



# 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 POHONNÉ JEDNOTKY

GASOLINE PARTICULATE FILTERS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

František Kadlček

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

BRNO 2019

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	<b>František Kadlček</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Radim Dundálek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

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 pohonné jednotky**

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

Osvojení základních pojmů zadané problematiky. Vysvětlení principu činnosti 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 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o pevných částicích, jejich vzniku a škodlivosti, přičemž se zaměřuje na filtry, které tyto karcinogenní částice zachytávají z výfukových plynů vozidel. Práce taktéž uvádí emisní standardy, které ovlivňují požadavky na filtrační efektivitu zařízení. Dále jsou popsány funkce specifických součástí a vysvětlen princip regenerace filtru.

## KLÍČOVÁ SLOVA

pevné částice, EURO normy, GPF, katalytická vrstva, regenerace filtru

## ABSTRACT

This research deals with particulate matter, its origin and harmfulness, focusing on filters that trap these carcinogenic particles from exhaust gases. The work also lists emission standards that affect the requirements for filtering efficiency of the equipment. Furthermore, the functions of specific components are described and the principle of filter regeneration is explained.

## KEYWORDS

particulate matter, EURO standards, GPF, catalytic layer, filter regeneration

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KADLČEK, F. *Filtry pevných částic pro zážehové pohonné jednotky*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 39 s. Vedoucí práce Radim Dundálek.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

František Kadlček

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D. za cenné rady, které pomohly ke zlepšení obsahové stránky této práce. Zvláště děkuji rodičům za všestrannou podporu během studia.

## OBSAH

Úvod .....	11
1 Pevné částice.....	12
1.1 Vznik pevných částic .....	13
1.2 Limity pro pevné částice v ovzduší a dodržování imisních limitů v ČR.....	13
1.2.1 Suspendované částice PM <sub>10</sub> .....	14
1.2.2 Suspendované částice PM <sub>2,5</sub> .....	14
1.3 Dopad pevných částic na lidské zdraví.....	15
2 Emisní limity .....	17
2.1 Znečišťující látky a jejich dopad na zdraví.....	17
2.1.1 Pevné částice.....	17
2.1.2 Oxid uhelnatý .....	17
2.1.3 Oxidy dusíku .....	17
2.1.4 Oxid siřičitý .....	18
2.1.5 Uhlovodíky .....	18
2.1.6 Benzeny .....	18
2.1.7 Olovo .....	18
2.2 Emisní normy EURO .....	18
2.3 Historie norem Euro.....	19
2.3.1 Euro 1 .....	20
2.3.2 Euro 2 .....	20
2.3.3 Euro 3 .....	20
2.3.4 Euro 4 .....	20
2.3.5 Euro 5 .....	20
2.3.6 Euro 6 .....	21
2.4 Metodika WLTP .....	21
3 Vysvětlení principu činnosti filtru pevných částic pro zážehové motory .....	23
3.1 Zachycení pevných částic .....	23
3.1.1 Difuze .....	23
3.1.2 Zachycení.....	24
3.1.3 Zaklínění.....	25
3.1.4 Prosívání .....	25
3.2 Zajištění nízkého poklesu tlaku .....	26
3.3 Porovnání s filtrem pevných částic pro vznětové motory.....	26
4 Speciální druh použité matrice ve filtrech GPF – kovová matrice od společnosti Bekaert.....	27



---

5	Specifické součásti - keramika, katalytická vrstva .....	28
5.1	Kordieritová keramika .....	28
5.2	Katalyzátor a katalytická vrstva.....	29
6	Regenerace filtru.....	31
6.1	Pasivní regenerace .....	31
6.2	Nucená regenerace .....	31
7	Příklady řešení systému pro zpracování výfukových plynů .....	33
	Závěr.....	35
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	39

## ÚVOD

Emise škodlivin vzniklých při nedokonalém spalování v motorech automobilů přispívá ke znečištění ovzduší, které v současné době představuje vážný problém. Zvláště nebezpečné jsou prachové neboli pevné částice, které jsou součástí výfukových exhalátů, neboť způsobují závažné zdravotní potíže. Donedávna byla tvorba pevných částic problematická pouze u vozidel se vznětovými motory, ale s příchodem technologie přímého vstřikování u motorů benzinových se jeho produkce pevných částic mnohonásobně zvětšila. Tím se stalo zavedení filtrů, které z výfukových plynů pevné částice odstraňují, nezbytné i pro vozidla s benzinovými spalovacími jednotkami.

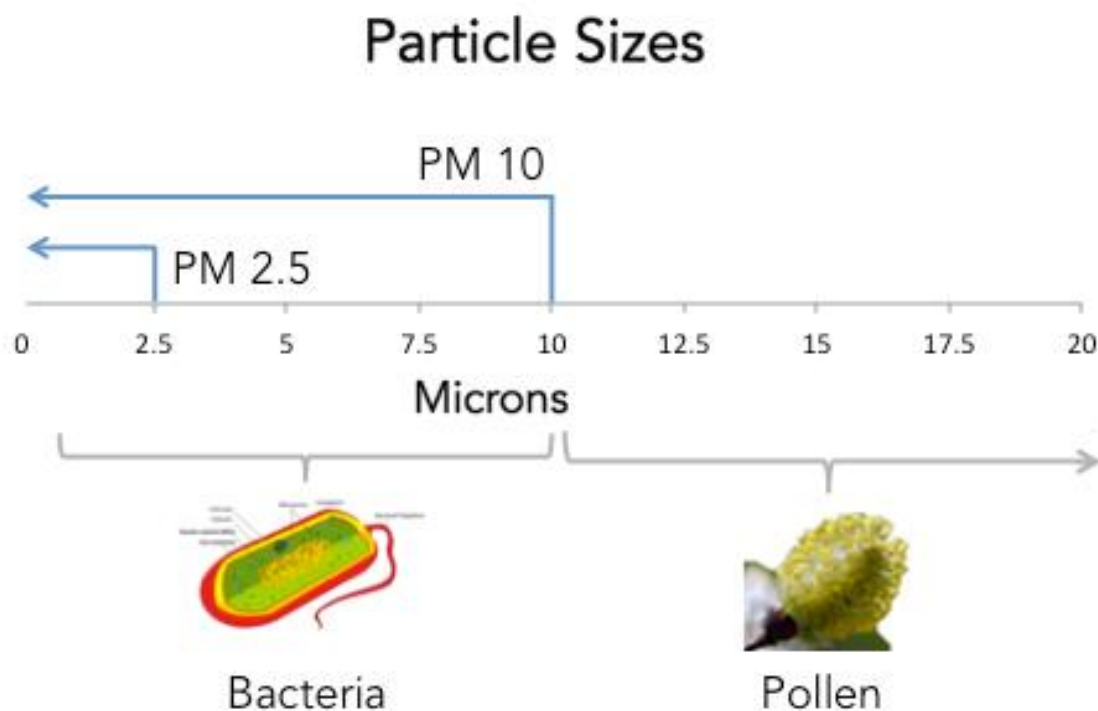
Začátek této bakalářské práce je věnován pevným částicím, jež jsou hlavním důvodem vzniku filtrů pevných částic. Pozornost je taktéž věnována emisním normám, protože udávají limitní hodnoty produkovaných pevných částic a jejich pravidelné zpřísnování ovlivňuje požadavky na filtrační efektivitu zařízení. Tato práce se ale především zaměřuje na samotné filtry pevných částic pro zážehové pohonné jednotky.

Cílem této bakalářské práce je zasvěcení čtenáře do problematiky související s produkcí pevných částic, vysvětlení principu činnosti filtru pevných částic a objasnění funkcí jednotlivých součástí. Dalším z cílů práce je předložit čtenáři stručný přehled filtrů dle použité matrice a uvést příklad zařazení filtru do systému pro zpracování výfukových plynů.

## 1 PEVNÉ ČÁSTICE

Kvalitu života se lidé snaží zlepšovat již od počátku dějin, aby byl především jednodušší, ale zároveň i více produktivní a praktický. Při tomto vývoji významně vzrostl také rozvoj antropogenních činností (původcem je člověk), který má dopad na kvalitu ovzduší. Se vzduchem, obsahujícím různé chemické sloučeniny a nabývajícím mnohé fyzikální charakteristiky, jsme v kontaktu každý den. Tento každodenní kontakt se vzduchem a vším, co obsahuje, například pevné částice, může mít negativní vliv na lidské zdraví. Poletavý prach neboli pevné částice (PM<sup>1</sup>) emitované do ovzduší jsou jednou z hlavních kategorií znečišťujících látek v oblasti znečišťování ovzduší. Vysoká koncentrace pevných částic může dokonce vést k jevu zvaném prachová bouře, kde koncentrace pevných částic dosahuje 6000  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  [1].

Pevné částice se skládají z částic různých látek. Jsou tak lehké, že mohou ve vzduchu poletovat několik hodin nebo i dnů. Částice s menším průměrem v ovzduší zůstávají zpravidla déle než částice větší. Nejmenším z nich může trvat i týdny, než se usadí. Podle velikosti se rozdělují do kategorií PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1,0</sub>. Index udává horní limit průměru částice. Např. PM<sub>2,5</sub> jsou částice do průměru 2,5 mikrometrů. Mohou být tvořeny komplexní směsí pevných i kapalných částic, které bývají jak organické, tak anorganické. V PM mohou být obsaženy látky uhlíku (sazí), síranů, dusičnanů, ale i organických látek a polyaromatických uhlovodíků [2].



Obr. 1 Porovnání velikosti pevné částice, bakterie a pylu [3]; particle sizes – velikosti částic; microns – mikrometry; bacteria – bakterie; pollen – pyl;

<sup>1</sup> particulate matter

## 1.1 VZNIK PEVNÝCH ČÁSTIC

Pevné částice vznikají v malém množství v přírodě, například pyly, sopečné erupce, prach ze Sahary nebo lesní požáry. V dnešní době je ale vznik nadměrného množství částic způsoben především antropogenní činností, a to především různými spalovacími procesy. Na tuto produkci má podstatný vliv několik faktorů, mezi které patří rozmach automobilové dopravy, vytápění domácností nekvalitními palivy, tepelné elektrárny nebo také spalování odpadů. Ve spalovacích motorech částice vznikají spolu s dalšími škodlivými látkami vlivem nedokonalého spalování [2][4].

## 1.2 LIMITY PRO PEVNÉ ČÁSTICE V OVZDUŠÍ A DODRŽOVÁNÍ IMISNÍCH LIMITŮ V ČR

Hodnoty měření pevných částic se nejčastěji udávají jako jejich denní nebo roční průměr výskytu v atmosféře, a to v mikrogramech na metr krychlový ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Negativní účinky na zdraví může mít i velmi nízká koncentrace v ovzduší. Není známa žádná úroveň koncentrace, pod kterou by částice již nebyly nebezpečné. Z toho důvodu je hlavním cílem Světové zdravotnické organizace<sup>2</sup> (SZO) snížení obsahu poletavého prachu v ovzduší na co nejmenší hodnoty. Avšak nulové hodnoty nebude možné nikdy dosáhnout, neboť vznik částic není jen produkcí antropogenních činností, ale i přirozených přírodních událostí [5].

SZO doporučuje dodržovat následující hodnoty:

- PM<sub>2,5</sub> – roční průměr: 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 
  - 24h průměr: 25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
- PM<sub>10</sub> – roční průměr: 20  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 
  - 24h průměr: 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (připouští se překročení 35x za rok)

Imisní limit v České republice:

- PM<sub>2,5</sub> – roční průměr: 25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 
  - 24h průměr: není stanoven
- PM<sub>10</sub> – roční průměr: 40  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 
  - 24h průměr: 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (připouští se překročení 35x za rok)

Dle poznatků SZO snížení koncentrací PM<sub>2,5</sub> na doporučenou hodnotu 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  v ročním průměru by snížilo procento úmrtnosti v důsledku znečištěného ovzduší o 15 %. Organizace se rovněž domnívá, že i v oblastech, kde je dodržována doporučená hodnota poletavého prachu, je průměrná délka života o 8,6 měsíce kratší než v oblastech, kde je antropogenní koncentrace PM nulová [5].

V České republice se nachází 143 stanic, které měří koncentraci PM<sub>10</sub> v ovzduší a 79 stanic měřících PM<sub>2,5</sub>. Dle dostupných informací z roku 2017 lze vyčíst hodnoty překračující limity pro jednotlivé oblasti ČR [5].

---

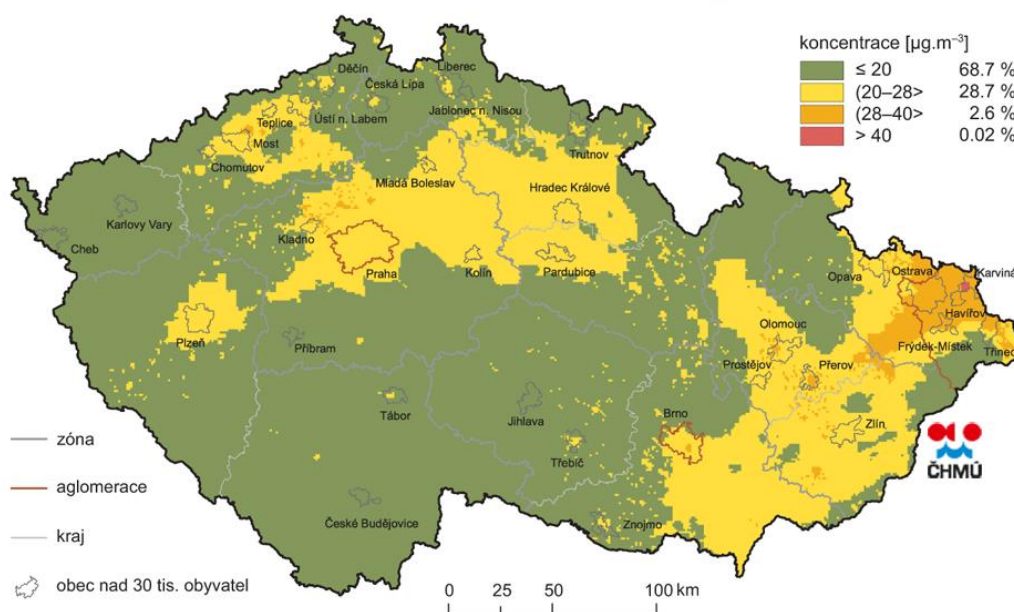
<sup>2</sup> Též známá pod zkratkou WHO (World Health Organization)

### 1.2.1 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE PM<sub>10</sub>

Imisní limit  $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro roční průměr stanovený Českou republikou byl v roce 2017 překročen pouze na dvou stanicích, obě se nacházejí v Moravskoslezském kraji. Avšak hodnota doporučená organizací SZO je poloviční, tedy  $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Tento limit splnilo pouhých 39 stanic (27,3 %) [5].

Denní neboli 24hodinové imisní limity je možno překročit maximálně 35krát ročně. Celkem na 50 stanicích (35,0 %) tyto standardy nebyly dodrženy [5].

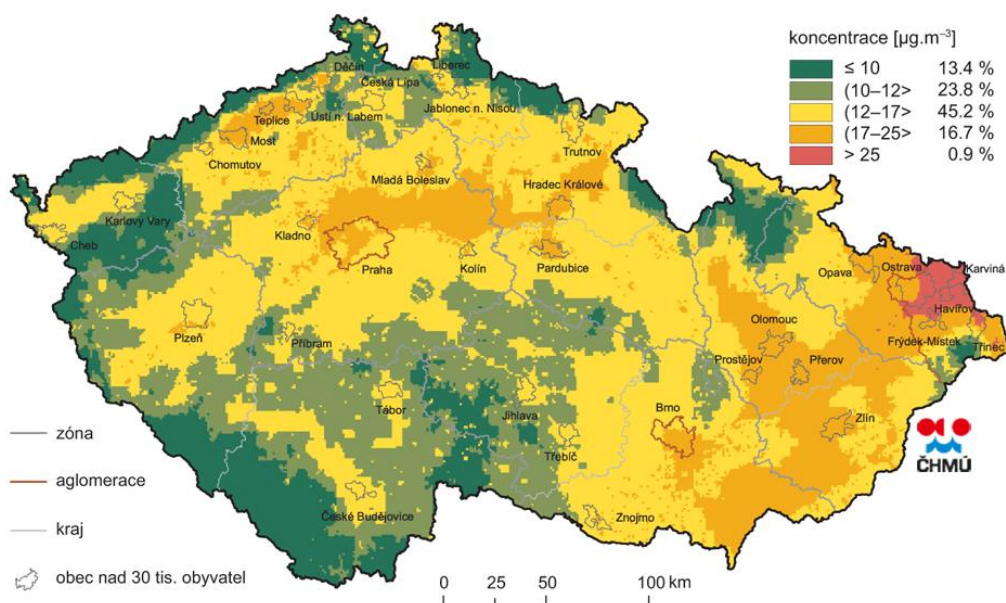
Evropská unie se chystá imisní limity zpřísnit, aby nejvyšší počet překročení limitu nebyl vyšší než sedmkrát za rok. Tím by se dosavadní kritérium pětatřiceti překročení za rok výrazně zpřísnilo [2].



Obr. 2 Pole roční průměrné koncentrace PM<sub>10</sub>, 2017 [6]

### 1.2.2 SUSPENDOVANÉ ČÁSTICE PM<sub>2,5</sub>

Imisní limit  $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro roční průměr stanovený Českou republikou byl v roce 2017 překročen na deseti stanicích (12,7 % stanic), opět se všechny nachází v Moravskoslezském kraji. Dle novely zákona bude v roce 2020 hodnota snížena na  $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Tyto hodnoty by nedodržel 26 stanic. Nicméně organizace SZO doporučuje mnohem nižší hodnoty ( $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), které by byly schopny splnit pouhé tři stanice [5].



Obr. 3 Pole roční průměrné koncentrace  $\text{PM}_{2,5}$ , 2017 [6]

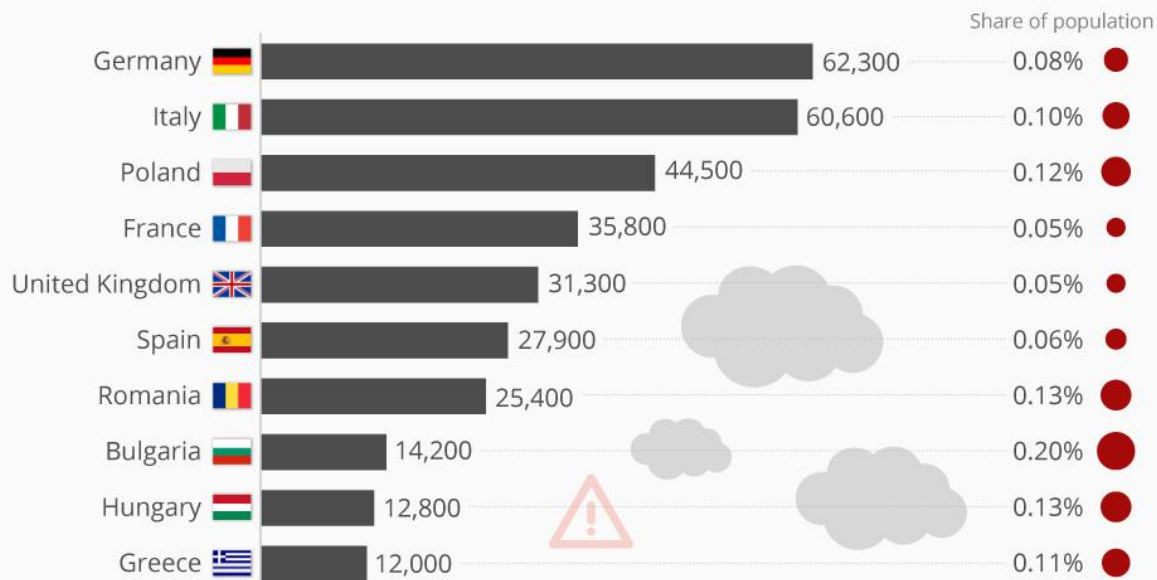
### 1.3 DOPAD PEVNÝCH ČÁSTIC NA LIDSKÉ ZDRAVÍ

Znečištění ovzduší pevnými částicemi je pro zdraví nebezpečnější v porovnání s kteroukoliv jinou znečišťující látkou, především kvůli částicím s malými průměry, které jsou zvláště nebezpečné. Částice větších průměrů, nabývající více jak 10 mikrometrů, se většinou zachytí již na nosní sliznici. Částice kategorie  $\text{PM}_{10}$ , tedy částice menší, jsou zastaveny v průduškách. Jak již bylo zmíněno, nejvíce nebezpečné částice jsou ty nejmenší. Jedná se o kategorie  $\text{PM}_{2,5}$  a  $\text{PM}_{1,0}$ , které se při hlubším nádechu mohou dostat až do plicních sklípků nebo krevního řečiště. Škodlivost prachových částic je způsobena mechanickým zanesením průdušek a plic, ale mnohem větší problém představuje přítomnost jedovatých a rakovinotvorných látek přilnutých k částicím prachu, jako je chrom, arzen, nikl, kadmium, olovo či mangan. Dlouhotrvající expozice poletavého prachu zapříčiňuje kardiovaskulární poruchy, astma, plicní choroby, poškození zdraví nenarozených dětí v prvním měsíci těhotenství nebo i rakovinu plic [2][5].

Přestože se údaje stále mění, nedávná data ukazují, že znečištění ovzduší zapříčiňuje každým rokem předčasné úmrtí u více než 5,5 milionů lidí po celém světě. Uvádí se, že za to jsou zodpovědné právě pevné částice menší než 2,5 mikrometru [7].

## Where EU air pollution kills the most people

EU28 countries with the most premature deaths attributable to particulate matter (2015)



@StatistaCharts Source: European Environment Agency

statista

Obr. 4 Přehled států EU s nejvyššími počty předčasných úmrtí, kterým je příčinou obsah pevných částic v ovzduší, 2015 [8]; Germany – Německo; Italy – Itálie; Poland – Polsko; France – Francie; United Kingdom – Spojené království; Spain – Španělsko; Romania – Rumunsko; Bulgaria – Bulharsko; Hungary – Maďarsko; Greece – Řecko; Share of population – část populace

## 2 EMISNÍ LIMITY

Při dnešním rapidním vývoji technologie nesmíme zapomínat především na ochranu lidského zdraví a také zdraví celé planety. Z tohoto důvodu vznikly emisní normy, jejichž hlavním cílem je zachování standardů kvality ovzduší, a to pomocí regulace znečišťujících látek uvolňovaných do ovzduší z automobilních exhalátů, ale také z exhalátů jiných transportních zařízení, stavebních strojů apod. Celosvětově je zavedeno více emisních norem, které platí pro určité státy.

V Evropské unii jsou zavedeny normy EURO, ty dále rozdělují automobily podle druhu a hmotnosti (automobily osobní, nákladní, autobusy atd.). V USA jsou pro osobní automobily a lehké nákladní automobily zavedeny normy Tier. Jiné normy jsou zavedeny v Asii, Jižní Americe atd. Všechny tyto regulace se od sebe více či méně liší, ale všechny mají stejný cíl, a tím je snaha o zachování nejvyšší možné kvality ovzduší.

Zpočátku emise pevných částic pro benzinové motory regulovány nebyly, protože běžné motory s nepřímým vstřikováním, kde se palivo vstřikuje do sacího potrubí, produkují nepodstatné množství částic. Nicméně po příchodu benzinových motorů s přímým vstřikováním, kde se palivo vstřikuje přímo do spalovací komory, již bylo nutné zavedení norem i pro motory benzinové, protože právě systém s přímým vstřikem vykazuje mnohem vyšší produkci částic menších v porovnání s konvenčními motory [7].

### 2.1 ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY A JEJICH DOPAD NA ZDRAVÍ

#### 2.1.1 PEVNÉ ČÁSTICE

U pevných částic ve spojení s lidským zdravím je nejdůležitějším aspektem jejich velikost. Platí zde pravidlo, čím menší, tím nebezpečnější, neboť při kritické velikosti je částice tak malá, že nedojde k jejímu zachycení na sliznici a dostávají se přímo do plic. Na povrchu pevných částic mohou být navázány i další škodlivé látky nebo taktéž částice prachu, popelu, rzi atd. Poté mohou způsobovat potíže s dýcháním, nebo dokonce i kardiovaskulární onemocnění. Vznik pevných částic způsobuje spalování nafty, ale i benzin při použití motoru s přímým vstřikováním [9].

#### 2.1.2 OXID UHELNATÝ

Oxid uhelnatý je jedovatá látka, která vzniká nedokonalým spalováním. Zabraňuje červeným krvinkám na sebe vázat kyslík a tím způsobuje bolesti hlavy, problémy s dýcháním, nebo dokonce i smrt [9].

#### 2.1.3 OXIDY DUSÍKU

Oxidy dusíku vznikají při každém spalování. Jsou to látky, které zapříčiňují oxidaci atmosféry, vznik kyselých dešťů a po reakci s uhlovodíky narušují ozonovou vrstvu. Na lidské zdraví má negativní účinky zejména oxid dusičitý ( $\text{NO}_2$ ), který dráždí sliznici nebo dýchací cesty. Může také způsobovat větší kazivost zubů nebo záněty spojivek [9].



#### 2.1.4 OXID SIŘIČITÝ

Oxid siřičitý je nežádoucí z více důvodů. Způsobuje korozi, vznik ozonu a kyselých dešťů. Jelikož je jeho základem síra, tak snižuje i účinnost katalyzátoru [9].

#### 2.1.5 UHLOVODÍKY

Taktéž uhlovodíky vznikají nedokonalým spalováním paliva. Jejich negativním účinkem je, jak již bylo zmíněno, že po fotochemické oxidaci s  $\text{NO}_x$  vzniká také ozon. Přestože je pro život nepostradatelný, neboť vytváří bílé krvinky, je také velmi toxický a v nižších koncentracích může způsobovat pálení očí, suchost sliznic a potíže s dýcháním. Má velmi charakteristický zápach podobný chloru [9].

#### 2.1.6 BENZENY

Ve spojení s automobily benzen vzniká jen ve velmi malém množství. Vzniká nejen jako výsledek nespáleného paliva, tedy nafty nebo benzínu, ale také odpařováním benzínu v palivových nádržích. Proto jsou auta opatřena odvětrávacím systémem přes aktivní uhlí, které benzen odstraňuje. Benzen je jedovatý, může podporovat nádorové onemocnění nebo také vznik leukémie [9].

#### 2.1.7 OLOVO

Olovo bylo přidáváno do benzínu pro jeho mazací účinky, aby se zvýšila životnost ventilových sedel. Olovnaté benziny se přestaly používat koncem osmdesátých let, neboť se olovo hromadí v lidském těle a má nežádoucí účinky na krevní buňky [9].

### 2.2 EMISNÍ NORMY EURO

Ke schválení automobilu pro provoz na silnici (tzv. homologace) musí nutně splňovat řadu norem, mezi které se řadí i normy EURO. Tyto normy určují přesné množství spalin, které může automobil produkovat. Hlavním cílem je redukce obsahu oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ), uhlovodíků (HC) a také pevných částic (PM) v exhalátech motorových vozidel. Tyto hodnoty se uvádějí v miligramech na jeden ujetý kilometr ( $\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$ ). Znečišťujícími látkami, které automobily vypouští, je ale více např. sirné sloučeniny nebo oxid uhličitý, který bývá zmiňován také s globálním oteplováním. EURO normy tyto látky sice zatím neřeší, ale s největší pravděpodobností budou do norem v dohledné době také zařazeny [10][11].

Jak již bylo zmíněno, EURO normy se rozdělují podle druhu automobilu nebo jeho hmotnosti. Velmi důležité rozdělení je ale také dle typu motoru, který je buď zážehový, nebo vznětový. Stanovené maximální hodnoty pro jednotlivé skupiny jsou tedy nastaveny různě. Je zřejmé, že velký vznětový motor umístěný v nákladním automobilu musí splňovat jiné požadavky narozdíl od malého, například litrového motoru, který pohání automobil osobní. Všechna nově vyráběná vozidla určená pro evropský trh musí splňovat aktuální emisní normy EURO. Nadále jsou emise výfukových plynů kontrolovány na stanicích technické kontroly každé dva roky během jeho provozu [10][11].

Tab. 1 Emisní limity pro osobní automobily s benzinovým motorem v  $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$  kromě PN ( $1\cdot\text{km}^{-1}$ ) [12]

Norma	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	EURO 5a	EURO 6b	EURO 6c	EURO 6d-TEMP	EURO 6d
Zavedení normy pro nové modely aut	Červenec 1992	Leden 1996	Leden 2000	Leden 2005	Září 2009	Září 2014	Září 2017	Září 2017	Leden 2020
Zavedení normy pro všechna nová auta	Červenec 1993	Leden 1997	Leden 2001	Leden 2006	Leden 2011	Září 2015	Září 2018	Září 2019	Leden 2021
Zkušební cyklus / Zkušební postup	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	NEDC	WLTC	WLTC/RDE	WLTC/RDE
CO	2720	2200	2300	1000	1000	1000	1000	1000/-	1000/-
(HC+NO <sub>x</sub> )	970	500	-	-	-	-	-	-/-	-/-
HC (NMHC)	-	-	200	100	68	68	68	68/-	68/-
NO <sub>x</sub>	-	-	150	80	60	60	60	60/126	60/90
PM	-	-	-	-	*5	*4,5	*4,5	*4,5/-	*4,5/-
PN	-	-	-	-	-	*6·10 <sup>12</sup>	*6·10 <sup>12</sup>	*6·10 <sup>12</sup> / 9·10 <sup>11</sup>	*6·10 <sup>12</sup> / 9·10 <sup>11</sup>

\*platí pouze pro motory s přímým vstřikováním

### 2.3 HISTORIE NOREM EURO

V Kalifornii roku 1968 vznikla první norma zabývající se exhaláty automobilů. Mnohem později v červenci roku 1992 vznikla první norma Euro určená pro nově homologovaná auta. Krátce na to v lednu 1993 byla norma závazná již pro všechna auta, to znamená i modely, které byly homologované před červencem 1992. Touto dobou počínaje, objeví se nová emisní norma

téměř pravidelně každé čtyři roky. Normy se od sebe odlišují číselným označením a většinou platí, že nová norma s sebou přináší přísnější požadavky [9][10].

Tyto první normy byly zřízeny především za účelem redukce emisí oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) a uhlovodíků (HC). Pro jejich splnění bylo nezbytné, aby se začal používat bezolovnatý benzín a zavedení trojcestného (správněji trojčinného) katalyzátoru s kyslíkovým senzorem pro zpracování výfukových plynů. U naftových motorů se začaly zavádět oxidačně-redukční katalyzátory [9].

### 2.3.1 EURO 1

Emise oxidů dusíku a uhlovodíků se zpočátku nerozlišovaly, a tak se do příchodu normy Euro 3 pracovalo s jejich výsledným součtem. Euro 1 rovněž nerozlišovala motory zážehové a vznětové, proto měla pro oba typy stejné požadavky. Vyjma požadavků na CO a kombinaci HC+NO<sub>x</sub> zde byl limit i pro pevné částice, který se ale vztahoval pouze pro vznětové motory a jeho hodnota činila 0,14 g·km<sup>-1</sup> [9].

### 2.3.2 EURO 2

S rozdělením limitních hodnot emisí zvlášť pro motory zážehové a vznětové začala následující norma Euro 2, která přišla v platnost v lednu 1996 pro všechna nová vozidla, respektive o rok později v lednu 1997 pro všechna vozidla včetně modelů homologovaných před rokem 1996. Cílem této normy bylo snížení limitu emisí pro oxid uhelnatý i limitu kombinovaného pro uhlovodíky a oxidy dusíku. Limit se zpřísnil i pro produkci pevných částic na 0,08 g·km<sup>-1</sup> [9].

### 2.3.3 EURO 3

Norma Euro 3 přišla v lednu roku 2000 a pro dříve homologované modely vstoupila v platnost opět o rok později. Tato norma již začala emise pro uhlovodíky a oxidy dusíku měřit u zážehových agregátů odděleně. Kombinované měření pro vznětové pohonné jednotky zachovala, ale zavedla samostatné měření emisí oxidů dusíku. Norma Euro 3 také učinila změnu v testování, kde vyloučila fázi zahřívání motoru [9].

### 2.3.4 EURO 4

V lednu 2005 začala platit norma Euro 4 a o rok později byla povinná i pro dříve homologované modely aut. Společně s normou Euro 5 se začaly zabývat převážně motory dieslovými a zaměřily se zejména na produkci pevných částic a emise oxidů dusíku. Limit těchto oxidů se oproti předchozí normě Euro 3 výrazně zmenšil z 0,5 g·km<sup>-1</sup> na 0,25 g·km<sup>-1</sup>. Aby byly tyto podmínky splnitelné, začala se zavádět recirkulace výfukových plynů, která zapříčiňuje pokles teploty spalování a tím snižuje i produkci emisí NO<sub>x</sub> [9].

Filtry pevných částic byly zaváděny již kvůli normě Euro 3, ale právě norma Euro 4 zapříčinila jejich větší rozšíření [9].

### 2.3.5 EURO 5

Pevné částice u motorů zážehových se začaly měřit až v září 2009, respektive v lednu 2011, s příchodem normy Euro 5. Důvodem bylo velké rozšíření přímého vstřikování, které tvorbu pevných částic výrazně podporovalo. Norma s sebou přinášela i další zpřísnění limitů, zejména

právě pevných částic, které byly sníženy o 80 % v porovnání s předchozí normou Euro 4. Výrazné snížení se týkalo i oxidů dusíku [9].

Další rozšíření filtrů pevných částic způsobila změna ve zjišťování množství produkovaných částic, kde se kromě klasického měření v gramech na ujetý kilometr začal rovněž měřit i jejich počet na kilometr [9].

### 2.3.6 EURO 6

Nynější norma Euro 6 nabyla platnosti v září roku 2014. Modely homologované již před zářím roku 2014 musely požadavky této normy dodržovat od září 2015. Norma Euro 6 se zaměřila na produkci oxidů dusíku vznětových agregátů, jejichž limit snížila z  $180 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$  na  $80 \text{ g}\cdot\text{km}^{-1}$ . Vznětové motory se proto musely vybavit novým systémem, který by dokázal oxidy dusíku odbourávat. Toho bylo možné dosáhnout dvěma způsoby. První cestou byla instalace zásobníkového katalyzátoru, který dostal zkratku deNO<sub>x</sub>, případně se mu taky říká NO<sub>x</sub> trap. Další způsob k dosažení nižší produkce nežádoucích oxidů dusíku byl pomocí systému SCR. SCR je zkratka pro systém selektivní katalytické redukce, který za použití redukčního činidla ve formě kapalného aditiva AdBlue dokáže redukovat NO<sub>x</sub> na dusík a vodu [9].

Název	Platnost	CO	HC	NO <sub>x</sub>	HC+NO <sub>x</sub>	PM
<b>Diesel</b>						
<b>Euro 1</b>	od 1993	2,72	-	-	0,97	0,14
<b>Euro 2</b>	1996	1,0	-	-	0,9	0,10
<b>Euro 3</b>	2000	0,64	-	0,50	0,56	0,05
<b>Euro 4</b>	2005	0,50	-	0,25	0,30	0,025
<b>Euro 5</b>	2009	0,50	-	0,18	0,23	0,005
<b>Euro 6 (návrh)</b>	od září 2014	0,50	-	0,08	0,17	0,005
<b>Benzín</b>						
<b>Euro 1</b>	od 1993	2,72	-	-	0,97	-
<b>Euro 2</b>	1996	2,2	-	-	0,5	-
<b>Euro 3</b>	2000	2,3	0,20	0,15	-	-
<b>Euro 4</b>	2005	1,0	0,10	0,08	-	-
<b>Euro 5</b>	2009	1,0	0,075	0,06	-	0,005

Obr. 5 Emisní limity Euro pro vznětové a zážehové motory v  $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$  [11]

## 2.4 METODIKA WLTP

Pro zjištění různých parametrů automobilů jsou zavedeny přesně definované jízdní cykly. Jedná se například o testování spotřeby paliva a produkce emisí u automobilů s motory spalovacími nebo dojezd a spotřeba energie u elektromobilů. Dosavadní procedura NEDC (New European Driving Cycle) je často shledávána jako velmi nepřesná, a tudíž i nereálná. Proto se postupně

zavádí nové procedury označované jako celosvětově harmonizované zkušební postupy pro lehká vozidla (WLTP<sup>3</sup>), které slibují výsledky mnohem přesnější [13].

Jak by se dalo očekávat, procedura WLTP s sebou přináší zcela nově definované testy jízdních cyklů, jejichž hodnoty jsou se skutečnými hodnotami reálného provozu téměř shodné. Nicméně testy WLTP nejsou jediné, které musí být dodrženy. Jsou zde i silniční testy RDE (Real Driving Emissions), které mají za úkol měřit množství znečišťujících látek produkovaných do ovzduší při reálném provozu auta. Test RDE nenahrazuje procedury WLTP, ale doplňuje [14][15].

Zavedením nových testovacích procedur není hospodárnost vozidla nijak ovlivněna, neboť se vozidla konstrukčně nezmění. Změní se pouze měření, kterými budou vozy podrobeny. Náročnost metodiky WLTP je zřejmá již z rozsáhlého nařízení, obsahující nové postupy a vícero různých jednotlivých zkoušek. Náročnost je tím zvýšena pro zrealizování jednotlivých testů, které jsou rovněž zpřísněny, i pro jejich vyhodnocování a dokumentaci. V rámci testování jsou kromě základní varianty nově zahrnuty i prvky výbavy, kterými může být model vybaven na přání. Homologace vozidel podle WLTP se tak stává přibližně dvakrát náročnější než metodika dosavadní [14].

Na druhou stranu bude možné, díky zavedení revoluční metodiky WLTP a jejich reálným výsledkům, porovnávat různé modely aut podle jejich spotřeby a produkovaných emisí, z čehož budou mít zákazníci při výběru vozidla značný prospěch [14].

Testy WLTP jsou uskutečňovány institucemi, jako jsou Dekra nebo TÜV. Tito poskytovatelé technických služeb zároveň zodpovídají za dodržování legislativních požadavků [14].

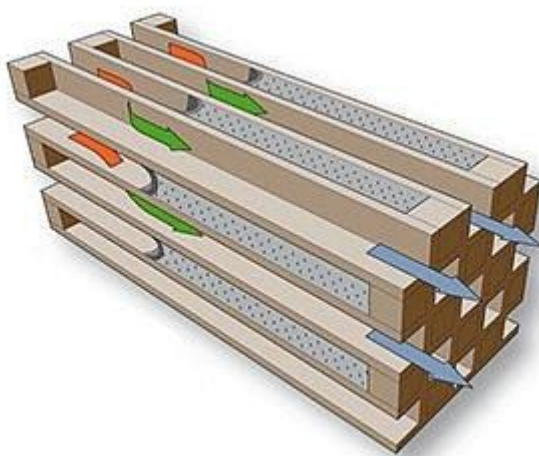
Souběžně se s testy WLTP budou provádět i měření dle staré metodiky EU, protože jsou podle ní nastaveny flotilové emisní cíle až do roku 2020. Taktéž při použití metodiky WLTP narostou i měřené hodnoty oxidu uhličitého, proto bude nutné navýšit i jejich limitní hodnoty. Hodnoty jízdního testu EU jsou zpracovávány pomocí softwaru CO2MPAS, který vznikl ve výzkumném středisku JRC (Joint Research Centre), nebo na základě dodatečných testů EU [14].

---

<sup>3</sup> Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure

### 3 VYSVĚTLENÍ PRINCIPU ČINNOSTI FILTRU PEVNÝCH ČÁSTIC PRO ZÁŽEHOVÉ MOTORY

Technologie filtrování částic není nová. Miliony dieselových vozidel jsou vybaveny filtry pro zachytávání částic (obvykle označováno DPF – Diesel Particulate Filter). Podobně jako filtry pevných částic pro vznětové motory, většina komerčních filtrů pevných částic pro zážehové motory (označováno GPF – Gasoline Particulate Filter) jsou keramická buněčná zařízení s kanálky, které jsou vždy střídavě na jedné straně uzavřeny. Výfukový plyn vstupuje do otevřených kanálů a je nucen proudit přes porézní keramické stěny, kde jsou částice zachyceny [16].



Obr. 6 Schéma průchodu výfukových plynů skrze keramickou matici filtru pevných částic [17]

#### 3.1 ZACHYCENÍ PEVNÝCH ČÁSTIC

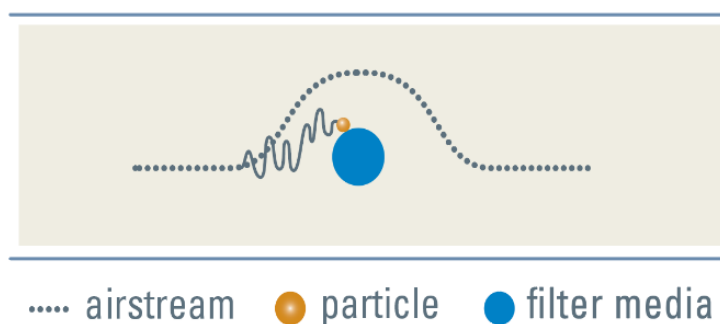
Filtrace se uskutečňuje skrze zachycení částic na porézní keramické stěny, kde se saze začnou zpočátku zachycovat. Nahromaděné saze a popel následně tvoří vrstvu na stěnách filtrů, a tak zabraňují dalšímu vniknutí sazí do zdi a napomáhají zvýšení účinnosti filtrace. Regenerace sazí vede k rozbití vrstvy sazí a následnému poklesu účinnosti filtrace, ale pro většinu předpokládané životnosti vozidla se očekává, že GPF bude pracovat s velmi vysokou (> 90 %) účinností filtrace. Zpočátku účinnost filtrace (podíl zachycených částic) není 100 %, když je filtr nový, ale efektivita se zvyšuje s najetými kilometry [16].

Filtrace může být uskutečněna i pomocí filtru s maticí kovovou, která obsahuje drátěnou vložku. Filtry se řídí následujícími mechanismy zachycení.

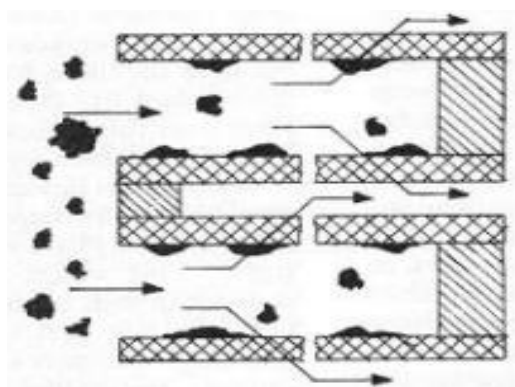
##### 3.1.1 DIFUZE

Mechanismus na základě difuze, který roste s klesající velikostí částic a je dominantním mechanismem zachycení velmi malých částic, menších než 30 nm. Tyto velmi malé částice se střetávají s molekulami a mění svůj směr až tisíckrát za sekundu. Tento náhodný pohyb se

uskutečňuje pod různými úhly, a tak se zvyšuje šance, že se částice se stěnou (nebo s vláknem) spojí [16][18].



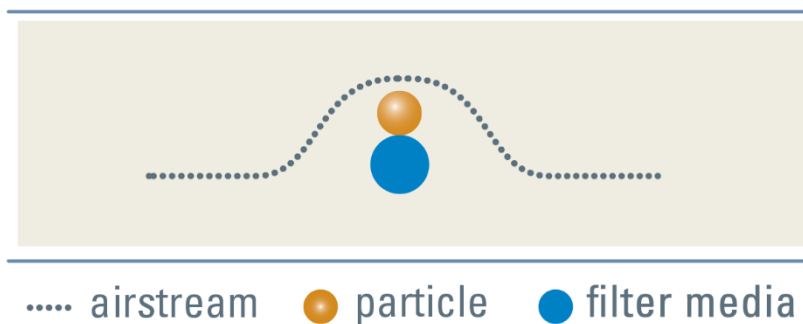
Obr. 7 Schéma mechanismu na základě difuze v matrici kovové [18]; airstream – proudnice vzduchu; particle – částice; filter media – filtrační medium



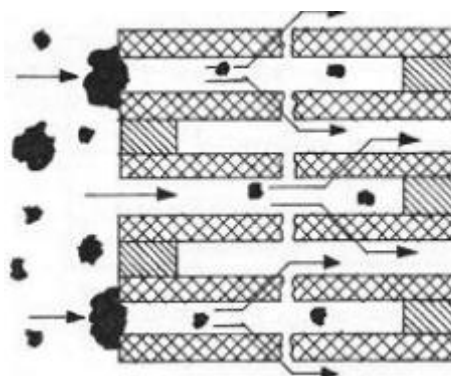
Obr. 8 Schéma mechanismu na základě difuze v matrici keramické [19]

### 3.1.2 ZACHYCNÍ

Částice větší než  $0.5 \mu\text{m}$  jsou primárně filtrovány pomocí mechanismu zachycení. Tyto částice jsou na difuzi již příliš velké, ale ještě nemají vysokou setrvačnost. Proud vzduchu procházející filtrem je nucen měnit směr, aby se mohl pohybovat kolem jednotlivých kovových vláken, ke kterým částice přilne. V případě použití keramické matrice efektivita filtrování roste s rostoucí velikostí částic a je dominantní pro zachycení velmi velkých částic. Částice se zachycují v kanálcích, neboť nejsou schopny proniknout porézní stěnou, nebo jsou zastaveny již o jednotlivé vstupy kanálek, pokud je částice většího průměru [16][18].



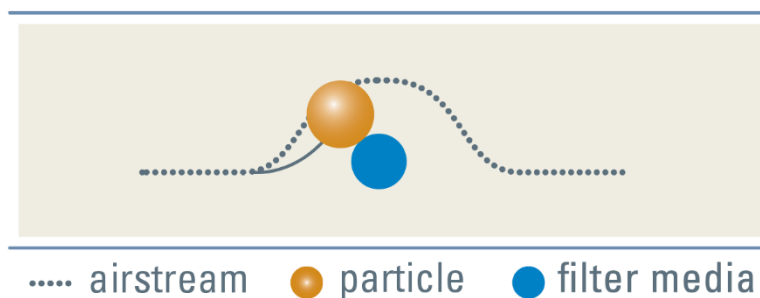
Obr. 9 Schéma mechanismu zachycení v matici kovové [18];  
 airstream – proudnice vzduchu; particle – částice;  
 filter media – filtrační medium



Obr. 10 Schéma mechanismu zachycení  
 v matici keramické [19]

### 3.1.3 ZAKLÍNĚNÍ

Mechanismus zaklínění se vyskytuje jen u kovové matrice s drátěnou vatou. Zde se již větší částice neudrží s měnícím se směrem toku výfukových plynů. Hmotnost těchto částic způsobí, že částice narazí do vlákna a přilne, jakmile tok plynu změní směr [16][18].

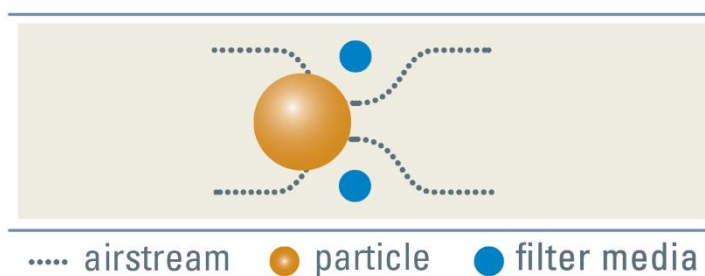


Obr. 11 Schéma mechanismu zaklínění v matici kovové [18];  
 airstream – proudnice vzduchu; particle – částice;  
 filter media – filtrační medium

### 3.1.4 PROSÍVÁNÍ

Prosívání se objevuje, stejně jako zaklínění, pouze u matic s drátěnou vatou. Tento mechanismus pracuje na základě velikosti částice, jejíž průměr je natolik velký, že není schopna vejít se do mezery mezi dvěma vlákny [16][18].





Obr. 12 Schéma mechanismu prosívání v matici kovové [18];  
 airstream – proudnice vzduchu; particle – částice;  
 filter media – filtrační medium

### 3.2 ZAJIŠTĚNÍ NÍZKÉHO POKLESU TLAKU

Kromě vysoké efektivity filtrace je u filtrů GPF dalším klíčovým požadavkem zajištění co nejmenšího poklesu tlaku, neboť pokles zvyšuje odpor, který musí výfukový plyn překonat. Stejně jako filtrační mechanismy byl široce zkoumán i vývoj poklesu tlaku ve filtrech pro vznětové motory a většina poznatků se vztahuje i na GPF. K zachování co nejmenší tlakové ztráty potřebuje GPF struktura póry s většími průměry a zároveň tenkými stěnami, nebo strukturu s větším počtem velkých pórů, pokud tloušťka stěny nabývá větších hodnot. V případě použití filtru s nanosenou katalytickou vrstvou na stěnách je tlaková ztráta závislá také na tloušťce, porozitě a rovnoměrnosti nanosené vrstvy katalyzátoru. Taktéž umístění GPF v systému má vliv na pokles tlaku. Například umístění GPF do úzce spojené polohy může omezit geometrickou flexibilitu návrhu a výsledkem budou vyšší teploty, které mohou zvýšit protitlak. Dosažení nízkého poklesu tlaku a zároveň účinné filtrace jsou často protichůdné cíle a vyžadují pečlivou optimalizaci různých faktorů, které byly zmíněny [16][20].

### 3.3 POROVNÁNÍ S FILTREM PEVNÝCH ČÁSTIC PRO VZNĚTOVÉ MOTORY

Filtry GPF se od DPF liší hlavně kvůli rozdílům v provozních podmínkách pro zážehové a vznětové motory. Hlavní odlišnosti benzinových motorů od dieselových jsou tyto: vyšší provozní teploty (až 900 °C ve srovnání s < 400 °C pro motorovou naftu), nižší hmotnostní produkce částic (1–3 mg·km<sup>-1</sup> ve srovnání s 10 mg·km<sup>-1</sup>), nižší počet produkováných částic (1–10 × 10<sup>12</sup> #·km<sup>-1</sup> ve srovnání s 1–10 × 10<sup>13</sup> #·km<sup>-1</sup> pro motorovou naftu) a nižší koncentrace O<sub>2</sub>. Filtry GPF mají velmi malou kapacitu (1 g) pro zachytávání pevných částic v porovnání s osmi gramovou kapacitou u filtrů DPF. V kontrastu, motor s přímým vstřikováním produkuje třicetkrát menší množství pevných částic než motor naftový. Ačkoli princip filtrace je stejný, požadavky na materiál jsou pro tyto dvě aplikace rozdílné, a to z důvodu různých provozních podmínek a požadavků [16].

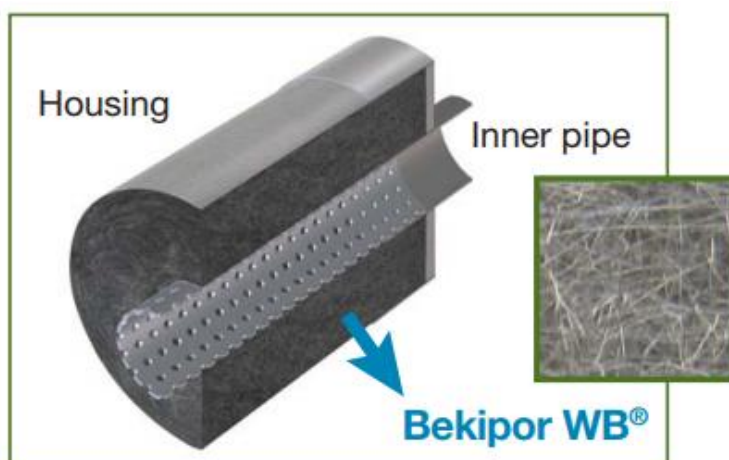
## 4 SPECIÁLNÍ DRUH POUŽITÉ MATRICE VE FILTRECH GPF – KOVOVÁ MATRICE OD SPOLEČNOSTI BEKAERT

V dnešní době se automobilový průmysl zaměřuje zejména na výrobu vozidel energeticky hospodárných a palivově úsporných, proto je důležité tyto vlastnosti zachovávat i u jednotlivých zařízení. Zatímco je známo, že filtry s keramickou maticí jsou vysoce efektivní, filtry s maticí kovovou jsou na vzestupu, neboť jsou též velmi účinné ale s výhodou, že nezpůsobují tak velký pokles tlaku jako matrice keramická. Nižší pokles tlaku snižuje spotřebu paliva, čímž přispívá ke snížení emisí CO<sub>2</sub>, ale současně zvyšuje výkon vozidla [22].



Obr. 13 Schéma toku výfukových plynů skrze GPF filtr od společnosti Bekaert [23]

Kovová matrice umožňuje naprostou svobodu při tvorbě designu filtru, který může nabývat různých i velmi složitých tvarů. To znamená, že tato matrice umožňuje zachovávat svoji funkci v jakémkoliv tvarovém provedení. Protože každý motor má jiné požadavky, médium kovových vláken může být jednoduše seřizováno v oblasti filtrační efektivity, která se může pohybovat od 30 % až po více než 80 %. Další kladnou vlastností je, že kovová matrice, stejně jako matrice keramická, může být potažena katalytickou vrstvou vzácných kovů a tím zároveň plnit funkci trojcestného katalyzátoru. Filtr má vlastnost vynikající elektrické vodivosti, protože je médium založeno na bázi oceli. To umožňuje provádět aktivní regeneraci již za nízkých teplot. Díky slinuté vláknité struktuře a jejich mechanickým vlastnostem, se vyznačuje velmi dobrým tlumením zvuku při porovnání s maticí keramickou [22][23].



Obr. 14 Konstrukce funkční části filtru od společnosti Bekaert [23]; housing – pouzdro; inner pipe – vnitřní trubka

## 5 SPECIFICKÉ SOUČÁSTI - KERAMIKA, KATALYTICKÁ VRSTVA

### 5.1 KORDIERITOVÁ KERAMIKA

Vzhledem k tomu, že benzinové motory pracují za prudkých teplotních změn, je pro GPF filtry odolnost vůči teplotním šokům klíčový požadavek. Kordierit je účelně zvolený materiál pro zpracování výfukových plynů ve filtrech se stěnovým průtokem, neboť je pro tuto aplikaci velmi vhodný, a to díky jeho nízkému koeficientu tepelné expanze a vynikající odolnosti proti tepelným šokům. Mezi další materiály používané pro filtraci výfukových exhalátů patří karbid křemíku (SiC) nebo hliník titan (AT). Ty se ale používají především v aplikacích s vysokým zatížením (diesellové motory), a to díky jejich inherentní vlastnosti vysoké hustoty a vysoké tepelné kapacity. Zatížení filtru sazemi je v benzinových motorech s přímým vstřikováním (GDI) mnohem menší oproti diesellovým filtrům, proto maximální hmotnostní limit sazí zde není kritický, a tak se kordierit opět jeví jako vhodnější materiál. Tepelná vodivost a nízká tepelná kapacita kordieritu umožňují rychlé zahřátí filtru, tudíž i časné uvedení katalyzátoru do provozu a vyšší regenerační účinnost při pasivní oxidaci sazí. Díky experimentům, které provedli Boger et al. [23], byla u kordieritu zjištěna vyšší účinnost regenerace ve srovnání se SiC a AT. Vyšší tepelná vodivost karbidu křemíku zajišťuje rychlé rozptýlení tepla, zatímco vyšší tepelná setrvačnost AT a SiC způsobuje pomalejší tepelné odeznění. Kromě výkonových charakteristik je klíčovým požadavkem jakéhokoli filtračního materiálu jeho chemická odolnost v přítomnosti popelu, zejména při vysokých výfukových teplotách typických pro benzinové motory a také během regenerace sazí. Předchozí práce s DPF filtry zjistila, že kordierit tomuto působení popelu při teplotách typických pro použití benzínu odolává. [16]



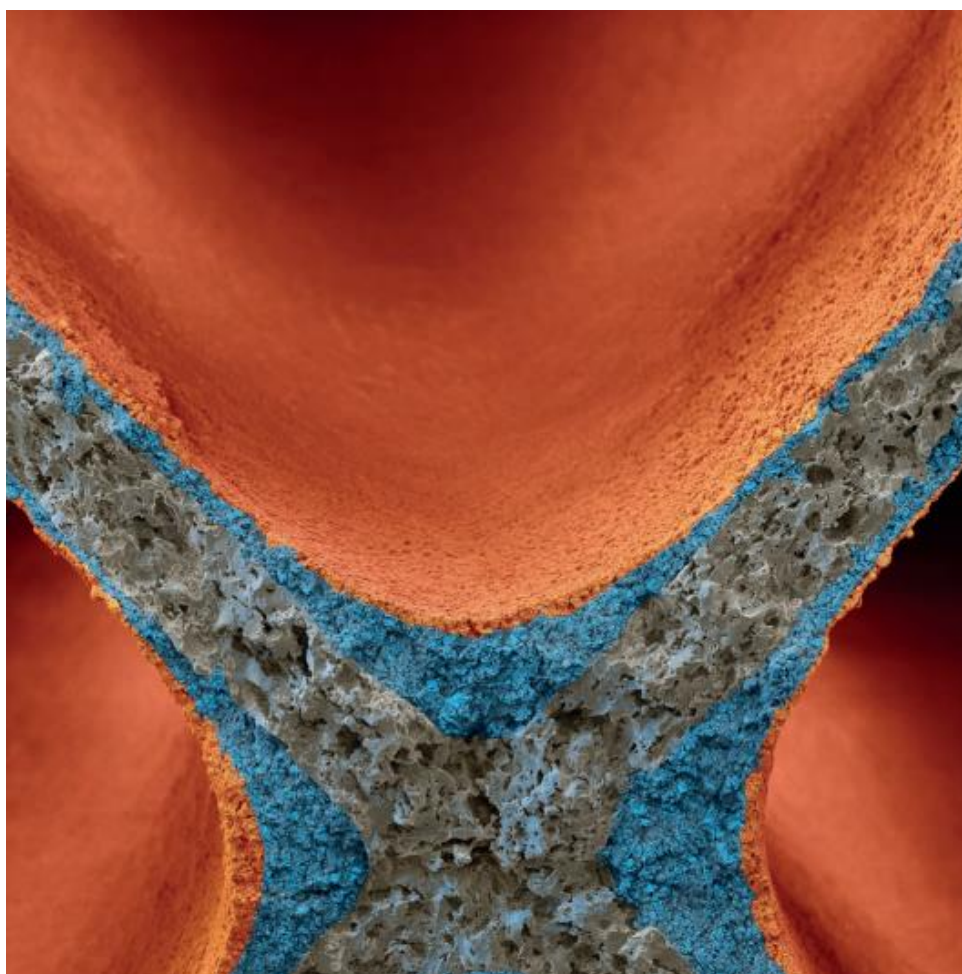
Obr. 15 Matrice z kordieritové keramiky [24]



## 5.2 KATALYZÁTOR A KATALYTICKÁ VRSTVA

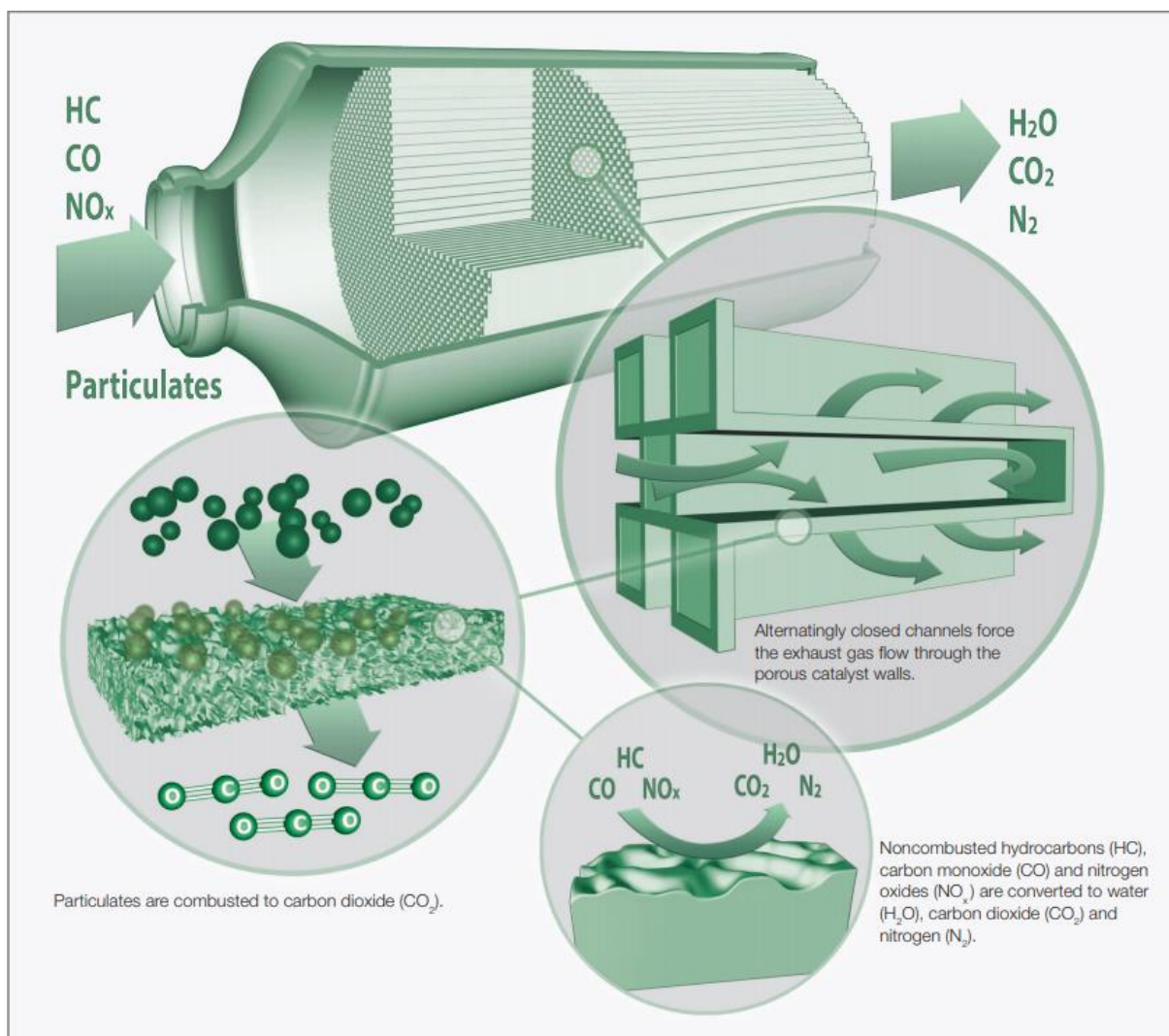
Ve výfukových plynech se nachází podstatné množství škodlivin, tři hlavní znečišťující látky jsou oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky (HC), oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>), které vznikají během spalování v reakci vzdušného dusíku s kyslíkem a pevné částice (PM), na jejichž povrchu mohou být navázány další škodlivé látky. U benzinových motorů se používají trojcestné katalyzátory, které odstraňují plynné emise z výfukových plynů, tudíž jsou schopny za vhodných podmínek oxidovat CO a HC, tím je přeměnit na oxid uhličitý (CO<sub>2</sub>) a zároveň redukovat NO<sub>x</sub> na dusík (N) [25][26]. Nejčastěji se v dnešní době používají monolitické katalyzátory nebo u moderních katalytických filtrů pevných částic je katalyzátor nanesen do vnitřní porézní struktury matrice. V případě monolitického katalyzátoru je porézní katalytická vrstva nanesená na velké množství paralelních kanálků. Monolit tvořený těmito kanálky bývá nejčastěji vyroben ze syntetického kordieritu, opět díky jeho odolnosti vůči vysokým teplotám [26].

Na Obr. 16 jdou zřetelně vidět jednotlivé vrstvy vzácných kovů nanesené na keramickou matici katalyzátoru (šedá). Vrstva palladia (modrá) selektivně oxiduje uhlovodíky a oxid uhelnatý na oxid uhličitý a vodu, zatímco vrstva rhodia (červená) s pomocí oxidu uhelnatého nebo vodíku současně přeměňuje oxidy dusíku na dusík, oxid uhličitý a vodu [27].



Obr. 16 Detailní pohled na trojcestný katalyzátor [27]

Nanesení vrstvy katalyzátoru na porézní vrstvy stěn filtru pevných částic je pro vozidla s benzinovými motory nejnovější technologií. Tento katalyzátor bývá nanášen ve dvou vrstvách. První vrstva je poměrně hrubá, tudíž přispívá k nižší tlakové ztrátě, a druhá vrstva je relativně hustá a přispívá k vyšší účinnosti filtrování částic. Tyto filtry jsou označovány jako cGPF (coated Gasoline Particulate Filter) a někdy jsou uváděny i pod názvem čtyřcestný katalyzátor (FWC<sup>4</sup>). Jedná se kombinaci všech důležitých vlastností dílčích zařízení v jediném kompaktním celku, kde jsou katalyzátorem odstraněny plynné znečišťující látky a zároveň zachyceny tuhé látky ve stěnách, jako jsou například pevné částice [27].



Obr. 17 Funkce čtyřcestného katalyzátoru [27]; particulates – částice; Alternatingly closed channels force the exhaust gas flow through the porous catalyst walls – Střídavě uzavřené kanálky nutí tok výfukových plynů, aby proudil skrze pórovité stěny s katalytickým povlakem; Particles are combusted to carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) – Částice se spalují na oxid uhličitý; Noncombusted hydrocarbons (HC), carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) are converted to water (H<sub>2</sub>O) and nitrogen (N<sub>2</sub>) – Nespálené uhlovodíky, oxid uhelnatý a oxidy dusíku jsou přeměňovány na vodu, oxid uhličitý a dusík

<sup>4</sup> four way catalyst

## 6 REGENERACE FILTRU

Nahromaděné saze a popel postupně tvoří vrstvu na stěnách filtrů, a tak napomáhají zvýšení účinnosti filtrace, ale zároveň způsobují zvýšení zpětného tlaku ve výfuku, který klade odpor unikajícím spalinám. Aby nedošlo k úplnému zanesení stěn filtru a tím k celkové ztrátě jeho funkce, nastupuje proces regenerace, která vede k rozbití této vrstvy sazí (vypálení zachycených částic) [16].

Právě regenerace je prvek, kterým se filtry GPF a DPF nejvíce odlišují. Zatímco u dieselů regeneraci vyvolá jízda po určitou dobu ustálenou rychlostí v režimu zatížení motoru (typický příklad je jízda po dálnici), v případě benzinových agregátů je nutná jízda bez plynu, tedy režim brzdění motorem. Díky tomu si GPF vystačí s pasivní regenerací na rozdíl od filtrů pro diesely, které primárně využívají regeneraci aktivní (s dodatečným přidáním paliva), neboť při normální jízdě motor běží bez zatížení (tedy v režimu brzdění) poměrně často. Tím pádem je GPF filtr zbaven několika nevýhod, jako je například u DPF potřeba zvýšení dávky vstřikovaného paliva pro zvýšení teploty spalin nutné k zahájení aktivní regenerace. Přesto je ale možné, že v praxi mohou nastat případy, kdy řidič pojedě delší dobu pod zatížením a k vypalování částic nedojde. V takovém případě dojde k nastavení režimu takzvané nucené regenerace [28][29].

### 6.1 PASIVNÍ REGENERACE

Proces pasivní regenerace probíhá samovolně. Klíčový požadavek pro zahájení tohoto procesu je přísun vzduchu s přirozeným obsahem kyslíku do výfukového traktu. Písty motoru v režimu brzdění nasávají vzduch, který není zužitkován ve formě zápalné směsi, neboť v tomto režimu není do motoru vstřikováno palivo, a tak k zážehu nedochází. Vzduch je poté nasáván do válců a následně vytlačen písty do výfukového potrubí při výfukovém zdvihu přes otevřené výfukové ventily. Následně díky kombinaci přísunu kyslíku obsaženém ve vzduchu a teploty spalin, která musí být 400 až 700 °C, dojde k zapálení usazených pevných částic, tedy k samovolné regeneraci filtru. V porovnání s filtrem pro vznětové motory je GPF filtr zhruba desetinásobně až třicetinásobně menší, tudíž dokáže absorbovat menší množství částic. Z toho vyplývá, že pasivní regenerace u GPF musí probíhat mnohem častěji, a to v řádu desítek až stovek ujetých kilometrů [28].

### 6.2 NUCENÁ REGENERACE

Proces nucené regenerace neboli nucené vypálení filtru aktivuje řídicí jednotka, právě když takzvaný senzor diferenčních tlaků (viz Obr. 18) vyhodnotí zaplnění filtru nad běžnou úroveň. Tento takzvaný senzor diferenčních tlaků porovnává údaje o proudění výfukových plynů, a tím umožňuje řídicí elektronice vyhodnotit úroveň zaplnění filtru. Za mezní a zároveň extrémní zanesení filtru můžeme považovat hmotnost pevných částic maximálně 8 gramů na jeden litr objemu ( $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ ). V tomto případě je již nucená regenerace nezbytná, ale běžné zanesení u filtrů GPF ze syntetické keramiky se pohybuje okolo  $1\text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$  [28][29].

Situace, při které je potřeba nucenou regeneraci spustit, může nejčastěji nastat při krátkých jízdách se studeným motorem. Zanesený filtr je pak potřeba vypálit umělým navýšením teploty spalin a zapálením částic. K tomu ale u benzinového motoru, jak už bylo dříve zmíněno, není zapotřebí zvyšovat dávku paliva jako u motoru vznětového, který následně může ředit olej nebo zacpávat filtr při neúspěšné regeneraci a vede k vyšší spotřebě vozu [28][29].

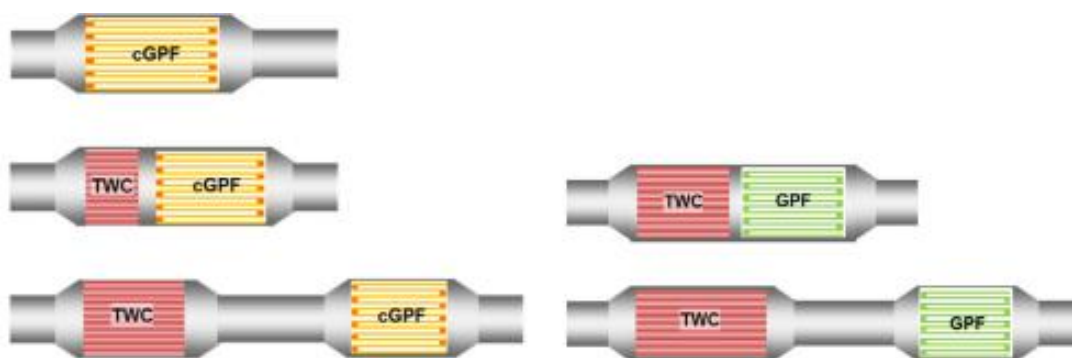
V případě zážehového motoru dojde k přechodu na spalování chudé zápalné směsi s výrazným přebytkem vzduchu a zároveň ke zvýšení teploty spalin díky opožděnému zážehu na svíčke. V motoru tak může být až sedmkrát více než při stechiometrickém směšovací poměru, kdy na 14,7 kg vzduchu připadá 1 kg benzínu [28][29].



Obr. 18 Schéma zapojení snímače tlaku [30]; PCM (powertrain control module) – řídicí jednotka motoru; differential pressure sensor – senzor tlakového rozdílu; exhaust in – vstup exhalátů; exhaust out – výstup exhalátů

## 7 PŘÍKLADY ŘEŠENÍ SYSTÉMU PRO ZPRACOVÁNÍ VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Způsob, jakým je systém zpracování výfukových plynů postaven, značně ovlivňuje design filtru a jeho výkonnost. Obecná klasifikace systému může být rozdělena na základě katalytické vrstvy, která může, ale nemusí být na stěnách filtru GPF nanesena. Filtry lze také dělit podle jejich umístění. Mohou být situovány do úzce spojené polohy, dále označovány jako CC (close-coupled), nebo pod sebou, označovány jako UF (underfloor). Tato systémová rozložení jsou znázorněna na následujícím obrázku [16].

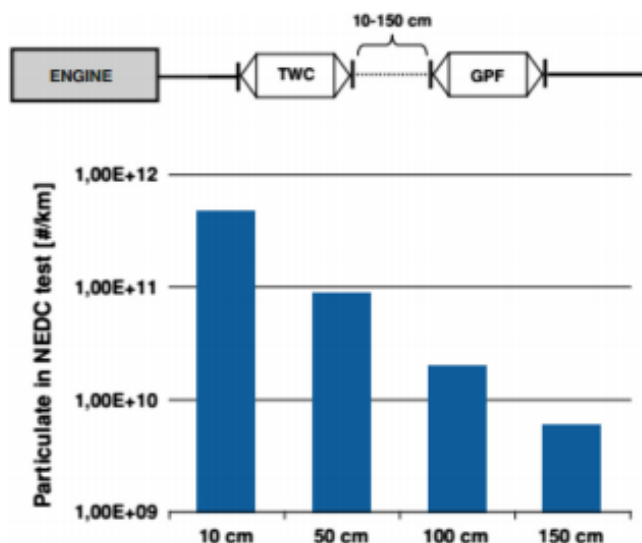


Obr. 19 Systémy pro zpracování výfukových plynů primárně rozdělené na filtry s povlakováním (vlevo) a filtry bez povlakování (vpravo) [16]

Primární výhodou filtru GPF bez katalytické vrstvy je, že může být navržena jako samostatná komponenta, aniž by bylo nutné výrazně upravovat výše umístěný trojcestný katalyzátor, který je pro splnění nízkých emisí již optimalizován. Absence této vrstvy umožňuje použít menší póry ve stěnách pro zachování efektivnosti filtrace bez výrazného poklesu tlaku [16].

Z pohledu filtrační efektivity bylo shledáno výhodnějším umístit filtry „pod sebe“. Nižší hodnoty teplot a naměřených průtoků prodlužují čas potřebný k průchodu výfukových plynů stěnami filtru. Vlivem nižších teplot může být negativně ovlivněna regenerace filtru, čímž na druhou stranu větší vrstva sazí může způsobit zvýšení filtrační účinnosti. Saito et al. [31] zjistili, že systém v pozici UF má ~15 % vyšší filtrační účinnost v porovnání s CC pozicí. Naměřené teploty byly o 140 °C nižší než u CC umístění vedoucí ke snížení průtoku o 15–20 %. Spiess et al. [32] prozkoumali závislost mezi efektivitou filtrace a vzdáleností, která je mezi trojcestným katalyzátorem a filtrem pevných částic s katalytickým povlakováním. Následující obrázek znázorňuje výrazné snížení emisí výfukových plynů s rostoucí vzdáleností mezi zařízeními [16].

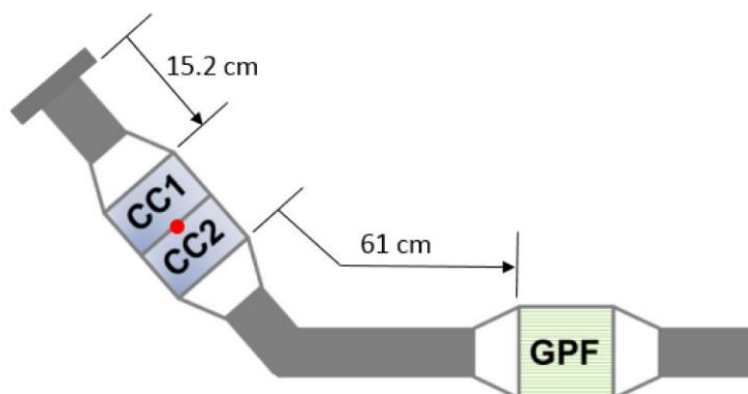




Obr. 20 Vliv vzdálenosti mezi trojcestným katalyzátorem a filtrem pevných částic na efektivitu filtrace [16]

Nižší filtrační účinnost v systému s umístěním do úzce spojené polohy je částečně odůvodněna vysokými hodnotami průtoků exhalátů. Jang et al. [33] se domnívají, že vyšší neuspořádané průtoky při CC umístění zabraňují tvorbě uspořádané vrstvy sazí, a tím snižují efektivitu filtrace, neboť jak již bylo dříve řečeno, přítomnost vrstvy sazí či popelu výrazně pomáhají filtrační účinnosti [16].

Craig et al. [34] v systému nahradili klasický trojcestný katalyzátor dvojicí katalytických substrátů a do uspořádání UF umístili filtr pevných částic s katalytickým povlakováním. Následně po měření emisí testovacími cykly FTP-75 a US06 zjistili, že hodnoty emisí pevných částic se pohybují v rozmezí  $0,17\text{--}0,25\text{ mg}\cdot\text{km}^{-1}$ , což splňuje kalifornské požadavky na emise ( $0,62\text{ mg}\cdot\text{km}^{-1}$ ) s velkou rezervou, kde testování probíhalo. Tím došli k závěru, že tento systém je vhodný pro reálné použití [16].



Obr. 21 Systém pro zpracování výfukových plynů podle Craig et al. [34]

## ZÁVĚR

Obsah této bakalářské práce objasňuje základní principy filtrů pevných částic pro zážehové pohonné jednotky a důvody k jejich zavedení, což bylo jejím primárním cílem. Dalším z cílů bylo uvedení přehledu filtrů dle použité matrice, jež nebylo možné zpracovat, neboť dle dostupných zdrojů je výroba zaměřena pouze na filtry s matricí keramickou. Jedinou výjimkou se stal filtr od společnosti Bekaert, jež používá matici tvořenou kovovými vlákny. Tato kovová matrice se odlišuje v mnoha směrech, což s sebou přináší další možnosti, kterými lze zdokonalovat filtraci pevných částic.

Další nárůst efektivity filtrace je sice možný, např. díky neustálému vývoji lepších materiálů nebo vhodnějšímu uspořádání výfukového systému, ale dle mého názoru vývoj této technologie dosáhl téměř maxima svého potenciálu. Z důvodu vysoké produkce pevných částic motorů s přímým vstřikováním a nadcházejících, postupně se zpřísnujících požadavků na nízkou emisivitu pevných částic, se bude muset (velmi pravděpodobně) budoucí vývoj přeplňovaných benzinových motorů ubírat jinými směry. Jedním z možných směrů by mohlo být širší zavádění hybridních pohonů, které díky kombinaci elektromotoru a spalovacího motoru spotřebovávají menší množství paliva, tudíž produkují méně emisí. Další možností by mohl být návrat k systému s nepřímým vstřikem, který opět nabývá na oblibě právě kvůli zpřísnujícím se náročným požadavkům na čistotu spalin. I když nevýhody tohoto systému jsou známé, firma Bosch se touto problematikou zabývá a systém zdokonaluje úpravou činnosti systému.

Při hledání informací k tomuto tématu neexistují téměř žádné dostupné české zdroje, které by tuto problematiku popisovaly, pravděpodobně z důvodu, že je tato technologie zachycení částic u benzinových motorů nová, nebo jí zkrátka není věnován dostatek pozornosti. Byl jsem tedy odkázán na odborné články zahraničních autorů. Tím vznikl k již vytyčeným cílům nový záměr této bakalářské práce, a to objasnění této problematiky v českém jazyce.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ESCAMILLA, Joel A Hernandez. *Particulate Matter: Capture and Quantification in Natural and Anthropogenic Sources*. 2015, **05**(04). DOI: 10.4172/2161-0525.1000281. ISSN 21610525. Dostupné také z: <https://www.omicsonline.org/open-access/particulate-matter-capture-and-quantification-in-natural-and-anthropogenic-sources-2161-0525-1000281.php?aid=56457>
- [2] Polétavý prach – neviditelná hrozba. *Hluk & Emise* [online]. ©2007 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/emise/poletavy-prach-%E2%80%93-neviditelna-hrozba/>
- [3] Do air purifiers remove PM2.5?. *Quora* [online]. 2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.quora.com/Do-air-purifiers-remove-PM2-5#>
- [4] Pevné částice – škodlivé látky. *Umwelt-Plakette.de* [online]. ©2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.umwelt-plakette.de/cz/informace-o-nemecka-ekologicka-plaketa/pevne-castice-a-skodlive-latky/pevne-castice-skodlive-latky.html>
- [5] BRZEZINA, Jáchym. Závěry a doporučení WHO – kvalita ovzduší. *ČHMÚ Brno* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/12/13/zavery-a-doporuceni-who-kvalita-ovzdusi/>
- [6] IV. KVALITA OVZDUŠÍ V ČESKÉ REPUBLICĚ. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2017 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/17groc/gr17cz/IV1\\_PM\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/17groc/gr17cz/IV1_PM_CZ.html)
- [7] Gasoline particulate filters. *INSIGHT* [online]. 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.infineuminsight.com/articles/passenger-cars/gasoline-particulate-filters/>
- [8] STATISTA: România, pe locul 7 în topul țărilor UE unde poluarea cu particule fine de suspensie ucide. *Financial Intelligence* [online]. 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://financialintelligence.ro/statista-romania-pe-locul-7-in-topul-tarilor-ue-unde-poluarea-cu-particule-fine-de-suspensie-ucide/>
- [9] DUSIL, Tomáš. Evropské emisní normy: Jsou s námi už od roku 1970. *Auto.cz* [online]. 2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/evropske-emisni-normy-jsou-s-nami-uz-od-roku-1970-94232>
- [10] Emisní normy. *PEVI* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://www.pevi.cz/zajimavosti-z-oboru/emisni-normy.html>
- [11] EURO normy. *Vítejte na Zemi* [online]. ©2013 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: [http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=euro\\_normy&site=doprava](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=euro_normy&site=doprava)
- [12] Unterschiede zwischen Euro 6c nach WLTP (ab 1. Sept) und Euro 6d-temp für Benzinmodelle - Bild: 209263652. *Motor-talk* [online]. ©2001-2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.motor-talk.de/bilder/unterschiede-zwischen-euro-6c-nach-wltp-ab-1-sept-und-euro-6d-temp-fuer-benzinmodelle-g79398190/abgasnormen-i209263652.html>

- [13] NEDC. *Elektrina.cz* [online]. 2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.elektrina.cz/slovník/nedc>
- [14] Nové metodiky měření: WLTP a RDE Reforma s výhodou pro zákazníky. *Autobible* [online]. 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/nove-metodiky-mereni-wltp-rde-reforma-vyhodou-zakazniky/>
- [15] The Real Driving Emissions (RDE). *Car Emissions Testing Facts* [online]. ©2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.caremissionstestingfacts.eu/rde-real-driving-emissions-test/>
- [16] JOSHI, Ameya a Timothy V. JOHNSON. Gasoline Particulate Filters—a Review. *Emission Control Science and Technology*. 2018, **4**(4), 219-239. DOI: 10.1007/s40825-018-0101-y. ISSN 2199-3629. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s40825-018-0101-y>
- [17] Co je DPF - filtr pevných částic. *Chiptuning PowerTEC*[online]. ©2000-2017 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.chiptuning.cz/clanek/seznam-clanku/technika/co-je-dpf-filtr-pevnych-castic>
- [18] Why Rate Sterile Air Filters at 0.2 Microns?. *Donaldson*[online]. ©2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.donaldson.com/en-us/compressed-air-process/technical-articles/why-rate-sterile-air-filters-0-2-microns/>
- [19] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. Warrendale, PA: SAE International, c1995. ISBN 15-609-1734-2.
- [20] NAKAYAMA, Hiroki, Yasuyuki BANNO, Hiroshi MOCHIZUKI, a Akito TAKAYAMA. *Topics in Catalysis*. 2019, **62**(1-4). DOI: 10.1007/s11244-019-01136-7. ISSN 1022-5528. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11244-019-01136-7>
- [21] Gasoline Particulate Filter media. *Bekaert* [online]. ©2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.bekaert.com/en/products/automotive/exhaust-systems/gasoline-particulate-filter-media>
- [22] Metal fiber technology for gas and diesel particulate filters. In: *Youtube* [online]. 15. 11. 2017 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=6fXbTexzJhw>. Kanál uživatele Bekaert channel
- [23] BOGER, Thorsten, Dominik ROSE, Per, N. GUNASEKARAN a GLASSON. Oxidation of Soot (Printex® U) in Particulate Filters Operated on Gasoline Engines. *Emission Control Science and Technology*. 2015, **1**(1), 49-63. DOI: 10.1007/s40825-015-0011-1. ISSN 2199-3629. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s40825-015-0011-1>
- [24] Honeycomb Ceramic Cordierite DPF For Catalytic Converters. *Ceramic-Substrate* [online]. ©2013-2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.ceramic-substrate.com/sale-1338415-honeycomb-ceramic-cordierite-dpf-for-catalytic-converters.html>
- [25] TWIGG, Martyn V. Progress and future challenges in controlling automotive exhaust gas emissions. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2007, **70**(1-4), 2-15. DOI:

- 10.1016/j.apcatb.2006.02.029. ISSN 09263373. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926337306002013>
- [26] HECK, Ronald M. a Robert J. FARRAUTO. Automobile exhaust catalysts. *Applied Catalysis A: General*. 2001, **221**(1-2), 443-457. DOI: 10.1016/S0926-860X(01)00818-3. ISSN 0926860X. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926860X01008183>
- [27] Four ways to a clean gasoline engine. *BASF* [online]. ©2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.basf.com/global/en/media/science-around-us/catalytic-converter.html>
- [28] DUSIL, Tomáš. Všechno, co potřebujete vědět o částicových filtrech pro zážehové motory. Čím se liší od filtrů pro diesely?. *Auto.cz* [online]. 2018 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/vsechno-co-potrebujete-vedet-o-casticovych-filtrech-pro-zazehove-motory-cim-se-lisi-od-filtru-pro-diesely-124295>
- [29] VAVERKA, Lukáš. Filtr pevných částic mají už skoro všechna benzínová auta. Bát se ho ale nemusíte. *Autobible* [online]. 2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/filtr-pevnych-castic-maji-uz-skoro-vsechna-benzinova-auta-bat-se-nemusi-site/>
- [30] TRACY, Martin. UNDERSTANDING DIESEL PARTICULATE FILTER SERVICE AND REPAIR. *SearchAutoParts.com*[online]. 2017 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.searchautoparts.com/nace-automechanika/commitment-training/understanding-diesel-particulate-filter-service-and-repair?page=0,1>
- [31] SAITO, Chika, Takahiko NAKATANI, Yukio MIYAIRI, et al. New Particulate Filter Concept to Reduce Particle Number Emissions. *SAE Technical Paper*. 2011, 2011-04-12. DOI: 10.4271/2011-01-0814. Dostupné také z: <https://www.sae.org/content/2011-01-0814/>
- [32] SPIESS, Stephanie, Ka-Fai WONG a Joerg-Michael RICHTER. Investigations of emission control systems for gasoline direct injection engines with a focus on removal of particulate emissions. *Topics in Catalysis*. 2013, **56**(1-8), 434–439. DOI: 10.1007/s11244-013-9992-6. ISSN 1022-5528. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11244-013-9992-6>
- [33] JANG, Jihwan, Jongtae LEE, Yonghyun CHOI a Sungwook PARK. Reduction of particle emissions from gasoline vehicles with direct fuel injection systems using a gasoline particulate filter. *Science of The Total Environment*. 2018, **644**, 1418-1428. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.362. ISSN 00489697. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718324380>
- [34] CRAIG, Angus, Jason WARKINS, Krishna ARAVELLI, David MOSER, Lucy YANG, Douglas, Tinghong TAO a Deven ROSS. Low Cost LEV-III, Tier-III Emission Solutions with Particulate Control using Advanced Catalysts and Substrates. *SAE International Journal of Engines*. 2016, **9**(2), 1276-1288. DOI: 10.4271/2016-01-0925. ISSN 1946-3944. Dostupné také z: <https://www.sae.org/content/2016-01-0925/>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CC	Close-coupled – poloha úzce spojená
cGPF	Coated Gasoline Particulate Filter – filtr pevných částic pro zážehové motory povlakovaný katalyzační vrstvou
DPF	Diesel Particulate Filter – filtr pevných částic pro vznětové motory
FWC	Four Way Catalyst – čtyřcestný katalyzátor
GDI	Gasoline Direct Injection – přímé vstřikování benzínu
GPF	Gasoline Particulate Filter – filtr pevných částic pro zážehové motory
JRC	Joint Research Centre
NEDC	New European Driving Cycle
PCM	Powertrain Control Module – řídicí jednotka motoru
PM	Particulate Matter – pevné částice
RDE	Real Driving Emissions
SCR	Selective Catalytic Reduction – Selektivní katalytická redukce
SZO	Světová zdravotnická organizace
UF	Underfloor – poloha pod sebou
WHO	World Health Organization
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure – celosvětově harmonizované zkušební postupy pro lehká vozidla
AT	Hliník titan
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
HC	Uhlovodíky
HO	Voda
N	Dusík
NO <sub>2</sub>	Oxid dusičitý
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku
O <sub>2</sub>	Kyslík
SiC	Karbid křemíku