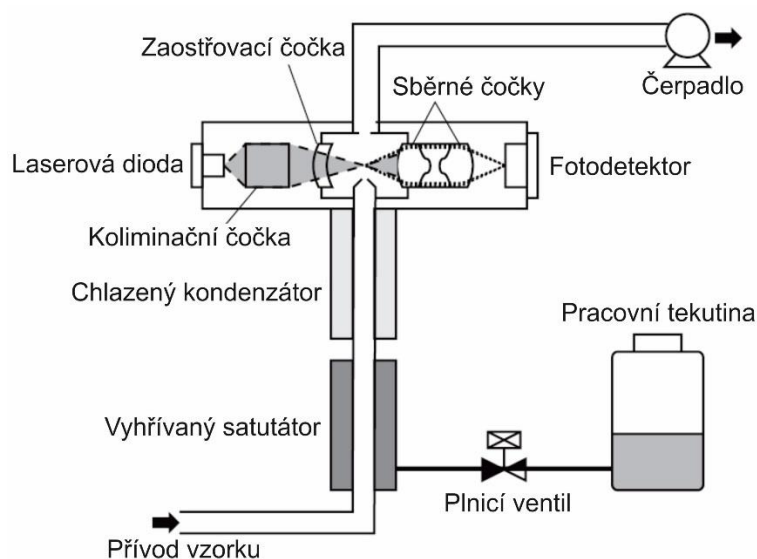
VPR upravuje zředěný vzorek před detekcí a počítáním částic. Odpařuje jakékoliv těkavé částice a dále ředí již zředěný výfukový plyn tak, aby se koncentrace částic PN nastavila na definovanou celkovou stupnici čítače PNC (Particle Number Counter). VPR obsahuje tři hlavní součásti. První je primární vyhřívána ředička PND₁ (Particle Number Diluter), kde je použit také vyhříváný filtr vzduchu HEPA, jehož teplota je vyšší než 150 °C, a tím zabraňuje další nukleaci těkavé frakce. Dále je za PND₁ umístěna odpařovací trubice ET (Evaporation Tube). Teplota stěny ET se udržuje na pevné jmenovité provozní teplotě mezi 300 a 400 °C. Jakékoliv zbývající těkavé částice se díky tomu úplně odpaří. Zahřátý vzorek se nakonec zředí pomocí ředicího a chladicího zařízení PND₂. Chlazením se zabraňuje termoforetickým ztrátám částic a opětovnému vytváření těkavých frakcí. Ředění a chlazení pomocí PND₂ snižuje teplotu vzorku plynu pod 35 °C, což je maximální teplota, kterou lze měřit pomocí PNC. [54]

CPC může obvykle detekovat částice o velikosti menší než 3 nm. V metodě PMP se však počítají pouze pevné částice vzniklé spalováním, které jsou typicky větší než 30 nm. Proto jsou PNC přesně nastavovány na měření pevných částic o minimální velikosti 23 nm. [54]



Obr. 15 Schéma kondenzačního čítače pevných částic CPC [54]

Konfigurace CPC je zobrazena na **Obr. 15**. Čítač částic CPC (PNC) se skládá ze saturátoru, kondenzátoru a detektoru. Pracovní tekutina (např. butanol) je přiváděna do saturační části. Fáze vypařování pracovní tekutiny je v této sekci nadměrně nasycená a mírně se zvýší teplota. Částice procházejí saturátorem a mísí se s párou pracovní kapaliny. Částice pak vstupují do části kondenzátoru, jehož teplota je nižší než teplota saturátoru. Proudění páry pracovní kapaliny kondenzuje na částice vlivem nižší teploty. Částice v aerosolu rostou na rovnoměrný průměr přibližně 10 μm tak, aby mohly být konzistentně počítány laserovým detektorem. Laserová dioda vyšle puls světelného svazku, dále ho kolimizační čočka rozšíří na rovnoběžný světelný svazek a poté ho zaostří zaostřovací čočka. Rozptýlené světlo se po průchodu sběrnými čočkami shromažďuje ve fotodetektoru. Detektor počítá laserové impulsy, které jsou rozptýleny částicemi. Celý tok vzorku musí projít saturačním zařízením, kondenzátorem a detektorem, jak je znázorněno na **Obr. 16**. [54]



Obr. 16 Schéma detekování pevných částic CPC (PNC) [54]

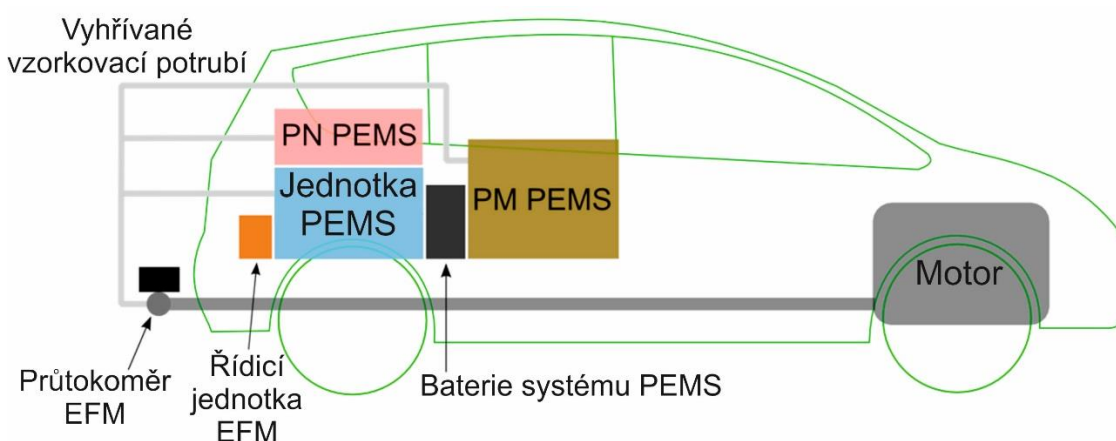
8.3 Přenosné systémy pro měření emisí (PEMS)

Cyklus WLTC značně rozšiřuje jízdní charakteristiky z hlediska podmínek zrychlení a rychlosti ve srovnání s NEDC. Navzdory tomu existují různé jízdní vlastnosti řidičů v reálném provozu, různé dopravní situace, okolní podmínky či trasy, které chybí v cyklu WLTC, což vede k rozdílným emisním hladinám než v reálných podmínkách. Aby se minimalizovaly nesrovnalosti mezi schvalováním typů vozidel a reálnými úrovněmi emisí, je od září 2017 zaveden testovací postup reálných jízdních emisí (RDE) jako doplněk cyklu WLTC (nařízení Komise (EU) 2016/427, 2016a). Cílem této nové metody zkoušení je kontrola úrovní emisí na silnicích lehkých motorových vozidel pomocí přenosných systémů pro měření emisí PEMS (Portable Emissions Measurement System). Vzhledem k tomu, že cyklus RDE má více nepříznivých podmínek než zkušební cyklus WLTC pro schválení typu vozidla, definoval Evropský parlament emisní limit RDE ve formě hodnoty NTE (Not-To-Exceed), v závislosti na faktoru shody CF (Conformity Factor) dle rovnice:

$$NTE_{\text{pollutant}} = CF_{\text{pollutant}} \cdot EURO6_{\text{limit}} \quad [56] \quad (8.3.1)$$

Dosavadní právní předpisy RDE stanovují pouze faktor shody CF 2,1 pro emise NO_x . Nařízení EURO 6 stanovuje pro tuto znečišťující látku limit 80 mg/km, což vede k hodnotě NTE 168 mg/km v testu RDE. Očekává se, že CF bude v září 2020 snížen na 1,5 (nařízení Komise (EU) 2016/646, 2016b). [56]

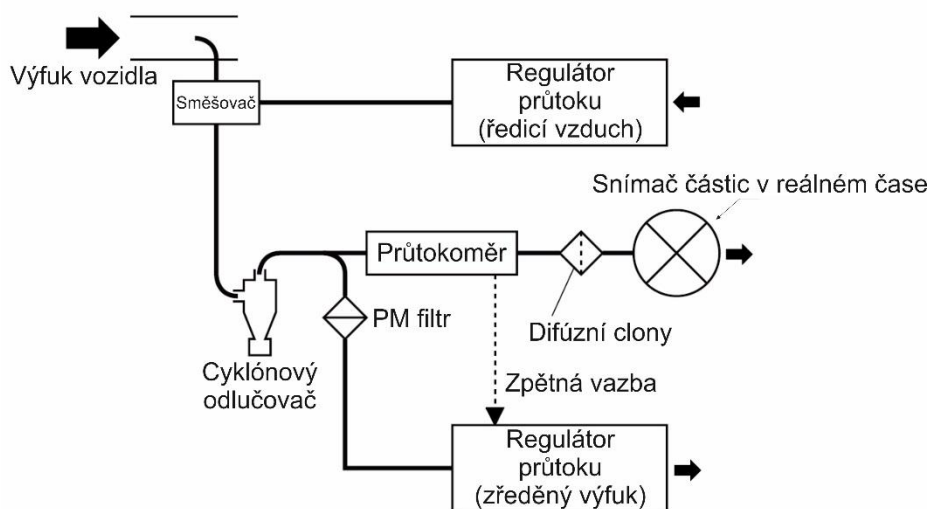
Systémy PEMS PM musí mít přijatelnou korelaci s konvenčními stacionárními laboratorními systémy, jako jsou systémy FFDS (CVS) a PFDS. Kromě toho je důležité, aby systém PEMS byl kompaktní a snadno se instaloval do vozidla. Vyžaduje také nízkou spotřebu elektrické energie, aby bylo možno měřit delší dobu. [55]



Obr. 17 Konfigurace rozmístění systému PEMS ve vozidle [57]

8.3.1 Systém PEMS PM

Jedna z nejběžnějších konfigurací systému PEMS PM je znázorněna na **Obr. 18**. Systém je velmi podobný systému PFDS. Snímač částic v reálném čase je kombinován se vzorkovačem pevných částic, aby bylo možné měřit hmotnostní koncentraci částic v reálném čase při testování. Množství toku vzorku odebraného do snímače v reálném čase je kompenzováno zpětnou vazbou do regulátoru průtoku zředěného výfukového plynu. Hrubé částice, které mohou být přítomny ve zředěném výfukovém plynu, jsou odstraněny cyklónovým odlučovačem před vstupem do snímače částic. Vliv částic nukleačního módu může být redukován použitím difúzních clon, které odstraňují menší částice. Vzorkování výfukových plynů se provádí proporcionálně k průtoku samotného výfukového plynu, aby se zajistily stejné podmínky ředění jako je tomu u laboratorních systémů. Jako snímač PM v reálném čase je použit buď fotoakustický snímač sazí, nebo křemenné mikrováhy. Vzhledem k tomu, že tyto snímače nemohou přímo stanovit hmotnostní koncentrace částic, přepočítací funkce z jejich detekčních signálů na hmotnostní koncentrace částic se kalibrují vzhledem k hmotnosti pevných částic nanesené na vzorkovacím médiu při každé zkoušce na bázi post-testu. [54],[56]

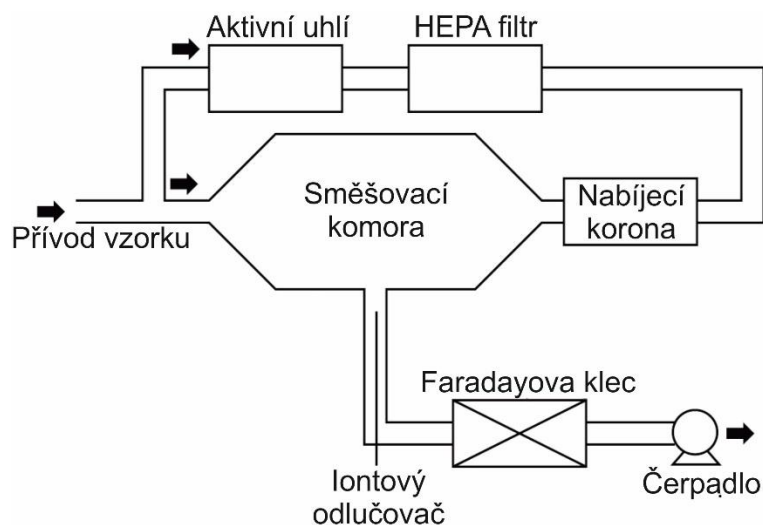


Obr. 18 Schéma systému PEMS PM [54]

8.3.2 Systém PEMS PN

Tento systém je určen pro měření počtu a velikostí pevných částic. Odběr vzorku je obdobný jako u PEMS PM. Je buď použit opět cyklónový odlučovač a difúzní clony, nebo je použit zjednodušený VPR s jedním ředicím zařízením, který je vhodný pro správné kondicionování odebraného vzorku. Jako detekční zařízení se používá např. snímač difúzního nabíjení DCS (Diffusion Charger Sensor). Konfigurace DCS je znázorněna

na **Obr. 19**. Vzorkovací plyn je rozdělen na dva proudy. Hlavní část je určena pro měření částic. Druhá část obsahuje čističku s aktivním uhlím a HEPA filtr pro získání čistého vzduchu bez částic. Tento vzduch je ionizován nabíjecí korunou a smíchán se vzorkem. Poté se promísí tyto dvě části a nadbytečné ionty se odstraní iontovým odlučovačem. Nabité částice jsou nakonec shromažďovány ve Faradayově kleci a detekovány jako elektrický proud. Účinnost detekce DCS je téměř úměrná velikosti částic. Koncentrace počtu částic se potom vypočte jednoduchou konverzí. Konstanta pro konverzi signálu DCS na PN se typicky získává experimentálně ze srovnání se standardním laboratorním systémem pro měření počtu částic. [54],[56],[57]



Obr. 19 Schéma snímače difuzního nabíjení DCS [54]

9 Praktická část

Praktická část je věnována měření spotřeby paliva za pomoci laboratorní váhy a stanovení spotřeby na základě výpočtu dle toku CO₂. Dále je zde uvedeno měření počtu pevných částic a jejich celková koncentrace během zvoleného jízdního cyklu. Jako cyklus byl zvolen NEDC. Tyto postupy byly použity pro tři vybraná paliva, a to motorovou naftu, hydrogenovaný rostlinný olej a směsné palivo D50H30B20. Následně jsou jednotlivá data paliv porovnána a vyhodnocena.

9.1 Přístrojové vybavení

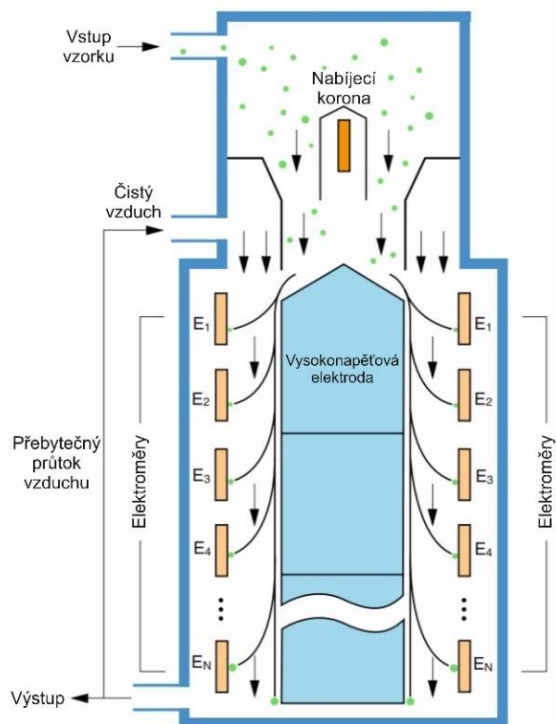
V této kapitole je uveden seznam a bližší specifikace přístrojů, které byly při měření použity. Všechna měřicí zařízení byla poskytnuta v laboratořích ČZU katedrou KVPD.

9.1.1 Velikostní klasifikátor pevných částic Engine Exhaust Particle Sizer Model 3090 (EEPS)

Velikostní klasifikátor částic EEPS odebírá vzorek výfukových plynů, jak je znázorněno na **Obr. 21**. Částice jsou kladně nabitý na předvídatelnou úroveň pomocí nabíjecí korony. Nabité částice poté vstupují do měřicí oblasti, kde se mísí s proudem čistého vzduchu bez částic. Oblast měření je tvořena prostorem mezi dvěma soustřednými válci. Vnější válec je tvořen soustavou snímacích elektrodových kroužků, které jsou navzájem elektricky izolovány. Tyto kroužky jsou připojeny k velmi citlivému zesilovači elektrického proudu, nazývanému také jako elektroměr. Vnitřní válec je připojen ke kladnému přívodu vysokého napětí a tvoří tak vysokonapěťovou elektrodu. Tím vznikne mezi oběma válci elektrické pole. Vysokonapěťová elektroda odpuzuje kladně nabitý částice směrem ven na elektrodové kroužky na základě jejich elektrické mobility. Částice s vyšší elektrickou mobilitou jsou zachyceny v horní části zařízení, zatímco částice s nižší elektrickou mobilitou proniknou níže. Částice zachycené na snímacím elektrodovém kroužku zde generují proud, který je zesílen elektroměry. Dále je informace digitalizována a čtena mikrokontrolerem. Data jsou zpracovávána v reálném čase a je možno získat až 10 velikostních rozdělení částic za sekundu. Specifikace přístroje jsou uvedeny v tabulce **Tab.11**. [60]



Obr. 20 Engine Exhaust Particle Sizer Spektrometr Model 3090 [60]



Obr. 21 Schéma měřicí části EEPS 3090 [60]

Specifikace

Rozsah velikosti částic	5,6-560 nm
Elektrometrické kanály	22
Nabíjecí režim	Unipolární difuzní nabíjení
Časové rozlišení	10 velikostních rozlišení / s
Průtok vzorku	10 l/min
Vstupní teplota vzorku	10-52 °C
Provozní teplota	0-40 °C
Ředění	Rotační termoředička

Tab. 11 Specifikace EEPS 3090 [60]

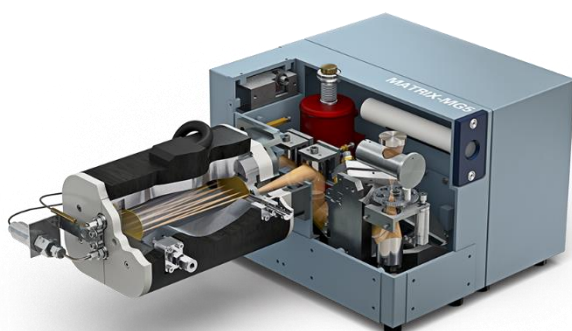
9.1.2 Plynový analyzátor FTIR MATRIX MG-5

Tento plynový analyzátor pracuje na základě absorpce infračerveného záření při průchodu odebraného vzorku výfukových plynů. FTIR (Fourier Transform Infrared) MATRIX MG-5 je vybaven pětimetrovým víceodrazným plynovým článkem a stanovuje přesně kvantifikace plynových sloučenin z velmi nízkých koncentrací na úrovni ppb (parts per billion). V následující tabulce **Tab. 12** jsou uvedeny bližší specifikace přístroje. Na obrázku **Obr. 23** je fotografie instalovaného FTIR analyzátoru při měření. [61]

Specifikace

Délka optické dráhy v plynovém článku	5 m
Maximální teplota plynového článku	191 °C
Spektrální rozsah	750-4800 cm^{-1}
Detektor	MCT chlazený kapalným dusíkem
Spektrální rozlišení	lepší než 0,5 cm^{-1}
Fotometrická přesnost	lepší než 0,1 %

Tab. 12 Specifikace FTIR MATRIX MG-5 [61]



Obr. 22 MATRIX MG-5 [61]



Obr. 23 Instalace MATRIX MG-5 při měření

9.1.3 Válcová zkušebna

Válcová zkušebna se skládá ze dvou válců o průměru 365 mm, kde je jeden válec opatřen protiskluzovou povrchovou úpravou pro zlepšení adheze. Z jedné strany je k válcům připojena sada setrvačnicků, která simuluje setrvačnou hmotnost měřeného vozidla. Tato sada je tvořena pěti setrvačníky, které lze pomocí ovládní připojit či odpojit. Z opačné strany je k jednomu válci připojen stejnosměrný elektrický motor o výkonu 56 kW, simulující odpor vzduchu. K druhému válci je připojena vířivý dynamometr o výkonu 125 kW k statickému měření výkonu. Další parametry válcové zkušebny jsou zobrazeny v **Tab. 13**.

Specifikace

Stejnoseměrný motorgenerátor	Maximální brzdňý výkon	56 kW
	Maximální brzdňý moment	305 Nm
	Maximální otáčky	3000 min ⁻¹
Vířivý dynamometr	Maximální brzdňý výkon	125 kW
	Maximální brzdňý moment	478 Nm
	Maximální otáčky	8000 min ⁻¹
Tenzometr	Jmenovité zatížení	2 kN
	Přesnost	0,5 % jmenovitého zatížení
	Opakovatelnost	0,05 %
Sada setrvačnicků	Základní simulovaná váha	680 kg
	Přídavné setrvačnický	900 kg, 450 kg, 225 kg, 120 kg, 112,5 kg

Tab. 13 Specifikace zkušebního válcového dynamometru [58]

Součástí válcové zkušebny je též ventilátor FILCAR AL-1500/C, který byl při měření použit k vytvoření proudu vzduchu (viz **Obr. 24**), sloužícímu ke chlazení chladiče vozu a částečně k odvodu tepla z výfukového systému pod vozidlem.



Obr. 24 Ventilátor FILCAR AL-1500/C a jeho instalace při měření (vpravo) [59]

Specifikace

Maximální výkon sání	12 000 m ³ /h
Napájení	230/400 V - 3 f. (50 Hz)
Příkon	11 kW (15 HP)
Otáčky motoru	2 800 ot./min
Hlučnost	89 dB
Příruba sání a výfuku	Ø 380 mm
Hmotnost	203 kg

Tab. 14 Specifikace ventilátoru [59]

9.1.4 Laboratorní váha VIBRA AJ-6200CE

Vysoce přesná laboratorní váha využívající snímací člen VIBRA MMTS, který pracuje na principu vibračního článku. Je vysoce odolný proti elektromagnetickému a elektrostatickému rušení a změnám teploty. Součástí váhy je také sériové datové rozhraní RS232 pro spojení s počítačem. Data z laboratorní váhy slouží pro účely měření jako ukazatel hmotnostního úbytku paliva. V tabulce **Tab. 15** jsou uvedeny bližší specifikace použité laboratorní váhy. Na obrázku **Obr. 25** je znázorněna instalace váhy během měření. [62]



Obr. 25 Laboratorní váha VIBRA AJ-6200CE a její instalace při měření (vpravo) [62]

Specifikace

Váživost	6200 g
Rozlišení	0,01 g
Opakovatelnost	0,01 g
Linearita	$\pm 0,02$ g
Doba stabilizace	3 s
Rozměry měřicí desky	180×160 mm
Port pro připojení k PC	RS232/C
Rozsah teplot prostředí	10-30 °C
Kalibrace	externí

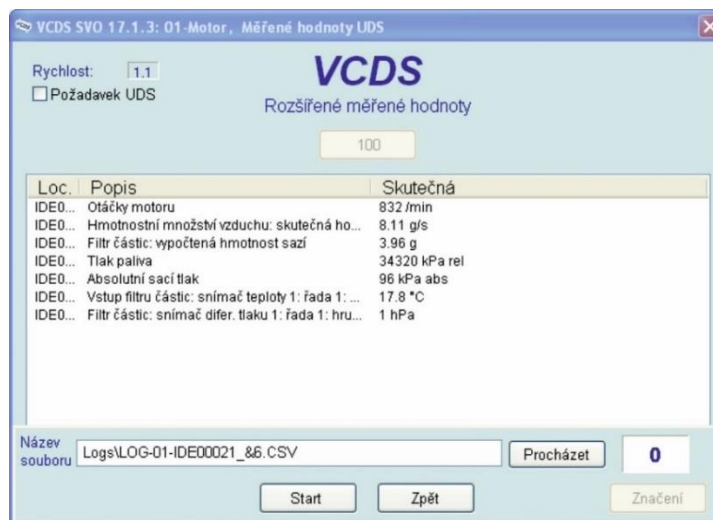
Tab. 15 Specifikace laboratorní váhy [62]

9.2 Softwarové vybavení

Následující kapitola shrnuje programy, které byly při měření použity pro zaznamenávání dat, či pro zobrazování důležitých parametrů pro měření (zobrazování průběhu NEDC v reálném čase).

9.2.1 VAG-COM VCDS Standard

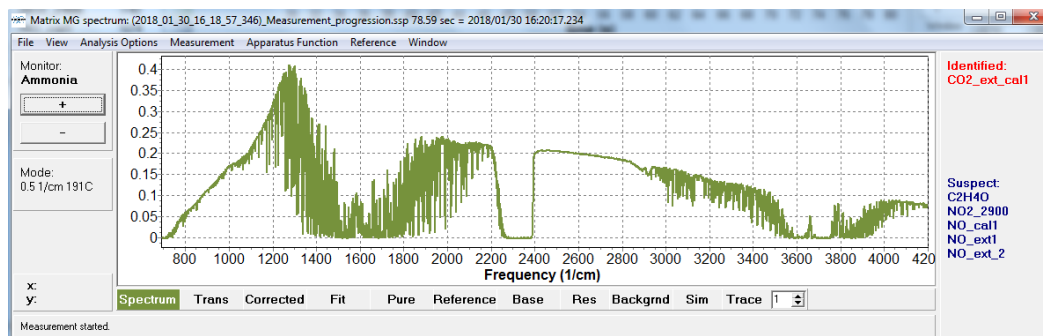
Diagnostický program VAG-COM VCDS Standard zahrnuje všechny funkce používané v diagnostice vozů koncernu VW. Jsou jimi např. čtení a smazání závad, čtení měřených hodnot, testy akčních členů, kódování, přizpůsobení a podobně. Umožňuje též logování - ukládání měřených hodnot do počítače. Pomocí tohoto softwaru byla pro naše měření zaznamenávána data o otáčkách motoru, hmotnostního množství vzduchu, rychlost, tlak paliva a absolutní sací tlak.



Obr. 26 Okno softwaru VCDS Standard

9.2.2 OPUS GA

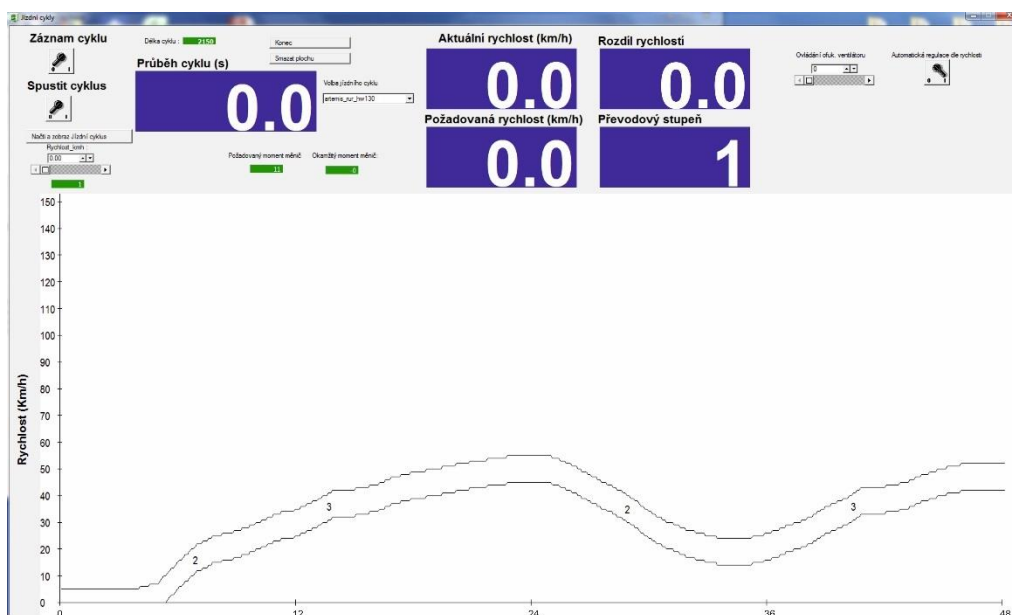
Identifikace a kvantifikace sloučenin plynů je plně automatizována komplexním softwarovým balíčkem OPUS GA (Gas Analysis). Používá nelineární algoritmy a kvantitativní referenční spektra s vysokým rozlišením, které umožňují kvantifikaci více než 400 sloučenin bez nutnosti kalibrace plynu. V případě měření na ŠKODA Roomster 1,4 TDI byly zaznamenávány koncentrace oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého. Na obrázku Obr. 27 je programové prostředí OPUS GA, zaznamenávající data v reálném čase.



Obr. 27 Softwarové prostředí OPUS GA

9.2.3 ControlWeb

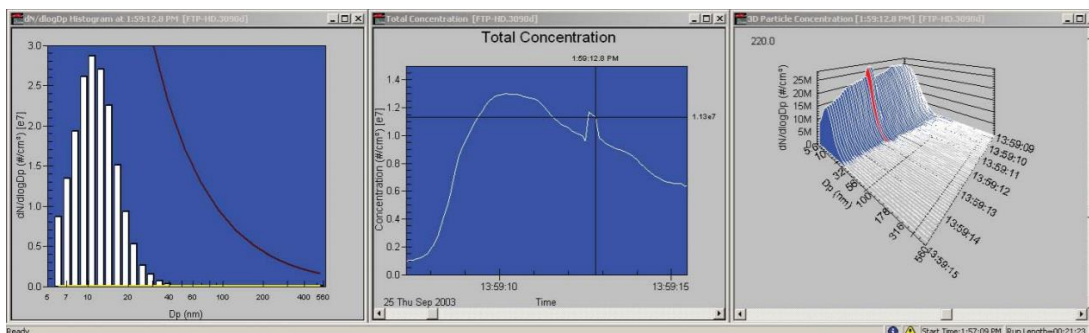
V programovacím prostředí ControlWeb je vytvořena aplikace zaměstnanci KVPD, která zaznamenává a zobrazuje průběh vybraného jízdního cyklu v reálném čase a jeho rychlostní meze. Dále zobrazuje body řazení rychlostních stupňů, nastavení válcové zkušebny, nastavení ventilátoru pro chlazení vozu či zaznamenává data z laboratorní váhy. Na obrázku Obr. 28 je prostředí vytvořené aplikace v ControlWeb a znázorněn začátek jízdního cyklu.



Obr. 28 Zobrazení průběhu cyklu v aplikaci Jízdní cykly v prostředí ControlWeb

9.2.4 EEPS Software

Software EEPS je rozhraním pro sběr a analýzu dat z přístroje EEPS. Je možné v něm zobrazit měřené hodnoty v reálném čase, tabulkové sumarizace dat, histogram dat, celkovou koncentraci pevných částic či 3D graf rozdělení velikostí částic. Dále také zpracovává data o jednotlivých velikostních škálách pevných částic. Tento program byl použit pro sběr dat koncentrací pevných částic během jízdních cyklů NEDC.



Obr. 29 Softwarové prostředí EEPS Software

9.3 Zkušební vozidlo

Testované vozidlo bylo ŠKODA Roomster 1,4 TDI přeplňované turbodmychadlem. Jeho přesnější specifikace jsou uvedeny v tabulce **Tab. 16**.

MOTOR	
Druh paliva	nafta
Příprava směsi	vznětový motor s přímým vstřikem
Přeplňování	turbodmychadlo s variabilní geometrií lopatek
Poháněná náprava	přední
Druh motoru	řadový
Maximální výkon	59 kW při 4000 ot./min
Maximální točivý moment	195 Nm při 2200 ot./min
Zdvihový objem	1422 ccm
Počet válců	3
Počet ventilů	6

FYZICKÉ PARAMETRY	
Rok výroby	2006
Emisní norma	EURO 4
Stav tachometru	102 000 km
Pohotovostní hmotnost	1240 kg
Celková hmotnost	1755 kg
Maximální rychlost	165 km/h
Zrychlení 0-100 km·h ⁻¹	14,7 s
Spotřeba paliva l/100 km (město, mimo město, kombinovaná)	6,3/4,4/5,1

Tab. 16 Specifikace zkušebního vozu ŠKODA Roomster 1,4 TDI [58]



Obr. 30 Instalace vozu ŠKODA Roomster 1,4 TDI na válcové zkušebně ČZU

9.4 Zkoušená paliva

V rámci měření byla použita jako paliva motorová nafta, hydrogenovaný rostlinný olej (HVO - hydrogenated vegetable oil) a směsné palivo (50 % motorové nafty, 30 % HVO a 20 % butanolu). V tabulce **Tab.17** jsou zobrazeny bližší specifikace jednotlivých paliv.

Veličina		Nafta	HVO	D50H30B20
Hustota při 15 °C	[kg·m ⁻³]	838,83	779,98	810,23
Kinematická viskozita při 40 °C	[mm ² ·s ⁻¹]	2,64	2,82	2,35
Bod vzplanutí	[°C]	68	97	35
Bod tuhnutí	[°C]	-5	-28	-18
Ztráta filtrovatelnosti	[°C]	-17	-30	-30
Cetanové číslo	[-]	51,8	>70,0	54,1
Cetanový index	[-]	50,9	75,2	53,2
Hmotnostní podíl uhlíku	[%]	85,9	84,8	81,2
Hmotnostní podíl vodíku	[%]	13	14	13,5
Hmotnostní podíl kyslíku	[%]	0	0	4,4

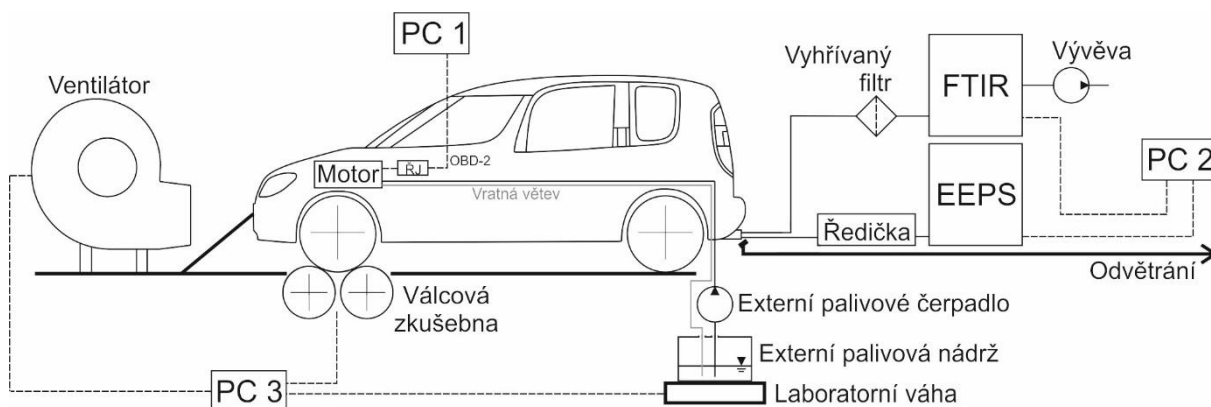
Tab. 17 Specifikace měřených paliv [58],[63]

9.5 Metodika měření

Vozidlo bylo umístěno na válcovou zkušebnu a zajištěno popruhy pro jeho lokální bezpečnostní fixaci. Před ním byl postaven ventilátor, sloužící k vytvoření proudu vzduchu, který ochlazuje chladič motoru a částečně odvádí teplo z výfukového systému pod vozem. Dále bylo k vozidlu připojeno externí palivové čerpadlo s externí palivovou nádrží, která byla umístěna na laboratorní váze. Toto řešení bylo zvoleno kvůli zaznamenávání hmotnostního úbytku paliva v reálném čase. Ventilátor, válcová zkušebna a laboratorní váha byly spojeny s počítačem PC3, přes který se řídil výkon ventilátoru, nastavení válcové zkušebny a byla zaznamenávána data z laboratorní váhy. Vozidlo bylo připojeno pomocí standardizovaného diagnostického rozhraní OBD-2 k počítači PC1 a zaznamenávala se měřená data z jednotlivých snímačů vozu (otáčky motoru, hmotnostní množství nasávaného vzduchu, tlak paliva, absolutní sací tlak) během jízdního cyklu. Do výfuku byly zasunuty sondy přístrojů EEPS a FTIR. Zařízení EEPS a FTIR byly připojeny k PC2, kde se zaznamenávala měřená koncentrace sledovaných složek.

Půl hodiny před zahájením měření byl zapnut infračervený spektrometr FTIR z důvodu jeho kondicionování na jeho provozní teplotu.

Těsně před zahájením měření byl zapnut ventilátor, zapnuta a nastavena válcová zkušebna pro simulaci odporu vzduchu, zapnuta a zkalibrována laboratorní váha, zapnuto externí palivové čerpadlo, naplněn FTIR kapalným dusíkem pro jeho chlazení, zapnuta jeho vývěva, zapnut systém EEPS a odvětrání výfukových plynů. Dále bylo spuštěno všechno potřebné, výše zmiňované, softwarové vybavení pro zaznamenávání měřených dat. Po spuštění veškeré přístrojové techniky bylo započato samotné měření a jízda ve vozidle dle zvoleného NEDC jízdního cyklu. Na **Obr. 31** je znázorněno schéma zapojení měřicí techniky na válcové zkušebně ČZU.



Obr. 31 Schéma měřicího stanoviště

První jízdní cyklus byl měřen na čistou naftu, druhý na HVO a třetí na směs D50H30B20. Mezi jednotlivými cykly, kdy se měnila paliva, byly prováděny vyplachovací jízdní cykly. Tímto způsobem došlo k pročištění palivové soustavy od zbytků předtím použitého paliva, aby se zabránilo znehodnocení výsledků vlivem promíšení paliv.

9.5.1 Zpracování dat a postup výpočtu produkce sledovaných složek výfukových plynů

Jelikož program pro zaznamenávání hodnot OPUS GA přístroje FTIR nezaznamenává data přesně po jedné sekundě je zapotřebí převzorkování dat na jednu sekundu pomocí lineární interpolace v programu MO Excel. Poté se data ze softwaru VCDS Standard (otáčky motoru, množství protékajícího vzduchu, rychlost), OPUS GA (koncentrace CO₂) a EEPS (koncentrace pevných částic ve vzorku výfukových plynů) synchronizovala přesně na jednu sekundu podle rychlosti vozidla. Následně se vybral úsek dat odpovídající délce jízdního cyklu NEDC a zpracovala se v několika krocích, jak je uvedeno dále.

Pro demonstraci přesnosti stanovení toku výfukových plynů byl proveden kontrolní výpočet spotřeby paliva za pomoci koncentrací CO₂ a údajů z VCDS Standard (hmotnostního toku vzduchu) při použití hydrogenovaného rostlinného oleje (HVO) jako paliva. Pro stanovení celkové spotřeby paliva během jízdního cyklu NEDC byl použit následující postup:

1. *Molární tok nasávaného vzduchu:*

$$\dot{n}_{air} = \frac{MAF}{M_m} [g \cdot mol^{-1}] \quad (9.5.1.1)$$

kde *MAF* je hmotnost nasávaného vzduchu (Mass Air Flow) zaznamenaná pomocí programu VCDS Standard ze snímače množství protékajícího vzduchu (g·s⁻¹) a *M_m* je molární hmotnost vzduchu, tj. 28,96 g·mol⁻¹. V tomto případě je zanedbána vzdušná vlhkost.

2. *Molární tok výfukových plynů:*

$$\dot{n}_{exh} = \dot{n}_{air} \cdot \beta [g \cdot mol^{-1}] \quad (9.5.1.2)$$

kde *β* je součinitel molární expanze, který byl zvolen 1,03 a je bezrozměrný.

3. *Molární tok oxidu uhličitého:*

$$\dot{n}_{CO_2} = \dot{n}_{exh} \cdot C_{CO_2} [g \cdot mol^{-1}] \quad (9.5.1.3)$$

kde hodnoty *C_{CO₂}* jsou procentuální koncentrace naměřené přístrojem FTIR a zaznamenané programem OPUS GA.

4. *Hmotnostní tok paliva:*

$$\dot{m}_f = \dot{n}_{CO_2} \cdot \frac{M_C}{m_{Cp}} [g] \quad (9.5.1.4)$$

kde *M_C* je molární hmotnost uhlíku (tj. 12,0107) a *m_{Cp}* je hmotnostní podíl uhlíku v palivu, tj. 0,863.

5. *Celková spotřeba paliva:*

$$m_f = \int_0^t \dot{m}_f \cdot dt [g] \quad (9.5.1.5)$$

Stanovení celkové spotřeby je stanoveno určitým integrálem hmotnostního toku oxidu uhličitého od začátku cyklu (tedy 0) do jeho konce *t* podle času (*t*), a to s uvažováním hmotnostního podílu uhlíku v palivech dle tabulky **Tab. 17**. Zaznamenané odchylky spotřeby paliva dle váhy a stanovené výpočtem z emisních parametrů a toku nasávaného vzduchu jsou dány souhrnem dílčích chyb jednotlivých vstupních hodnot, a to hmotnostního průtoku vzduchu do motoru, stanovení koncentrace CO₂, proměnností součinitele molární dilatace *β*

a nezahrnutím ostatních uhlíkatých složek (CO, CH₄, PM) do výpočtu. Metan a nespálené uhlovodíky nebyly totiž měřeny a nebyla měřena hmotnost emitovaných pevných částic. Odhadovaná chyba od skutečné hodnoty spotřeby na jeden cyklus NEDC je odhadována na desetiny procent.

Pro stanovení celkového počtu pevných částic během jízdního cyklu NEDC pro všechna paliva byl použit následující postup:

1. *Stanovení okamžitého toku pevných částic:*

$$PN = \frac{MAF}{M_m} \cdot \beta \cdot V_m \cdot DR \cdot C_{pn} \quad [PN \cdot s^{-1}] \quad (9.5.1.6)$$

kde V_m je molární objem vzduchu, který je 22,40 dm³·mol⁻¹. Dále DR je ředící poměr, který byl nastaven na hodnotu 1:200 a C_{pn} je hodnota aktuálního počtu částic ve stanoveném objemu vzorku, naměřená přístrojem EEPS a zaznamenaná EEPS softwarem.

2. *Stanovení celkového počtu pevných částic na jízdní cyklus NEDC:*

$$Total\ PN = \sum_{i=0}^t PN \quad [PN \cdot cyklus^{-1}] \quad (9.5.1.7)$$

Stanovení celkového počtu pevných částic na jeden jízdní cyklus NEDC, od začátku cyklu (tedy $i=0$) do jeho konce t , je sumou jednotlivých toků pevných částic PN zaznamenaných po jedné sekundě.

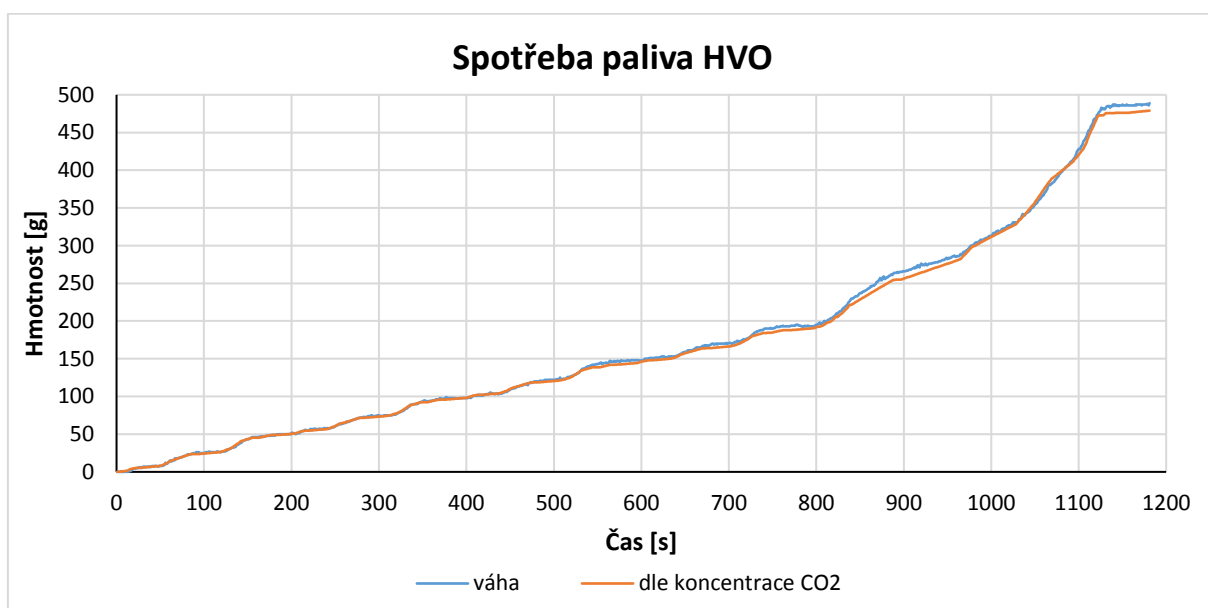
3. *Stanovení celkového počtu částic na 1 km*

$$Total\ PN_{1km} = \frac{Total\ PN}{s} \quad [PN \cdot km^{-1}] \quad (9.5.1.8)$$

kde s je ujetá vzdálenost během cyklu NEDC.

9.6 Výsledky a diskuze

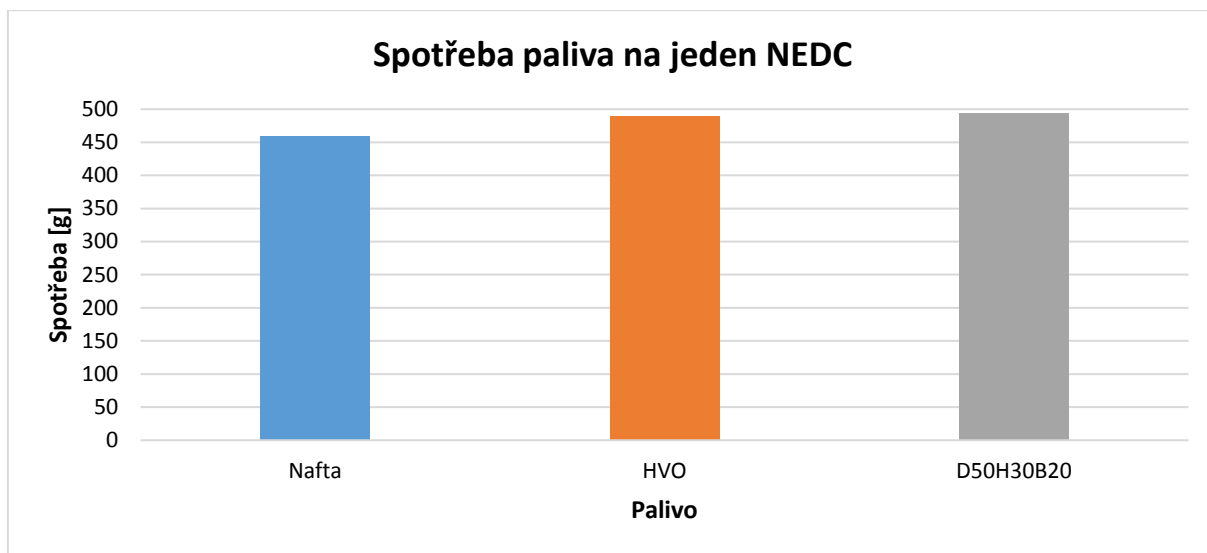
Jelikož je ve výpočtu pro stanovení okamžitého toku částic používán tok výfukových plynů, nikoliv pouze koncentrace částic, je zde uvedena kontrola přesnosti hmotnosti nasávaného vzduchu. Věrohodnost takto získaných údajů byla posouzena porovnáním spotřeby paliva stanovené z toku výfukových plynů a koncentrace CO₂ a porovnána se spotřebou dle váhy. Průběhy spotřeby paliva pomocí obou zmíněných metod jsou znázorněny na grafu **Graf 8** pro HVO. Průběhy pro ostatní paliva nejsou zobrazeny, jelikož bylo dosaženo obdobné shody.



Graf 8 Spotřeba paliva HVO během NEDC stanovená váhou a výpočtem

Toto kontrolní měření proběhlo pro jedno zvolené palivo, a to pro hydrogenovaný rostlinný olej (HVO). Tímto měřením jsme ověřili přesnost snímače množství nasávaného vzduchu, který je důležitý pro výpočet koncentrací pevných částic (viz rovnice 9.5.1.6). Průběhy obou křivek jsou velmi podobné a téměř se zakrývají. Nepřesnost ve výsledku obou hodnot je způsobena zanedbáním vzdušné vlhkosti, koncentrace oxidu uhelnatého, metanu a pevných částic ve výpočtech. Další nepřesnost může vzniknout použitou instalací váhy, která nebyla odstíněna od okolního prostředí a to např. od přenosu vibrací z podložky na váhu. Výsledkem je tedy stanovená spotřeba váhou, tj. 489 g HVO, a na základě výpočtu 484 g HVO. Rozdíl na jeden NEDC o přesné délce 11117 m je tedy 5 g a procentuální rozdíl činí 1,1 %.

Dalším sledovaným parametrem byla spotřeba paliva během NEDC. Graf **Graf 9** znázorňuje spotřeby jednotlivých použitých paliv, tj. motorové nafty, hydrogenovaného rostlinného oleje HVO a směsného paliva D50H30B20. Dále je uvedena souhrnná tabulka **Tab. 18**, uvádějící spotřebu paliva, ujetou vzdálenost během NEDC a přepočítanou spotřebu podle hustoty paliva na 100 km v litrech.



Graf 9 Spotřeba paliva na jeden NEDC

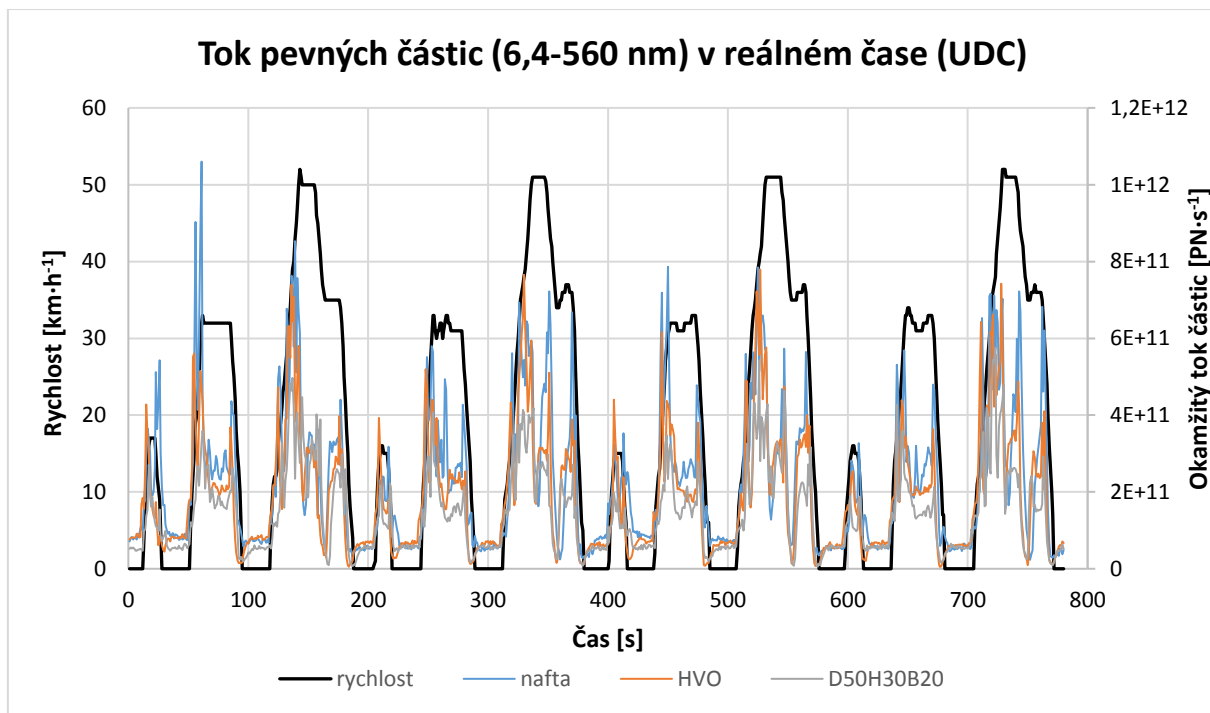
Palivo	Spotřeba na NEDC [g]	Vzdálenost [m]	Spotřeba na 100 km [l]
Nafta	459	11074	4,94
HVO	489	11117	5,64
D50H30B20	494	11140	5,47

Tab. 18 Souhrn spotřeby paliva a ujeté vzdálenosti během NEDC

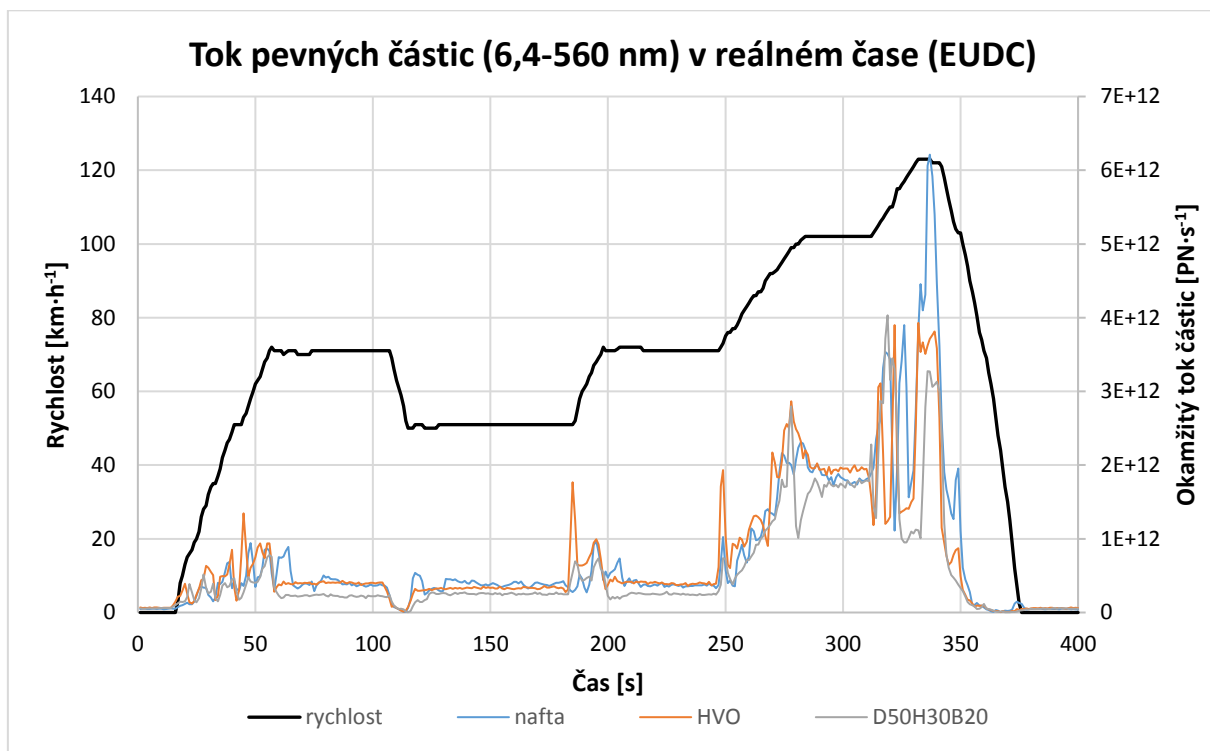
Aby byla částečně eliminována chyba v hmotnostní spotřebě paliva na NEDC, způsobená rozdílnou ujetou vzdáleností během cyklu, byla spotřeba přepočítána na objemovou spotřebu na 100 kilometrů. Rozdílnost dat HVO a D50H30B20 mezi hmotností spotřebou a objemovou spotřebou na sto kilometrů závisí na podstatně nižší hustotě HVO ($779,98 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) oproti směsnému palivu ($810,23 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Nejnižší spotřeba byla naměřena při použití motorové nafty ($4,94 \text{ l}\cdot 100 \text{ km}^{-1}$). Naopak HVO zaznamenalo nejvyšší spotřebu na 100 kilometrů, a to $5,64 \text{ l}\cdot 100 \text{ km}^{-1}$. Směsné palivo D50H30B20 má v pořadí druhou nejnižší spotřebu ze tří měřených paliv. Je to zapříčiněno vyšším podílem (50 %) motorové nafty ve směsi a nižším podílem HVO.

Následující grafy (**Graf 10, 11**) zobrazují průběh okamžitého toku celého měřeného velikostního spektra pevných částic ve výfukových plynech. Jsou zde vidět zřetelnější špičky během UDC pro motorovou naftu, a to především při akceleracích a deceleracích než u ostatních paliv.



Graf 10 Zobrazení toku pevných částic v reálném čase – UDC



Graf 11 Zobrazení toku pevných částic v reálném čase – EUDC

Zobrazené průběhy toků pevných částic obsahují velikostní spektrum, které přístroj EEPS nabízí, tedy od 6,4 do 560 nm. Výrazné navýšení koncentrace částic jsou u UDC zaznamenány při akceleraci a deceleraci. U EUDC jsou nárůsty koncentrací především u akcelerací na vyšší rychlosti. Naopak u volnoběhů jsou koncentrace nejnižší, a to především u směsného paliva.

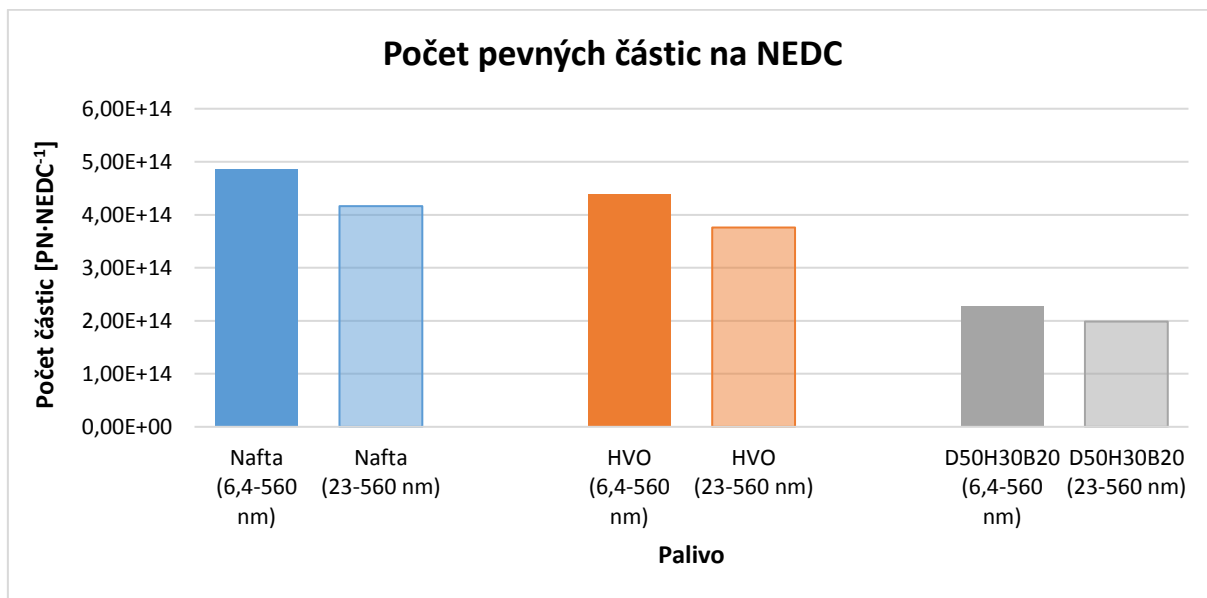
Při použití hydrogenovaného rostlinného oleje klesne produkce částic v celém rozsahu spektra přibližně o 10 % oproti motorové naftě. Nižší produkce pevných částic u HVO je zapříčiněna nižším průtahem vznícení, takže na vlastní doba hoření paliva je delší. Dalšími vlivy mohou být i rozdílnost molekulární struktury či absence těžce odpařitelných složek oproti motorové naftě. Výrazný pokles oproti naftě ale zaznamenalo použití směsného paliva D50H30B20, a to o 53 % (viz **Tab. 19**). Takový rozdíl je zapříčiněn jednak nižší kinematickou viskozitou směsi ($2,35 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), což má za následek lepší rozprášení paliva a promíchání se vzduchem. Druhý, dominantnější, vliv na snížení počtu pevných částic u D50H30B20 má složka butanolu. Tento podíl butanolu v palivu zapříčiňuje dokonalejší spalování. Dokonalejší spalování směsi je dáno vyšším obsahem kyslíku v butanolu. Hmotnostně je podíl kyslíku ve směsi paliva 10,9 %, kdežto ostatní dvě paliva ho neobsahují.

Palivo	Počet částic (6,4-560 nm) na NEDC [$\text{PN} \cdot \text{NEDC}^{-1}$]	Počet částic na 1 km [$\text{PN} \cdot \text{km}^{-1}$]	Relativní produkce PN vzhledem k naftě [%]
Nafta (6,4-560 nm)	$4,86 \cdot 10^{14}$	$4,39 \cdot 10^{14}$	100,00
Nafta (23-560 nm)	$4,16 \cdot 10^{14}$	$3,76 \cdot 10^{14}$	100,00
HVO (6,4-560 nm)	$4,39 \cdot 10^{14}$	$3,95 \cdot 10^{14}$	90,42
HVO (23-560 nm)	$3,76 \cdot 10^{14}$	$3,38 \cdot 10^{14}$	90,32
D50H30B20 (6,4-560 nm)	$2,28 \cdot 10^{14}$	$2,04 \cdot 10^{14}$	46,89
D50H30B20 (23-560 nm)	$1,98 \cdot 10^{14}$	$1,78 \cdot 10^{14}$	47,69

Tab. 19 Souhrnná tabulka počtu pevných částic

Tabulka **Tab. 19** shrnuje naměřená data pro jednotlivá paliva a jsou v ní rozděleny částice na základě jejich velikostí. Je uveden celkový počet naměřených částic (6,4-560 nm) a počet částic, které stanovují emisní limity, tedy 23-560 nm. Měřené vozidlo spadá do emisních limitů EURO 4. Dle této emisní normy není stanoven limit pro emisi počtu pevných částic. Použitý částicový klasifikátor nedokáže odstranit odpařitelné částice a ty jsou započítány do celkového počtu pevných částic, které současná legislativa pro měření celkové koncentrace neuvažuje. Dále graf **Graf 12** porovnává počet pevných částic dle škál od 6,4-560 nm

a od 23-560 nm. Koncentrace pevných částic od 6,4 do 23 nm u nafty a HVO tvoří přibližně 14,5 % celkové produkce pevných částic. U směsného paliva D50H30B20 je tato produkce nižší, a to o 12,7 %.



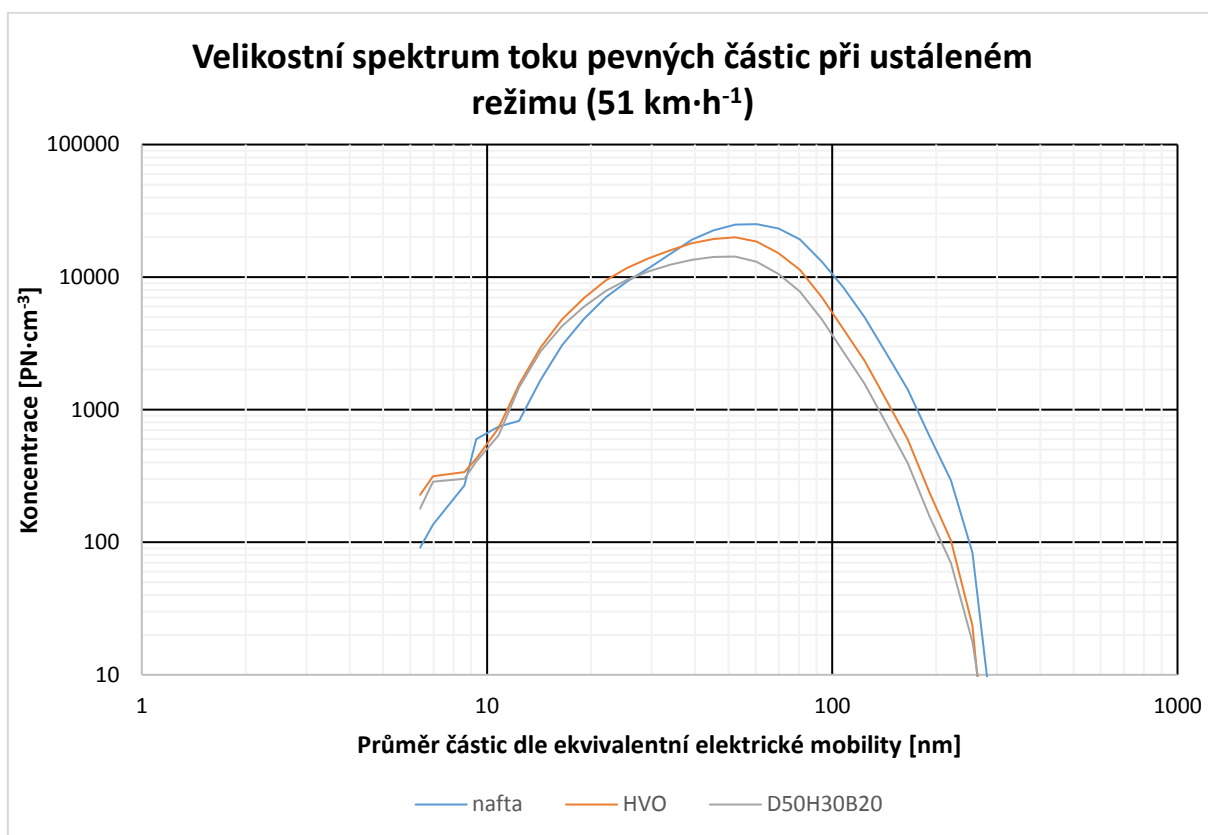
Graf 12 Souhrnný graf počtu pevných částic během NEDC

Velikostní spektrum toku pevných částic při ustáleném režimu při $51 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ je zobrazeno v grafu **Graf 13**. Obě osy jsou zobrazeny v logaritmickém měřítku. Osa x znázorňuje průměr částic dle ekvivalentní elektrické mobility, jelikož je obtížné měřit částice, které nemají kulový tvar. Její průměr je tedy definován na základě ekvivalentní kulové částice, která se chová stejně v elektrickém poli jako měřené částice. Osa y zobrazuje relativní koncentraci pevných částic ve zředěných výfukových plynech, tj. počet částic na cm^3 .

Nejvyšší koncentraci pevných částic ($25000 \text{ PN}\cdot\text{cm}^{-3}$) zaznamenala motorová nafta, a to v rozmezí od 55 do 60 nm. Druhá nejvyšší koncentrace ($20000 \text{ PN}\cdot\text{cm}^{-3}$) byla naměřena u HVO v rozmezí od 45 do 55 nm. Nejnižší koncentrace pevných částic ($15000 \text{ PN}\cdot\text{cm}^{-3}$) je u směsného paliva D50H30B20, tj. od 45 do 50 nm.

Z průběhů křivek je patrné, že při použití motorové nafty, oproti ostatním měřeným palivům, je produkce částic, větších než 40 nm, nejvyšší. Opačný efekt je u částic menších než 30 nm, kde motorová nafta jich emituje nejméně. Na základě velikostního spektra lze přisuzovat kladný vliv složky butanolu, ve směsném palivu, na celkovém snížení produkce počtu pevných částic. Pozice její křivky, která ukazuje vyšší koncentraci částic do 30nm a nižší koncentrace větších částic, prokazuje lepší prohoření paliva, než je tomu u motorové nafty a HVO. Toto

tvrzení koreluje s naměřenými hodnotami celkové produkce počtu částic ve výfukových plynech, které jsou o 53 % nižší než u motorové nafty a o 43 % nižší než u HVO.



Graf 13 Velikostní spektrum toku pevných částic při ustáleném režimu (51 km·h⁻¹)

10 Závěr

Diplomová práce se zabývala analýzou produkce pevných částic u tří vybraných paliv, a to pro motorovou naftu, hydrogenovaný rostlinný olej HVO a směsné palivo D50H30B20. Rešeršní část zahrnuje problematiku tvorby pevných částic, možnosti jejich redukce a legislativní předpisy, které stanovují maximální přípustné množství produkovaných látek. S využitím dostupné literatury je shrnut vliv částic na lidské zdraví a současné metody pro jejich měření.

Praktická část je zaměřena na vyhodnocení emisí pevných částic u tří, výše zmiňovaných, paliv. Správnost této metodiky byla ověřena porovnáním spotřeby paliva, vycházející z měření spotřeby dle váhy a na základě koncentrace CO₂ ve výfukových plynech. Úpravou současně dostupných paliv, jako je motorová nafta, například přidáním složek HVO či butanolu, může vést k nižší produkci pevných částic a tím ke zlepšení životního prostředí.

Pro měření bylo použito vozidlo Škoda Roomster 1,4 TDI, které bylo umístěno na válcovou zkušebnu, a zvolen jízdní cyklus NEDC. Spotřeba paliva byla stanovena na základě dat naměřených laboratorní váhou a pro kontrolu byla také počítána na základě toku oxidu uhličitého ve výfukových plynech, který byl měřen plynovým analyzátozem. Počet pevných částic byl stanoven na základě měřených hodnot částicovým klasifikátorem EEPS.

Měření produkce pevných částic ukázalo, že nejnižší hodnoty byly indikovány pro směsné palivo (D50H30B20). Když porovnáme produkci pevných částic mezi směsným palivem a naftou zjistíme, že při použití námi vybraného směsného paliva dojde k rasantnímu snížení produkce pevných částic, a to více než o polovinu. Tento pokles je zapříčiněn složkou butanolu, který obsahuje kyslík, tudíž lze očekávat vyšší pravděpodobnost úplné oxidace paliva. Rozdíl mezi naftou a HVO není výrazný, tj. při použití HVO klesne produkce pevných částic o jednu desetinu. Nižší produkce pevných částic u HVO je zapříčiněna nižším průtahem vznícení, takže na vlastní doba hoření paliva je delší. Dalšími vlivy mohou být i rozdílnost molekulární struktury či absence těžce odpařitelných složek oproti motorové naftě. Spotřeba paliva, vyjádřená v litrech na sto kilometrů, užitím motorové nafty byla nejnižší. Druhým nejúspěšnějším palivem bylo směsné palivo, kde se nárůst pohyboval v rámci jednotek procent. Nejvyšší spotřeba byla naměřena pro HVO. Tyto rozdíly nebyly vyvolány pouze změnou celkové účinnosti motoru, ale také zapříčiněny odlišnými vlastnostmi jednotlivých testovaných paliv. Z těchto výsledků je zřejmé, že čisté HVO nemá tak značný vliv na snížení produkce

pevných částic jako směsné palivo, oproti motorové naftě. Velmi zajímavé výsledky vykazuje směsné palivo nejen v oblasti pevných částic, ale i malému nárůstu paliva. Jeho používáním bychom mohli dosáhnout nižších koncentrací částic v ovzduší a tím zlepšení životního prostředí.

V návaznosti na tuto práci by mohla vzniknout ekonomická rozvaha nad komerčním užitím směsného paliva, jelikož spotřeba je mírně vyšší než u motorové nafty a není vybudována dostatečně velká infrastruktura na výrobu HVO. Další pokračování v experimentech může také stanovit lepší směsné palivo, tj. jiné směsné poměry paliv. Současně by bylo možné měřit plynné emise, kde některé jejich složky jsou označovány jako skleníkové plyny či zdraví nebezpečné. Takto rozšířené měření by mohlo komplexně vysvětlit ekologickou výhodnost při použití alternativních směsných paliv.

11 Seznam použité literatury

- [1] MÜHLBAUER, Wolfgang, Christian ZÖLLNER, Sebastian LEHMANN, Sebastian LORENZ a Dieter BRÜGGEMANN. *Correlations between physicochemical properties of emitted diesel particulate matter and its reactivity* [online]. [cit. 2018-02-04]. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.02.029. ISBN 10.1016/j.combustflame.2016.02.029. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010218016300062>
- [2] MOHANKUMAR, S. a P. SENTHILKUMAR. Particulate matter formation and its control methodologies for diesel engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. Elsevier, 2017 [cit. 2017-11-06]. Dostupné z: https://ac.els-cdn.com/S136403211730761X/1-s2.0-S136403211730761X-main.pdf?_tid=ec5c0c86-c2dc-11e7-a643-00000aacb361&acdnat=1509964157_8ffebd7158daecde36ce67b55e316474
- [3] HOLLEROVÁ, Jitka. *Prašnost na pracovišti* [online]. 14.11.2007 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/prasnost-na-pracovisti-1>
- [4] *Diesel Exhaust Particle Size* [online]. [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: https://www.dieselnet.com/tech/dpm_size.php
- [5] MERKISZ, Jerzy a Jacek PIELECHA. Nanoparticle Emissions From Combustion Engines. *Nanoparticle emissions from combustion engines: The Relationship between Particle Mass and Particle Number* [online]. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2015, s. 93-108 [cit. 2018-02-04]. ISBN 978-3-319-15927-0. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-15928-7_8#citeas
- [6] HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Vladimír HÖNIG a Petr MILER. Spalovací motory. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011, s. 181-198. ISBN 978-80-247-3475-0.

- [7] ŽITNÝ, Rudolf. *Numerická analýza procesů: Spalování* [online]. Ústav procesní a zpracovatelské techniky ČVUT FS, 2010 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj34LW8y5vXAhUJAxoKHUPiDuAQFgg5MAQ&url=http%3A%2F%2Fusers.fs.cvut.cz%2F~zitnyrud%2FNAP11.ppt&usg=AOvVaw145o5517b_-T7hNXrp6BUx
- [8] MAŇÁK, Tomáš. *Uhlovodíky* [online]. 29.9.2013 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/CHE/CHE_1_Uhlovod%C3%ADky_UT-PL.pdf
- [9] *Informační systém Uvádění výrobků na trh: ČSN ISO 29464 - Zařízení pro čištění vzduchu a jiných plynů - Terminologie* [online]. 2012 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: <https://www.nlnorm.cz/terminologicky-slovník/61421>
- [10] SKOPAL, František, Martin HÁJEK, Petr KUTÁLEK a Jaroslav KOCÍK. *Katedra fyzikální chemie při Fakultě chemicko-technologické v Pardubicích: Bionafta (FAME) - náhrada za fosilní naftu* [online]. [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: http://kfch.upce.cz/htmls/vedecka_cinnost_bionafta.htm
- [11] ZHU, Lei, C.S. CHEUNG, W.G. ZHANG a kol. *Effects of ethanol–biodiesel blends and diesel oxidation catalyst (DOC) on particulate and unregulated emissions* [online]. [cit. 2018-02-04]. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.06.028. ISBN 10.1016/j.fuel.2013.06.028. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236113005632>
- [12] GILL, S.S., A. TSOLAKIS, J.M. HERREROS a A.P.E. YORK. *Diesel emissions improvements through the use of biodiesel or oxygenated blending components* [online]. [cit. 2018-02-04]. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.11.047. ISBN 10.1016/j.fuel.2011.11.047. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236111007423>
- [13] *Alternativní paliva a jejich využití v dopravě: Emulzní nafta EN 656509, FAME EN 14214* [online]. In: . 2010 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: http://www.petroileum.cz/upload/auto_tec_2010_03.pdf

- [14] ŠPAČEK, Martin. *Měření parametrů vstřikování Common Rail* [online]. Brno, 2010 [cit. 2017-11-13]. Dostupné z: http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=37135;download_prace=1. Diplomová práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Jiří Čupera.
- [15] WADE, W. R., J. E. WHITE a J. J. FLOREK. *Diesel Particulate Trap Regeneration Techniques* [online]. , - [cit. 2017-12-03]. DOI: 10.4271/810118. Dostupné z: <http://papers.sae.org/810118/>
- [16] MAJEWSKI, W. Addy. *Diesel Particulate Filters* [online]. [cit. 2017-12-03]. Dostupné z: <https://www.dieselnets.com/tech/dpf.php#principle>
- [17] JANDOVÁ, Vilma, Ivo DOSTÁL, Leoš PELIKÁN, a kol. *STUDIE O VÝVOJI DOPRAVY Z HLEDISKA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ V ČESKÉ REPUBLICE ZA ROK 2015* [online]. Brno: Centrum dopravního výzkumu, v. v. i, Oblast dopravy a životního prostředí [cit. 2017-12-04]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/studie_vyvoj_dopravy/\\$FILE/000-Studie_2015-20170123.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/studie_vyvoj_dopravy/$FILE/000-Studie_2015-20170123.pdf)
- [18] MAJEWSKI, W. Addy. *Diesel Filter Systems: Classification of Systems* [online]. 2015 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: https://www.dieselnets.com/tech/dpf_sys.php
- [19] RICHARDS, Paul. *Filters Using Fuel Borne Catalysts* [online]. 2014 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: https://www.dieselnets.com/tech/dpf_fbc.php
- [20] *Catalyzed Diesel Filters* [online]. 2005 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: <http://courses.washington.edu/cive494/CatalyzedDPF.pdf>
- [21] SCHWARTZ, Jiří. *Automobily ŠKODA Fabia II*. Praha: Grada Publishing, 2008. ISBN 978-80-247-2155-2.
- [22] *CRT Filter: Principle of Operation* [online]. 2005 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: https://www.dieselnets.com/tech/dpf_crt.php

- [23] MAYER, A., Th. LUTZ, Chr. LÄMMLE a kol. *Engine Intake Throttling for Active Regeneration of Diesel Particle Filters* [online]. 2003-03-03 [cit. 2018-02-04]. DOI: 10.4271/2003-01-0381. ISBN 10.4271/2003-01-0381. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2003-01-0381/>
- [24] MAJEWSKI, W. Addy. *Filters Regenerated by Fuel Combustion* [online]. 2009 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: https://www.dieselnet.com/tech/dpf_sys_fuel.php#ccomb
- [25] PALMA, Vincenzo, Paolo CIAMBELLI, Eugenio MELONI a Agusti SIN. *Catalytic DPF microwave assisted active regeneration*[online]. [cit. 2018-01-09]. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.09.051. ISBN 10.1016/j.fuel.2014.09.051. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001623611400920X>
- [26] *Electrically Regenerated Filters: Electric Regeneration* [online]. 2002 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: https://www.dieselnet.com/tech/dpf_electric.php
- [27] *NETT Technologies INC.: GREENTRAP™ VOLT ACTIVE DIESEL PARTICULATE FILTER (ADPF)* [online]. [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: <https://www.nettinc.com/products/diesel-particulate-filters-dpf/greentrap-volt-active-dpf>
- [28] SPOOF-TUOMI, Kirsi. *REDUCTION OF PARTICULATE MATTER EMISSIONS IN EU INLAND WATERWAY TRANSPORT*. Vaasa, Finsko, 2016. Diplomová práce. UNIVERSITY OF VAASA. Vedoucí práce Jukka Kiijärvi.
- [29] Health and Environmental Effects of Particulate Matter. *EPA United States Environmental Protection Agency* [online]. [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>

- [30] VALAVANIDIS, ATHANASIOS, KONSTANTINOS FIOTAKIS a THOMAS VLACHOGIANNI. *Airborne Particulate Matter and Human Health: Toxicological Assessment and Importance of Size and Composition of Particles for Oxidative Damage and Carcinogenic Mechanisms* [online]. [cit. 2018-02-04]. DOI: 10.1080/10590500802494538. ISBN 10.1080/10590500802494538. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10590500802494538>
- [31] SACKS, Jason D., Lindsay Wichers STANEK, Thomas J. LUBEN, a kol. *Particulate Matter–Induced Health Effects* [online]. [cit. 2018-02-04]. DOI: 10.1289/ehp.1002255. ISBN 10.1289/ehp.1002255. Dostupné z: <http://ehp.niehs.nih.gov/1002255>
- [32] ANDERSON, Jonathan O., Josef G. THUNDIYIL a Andrew STOLBACH. *Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health* [online]. [cit. 2018-02-04]. DOI: 10.1007/s13181-011-0203-1. ISBN 10.1007/s13181-011-0203-1. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s13181-011-0203-1>
- [33] XING, Yu-Fei, Yue-Hua XU, Min-Hua SHI a Yi-Xin LIAN. *The impact of PM2.5 on the human respiratory system* [online]. China, Dec 10, 2015 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://jtd.amegroups.com/article/view/6353/6196>
- [34] HOLOUBEK, Ivan. *Chemie životního prostředí III: Další polutanty v atmosféře* [online]. In: . Masarykova univerzita, Brno [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://www.recetox.muni.cz/res/file/prednasky/holoubek/chzp-iii/chzp-iii-atmosfera-08-dalsi-polutanty.pdf>
- [35] EL-SHAFEI, Dalia Abdallah. *Pulmonary defense mechanisms* [online]. In: . Zagazig University, Egypt, 2015 [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/dalia-elshafei/pulmonary-defense-mechanisms>
- [36] Informace o kvalitě ovzduší v ČR. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/actual_hour_data_CZ.html

- [37] SAJDL, Jan. Emisní norma EURO. *Autolexicon.net* [online]. 2017 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>
- [38] Emission Standards: EU: Cars and Light Trucks. *DieselNet* [online]. 08.2017 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php#stds>
- [39] ŘEZÁČ, Zeno. *Analýza vybraných parametrů ovlivňující množství emisí spalovacího motoru*. BRNO, 2015. Diplomová práce. MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. RNDr. Stanislav Bartoň, CSc.
- [40] EU: LIGHT-DUTY: EMISSIONS: EMISSIONS STANDARDS. *TransportPolicy.net* - [online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://www.transportpolicy.net/standard/eu-light-duty-emissions/>
- [41] EURO EMISSIONS STANDARDS: Limits to improve air quality and health. *The AA* [online]. 11.12.2017 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.theaa.com/driving-advice/fuels-environment/euro-emissions-standards>
- [42] *Nariadení: NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2017/1151*. In: . Evropská komise, 2017. Dostupné také z: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A02017R115_1-20170727
- [43] LANG, Patrick. *DIESE AUTOS ERFÜLLEN DIE STRENGE EURO 6D-TEMP-NORM: Diese Modelle fürchten kein Fahrverbot* [online]. 1.2.2018 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.auto-motor-und-sport.de/news/euro-6-diesel-modelle-fahrverbot-umwelt-11824984.html>
- [44] *T.A.D PRAHA: ZÁSADNÍ NOVINKY V ROCE 2018* [online]. 2017 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://eshop.tadpraha.cz/clanek/zasadni-novinky-v-roce-2018-co-nas-ceka-13/>

- [45] *Předpis Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů (EHK OSN) č. 83: Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska emisí znečišťujících látek podle požadavků na motorové palivo [2015/1038]* [online]. 2015 [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2015.172.01.0001.01.CES#document1
- [46] ROMAIN, Nicolas. The different driving cycles. *Car Engineer* [online]. 1.5.2013 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles/>
- [47] SEILER, Jakob. Exhaust emissions. *VDA Verband der Automobilindustrie* [online]. 2016 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://www.vda.de/en/topics/environment-and-climate/exhaust-emissions/emissions-measurement.html>
- [48] Emission Test Cycles: ECE 15 + EUDC / NEDC. *DieselNet* [online]. 2013 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: https://www.dieselnets.com/standards/cycles/ece_eudc.php
- [49] Real Driving Emissions: Implementation and Its Impact on Current Technology. *Frost & Sullivan* [online]. 9.1.2017 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://ww2.frost.com/frost-perspectives/real-driving-emissions-implementation-and-its-impact-current-technology/>
- [50] Emission Test Cycles: Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC). *DieselNet* [online]. 08/2017 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://www.dieselnets.com/standards/cycles/wltp.php>
- [51] Emission Test Cycles: Common Artemis Driving Cycles (CADC). *DieselNet* [online]. 2011 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <https://www.dieselnets.com/standards/cycles/artemis.php>
- [52] More information on homologation tests, deviations in practice and references: CADC cycle. *Ecoscore* [online]. 2014 [cit. 2018-02-20]. Dostupné z: <http://ecoscore.be/en/info/ecoscore/homologation>

- [53] BURTSCHER, H. Physical characterization of particulate emissions from diesel engines: a review. *Journal of Aerosol Science* [online]. 2005, 36(7), 896-932 [cit. 2018-02-26]. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2004.12.001. ISSN 00218502. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021850204004124>
- [54] OTSUKI, Yoshinori, Hiroshi NAKAMURA, Masataka ARAI a Min XU. The methodologies and instruments of vehicle particulate emission measurement for current and future legislative regulations. *Measurement Science and Technology* [online]. 2015, 26(9), 092002-[cit. 2018-02-26]. DOI:10.1088/0957-0233/26/9/092002. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/09570233/26/i=9/a=092002?key=crossref.08d60c9e65ad48bb6c545a71f0a16be5>
- [55] GEISER, Marianne, Barbara ROTHEN-RUTISHAUSER, Nadine KAPP, et al. Ultrafine Particles Cross Cellular Membranes by Nonphagocytic Mechanisms in Lungs and in Cultured Cells. *Environmental Health Perspectives* [online]. 2005, 113(11), 1555-1560 [cit. 2018-02-27]. DOI: 10.1289/ehp.8006. ISSN 0091-6765. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1310918/>
- [56] LUJÁN, José M., Vicente BERMÚDEZ, Vicente DOLZ a Javier MONSALVE-SERRANO. An assessment of the real-world driving gaseous emissions from a Euro 6 light-duty diesel vehicle using a portable emissions measurement system (PEMS). *Atmospheric Environment* [online]. 2018, 174, 112-121 [cit. 2018-02-28]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.056. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231017308178>
- [57] GALLUS, Jens, Ulf KIRCHNER, Rainer VOGT, a kol. On-road particle number measurements using a portable emission measurement system (PEMS). *Atmospheric Environment* [online]. 2016, 124, 37-45 [cit. 2018-02-28]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.11.012. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231015305203>

- [58] KOTEK Martin, Jakub MAŘÍK, Petr JINDRA, David MARČEV a Vladimír HÖNIG. Vliv vybraných biopaliv na výkonové parametry motoru ŠKODA Roomster 1.4 TDI. *XLVIII. INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE OF CZECH AND SLOVAK UNIVERSITIES' DEPARTMENTS AND INSTITUTIONS DEALING WITH THE RESEARCH OF COMBUSTION ENGINES*. Praha, 2017, 3-10.
- [59] *Odsávání výfukových plynů: Odsávací ventilátor FILCAR AL - 1500/C* [online]. 2014 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://www.technology-garage.cz/odsavaci-ventilatory-filcar-rada-al-plechove-lopatkove/odsavaci-ventilator-filcar-al-1500c-ventilator-11-kw-15-hp-pro-carvantruckbus>
- [60] *Particle Instruments: Model 3090 Engine Exhaust Particle Sizer™ Spectrometer* [online]. USA, 2005 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: http://www.tsi.com/uploadedFiles/Product_Information/Literature/Spec_Sheets/3090_2980244A.pdf
- [61] *Automated High-Performance Gas Analyzers MATRIX-MG Series: MATRIX-MG5* [online]. Germany, 2017 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/OpticalSpectroscopy/Gas_Analysis/MATRIX-MG/Brochures/MATRIX_MG_Brochure_EN.pdf
- [62] *Laboratorní váhy: Laboratorní váha VIBRA AJ-6200CE* [online]. [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: <http://www.gapa-vahy.cz/produkty-laboratorni-vaha-vibra-aj-6200ce-detail-8003>
- [63] AATOLA, Hannu, Martti LARMI a Teemu SARJOVAARA. *Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) as a Renewable Diesel Fuel: Trade-off between NOx, Particulate Emission, and Fuel Consumption of a Heavy Duty Engine: HVO – HYDROTREATED VEGETABLE OIL*[online]. Helsinki University of Technology, 2008, , 1-9 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: http://www.etipbioenergy.eu/images/SAE_Study_Hydrotreated_Vegetable_Oil_HVO_as_a_Renewable_Diesel_Fuel.pdf

12 Seznam obrázků

Obr. 1	Schéma pevné částice [2].....	3
Obr. 2	Schematické zobrazení tvorby částic [2].....	5
Obr. 3	Uspořádání metod vedoucím k redukování pevných částic [2].....	8
Obr. 4	Filtrace výfukových plynů voštinovým keramickým filtrem [2].....	11
Obr. 5	Průběh chemických reakcí při pasivní regeneraci uvnitř CDPF [21].....	14
Obr. 6	Konfigurace a princip činnosti CRT filtru [22].....	14
Obr. 7	CRT filtr [22].....	15
Obr. 8	Aktivní regenerace filtru pevných částic použitím hořáku [2].....	16
Obr. 9	Schéma elektricky regenerovaného filtru pomocí spirálového ohříváče [27].....	17
Obr. 10	Znázornění možnosti průchodu částic dýchacím ústrojím člověka [35].....	19
Obr. 11	Mikrofotografie polystyrenových nanočástic v plicním parenchymu [55].....	20
Obr. 12	Mikrofotografie xy a xz projekce fluorescenčních polystyrenových částic (zelená barva) zachycených červenými krvinkami [55].....	22
Obr. 13	Příklad rozdělení vybraných jízdnic cyklů [49].....	32
Obr. 14	Nejběžnější konfigurace systému ředění plného toku výfukových plynů (CVS) [54].....	43
Obr. 15	Schéma kondenzačního čítače pevných částic CPC [54].....	47
Obr. 16	Schéma detekování pevných částic CPC (PNC) [54].....	47
Obr. 17	Konfigurace rozmístění systému PEMS ve vozidle [57].....	48
Obr. 18	Schéma systému PEMS PM [54].....	49
Obr. 19	Schéma snímače difuzního nabíjení DCS [54].....	50
Obr. 20	Engine Exhaust Particle Sizer Spektrometr Model 3090 [60].....	52
Obr. 21	Schéma měřicí části EEPS 3090 [60].....	52
Obr. 22	MATRIX MG-5 [61].....	53
Obr. 23	Instalace MATRIX MG-5 při měření.....	53
Obr. 24	Ventilátor FILCAR AL-1500/C a jeho instalace při měření (vpravo) [59].....	54
Obr. 25	Laboratorní váha VIBRA AJ-6200CE a její instalace při měření (vpravo) [62]	55
Obr. 26	Okno softwaru VCDS Standard.....	56
Obr. 27	Softwarové prostředí OPUS GA.....	56
Obr. 28	Zobrazení průběhu cyklu v aplikaci Jízdní cykly v prostředí ControlWeb.....	57
Obr. 29	Softwarové prostředí EEPS Software.....	57
Obr. 30	Instalace vozu ŠKODA Roomster 1,4 TDI na válcové zkušební čZU.....	58
Obr. 31	Schéma měřicího stanoviště.....	60

13 Seznam tabulek

Tab. 1	Legenda indexu kvality ovzduší z tabulky ČHMÚ [36].....	23
Tab. 2	Emisní limity EURO pro zážehové a vznětové motory osobních vozidel M1, M2 [38].....	28
Tab. 3	Emisní limity EURO lehkých užitkových vozidel N1, N2 [38].....	29
Tab. 4	Rozdělení jízdnicích cyklů WLTC [50].....	34
Tab. 5	Charakteristiky cyklů CADC [51].....	37
Tab. 6	Produkce pevných částic v tunách jednotlivými druhy dopravy v ČR [17].....	38
Tab. 7	Spotřeba pohonných hmot v tisíci tunách v dopravě ČR [17].....	39
Tab. 8	Porovnání spotřeby paliv PHM a celkové produkce pevných částic PM dopravou v ČR [17].....	40
Tab. 9	Podmínky a přípustné odchylky ředění výfukových plynů [54].....	42
Tab. 10	Metody určování počtu pevných částic PN [54].....	45
Tab. 11	Specifikace EEPS 3090 [60].....	52
Tab. 12	Specifikace FTIR MATRIX MG-5 [61].....	53
Tab. 13	Specifikace zkušebního válcového dynamometru [58].....	54
Tab. 14	Specifikace ventilátoru [59]	54
Tab. 15	Specifikace laboratorní váhy [62]	55
Tab. 16	Specifikace zkušebního vozu ŠKODA Roomster 1,4 TDI [58]	58
Tab. 17	Specifikace měřených paliv [58],[63].....	59
Tab. 18	Souhrn spotřeby paliva a ujeté vzdálenosti během NEDC cyklu.....	64
Tab. 19	Souhrnná tabulka počtu pevných částic.....	66

14 Seznam grafů

Graf 1	Rozdělení velikosti částic motorové nafty [4].....	4
Graf 2	Vývoj NO _x a PM v emisních standardech EURO pro vznětové motory.....	26
Graf 3	Průběh New European Driving Cycle [46].....	33
Graf 4	Průběh cyklu WLTC třídy 3b (vlevo) a 2 (vpravo) [50].....	35
Graf 5	Průběh cyklu WLTC třídy 1 [50].....	35
Graf 6	Průběh cyklů CADC [52].....	37
Graf 7	Porovnání spotřeby paliv PHM a celkové produkce pevných částic PM dopravou v ČR.....	40
Graf 8	Spotřeba paliva HVO během NEDC stanovená váhou a výpočtem.....	63
Graf 9	Spotřeba paliva na jeden NEDC cyklus.....	64
Graf 10	Zobrazení toku pevných částic v reálném čase – UDC cyklus.....	65
Graf 11	Zobrazení toku pevných částic v reálném čase – EUDC cyklus.....	65
Graf 12	Souhrnný graf počtu pevných částic během NEDC cyklu.....	67
Graf 13	Velikostní spektrum toku pevných částic při ustáleném režimu (51 km·h ⁻¹).....	68