



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## FILTRY PEVNÝCH ČÁSTIC PRO ZÁŽEHOVÉ MOTORY

DPF FOR SI ENGINES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lenka Pohludková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

BRNO 2020

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Studentka: **Lenka Pohludková**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Radim Dundálek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Filtry pevných částic pro zážehové motory

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Osvojení základních pojmů zadané problematiky. Vysvětlení principu funkce filtru pevných částic pro benzínové motory. Zamyšlení nad perspektivou budoucího vývoje přeplňovaných benzínových s ohledem na snižování škodlivin ve výfukových plynech.

#### **Cíle bakalářské práce:**

Uvedení přehledu filtrů pevných částic pro benzínové motory, popis jejich konstrukčního řešení. Výhody a nevýhody s ohledem na plnění emisních limitů. Specifické součásti – keramika, katalytická vrstva. Příklady řešení systému u konkrétních pohonných jednotek.

#### **Seznam doporučené literatury:**

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.



Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

.....  
prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

.....  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Práce se zabývá filtry pevných částic pro zážehové motory. Jsou zde rozebrány emise spalovacích motorů a jejich vliv na znečištění ovzduší a lidské zdraví, zejména vliv pevných částic. Dále je popsáno z čeho jsou tyto filtry vyrobeny, kde jsou v automobilu umístěny a vysvětlen princip jejich funkce i regenerace.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Pevné částice, emise, GPF, filtr pevných částic, regenerace filtru, katalytická vrstva, kordierit, keramika

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with gasoline particulate filters. Emissions of internal combustion engines and their impact on air pollution and human health, especially the impact of particulate matter, are discussed. It also describes what these filters are made of, where they are located in the car, and explains the principle of their function and regeneration.

## KEYWORDS

Particulate matters, emissions, GPF, gasoline particulate filter, filter regeneration, catalytic layer, cordierite, ceramic

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

POHLUDKOVÁ, Lenka. Filtry pevných částic pro zážehové motory. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124256>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 46 s. Vedoucí práce Radim Dundálek.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Radima Dundálka a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Paskově dne 26. června 2020 .....

Lenka Pohludková

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D. za veškeré rady, připomínky a nápady. Dále děkuji svým rodičům a příteli za velkou podporu v průběhu celého studia.



# OBSAH

Úvod .....	10
<b>1 Pevné částice .....</b>	<b>11</b>
1.1 Co jsou pevné částice .....	11
1.2 Vliv velikosti částic.....	11
1.3 Znečištění ovzduší v České republice a Evropě.....	12
<b>2 Regulace emisí .....</b>	<b>15</b>
2.1 Emisní normy v Evropě .....	15
2.2 Emisní normy ve světě .....	16
2.3 Způsoby měření emisí .....	17
2.4 Ekologická daň.....	18
2.5 Složení výfukových plynů .....	18
2.5.1 Oxid uhelnatý (CO) .....	19
2.5.2 Oxidy dusíku (NO <sub>x</sub> ).....	19
2.5.3 Uhlovodíky (HC) .....	19
2.5.4 Oxid siřičitý (SO <sub>2</sub> ) .....	20
2.6 Trojčinný katalyzátor .....	20
2.7 Lambda sonda .....	20
2.8 Motory s přímým vstřikem benzínu .....	20
<b>3 Názvy .....</b>	<b>24</b>
<b>4 Princip a složení filtru .....</b>	<b>25</b>
4.1 Keramická vložka .....	25
4.2 Kovová vložka .....	26
4.3 Katalytická vrstva .....	27
4.4 Senzor diferenčního tlaku.....	28
<b>5 Konstrukční řešení a umístění .....</b>	<b>29</b>
5.1 Uspořádání underfloor - samostatně .....	30
5.2 Uspořádání close-coupled - dohromady.....	31
5.3 Umístění ve vertikální části výfukového potrubí .....	31
5.4 Umístění v horizontální části výfukového potrubí .....	32
<b>6 Údržba filtru (Regenerace) .....</b>	<b>34</b>
6.1 Pasivní regenerace .....	34
6.2 Nucená regenerace.....	34
6.3 Čištění pomocí stroje.....	34
<b>7 Výhody a nevýhody s ohledem na plnění emisních limitů .....</b>	<b>37</b>
<b>8 Porovnání s DPF.....</b>	<b>39</b>
<b>Závěr.....</b>	<b>40</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>46</b>

## ÚVOD

V současné době jsou velkým problémem emise. S rostoucí automobilovou dopravou se zhoršuje kvalita ovzduší. Součástí emisí jsou pevné částice, které jsou velmi nebezpečné pro člověka. Dříve se tento problém týkal především automobilů se vznětovými motory, ale s nástupem technologie přímého vstřiku benzínu, se tento problém začal dotýkat i automobilů se zážehovými motory. Po zavedení normy Euro 6c, která na rozdíl od předešlých norem, limituje množství pevných částic ve spalinách i pro zážehové motory, byly automobilky donuceny přidat filtr pevných částic i do automobilů s těmito motory. Tato práce popisuje vliv pevných částic na lidské zdraví, funkci a způsoby regenerace filtru pevných částic a ukazuje jejich umístění a typy konstrukčních řešení.

# 1 PEVNÉ ČÁSTICE

## 1.1 CO JSOU PEVNÉ ČÁSTICE

Pevné částice (PM – particulate matter) jsou mikroskopické částice pevného skupenství unášené vzduchem skládající se z mnoha druhů látek – například z uhlíku v podobě sazí, kovů, síranů a anorganických solí. Pevné částice vznikají buď samovolně v přírodě nebo lidskou činností. Přírodními procesy vzniku pevných částic mohou být například lesní požár, výbuch sopky, anebo větrná bouře. Mnohem více zastoupená je však oblast lidské činnosti. Největší producent pevných částic je ve skupině lidských činností zemědělství, dále pak do této skupiny patří také automobily bez filtru pevných částic, cigaretový kouř, ale také svíčky či spreje na vlasy. [1]

## 1.2 VLIV VELIKOSTI ČÁSTIC

Jejich negativní vliv může být jednak na počasí, protože ovlivňují teplotní bilanci Země a podílí se na vzniku vodních srážek, ale také na lidské zdraví – při vysoké koncentraci mohou způsobovat nemoci související s dýchacím ústrojím, jako je astma, plicní choroby, nebo až rakovinu plic. Ještě nenarozené děti mohou být rovněž ohroženy na zdraví. A nejvíce ohroženy na zdraví jsou děti od narození do 18 let, protože právě ony tráví většinu času venku, kde mají obvykle zvýšenou fyzickou aktivitu a vdechují hodně vzduchu. Také i bez fyzické aktivity v poměru k jejich hmotnosti vdechují mnohem více vzduchu než dospělí a zároveň se jejich dýchací cesty stále vyvíjí, a proto jsou mnohem více náchylnější k onemocněním. [1, 2]

Pevné prachové částice dělíme podle velikosti.

- PM10 – částice menší než 10  $\mu\text{m}$ ,
- PM2,5 – částice menší než 2,5  $\mu\text{m}$ ,
- PM1 – částice menší než 1  $\mu\text{m}$  (méně často),
- PM0,1 – částice menší než 100 nm (výjimečně).

Bylo zjištěno, že pro lidské tělo jsou více nebezpečné částice menší než 10  $\mu\text{m}$ . Je to především z toho důvodu, že větší částice jsou zachyceny na chloupkách v nose, avšak menší částice pronikají do dolních dýchacích cest, kde nám mohou způsobit již zmíněné problémy. Opět v závislosti na velikosti se tato částice může dostat až do průdušek, kde se usadí, plicních sklípků, anebo krve. PM2,5 a PM1 jsou pro živé organismy podstatně škodlivější také proto, že při stejné objemové koncentraci je menších částic mnohem větší počet a pokud jsou částice menší než buňka lidského těla, mohou způsobit patologické změny těchto buněk. [2]

Mnohem větším problémem, než samotné prachové částice jsou jedovaté a karcinogenní látky, které k prachové částici přilnou a díky tomu se mohou dostat až do lidského těla – například olovo (Pb), arzen (As) a kadmium (Cd). [3]

Podle statistik až 13% úmrtí v České republice může mít souvislost s pevnými částicemi. A průměrná délka života lidí žijících ve městech je tak snížena o 1 rok.

Při dlouhodobě vysokých koncentracích pevných částic je výskyt rakoviny až o 40% vyšší. [4]

*Tabulka 1 Přehled limitů doporučených Světovou zdravotnickou organizací, známou spíše pod zkratkou WHO (World Health Organization). Hodnoty koncentrací těchto částic jsou udávány v jednotkách objemové hustoty  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . [5]*

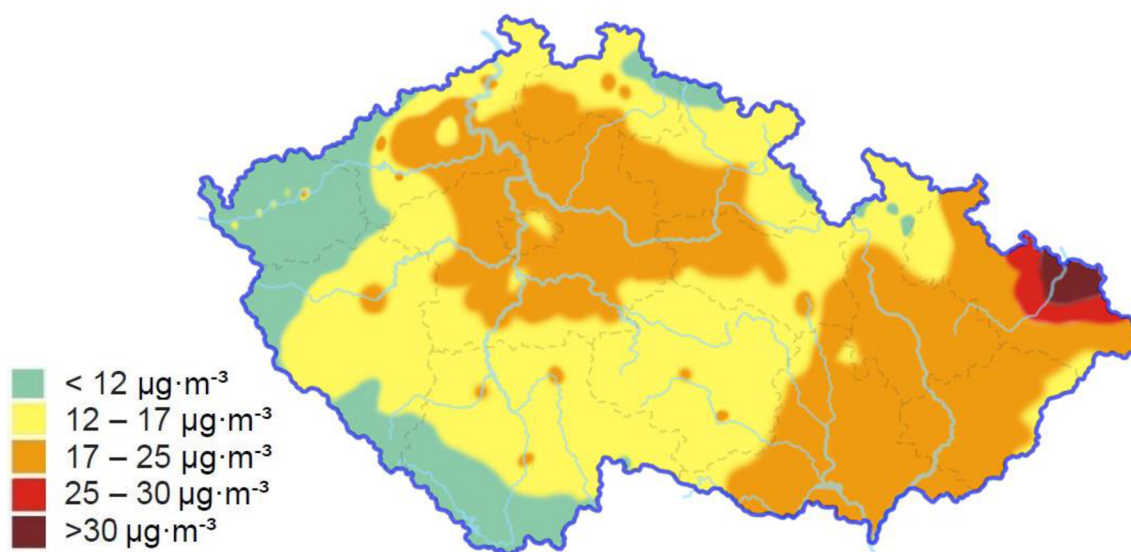
Částice	Roční průměr	Imisní limit v ČR	24h průměr	Imisní limit v ČR
PM <sub>2,5</sub>	10	25	25	nestanoven
PM <sub>10</sub>	20	40	50	50

V tabulce 1 vidíme přehled limitů doporučených Světovou zdravotnickou organizací. I přesto, že doporučená hodnota ročního průměru PM<sub>10</sub> je  $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , v ČR je tento limit až  $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a i přesto byl v Moravskoslezském kraji v roce 2017 překročen. A když se zaměříme na denní neboli 24hodinový průměr, pak tato hodnota dosahuje  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a smí být překročena maximálně 35x ročně. Přibližně v třetině měřících stanic byl tento limit překročen vícekrát než dovolené maximum. Zmíněné hodnoty dokazují, že v České republice tvoří největší problém koncentrace právě těchto částic. [5]

Pevné částice jsou škodlivé již při malém množství a nebyla nalezena koncentrace, pod kterou by už částice škodlivé nebyly. Proto jsou tyto hodnoty uváděny jako limitní (maximální možné) a tedy i jejich dodržování má neblahý vliv na lidské zdraví a přírodu, proto je snaha nejen o dodržování těchto limitů, ale především o snižování samotných hodnot. [1]

### 1.3 ZNEČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ V ČESKÉ REPUBLICE A EVROPĚ

V České republice jsou největším problémem znečištění ovzduší právě již zmíněné pevné částice. Jejich původ nejsou pouze dopravní prostředky, ale také spalovací prostředky v energetice a vytápění domácností. Pro Českou republiku platí limit znečištění ovzduší pevnými částicemi během 24 hodin  $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Tento limit může být překročen maximálně 35x ročně, přičemž např. Sstavrsko nevyhovuje tomuto limitu až více než 100 dní v roce, což je zdůrazněno i na obrázku 1, kde je možné vidět, že Ostravsko a Karvinsko mají průměrnou roční koncentraci pevných částic PM<sub>2,5</sub> pro rok 2011 vyšší než  $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . [5]



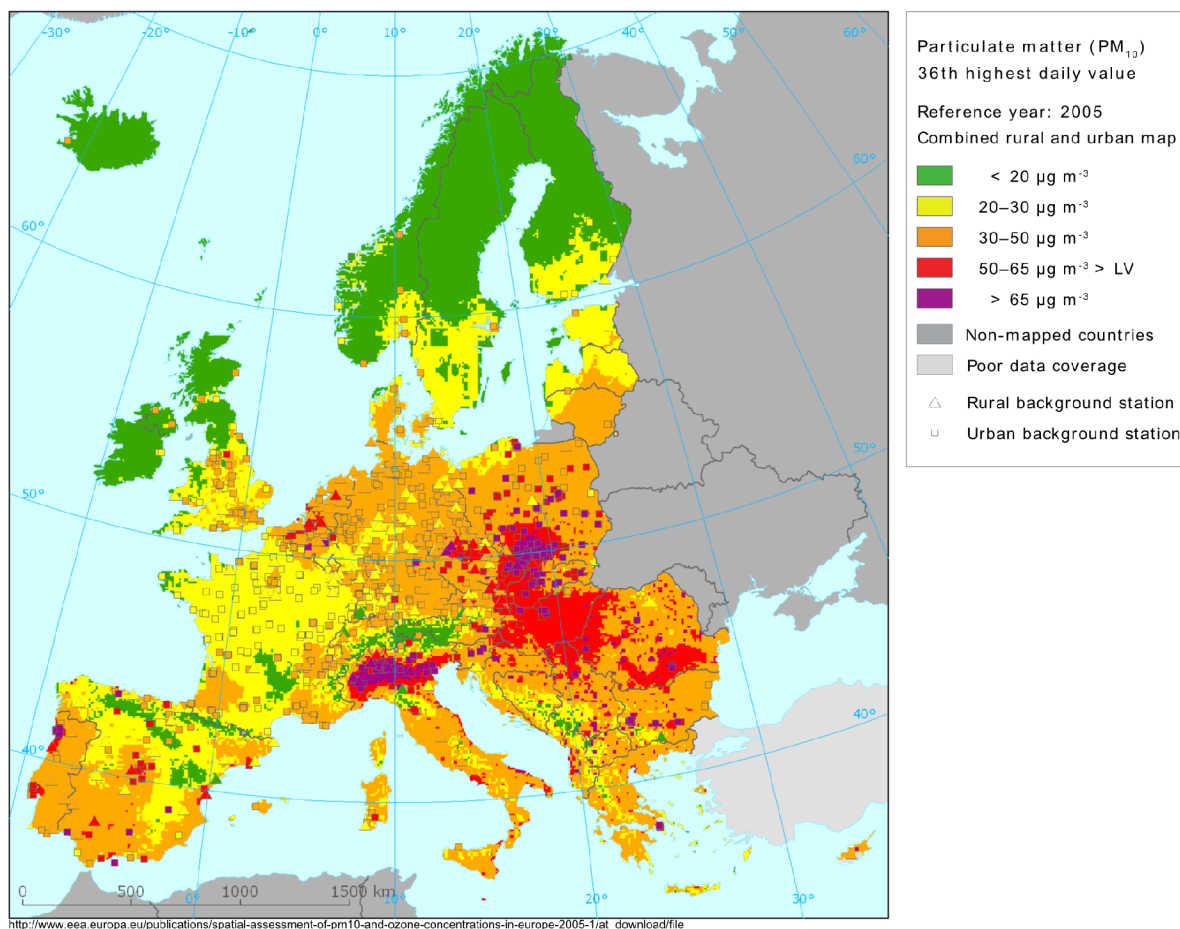
Obrázek 1 Průměrná roční koncentrace pevných částic PM<sub>2,5</sub> v České republice v roce 2011 [1]

Jak už bylo uvedeno v tabulce, roční limity doporučené WHO jsou  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro PM<sub>2,5</sub> a  $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro PM<sub>10</sub>. Na obrázku ... jsou tyto doporučené hodnoty pro PM<sub>2,5</sub> znázorněny zeleně ( $<12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). [5]

Jak můžeme vidět na obrázku 2, v Evropském měřítku mají nejlepší hodnoty severské země (Norsko, Švédsko, Finsko, Island) a naopak nejhorší sever Itálie, východ České republiky a jihozápad Polska.

Znečištění je dále způsobeno jevem zvaným sekundární prašnost. Jedná se opět o pevné částice, ale které byly už usazeny a nyní jsou opět rozptýleny do vzduchu. Tento jev je hlavním zdrojem prachu ve městech. Sekundární prašnost je způsobena především automobilní dopravou, stavební činností, těžbou surovin. Tato skutečnost vysvětluje také vysoké hodnoty znečištění na Ostravsku – v minulosti byla tato oblast velmi významná důlní činností. V současnosti jsou hlavním zdrojem znečištění průmyslové podniky, lokální topeniště, doprava a emise.

Pevné částice jsou také zodpovědné za výskyt smogu, neboť v ovzduší hrají roli kondenzačního jádra a vodní páry tak díky prašnému městskému prostředí mnohem jednodušeji kondenzují. Pevné částice jsou velmi lehké, a tak trvá dny až týdny, než se usadí. Z toho důvodu mohou být větrem uneseny až několik kilometrů a tím pádem způsobovat problémy i na místech velmi vzdálených od jejich zdroje. Když se tyto škodlivé látky dostanou do styku s živými organismy, půdou, vodou apod., kde se také mohou ukládat, nazýváme je imise. [2, 6]



Obrázek 2 Znečištění ovzduší pevnými částicemi v Evropě v roce 2005 [1]

WHO dále uvádí, že znečištění ovzduší je příčinou 29 % úmrtí a onemocnění rakovinou plic, 17 % úmrtí a onemocnění akutní infekcí dýchacího traktu, 24 % úmrtí na následky infarktu, 25 % úmrtí a onemocnění ischemickou chorobou srdeční a 43 % úmrtí a onemocnění chronickou obstrukční plicní nemocí. [7]

## 2 REGULACE EMISÍ

### 2.1 EMISNÍ NORMY V EVROPĚ

Z již zmíněných důvodů byly zavedeny opatření limitující vznik pevných částic. Prvním zavedeným předpisem v Evropě byl předpis EHK z roku 1971. V roce 1993 začala platit nová emisní norma s označením EURO 1, která stanovuje limitní hodnoty oxidu uhelnatého, oxidu dusíku, uhlovodíků a pevných částic na jeden kilometr ve výfukových plynech vozidel nově uváděných na trh a zároveň nařizuje používání katalyzátoru. Norma Euro 3 z roku 2001 zpřísňuje způsob měření emisí – nedovoluje před samotným měřením dříve zavedený běh motoru na prázdko. Euro 4 zavádí tzv. faktor zhoršení, který bere v potaz také změny produkce emisí z důvodu opotřebování motoru. A faktor náběhu, který zase zohledňuje rozdílné hodnoty nového auta a auta s již zaběhnutým motorem, jelikož nové auto má vyšší spotřebu paliva a tím pádem i vyšší produkci oxidu uhličitého. Významný přelom nastal v roce 2018 s normou Euro 6c, která nově zavedla limitní hodnoty pevných částic i pro zážehové motory. [8, 9]

Normy EURO rozlišují, zda se jedná o zážehový či vznětový motor, jaký druh automobilu jde a jakou má hmotnost. Pro každý tento typ jsou zavedeny rozdílné hodnoty. V tabulce 2 je uveden přehled limitů v  $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$  jednotlivých emisních norem Euro pro benzínové motory. [8, 9]

Tabulka 2 Přehled emisních norem Euro [10, 11]

Norma	Platnost	CO	HC	NO <sub>x</sub>	HC + NO <sub>x</sub>	Pevné částice
Euro 1	1993	2,72	-	-	0,97	-
Euro 2	1997	2,2	-	-	0,5	-
Euro 3	2001	2,3	0,2	0,15	-	-
Euro 4	2006	1,0	0,1	0,08	-	-
Euro 5a	2011	1,0	0,1	0,06	-	-
Euro 5b	2013	1,0	0,1	0,06	-	-
Euro 6b	2015	1,0	0,1	0,06	-	$6 \times 10^{11*}$
Euro 6c	2018	1,0	0,1	0,06	-	$6 \times 10^{11}$
Euro 6d- Temp	2019	1,0	0,1	0,06	-	$6 \times 10^{11}$
Euro 6d	2021	1,0	0,1	0,06	-	$6 \times 10^{11}$

\*ve skutečnosti tato norma povolovala hodnotu  $6 \times 10^{12}$  během prvních tří let od data její platnosti

Rok platnosti je uveden pro všechna nová vozidla – ve většině případů byla norma vydána již o rok dříve, ale platila pouze pro nové modely automobilů. Modelů, které byly homologovány již dříve, se tato norma týkala až o rok později, tedy v rok, který je uveden v tabulce. [11]

V důsledku těchto norem, které platí pro veškeré vozidla nově přicházející na evropský trh, byly automobilky donuceny začít vyrábět automobily s filtry pevných částic, aby i nadále splňovaly hodnoty. Dieselových automobilů se tento filtr začal týkat v roce 2004, u benzínových s přímým vstřikem až v normě EURO 6c, tedy od září 2018. V České republice není však měření emisí pouze jednorázová činnost, jako např. v USA, neboť v ČR je podmínkou kontrolovat emise automobilu každé dva roky v rámci státní technické kontroly. [12]

Problém s pevnými částicemi u zážehových motorů nastal především z toho důvodu, že automobilky se snaží vyrábět auta s malými obsahy motoru, avšak s vysokým výkonem. Tohoto docílí přeplňováním motoru nebo přímým vstřikem benzínu. Motory s přímým vstřikem jsou klíčová technologie vývoje benzínových motorů, která snižuje emise CO<sub>2</sub> a zároveň zvyšuje výkon a točivý moment. Nevýhodou této technologie je však nárůst emisí v podobně pevných částic ve srovnání s motory bez přímého vstřiku. Při přímém vstřikování benzínu dochází uvnitř válce k lokálnímu nerovnoměrnému rozložení směsi. V místech, kde je benzínu více, benzín shoří nedokonale, a to způsobí vznik pevných částic. [12, 13]

Nepříznivým vedlejším jevem tohoto druhu zvýšení výkonu je právě již zmíněný vznik pevných částic. V roce 2013 testy organizace Deutsche Umwelthilfe prokázaly, že hodnoty produkce pevných částic u benzínových přeplňovaných motorů jsou mnohonásobně vyšší než u dieselových motorů s filtry DPF. [14]

Na rok 2020 je opět plánováno zpřísnění této normy. [15]

## 2.2 EMISNÍ NORMY VE SVĚTĚ

V USA byly zavedeny emisní normy z důvodu smogových situací. Jako první stát, který zavedl emisní normu, byla Kalifornie v roce 1968. Významná norma označena jako LEV I (Low Emission Vehicle) byla uvedena v platnost v roce 1994 a později byla převzata do dalších států USA pod označením Tier 1. Tyto normy mají velmi podobné hodnoty jako evropská norma EURO. [9, 16]

V emisní normě LEV jsou pak automobily dále rozděleny do několika skupin. Některé se již běžně používají a některé jsou teprve připraveny do budoucna.

- TLEV (Transient Low Emission Vehicle): <0,078 g HC na kilometr
- LEV (Low Emission Vehicle): <0,047 g HC na kilometr
- ULEV (Ultra Low Emission Vehicle): <0,025 g HC na kilometr
- SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle): <0,0063 g HC na míli; 0,02 g NOX na kilometr
- EZEV (Equivalent Zero Emission Vehicle): téměř žádné emise
- ZEV (Zero Emission Vehicle): žádné emise [23]



I přes to, že jsou limitní hodnoty těchto norem velmi podobné, jako hodnoty norem platných v Evropě, tak tyto normy mnohdy omezují v podstatě jen výrobce. Nové normy se sice všude vztahují pouze na nově vyrobená auta, avšak v některých zemích nejsou povinné pravidelné technické kontroly s měřením emisí tak, jako například v České republice. Na silnicích mohou být tedy provozovány také automobily, které už nespĺňují žádný emisní limit a velmi značně znečišťují ovzduší. Z tohoto důvodu můžeme sice vidět snahu o zlepšení kvality ovzduší, avšak realita může být úplně jiná. [11, 17]

V asijských zemích se můžeme setkat s velice rozdílnými situacemi. Zatímco v Japonsku se snaží s emisemi bojovat již od roku 1978, kdy bylo přikázáno používání katalyzátoru a normy byly vesměs srovnatelné s těmi v Evropě a USA, v Číně jsou současné přísné emisní předpisy zavedeny jen ve velkých městech. Ve většině Číny dodnes tolerují poměrně vysoké hodnoty emisí. [11, 17]

A například v Africe se zatím snaží snížit procento síry a benzenu v palivu. [18]

## 2.3 ZPŮSOBY MĚŘENÍ EMISÍ

Dříve používaný způsob měření emisí se nazýval NEDC - New European Driving Cycle, ten ale s normou Euro 6c nahradil tzv. WLTP - Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure, který by se měl více blížit reálným výsledkům. V tabulce 3 můžeme porovnat oba dva způsoby a zaznamenat největší a nejvýznamnější rozdíly jako je délka trasy, která se více než zdvojnásobila, tím pádem i čas samotného měření narostl a dále byla navýšena maximální i průměrná rychlost. Všechny tyto změny by měly co nejlépe simulovat reálnou jízdu, a tedy i spotřebu a emise automobilu. V obou těchto případech je měření prováděno na válcovém dynamometru. [19, 20, 21]

S normou Euro 6d-temp přibyl k WLTP ještě nový druh měření emisí, který se nazývá Real Driving Emissions a je uváděn pod zkratkou RDE. Jedná se o měření emisí a spotřeby v reálném provozu, nikoliv v laboratorních podmínkách na dynamometru. I zde jsou stanoveny určité podmínky, aby testování bylo co nejvíce objektivní. Doba jízdy je 90 až 120 minut, třetinu času se jede v městském provozu, třetinu na komunikacích mimo město a poslední třetinu se jede po dálnici s maximální rychlostí 145 km/h. Na rozdíl od jiných měření, při RDE má být zapnutá klimatizace a venkovní teplota by měla být 0 °C až 30 °C. Převýšení může být maximálně 100 metrů a nadmořská výška do 700 m.n.m. Tento test se však vždy provádí spolu s WLTP. Souhrnně se někdy WLTP a RDE označují jako WLTC. V současnosti byly při měření tolerovány menší odchylky použitím tzv. násobného faktoru, který dopomáhal ke snadnějšímu splnění těchto limitů. Na konci roku 2020 by měl být tento faktor zrušen. [19, 20, 21]

Tabulka 3 Porovnání způsobů měření emisí NEDC a WLTP [23]

	NEDC	WLTP
Teplota testovací místnosti	20-30 °C	23 °C
Délka trasy	11 km	23 km
Doba trvání cyklu cca 20 min	20 min	30 min
Cyklus se skládá z	13 minut simulovaná jízda ve městě, 7 minut simulovaná jízda mimo město	Low, medium, high, extra-high
Průměrná rychlost	33 km·h <sup>-1</sup>	47 km·h <sup>-1</sup>
Podíl stání	25 %	13 %
Maximální rychlost	120 km·h <sup>-1</sup>	Přes 130 km·h <sup>-1</sup>
Doplňková výbava	nezohledněna	zohledněna

## 2.4 EKOLOGICKÁ DAŇ

Další snahou, jak snížit emise bylo roku 2009 zavedení ekologické daně při registraci vozidla. Samotná tato daň samozřejmě emise nesnižovala, ale měla lidi odradit od koupě starých automobilů, které produkují velké množství emisí. Tato daň se netýká motocyklů, vozidel nad 3,5t a oficiálních veteránů. [22]

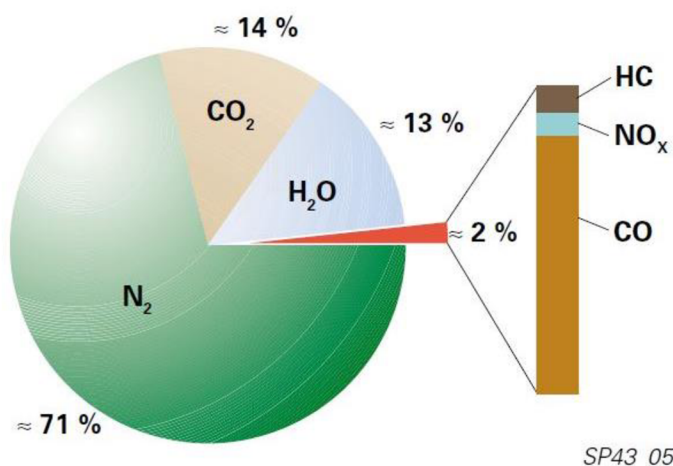
Osobní automobily jsou rozděleny do kategorií podle toho, jakou normu Euro splňují. Při koupi automobilu, který splňuje Euro 2 se platí ekologická daň ve výši 3 000 Kč, pro automobily splňující normu Euro 1 je pak tato hodnota 5 000 Kč a pokud automobil nesplňuje ani jednu z těchto norem, tak se při přepisu platí ekologická daň 10 000 Kč. [22]

Tato daň se vztahuje přímo k danému automobilu a pokud již byla jednou uhrazena, další majitel automobilu tuto daň již platit nemusí. Ekologickou daň rovněž nemusí platit lidé, kteří jsou držitelé průkazu ZTP nebo ZTP-P, nebo pokud ke změně majitele dochází z důvodu dědictví či zániku společného jmění manželů. [22]

## 2.5 SLOŽENÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Výfukové plyny se ze 71 % skládají z dusíku, 14 % oxidu uhličitého, 13 % vody a 2 % škodlivých látek. Grafické znázornění těchto složek výfukových plynů je na obrázku 3. Jelikož dusík zastupuje ve vzduchu 78 % objemu, kyslík téměř 21 %, oxid uhličitý 0,04 % a více než 70 % zemského povrchu pokrývá voda, jsou to tedy látky

běžně se vyskytující ve volné přírodě a ve výfukových plynech je nepovažujeme jako škodlivé. Sloučeniny, které ale škodí živým organismům či přírodě, jsou oxid uhelnatý, oxidy dusíku, oxid siřičitý, uhlovodíky a pevné částice. I přesto, že ve výfukových plynech tvoří jen malé procento, v celosvětovém měřítku je to obrovské množství produkce škodlivých látek. Za zmínku stojí také oxid siřičitý. Ačkoliv není uveden ve složení výfukových plynů zážehových motorů na obrázku 3, může vznikat ve stopovém množství při spalování nekvalitního benzínu a nafty. [25, 26, 57]



Obrázek 3 Složení výfukových plynů zážehových motorů;  $N_2$  – dusík;  $O_2$  – kyslík;  $H_2O$  – voda, vodní pára;  $CO_2$  – oxid uhličitý;  $CO$  – oxid uhelnatý;  $NO_x$  – oxidy dusíku;  $SO_2$  – oxid siřičitý;  $HC$  – uhlovodíky;  $PM$  – pevné částice, saze (particulate matter) [24]

### 2.5.1 OXID UHELNATÝ (CO)

Je jedovatý plyn, který vzniká při nedokonalém spalování uhlíku, který je v palivu. Tento plyn je bezbarvý, bez chuti a zápachu, proto je pro živé organismy velmi nebezpečný. V krvi se váže na červené krvinky a tím zabraňuje přenosu kyslíku z plic do ostatních částí těla. [27, 29]

### 2.5.2 OXIDY DUSÍKU ( $NO_x$ )

Souhrnné označení oxidy dusíku zahrnuje oxid dusnatý a oxid dusičitý. Oxid dusnatý je bezbarvý plyn bez zápachu a vzniká při vysokém tlaku a teplotě ve spalovací komoře. Po sloučení se vzdušným kyslíkem se vytváří ostře páchnoucí červenohnědý jedovatý plyn oxid dusičitý. Ten je pohlcován v dýchacích cestách a tím způsobuje zánět. V přírodě je jedním ze zdrojů kyselých dešťů. Roční průměr i imisní limit pro ČR je  $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , tato hodnota byla v roce 2017 v Brně a Praze na měřicích stanicích poblíž silnic. Hodinový průměr a imisní limit v ČR je  $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . [27, 29]

### 2.5.3 UHLOVODÍKY (HC)

Nespálené uhlovodíky vznikají nedokonalou oxidací. Silně dráždí sliznice a oči a mohou mít až karcinogenní účinek. Spolu s oxidy dusíku se podílí na vzniku smogu. [27]

#### 2.5.4 OXID SIŘIČITÝ (SO<sub>2</sub>)

Je to bezbarvý, avšak páchnoucí a jedovatý plyn, který je těžší než vzduch. Reaguje s kyslíkem a vodou a tím vzniká kyseliny sírová, jeden ze zdrojů kyselých dešťů. Oxid siřičitý má dále za vinu korozi a narušuje také správnou funkci katalyzátoru. V přírodě reaguje s chlorofylem a tím poškozují rostliny a zabraňuje jejich schopnosti fotosyntézy.

Limit oxidu siřičitého na 24 hodin pro ČR je 125  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a může být překročen maximálně 3x za rok. WHO doporučuje ale průměrný roční imisní limit jen 20  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . [27, 28]

### 2.6 TROJČINNÝ KATALYZÁTOR

Až doposud se u zážehových motorů kontrolovaly především již zmíněné škodlivé oxidy a uhlovodíky, nikoliv pevné částice. Bylo to z toho důvodu, že zážehový motor, který není přeplňovaný nebo s přímým vstřikem benzínu, produkuje jen zanedbatelně malé množství pevných částic. [29, 30]

Problém s oxidy a uhlovodíky řešil tzv. oxidačně redukční neboli trojčinný (třícestný) katalyzátor. Název je odvozen z počtu funkcí (činností), které zastává – oxidace CO, oxidace nespálených uhlovodíků a redukce NO<sub>x</sub>. Jedná se o objekt ve výfukovém potrubí, který má v sobě keramickou nebo ocelovou vložku s průchozími kanálky a na povrchu tenkou katalytickou vrstvou obsahující platinu a rhodium. Při dosažení požadované teploty (400–800 °C) začnou CO a nespálené uhlovodíky oxidovat pomocí platiny na CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O a zároveň se díky rhodiu redukuje oxidy dusíku na N<sub>2</sub> a O<sub>2</sub>. [29, 30]

### 2.7 LAMBDA SONDA

Součástí katalyzátoru bývá i kyslíková sonda neboli lambda sonda. Tato sonda měří složení spalin a předává tuto informaci do řídicí jednotky. Ta vyhodnotí, zda je současný stav optimální, nebo zda dochází v motoru při spalování benzínu k detonaci (je použita příliš chudá směs) anebo naopak k nedokonalému spalování (je použita příliš bohatá směs) a v případě potřeby může tento poměr upravit. [29, 31]

Při optimálních podmínkách katalyzátor s lambda sondou funguje až s 95% účinností a bez lambda sondy s přibližně 50% účinností. [29, 31]

### 2.8 MOTORY S PŘÍMÝM VSTŘIKEM BENZÍNU

Na obrázku 4 můžeme vidět nepřímý, tedy klasický vstřik benzínu. Benzín je vstřikován do sacího potrubí, kde se mísí se vzduchem a přes otevřené ventily vstupuje dále do spalovací komory. Zatímco obrázek 5 ukazuje přímý vstřik benzínu – sacím potrubím je přiveden pouze vzduch, benzín je vstříknutý tryskou přímo do spalovací komory (válce) pod tlakem 40 až 130 barů a čas na smíchání benzínu se vzduchem je

tedy mnohem kratší než u nepřímého vstřiku. Umístění této trysky velmi ovlivňuje účinnost celého systému. [29, 32, 33, 52]

System přímého vstřikování je u běžných osobních automobilů poměrně novinkou, zatímco v oblasti automobilových závodů byl tento systém používán již v 50. letech 20. století.



*Obrázek 4 Sací potrubí a spalovací komora zážehového motoru bez přímého vstřiku [35]*



*Obrázek 5 Sací potrubí a spalovací komora zážehového motoru s přímým vstřikem [35]*

V současné době se přímé vstřikování benzínu používá u přeplňovaných motorů. Tímto způsobem je zvýšena účinnost motoru, protože můžeme zvýšit kompresní poměr – do válce je tak vstříknuto menší množství benzínu, ale práci, a tedy i výkon od něj dostaneme stejný. Další výhodou je ta, že benzín také ochlazuje spalovací prostor, což je v tomto případě výhodné, neboť se tím snižuje riziko tzv. samozápalů – směs ve spalovacím prostoru vzplane dříve, než dojde k zážehu na zapalovací svíče. [29, 32, 33, 52]

Tento systém má však ale i své nevýhody. Jednou z nich je vysoký tlak, pod kterým je zápalná směs vstřikována do válce. Tím pádem musí být konstrukční prvky související se vstřikováním paliva masivnější, aby tyto tlaky ustály. Další nevýhoda, která je velmi podstatná z hlediska této práce, je větší tvorba emisí. U přímého vstřikování vzniká mnohem více oxidu dusíku, protože je ve spalovací komoře hodně vzduchu a málo paliva. A největším problémem je vznik pevných částic, které jsou složením velmi podobné pevným částicím z dieselových motorů, avšak ty z benzínových jsou mnohem menší a tím pádem pro živé organismy mnohem více nebezpečné (viz kapitola 1.2 *Vliv velikosti částic*). Všechny částice však neodejdou výfukovým potrubím. Některé se usazují v motoru a tím pádem způsobují zanášení motoru a tím mohou způsobit snížení účinnosti, výkonu, anebo i poruchu motoru. [29, 32, 33, 52]

Výhody však převyšují nedostatky tohoto systému, neboť výrobci přímý vstřik benzínu hojně používají. Přímý vstřik se v současné době jeví jako nejlepší řešení, jak uspokojit touhu uživatelů po automobilech s vysokými výkony a zároveň nízkou spotřebou. Aby ale automobily splňovaly i všechny právní emisní zákony, musely být do těchto aut již od výroby namontovány filtry pevných částic. [29, 32, 33, 52]

Další rozdíl je škrtká klapka, která u přímého vstřiku není. Také tepelné ztráty jsou díky absenci škrtká klapky u přímého vstřiku nižší a tím pádem můžeme z motoru dostat vyšší výkon. [29, 32, 33, 52]

Pro porovnání účinnosti přímého vstřiku bylo provedeno měření na dvou automobilech Ford Mondeo, z nichž jeden má přímý vstřik benzínu a druhý nikoliv. Výsledky měření jsou znázorněny v tabulce 4, u přímého vstřiku můžeme vidět malé navýšení výkonu i kroutícího momentu a zároveň snížení spotřeby paliva.

*Tabulka 4 Srovnání motorů 1.8 Duratec HE a 1.8 Duratec SCi s přímým vstřikem automobilu Ford Mondeo [33]*

Označení	1.8 Duratec HE	1.8 Duratec SCi
Výkon	92 kW/6000 ot	96 kW/6000 ot
Kroutící moment	170 Nm/4500 ot	175 Nm/4250 ot
Kompresní poměr	10,5	11,3
Kombinovaná spotřeba	7,9 l/100 km	7,2 l/100 km

Dříve se u přímého vstřiku využívalo 2 variant směsí. Při nízkém zatížení se využívala tzv. vrstvená směs, což znamená, že u svíčky je ve směsi mnohem více benzínu než v jiných částech spalovací komory, kde je směs naopak chudá. Tímto procesem můžeme dosáhnout při nižším zatížení menší spotřeby. Druhá varianta směsi byla při plném zatížení a jednalo se o homogenní směs. [34]

Vrstvení směsi se ale neuchytilo, protože při něm docházelo k velkému zanášení motoru. Ve válcích se usazoval karbon, a to pak způsobovalo, že se motor přepnul

do nouzového režimu. V současnosti se už vrstvení směsi nepoužívá, avšak zanášení je celkově problémem přímého vstřikování, i pokud se jedná o homogenní směs. Částečně se tomu dá předcházet používáním benzínu s vyšším oktanovým číslem.  
[34]

### 3 NÁZVY

Pro filtry pevných částic benzínových motorů se objevuje plno zkratk či názvů a všechny znamenají to samé. Nejčastější název je GPF – Gasoline particulate filter, případně PPF – Petrol particulate filter. V německé terminologii se pak objevuje OPF - Otto particle filter a ve francouzské FAP z „filtre à particules“, který ani nerozlišuje filtry pro benzínové a dieselové motory. V českých textech se dále můžeme setkat i s označením cGPF neboli čtyřcestný katalyzátor, což znamená, že filtr obsahuje také katalytickou vrstvu, která plní funkci katalyzátoru. Toto označení je více vysvětleno v podkapitole 4.3 *Katalytická vrstva* a v kapitole 5. *Konstrukční řešení a umístění*. [12, 36]



## 4 PRINCIP A SLOŽENÍ FILTRU

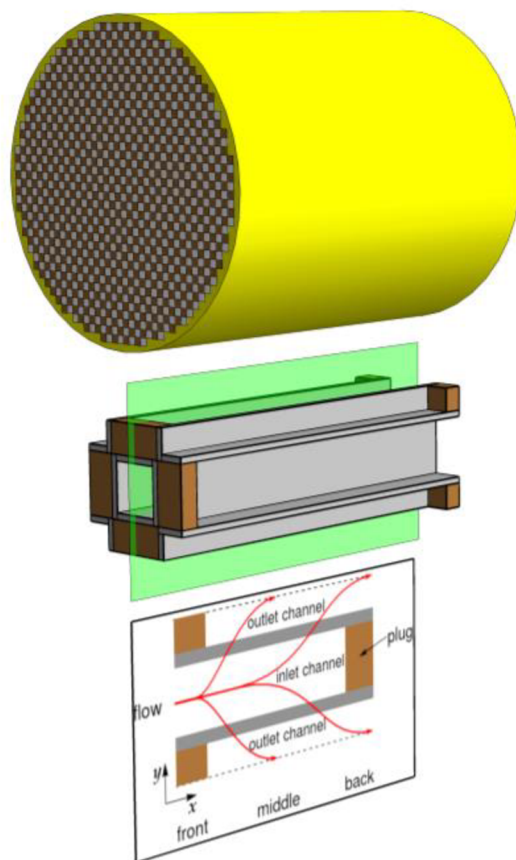
Základní princip funkce filtru pevných částic pro benzínové motory je shodný s funkcí filtru pevných částic pro dieselové motory – tj. zachytit z výfukových plynů jemné, okem neviditelné pevné (prachové) částice (PM). Částice zachycené ve filtru můžeme rozdělit na 2 druhy. První jsou saze – ty mají složitý tvar a jsou tvořeny převážně uhlíkem. Velikosti těchto produkovaných částic byly měřeny experimentálně. Pro přímý vstřík benzínu jsou typické saze o velikosti 20–100 nm. Druhou kategorií je popel, který tvoří vločky. Ty jsou větší než saze a jsou tvořeny především uhlovodíky a oxidy různých kovů. Zachycení těchto částic docílíme umístěním keramické vložky s velice jemnou strukturou kanálků nebo drátěné vložky do výfukového potrubí. Filtr pevných částic může také obsahovat katalytickou vrstvu, které snižuje obsah škodlivých látek ve spalínách. Součástí filtru pevných částic bývá také senzor diferenčních tlaků, který měří tlak před filtrem a za filtrem a tím vyhodnocuje míru zaplnění filtru. Při zaplnění filtru nad stanovený limit, se filtr vypaluje neboli regeneruje. Saze mohou být z filtru pevných částic odstraněny oxidační reakcí. [12, 37]

### 4.1 KERAMICKÁ VLOŽKA

Většina filtrů používá keramickou vložku neboli kordierit. Tento materiál je směs křemičitanu hliníku a manganu a je vhodný pro toto využití především díky nízké roztažnosti při velkém zvýšení teploty a také díky vysoké odolnosti proti tepelným šokům. Kordierit snáší teploty až do 1200 °C. Další výhodou je vysoká tepelná vodivost, díky které dojde k žádoucímu zahřátí filtru poměrně rychle. [38]

Další variantou keramické vložky je karbid křemíku označující se SiC. Tento materiál je vyroben zapékáním práškové směsi v peci. Vyznačuje se extrémní pevností a odolností vůči teplu – teplota tání je 2700 °C, odolností vůči korozi a nízkou tepelnou roztažností. Avšak kvůli vysoké ceně se do filtrů moc nepoužívá. [38]

V obou těchto případech je keramická vložka ve filtru uspořádána do mikroskopických kanálků se střídavě utěsněnými konci, jak můžeme vidět na obrázku 6. Jednotlivé kanálky jsou odděleny porézní stěnou. Aby spaliny mohly pokračovat dál do výfukového potrubí, musí projít touto porézní stěnou, na které se však pevné částice zachytí příp. částice menší než 30 nm přilnou ke stěně difúzí. Při zvýšení teploty zachycené pevné částice shoří a tím porézní stěnu opět uvolní. [39]



Obrázek 6 Schéma kanálků v keramické matici [39]

Hustota těchto kanálků je přibližně 200 až 350 kanálků na čtvereční palec. Filtry pro benzínové motory jsou více poréznější a tedy i křehčí než filtry pro dieselové motory.

Tato keramická vložka může být pokryta speciální vrstvou obsahující jemně rozptýlené částice drahých kovů, které urychlují chemické reakce. Toto řešení je pak nazýváno cGPF – neboli čtyřcestný katalyzátor – kapitola 5 *Konstrukční řešení a umístění*. [40]

## 4.2 KOVOVÁ VLOŽKA

Další varianta vložky filtru pevných částic je kovová nebo drátěná vložka. Jak již název napovídá, tato vložka se skládá z drátků či pletiva, které jsou stlačeny na co nejmenší objem, aby vytvářely částicím co největší odpor. Tato velmi jemná lehká vlákna (s průměrem mezi 17 a 30  $\mu\text{m}$ ) umožňují vysokou pórovitost a optimální filtrační výkon a odolnost. Použitím vláken Fecralloy je zlepšena odolnost vůči korozi a teplotám do 1050 °C. Další velkou výhodou kovových vláken je ta, že oproti keramické matici nekladou spalinám tak velký odpor a tím pádem ani tolik nesnižují výkon motoru a zároveň mohou být tato vlákna pokryta katalytickou vrstvou stejně jako keramická matrice. [41, 42, 43]

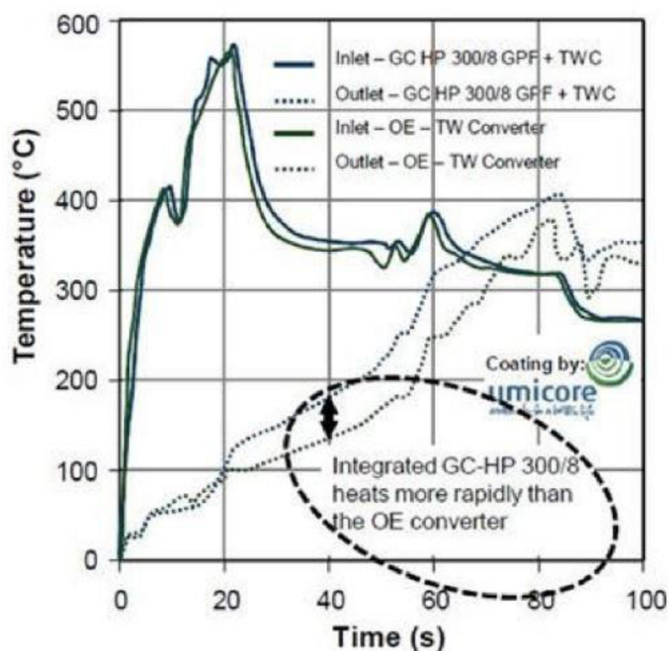
Fecralloy je ochranná známka registrovaná UKAEA (Úřadem pro atomovou energii ve Spojeném království). Jedná se materiál obsahující železo (Fe), chrom (Cr), hliník (Al) a případně ytrium (Y). [44]

Tento flexibilní materiál může být vytvarován do mnoha tvarů, aby se dal aplikovat do výfukového systému. Zároveň podle toho, kolik vláken na daný objem použijeme, můžeme měnit účinnost v rozsahu od přibližně 30 % až do 90 %. Díky dobré schopnosti tlumit zvuk, může filtr pevných částic nahradit také funkci tlumiče. A díky elektrické vodivosti kovů může být mnohem dříve po nastartování motoru zahájena aktivní regenerace. [41, 42, 43]

### 4.3 KATALYTICKÁ VRSTVA

Součástí filtru pevných částic může, ale nemusí, být také katalytická vrstva. Ta má za úkol z výfukových plynů odstranit plynné škodlivé látky. Jak je uvedeno v kapitole 2, na obrázku 3, ve výfukových plynech jsou 2% škodlivých látek, která jsou zastoupena především oxidem uhelnatým (CO), oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>) a uhlovodíky (HC). Katalytická vrstva se skládá z jednotlivých vrstev vzácných kovů – palladium a rhodium. První vrstva – palladium, aby nevyvolávala tlakové ztráty, je silnější. Druhá vrstva – platina – je tenká, ale zato hustá, aby lépe filtrovala částice. Tyto kovy způsobí, že nedokonale spálené uhlovodíky a oxid uhelnatý spolu se zbytkovým kyslíkem se oxidují na oxid uhličitý a vodu. Zároveň se redukují i oxidy dusíku na molekuly dusíku a kyslíku, které jsou běžně přítomné ve vzduchu. [45]

Jak můžeme vidět na obrázku 7, z praktického testu bylo zjištěno, že hodnoty teploty na vstupu jsou stejné jak pro cGPF, tak i pro katalyzátor (TWC), ale po 20 s teplota na výstupu cGPF začne růst rychleji a po 40 s je o 50 °C vyšší než teplota na výstupu z katalyzátoru (TWC). Tento jev je způsoben lepším přenosem tepla v pórovité stěně. V jiných testech bylo zjištěno, že zpětný tlak pro cGPF je nižší než pro standardní katalyzátor (TWC). [46]



Obrázek 7 Přehled závislosti teploty na čase při použití katalyzátoru a cGPF [46]

Bylo dokázáno, že shromažďování malého množství sazí a popílku na stěnách filtru může vést k velkému nárůstu filtrační účinnosti. Filtrační účinnost byla zlepšena z cca 60 % při zcela prázdném filtru, na 90 % při 0,08 g/l sazí a na 80 % při 1 g/l sazí. [46]

Dále bylo zjištěno, že povlakovaný filtr pevných částic regeneruje pevné částice snadněji než nepovlakované části. [46]

Jednou z firem, zabývajících se mimo jiné také katalyzátory a povlakováním filtrů pevných částic pro vznětové i zážehové motory, je Umicore. [50]

#### **4.4 SENZOR DIFERENČNÍHO TLAKU**

Součástí filtru pevných částic bývá také senzor diferenčního tlaku, který pomocí hadic přivádí k měřicí elektronice senzoru tlak výfukových plynů před a za filtrem pevných částic. Pomocí membrány mezi dvěma komorami nebo tzv. kapacitním měřením je pak následně vyhodnocen diferenční tlak a všechny tyto informace jsou dále předávány do řídicí jednotky. Další úlohou senzoru může být také sledovat dynamické chování tlaku před filtrem a reagovat na něj – například pokud rychle dochází k zaplnění filtru, tak může být regenerace spuštěna častěji; naopak když se filtru nedaří moc často regenerovat, může být zahájena časově delší regenerace. Pokud nastane vada tohoto senzoru, pak jsou vyhodnocovány a předávány nesprávné informace, na které senzor a řídicí jednotka opět reagují, a to může způsobit například snížení výkonu, nebo až zničení filtru. Proto je důležité, při zobrazení chybové hlášky týkající se GPF zkontrolovat i funkčnost akčních členů s ním souvisejících. [48]

## 5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ A UMÍSTĚNÍ

U filtru pevných částic pro zážehové motory můžeme rozlišit, zda je pokryt katalytickou vrstvou a tím pádem zastává i funkci katalyzátoru či nikoliv. Pokud se jedná o filtr bez katalytické vrstvy, nazývá se pouze GPF. Pokud filtr obsahuje i katalytickou vrstvu, jeho zkratka je cGPF (catalysed gasoline particulate filter), v českém překladu se někdy můžeme setkat s názvem čtyřcestný katalyzátor, neboť se dá říct, že současnému třícestnému katalyzátoru přibyla další funkce – filtrace pevných částic. Principu cGPF je využito například u automobilu Škoda Fabia s motorem 1,0 TSI, nebo Fiat Firefly s přeplňovanými motory 1,0 a 1,3 l. [12]

Dalším rozdělením může být umístění filtru – a to buď v horizontální či vertikální části výfukového potrubí. [12]

Z hlediska konstrukčního řešení můžeme rozdělit filtry podle uspořádání ve výfukovém potrubí. Na obrázku 8 vidíme rozdělení filtru pevných částic pro zážehové motory s katalytickou vrstvou (cGPF).

Nahoře vidíme samostatně uložený třícestný katalyzátor – TWC (three way catalyst) a filtr pevných částic s katalytickou vrstvou – cGPF. Toto uspořádání se nazývá underfloor.

Uprostřed je znázorněn filtr pevných částic s katalytickou vrstvou a třícestný katalyzátor v jednom tělese – tzv. closed coupled.

Vespod obrázku vidíme pouze filtr pevných částic s katalytickou vrstvou, který zcela zastává funkci katalyzátoru.

Rozdělení na underfloor a closed coupled můžeme najít i u filtrů pevných částic bez katalytické vrstvy. [12, 46]



Combination of TWC and cGPF underfloor



Combination of TWC and cGPF closed coupled



All-in-one cGPF

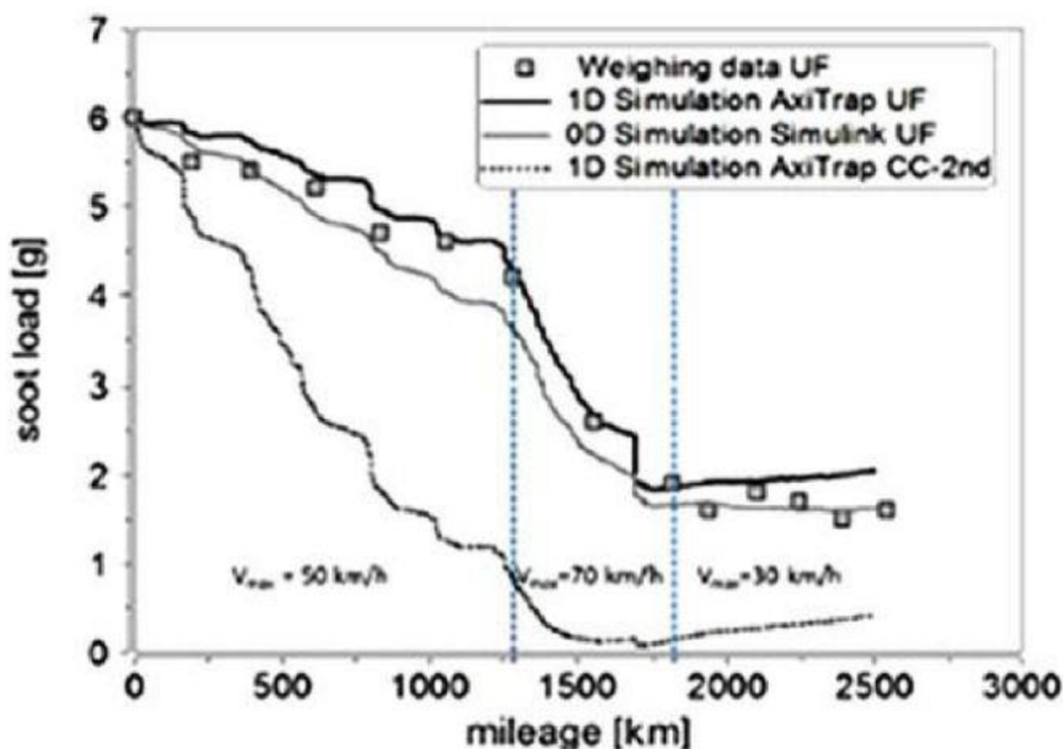
Obrázek 8 Uspořádání cGPF a případného katalyzátoru ve výfukovém potrubí [50]

Studiemi bylo prokázáno, že čistý filtr bez katalytické vrstvy pracuje s účinností okolo 80 % a jeho účinnost vzroste až na 95 % po 230 s běhu motoru. Filtr pracuje lépe po zahřátí. [46]

### 5.1 USPOŘÁDÁNÍ UNDERFLOOR - SAMOSTATNĚ

Tento typ uspořádání je výhodný z toho důvodu, že lze použít stávající katalyzátor a dál ve výfukovém potrubí pouze přidat filtr pevných částic. Také náklady na případnou opravu katalyzátoru či filtru jsou nižší, protože je možné vyměnit vadný díl nezávisle na druhém. Nevýhodou je nižší teplota spalin vstupujících do filtru, a tedy horší vypalování sazí (regenerace), protože v tomto uspořádání je filtr téměř vždy dál od motoru. [46, 51]

Na obrázku 9 je znázorněn graf, který ukazuje, že v nižších rychlostech se do filtru v uspořádání underfloor usadilo více sazí (2,3 – 3,0 g) než v uspořádání closed-coupled. [46, 51]



Obrázek 9 Závislost vzniku sazí na počtu ujetých kilometrů [46]

## 5.2 USPOŘÁDÁNÍ CLOSE-COUPLED - DOHROMADY

Toto uspořádání je výhodnější z hlediska vypalování sazí, neboť v tomto případě můžeme dát filtr i s katalyzátorem blíže k motoru, kde jsou vyšší teploty a snáze tak dojde ke spálení sazí (regeneraci). Důsledkem vyšší teploty může být ale také silnější protitlak. Tohoto uspořádání lze docílit dvěma způsoby – buď je v jednom obalu nejdříve katalyzátor a pak filtr pevných částic, anebo se přímo do filtru pevných částic nanese vrstva vzácných kovů neboli katalytická vrstva (cGPF). [46, 50, 51]

Nevýhody tohoto uspořádání jsou cena a technologická náročnost týkající se katalytické vrstvy. Dále pak zmenšení katalyzátoru v případě, kdy jsou v jednom tělese katalyzátor a filtr bez katalytické vrstvy. [46, 50, 51]

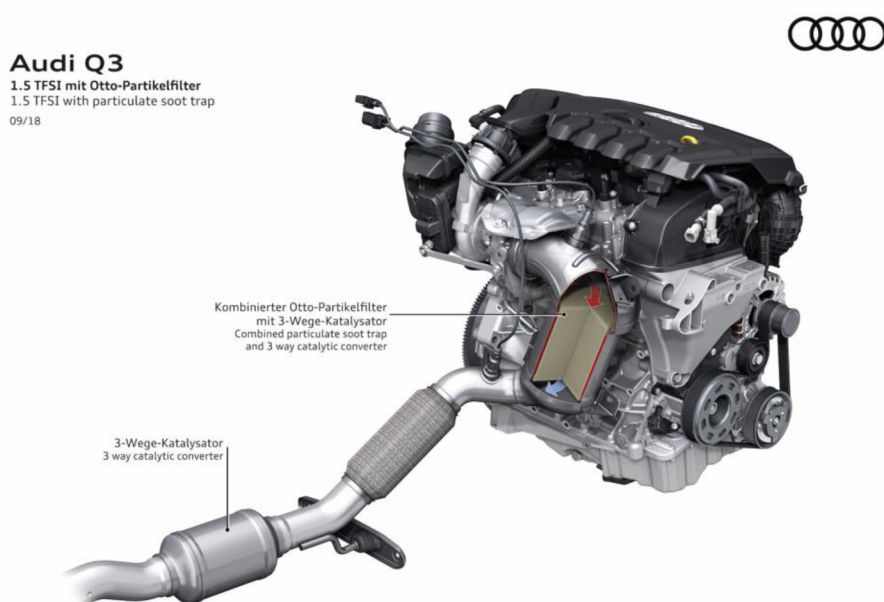
V grafu na obrázku 9 je dále znázorněno, že při stejné rychlosti se do filtru v uspořádání close-coupled usazuje méně sazí než do filtru umístěného jako underfloor. Je to způsobeno tím, že když je GPF a katalyzátor v jednom tělese, mohou se nacházet blíže motoru a tím pádem tam je vyšší teplota. [46, 50, 51]

## 5.3 UMÍSTĚNÍ VE VERTIKÁLNÍ ČÁSTI VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ

Umístění filtru pevných částic ve vertikální části výfukového potrubí je možné pouze tehdy, pokud se jedná o samostatné těleso, nikoliv o filtr a katalyzátor v jednom tělese

(closed-coupled), z důvodu omezeného místa v motorovém prostoru. Filtr se v tomto případě umísťuje svisle za výfukové svody a turbodmychadlo, tedy velmi blízko motoru. Z tohoto důvodu bude na vstupu do filtru velmi vysoká teplota a mnohem častěji bude docházet k vypalování sazí (regeneraci). Druhé konstrukční řešení je umístit filtr blíže k motoru – tedy svisle za výfukové svody a turbodmychadlo. Nevýhodou může být opět vyšší protitlak a především velmi špatná přístupnost, která však vzhledem k téměř bezporuchovosti a nutnosti servisu filtru pevných částic pro zážehové motory na rozdíl od filtrů pro vznětové motory, by neměla být problémem. [12]

Tento typ umístění, jak vidíme na obrázku 10, využívá např. automobilka Audi pro svůj model Q3 s motorem 1,5 TFSI. [12]



Obrázek 10 Motor 1.5 TFSI automobilu Audi Q3 s filtrem pevných částic ve vertikální části výfukového potrubí [12]

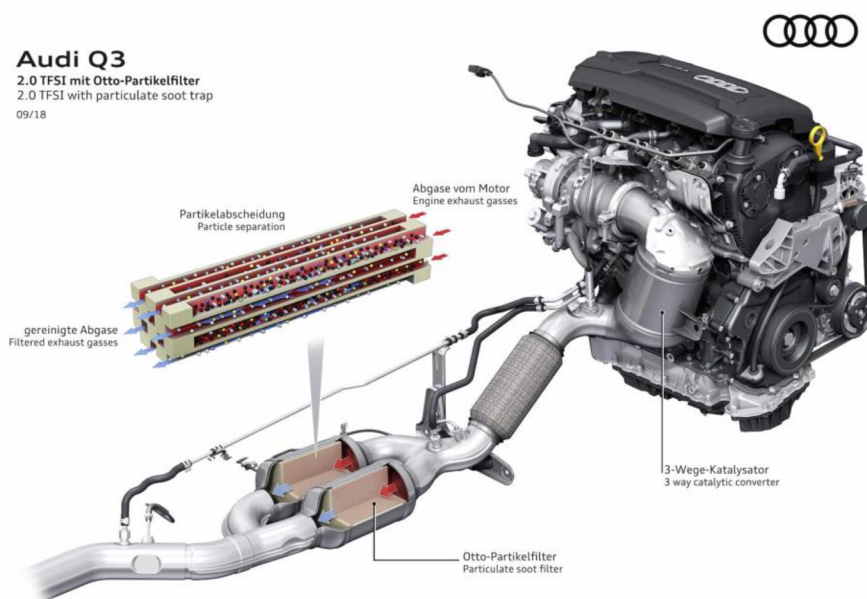
#### 5.4 UMÍSTĚNÍ V HORIZONTÁLNÍ ČÁSTI VÝFUKOVÉHO POTRUBÍ

Dalším způsobem umístění filtru pevných částic ve výfukovém potrubí počátek horizontální části. Výhodou je dobrá přístupnost a také menší omezení, co se týče délkových rozměrů filtru. Na druhou stranu pozor se musí dávat na výšku filtru, neboť tímto umístěním se zmenšuje světlá výška vozidla. Další nevýhodou je také vzdálenost od motoru s tím související nižší teplota vstupujících spalin, a tedy méně časté vypalování sazí. [12]

Na obrázku 11 vidíme, že u stejného modelu, pouze při navýšení objemu motoru na 2,0 TFSI, automobilka Audi zvolila raději umístění v horizontální části.

Dále tohoto konstrukčního řešení je využito například u automobilu Ford Focus Kombi 1.5 EcoBoost ST-Line anebo nové generace Kia Ceed. [12]





*Obrázek 11 Motor 1.5 TFSI automobilu Audi Q3 s filtrem pevných částic v horizontální části výfukového potrubí [12]*

## 6 ÚDRŽBA FILTRU (REGENERACE)

Vzhledem k tomu, že GPF jsou velmi účinné a dokáží zachytit až 90 % vyprodukovaných částic, tak by při nevyčištění způsobovaly problémy, konkrétně zvýšení zpětného tlaku ve výfuku, který by zvýšil odpor spalinám. Z tohoto důvodu se saze musí odstraňovat. Nejlepší způsob, jak saze z filtru odstranit, je proces známý jako regenerace. Jedná se o spálení těchto sazí uvnitř filtru v přítomnosti kyslíku a při teplotě nad 600° C.

U filtrů jsou obecně známy dva druhy regenerace – pasivní a aktivní. Na rozdíl od dieselových motorů, u benzínových můžeme dosáhnout pasivní regenerace mnohem jednodušeji. [12, 31, 51]

### 6.1 PASIVNÍ REGENERACE

Benzínové motory obecně pracují se stechiometrickou směsí, což znamená, že ke spálení 1,0 kg benzínu je potřeba 14,8 kg vzduchu. Když je motor pod vysokým zatížením, ve výfukových plynech už není kyslík, který by spálil saze. K pasivní regeneraci tedy dochází při tzv. „brždění motorem“ neboli „jízdě bez plynu“ – jedná se o proces, kdy máme zařazen rychlostní stupeň, ale nemáme sešlápnutý pedál akcelérátoru. Motor pak stále nasává vzduch, ale jelikož se do motoru nevstříkuje palivo, vzduch se nespotřebuje a proudí dál až do výfukového potrubí a GPF filtru, kde díky němu a vysoké teplotě saze shoří. [12, 31, 51]

### 6.2 NUCENÁ REGENERACE

K nucené regeneraci dochází v případech, kdy motor jede stále pod plynem a v nízkých otáčkách nebo při krátkých trasách se studeným motorem. Filtr nemá možnost pasivní regenerace, protože teplota spalin nedosáhne požadované teploty a saze ve filtru neshoří.

Když řídicí jednotka vyhodnotí, že filtr je již plný, přejde motor do režimu nucené regenerace. Na rozdíl od dieselových motorů, není zvýšena dávka paliva, ale je spalována naopak chudá směs s nadbytkem vzduchu, což zvýší teplotu spalin. Zároveň díky nižšímu tlaku ve výfukovém potrubí a již zmíněnému přebytku kyslíku, začne spalování sazí už při 500°C.

U GPF se udává jako limitní hodnota zanesení filtru 8 g na litr objemu, přičemž běžná hodnota zanesení je pouhý 1 g/l. [12, 31, 51]

### 6.3 ČIŠTĚNÍ POMOCÍ STROJE

Vzhledem k již zmíněným parametrům GPF oproti DPF – jako je například rozdílná teplota spalin, by mělo stačit čištění filtru pomocí regenerací. Pokud by ale nastal případ, že se filtr i přesto zanesou (například kvůli vadným čidlům, které nespustí nucenou regeneraci), pak se musí filtr vymontovat z auta a odvézt do příslušného servisu. Jelikož jsou ale filtry pevných částic pro benzínové motory zavedeny poměrně nedávno, spousta servisů zatím o nich nemá dostatek informací.

Servis zvaný DPF – FM se sídlem ve Frýdku-Místku provádí čištění DPF pomocí zařízení FLASH CLEANER MACHINE 1000, které je zobrazeno na obrázku 12.

Tento stroj byl doposud využíván na čištění filtru pevných částic pro vznětové motory, ale měl by být schopen provést čištění i filtru pevných částic pro benzínové motory.



Obrázek 12 Zařízení FLASH CLEANER MACHINE 1000 na čištění filtrů pevných částic

Čištění se skládá z několika kroků. Nejprve se do filtru naleje čistící kapalina, která se nechá působit 5–30 min. Poté se z filtru tato kapalina vyleje a filtr se připojí do čistícího stroje, jak je tomu na obrázku 13. Zde je přivedena voda, která slabým proudem protéká filtrem neustále a k tomu jsou do filtru pouštěny rázy vody o tlaku 4 bar (přibližně 6–8 rázů – záleží na znečištění filtru; hodnota tlaku je pro osobní automobily). Samotný proces čištění trvá 5–10 minut. Pak ale následuje sušení teplým vzduchem, které se pohybuje v řádech hodin. Tento způsob čištění je uváděn jako nejšetnější vzhledem k filtru.

Je doporučeno současně při čištění filtru provést také kontrolu funkčnosti senzoru diferenčního tlaku, případně lambda sondy. Téměř všechny autoservisy by měly mít diagnostiku, kterou můžou zhodnotit, zda jsou informace předávané senzory skutečné. Nejjednodušší kontrola je při zapnutém zapalování, kdy musí být naměřeno 0 mbar. Toleruje se zde odchylka  $\pm 3$  mbar. Stárnutím senzoru v provozu se však odchylka zvětšuje. [48]



*Obrázek 13 Zařízení FLASH CLEANER MACHINE 1000 s filtrem pevných částic upevněným a připraveným na čištění [54]*

## 7 VÝHODY A NEVÝHODY S OHLEDEM NA PLNĚNÍ EMISNÍCH LIMITŮ

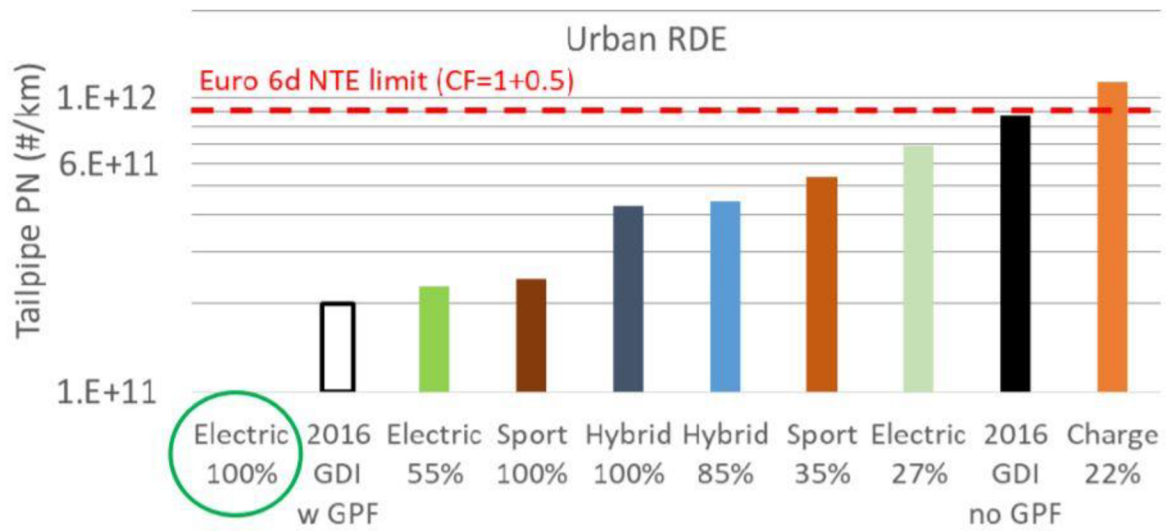
V poslední době je v médiích hodně diskutované téma globálního oteplování, kromě dalších příčin, jsou na vině také spaliny z dopravy. Zavedením emisních limitů se tedy vláda snaží tento problém řešit. V podkapitole 1.2 *Vliv velikosti částic* jsou také podrobně zmíněny neblahé účinky spalin na lidské zdraví. Na druhou stranu globální oteplování a znečištění ovzduší je globální problém, a i když v Evropské unii jsou přísné emisní normy, např. v Americe se na emise tolik nehledí, protože kromě kontroly vyráběných vozidel, se už pak během provozu vozidla emise neměří, a tedy tyto normy řeší problém jen v malé míře. [31, 53]

Obecné výhody GPF jsou tedy už několikrát zmíněné snížení množství pevných částic ve spalinách, a tím pádem šetrnější přístup k životnímu prostředí. Pravděpodobně je to také jediný způsob, jak vyhovět ekologickým normám za použití přímého vstřiku benzínu, který podstatně zvyšuje výkon automobilu.

Nevýhodou může být kvůli odporu vzduchu, který filtr ve výfukovém potrubí vytváří, vyšší spotřeba automobilu, kterou vozidlo má oproti stejnému vozidlu bez filtru. Toto ale běžný uživatel nepocítí, protože filtr je namontován už od výroby a přímý vstřik, kvůli kterému je filtr namontován, přidá mnohem více výkonu, než kolik filtr ubere. Dále se samozřejmě mohou pokazit akční členy filtru – senzor diferenčních tlaků, který hodnotí míru zaplněnosti filtru. V případě použití pouze cGPF se na tento filtr, který zastává funkci katalyzátoru, váže i lambda sonda kontrolující správný poměr vzduchu a paliva vstupujícího do motoru. Při poruše nějakého z těchto akčních členů může dojít k nesprávnému fungování filtru, což může způsobit snížení výkonu, zvýšení spotřeby, a nebo i zničení samotného filtru. Životnost filtru se projeví až v praxi. [31, 53]

Díky praktickým testům – tzv. Real-Driving Emissions (RDE) motoru s přímým vstřikem s cGPF vs. s třicestným katalyzátorem ve skutečném provozu (ve městě i mimo něj) můžeme porovnat účinnost těchto filtrů. Testováno bylo vozidlo s označením Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV). Toto vozidlo je schopné jezdit ve 4 různých jízdních režimech – Elektrický, Hybridní, Nabíjecí a režim Sport. Spalovací motor má objem 1.5 l a je s přímým vstřikem. [55]

Na obrázku 14 vidíme výsledky tohoto testování zanesené do grafu. Jedná se o část testu prováděnou v městském provozu. Je zde znázorněno množství pevných částic vypuštěných do ovzduší v různých režimech řízení. 100% elektrický režim je možný pouze při nabití baterii a tento režim má samozřejmě nulové emise. Dále jsou zde znázorněny také různé poměry režimů. Všechny ale přesahují hodnoty motoru s přímým vstřikem a s použitím cGPF - v grafu je tato hodnota označena 2016 GDI w GPF. Pro porovnání pod označením 2016 GDI no GPF nalezneme hodnoty pro motor s přímým vstřikem, ale místo GPF je zde použit třicestný katalyzátor. [55]



Obrázek 14 Srovnání jednotlivých druhů pohonu automobilů a jejich produkci částic [55]

## 8 POROVNÁNÍ S DPF

DPF a GPF mají ve výfukovém potrubí stejný účel – zachytit co nejvíce pevných částic. Oba dva typy se nejčastěji skládají z plechového obalu a keramické pórovité matrice. Vzhledem k tomu, že vznětový a zážehový motor mají různé provozní teploty, tak i princip filtru a pak následné regenerace je odlišný. [51]

Vzhledem k tomu, že vznětový motor pracuje za nižších provozních teplot (mezi 400 až 600 °C, oproti tomu zážehový pracuje s provozní teplotou mezi 700 až 900 °C), tak aby bylo možné filtr vypálit (= regenerovat), musí být navýšena teplota spalin. Tohoto lze docílit dvěma způsoby. První způsob je dlouhodobá jízda ve vysokých otáčkách – například jízda po dálnici. Zde se teplota zvýší samovolně a může tak probíhat pasivní regenerace. Pokud je ale filtr naplněn nad přípustnou hodnotu a nejsou uzpůsobeny podmínky pro pasivní regeneraci, musí řídicí jednotka přejít na aktivní regeneraci a nuceně zvýšit teplotu spalin přivedením většího množství paliva do motoru nebo přímo výfukového potrubí, na rozdíl od GPF, kde je při nucené regeneraci zvýšen přísun vzduchu. Palivo tak začne ve výfukovém potrubí hořet a tím se začne vypalovat i DPF. Nevýhody tohoto jevu jsou zvýšená spotřeba a snížený výkon automobilu. [47, 51]

Zmíněná regenerace související s pracovní teplotou motoru je pravděpodobně největším rozdílem mezi filtrem pevných částic pro zážehové a vznětové motory, samozřejmě v neprospěch vznětových. Uživatelé jsou s regenerací DPF velmi nespokojeni, jelikož na samotný provoz automobilu to má spíše negativní účinky. Filtr snižuje výkon, špatně se regeneruje a k aktivní regeneraci potřebuje mnohem více paliva, životnost bývá také velmi omezená. Samozřejmě zde záleží na spoustě faktorech, a to především pravidelné údržbě, ale i v tomto případě se životnost může pohybovat okolo 100-150 tisíc km. Nový filtr je pak záležitostí několika tisíc až desetitisíc. Poslední nevýhodou jsou čidla přímo související s filtrem. Tato čidla totiž vyhodnocují míru zanesení filtru, a tedy i následnou regeneraci filtru. Pokud je toto čidlo vadné, nemusí rozpoznat, že je filtr plně zanesený a tím jej zničí, nemluvě o vysoké spotřebě paliva a nízkému výkonu motoru. [51, 56]

Z těchto důvodů byly DPF často z aut demontovány. Tato demontáž je však nezákonná a hrozí za ní pokuta či právní postih. Vozidlo s odstraněným DPF také samozřejmě neprojde na kontrole emisí. [49]

Filtry pro zážehové motory jsou poměrně novou záležitostí, avšak kvůli negativní zkušenosti uživatelů automobilů s filtry pro vznětové motory, jsou už nyní odsouzeny jako nechtěná součást automobilu. I přes to, že DPF obsahují až 8 g sazí na 1 l objemu filtru v plně zaneseném stavu a GPF mají kapacitu pouze 1 g/l, GPF by měly být díky snazší regeneraci méně problémové. Zda mají GPF oproti DPF opravdu tolik výhod, to už ukáže jenom praxe. [12, 56]

## ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá filtry pevných částic pro zážehové motory, jejich principem, konstrukčním řešením a údržbou. Nedílnou součástí tohoto tématu jsou samozřejmě také samotné pevné částice, emise a emisní normy.

V úvodu této práce je vysvětleno, co jsou to pevné částice, jak vznikají a proč škodí lidskému zdraví. Díky přiloženým obrázkům můžeme porovnat znečištění ovzduší v rámci České republiky i Evropy.

Z důvodu vzrůstající automobilní dopravy a tím spojeným znečištěním ovzduší, byly zavedeny po celém světě emisní normy. V této bakalářské práci můžete vidět srovnání limitů norem platných v České republice od minulosti až do současnosti. Také je zde zmíněno, jaké emisní normy platí ve světě a jak se emisní normy měří.

S příchodem moderní technologie přímého vstřikování benzínu, která zajišťuje vysoký výkon v poměru k relativně nízké spotřebě, zároveň vzrůstá množství vyprodukovaných pevných částic. Aby automobily s touto technologií byly schopné splnit emisní limity, bylo nutné množství těchto pevných částic podstatně zredukovat. Z tohoto důvodu se nově začal přidávat filtr pevných částic do výfukového potrubí zážehových motorů. Vysvětlením principu, konstrukčního řešení, regenerací a umístěním filtru se zabývá velká část této bakalářské práce. Nesmíme také opomenout regeneraci neboli tzv. „samočištění“ filtru, kdy částice usazené ve filtru shoří. V práci je podrobně vysvětleno, jak regenerace probíhá, za jakých podmínek a jaké jsou druhy regenerace. Právě samotná regenerace je pravděpodobně největší rozdíl mezi filtry pevných částic pro zážehové a pro vznětové motory. I když filtry pevných částic pro vznětové motory jsou velmi neoblíbená součást, tak právě díky lepší regeneraci u zážehového motoru, by mohl filtr pevných částic pro zážehové motory dosáhnout od spotřebitelů kladného hodnocení. Z tohoto důvodu nalezneme na samotném konci této práce vysvětlení rozdílů mezi filtry pevných částic pro zážehové a pro vznětové motory.

Vzhledem k tomu, že pevné částice prokazatelně škodí živým organismům, tak bychom ve vlastním zájmu měli tyto technologie podporovat.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Pevné částice. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Pevn%C3%A9\\_%C4%8D%C3%A1stice](https://cs.wikipedia.org/wiki/Pevn%C3%A9_%C4%8D%C3%A1stice)
- [2] Znečištění venkovního ovzduší prachem (prašný aerosol PM10). In: *KRAJSKÁ HYGIENICKÁ STANICE MORAVSKOSLEZSKÉHO KRAJE SE SÍDLEM V OSTRAVĚ* [online]. 2007 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <http://www.khsova.cz/obcanum/detail/540>
- [3] Znečišťující látky. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zne%C4%8Di%C5%A1%C5%A5uj%C3%ADc%C3%AD%C3%A1tky>
- [4] Poléťavý prach – neviditelná hrozba. In: *Hluk & Emise* [online]. 2007 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/emise/poletavy-prach-%E2%80%93-neviditelna-hrozba/>
- [5] Poléťavý prach - PM10. In: *Arnika* [online]. 2014 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://arnika.org/poletavy-prach-pm10>
- [6] Imise. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Imise>
- [7] BRZEZINA, Jáchym. Závěry a doporučení WHO – kvalita ovzduší. In: *ČHMÚ Brno* [online]. 2018, 13. 12. 2018 [cit. 2019-11-08]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/12/13/zavery-a-doporuceni-who-kvalita-ovzdusi/>
- [8] TESAŘOVÁ, Zdeňka. *Zákon o dani silniční: Komentář s příklady*. Wolters Kluwer, 2013. ISBN 978-80-7357-277-8. Dostupné také z: <https://obchod.wolterskluwer.cz/cz/zakon-o-dani-silnicni-komentar-s-priklady.p1183.html>
- [9] Emisní norma Euro. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Emisn%C3%AD\\_norma\\_Euro](https://cs.wikipedia.org/wiki/Emisn%C3%AD_norma_Euro)
- [10] Euro 6. In: *Šmucler: Magazín* [online]. 2016 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: <https://www.smucler.cz/blog/euro-6/>
- [11] European emission standards. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-12-11]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/European\\_emission\\_standards](https://en.wikipedia.org/wiki/European_emission_standards)
- [12] VAVERKA, Lukáš. Filtr pevných částic mají už skoro všechna benzinová auta. Bát se ho ale nemusíte. In: *Autobible* [online]. 2019 [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/filtr-pevnych-castic-maji-uz-skoro-vsechna-benzinova-auta-bat-se-nemusite/>

- [13] Gasoline Particulate Filter. In: *AECC: Association for Emission Control by Catalyst* [online]. 1978 [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://www.aecc.eu/key-topics/gasoline-particulate-filter/>
- [14] Filtry pevných částic i pro benzin. In: *UAMK* [online]. 2016 [cit. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://www.uamk.cz/garaz/1443-filtry-pevných-castic-i-pro-benzin>
- [15] Evropa zpřísňuje emisní normy. In: *Tech Magazín: Nejrychlejší spojení se světem průmyslové techniky* [online]. 2010 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/47244>
- [16] Emisní norma EURO: Emisní norma Euro platná v zemích Evropské unie stanovuje limitní hodnoty výfukových exhalací. In: *Autolexicon.net: S námi uvidíte pod kapotu* [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>
- [17] Ultra-low-emisí vozidla - Ultra-low-emission vehicle. In: *QWE wiki* [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: [https://cs.qwe.wiki/wiki/Ultra-low-emission\\_vehicle](https://cs.qwe.wiki/wiki/Ultra-low-emission_vehicle)
- [18] Ropné firmy vozí do Afriky toxické palivo, šetří na dvojí kvalitě. In: *IDNES* [online]. 2018 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: [https://www.idnes.cz/zpravy/zahranicni/afrika-ropne-spolecnosti-dovazi-toxicke-palivo.A180712\\_130950\\_zahranicni\\_mko](https://www.idnes.cz/zpravy/zahranicni/afrika-ropne-spolecnosti-dovazi-toxicke-palivo.A180712_130950_zahranicni_mko)
- [19] NEDC a WLTP. In: *Audi* [online]. [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.audi.cz/wltp/nedc-a-wltp>
- [20] DUSIL, Tomáš. Nový homologační emisní test WLTP: Opravdu znamená konec lhaní? In: *Auto.cz* [online]. 2017 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/novy-homologacni-emisni-test-wltp-opravdu-znamená-konec-lhani-110305>
- [21] Global WLTP roll-out for more realistic results in fuel consumption. In: *VDA: Verband der Automobilindustrie* [online]. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.vda.de/en/topics/environment-and-climate/Global-WLTP-roll-out-for-more-realistic-results-in-fuel-consumption/WLTP-What-distinguishes-the-new-test-procedure-from-the-old-one.html>
- [22] Eko daň – Ekologická daň při registraci vozidla. In: *Ekologická likvidace vozidel: Kvalitní služby - rychle a snadno* [online]. [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.likvidace-vozidla-praha.cz/eko-dan-ekologicka-dan-pri-preregistraci-vozidla/>
- [23] PICKERING, Kevin T. a Lewis A. OWEN. *An Introduction to Global Environmental Issues*. Second edition. Velká Británie, USA, Kanada: Routledge, 1997. ISBN 978-0-415-14098-0.
- [24] HROMÁDKO, PH.D., Jan. Spalovací motory. In: *Slideplayer* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/11273508/>

- [25] Vzduch. In: *Chemie* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <http://ucebnicechemie.wz.cz/index.php?sloucenina=vzduch>
- [26] Voda v přírodě. In: *SmVaK: Severomoravské vodovody a kanalizace Ostrava a.s.* [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://smvak.cz/voda-v-prirode>
- [27] ŽÁK, Michal. Přehled látek, které způsobují znečištění ovzduší. In: *In-počasi* [online]. 2017 [cit. 2019-11-18]. Dostupné z: <https://www.in-pocasi.cz/clanky/teorie/kvalita-ovzdusi-19.2.2017/>
- [28] Oxidy síry. In: *Arnika* [online]. 2014 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://arnika.org/oxidy-siry>
- [29] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Výkladový automobilový slovník*. 4. aktualizované vydání. Brno: Computer Press, 2011. ISBN 978-80-251-3725-3
- [30] Katalyzátor výfukových plynů. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2019-12-20]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Katalyz%C3%A1tor\\_v%C3%BDfukov%C3%BDch\\_plyn%C5%AF](https://cs.wikipedia.org/wiki/Katalyz%C3%A1tor_v%C3%BDfukov%C3%BDch_plyn%C5%AF)
- [31] MIHÁLIK, Miro. Filtry pevných částic se stěhují do benzinových motorů. Jsou strašákem? In: *Autorevue* [online]. 2018 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/filtry-pevnych-castic-se-stehuji-do-benzinovy-ch-motoru-je-sou-strasakem>
- [32] DUSIL, Tomáš. Přímé vs. nepřímé vstřikování benzínu: Modernější technologie nemusí být vždy lepší. In: *Auto.cz* [online]. 2018 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/prime-vs-neprime-vstrikovani-benzinu-modernejsi-technologie-nemusi-byt-vzdy-lepsi-121703>
- [33] BROŽA, Petr a Marek LITZMAN. Přímý vstřik benzínu: revoluce, nebo evoluce? In: *Autorevue.cz* [online]. 2005 [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: [https://www.autorevue.cz/primy-vstrik-benzinu-revoluce-nebo-evoluce\\_2](https://www.autorevue.cz/primy-vstrik-benzinu-revoluce-nebo-evoluce_2)
- [34] DUSIL, Tomáš. Vstřikování benzínu včera a dnes: Přímý, nebo nepřímý vstřik? A co třeba oba? In: *Auto.cz* [online]. 2017 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/vstrikovani-benzinu-vcera-a-dnes-primy-nebo-neprimy-vstrik-a-co-treba-oba-102151>
- [35] DUSIL, Tomáš. Přímé vs. nepřímé vstřikování benzínu: Modernější technologie nemusí být vždy lepší. In: *Auto.cz* [online]. 2018 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/prime-vs-neprime-vstrikovani-benzinu-modernejsi-technologie-nemusi-byt-vzdy-lepsi-121703>
- [36] MAJEWSKI, W. Addy. Gasoline Particulate Filters. In: *DieselNet Technology Guide* [online]. [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: [https://dieselnet.com/tech/gasoline\\_particulate\\_filters.php](https://dieselnet.com/tech/gasoline_particulate_filters.php)
- [37] STOREY, John ME, Scott J. CURRAN, Samuel A. LEWIS, et al. Evolution and current understanding of physicochemical characterization of particulate matter

- from reactivity controlled compression ignition combustion on a multicylinder light-duty engine. In: *Sage Journals: International Journal of Engine Research* [online]. 2016 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1468087416661637>
- [38] Jak vypadá keramické sítko DPF filtru. In: *DPFfap* [online]. 2014 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.dpffap.cz/clanky-2/jak-vypada-keramicke-sitko-dpf-filtru/>
- [39] KORNEEV, Svyatoslav a Simona ONORI. *MODELING THE TRANSPORT DYNAMICS IN GASOLINE PARTICULATE FILTERS*. ASME, 2018. ISBN 978-0-7918-5190-6. Dostupné také z: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10108274>
- [40] Gasoline particulate filters: Engineering for lower vehicle emissions. In: *In Sight: From Infineum International Limited* [online]. 2018 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.infineuminsight.com/en-gb/articles/passenger-cars/gasoline-particulate-filters>
- [41] Exhaust filtration media. In: *Bekaert: Better together* [online]. [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://www.bekaert.com/en/products/automotive/exhaust-systems/exhaust-filtration-media>
- [42] Oxidation of Soot (Printex® U) in Particulate Filters Operated on Gasoline Engines. In: *Springer Link* [online]. 2015 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40825-015-0011-1>
- [43] Honeycomb Ceramic Cordierite DPF For Catalytic Converters. In: *Ceramic substrate* [online]. 2013 [cit. 2020-02-26]. Dostupné z: <https://www.ceramic-substrate.com/sale-1338415-honeycomb-ceramic-cordierite-dpf-for-catalytic-converters.Html>
- [44] BACHELET, E., R. BRUNETAUD, D. COUTSOURADIS, et al. *High Temperature Materials for Power Engineering*. Dordrecht ; Boston ; London : Kluwer Academic, cop. 1990. Dordrecht ; Boston ; London: Kluwer Academic Publishers, 1990. ISBN 978-0-7923-0927-7.
- [45] Kapitola II. KATALYTICKÉ A FILTRAČNÍ MATERIÁLY. In: *Investice do rozvoje vzdělávání* [online]. 2009 [cit. 2019-11-28]. Dostupné z: <http://projekt150.havet.cz/node/134>
- [46] LIETTI, Luca a Lidia CASTOLDI, ed. *NOx Trap Catalysts and Technologies: Fundamentals and Industrial Applications*. Royal Society of Chemistry, 2018. ISBN 9781782629313
- [47] HROMÁDKO, Jan, Jiří HROMÁDKO, Vladimír HÖNIG a Petr MILER. *Spalovací motory: Komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2011. ISBN 9788024774787
- [48] FCD SERVISY. Test diferenčního senzoru tlaku filtru částic (DPF/FAP) [online]. 2016 [cit. 2019-12-08] Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=DCn8aDQcAuQ>

- [49] Právní posouzení odstraňování filtrů pevných částic. In: *EPrávo* [online]. 2016 [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <https://www.epravo.cz/top/clanky/pravni-posouzeni-odstranovani-filtru-pevnych-castic-103866.html>
- [50] Catalysed Gasoline Particulate Filter (cGPF). In: *Umicore: Automobile Catalysts* [online]. [cit. 2019-12-05]. Dostupné z: <https://ac.umicore.com/en/technologies/gasoline-particulate-filter/>
- [51] DUSIL, Tomáš. Všechno, co potřebujete vědět o částicových filtrech pro zážehové motory. Čím se liší od filtrů pro diesely? In: *Auto.cz* [online]. 2018 [cit. 2019-12-6]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/vsechno-co-potrebuje-vedet-o-casticovych-filtrech-pro-zazehove-motory-cim-se-lisi-od-filtru-pro-diesely-124295>
- [52] STONE, Richard. *Introduction to Internal Combustion Engines*. 2nd ed. Brunel University Uxbridge, Middlesex: Macmillan, 1992. ISBN 0-333-55083-8
- [53] TENNECO DEVELOPS GASOLINE PARTICULATE FILTER TECHNOLOGY FOR EUROPEAN LIGHT VEHICLES. In: *Tenneco* [online]. 2015 [cit. 2020-04-16]. Dostupné z: [https://www.tenneco.com/tenneco\\_develops\\_gasoline\\_particulate\\_filter\\_technology\\_for\\_european\\_light\\_vehicles/](https://www.tenneco.com/tenneco_develops_gasoline_particulate_filter_technology_for_european_light_vehicles/)
- [54] Ukázky naší práce. In: *DPF - FM* [online]. Facebook, 2019 [cit. 2020-01-23]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/dpffm/photos/a.118200272921005/118197739587925>
- [55] Real-Driving Emissions from a Gasoline PHEV with and without a GPF. In: *AECC: Association for Emission Control by Catalyst* [online]. 2018 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.aecc.eu/wp-content/uploads/2018/02/180221-AECC-Ricardo-PHEV-programme-AVL-forum-final.pdf>
- [56] Filtry pevných částic (DPF/FAP). In: *Elit: Více než autodíly* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://www.elit.cz/produkty/filtry-pevnych-castic-dpffap.html>
- [57] Oxid siřičitý. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid\\_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Oxid_si%C5%99i%C4%8Dit%C3%BD)

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>Al</i>	Hliník
<i>As</i>	Arsen
<i>Cd</i>	Kadmium
<i>cGPF</i>	Catalysed gasoline particulate filter
<i>CO</i>	Oxid uhelnatý
<i>CO<sub>2</sub></i>	Oxid uhličitý
<i>Cr</i>	Chrom
<i>DPF</i>	Diesel particulate filter
<i>FAP</i>	Filtre à particules
<i>Fe</i>	Železo
<i>GPF</i>	Gasoline particulate filter
<i>H<sub>2</sub>O</i>	Voda
<i>HC</i>	Uhlovodíky
<i>LEV</i>	Low Emission Vehicle
<i>N<sub>2</sub></i>	Dusík
<i>NEDC</i>	New European Driving Cycle
<i>NO<sub>x</sub></i>	Oxidy dusíku
<i>OPF</i>	Otto particle filter
<i>Pb</i>	Olovo
<i>PM</i>	Particulate matter
<i>RDE</i>	Real Driving Emissions
<i>SiC</i>	Karbid křemíku
<i>SO<sub>2</sub></i>	Oxid siřičitý
<i>TFSI</i>	Turbo fuel Stratified injection
<i>TWC</i>	Three-way-catalyst
<i>WHO</i>	World Health Organization
<i>WLTC</i>	The Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles
<i>WLTP</i>	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure
<i>Y</i>	Ytrium