

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojů průmyslové dopravy



Obor

Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření

KOLOVÉ DOPRAVNÍ A MANIPULAČNÍ STROJE

MINITUNEL PRO MĚŘENÍ EMISÍ TUHÝCH LÁTEK

Diplomová práce

KSD – DP – 490

Radek Štejnár

Rozsah práce:

Počet stran: 52

Počet obrázků: 22

Počet tabulek: 5

Počet příloh: 10

Počet výkresů: 4

květen 2005

Minitunel pro měření emisí tuhých látek

ANOTACE

Diplomová práce shrnuje problematiku vzniku emisí tuhých látek ve výfukových plynech spalovacích motorů a pro různá paliva porovnává jejich velikost, přehled používaných měřících systémů a legislativních předpisů pro měření tuhých látek. Věnuje se vypracování postupu a softwaru pro stanovení nejistoty měření tuhých látek. Zabývá se zkoumáním vlivu provozních veličin motoru a podmínek odběru vzorku na hodnotu měrné emise tuhých látek motoru.

Tunnel for measurring emissions of solid substances

ANNOTATION

The diploma thesis summarizes an issue of creating emissions of solid substances in exhaust gases of internal combustion engine. It compares a content of these particles in different fuels, futhermore it compares the used measuring systems and legislative regulations for measurement of solid substances. It deals with elaboration of process and software for determination of uncertainty of measurement of solid substances. It examines an influence of operative quantities in engine and conditions of samples intake on the value of specific emissions of solid substances in engine.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mojí diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

Prohlášení k užívání výsledků DP:

Jsem si vědom, že diplomová práce je majetkem TU, a že s ní nemohu sám bez svolení TU disponovat. Diplomová práce může být zapůjčena či její kopie objednána za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po pěti letech mohu DP převzít v Univerzitní knihovně TU, kde bude uložena.

Datum: 27.5.2005

Jméno a příjmení autora: Radek Štejnár

Adresa bydliště: Lidická 1006, Mnichovo Hradiště

Podpis:

Poděkování

Chtěl bych tímto vyjádřit poděkování vedoucímu diplomové práce, Doc. Ing. L. Mocovi, CSc. za odbornou pomoc při zpracování mé diplomové práce a za možnost realizace měření. Dále bych chtěl poděkovat Ing. H. Ginzlovi za pomoc při měření.

Obsah

1. Úvod	8
2. Vznik, složení, velikost a škodlivost částic.....	9
3. Způsoby měření emisí pevných částic.....	12
3.1 <i>Měření kouřivosti filtrační metodou.....</i>	<i>12</i>
3.2 <i>Opacimetrie</i>	<i>13</i>
3.3 <i>Gravimetrické měření koncentrace částic.....</i>	<i>14</i>
3.3.1. <i>Plnoprůtočný ředící systém</i>	<i>15</i>
3.3.2 <i>Neplnoprůtočný ředící systém – minitunel</i>	<i>17</i>
4. Předpisy pro měření a vyhodnocení emise tuhých částic	24
5. Kvalimetrie.....	27
6. Měření na minitunelu – vlastní měření	30
6.1. <i>Popis měřicího zařízení ve zkušební laboratoři KSD.....</i>	<i>30</i>
6.2. <i>Postup měření na měřicím zařízení.....</i>	<i>34</i>
6.3. <i>Výpočet emise pevných částic</i>	<i>34</i>
6.4. <i>Vyhodnocení měření.....</i>	<i>39</i>
7. Závěr	51
Seznam použité literatury	52

1. Úvod

V roce 1950 bylo v celosvětovém měřítku vyrobeno kolem 53 miliónů motorových vozidel. V průběhu následujících 40 let se toto množství téměř zdesetinásobilo; překročilo 456 miliónů. To znamená, že v průměru vzrostlo ročně množství automobilů o 9,5 procent. V roce 1994 již celkové množství motorových vozidel překročilo 700 miliónů [8]. Samozřejmě tento počet stále roste a roste i v dnešní době. Používání automobilů přináší mnoho výhod pro lepší a komfortnější život člověka, ale má i své negativní stránky. Jednou z nejzávažnějších je znečišťování životního prostředí produkty spalování zážehových i vznětových motorů. Proto je obsah těchto produktů ve výfukových plynech sledován a limitován.

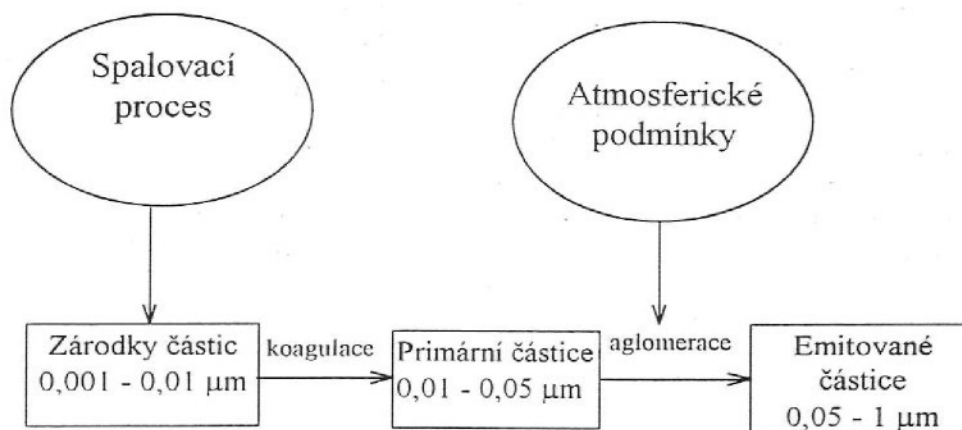
Automobilové motory emitují velké množství oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku (NO_x), nespálených uhlovodíků (HC), olova (Pb) a řadu toxických organických látek adsorbovaných na pevné částice (PT), které jsou u spalovacích motorů také sledovány a limitovány. Dále je sledován i vliv další složky výfukových plynů, oxidu uhličitého (CO_2), který negativně působí na životní prostředí vytvářením tzv. skleníkového efektu [7].

Předmětem této diplomové práce je měření jedné složky výfukových plynů - pevných částic (PT). Při měření koncentrace pevných částic jsou napodobovány provozní podmínky motoru. Výfukové plyny jsou ředěny vzduchem. K tomuto účelu slouží plnoprůtočné tunely nebo neplnoprůtočné tunely, tzv. minitunely [2]. Pro měření byl použit minitunel s měřením koncentrace CO_2 , který je využíván v laboratoři pístových spalovacích motorů KSD.

Cílem této diplomové práce je zkoumání vlivu provozních veličin a podmínek odběru vzorku na hodnotu emise tuhých látek.

2. Vznik, složení, velikost a škodlivost částic

Při spalování uhlovodíkového paliva v naftových motorech, vznikají jako vedlejší produkt škodliviny, mezi které patří i pevné částice [4]. Na obr. 1 je schematicky znázorněn mechanismus vzniku částic.

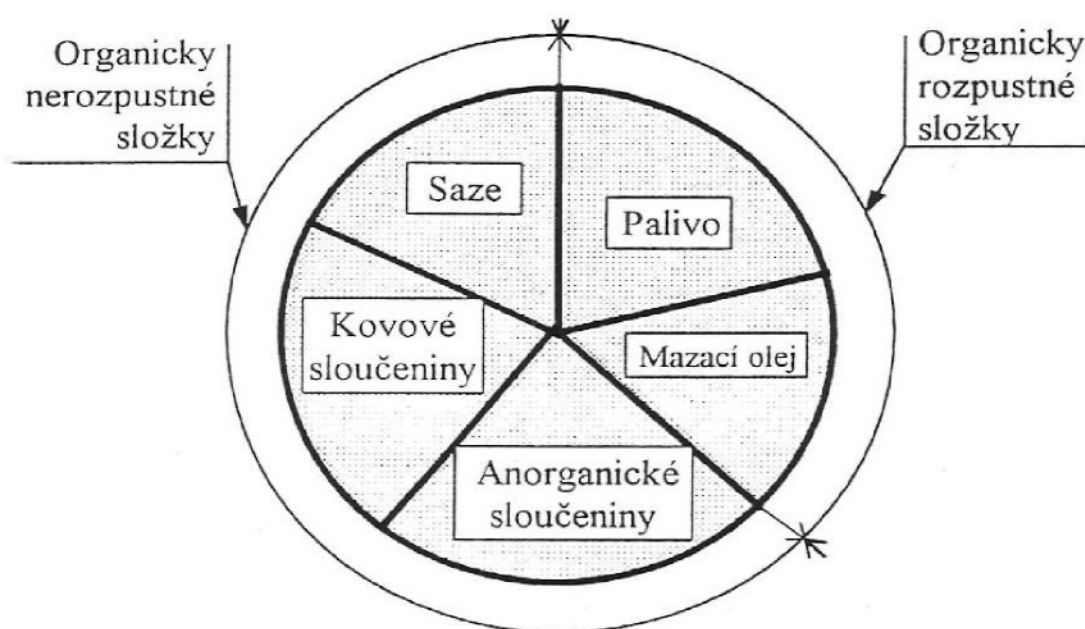


Obr. 1 - Schéma mechanismu vzniku pevných částic

Při vstupu výfukových plynů do atmosféry dojde účinkem jejich rychlého ochlazení a zředění atmosferickým vzduchem ke spojování částic. Výsledný rozměr takto emitovaných pevných částic tak mnohonásobně převyší původní rozměr ve spalínách. Jejich rozměr se většinou pohybuje v rozmezí 0,3 – 1 μm, ve výfukových plynech však může mít menší množství těchto částic velikost až 5 – 30 μm. Na stěnách spalovacího prostoru a výfukového systému motoru pak mohou vytvářet seskupení i větších rozměrů. Na obsah a velikost částic má významný vliv druh použitého paliva. Nejvíce částic produkují naftové motory, menší množství benzínové a výrazně nižší množství vykazuje pohon na plynná paliva [4]. Dle předpisu Euro IV, který je platný od ledna 2005, je v Evropské unii povolené množství zplodin osobních vozidel u vznětových motorů 0,025 g/km. Plynové motory představují ekologickou variantu pohonných jednotek pro vozidla, jejich nevýhodou je ovšem velký objem nádrže, kde je v kapalné podobě uloženo pohonné medium [8].

Částice ve výfukových plynech se vyskytují jak v pevné, tak v kapalné fázi. Do skupiny pevných patří zejména saze, karbon, popel, sloučeniny síry a kovů (především síranů), nitridy a oxidy síry. Do skupiny kapalných patří aerosoly – mikrokapky nespálených uhlovodíků

z paliva i z motorového oleje a voda. Složení tuhých částic ve výfukových plynech závisí na provozním režimu motoru (otáčkách i zatížení). Na obr. 2 je uveden příklad možného podílu jednotlivých složek v těchto částicích. Tuhé částice je možno rozdělit do dvou hlavních částí; na organicky rozpustné a nerozpustné sloučeniny. Rozpustná část je v případě potřeby oddělována dichlormetanem (CH_2Cl_2) nebo jinými organickými rozpouštědly. Nejdůležitější složkou tuhých částic je uhlík ve formě grafitových sazí, a proto se velmi často nazývají jako pevné částice [4].



Obr. 2 – Složení tuhých částic ve výfukových plynech pístových spalovacích motorů

Důsledkem nekvalitní (nehomogenní) palivové směsi se vzduchem, dojde účinkem tepelného rozkladu uhlovodíkového paliva k přednostní oxidaci vodíku - díky větší afinitě vodíku ke kyslíku než má uhlík. Tudiž při lokálním nedostatku vzduchu ve směsi se uhlík modifikuje do formy sazí. Emise pevného uhlíku tedy souvisí především s kvalitou rozprašování paliva při jeho vstřikování do válce vznětového motoru. Přísun kyslíku mezi částice paliva se zlepšuje se zvyšováním celkového množství vzduchu. Emise částic se tedy snižuje s rostoucí hodnotou součinitele přebytku vzduchu λ . Špatný mechanický stav motoru, který způsobuje zvýšenou spotřebu mazacího oleje v motoru, má za následek vznik aerosolů [4].

Tuhým částicím ve výfukových plynech pístových spalovacích motorů jsou přisuzovány karcinogenní a mutagenní vlastnosti. Největší nebezpečí představuje vaznost jiných výfukových škodlivin, nejvíce polycyklických aromatických uhlovodíků – PAH na tyto

částice. V živém organismu začínají tuhé částice působit nepříznivě desorbci jiných škodlivin z povrchu částic. Z tohoto hlediska jsou nejnebezpečnější částice o rozměru $0,1 - 10 \mu\text{m}$, které se usazují na sliznici v dýchacím ústrojí, kde poškozují mechanicky i chemicky povrch živé tkáně [4].

Obsah tuhých částic ve výfukových plynech lze primárně snižovat vhodnými opatřeními v řešení plnicího systému, tvorbou směsi a spalovacího procesu, konstrukčními úpravami, které vedou k snížení spotřeby mazacího oleje a omezením obsahu síry v palivu. Sekundárním opatřením je sledování cesty zachytu tuhých částic a jejich následná likvidace vypalováním v tzv. zachycovačích částic, které jsou zařazeny na místě tlumiče ve výfukovém systému motoru [4]. Omezení obsahu tuhých částic ve výfukových plynech je v každém případě spojeno s řadou složitých úloh, které výrobci motorů, zejména pak vznětových, velmi intenzivně řeší.

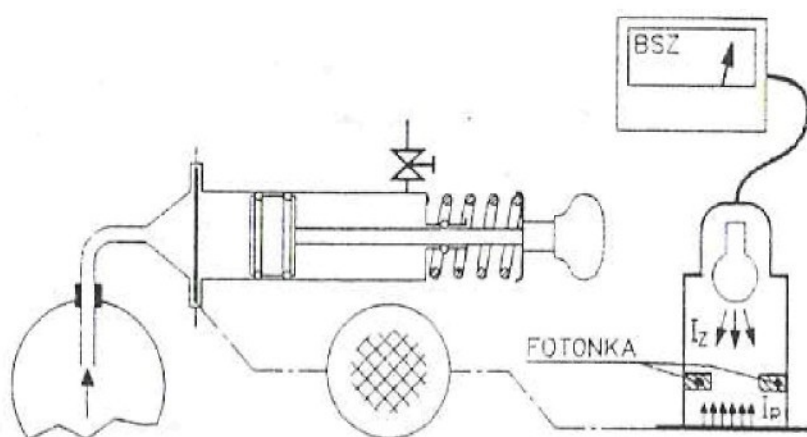
3. Způsoby měření emisí pevných částic

Množství pevných částic lze vyjádřit jako kouřivost motoru, nebo jako měrnou koncentraci. Kouřem se nazývají částice rozptýlené ve výfukovém plynu, které pohlcují, odrážejí nebo lámou světlo. Na rozdíl od plynných škodlivin je kouřivost vznětového motoru pozorovatelná i bez měřicích přístrojů a proto byla ze všech škodlivin sledována jako první. Měření kouřivosti motoru je uskutečňováno filtrační metodou nebo opacimetrií. Měrná koncentrace je podíl pevných částic vztažený na výkonové parametry motoru. Koncentrace pevných částic je měřena pomocí gravimetrické metody. Koncentraci částic je možné získat také výpočtem z kouřivosti motoru [1].

3.1 Měření kouřivosti filtrační metodou

Metoda zjišťování kouřivosti motoru je založena na zachytu částecek kouře na filtračním papírku, přes který je proset vzorek výfukových plynů definovaného objemu definovanou rychlostí. Množství zachycených částic je vyhodnocováno opticky, podle míry zčernání filtru. Je měřeno množství světla pohlceného kontaminovaným filtrem ve srovnání s pohlcením světla nepoužitým filtrem [6].

Na obr. 3 je schéma sestavy zařízení pro měření kouřivosti metodou s ruční sondou.



Obr. 3 – Filtrační kouřoměr BOSCH

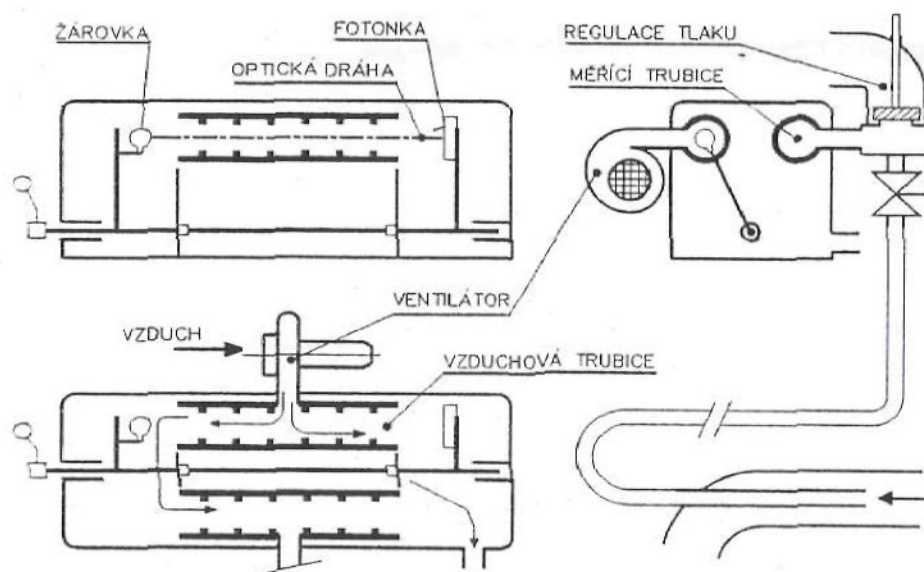
Pístnice vykoná pomocí stlačené pružiny sací zdvih. Rychlost pohybu pístu je nastavena seřízením odtokového otvoru vzduchu z prostoru. Kontaminovaný papírek je pak vyhodnocen reflektčním fotometrem. Výsledkem měření je stupeň zčernání v jednotkách °BOSCH. Odběr vzorku může být proveden sacím účinkem sloupce vody (systém snímačů ÚVMV) [6].

Vliv odrazivosti podložky pod papírkem se eliminuje podložním pěti vrstvami čistých papírků, stejným způsobem se nastavuje nula stupnice. Pro nastavení plné výchylky stupnice (10°BOSCH) je optický snímač zasunut do speciálního pouzdra napodobujícího absolutně černé těleso [6].

3.2 Opacimetrie

Opacimetrie je jednoetapové přímé zjišťování pohltivosti světla sloupcem výfukových plynů definované délky. Definovanou délkou je míněna optická dráha od světelného zdroje ke snímači a tuto hodnotu udává výrobce přístroje. Měřená veličina je nazývána opacita (pohltivost světla) spalin a příslušný měřicí přístroj je opacimetr. Opacimetr může být při měření umístěn ve výfukové trubce (plnoprůtokový opacimetr), na konci výfukové trubky (koncový plnoprůtokový opacimetr) nebo je do opacimetru přiveden vzorek výfukových plynů (opacimetr s dílčím tokem) [6].

Na obr. 4 je schématicky znázorněn opacimetr s dílčím tokem.

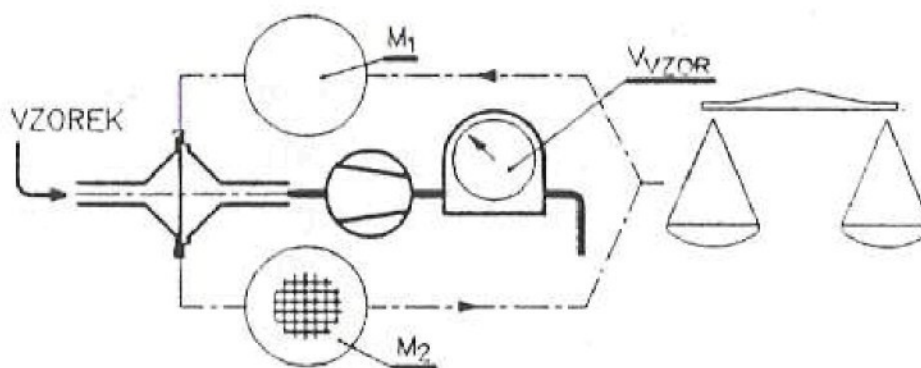


Obr. 4 – Opacimetr Hatridge

Při měření je optická dráha souosa se vzduchovou trubicí a přívod spalin do přístroje je uzavřen. Žárovka i fotonka jsou omývány čistým vzduchem. Při vlastní měřicí proceduře je překllopena optická dráha do osy měřicí trubice, do které je současně vpouštěn vzorek spalin. Po odečtení hodnoty je optická dráha překllopena zpět do osy vzduchové trubice a přívod spalin do přístroje je uzavřen. Ze stupnice ukazovacího přístroje, která je lineárně rozdělena na 100 dílků je odečtena hodnota v jednotkách HSU (Hartridge Smoke Unit). Konečným výsledkem měření je absorpční koeficient k [m^{-1}], který je vypočítán z údaje stupnice a z optické dráhy [6].

3.3 Gravimetrické měření koncentrace částic

Vlastní princip gravimetrického stanovení obsahu pevných částic je znázorněn na obr. 5.



Obr. 5 - Gravimetrické měření obsahu částic

Filtrační element je složen ze skelných vláken potažených teflonem (Pallflex). Nejprve je změřena jeho hmotnost a následně je instalován do příslušného držáku a pumpou je přes něho proset vzorek spalin. Je změřen objem prosetého množství spalin. Po ukončení měření je filtr i se zachycenými částicemi opět zvážen na přesných laboratorních vahách. Výsledná hmotnostní koncentrace je rovna podílu rozdílu hmotností kontaminovaného filtračního papírku s čistým a objemu prosetého množství spalin [6].

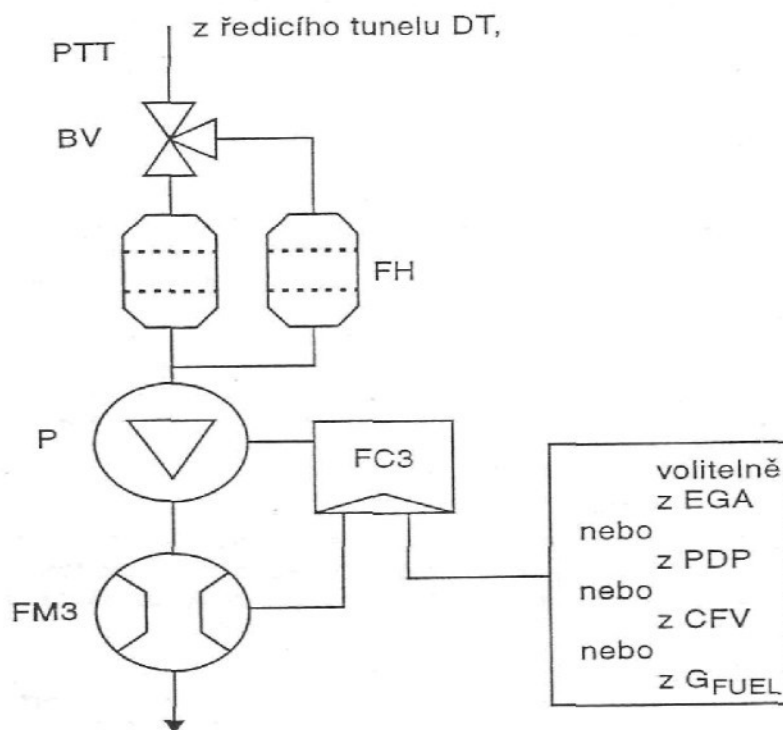
Při výstupu plynů z výfukového traktu do atmosféry dojde vlivem jejich rychlého ochlazení a zředění atmosferickým vzduchem ke spojování částic a sorpci jiných výfukových škodlivin, zejména PAH. Výfukové plyny jsou proto ředěny vzduchem, aby byly napodobeny

podmínky běžného provozu motoru. Rozlišují se 2 druhy ředicích systémů: plnoprůtočný a neplnoprůtočný ředicí systém [2].

3.3.1. Plnoprůtočný ředicí systém

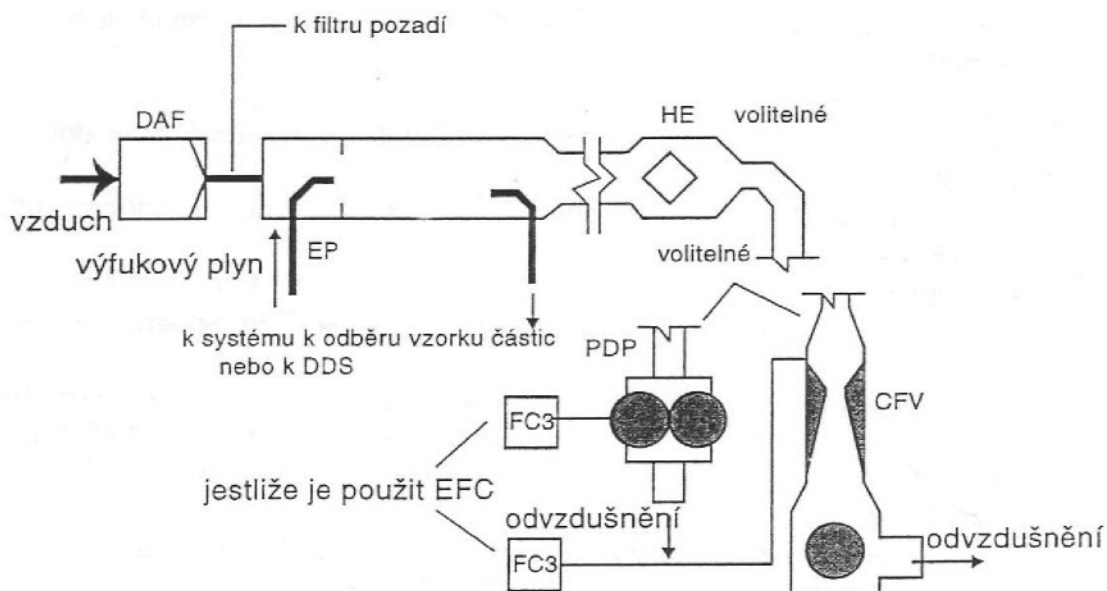
Tento systém využívá celý průtok výfukových plynů. Plyny jsou pak v tunelu zředěny vzduchem. Závislost velikosti zařízení na průtoku spalin je dána mezní teplotou zředěných výfukových plynů na vstupu do zachycovacích filtrů. Průtok zředěných spalin je udržován během zkušebního cyklu konstantní (tato metoda se nazývá CVS – Constant Volume Sampling) [1].

Na obr. 6 je znázorněn systém k odběru vzorku částic, který je potřebný k jejich jímání. Vzorek zředěného výfukového plynu je odebírán odběrným čerpadlem (P) z ředicího tunelu (DT) odběrnou sondou částic (PSP) a přenosovou trubicou částic (PTT). Vzorek prochází držáky filtrů (FH), v nichž jsou filtry k odběru částic. Průtok vzorku řídí regulátor (FC3). Při použití elektronické kompenzace EFC (viz obr. 7), je použit průtok zředěného výfukového plynu jako řídicí signál pro FC3 [3].



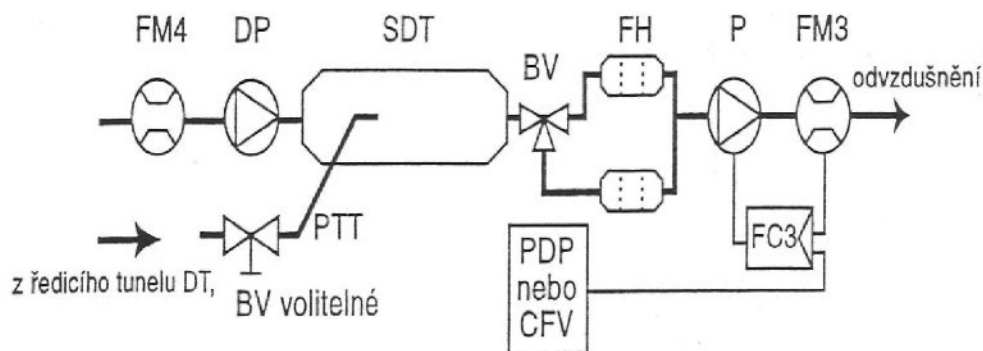
Obr. 6 – Systém k odběru částic

Na obr. 7 je znázorněno schéma uspořádání tunelu na měření produkce částic s možností použití dvou systémů pro měření průtoku zředěných spalín (PDP nebo CVF). Celkové množství surového výfukového plynu je vedeno výfukovou trubicou (EP) do ředícího tunelu (DT), kde dojde k smísení s ředícím vzduchem. Průtok zředěného výfukového plynu je měřen buď objemovým čerpadlem (PDP) - Positive Displacement Pump nebo Venturiho clonou s kritickým průtokem (CFV) - Critical Flow Venturi. Ředící vzduch je nasáván přes filtr vzduchu (DAF). Vzorek je odebrán odběrnou sondou (PSP) a dále je veden přenosovou trubicou (PTT) k systému odběru vzorku, viz. obr. 6 [3].



Obr. 7 – Plnoprávný systém

Prochází-li vzorek zředěného výfukového plynu z ředícího tunelu přímo do systému odběru vzorku částic, nazýváme tento postup jednoduché ředění. Je-li předepsaná teplota na vstupu do filtru vyšší než uvádí norma (52°C), je použito dvojitého ředění, kdy je vzorek ředěn ještě jednou v sekundárním ředícím tunelu. Schéma zapojení je na obr. 8. Zředěné výfukové plyny primárním vzduchem jsou pomocí odběrného čerpadla (P) nasávány z přenosové trubky (PTT) do sekundárního ředícího tunelu (SDT), kde jsou ještě jednou ředěny vzduchem. Čerpadlo ředícího vzduchu (DP) nasává do ředícího tunelu vzduch přes průtokoměr (FM4). Vzorek prochází držákem (držáky) filtrů (FH), v nichž jsou filtry k odběru částic. Průtok prosetého množství zředěného vzorku je měřen průtokoměrem (FM3) [3].



Obr. 8 – Systém s dvojitým ředěním

3.3.2 Neplnoprůtočný ředící systém – minitunel

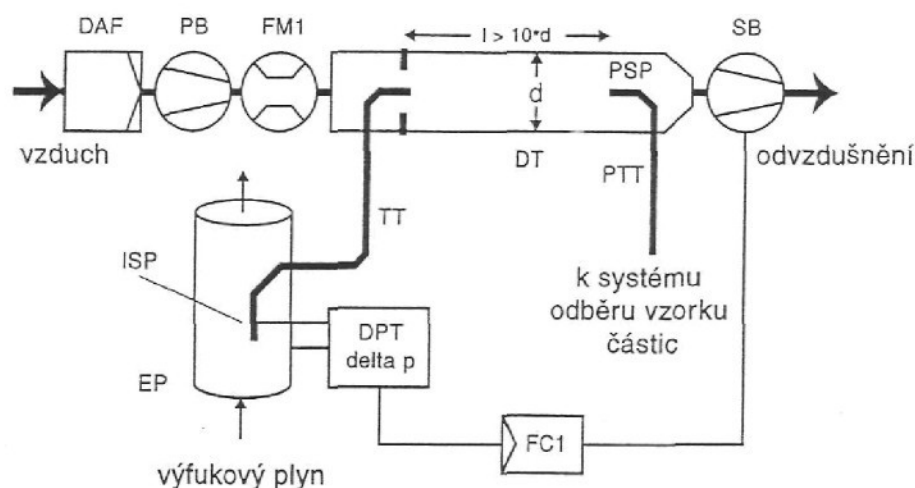
Při použití tohoto systému vstupuje do ředicího tunelu jen část výfukového plynu. Následné ředění výfukových plynů vzduchem lze provést různými způsoby. Množství částic závisí na teplotě zředěných spalin a tím i na ředícím poměru. Pro zajištění shodných podmínek během procesu ředění je, stejně jako u plnoprůtočného systému, nutné dodržovat neměnný poměr průtoku (dělicí systém) výfukových plynů přiváděných do minitunelu proti celkovému průtoku spalin z motoru nezávisle na změnách pracovního režimu[1]. Existuje několik konstrukčních uspořádání minitunelu.

a) Izokinetické systémy

Tyto systémy jsou založeny na podmínce splnění rovnosti průtokových rychlostí uvnitř odběrové sondy a v okolním průřezu výfukového potrubí. Je nutné dodržet nerušený a rovnoměrný tok výfukového plynu v odběrové sondě. Pro dodržení rovnosti průtoků je využívána regulace průtoku tak, aby byl na vstupu sondy udržen nulový tlakový rozdíl. Regulace průtoku je zajištěna sacím ventilátorem (SB), viz. obr. 9 nebo tlakovým ventilátorem (PB), viz obr. 10 [1].

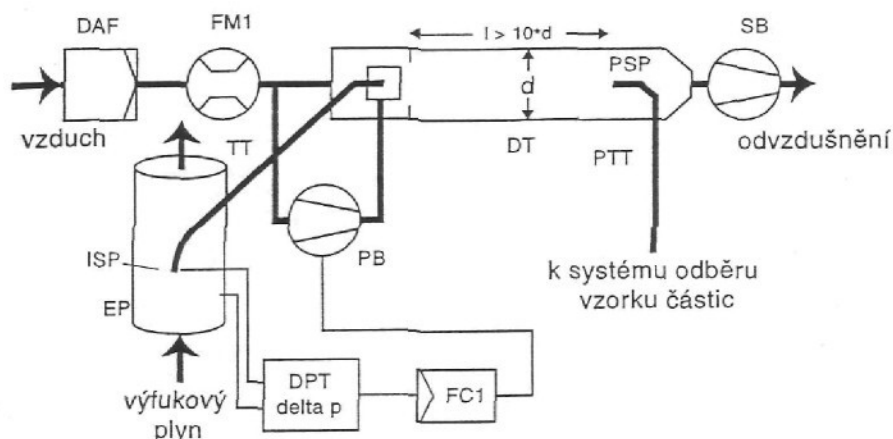
Na obr. 9 je znázorněn izokinetický systém s řízením (SB). Výfukový plyn je převáděn z výfukové trubky (EP) izokinetickou odběrovou sondou (ISP) a přenosovou trubkou (TT) do ředicího tunelu (DT). Tlakový ventilátor (PB) nasává ředící vzduch do ředicího tunelu přes vzduchový filtr (DAF). Rozdíl tlaku výfukového plynu mezi výfukovou trubkou a vstupem do sondy je měřen snímačem tlaku (DPT). Tento signál je pak převáděn na regulátor průtoku

(FC1), který řídí sací ventilátor (SB) tak, aby byla dodržena podmínka rovnosti průtokových rychlostí ve výfukové trubce a v izokinetické sondě. Dělicí poměr je určen z příčných průřezů EP a ISP. Průtok ředicího vzduchu je měřen průtokoměrem (FM1). Ředící poměr je vypočten z průtoku ředicího vzduchu a z dělicího poměru. Odběrnou sondou (PSP) je zředěný výfukový plyn přiváděn přenosovou trubicou (PTT) k systému odběru částic, viz obr. 6 [3].



Obr. 9 – Izokinetický systém (řízení SB)

Na obr. 10 je znázorněn izokinetický systém s řízením PB. Nulový tlakový rozdíl mezi výfukovou trubicou a vstupem do sondy je regulován pomocí tlakového ventilátoru (PB), který odebírá část ředicího vzduchu. Tato část je zavedena do přenosové trubky (TT) pneumatickou clonou [3]. Ostatní části zařízení se shodují s obr. 9.

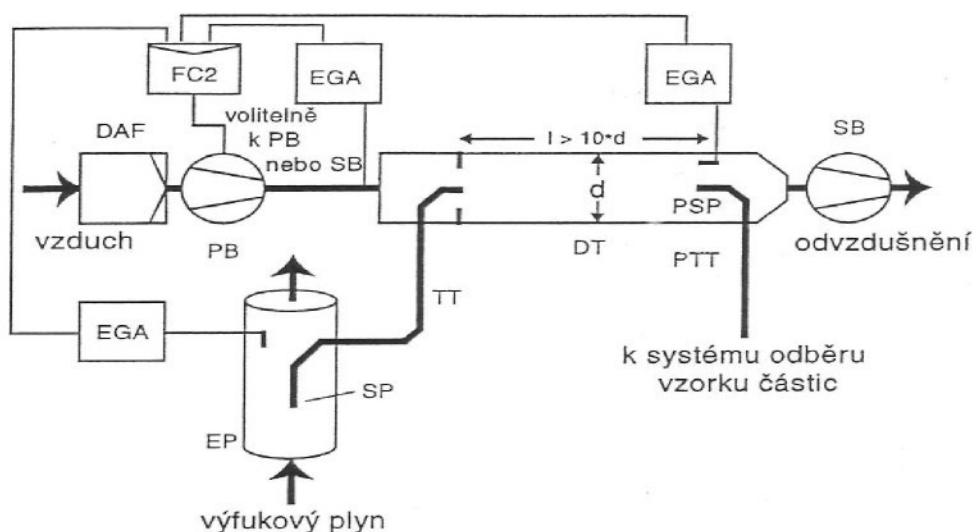


Obr. 10 – Izokinetický systém (řízení PB)

b) Systémy s řízením průtoku a s měřením koncentrace

U těchto systémů je měřena koncentrace složek CO_2 nebo NO_x . Koncentrace těchto složek je zjišťována ve výfuku nejen před a po zředění vzduchem, ale i přímo ředícího vzduchu. Koncentrace ve výfuku je měřena přímo, nebo může být určena z průtoku paliva a z rovnice bilance uhlíku, pokud známe složení paliva. Z naměřených koncentrací je potom vypočítán ředící poměr. Pomocí vypočítaného ředícího poměru je řízen systém tlakovým nebo sacím ventilátorem [3].

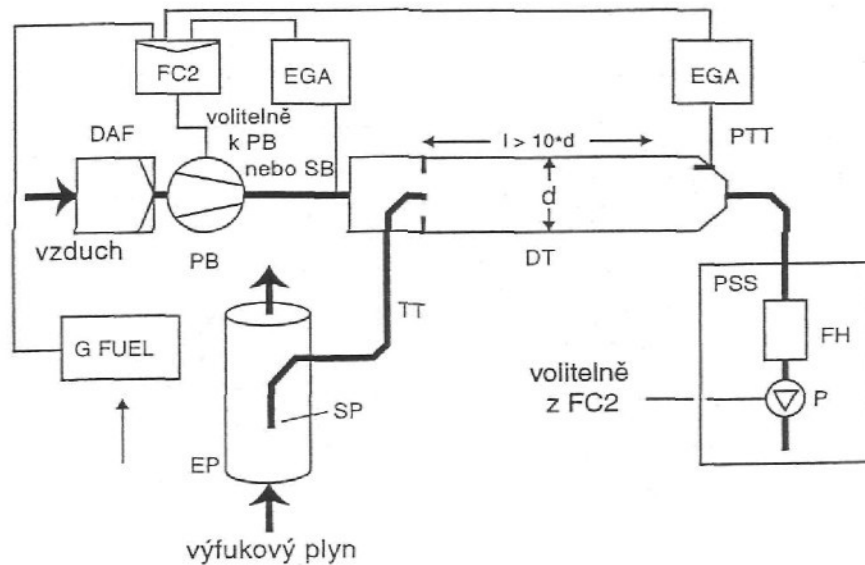
Na obr. 12 je schéma systému s měřením koncentrace CO_2 nebo NO_x . Z výfukového potrubí (EP) je snímán odběrnou sondou (SP) vzorek výfukových plynů. Vzorek je dále veden přenosovou trubicí (TT) do ředícího tunelu (DT). Koncentrace složek CO_2 nebo NO_x je měřena pomocí analyzátorů EGA. Tyto signály jsou přenášeny do regulátoru průtoku (FC2), který řídí průtok tlakovým ventilátorem (PB) nebo sacím (SB) [3].



Obr. 12 – Systém s měřením koncentrace CO_2 nebo NO_x

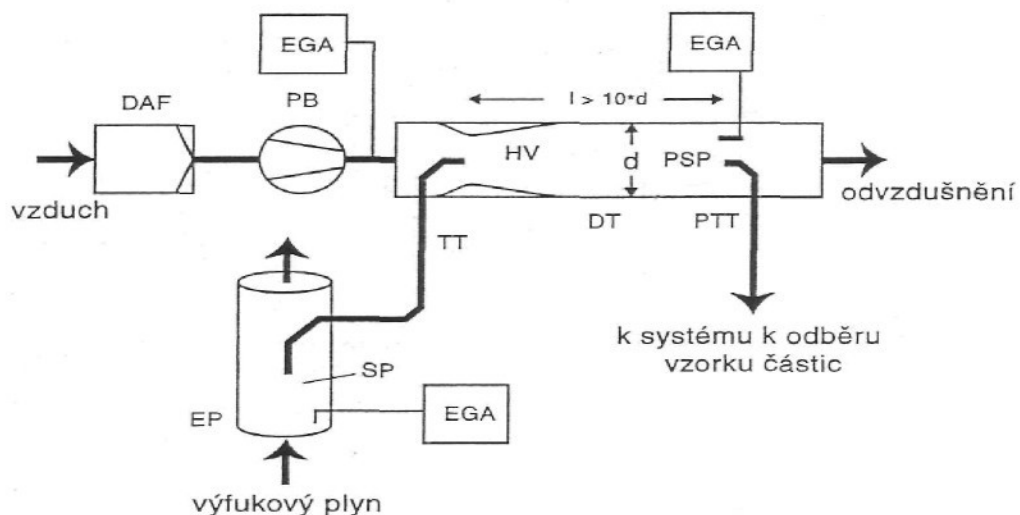
Na obr. 13 je znázorněno další možné uspořádání systému. Při použití tohoto systému je měřena analyzátory EGA koncentrace CO_2 ve zředěném výfukovém plynu a ředícím vzduchu. Signály CO_2 a průtoku paliva (G_{FUEL}) jsou přiváděny buď do regulátoru průtoku (FC2), nebo do regulátoru průtoku (FC3) systému k odběru vzorku částic (viz obr. 6). Regulátor (FC2) řídí tlakový ventilátor (PB), regulátor (FC3) řídí odběrné čerpadlo (P) a tím seřizují toky do systému tak, aby bylo v tunelu (DT) udrženo požadované dělení toku výfukového plynu a

ředící poměr. Ředící poměr je vypočten z koncentrací CO_2 a G_{FUEL} s použitím metody bilance uhlíku [3].



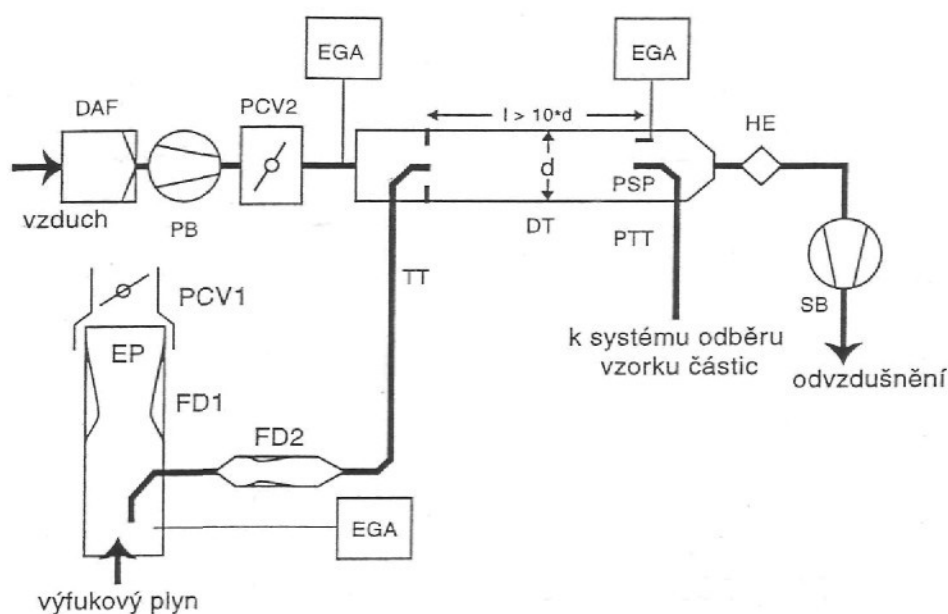
Obr. 13 – Systém s měřením koncentrace CO_2 a s bilancí uhlíku

Systém s jednoduchou Venturiho clonou je znázorněn na obr. 14. Venturiho clona je umístěna v ředícím tunelu (DT). Clona vytváří podtlak, jehož pomocí je nasáván vzorek výfukového plynu do ředícího tunelu. Průtok plynu z přenosové trubky (TT) do ředícího tunelu závisí na změně hybnosti v oblasti Venturiho clony a je ovlivňován teplotou plynu na výstupu z přenosové trubky. V důsledku toho proto není dělení toku výfukového plynu pro daný průtok tunelem konstantní a ředící poměr je závislý na zatížení motoru [3].



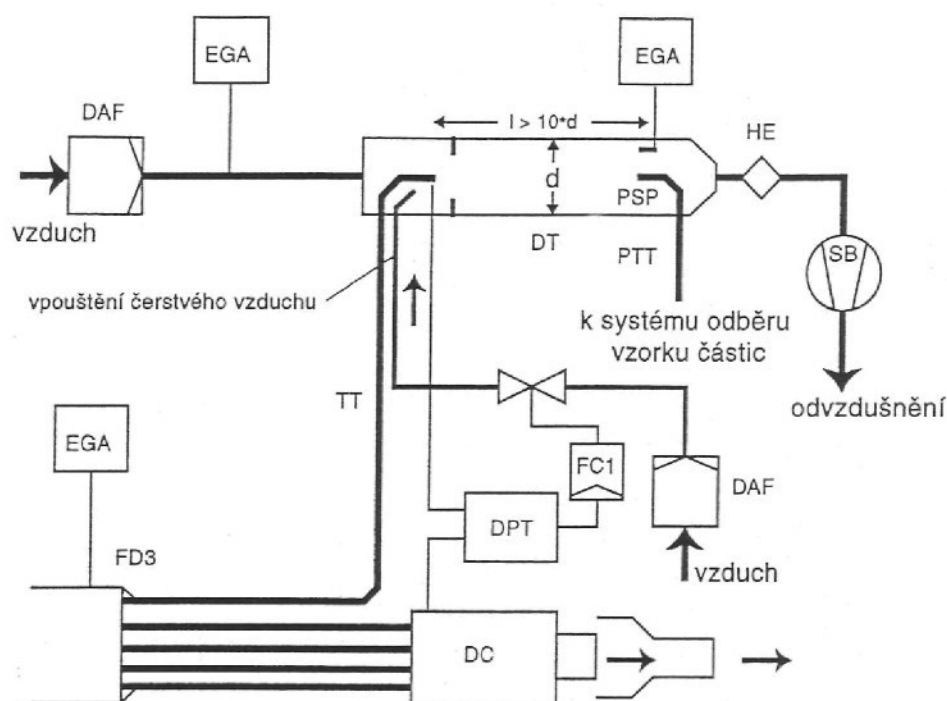
Obr 14 – Systém s jednoduchou Venturiho clonou

Na obr. 15 je znázorněné schéma s dvojitou Venturiho clonou. Tento systém je oproti předcházejícímu systému výhodnější, protože u tohoto systému zaniká nevýhoda, kdy ředící poměr není konstantní. První Venturiho clona (FD1) je umístěna ve výfukovém potrubí (EP), druhá Venturiho clona (FD2) v přenosové trubce (TT). Pomocí ventilů k řízení tlaku (PCV1) a (PCV2) je udržován konstantní ředící poměr. Ventil (PCV1) řídí protitlak ve výfukovém potrubí a ventil (PCV2) řídí tlak ředícího vzduchu. Měření koncentrace analyzátorů (EGA) je obdobné jak u předcházejících systémů [3].



Obr. 15 – Systém s dvojitou Venturiho clonou a s měřením koncentrace

Jednou z možností je nahrazení odběrné sondy děličem toku výfukových plynů (FD3), který se skládá z více trubek stejného rozměru. Rozdělení výfukových plynů závisí jen na celkovém počtu trubek. Tento systém je znázorněn na obr. 16. Jednou z trubek je veden výfukový plyn do ředícího tunelu (DT). Ostatní trubky jsou vedeny do tlumicí komory (DC), čímž se minimalizuje kolísání tlaku ve výfukové trubce. Diferenciálním tlakovým snímačem (DPT) je měřen rozdíl tlaků v tlumicí komoře a na přenosové trubce (TT). Nulovou hodnotou rozdílu tlaku je udržován konstantní průtok výfukového plynu v celé sadě trubek. Signál z tlakového snímače je předán do regulátoru průtoku (FC1), který reguluje průtok vzduchu k výstupu přenosové trubky do ředícího tunelu. Ředící poměr je vypočítán z naměřených hodnot analyzátorů (EGA) [3].

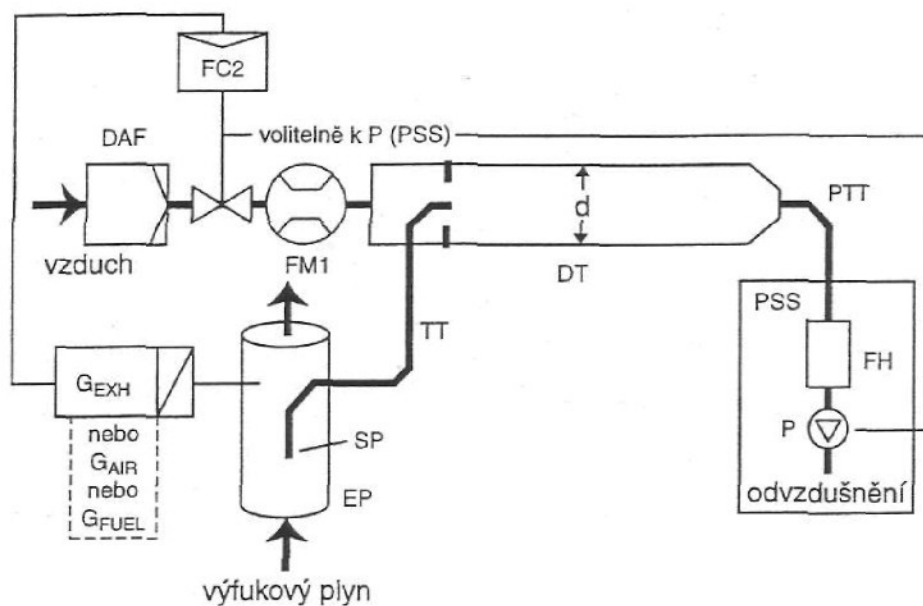


Obr. 16 – Systém s rozdělením do více trubek a s měřením koncentrace

c) Systémy s řízením průtoku a s měřením průtoku

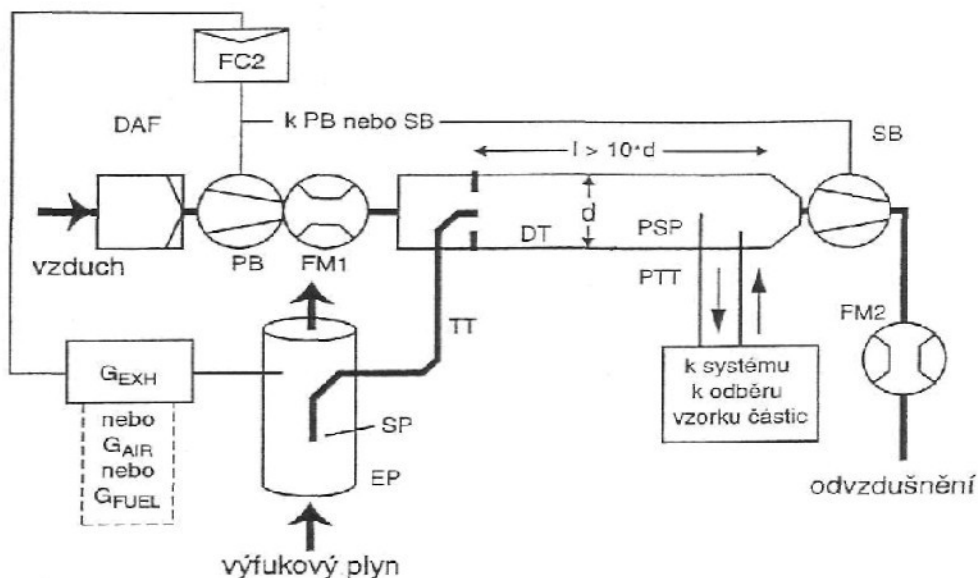
Těmito systémy je odebírán vzorek výfukových plynů pomocí nastaveného průtoku ředícího vzduchu a celkového průtoku zředěného výfukového plynu. Z těchto průtoků je vypočítán ředící poměr [3].

U systému s ředěním části toku s řízením průtoku a s odběrem celkového vzorku, který je znázorněn na obr. 17, je celkový průtok tunelem nastavován odběrným čerpadlem (P). Průtok ředícího vzduchu je řízen regulátorem průtoku (FC2), který využívá signálu z měření průtoku výfukových plynů (G_{EXHW}), vzduchu (G_{AIR}) nebo paliva (G_{FUEL}) [3].



Obr. 17 – Systém s ředěním části toku s řízením průtoku a s odběrem celkového vzorku

Na obr. 18 je zobrazeno měření částic pomocí dílčího odběru vzorku s řízením průtoku. Tento systém se liší od předchozího (obr. 17) ve způsobu odběru vzorku a řízením průtoku. Odebraný vzorek je vrácen zpět do ředícího tunelu (DT). Tlakový ventilátor (PB) řídí průtok ředícího vzduchu a sací ventilátor (SB) celkový průtok zředěných spalín [3].



Obr. 18 – Systém s ředěním části toku s řízením průtoku a s odběrem dílčího vzorku

4. Předpisy pro měření a vyhodnocení emise tuhých částic

Předpis EHK č. 49 stanovuje požadavky na maximální emise plyných škodlivin a částic ze vznětových motorů, z motorů poháněných zemním plynem a z motorů poháněných zkapalněnými ropnými plyny, určených k pohonu motorových vozidel s konstrukční rychlostí větší než 25 km/h, které patří do kategorií M1 o celkové hmotnosti větší než 3,5t, dále M2, M3, N1, N2 a N3 [3]. Předpis uvádí metody a postupy měření, postupy výpočtu, požadavky na přístrojové vybavení, limity škodlivých emisí a jiné. Předepisuje 3 základní zkoušky motoru:

a) Zkouška ESC

Při této zkoušce jsou měřeny emise CO, HC, NO_x a PT. Zkouška je složena ze třinácti režimů ustáleného stavu, které odpovídají typickému provoznímu rozsahu motoru (viz tab. 1). Pro měření částic je použit jeden pár měřících filtrů po celou dobu zkoušky. Výpočet otáček A, B, C a celkové provedení zkoušky je uvedeno v normě [3].

Tab. 1 – Režimy vznětového motoru pro třinácti bodový test [3]

Č.režimu	Otáčky motoru	Procento zatížení	Váhový faktor	Trvání režimu
1	Volnoběžné	-	0,15	4 minuty
2	A	100	0,08	2 minuty
3	B	50	0,10	2 minuty
4	B	75	0,10	2 minuty
5	A	50	0,05	2 minuty
6	A	75	0,05	2 minuty
7	A	25	0,05	2 minuty
8	B	100	0,09	2 minuty
9	B	25	0,10	2 minuty
10	C	100	0,08	2 minuty
11	C	25	0,05	2 minuty
12	C	75	0,05	2 minuty
13	C	50	0,05	2 minuty

Limity pro zkoušku ESC s příslušnou platností jsou uvedeny v tab. 2.

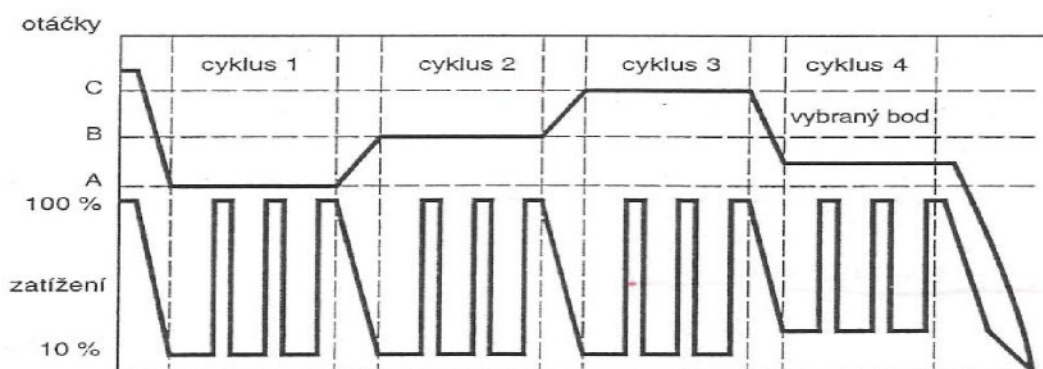
Tab. 2 – Limity pro zkoušky ESC a ELR [3]

Řádek	Hmotnost oxidu uhelnatého CO [g/kWh]	Hmotnost uhlovodíků HC [g/kWh]	Hmotnost oxidů dusíku NO _x [g/kWh]	Hmotnost částic PT [g/kWh]	Kouř [m ⁻¹]
A (2000)	2,1	0,66	5,0	0,10 0,13 ^a	0,8
B1 (2005)	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5
B2 (2008)	1,5	0,46	2,0	0,02	0,5
C (EEV)	1,5	0,25	2,0	0,02	0,15

^a – pro motory se zdvihovým objemem < 0,75 dm³ na válec a s otáčkami jmenovitého výkonu > 3000 min⁻¹

b) Zkouška ELR

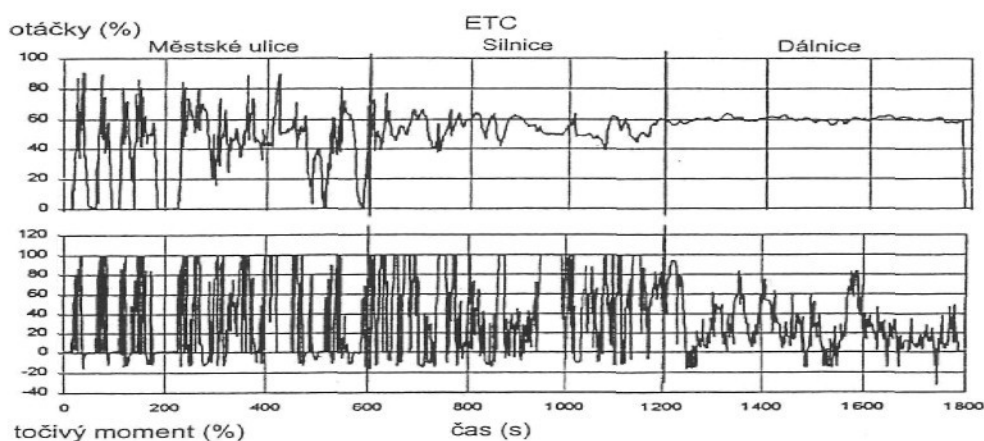
V průběhu zkoušky ELR je určována kouřivost motoru pomocí metody opacimetrie. Zkouška je složena ze tří cyklů a vybraného bodu. U každého cyklu jsou definovány otáčky motoru, které jsou po celou dobu cyklu konstantní a je zvyšováno zatížení motoru z 10% na 100 % během definovaného času. Čtvrtý cyklus (vybraný bod) je zvolen technickou zkušebnou a hodnota je porovnávána s hodnotami třech předchozích zatěžovacích cyklů. Nejvyšší hodnota kouře je určena průměrovacím algoritmem [3]. Postup zkoušky je schématicky znázorněn na obr. 18. Limitní hodnoty kouřivosti jsou uvedeny v tab. 2.



Obr. 18 – Průběh zkoušky ELR

c) Zkouška ETC

Tato zkouška je složena z neustálých, každou sekundu se střídajících režimů, které vystihují silniční jízdní režimy motorů velkého výkonu určené pro nákladní automobily a autobusy. Výfukové plyny jsou ředěny vzduchem a je zaznamenáván signál z analyzátorů. Výfukové škodliviny a práce motoru jsou vyhodnoceny jako integrální za celý test [3]. Plán průběhu zkoušky ETC je znázorněn na obr. 19. Emisní limity jsou odlišné od hodnot při zkoušce ESC a jsou uvedeny v tab. 3.



Obr. 19 – Průběh zkoušky ETC na dynamometru

Tab. 3 – Limity pro zkoušku ETC [3]

Řádek	Hmotnost oxidu uhelnatého CO [g/kWh]	Hmotnost uhlovodíků NMHC [g/kWh]	Hmotnost metanu (CH ₄) ^b [g/kWh]	Hmotnost oxidů dusíku NO _x [g/kWh]	Hmotnost částic PT [g/kWh]
A (2000)	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16
B1 (2005)	4,0	0,55	1,1	3,5	0,03
B2 (2008)	4,0	0,55	1,1	2,0	0,03
C (EEV)	3,0	0,4	0,65	2,0	0,02

^a – pro motory se zdvihovým objemem < 0,75 dm³ na válec a s otáčkami jmenovitého výkonu > 3000 min⁻¹

^b – jen pro motory pracující s NG

5. Kvalimetrie

Měření emisí znečišťujících látek stacionárními zdroji znečišťování ovzduší je aplikovaným oborem analytické chemie. Jedním z nejdůležitějších imperativů analytické chemie je snaha o nejvyšší kvalitu dosažených výsledků. Tímto úkolem se zabývá speciální část metrologie nazývaná kvalimetrie [5].

Mnoho důležitých rozhodnutí je založeno na výsledcích kvantitativních chemických analýz, k nimž patří i měření emisí znečišťujících látek v ovzduší. Jejich výsledky jsou používány k porovnávání se zákonnými limity (viz.kapitola.4). V případech, kdy je rozhodování založeno na výsledcích analýz, je nezbytné dbát na existenci určitých indikátorů kvality výsledků, tedy míře, s níž se lze na výsledky pro daný účel spolehnout. Je oficiálním požadavkem, aby laboratoře zavedly opatření pro zabezpečení jakosti a tím zajistily spolehlivost požadovaných údajů [5].

V důsledku těchto požadavků je nutné prokazovat kvalitu výsledků a zvláště pak demonstrovat jejich vhodnost pro zamýšlené použití tím, že je uváděna míra spolehlivosti výsledků. Takovou vhodnou mírou je nejistota měření, která je přiřazena k hodnotě výsledku měření. Měřená veličina se tedy liší od skutečné hodnoty o nejistotu měření. Skutečná hodnota je hodnota dokonale charakterizující definovanou veličinu za podmínek, při nichž je tato veličina uvažována. Je to hodnota, která by mohla být získána dokonalým měřením. Skutečné hodnoty jsou však nedostupné a jsou proto nahrazovány dohodnutými (schválenými) referenčními hodnotami [5].

Nejistota měření je způsobena i měřicími přístroji, hodnotami použitých konstant, korekce apod. Pro určení míry nejistoty je používána směrodatná odchylka udávané veličiny (nebo její stanovený násobek) nebo šířka konfidenčního intervalu [5].

Při určování pomocí směrodatné odchylky se nejistota nazývá standardní nejistota měření. Podle způsobu, kterým jsou nejistoty získány jsou rozděleny:

- a) Standardní nejistoty typu A (u_A) - jsou způsobeny náhodnými chybami a stanoveny výpočtem z opakovaných měření stejné hodnoty za stejných podmínek. Tyto nejistoty se zmenšují se zvětšujícím se počtem opakovaných měření. Za standardní nejistotu typu A je zvolena směrodatná odchylka výběrových průměrů, která je rovna [1]:

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad , \quad (1)$$

kde: y_i jednotlivé naměřené hodnoty,
 $\bar{y}$ průměrná hodnota,
 n počet měření.

- b) Standardní nejistoty typu B (u_B) - jsou způsobeny známými a odhadnutelnými příčinami vzniku z různých zdrojů. Výsledkem je součet jednotlivých zdrojů nejistot. Výpočet těchto nejistot vychází z mezních chyb měřidel podle údajů výrobce, z mezních chyb konstant a také z parametrů měřicího zařízení. Vliv změn vnějších podmínek (např. vliv teploty) je nutný uvažovat u měřidel, u kterých je známá citlivost parametrů. Pro stanovení nejistoty výsledku měření se používá výpočet ve spojení s odhadem některých jejích složek [1]. Celková nejistota typu B je rovna:

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2} \quad (2)$$

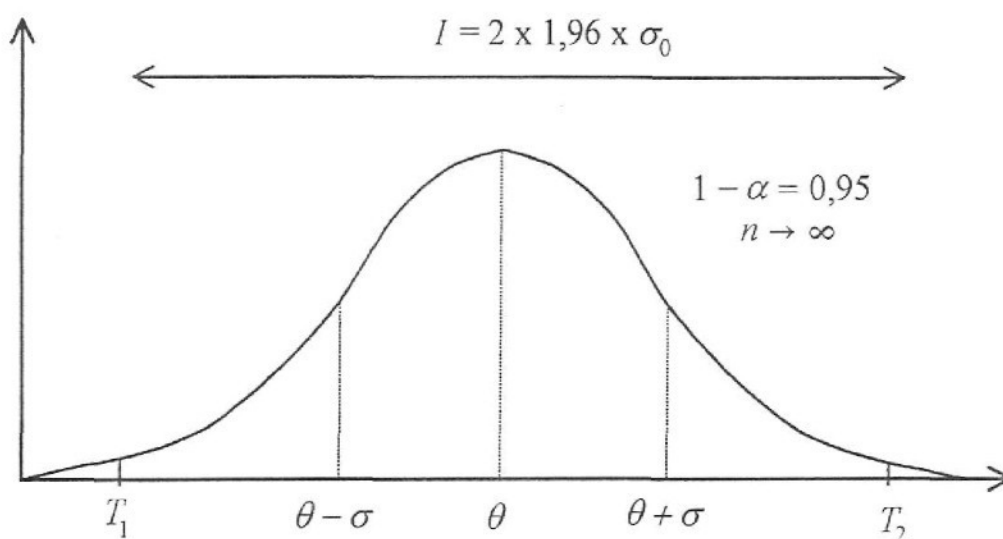
kde: u_{zj} jednotlivé zdroje nejistot.

- c) Kombinovaná standardní nejistota C (u_C) – je standardní nejistota výsledku měření, která byla získána z řady dalších veličin (na sebe navazujících výsledků měření). Obvyklou metodou pro určení nejistoty výsledků je právě stanovení kombinované standardní nejistoty u_C . Mírou této nejistoty je interval veličiny považované za výsledek měření, který zahrnuje velkou část distribuce hodnot, jenž lze považovat za výsledky měření (viz.obr. 20) [5]. Kombinovaná standardní nejistota je rovna:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad . \quad (3)$$

Takto vypočítaná kombinovaná standardní nejistota pro normální rozdělení uvádí, že naměřené hodnoty leží v tomto intervalu s pravděpodobností 68 %. Vynásobením kombinované standardní nejistoty faktorem pokrytí (k) získáme rozšířenou standardní nejistotu (U), která má větší pravděpodobnost správného výsledku měření (pro $k = 2, \dots, 95$ % pravděpodobnost) [5].

Druhý způsob určení míry nejistoty je tedy šířka konfidenčního intervalu. Na obr. 20 je znázorněn 95 % konfidenční interval (oboustranný). Jsou-li T_1 a T_2 dvě funkce měřené veličiny a θ je charakterizující parametr, o jehož odhad se snažíme, potom je pravděpodobnost, že se $T_1 \leq \theta \leq T_2$ rovná nejméně $(1-\alpha)$ (kde $1-\alpha$ je zadané kladné číslo menší než 1). Interval mezi T_1 a T_2 je oboustranný $(1-\alpha)$ konfidenční interval pro θ [5].



$T_1 = \theta - 1,96 \cdot \sigma_0$		spodní mez 95 % konfidenčního intervalu,
$T_2 = \theta + 1,96 \cdot \sigma_0$		horní mez 95 % konfidenčního intervalu,
$I = T_2 - T_1 = 2 \cdot 1,96 \cdot \sigma_0$		šířka 95 % konfidenčního intervalu,
$\sigma_0 = I / (2 \cdot 1,96)$		směrodatná odchylka odpovídající 95 % konfid. intervalu.

Obr. 20 – 95 % konfidenční interval (oboustranný)

V této diplomové práci je při výpočtu nejistoty měření používána první metoda, tedy výpočet pomocí kombinované standardní nejistoty. Výpočet nejistoty měření je uveden v kapitole 6.3.

6. Měření na minitunelu – vlastní měření

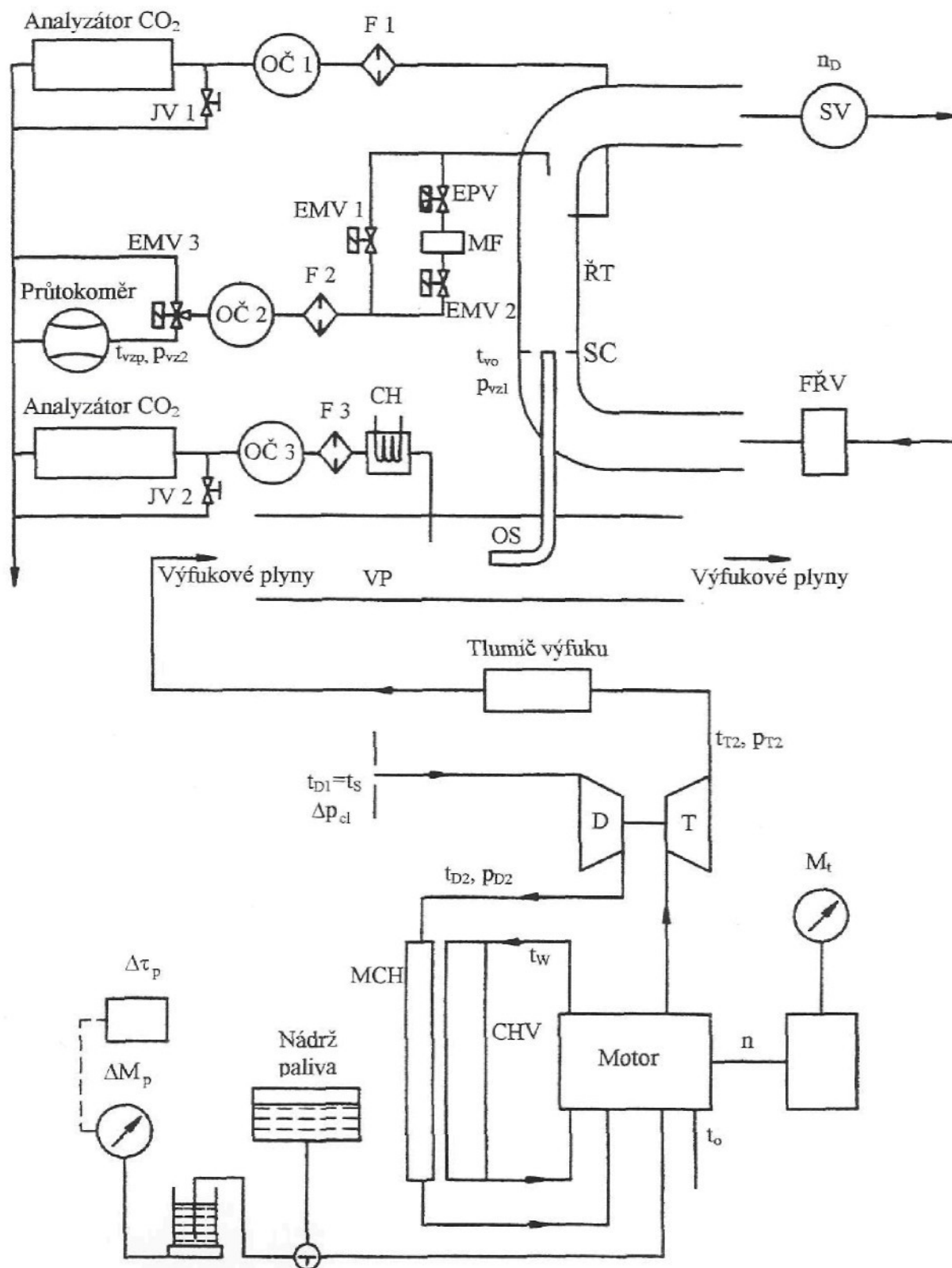
6.1. Popis měřicího zařízení ve zkušební laboratoři KSD

Ve zkušební laboratoři KSD byl k měření pevných částic používán neplnoprůtočný ředící systém s měřením koncentrace CO_2 . Princip a schéma systému jsou uvedeny v kapitole 3.3.2. Na obr. 21 je schématicky znázorněno kompletní zařízení s označením míst k měření koncentrace pevných částic. Výfukové plyny byly vedeny výfukovým potrubím (VP), kde byla umístěna odběrová sonda (OS). Tato sonda odebírala část výfukových plynů. Po odběru byly výfukové plyny vedeny přenosovou trubicí (PT) do ředícího tunelu (ŘT), který zajišťoval ředění. V ředícím tunelu proudil vzduch nasávaný dmychadlem přes filtry (FRV), které zajišťovaly jeho čistotu. Konstrukce ředícího tunelu (ŘT) musela zajistit dokonalé promísení vzorku výfukových plynů s ředícím vzduchem a snížení teploty zředěného vzorku pod 52°C . K dokonalému promísení sloužila směšovací clona (SC), která byla v ředícího tunelu (ŘT) v místě, kde ústila přenosová trubka (PT). Vzorek zředěných výfukových plynů byl z ředícího tunelu (ŘT) odebírán pomocí odběrného čerpadla (OČ2). Vzorek procházel přes kulový elektropneumaticky ovládaný ventil (EPV) na měřicí filtr (MF). Dále byl vzorek veden přes elektromagnetický ventil (EMV2) přes filtr (F2) do odběrného čerpadla (OČ2) a přes průtokoměr ven. Koncentraci CO_2 ve výfukových plynech a v ředěných výfukových plynech měřily infračervené analyzátory. Ve větvi výfukových plynů byl navíc umístěn chladič (CH), který sloužil ke snížení teploty výfukových plynů do analyzátoru.

Součástí měření byla vážicí komora (s řízenou teplotou a vlhkostí) a mikrováhy. Teplota komory musela být udržována v rozmezí $\pm 6\text{K}$ od hodnoty nastavené v rozmezí $295 - 305\text{ K}$ ($20 - 30^\circ\text{C} \pm 6^\circ\text{C}$) a relativní vlhkost v rozmezí $\pm 10\%$ od hodnoty nastavené v rozmezí $35 - 55\%$. Mikrováhy, které byly používány k určování hmotnosti filtrů vážily s přesností $10\text{ }\mu\text{g}$ a rozlišovací schopností $5\text{ }\mu\text{g}$.

Použitý filtr byl ze skelných vláken, s fluorokarbonovým povrchem nebo z fluorokarbonových membrán. Minimální průměr filtru musel být 47 mm (efektivní průměr byl 37 mm).

Měření bylo prováděno na motoru Daewoo Avia. Parametry motoru jsou uvedeny v příloze 1.



Obr. 21 – Schéma zapojení se zařízením na měření koncentrace pevných částic

V tab. 4. je uvedeno používané přístrojové vybavení zapojení měřicího stanoviště.

Tab. 4 – Přístrojové vybavení

Číslo	Měřená veličina	Označení (Rozměr)	Měřidlo	Umístění
1	Otáčky motoru	n [min ⁻¹]	Tachodynamo dynamometru 2VD 110/6 Meret OC	Vířivý dynamometr
2	Točivý moment motoru	M_t [N.m]	Vážicí zařízení dynamometru, Transporta CHr., v.č. 637748	Vířivý dynamometr 2VD110/6
3	Teplota plnicího vzduchu před dmychadlem	$t_{D1} = t_{e1}$ [°C]	Odporový teploměr PT 100 + převodník DM 300/1-6	70 mm za výstupním průřezem z dmychadla
4	Teplota plnicího vzduchu za dmychadlem	t_{D2} [°C]	Odporový teploměr PT 100 + převodník DM 300/1-6	90 mm za výstupem Vzduchu z dmychadla
5	Teplota plnicího vzduchu za mezichladičem	t_s [°C]	Odporový teploměr PT 100 + převodník DM 300/1-6	350 mm před vstupem vzduchu do sběrného plnicího potrubí
6	Teplota výfukových plynů za turbinou	t_{r2} [°C]	Termočlánek Fe – C + ukazatel 0 až 800 °C v.č. 1750837	230 mm za výstupní přírubou turbíny
7	Teplota výfukových plynů před odběrem vzorku do ředícího tunelu	t_{vz} [°C]	Termočlánek Fe – C + ukazatel 0 až 800 °C v.č. 1750837	V místě odběru vzorku do přenosové trubky
8	Teplota okolí	t_{okoli} [°C]	Psychrometr PM8211	Před čelní clonkou
9	Teplota vzorku před ředěním	t_{vo} [°C]	Odporový teploměr PT 100 + převodník DM 300/1-6	V místě přívodu vzorku do ředícího tunelu
10	Teplota vzorku (před odběrem z ředícího tunelu)	t_{vzorek} [°C]	Odporový teploměr PT 100 + převodník	V místě odběru vzorku z ředícího tunelu
11	Teplota vzorku v plynoměru	t_{vzp} [°C]	Odporový teploměr PT 100 + převodník DM 300/1-6	Před plynoměrem
12	Teplota mazacího oleje	t_o [°C]	Odporový teploměr PT 100 + převodník DM 300/1-6	Olejová vana motoru
13	Teplota chladící kapaliny na výstupu z motoru	t_w [°C]	Odporový teploměr PT 100 + převodník DM 300/1-6	Boční stěna hlavy válců, 1. a 4. válec

Pokračování tab. 4.

14	Přetlak plnicího vzduchu za dmychadlem	Δp_{D2} [kPa]	BD Sensor, DMP 331	250 mm za výstupním průřezem dmychadla
15	Přetlak plnicího vzduchu za mezichladičem	Δp_s [kPa]	BD Sensor, DMP 331	170 mm před vstupem vzduchu do sběrného plnicího potrubí
16	Tlaková difference na čelní clonce	Δp_{cl} [kPa]	Kapalinový tlakoměr s náplní H ₂ O	Čelní hrana clonky
17	Podtlak vzorku v plynoměru	Δp_{vz2} [kPa]	Kapalinový tlakoměr s náplní H ₂ O	Před plynoměrem
18	Barometrický tlak	p_b [kPa]	Staniční barometr Č. DP 1148/3	Ve zkušební laboratoři
19	Koncentrace složky CO _{2spal}	c_s [ppm,%]	Měřicí analyzátory složek emisí	Odběrová sonda 100 a 200 mm před tlumičem výfuku
20	Koncentrace složky CO _{2zřed}	c_s [ppm,%]	Měřicí analyzátory složek emisí	Odběrová sonda před odběrem vzorku z minitunelu
21	Objem vzorku prošlého plynoměrem	V_{plynom} [dm ³]	Plynoměr ELSTER	Za filtrem částic
22	Hmotnost kontaminovaného filtru	Δm [μm]	Mikrogramová váha	Laboratoř KSD
23	Množství spotřebovaného paliva	M_p [g]	Váha C64 Sartorius	Měřicí stanoviště
24	Doba odběru spotřebovaného paliva	T_{odb} [s]	Stopky patřící k výbavě váhy C 64 Sartorius	Měřicí stanoviště
25	Relativní vlhkost vzduchu	φ [%]	Psychrometr PM8211	Před čelní clonkou

6.2. Postup měření na měřicím zařízení

Měřicí filtr musel být nejméně 1 hodinu před použitím stabilizován ve váhací komoře. Poté byl zvážen na mikrogramových váhách. Měřicí filtr musel být podle normy použit do 8 hodin po ukončení stabilizace, jinak bylo nutné filtr znovu stabilizovat a zvážit. Měřicí filtr byl vložen do držáku.

Analyzátory CO_2 byly nakalibrovány pomocí kalibračního plynu. Do analyzátoru byl přiveden nulovací plyn (N_2) a potenciometrem byla na stupnici nastavena nulová hodnota. Průtok nulovacího plynu do analyzátoru byl stejný jako u měřeného plynu. Pro kalibraci kalibračním plynem (% CO_2 v N_2) byl nastaven na analyzátoru měřicí rozsah a byl přiveden kalibrační plyn. Průtok byl stejný jako u měřeného plynu. Ukazatel byl nastaven pomocí potenciometru na hodnotu koncentrace kalibračního plynu. Pro kalibraci byly použity kalibrační plyny s obsahem 9,97 % CO_2 v N_2 a 1,08 % CO_2 v N_2 .

Po kalibraci analyzátorů a zahřátí motoru na provozní teplotu byl nastaven zvolený režim motoru. Pomocí změny otáček sacího ventilátoru byl na analyzátoch CO_2 nastaven požadovaný ředící poměr. Po danou dobu vzorek zředěných výfukových plynů procházel otevřením elektropneumatického ventilu přes měřicí filtr. Vzorek procházel současně průtokoměrem, kterým bylo měřeno prošlé množství vzorku. Hodnoty byly odečítány na počátku a na konci měřicího cyklu. Po uplynutí této doby elektropneumatický ventil uzavřel přívod zředěného vzorku k filtru a vzorek procházel obtokovou větví. Měřicí filtr byl odebrán z držáku, byl nahrazen novým měřicím filtrem a následovalo další měření. Vždy byla kontrolována teplota před vstupem vzorku do měřicího filtru, která nesměla překročit 52°C . Byla-li teplota vyšší, musel být upraven ředící poměr.

6.3. Výpočet emise pevných částic

Postup výpočtu koncentrace pevných částic je předveden při výpočtu prvního vzorku prvního měření. Při tomto měření byl zjišťován vliv ředícího poměru (q) a změna parametru motoru (velikost točivého momentu motoru M_t) na množství částic. Otáčky motoru byly konstantní $n = 1400 \text{ min}^{-1}$.

Na stupnicích zkalibrovaných analyzátorů byly odečteny hodnoty koncentrací CO_2 ve výfukových plynech a v zředěném vzorku. Z těchto koncentrací byl vypočítán ředící poměr. Analyzátor měřící koncentraci ve výfukovém potrubí měl nastaven měřicí rozsah 16 % a

analyzátor měřící koncentraci v ředicím tunelu 1,2 %. Vzorec pro výpočet ředícího poměru (4) musel být upraven přepočtovým koeficient 13,33 získaným podílem měřících rozsahů (16/1,2).

Naměřené hodnoty, které byly při výpočtu použité, jsou uvedeny v přílohách 2 až 6 . Hodnota podtlaku vzorku v plynoměru (p_{vz2}) byla při výpočtu hustoty spalin (vzorec 11) zanedbatelná, protože byla řádově 10^3 krát menší než hodnota barometrického tlaku (p_b). Při uvažování nulové hodnoty p_{vz2} se tedy hodnota hustoty spalin příliš nelišila.

Konstanty použité při výpočtu:

Izoentropický mocnítel		$\kappa = 1,4 [-]$
Měrná plynová konstanta		$r = 287,1 [J/kg.K]$
Konstanta		$\pi = 3,142 [-]$

a) Ředící poměr

$$q = \frac{CO_{2spal}}{CO_{2zřed}} \cdot 13,33 \quad (4)$$

$$q = \frac{37}{79,5} \cdot 13,33 = 6,204$$

b) Hustota nasávaného vzduchu do motoru

$$\rho_{vzd} = \frac{0,464}{t_{D1} + 273} \cdot \left[7,501 \cdot p_b - \frac{\varphi}{100} \cdot (0,412 \cdot t_{D1} - 1,6) \right] \quad (5)$$

$$\rho_{vzd} = \frac{0,464}{18 + 273} \cdot \left[7,501 \cdot 97 - \frac{31}{100} \cdot (0,412 \cdot 18 - 1,6) \right] = 1,157 kg / m^3$$

c) Expanzní součinitel

$$\varepsilon = 0,636 + 0,364 \cdot \left(1 - \frac{\Delta p_{cl}}{p_b} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (6)$$

$$\varepsilon = 0,636 + 0,364 \cdot \left(1 - \frac{1147,77}{97 \cdot 100} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,9687$$

d) Množství nasávaného vzduchu do motoru

$$M_{vzd} = 6,041 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{\Delta p_{cl} \cdot \rho_{vzd}} \quad (7)$$

$$M_{vzd} = 6,041 \cdot 0,9687 \cdot \sqrt{1147,77 \cdot 1,157} = 213,274 kg / h$$

e) Množství spotřebovaného paliva

$$M_p = \frac{m_p}{T_{odb} \cdot 1000} \cdot 3600 \quad (8)$$

$$M_p = \frac{100}{64,8 \cdot 1000} \cdot 3600 = 5,560 \text{ kg/h}$$

f) Množství směsi

$$M_s = M_{vzd} + M_p \quad (9)$$

$$M_s = 213,274 + 5,560 = 218,834 \text{ kg/h}$$

g) Ekvivalentní hmotnostní průtok

$$G_{EDFW} = M_s \cdot q \quad (10)$$

$$G_{EDFW} = 218,834 \cdot 6,204 = 1357,626 \text{ kg/h}$$

h) Hustota spalin

$$\rho_{spal} = \frac{P_b - P_{vz2}}{r \cdot (t_{vzp} + 273,15)} \quad (11)$$

$$\rho_{spal} = \frac{97 \cdot 10^3 - 0}{287,1 \cdot (26,4 + 273,15)} = 1,128 \text{ kg/m}^3$$

i) Hmotnost vzorku prošlého filtry částic

$$M_{SAM} = V_{plynoměr} \cdot \rho_{spal} \quad (12)$$

$$M_{SAM} = 120 \cdot 1,128 = 135,348 \text{ g}$$

j) Hmotnost vzorku na měřicím filtru

$$\Delta m_{vzorek} = m_1 - m_2 \quad (13)$$

$$\Delta m_{vzorek} = 67915 - 66826 = 1089 \mu\text{g}$$

k) Hmotnostní průtok pevných částic

$$PT_{mass} = \frac{\Delta m_{vzorek} \cdot G_{EDFW}}{M_{SAM} \cdot 1000} \quad (14)$$

$$PT_{mass} = \frac{1089 \cdot 1357,626}{135,348 \cdot 1000} = 10,923 \text{ g/h}$$

l) Emise pevných částic

$$PT = \frac{PT_{mass}}{P} = \frac{PT_{mass}}{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M} \quad (15)$$

$$PT = \frac{10,923 \cdot 1000}{2,3,142 \cdot \frac{1400}{60} \cdot 150} = 0,497 \text{ g/kWh}$$

m) Výpočet celkové nejistoty emise pevných částic

V tab. 5 jsou uvedeny všechny zdroje a hodnoty jejich nejistot. Na těchto zdrojích nejistot byla závislá celková nejistota emise pevných částic. Postupně byly vypočítány dílčí nejistoty rovnic (4) až (15).

Tab. 5 – Zdroje nejistot

Měřená veličina	Hodnota nejistoty	Měřená veličina	Hodnota nejistoty
Otáčky motoru n	0,5 %	Relativní vlhkost φ	2%
Moment motoru M _t	2 %	Analyzátor CO ₂	2%
Hmotnost Δm, m _p	0,5 %	Čas T _{odb}	0,5%
Objem plynoměru V	2 %	Nulovací plyn	2%
Tlak p _b , p _{vzd} , Δp _{cl}	2 %	Kalibrační plyn	2%
Teplota t _{p(vnoměr)} , t _{D1}	2 %	Ostatní vlivy	2%

$$u_{CO_2} = \sqrt{u_{anal.CO_2}^2 + u_{nul.plyn}^2 + u_{kal.plyn}^2 + u_{ostat.vlivy}^2} \quad (16)$$

$$u_{CO_2} = \sqrt{2^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2} = 4 \%$$

$$u_q = \sqrt{u_{CO_2}^2 + u_{CO_2}^2} \quad (17)$$

$$u_q = \sqrt{4^2 + 4^2} = 5,66 \%$$

$$u_{pvzd} = \sqrt{2u_{tD1}^2 + u_{pb}^2 + u_{\varphi}^2} \quad (18)$$

$$u_{pvzd} = \sqrt{2^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2} = 4 \%$$

$$u_{\varepsilon} = \sqrt{u_{\Delta pcl}^2 + u_{pb}^2} \quad (19)$$

$$u_{\varepsilon} = \sqrt{2^2 + 2^2} = 2,83 \%$$

$$u_{Mvzd} = \sqrt{u_{\varepsilon}^2 + u_{\Delta pcl}^2 + u_{pvzd}^2} \quad (20)$$

$$u_{Mvzd} = \sqrt{2,83^2 + 2^2 + 4^2} = 5,29 \%$$

$$u_{Mp} = \sqrt{u_{mp}^2 + u_{Tab}^2} \quad (21)$$

$$u_{Mp} = \sqrt{0,5^2 + 0,5^2} = 0,71\%$$

$$u_{Ms} = \sqrt{u_{Mzd}^2 + u_{Mp}^2} \quad (22)$$

$$u_{Ms} = \sqrt{5,29^2 + 0,71^2} = 5,34\%$$

$$u_{GEDFW} = \sqrt{u_{Ms}^2 + u_q^2} \quad (23)$$

$$u_{GEDFW} = \sqrt{5,34^2 + 5,66^2} = 7,78\%$$

$$u_{\rho spal} = \sqrt{u_{pb}^2 + u_{pvz}^2 + u_{t\text{plynomér}}^2} \quad (24)$$

$$u_{\rho spal} = \sqrt{2^2 + 2^2 + 2^2} = 3,46\%$$

$$u_{Msam} = \sqrt{u_{t\text{plynom.}}^2 + u_{\rho spal}^2} \quad (25)$$

$$u_{Msam} = \sqrt{2^2 + 3,46^2} = 3,4\%$$

$$u_{PTmass} = \sqrt{u_{\Delta nvzorek}^2 + u_{GEDFW}^2 + u_{Msam}^2} \quad (26)$$

$$u_{PTmass} = \sqrt{0,5^2 + 7,78^2 + 3,4^2} = 8,51\%$$

$$u_{PT} = \sqrt{u_{PTmass}^2 + u_n^2 + u_{Mt}^2} \quad (27)$$

$$u_{PT} = \sqrt{8,51^2 + 0,5^2 + 2^2} = 8,77\%$$

n) Výsledek měření

Emise pevných částic: $PT = (0,497 \pm 0,04357) \text{ g/kWh}$ s 95% pravděpodobností

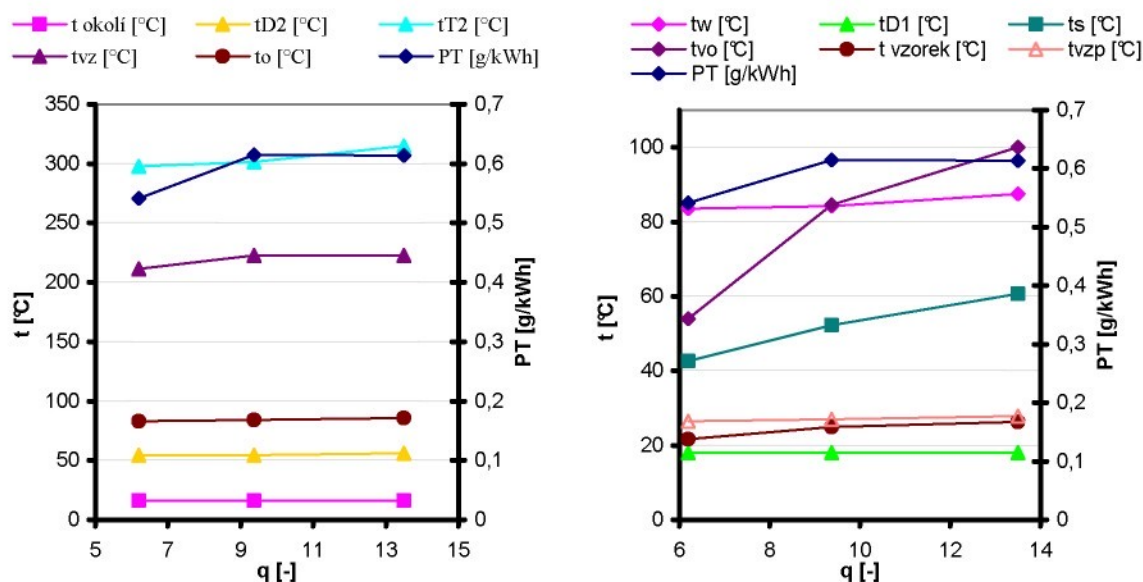
$PT_{MAX} = 0,541 \text{ g/kWh}$

$PT_{MIN} = 0,453 \text{ g/kWh}$

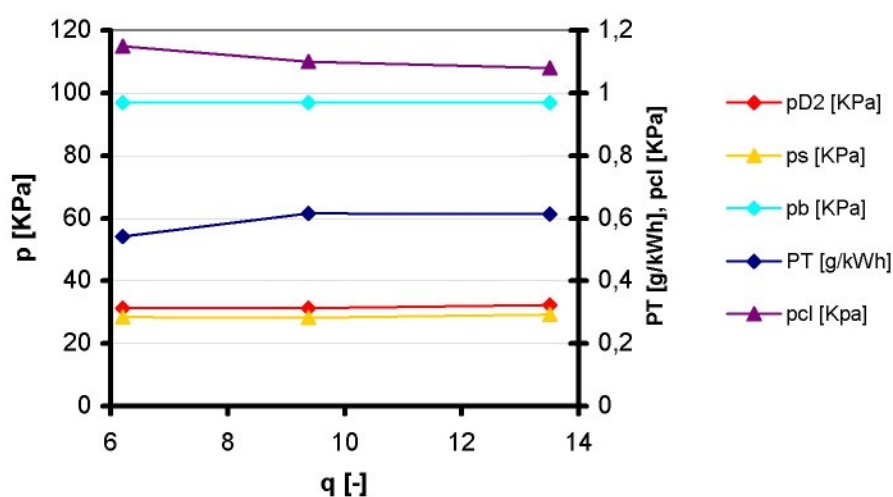
Při vyhodnocení měření byla uvažována a vynášena do grafů hodnota PT_{MAX} .

6.4. Vyhodnocení měření

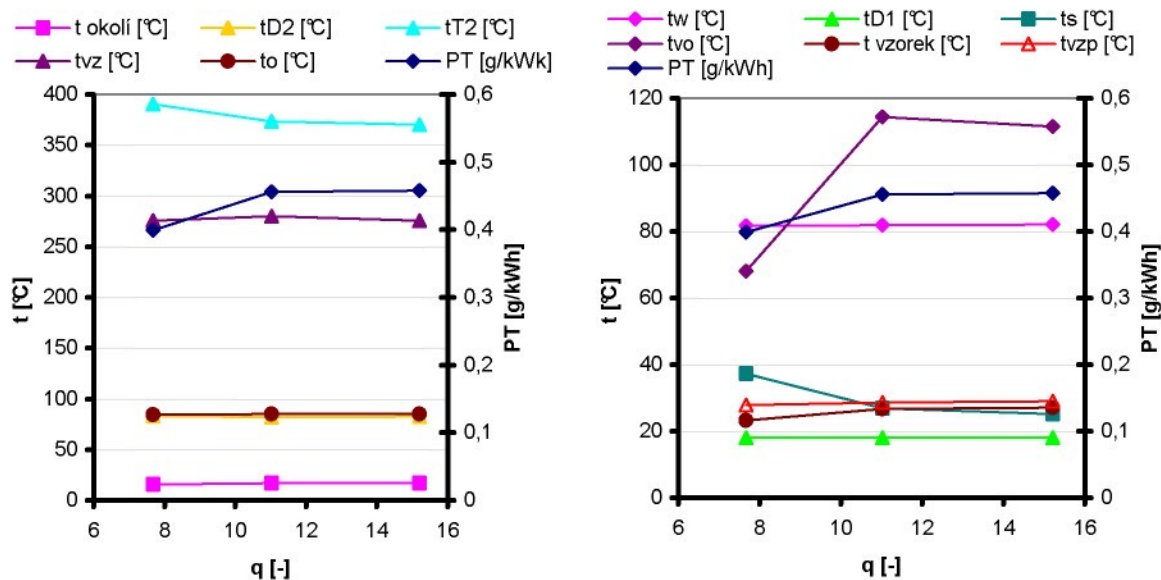
První měření (celkem 6 vzorků) bylo zaměřeno na posouzení vlivu provozních veličin na hodnotu měrné emise tuhých látek. Hodnoty otáček motoru byly konstantní ($n = 1400 \text{ min}^{-1}$). Tři vzorky byly měřeny při zatížení $M_t = 150 \text{ Nm}$ a další tři při zatížení $M_t = 265 \text{ Nm}$. U každého měření byly zvoleny různé ředící poměry. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 2, vypočtené hodnoty v příloze 7. Závislosti průběhů veličin jsou vyneseny do grafů 1 až 6.



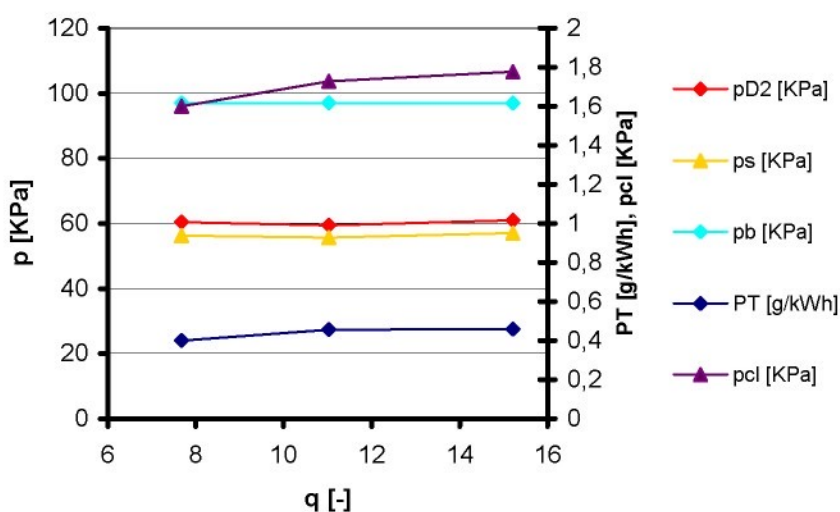
Grafy 1, 2 – Závislost teplot a emise pevných částic na ředícím poměru při $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ a $M_t = 150 \text{ Nm}$.



Graf 3 – Závislost tlaků a emise pevných částic na ředícím poměru při $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ a $M_t = 150 \text{ Nm}$.



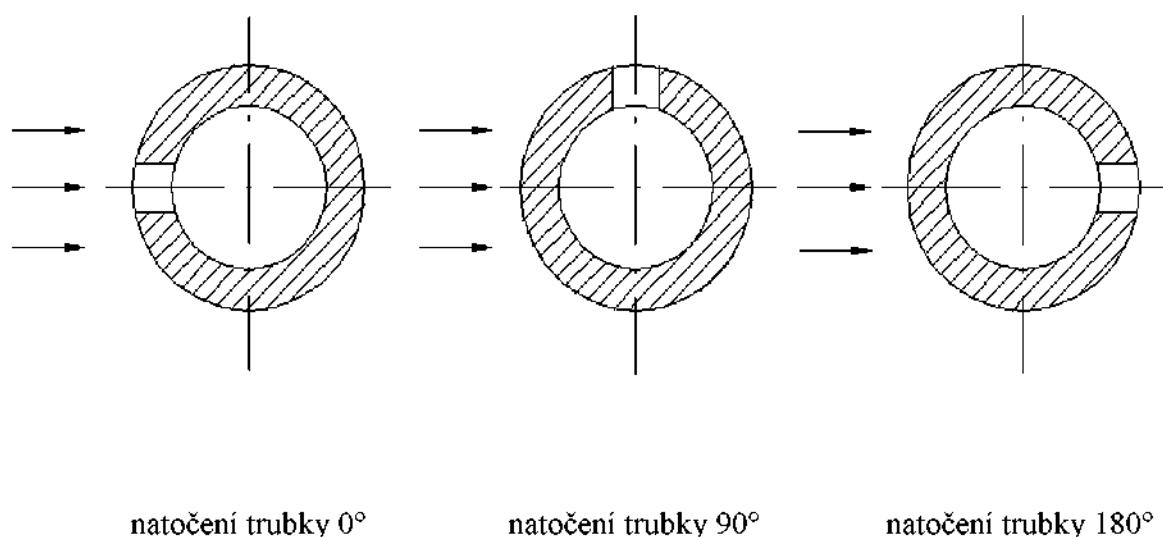
Grafy 4, 5 – Závislost teplot a emisí pevných částic na ředícím poměru při $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ a $M_t = 265 \text{ Nm}$.



Graf 6 – Závislost tlaků a emisí pevných částic na ředícím poměru při $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ a $M_t = 265 \text{ Nm}$.

Z grafů 1 až 6 vyplývá, že se zvyšujícím se ředícím poměrem (q) docházelo v důsledku změny podmínek při odběru vzorku k nárůstu emisí pevných částic. Při zatížení $M_t = 150 \text{ Nm}$ byl tento nárůst $0,073 \text{ g/kWh}$ (13,5 %), při zatížení $M_t = 265 \text{ Nm}$ činil $0,059 \text{ g/kWh}$ (14,8 %). Množství zachycených částic bylo při vyšším zatížení nižší. Je nutno poznamenat, že hodnoty ředících poměrů nebyly při zatíženích shodné.

U zbývajících měření (celkem 24 vzorků) byl sledován vliv podmínek odběru vzorku na hodnotu měrné emise tuhých látek. Z tohoto důvodu byl vytvořen nový odběr vzorku spalin přibližně 400 mm od původního odběru vzorku z výfukového potrubí. Při tomto odběru byly vzorky odebírány z výfukového potrubí 145 milimetrů dlouhou trubicí o průměru 24 milimetrů. Do této trubky bylo vyvrtáno pět děr, jejichž průměr se postupně zvyšoval. První průměr děr činil 5 milimetrů, druhý průměr 8 milimetrů a poslední průměr 10 milimetrů. Poloha trubky se při odběru také měnila. V první poloze byly vyvrtané díry natočeny proti proudu výfukových plynů (natočení 0°), v druhé poloze byla trubka pootočena o 90° ve směru hodinových ručiček a v třetí poloze, která byla měřena pouze u průměru děr 8 milimetrů, byla trubka natočena o 180° (díry se nacházely ve směru proudění výfukových plynů). Poloha děr a proudění výfukových plynů jsou znázorněné na obr. 22. Schéma odběru vzorku je znázorněné na výkrese č.KSD – DP – 490 - 1.



Obr. 22 – Schéma proudění výfukových plynů a pozice natočení odběrové trubky

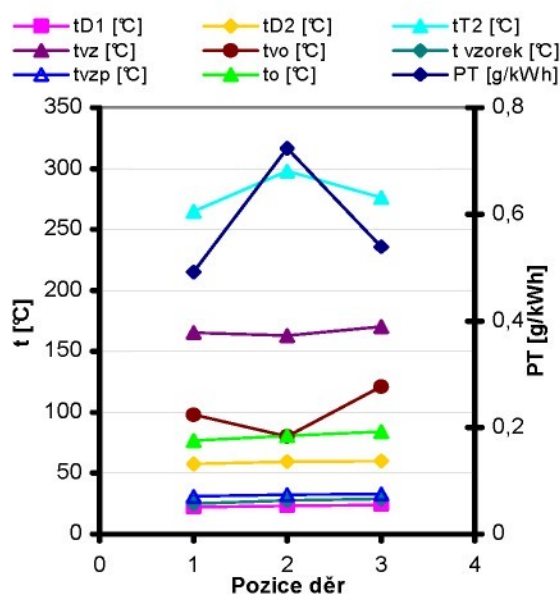
Všech 24 měření bylo prováděno při konstantních otáčkách $n = 1400 \text{ min}^{-1}$ a konstantním zatížení $M_t = 150 \text{ Nm}$. U prvních tří vzorků byl proveden tzv. stěnový odběr (trubka bez děr). Při tomto odběru byl vzorek odebírán z blízkosti stěny výfukového potrubí a to při třech různých ředících poměrech. Tento odběr byl považován za referenční (porovnávací). Dále byla prováděna vždy tři měření pro různé průměry děr a různé natočení odběrové trubky a to při třech různých ředících poměrech. Každá trojice hodnot byla zanesena do grafu a byla provedena lineární regrese, ze které byla vypočítána rovnice přímky. Z této rovnice byla vypočítána hodnota emise pevných částic pro stejnou hodnotu ředícího poměru jako u referenčního (stěnového) odběru. Tyto hodnoty emisí byly nanесeny do vyhodnocovacích

grafů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v přílohách 3 až 6, vypočtené hodnoty v přílohách 8 až 10. Při výpočtu difference výsledných emisí ε_{PT} (viz. přílohy 8 až 10) byl za referenční považován odběr při průměru děr 5 mm a natočení trubky 0° .

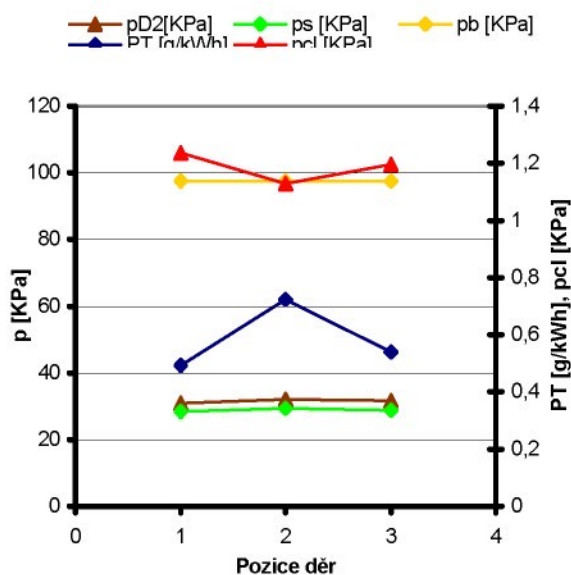
$$\varepsilon_{PT} = \frac{\text{výpočet} - \text{referenční}}{\text{referenční}} \cdot 100 [\%] \quad (28)$$

Vyhodnocení vlivu natočení odběrové trubky pro průměr děr 5 milimetrů, 8 milimetrů a 10 milimetrů. Pozice děr znázorněných v grafech na ose x jsou:

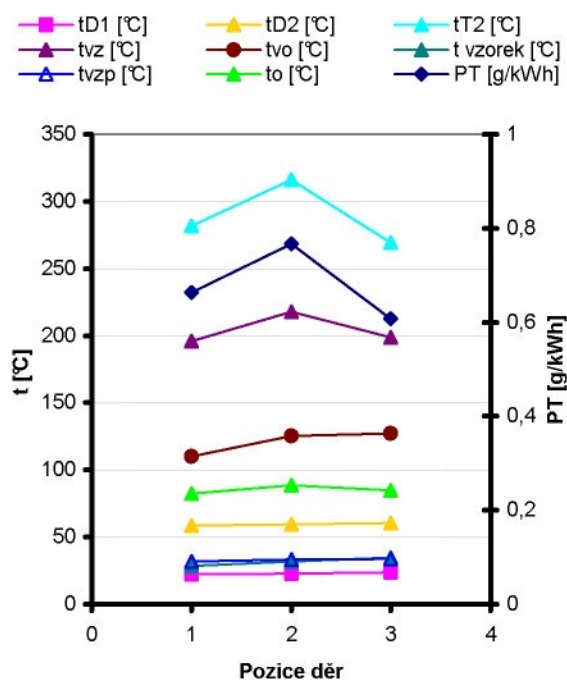
- 1 - referenční odběr,
- 2 – natočení trubky 0° ,
- 3 – natočení trubky 90° ,
- 4 – natočení trubky 180° (měření pouze u průměru děr 8 milimetrů).



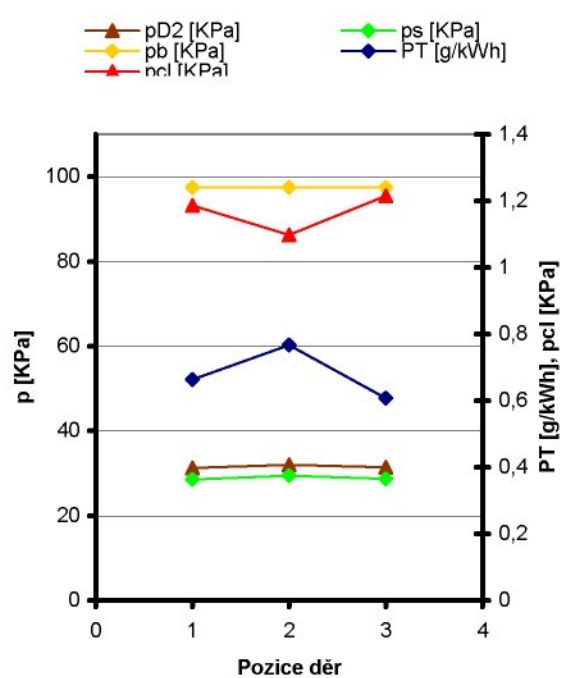
Graf 7 – Závislost teplot a emise PT, průměr děr 5mm, $q = 6,192$



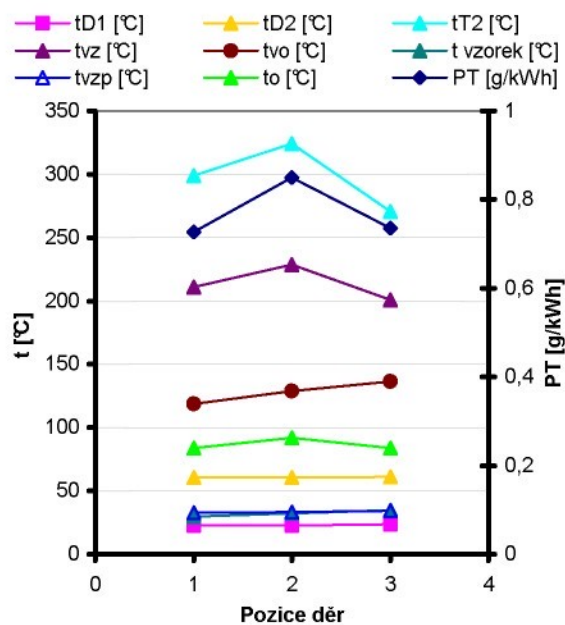
Graf 8 – Závislost tlaků a emise PT, průměr děr 5 mm, $q = 6,192$



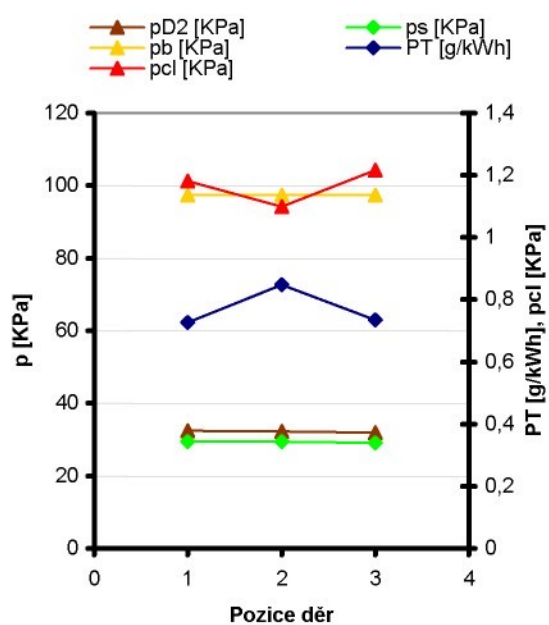
Graf 9 – Závislost teplot a emise PT, průměr děr 5 mm, $q = 9,368$



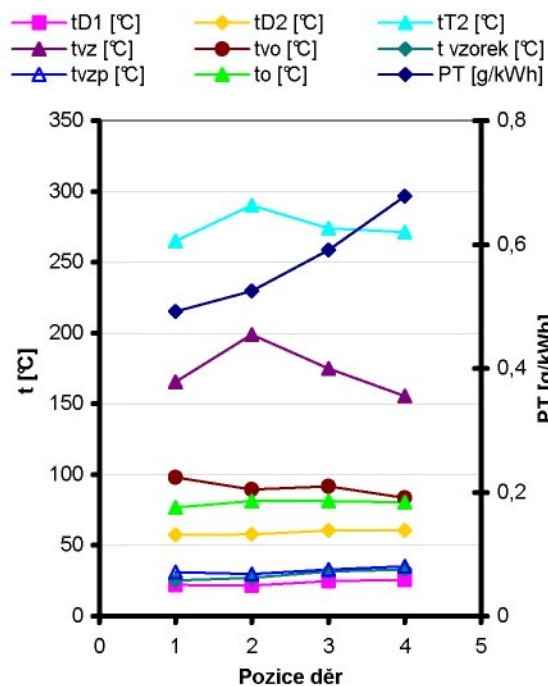
Graf 10 – Závislost tlaků a emise PT, průměr děr 5 mm, $q = 9,368$



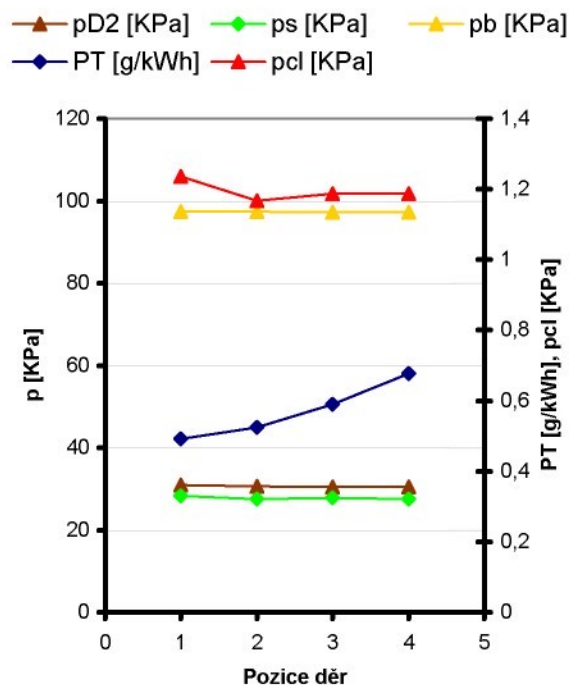
Graf 11 – Závislost teplot a emise PT, průměr děr 5 mm, $q = 15,350$



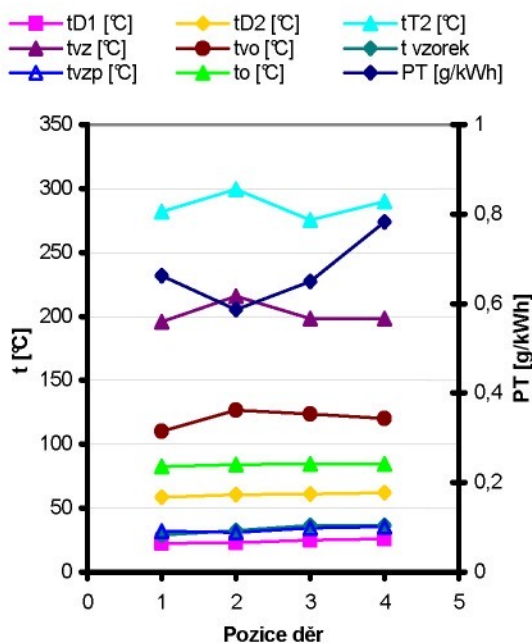
Graf 12 – Závislost tlaků a emise PT, průměr děr 5 mm, $q = 15,350$



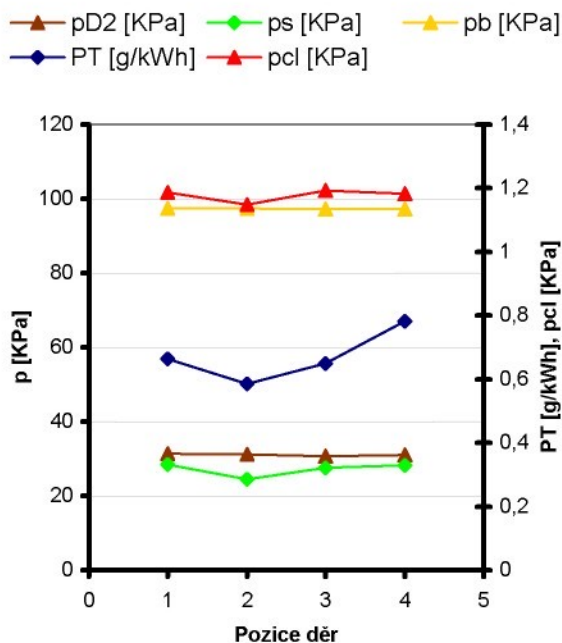
Graf 13 – Závislost teplot a emise PT, průměr děr 8 mm, $q = 6,192$



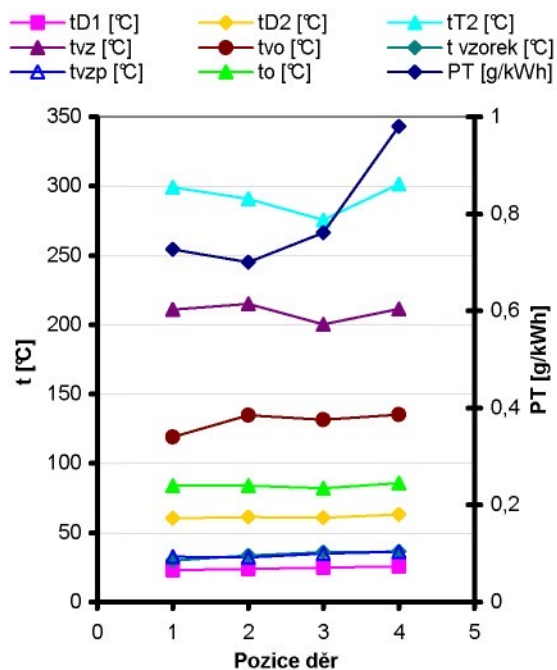
Graf 14 – Závislost tlaků a emise PT, průměr děr 8 mm, $q = 6,192$



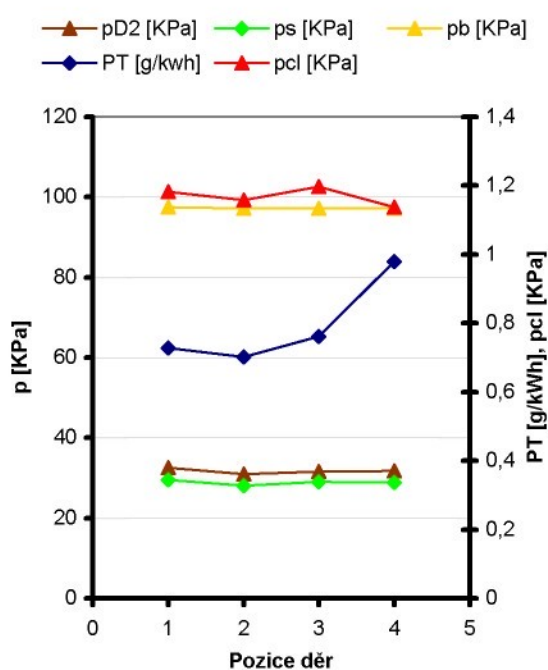
Graf 15 – Závislost teplot a emise PT, průměr děr 8 mm, $q = 9,368$



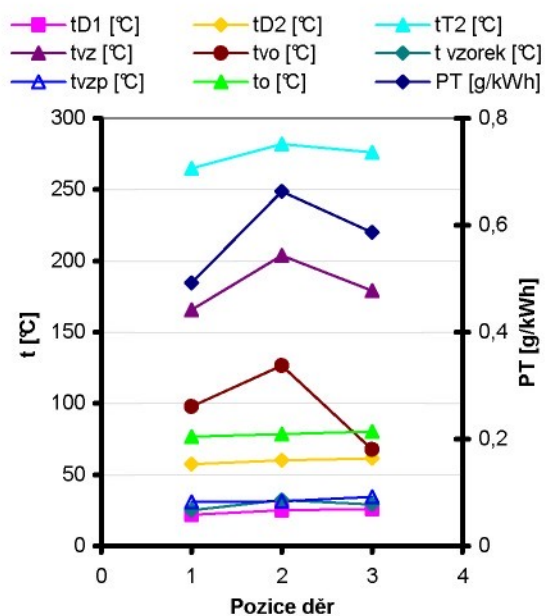
Graf 16 – Závislost tlaků a emise PT, průměr děr 8 mm, $q = 9,368$



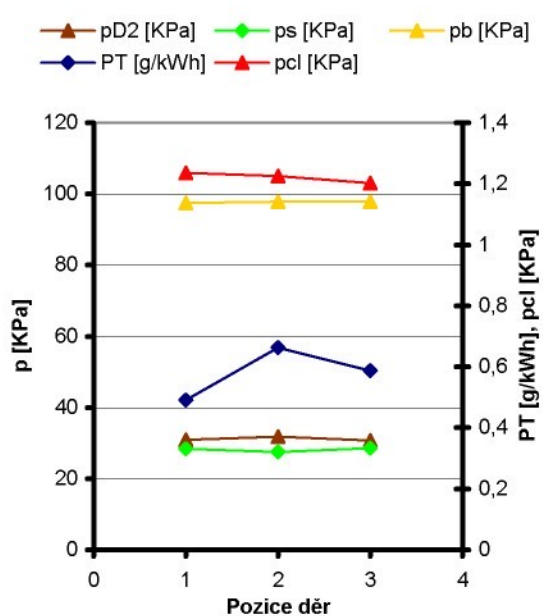
Graf 17 – Závislost teplot a emise PT
průměr děr 8 mm, $q = 15,350$



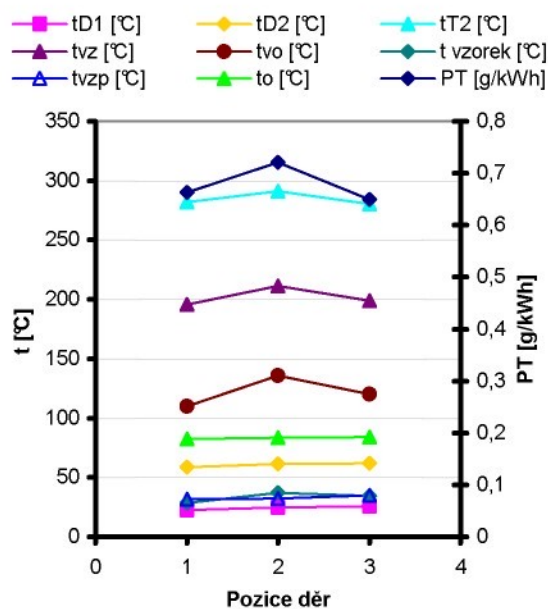
Graf 18 – Závislost tlaků a emise PT
průměr děr 8 mm, $q = 15,350$



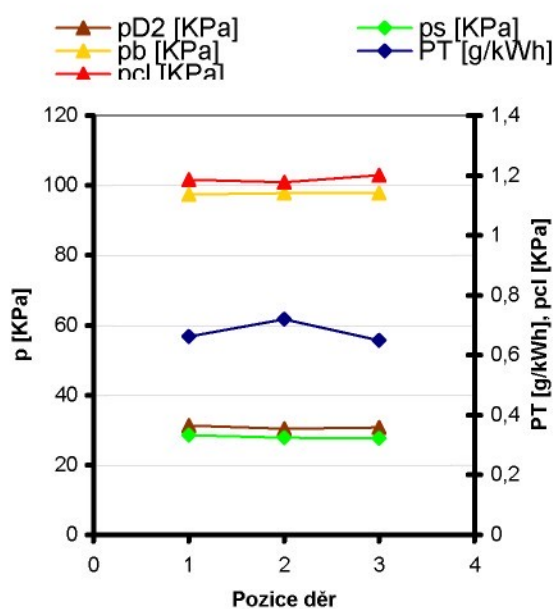
Graf 19 – Závislost teplot a emise PT,
průměr děr 10 mm, $q = 6,192$



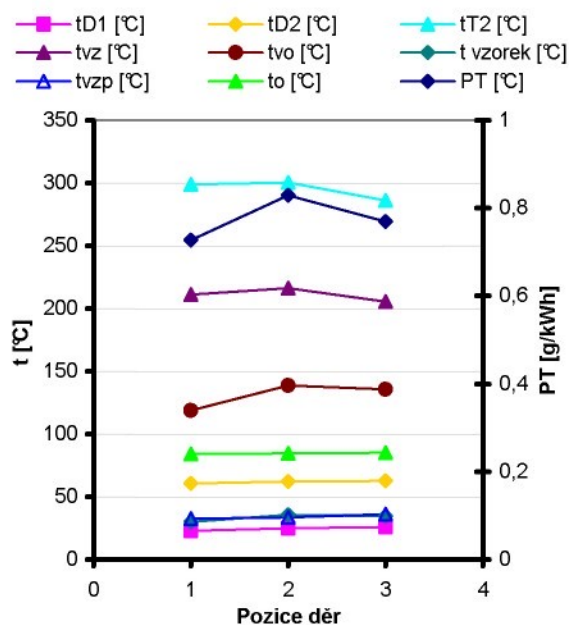
Graf 20 – Závislost tlaků a emise PT,
průměr děr 10 mm, $q = 6,192$



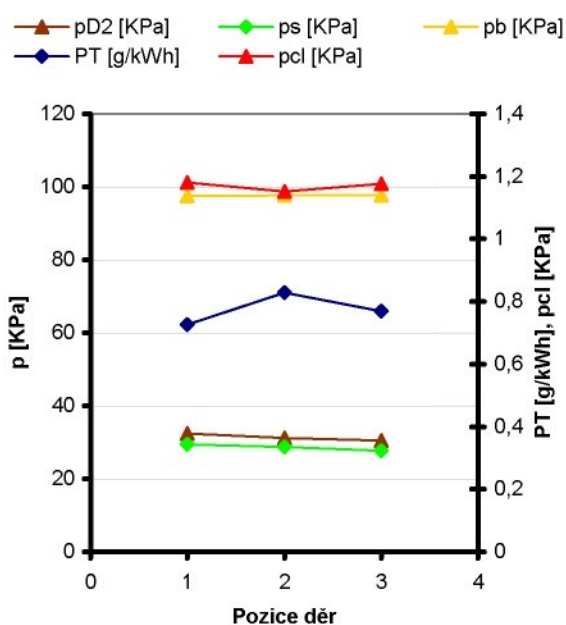
Graf 21 – Závislost teplot a emise PT, průměr děr 10 mm, $q = 9,368$



Graf 22 – Závislost tlaků a emise PT, průměr děr 10 mm, $q = 9,368$



Graf 23 – Závislost teplot a emise PT, průměr děr 10 mm, $q = 15,350$

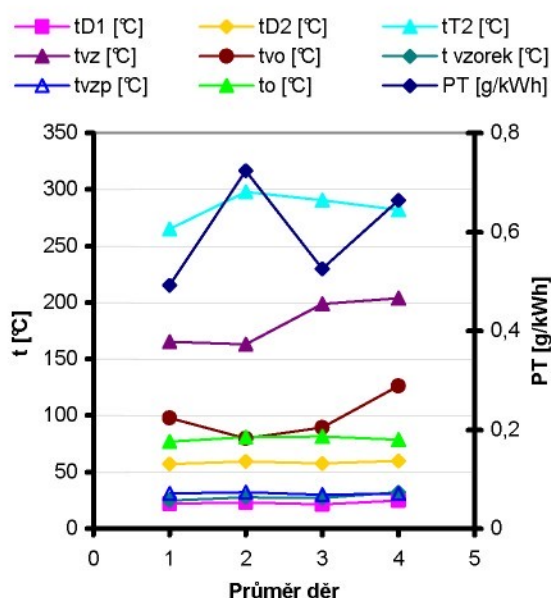


Graf 24 – Závislost tlaků a emise PT, průměr děr 10 mm, $q = 15,350$

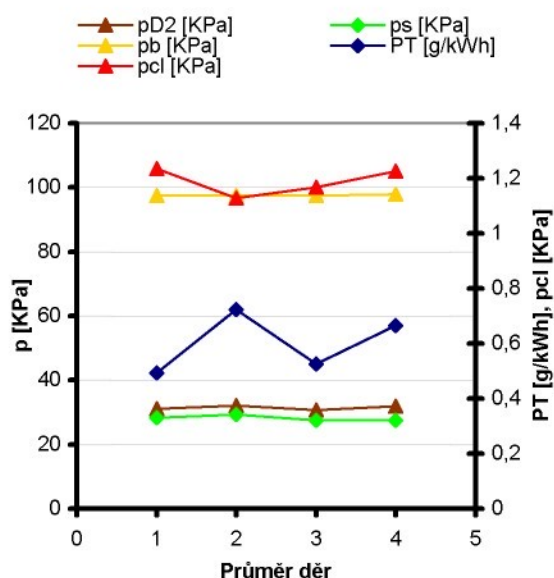
Z grafů 7 až 24 je patrný podobný průběh množství pevných částic pro průměr děr 5 a 10 mm. Nejvyšší hodnota emisí byla naměřena při natočení odběrové trubky 0°. Nejpatrnější výsledky byly při nejnižším ředícím poměru ($q = 6,192$), s rostoucím ředícím poměrem přestával být rozdíl natolik zřejmý. Množství emisí bylo při stěnovém odběru většinou velmi podobné natočení odběrové trubky 90°. Rozdílný průběh emisí byl pro průměr děr 8 mm. Při nejnižším ředícím průměru ($q = 6,192$) množství emisí s natáčením odběrové trubky plynule rostl. Při zbývajících ředících poměrech ($q = 9,368$ resp. $15,350$) byly hodnoty emisí při stěnovém odběru, při natočení trubky 0° a 90° podobné, výrazněji vzrostly při natočení trubky 180°. Při natočení trubky 180° a ředícím poměru 15,350 byla naměřena nejvyšší hodnota emisí v průběhu celého měření. Množství emisí opět rostlo s rostoucím ředícím poměrem.

Vyhodnocení vlivu velikosti průměru děr v odběrové trubce. Vliv průměru děr se ověřoval pro natočení trubky 0° a 90°. Průměry děr znázorněných v grafech na ose x jsou:

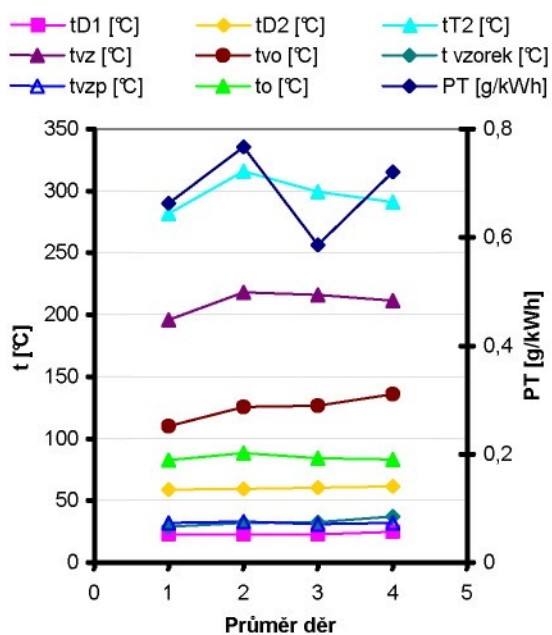
- 1 – referenční odběr,
- 2 – průměr děr 5 mm,
- 3 – průměr děr 8 mm,
- 4 – průměr děr 10 mm.



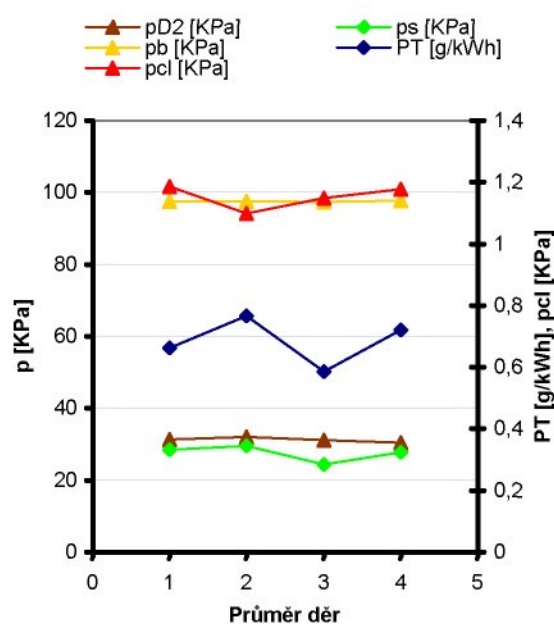
Graf 25 – Závislost teplot a emise PT, natočení trubky 0°, $q = 6,192$



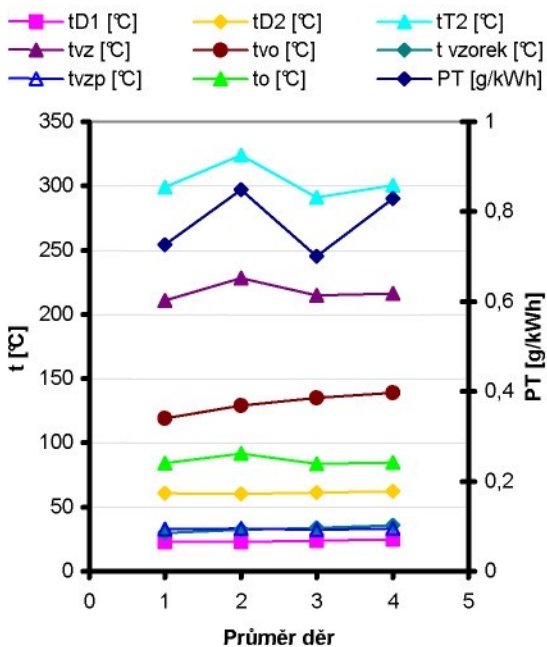
Graf 26 – Závislost tlaků a emise PT, natočení trubky 0°, $q = 6,192$



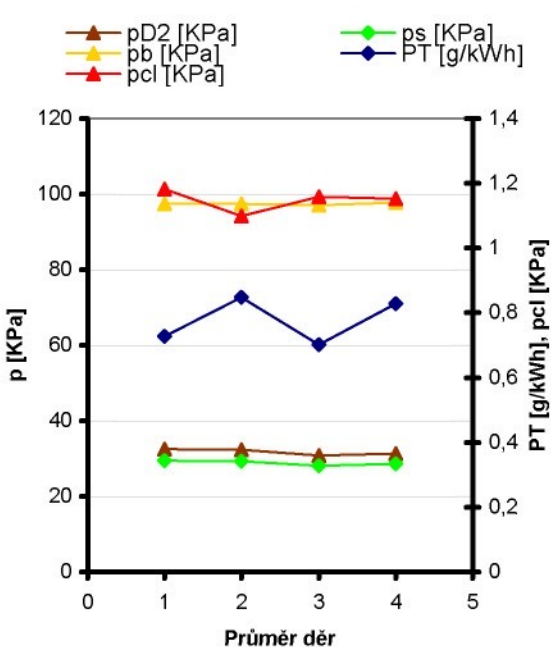
Graf 27 – Závislost teplot a emise PT, natočení trubky 0°, $q = 9,368$



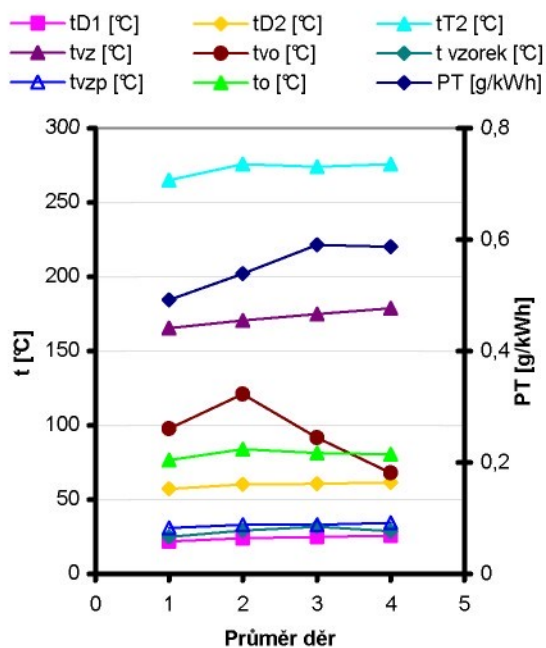
Graf 28 – Závislost tlaků a emise PT, natočení trubky 0°, $q = 9,368$



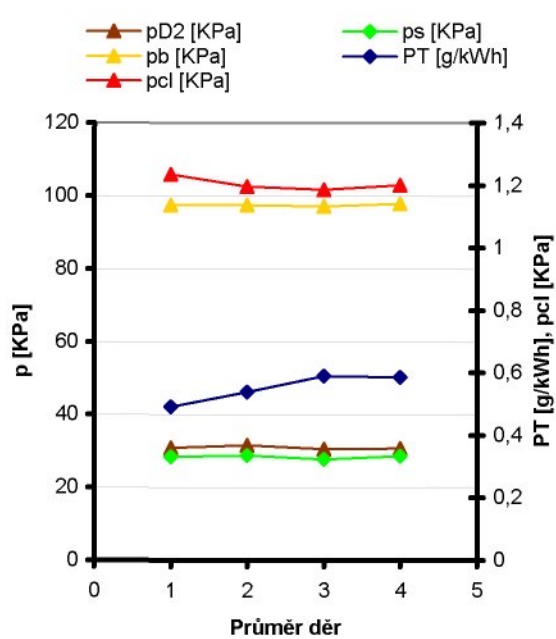
Graf 29 – Závislost teplot a emise PT, natočení trubky 0°, $q = 15,350$



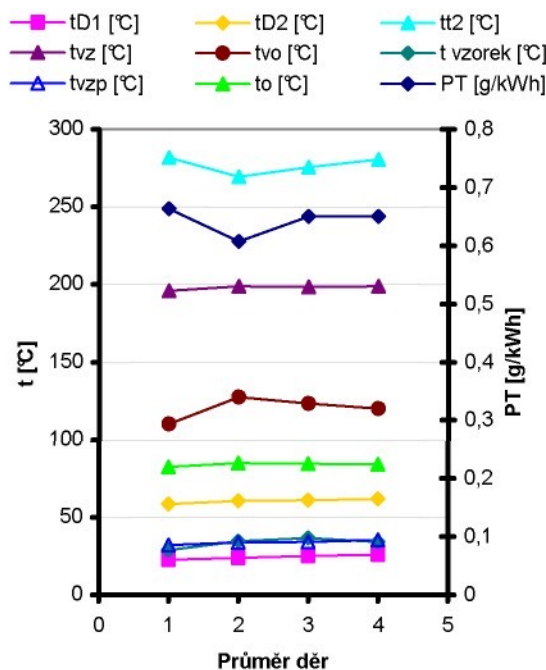
graf 30 – Závislost teplot a emise PT, natočení trubky 0°, $q = 15,350$



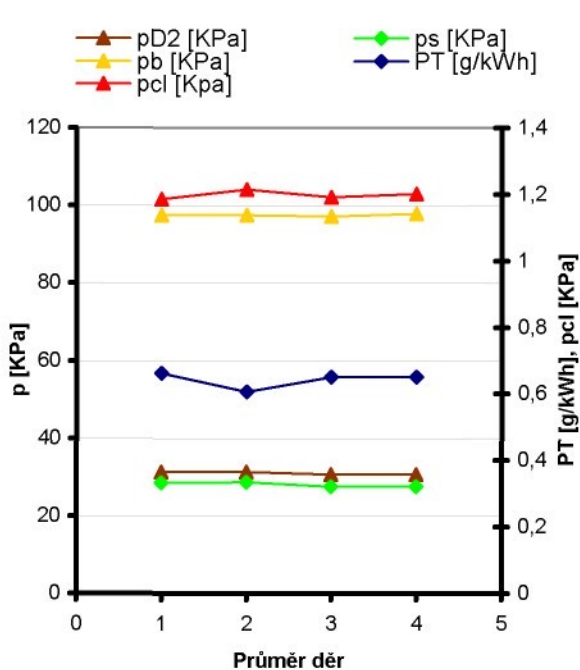
Graf 31 – Závislost teplot a emise PT, natočení trubky 90°, $q = 6,192$



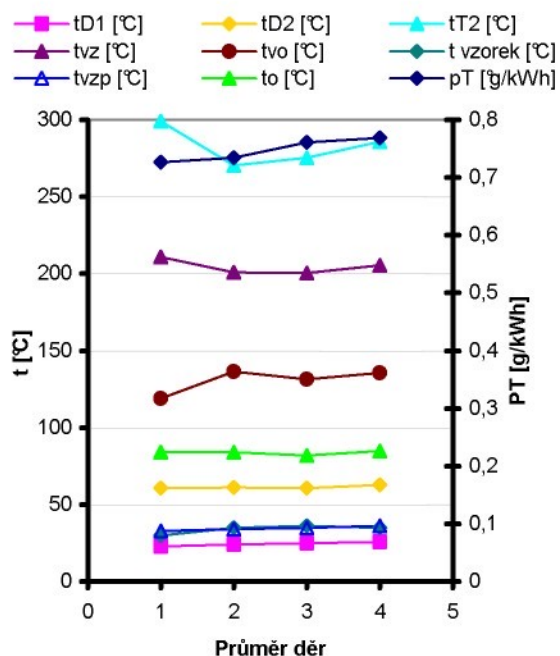
graf 32 – Závislost tlaků a emise PT, natočení trubky 90°, $q = 6,192$



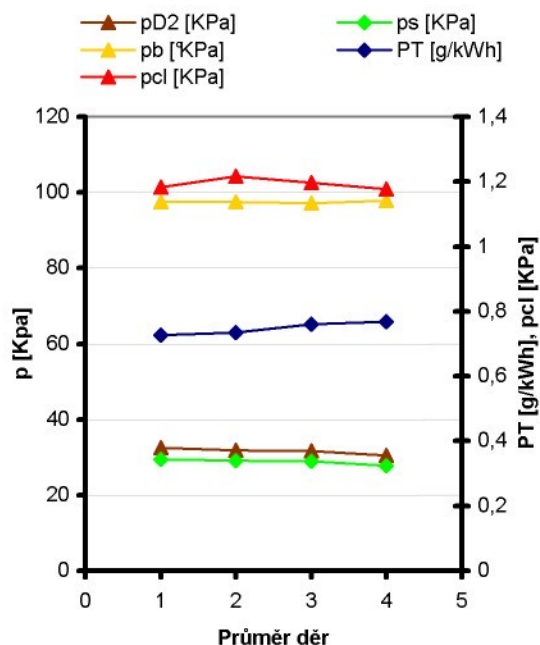
Graf 33 – Závislost teplot a emise PT, natočení trubky 90°, $q = 9,368$



Graf 34 – Závislost tlaků a emise PT, natočení trubky 90°, $q = 9,368$



Graf 35 – Závislost teplot a emise PT, natočení trubky 90°, $q = 15,350$



Graf 36 – Závislost tlaků a emise PT, natočení trubky 90°, $q = 15,350$

Z grafů 25 až 36 je zřejmý odlišný průběh množství emisí pro různá natočení odběrové trubky. Při natočení trubky 0° byly hodnoty emisí pro stěnový odběr a různé průměry děr odlišné. Nejvyšší hodnoty byly naměřeny při průměru děr 5 mm. Při průměru děr 10 mm byly naměřeny také vysoké hodnoty emisí. Nižší hodnoty emisí byly naměřeny při průměru děr 8 mm, které se blížily stěnovému odběru vzorku. Při natočení trubky 90° byla největší variabilita emise pevných částic. Při ředícím poměru $q = 6,192$ byla difference v naměřených hodnotách $\varepsilon_{PT} = 7,2 \%$, při poměru $q = 9,368$ byla difference $\varepsilon_{PT} = 5,5 \%$ a při poměru $q = 15,350$ byla difference $\varepsilon_{PT} = 5,7 \%$. Hodnoty diferencí byly vztaženy na odběr při průměru děr 5 mm a natočení odběrové trubky 0°.

Žádný z použitých odběrů neměl výraznější vliv na hodnotu měrné emise tuhých látek, proto nebylo možné navrhnout optimální odběr částic. Bylo by vhodné provést odběry částic pro odlišné zatížení motoru případně odlišnou hodnotu otáček motoru. Vliv na emitované částice měly zejména tlakové poměry ve výfukovém potrubí a v odběrové sondě [1]. Proto by bylo vhodné zkoumat vliv způsobu odběru vzorku při různých tlakových poměrech ve výfukovém potrubí a v přenosové trubce..

7. Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na analyzování vlivu provozních podmínek a především odběru vzorku na hodnotu emise tuhých látek motoru. V teoretické části popisují vznik, složení, velikost a škodlivost pevných částic. Dále jsem uvedl přehled používaných měřících systémů pro měření tuhých látek, příslušných legislativních předpisů a vypracoval jsem postup pro stanovení nejistoty jejich měření.

V experimentální části jsem popsal měřící zařízení v laboratoři pístových spalovacích motorů (KSD) – ředící systém s měřením koncentrace CO_2 . Dále jsem popsal postup měření na měřícím zařízení. Pro vyhodnocení naměřených hodnot jsem detailně popsal postup výpočtu emise pevných částic a celkové nejistoty měření. V této diplomové práci jsem provedl dvě měření pro konstantní otáčkový režim motoru $n = 1400 \text{ min}^{-1}$. První měření jsem zaměřil na posouzení vlivu provozních veličin na hodnotu měrné emise tuhých látek. Při měření jsem zvolil tři různé ředící poměry. Tři vzorky jsem měřil při zatížení $M_t = 150 \text{ Nm}$ a tři při zatížení $M_t = 265 \text{ Nm}$. Ze závislostí jsem vyvodil závěr, že množství částic vzrůstá s rostoucím ředícím poměrem a je nižší při vyšším zatížení motoru. Na množství částic mají velký vliv tlakové poměry v odběrové sondě a ve výfukovém potrubí [1]. Druhé měření jsem zaměřil na posouzení vlivu odběru vzorku spalín. Z tohoto důvodu jsem vytvořil nový odběr vzorku spalín z výfukového potrubí. Vzorek jsem odebíral trubicí, do které jsem vyvrtal pět děr, jejichž průměr jsem postupně zvyšoval. Ověřoval jsem vliv různého natočení trubky (pozice děr) ve výfukovém potrubí a velikost průměru děr na hodnotu emise částic. Jedinou zvláštností výsledků měření byly nejvyšší emisní hodnoty při natočení odběrové trubky 180° (při průměru děr 8 mm). Při tomto odběru jsem předpokládal nižší hodnoty než u zbývajících natočení odběrové trubky. Příčinou mohl být způsob proudění výfukových plynů nebo velké tlakové rozdíly ve výfukovém potrubí a v odběrové sondě, protože předpokládám, že nebyl dodržen isokinetický odběr vzorku. Vyvodil jsem tedy závěr, že žádný z použitých odběrů neměl výraznější vliv na hodnotu měrné emise tuhých látek.

Pro dokonalejší ověření vlivu podmínek odběru vzorku na hodnotu emise pevných částic by bylo nutné provést více měření pro různé režimy motoru a při různých tlakových poměrech. Z finančních důvodů nebylo možné více měření provést.

Seznam použité literatury

- [1] Domonkosová, A. – Analýza vlivu podmínek při měření koncentrace tuhých částic ve výfukových plynech spalovacího motoru, Diplomová práce, TU v Liberci, Fakulta strojní, 2004
- [2] Technická dokumentace minitunelu KSD
- [3] Předpis EHK č. 49
- [4] Beroun, S. – Výfukové emise pístových spalovacích motorů, Studijní pomůcka, 1997
- [5] Skácel, F., Tekáč, V. – Měření emisí Praha 2003, ISBN 80-7080-508-0
- [6] Takáts, M. – Měření emisí spalovacích motorů, Skripta ČVUT Praha 1997, ISBN 80-01-01632-3
- [7] Štěpán, D. – Spalovací motory a jejich vliv na životní prostředí, Dopravní fakulta Jana Pernera, Univerzita Pardubice, Šk. rok 2001/2002
- [8] Kohoutek, J., Holoubek, I. – Vývoj složení emisí z automobilové dopravy v závislosti na technickém pokroku v konstrukci vozidel, TOCOEN REPORT No. 116, TOCOEN s.r.o. Brno, červenec 1996
- [9] Pustka Z. – Základy konstruování (Technické kreslení), Skripta TU Liberec 1999, ISBN 80-7083-333-5

Parametry motoru jsou:**1) Údaje o motoru:**

Výrobce:	DAEWOO AVIA, a.s
Typové označení:	AVIA D 422.100
Provedení:	vznětový přeplňovaný naftový motor
Určení:	pohonná jednotka nákladního automobilu
Konstrukce:	kapalinou chlazený, čtyřdobý, čtyřválcový naftový řadový motor s mezichladičem plnicího vzduchu bez katalyzátoru

2) Základní technické údaje:

Výrobní číslo:	200 - 99 57007 A
Zdvihový objem motoru:	3,92 dm ³
Vrtání válce:	102 mm
Zdvih pístu:	120 mm
Počet válců:	4
Jmenovitý výkon motoru:	97,7 kW
Jmenovité otáčky:	2 400 min ⁻¹
Volnoběžné otáčky:	850 min ⁻¹
Kompresní poměr:	17,5 : 1

3) Seřizovací parametry motoru:

Geometrický počátek dodávky paliva (statický):	0° před HÚ
Vůle ventilů (sací/výfukový):	0,30/0,40 mm
Otevírací tlaky vstřikovačů:	22 Mpa

4) Parametry provozní hmoty – nafty:

Hustota při 15°C:	0,852 g/cm ³
Bod vzplanutí PMFP:	>95°C
Kinematická viskozita při 40°C:	3,25 mm ² /s
Cetanový index:	49

Tabulka naměřených hodnot pro měření č.1 (vliv provozních veličin motoru)

Měření	1			2			3			4			5			6		
Parametr	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ
n [min ⁻¹]	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
M _t [Nm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	255	265	260	265	265	265	265	265	265
t _{D1} [°C]	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
t _{D2} [°C]	54,4	54,2	54,3	54,3	54,7	54,5	55,4	57	56,2	84,6	81,3	83	79,9	84,5	82,2	81,7	83,6	82,7
t _s [°C]	39,5	45,7	42,6	50,1	54,5	52,3	58,5	62,8	60,7	43,5	31,2	37,4	27,6	26,1	26,9	25,2	25	25,1
t _{T2} [°C]	294	301	297,5	299	304	301,5	309	321	315	401	380	390,5	368	379	373,5	369	372	370,5
t _{vz} [°C]	208	215	211,5	221	224	222,5	221	224	222,5	269	283	276	280	280	280	277	275	276
t _{okolí} [°C]	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	17	17	17	17	17	17
t _{vo} [°C]	42	66	54	79	90	84,5	98	102	100	61	75	68	125	104	114,5	112	111	111,5
t _{vzorek} [°C]	20,3	23	21,7	24	25,7	24,9	26,3	26,3	26,3	22,2	24,1	23,2	26,4	27,1	26,8	27,2	27	27,1
t _{vzp} [°C]	26,1	26,7	26,4	26,6	27,3	27	27,4	28,1	27,8	27,5	28,1	27,8	28,3	28,9	28,6	28,7	29,4	29,1
t _o [°C]	83,2	83,2	83,2	83,1	84,7	83,9	85,3	85,7	85,5	84,3	85,2	84,8	85,4	85,1	85,3	85,3	84,8	85,1
t _w [°C]	83,4	83,6	83,5	83,9	84,5	84,2	86,3	88,5	87,4	81,8	81,8	81,8	81,9	82,1	82	81,9	82,2	82,1
p _{D2} [kPa]	32,1	30,3	31,2	31,4	31,1	31,3	31,3	33,3	32,3	59,2	61,3	60,3	60,2	58,8	59,5	60,7	61,3	61
p _s [kPa]	28,5	28,3	28,4	28,4	28,1	28,3	28,1	30,2	29,2	57,3	55,3	56,3	52,7	58,4	55,6	56,7	57,2	57
p _{cl} [mmH ₂ O]	117	117	117	112	112	112	110	110	110	160	166	163	172	180	176	180	182	181
p _b [kPa]	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
p _{vz2} [kPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO _{2spal} [dítky]	36	38	37	38	38	38	39	39	39	46	45	45,5	46	45	45,5	44	45	44,5
CO _{2žred} [dítky]	79	80	79,5	55	53	54	38	39	38,5	78	80	79	55	55	55	40	38	39
V _{plyn} [dm ³]	2654	2774	120	2774	2899	125	2899	3026	127	3026	3142	116	3142	3258	116	3258	3378	115
Δm [μg]	66826	67915	1089	63163	64031	868	66290	66905	615	66248	67166	918	63997	64716	719	65777	66312	535
m _p [g]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
T _{odb} [s]	64,3	65,2	64,8	65,7	66,5	66,1	64,8	63,1	64	38,3	40,2	39,3	40,9	40,5	40,7	40,2	40,9	40,6
φ [%]	31	31	31	31	31	31	31	31	31	30	30	30	31	31	31	31	31	31

Tabulka naměřených hodnot pro měření č.2 (vliv podmínek odběru vzorku)

Měření Parametr	Stěnový odběr (ref.)			Stěnový odběr (ref.)			Stěnový odběr (ref.)			díry Ø 5, natočení 0°			díry Ø 5, natočení 0°			díry Ø 5, natočení 0°		
	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ
n [min ⁻¹]	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
M _t [Nm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
t _{D1} [°C]	22	22	22	22	23	22,5	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
t _{D2} [°C]	57,1	57,7	57,4	58,7	58,9	58,8	60,1	61	60,6	57,9	60,8	59,4	58,3	60,7	59,5	60,1	60,8	60,5
t _s [°C]	29,4	31,5	30,5	37,4	41,9	39,7	47,4	52,2	49,8	55,7	60,8	58,3	66,5	68,8	67,7	71,6	72,8	72,2
t _{T2} [°C]	258	272	265	278	286	282	294	304	299	288	308	298	315	317	316	321	326	324
t _{vz} [°C]	158	173	165,5	192	200	196	207	214	211	142	184	163	212	224	218	228	229	228,5
t _{okolí} [°C]	20	20	20	21	21	21	20	20	20	20	20	20	21	21	21	21	21	21
t _{vo} [°C]	68	128	98	106	114	110	120	118	119	60	100	80	125	126	125,5	128	130	129
t _{vzorek} [°C]	24,5	25,9	25,2	28,1	29,5	28,8	29,9	29,9	29,9	26,1	29,1	27,6	31,5	32,6	32	32,6	32,1	32,4
t _{vzp} [°C]	30,7	31,3	31	31,7	32,4	32	32,4	33,1	32,8	32	32,8	32,4	33	33,4	33,2	33,3	33,9	33,6
t _o [°C]	75,8	77,9	76,9	81,9	83,3	82,6	83,6	84,6	84,1	78,9	82,8	80,9	86,9	90,1	88,5	91,3	92,2	91,8
t _w [°C]	81,4	82,6	82	82,6	82,8	82,7	82,8	83,2	83	83,5	85,6	84,6	88,3	88,2	88,3	91,2	93	92,6
p _{D2} [kPa]	30,7	31,4	31	31,2	31,3	31,3	32,5	32,4	32,5	31,4	32,6	32	32,7	31,4	32	32,6	31,9	32,3
p _s [kPa]	28,1	28,6	28,4	28,4	28,6	28,5	29,4	29,5	29,5	28,7	30	29,4	29,9	29,1	29,5	29,8	29	29,4
p _{cl} [mmH ₂ O]	128	124	126	122	120	121	120	119	119,5	112	118	115	112	112	112	112	112	112
p _b [kPa]	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5
p _{vz2} [kPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO _{2spal} [dítky]	36	36	36	37	37	37	38	38	38	40	39,5	39,8	40	39	39,5	39	39	39
CO _{2žřed} [dítky]	77	78	77,5	52,3	53	52,7	34	32	33	83	82	82,5	56	54	55	31	32	31,5
V _{plyn} [dm ³]	3378	3497	119	3497	3613	117	3613	3729	116	3729	3843	114	3843	3956	113	3956	4066	110
Δm [μg]	66300	67243	943	66348	67181	833	63984	64527	543	62107	63428	1321	63847	64815	968	65025	65625	600
m _p [g]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
T _{odb} [s]	58,8	59,9	59,4	60,8	60,9	60,9	61,2	61,2	61,2	59,8	60,1	60	59,8	60,8	60,3	60,9	60,4	60,7
φ [%]	29	29	29	29	28	28,5	28	28	28	28	28	28	29	29	29	29	29	29

Tabulka naměřených hodnot pro měření č.2 (vliv podmínek odběru vzorku)

Měření	díry Ø 5, natočení 90°			díry Ø 5, natočení 90°			díry Ø 5, natočení 90°			díry Ø 8, natočení 0°			díry Ø 8, natočení 0°			díry Ø 8, natočení 0°		
Parametr	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ
n [min ⁻¹]	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
M _t [Nm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
t _{D1} [°C]	24	24	24	24	24	24	24	24	24	21	22	21,5	23	23	23	24	24	24
t _{D2} [°C]	60,1	60,5	60,3	60,2	60,7	60,5	61	61,3	61,2	57,2	58,1	57,7	60,4	60,7	60,6	60,7	61,7	61,2
t _s [°C]	36,4	28,7	32,6	24,7	23,3	24	22,5	22,3	22,4	34,3	43,3	38,8	44,2	39,6	41,9	37,4	34,6	36
t _{T2} [°C]	277	275	276	269	270	269,5	270	271	270,5	286	295	290,5	302	297	299,5	290	292	291
t _{vz} [°C]	157	184	170,5	198	200	199	201	201	201	190	208	199	215	217	216	215	215	215
t _{okolí} [°C]	21	21	21	21	21	21	21	21	21	18	18	18	19	19	19	21	21	21
t _{vo} [°C]	120	122	121	125	130	127,5	135	138	136,5	73	106	89,5	122	131	126,5	134	136	135
t _{vzorek} [°C]	27,3	31	29,2	33,9	35,6	34,8	35,6	34,4	35	24,7	29,9	27,3	31,4	33,9	32,7	33,8	33,8	33,8
t _{vzp} [°C]	32,9	33,4	33,2	33,4	34	33,7	33,9	34,5	34,2	29,7	30,2	30	30,6	31,5	31,1	32	32,5	32,3
t _o [°C]	83,4	84,5	84	84,8	85	84,9	84,5	84,4	84,5	80,7	82,5	81,6	84	84,6	84,3	84,3	83,6	84
t _w [°C]	82,4	82,4	82,4	82,2	82,3	82,3	82,3	82,4	82,4	83,2	83,3	83,3	82,9	82,5	82,7	82,4	82,4	82,4
p _{D2} [kPa]	31,4	31,9	31,7	30,8	32	31,4	31,9	31,8	31,9	31,2	30	30,6	32,1	30,3	31,2	30,7	31	30,9
p _s [kPa]	28,3	29,2	28,8	28,1	29,3	28,7	29,1	29	29,1	28,1	26,9	27,5	29,1	27,6	28,4	27,8	28,3	28,1
p _{el} [mmH ₂ O]	212	123	122	124	124	124	124	124	124	121	117	119	117	117	117	118	118	118
p _b [kPa]	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,4	97,4	97,4	97,4	97,4	97,4	97,2	97,2	97,2
p _{vz2} [kPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO _{2spal} [dítky]	37	36	36,5	35	36	35,5	36	35	35,5	37	37	37	38	38	38	38	37	37,5
CO _{2žřed} [dítky]	88	84	86	53	55	54	34	34	34	68	66	67	48	46	47	32	32	32
V _{plyn} [dm ³]	4066	4177	111	4177	4286	109	4286	4395	109	4395	4504	109	4504	4610	106	4610	4715	105
Δm [μg]	65100	66105	1005	61767	62543	776	59812	60354	542	63964	64686	722	64352	65077	725	63690	64144	454
m _p [g]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
T _{odb} [s]	61,6	61,5	61,6	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,9	61,9	61,9	61,5	61,7	62,3	62,1	62,2
φ [%]	30	30	30	30	30	30	30	30	30	24	24	24	24	21	22,5	18	18	18

Tabulka naměřených hodnot pro měření č.2 (vliv podmínek odběru vzorku)

Měření	díry Ø 8, natočení 90°			díry Ø 8, natočení 90°			díry Ø 8, natočení 90°			díry Ø 8, natoč. 180°			díry Ø 8, natoč. 180°			díry Ø 8, natoč. 180°		
Parametr	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ
n [min ⁻¹]	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
M _t [Nm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
t _{D1} [°C]	25	25	25	25	25	25	25	25	25	26	26	26	26	26	26	26	26	26
t _{D2} [°C]	59,9	61,2	60,6	60,9	61,3	61,1	60,9	60,7	60,8	59,7	61,3	60,5	61,6	62,5	62,1	63	63,5	63,3
t _s [°C]	26,7	27,2	27	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8	26,8	30,3	34,2	32,3	41,8	45,7	43,8	51,7	57,5	54,6
t _{T2} [°C]	270	278	274	274	277	275,5	274	277	275,5	266	277	271,5	285	295	290	298	305	301,5
t _{vz} [°C]	165	185	175	197	200	198,5	201	200	200,5	143	168	155,5	194	203	198,5	209	214	211,5
t _{okolí} [°C]	22	22	22	22	22	22	23	23	23	23	23	23	23	23	23	24	25	24,5
t _{vo} [°C]	79	105	92	120	127	123,5	130	133	131,5	75	92	83,5	116	124	120	134	137	135,5
t _{vzorek} [°C]	29,4	34	31,7	35,9	37,3	36,6	36,8	35,4	36,1	32,3	33,9	33,1	35,8	37	36,4	36,8	36,3	36,6
t _{vzp} [°C]	32,7	33,7	33,2	34	34,6	34,3	34,6	35,3	35	35,1	35,7	35,4	35,6	36	35,8	36,4	36,8	36,6
t _o [°C]	80,6	82,6	81,3	84,6	84,4	84,5	84,6	85,5	85,1	79,1	81,6	80,4	84,6	85	84,8	85,9	86	86
t _w [°C]	82,7	82,9	82,8	82,8	82,9	82,9	82,8	82,9	82,9	82,6	82,9	82,8	82,8	82,8	82,8	83,2	84,2	83,7
p _{D2} [kPa]	30,2	30,8	30,5	30,8	30,5	30,7	32	31,2	31,6	30,1	30,9	30,5	30,9	31,1	31	32,1	31,3	31,7
p _s [kPa]	27,6	28	27,8	27,7	27,5	27,6	29,1	28,8	29	27,5	27,5	27,5	28,3	28,4	28,4	29,2	28,5	28,9
p _{el} [mmH ₂ O]	121	121	121	121	122	121,5	122	122	122	121	121	121	121	120	120,5	118	114	116
p _b [kPa]	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2	97,2
p _{vz2} [kPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO _{2spal} [dítky]	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	36	38	38	38	38	38	38
CO _{2žed} [dítky]	73	74	73,5	55	54	54,5	31	31	31	75	76	75,5	60	59	59,5	34	32	33
V _{plyn} [dm ³]	4715	4820	105	4820	4923	103	4923	5026	103	5026	5127	101	5127	5227	100	5227	5325	98
Δm [μg]	63173	64069	896	62146	62995	849	66158	66653	495	66139	67187	1048	65534	66472	938	56789	57423	634
m _p [g]	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
T _{odb} [s]	61,2	61,3	61,3	61,8	61,9	61,9	61,8	61,8	61,8	61,2	61,1	61,2	61,9	62	62	61,9	61,9	61,9
φ [%]	19	20	19,5	20	20	20	20	20	20	17	17	17	17	19	18	19	19	19

Tabulka naměřených hodnot pro měření č.2 (vliv podmínek odběru vzorku)

Měření	díry Ø 10, natočení 0°			díry Ø 10, natočení 0°			díry Ø 10, natočení 0°			díry Ø 10, natoč. 90°			díry Ø 10, natoč. 90°			díry Ø 10, natoč. 90°		
Parametr	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ	0 min	5 min	Δ
n [min ⁻¹]	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
M _I [Nm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
t _{D1} [°C]	25	25	25	25	25	25	25	25	25	26	26	26	26	26	26	26	26	26
t _{D2} [°C]	60,3	60,3	60,3	61,3	61,3	61,3	61,8	62,8	62,3	61,7	61,2	61,5	61,9	62	62	63	63	63
t _s [°C]	23,2	33,8	28,5	35,2	39,6	37,4	43,4	49,3	46,4	31,8	31,8	31,8	35,4	39,5	37,5	42	44	43
t _{T2} [°C]	280	284	282	291	291	291	297	304	300,5	274	278	276	278	283	280,5	285	287	286
t _{vz} [°C]	199	209	204	210	213	211,5	215	218	216,5	174	184	179	196	202	199	204	207	205,5
t _{okolí} [°C]	20	21	20,5	21	21	21	20	20	20	20	20	20	21	22	21,5	22	22	22
t _{vo} [°C]	124	129	126,5	134	138	136	138	139,7	138,9	54	82	68	114	126	120	133	138	135,5
t _{vzorek} [°C]	29,5	35,4	32,5	37,1	37,7	37,4	36,6	35	35,8	27,6	30,3	29	32,8	35,7	34,3	35,1	34,5	34,8
t _{vzp} [°C]	31,1	31,6	31,4	31,9	32,7	32,3	33	33,9	33,5	34,1	34,7	34,4	34,9	35,6	35,3	35,7	36,4	36,1
t _o [°C]	75,3	82,3	78,8	82,6	84,2	83,4	84,7	84,8	84,8	78,5	82,2	80,4	84	84	84	85	85	85
t _w [°C]	83,3	83,1	83,2	83,2	83,3	83,3	93,4	83,8	88,6	82,4	82,5	82,5	82,7	83	82,9	83	83	83
p _{D2} [kPa]	32,1	31,6	31,9	30,2	30,8	30,5	31,3	30,8	31,1	30,5	30,8	30,7	31	30,4	30,7	30,2	30,8	30,5
p _s [kPa]	28,1	26,9	27,5	27,4	28,2	27,8	28,3	29,1	28,7	28,8	28,4	28,6	27,5	27,6	27,6	28	27,6	27,8
p _{cl} [mmH ₂ O]	125	125	125	120	120	120	118	117	117,5	125	120	122,5	125	120	122,5	120	120	120
p _b [kPa]	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8	97,8
p _{vz2} [kPa]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO _{2spal} [dítky]	36	36	36	36	36	36	37	38	37,5	38	37	37,5	37	37	37	36	36	36
CO _{2žřed} [dítky]	78	78	78	53	51	52	35	34	34,5	85	86	85,5	54	52	53	31	30	30,5
V _{plyn} [dm ³]	5325	5424	99	5424	5521	97	5521	5616	95	5616	5710	94	5710	5802	92	5802	5893	91
Δm [μg]	55949	56975	1026	56047	56875	828	54789	55328	539	56070	56971	901	55567	56243	676	56329	56775	446
m _p [g]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	622	622	622	200	200	200	200	200	200
T _{odb} [s]	88	88	88	119	119	119	109,1	109,1	109,1	300	300	300	126	126	126	100	100	100
φ [%]	28	28	28	28	28	28	28	28	28	26	26	26	26	26	26	26	26	26

Tabulka vypočtených hodnot pro měření č.1 (vliv provozních veličin motoru)

	1 n = 1400 [min ⁻¹] M _t = 150 [Nm]	2 n = 1400 [min ⁻¹] M _t = 150 [Nm]	3 n = 1400 [min ⁻¹] M _t = 150 [Nm]	4 n = 1400 [min ⁻¹] M _t = 260 [Nm]	5 n = 1400 [min ⁻¹] M _t = 265 [Nm]	6 n = 1400 [min ⁻¹] M _t = 265 [Nm]
Δp _{cl} [Pa]	1147,770	1098,720	1079,100	1599,030	1726,560	1775,610
q [-]	6,204	9,380	13,503	7,677	11,028	15,210
ρ _{vzd} [kg/m ³]	1,157	1,157	1,157	1,157	1,157	1,157
ε [-]	0,9687	0,9700	0,9706	0,9561	0,9524	0,9511
M _{vzd} [kg/h]	213,274	208,961	207,203	248,459	257,193	260,439
M _p [kg/h]	5,560	5,446	5,629	9,172	8,845	8,878
M _s [kg/h]	218,834	214,407	212,832	257,631	266,038	269,317
G _{EDFW} [kg/h]	1357,626	2011,219	2873,899	1977,938	2933,744	4096,279
ρ _{spal} [kg/m ³]	1,128	1,126	1,123	1,123	1,120	1,118
M _{SAM} [g]	135,348	140,729	142,600	130,227	129,882	134,161
PT _{MASS} [g/h]	10,923	12,405	12,394	13,943	16,244	16,335
PT _{MAX} [g/kWh]	0,541	0,615	0,614	0,399	0,456	0,458

Tabulka vypočtených hodnot pro měření č.2 (vliv podmínek odběru vzorku)

	stěnový (ref.) odběr	stěnový (ref.) odběr	stěnový (ref.) odběr	díry Ø 5 mm natočení 0°	díry Ø 5 mm natočení 0°	díry Ø 5 mm natočení 0°	díry Ø 5 mm natočení 90°	díry Ø 5 mm natočení 90°	díry Ø 5 mm natočení 90°
Δp_{cl} [Pa]	1236,060	1187,010	1182,105	1128,150	1098,720	1098,720	1196,820	1216,440	1216,440
q [-]	6,192 (q_{ref})	9,368 (q_{ref})	15,350 (q_{ref})	6,423	9,573	16,504	5,566	8,763	13,918
ρ_{vzd} [kg/m ³]	1,147	1,145	1,143	1,143	1,143	1,143	1,139	1,139	1,139
ε [-]	0,9664	0,9678	0,9679	0,9694	0,9702	0,9702	0,9675	0,9670	0,9670
M_{vzd} [kg/h]	219,814	215,525	214,925	210,286	207,694	207,688	215,762	217,401	217,401
M_p [kg/h]	6,066	5,916	5,882	6,005	5,970	5,916	5,849	5,825	5,825
M_s [kg/h]	225,879	221,441	220,807	216,291	213,664	213,604	215,762	223,226	223,226
G_{EDFW} [kg/h]	1398,645	2074,399	3389,326	1389,161	2045,482	3525,284	1253,762	1956,185	3106,882
ρ_{spal} [kg/m ³]	1,117	1,113	1,110	1,111	1,109	1,107	1,109	1,107	1,105
M_{SAM} [g]	132,871	129,076	125,450	126,705	125,266	121,781	123,069	120,635	120,438
PT_{MASS} [g/h]	9,926	13,387	14,670	14,483	15,807	17,369	10,238	12,583	13,982
PT_{MAX} [g/kWh]	0,492	0,663	0,727	0,718	0,783	0,861	0,507	0,624	0,693
Rovnice regresní přímky	$y (PT_{MAX}) = 0,0237 \cdot x (q) + 0,3829$			$y = 0,0137 \cdot x + 0,6389$			$y = 0,0214 \cdot x + 0,4062$		
PT_{MAX} pro q_{ref}	q_{ref}	q_{ref}	q_{ref}	0,724	0,767	0,849	0,539	0,607	0,735
ε_{PT} [%]	-32 %	-13,6 %	-14,4 %	referenční	referenční	referenční	-25,6 %	-20,8 %	-13,42 %

Tabulka vypočtených hodnot pro měření č.2 (vliv podmínek odběru vzorku)

	díry Ø 8 mm natočení 0°	díry Ø 8 mm natočení 0°	díry Ø 8 mm natočení 0°	díry Ø 8 mm natočení 90°	díry Ø 8 mm natočení 90°	díry Ø 8 mm natočení 90°	díry Ø 8 mm natoč. 180°	díry Ø 8 mm natoč. 180°	díry Ø 8 mm natoč. 180°
Δp_{cl} [Pa]	1167,390	1147,770	1157,580	1187,010	1191,915	1196,820	1187,010	1182,105	1137,960
q [-]	6,361	10,777	15,621	6,348	8,805	15,480	6,356	8,513	15,350
ρ_{vzd} [kg/m ³]	1,148	1,142	1,137	1,133	1,133	1,133	1,129	1,129	1,129
ε [-]	0,9683	0,9688	0,9685	0,9677	0,9675	0,9674	0,9677	0,9678	0,9690
M_{vzd} [kg/h]	214,167	211,935	212,229	214,337	214,743	215,454	214,000	213,575	209,801
M_p [kg/h]	5,821	5,696	5,788	5,878	5,821	5,825	5,887	5,811	5,816
M_s [kg/h]	219,987	217,631	218,016	220,215	220,564	220,980	219,888	219,386	215,616
G_{EDFW} [kg/h]	1619,403	2345,511	3405,650	1397,841	1942,094	3420,764	1397,612	1867,691	3309,648
ρ_{spal} [kg/m ³]	1,119	1,115	1,109	1,105	1,101	1,099	1,097	1,096	1,093
M_{SAM} [g]	122,002	118,215	116,400	116,039	113,422	113,182	110,823	109,583	107,114
PT_{MASS} [g/h]	9,584	14,385	13,283	10,793	14,537	14,961	13,217	15,987	19,389
PT_{MAX} [g/kWh]	0,475	0,713	0,658	0,535	0,720	0,741	0,655	0,792	0,971
Rovnice regresní přímky	$y = 0,0193 \cdot x + 0,405$			$y = 0,0185 \cdot x + 0,4766$			$y = 0,033 \cdot x + 0,4739$		
PT_{MAX} pro q_{ref}	0,525	0,586	0,701	0,591	0,650	0,761	0,678	0,783	0,980
ε_{PT} [%]	-27,5 %	-23,6 %	-17,4 %	-18,4 %	-15,3 %	-15,1 %	-6,4 %	+2,1 %	+15,4 %

Tabulka vypočtených hodnot pro měření č.2 (vliv podmínek odběru vzorku)

	díry Ø 10 mm natočení trubky 0°	díry Ø 10 mm natočení trubky 0°	díry Ø 10 mm natočení trubky 0°	díry Ø 10 mm natočení trubky 90°	díry Ø 10 mm natočení trubky 90°	díry Ø 10 mm natočení trubky 90°
Δp_{cl} [Pa]	1226,250	1177,200	1152,675	1201,725	1201,725	1177,200
q [-]	6,152	9,228	14,489	5,846	9,306	15,734
ρ_{vzd} [kg/m ³]	1,138	1,138	1,138	1,135	1,135	1,135
ε [-]	0,9668	0,9681	0,9688	0,9675	0,9675	0,9681
M_{vzd} [kg/h]	218,215	214,16	212,012	215,821	215,821	213,757
M_p [kg/h]	6,136	4,538	4,950	7,464	5,714	7,200
M_s [kg/h]	224,341	218,643	216,961	223,285	221,536	220,957
G_{EDFW} [kg/h]	1380,279	2017,743	3143,578	1305,435	2061,577	3476,488
ρ_{spal} [kg/m ³]	1,119	1,115	1,111	1,108	1,105	1,102
M_{SAM} [g]	110,753	108,178	105,550	104,116	101,620	100,255
PT_{MASS} [g/h]	12,787	15,444	16,053	11,297	13,714	15,466
PT_{MAX} [g/kWh]	0,634	0,765	0,796	0,560	0,680	0,766
Rovnice regresní přímky	$y = 0,0018.x + 0,5527$			$y = 0,00199.x + 0,4639$		
PT_{MAX} pro q_{ref}	0,664	0,721	0,829	0,587	0,650	0,769
ε_{PT} [%]	-8,3 %	-6 %	-2,4 %	-19 %	-15,3 %	-9,4 %