

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh zařízení pro izokinetický odběr TZL z malých
spalovacích zařízení

Design of device for isokinetic tsp sampling from
small combustion furnaces

Student: Bc. Petr Kubesa

Vedoucí práce: Ing. Jiří Horák, Ph.D

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Kubesa**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh zařízení pro izokinetický odběr TZL z malých spalovacích zařízení**
Design of Device for Isokinetic TSP Sampling from Small Combustion Furnaces

Zásady pro vypracování:

Navrhněte konstrukční řešení pro izokinetický odběr tuhých znečišťujících látek (TZL) z malých spalovacích zařízení. Řešení bude obsahovat vlastní konstrukční návrh ředící trati a odběrové sondy, dále návrh zařízení odběrové aparatury.

1. Vypracujte přehled metod stanovení TZL.
2. Vypracujte podrobnou rešerši metod stanovení TZL z malých spalovacích zařízení.
3. Navrhněte vlastní konstrukční řešení ředícího tunelu a stanovte základní konstrukční a provozní parametry návrhu.
4. Vypracujte výrobní dokumentaci návrhu.
5. Vypracujte výrobní dokumentaci odběrové sondy a navrhněte odběrovou aparaturu.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. <http://www.ecosolidfuel.org/>
2. ISO 9096 Stacionární zdroje emisí – Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí – Manuální gravimetrická metoda
3. BS 3841-2 – Determination of smoke emission from manufactured solid fuels for domestic use

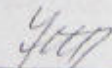
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Horák, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 22.05.2011

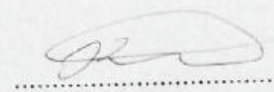


.....
Bc. Petr Kubesa

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 22.5.2011



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Petr Kubesa

Adresa trvalého pobytu autora práce: Zámecká 14, Raduň, okr. Opava

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Horákovi, Ph.D. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této práce. Dále poděkování patří Ing. Františku Hopanovi, Ph.D. a Zdeňkovi Kysučanovi z Výzkumného energetického centra v Ostravě za přínosné konzultace. Nakonec bych chtěl poděkovat rodičům a své výjimečné přítelkyni za podporu během tvorby diplomové práce.

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KUBESA, P. *Návrh zařízení pro izokinetický odběr TZL z malých spalovacích zařízení: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 65 s. Diplomová práce, vedoucí: Horák, J.

Diplomová práce je rozdělena do tří základních částí. První část obsahuje teorii tuhých znečišťujících látek, jejich definici, vlastnosti a dále popisuje obecné metody stanovení koncentrace těchto látek. Druhá část práce se podrobně zabývá problematikou stanovení emisí prachových částic z malých spalovacích zdrojů, jejíž součástí je i návrh zařízení pro isokinetický odběr tuhých látek pro umístění do nově budované zkušebny Výzkumného energetického centra v Ostravě. Součástí návrhu je jeho výrobní dokumentace, prostorová vizualizace a stanovení základních provozních parametrů návrhu. V poslední části je navržena odběrová aparatura určená k odběru tuhých látek z ředícího tunelu dle platných gravimetrických norem včetně výrobní dokumentace odběrové sondy a základního výpočtu dle navržené aparatury.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KUBESA, P. *Design of device for isokinetic tsp sampling from small combustion furnaces: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2011, 65 p. Thesis head: Horák, J.

The thesis is divided into three main parts. The first part contains the theory of total suspended particles, their definition, characteristics, and describes the general method of determining the concentration of these particles. The second part deals in detail with the determination of particulate emissions from small combustion sources, including the design of the device for isokinetic tsp sampling for placement into the newly constructed testing laboratory of Energy Research Center in Ostrava. The draft includes the production drawings, visualization and determination of basic operating parameters. In the last part, there is draft of sampling equipment, which is designed to determination of tsp concentration in the dilution tunnel according to applicable standards, including the production drawings of sampling probe and the basic calculation according the proposed apparatus.

Obsah

SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ, ZKRATEK, TERMÍNŮ	8
1 ÚVOD	11
2 TUHÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY	12
3 METODY STANOVENÍ TUHÝCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK.....	13
3.1 ÚVOD	13
3.2 JEDNORÁZOVÉ MĚŘENÍ.....	14
3.2.1 Gravimetrická manuální metoda.....	14
3.2.2 Elektrostatická metoda.....	18
3.3 KONTINUÁLNÍ MĚŘÍCÍ SYSTÉMY KONCENTRACE PRACHU	18
3.3.1 Optické metody.....	19
3.3.2 Metoda založená na triboelektrickém jevu [16].....	20
3.3.3 Metoda využívající absorpce beta záření [17].....	21
4 PROBLEMATIKA STANOVENÍ EMISÍ PRACHU Z MALÝCH SPALOVACÍCH ZDROJŮ	22
4.1 ÚVOD	22
4.2 METODY STANOVENÍ EMISÍ TUHÝCH ČÁSTIC Z MALÝCH SPALOVACÍCH ZDROJŮ	22
4.2.1 Rakousko/německá metodika	23
4.2.2 Norská metodika [28,29]	25
4.2.3 U.K. metodika	26
4.2.4 U.S. metodika	28
4.2.5 Australská/novozélandská metodika	31
4.3 DODATEK K PROBLEMATICE MĚŘENÍ EMISÍ PRACHU U MALÝCH ZDROJŮ	33
5 NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ ŘEDÍCÍHO TUNELU	33
5.1 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....	33
5.2 STANOVENÍ ZÁKLADNÍCH PROVOZNÍCH PARAMETRŮ	37
5.2.1 Určení ředícího poměru [41].....	37
5.2.2 Určení teploty plynu v měřícím úseku.....	38
5.2.3 Určení provozních parametrů pro návrh kouřového ventilátoru	38
6 NÁVRH ODBĚROVÉ APARATURY	44
6.1 ÚVOD	44
6.2 ODBĚROVÁ SONDA	45
6.3 SESTAVA FILTRU (ODLUČOVAČ TUHÝCH ČÁSTIC)	47
6.4 ODSTRANĚNÍ VLHKOSTI ZE VZORKU PŘED MĚŘIDLEM PROLEKLÉHO MNOŽSTVÍ PLYNU	47
6.5 SYSTÉM MĚŘENÍ PRŮTOKU PLYNU	48
6.6 ČERPADLO VZORKU	50
6.6.1 Volba typu vývěvy	50

6.7	MĚŘENÍ VLHKOSTI SPALIN V ŘEDÍCÍM TUNELU	53
6.8	OSTATNÍ PŘÍSTROJE A SOUČÁSTI ODBĚROVÉ APARATURY	54
6.9	VÝPOČET KONCENTRACE TZL DLE NAVRŽENÉ APARATURY	55
6.9.1	<i>Vstupní data</i>	55
6.9.2	<i>Výpočet</i>	57
7	ZÁVĚR	60
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	61

Seznam použitého označení, zkratk, termínů

Označení	Název	Jednotka
a	- efektivní plocha ústí hubice sondy	[m·s ⁻¹]
A	- hmotnostní podíl popeloviny v palivu	[1]
C	- hmotnostní podíl uhlíku v palivu	[1]
d _{RT}	- vnitřní průměr ředícího tunelu	[m]
d _s	- vnitřní průměr ústí hubice	[mm]
DR	- dilution ratio – ředící poměr	[1]
H ₂	- hmotnostní podíl vodíku v palivu	[1]
K _{Pt}	- konstanta Prandtlovy sondy	[1]
m _{před}	- hmotnost filtru před měřením	[g]
m _{po}	- hmotnost filtru po měření	[g]
m _{oplach}	- hmotnost oplachu	[g]
m	- navážka celkem	[g]
m _{pal}	- spotřeba paliva	[kg·h ⁻¹]
n	- přebytek vzduchu	[1]
N ₂	- hmotnostní podíl dusíku v palivu	[1]
O _{2K}	- objemová koncentrace O ₂ za kotlem	[%obj.]
O _{2RT}	- objemová koncentrace O ₂ v ředícím tunelu	[%obj.]
O ₂	- hmotnostní podíl kyslíku v palivu	[1]
p _{RT}	- statický tlak spalin v ředícím tunelu	[kPa]
Δp _{Pt}	- diferenční tlak na sondě	[Pa]
p _e	- statický tlak (podtlak) na sondě	[Pa]
p _a	- referenční tlak charakteristiky a	[Pa]
p _{amb}	- tlak okolí	[Pa]
q _{Vg}	- efektivní průtok vzorku spalin za podmínek v potrubí	[m ³ ·h ⁻¹]
q' _{Vg}	- efektivní průtok vzorku spalin, charakteristika a	[m ³ ·h ⁻¹]
Q _i	- výhřevnost paliva	[MJ/kg]
p _N , T _N	- normální podmínky – tlak 101325 Pa, teplota 273,15 °C	
S	- hmotnostní podíl síry v palivu	[1]
S _{RT}	- plocha průřezu ředícího tunelu	[m ²]
T _s	- termodynamická teplota vzorku v měřícím místě	[K]
T _a	- termodynamická teplota charakteristiky a	[K]
t	- délka doby odběru	[s]

Označení	Název	Jednotka
t_{RT}	- teplota spalin v ředícím tunelu	[°C]
v'	- rychlost plynu v potrubí	[m·s ⁻¹]
v_s'	- rychlost plynu v ústí odběrové hubice	[m·s ⁻¹]
v_{sp}	- průměrná rychlost spalin v ředícím tunelu	[m·s ⁻¹]
v'	- rychlost spalin ve vzorkovacím bodě	[m·s ⁻¹]
$V_{O_2,t}$	- teoretická spotřeba kyslíku	[m _N ³ ·kg ⁻¹]
$V_{vz,t}^s$	- teoretická spotřeba suchého vzduchu	[m _N ³ ·kg ⁻¹]
$V_{vz,t}^v$	- teoretická spotřeba vlhkého vzduchu	[m _N ³ ·kg ⁻¹]
$V_{sp,t}^s$	- množství vzniklých suchých spalin, teoretických	[m _N ³ ·kg ⁻¹]
V_{H_2O}	- objem vzniklé vodní páry	[m _N ³ ·kg ⁻¹]
$V_{sp,t}^v$	- množství vzniklých vlhkých spalin, teoretických	[m _N ³ ·kg ⁻¹]
$V_{počáteční}$	- objem na začátku – stav hodin před měřením	[m _N ³]
$V_{konečný}$	- objem na konci – stav hodin po měření	[m _N ³]
$V_{g,N}$	- odebraný objem	[m _N ³]
V_{sp}^v	- množství vzniklých vlhkých spalin	[m _N ³ ·kg ⁻¹]
V_{sp}^s	- množství vzniklých suchých spalin	[m _N ³ ·kg ⁻¹]
$V_{sp,mpal}^v$	- průtok vlhkých spalin po spálení m_{pal} paliva	[m _N ³ ·h ⁻¹]
$V_{sp,mpal,ef}^v$	- průtok vlhkých naředěných spalin, provozní podmínky	[m ³ ·h ⁻¹]
$V_{sp,RT}^v$	- množství naředěných vlhkých spalin	[m _N ³ ·kg ⁻¹]
w	- hmotnostní podíl vody v palivu	[1]
η	- účinnost spalovacího zařízení	[1]
ν	- součinitel zvětšení objemu vlhkosti vzduchu	[1]
ρ	- hustota plynu	[kg·m ⁻³]
$\varphi(x)$	- objemový podíl složky x	[%]

Zkratky a termíny

impigner - prachoměr pro běžný odběr vzorků prachu

in-situ - snímací část prachoměru je umístěna přímo v potrubí

DNOP - Di-n-Octyl Phthalate

DR - dilution ratio – ředící poměr

CEN - European Committee for Standardization - Evropská komise pro normalizaci

FMPS - Fast Mobility Particle Sizer

PM - Particulate Matter

SMPS - Scanning Mobility Particle Sizer

TZL - tuhé znečišťující látky

TSP - Total Suspended Particles

US EPA - US Environmental Protection Agency - Agentura pro ochranu životního prostředí ve Spojených státech amerických

VEC - Výzkumné energetické centrum, VŠB - Technická universita Ostrava

1 Úvod

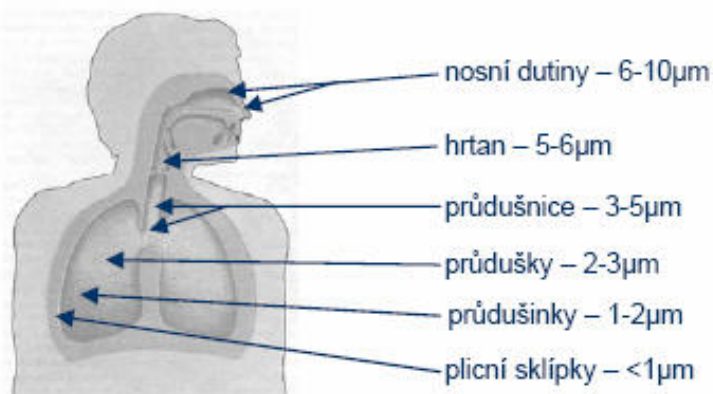
Spalovací zdroje znečišťování se dle platné legislativy dělí na zdroje zvláště velké, velké, střední a malé zdroje. V dnešní době se stále více upírá pohled právě na malé zdroje znečištění, neboť ty jsou výrazným znečišťovatelem ovzduší škodlivinami a stávají se především během topného období závažným problémem v dané lokalitě v souvislosti se zhoršováním kvality ovzduší a jeho dopadu na lidské zdraví. Snad každý chce žít v čistém životním prostředí, a proto se stále objevují a budou se objevovat diskuze na téma řešení problematiky emisí znečišťujících látek u malých spalovacích zdrojů. Zákon o ochraně ovzduší definuje malý zdroj znečištění jako zdroj s maximálním tepelným výkonem do 200kW [1]. V malých spalovacích zdrojích může být spalováno jak tuhé, tak kapalné a plynné palivo. Tato práce, s ohledem na řešení problematiky emisí tuhých znečišťujících látek z malých spalovacích zařízení, se zaměřuje především na malé zdroje spalující tuhé paliva sloužící k přímému nebo nepřímému vytápění nebo k vaření a jejich kombinaci.

Při každém spalovacím procesu vznikají určité látky a jejich typ, vlastnosti a množství závisí zejména na typu použitého paliva, typu spalovacího zařízení a podmínky za jakých bylo dané palivo spalováno. Tyto látky jsou pak v různém množství vypouštěné ze zdroje do ovzduší. Při běžném spalování tvoří hlavní podíl spalin dusík, dále oxid uhličitý, vodní pára a nevyužitý kyslík. Podíl ostatních látek obsažených ve spalinách je výrazně menší, přesto však mají výrazný vliv na lidské zdraví a životní prostředí. Látky, které mají tyto vlivy označujeme obecně za škodliviny. Snaha omezit tvorbu a vypouštění škodlivin do ovzduší vedlo k vytvoření legislativních opatření a stanovení emisních limitů pro jednotlivé druhy škodlivin. Znečišťující látku zákon o ovzduší (Zákon č. 86/2002 Sb. o ochraně ovzduší [1]) definuje jako jakoukoliv látku vnesenou do vnějšího ovzduší nebo v něm druhotně vznikající, která má přímo a nebo může mít po fyzikální nebo chemické přeměně nebo po spolupůsobení s jinou látkou škodlivý vliv na život a zdraví lidí a zvířat, na životní prostředí, na klimatický systém Země nebo na hmotný majetek. Systém omezování emisí škodlivin vyžaduje stanovení zákonných emisních limitů a stanovení metodiky jakým způsobem bude zdroj znečišťujících látek kontrolován a popř. způsob zpoplatňování emisí jednotlivých znečišťujících látek. Tuhé znečišťující látky (TZL, nebo anglicky TSP – Total Suspended Particles) patří dle nynější platné legislativy spolu s dalšími látkami do skupiny tzv. základních znečišťujících látek vznikajících při spalování. Není problém aplikovat systém omezování emisí dle platné legislativy na velké a střední zdroje znečištění. Problém nastává u malých zdrojů, zvláště používaných v občanské sféře, kdy malý spalovací zdroj je podroben zkouškám v autorizované

zkušebně, ale dále již není kontrolováno jakým způsobem je zařízení provozováno a zda-li se v něm spaluje předepsané palivo. To potom vede k uvedenému problému zhoršování kvality ovzduší během topného období. Tato práce má za úkol především řešit technickou stránku problematiky, tj. popis metod měření emisí tuhých látek, návrh ředícího tunelu a návrh vhodné odběrové aparatury s ohledem na měření emisí tuhých látek u malých spalovacích zdrojů, ve kterých se spalují tuhá paliva.

2 Tuhé znečišťující látky

Vlivem přírodních a lidských aktivit dochází ke vnášení tuhých, kapalných a plynných částic do ovzduší a ty pak mohou negativně působit ve vnitřním i vnějším ovzduší na zdraví lidí, zvířat, mít negativní následky na rostliny a stavby. Tuhé částice jsou historicky nejdéle sledované znečišťující látky. Jejich vznik může být buď přirozený (lesní požáry, sopky apod.) nebo antropogenní (spalování v uhelných elektrárnách, doprava, spalování v malých spalovacích zdrojích apod.) [2]. V technické praxi se často jako prach obecně označují tuhé částice rozptýlené v plynné fázi [3,4,5]. Tuhé částice jsou charakterizovány fyzikálními, rozměrovými a chemickými vlastnostmi a podle nich lze určit vliv prachových částic na lidské zdraví. Složení tuhých částic je velmi různorodé. Pevné částice mohou na svém povrchu adsorbovat další znečišťující složky a pomáhají tak k přenosu těchto látek do plic (např. karcinogenní látky). Základní vlastnosti z hlediska působení na lidské zdraví je velikost částice. Částice větší než 100 μm poměrně rychle sedimentují a proto nepředstavují pro člověka výraznější problém. Problém nastává u jemnějších částic, které mohou v ovzduší zůstat déle a například částice menší než 0,1 μm mohou sedimentovat až po jejich koagulaci [2]. Průnik jednotlivých frakcí TZL do dýchacích cest je znázorněno na Obr. 1.



Obr. 1 Průnik jednotlivých velikostních frakcí prachu do dýchacích cest [6]

Známé je označení pro jemné frakce tuhých částic PM10, resp. PM2,5 (PM – z anglického Particulate Matter), které představují částice, které projdou selektivním filtrem vykazující pro aerodynamický průměr 10 μm , resp. 2,5 μm , odlučovací účinnost 50% [2]. Odběr těchto frakcí může být realizován pomocí cyklonů nebo pomocí impaktorů. Při posuzování odpadních plynů se pojem „particulate matter“ překládá do češtiny jako tuhé znečišťující látky. V odborné literatuře se uvádí několik definic TZL. S ohledem na řešení problematiky stanovování emisí TZL u spalovacích zdrojů vybírám následující:

- dle [7] tuhými znečišťujícími látkami se rozumí částice tuhého skupenství jakéhokoliv tvaru, struktury a hustoty rozptýlené v plynné fázi
- další literatura [3] definuje TZL jako částice různých velikostí, tvaru, původu, složení a struktury, které jsou za dané teploty a tlaku v komíně, výduchu, výpusti nebo při měření emisí přítomny v odpadním plynu v pevném skupenství a jsou jím unášeny
- částice libovolného tvaru, struktury nebo hustoty rozptýlené v plynné fázi za podmínek existujících ve vzorkovacím bodě, které mohou být zachyceny filtrací za určených podmínek po reprezentativním odběru vzorku sledovaného plynu a které zůstanou na filtru i po sušení za určených podmínek [4]

Stanovení emisí tuhých znečišťujících látek patří mezi nejkomplicovanější měření znečišťujících látek a to zvláště u malých spalovacích zdrojů. Především je to dáno charakterem proudění v uzavřeném měřicím profilu, charakterem tuhých částic a dále měření klade vysoké nároky na přístrojové vybavení (přesnost měření, způsob měření a pod.) [8].

3 Metody stanovení tuhých znečišťujících látek

3.1 Úvod

Stanovením tuhých znečišťujících látek se rozumí stanovení hmotnostních toků a hmotnostních koncentrací tuhých částic v proudu plynu pomocí určité metody. Základní dělení měření TZL je:

- **jednorázové měření** (jednorázový odběr a následné vyhodnocení)
- **kontinuální měření** (on-line stanovení koncentrace prachu)

Přístroje na měření prachových částic pracují na principu několika různých metod.

Tyto metody lze rozdělit do několik skupin [9]:

- **gravimetrická metoda** – tato metoda je zvolena jako metoda rozhodčí pro stanovení koncentrace prachu v plynu a jsou určeny pro kalibraci kontinuálních prachoměrů. Není vhodná pro kontinuální měření.
- **optické metody** – tyto metody využívají transmisního principu a principu rozptylu světelného paprsku.
- **metoda využívající triboelektrický jev** – měří se změna elektrického náboje, způsobená průletem prachových částic na povrchu kovové sondy přístroje.
- **metoda využívající absorpce beta záření** – měří se hodnota intenzity β záření před a po vzorkování. Metoda dosahuje vysoké přesnosti výsledků, avšak je poměrně nákladná.

Z hlediska provedení měření lze prachoměry rozdělit [9] na:

- **prachoměry založené na extraktivní metodě** – odběrovou sondou se odebere vzorek z proudícího plynu a následně vyhodnotí. Do této kategorie patří tzv. gravimetrická metoda.
- **prachoměry využívající tzv. metody in-situ** – snímací část prachoměru je umístěna přímo v potrubí, kde proudí plyn. Do této kategorie patří např. optická metoda založená na principu rozptylu světla. Nevýhodou této metody je, že měřicí část přístroje je umístěna ve znečištěném plynu a může docházet k zanášení snímače; částečně tuto nevýhodu lze řešit použitím např. tzv. ofuku vzduchem nebo jiným inertním plynem.

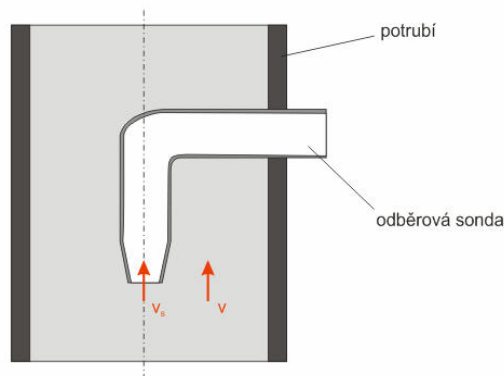
3.2 Jednorázové měření

3.2.1 Gravimetrická manuální metoda

Hlavní jednorázovou metodou je manuální gravimetrická metoda. Pro stanovení koncentrace tuhých znečišťujících látek se používají dvě mezinárodně přijaté normy, jejichž princip je založen na záchytu prachu na vhodných filtrech a následným gravimetrickým vyhodnocením. První metody může být použito k určení hmotnostních koncentrací v rozsahu od 5 mg/m^3 do 10 g/m^3 . Pro hmotnostní koncentrace menší než 50 mg/m^3 je nejistota této metody větší než $\pm 10 \%$. Jedná se o normu ČSN ISO 9096:1998 Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých

částic v potrubí - Manuální gravimetrická metoda. Druhá z metod je určena pro stanovení nízkých hodnot hmotnostní koncentrace prachu v plynech proudících potrubím při hmotnostních koncentracích nižších než 50 mg/m^3 po přepočtu na normální stavové podmínky. Tato metoda byla ověřena se zvláštním důrazem na obsah prachu okolo 5 mg/m^3 a průměrnou dobu odběru vzorku 30 minut - ČSN EN 13284-1 Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda. Koncentrace TZL se pak stanoví jako podíl hmotnosti zachycených TZL v zachycovači k objemu odsátého suchého plynu přepočteného na normální podmínky, tj. 0°C ; $101,325 \text{ kPa}$. Gravimetrická metoda je v první řadě základní, referenční metodou pro stanovení částic tuhého skupenství emitovaných ze stacionárních zdrojů a slouží také pro kalibraci (srovnávací měření) systémů na kontinuální měření tuhých částic. Metoda by měla být použita, pokud je to možné, při konstantních hodnotách stavových veličin plynu proudícího plynem. Odběr plynu je realizován pomocí odběrové sondy opatřené hubicí, která je umístěna do potrubí proti proudění vzduchu a proud vzorku je odebírán izokineticky po celou dobu měření. Jedná se tedy o izokinetické vzorkování, což je způsob vzorkování, při němž se rychlost a směr plynu vstupujícího do hubice vzorkovací sondy (v_s) shoduje s rychlostí a směrem proudění plynu potrubím v místě měřicího bodu (v), viz. Obr. 2. Tuhé částice jsou následně filtrovány pomocí filtru, vysušeny a zváženy. Hmotnostní tok tuhých látek se následně vypočítá s vypočtené hmotnostní koncentrace tuhých částic a příslušného průtoku plynu. Vzorkovací trať se zpravidla skládá z následujících základních částí:

- vyhřívaná vzorkovací sonda s vyměnitelnou hubicí
- odlučovače tuhých znečišťujících částic, sestava filtru, spojovací potrubí
- systému pro měření průtoku
- sacího systému (vývěva)



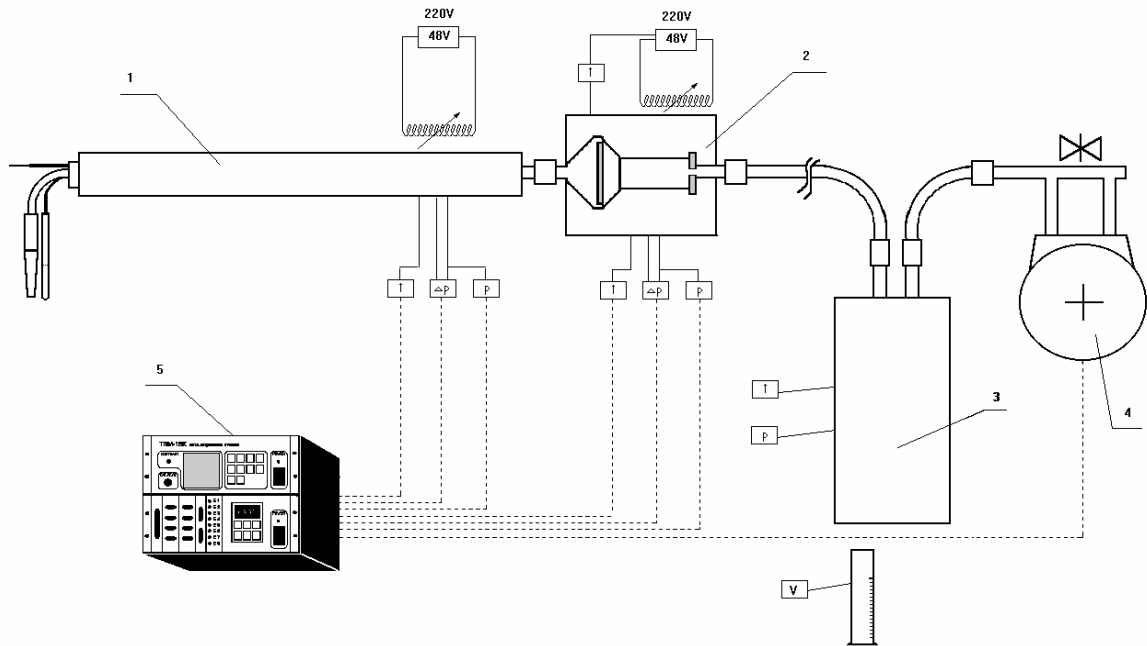
Obr. 2 Izokinetické vzorkování

Během odebírání vzorku plynu je nutné zamezit kondenzaci par ve vzorkovací trati, protože to by mohlo nepříznivě ovlivnit separaci tuhých částic (např. nalepování tuhých částic na vnitřní stěny sondy, tím zanášení sondy a zhoršení podmínek pro odběr plynu). Z tohoto důvodu je potřeba vyhřívat část trati před separací tuhých částic v odlučovači. V průběhu izokinetického vzorkování se měří rychlost plynu ve vzorkovacím bodě potrubí a na základě této hodnoty se upravuje příslušný průtok přes odběrovou hubici tak, aby byly docíleny izokinetické podmínky (např. pomocí vývěvy v kombinaci s frekvenčním měničem řízeným regulátorem). Dále pro izokinetické vzorkování je nutné zvolit vhodný vnitřní průměr hubice sondy v závislosti na výkonu vývěvy, rychlosti proudění plynu v potrubí a koncentraci tuhých látek v proudící vzdušině. Podrobnější informace o metodě a postupu měření je k dispozici v uvedených mezinárodních normách.

Podobný postup měření jako v normě [4] lze nalézt v mezinárodní ISO normě pro stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachových částic v rozsahu do $20 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ se zvláštním zřetelem na obsah částic okolo 5 mg/m^3 [8,10].

US EPA zavedla pro stanovení prachu v odpadních plynech ze stacionárních zdrojů obdobné metody: *Method 5 – Determination of particulate matter emissions from stationary sources* (Code of Federal Regulations US EPA 1999) – obdoba [3] a *Method 5I – Determination of low level particulate matter emissions from stationary sources* (Code of Federal Regulations US EPA 1999) - obdoba [4].

Příkladem gravimetrické aparatury je izokinetická gravimetrická souprava GTE společnosti Technické služby ochrany ovzduší PRAHA, a.s.. Tato izokinetická gravimetrická souprava slouží pro odběr vzorku tuhých znečišťujících látek z proudícího plynu za izokinetických, popřípadě přibližně i za izotermických podmínek, v souladu s výše uvedenými normami [3] a [4]. Tuhé částice jsou z dílčího proudu plynu kvantitativně odlučovány rovinným filtrem umístěným v externím zachycovači s filtračním materiálem vyrobeným ze skelných vláken. Aparatura umožňuje instalaci patronového interního filtru nebo cyklonového externího předodlučovače. Souprava, vybavená kombinovanou odběrovou sondou s použitím měřicího modulu pro snímání teplot, tlaků a tlakových diferencí na rychlostní sondě a měřicí dýze s elektrickým výstupem, je určena na automatické řízení izokinetiky odběru a vyhodnocení odběru pomocí řídicí jednotky [11]. Schéma aparatury včetně popisu základních částí je na Obr. 3.



1 - odběrová sonda - vytápěná s teplotním čidlem a rychlostní Prandtlovou sondou v místě odběru, 2 - externí zachycovač - vytápěný zachycovač pro rovinné filtry s automatickou regulací vytápění a integrovanou vytápěnou měřicí dýzou se snímáním tlakové diference, tlaku a teploty vzorku plynu, 3 - chladič - vodní náplňový chladič s kovovou spirálou, teploměrem, manometrem a jednotkou snímačů 1T1P, 4 - zdroj sání s regulovaným obtokem dílčího proudu plynu, 5 - řídicí jednotka IZOMAT s frekvenčním měničem.

Obr. 3 Izokinetická gravimetrická metoda GTE [12]

Dalším příkladem je souprava SHC GRAVIMAT 500 [13], ta je určena pro gravimetrické měření koncentrace prachu v proudícím odpadním plynu a je vhodná také pro kalibraci kontinuálních systémů a pro porovnávací měření. Odběr vzorku je realizován izokineticky přes odběrovou sondu, ve které je přímo umístěn filtr. Jedná se tedy o interní sestavu filtru. Koncentrace prachu je určena gravimetrickým vyhodnocením zvážením filtru před a po odběru vzorku. Souprava je automatická. Celá souprava je provedena v kompaktním provedení s nízkým počtem komponentů. Hlavní části aparatury jsou [13]:

Prachový zachycovač

- Verze 1 – LC pro nízké koncentrace prachu ($0,1 \dots 200 \text{ mg/m}^3$)
- Verze 2 – HC pro vysoké koncentrace prachu ($50 \dots 50\,000 \text{ mg/m}^3$)

Hlava sondy

- Hlava sondy obsahuje odlučovač prachu s filtrem, měření tlaků pro řízení izokinetického odběru a termočlánek PT100 pro měření teploty plynu.

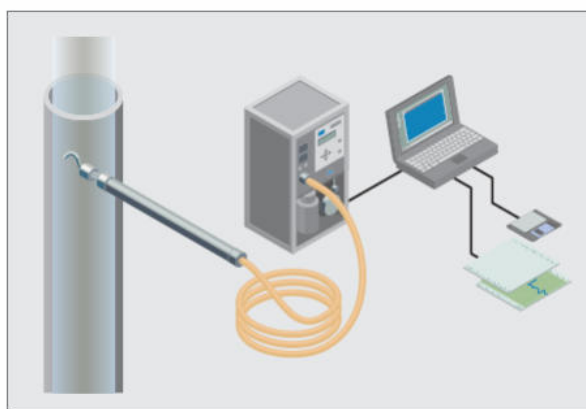
Výrobce udává, že zde nedochází ke ztrátám prachu vlivem manipulace s filtrem. Jedná se o patentovaný vzorkovací systém.

- Nerezové provedení odběrové sondy.
- Více-kanálová hadice pro přenos tlakových signálů do tlakových snímačů

Automatická hlava

- Se skládá z elektronické jednotky, šesti tlakových snímačů, napájení, sacího čerpadla, kontrolního a uzavíracího ventilu, odlučovače vlhkosti

Schéma aparatury je na Obr. 4.



Obr. 4 SHC GRAVIMAT 500 [13]

3.2.2 Elektrostatická metoda

Elektrostatická metoda se používá ke stanovení koncentrace prachu u malých zdrojů a je podrobněji popsána v kapitole 4.2.3.

3.3 Kontinuální měřicí systémy koncentrace prachu

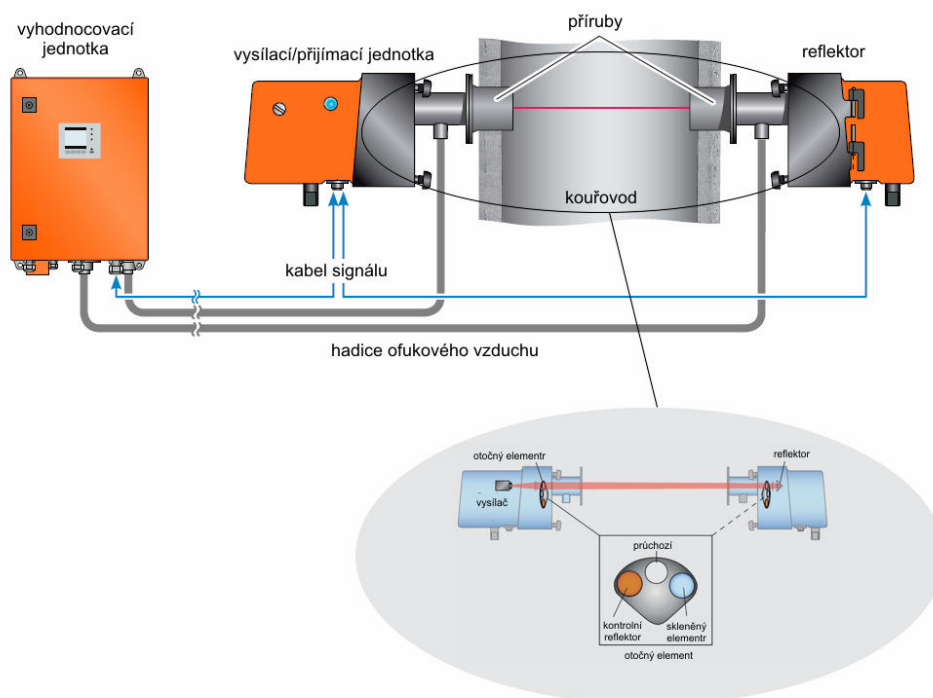
Kontinuální systémy na měření prachových částic jsou také zkráceně nazývány prachoměry. Obecně lze říci, že se jedná o systémy, které slouží k nepřetržitému měření hmotnostních koncentrací znečišťujících látek pomocí přístrojů konstruovaných za tímto účelem včetně vyhodnocení a archivace naměřených hodnot pomocí výpočetní techniky. Jejich využití je především v průmyslové oblasti- měření emisí prachu z elektráren a tepláren, spaloven odpadů, závodů na zpracování kovů, cementáren a jiné. Jejich umístění je doporučováno za filtrační zařízení u zdrojů prachu a zde slouží kontinuální systémy ke kontrole správné činnosti filtračních zařízení. Dále jsou používány tam, kde je potřeba znát průběh koncentrace prachu v proudícím plynu při konkrétním technologickém procesu emitující prachové částice. Kontinuální měřicí systémy jsou v dnešní době založeny

především na optické metodě, triboelektrické metodě a metodě pohlcování beta záření. Velice důležitým prvkem pro správné měření kontinuálními systémy je jejich kalibrace, neboť správnost měření závisí na mnoha faktorech (např. optické vlastnosti částic, hmotnostní koncentrace apod.).

3.3.1 Optické metody

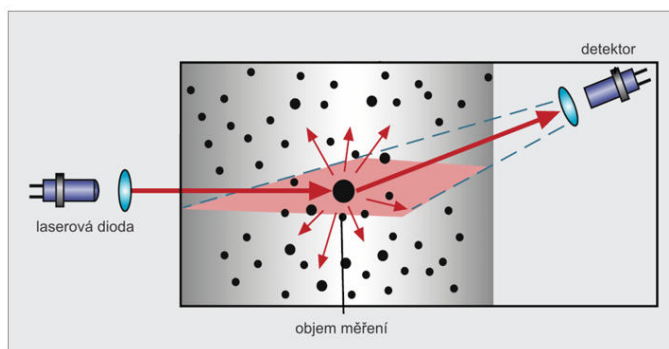
Optická metoda je v průmyslové oblasti nejvíce používaná. Metoda využívá dvou základních principů: princip transmise a rozptylu světla.

Prachoměry pracující na principu transmise světla - tato metoda se používá především pro vyšší koncentrace prachových částic v odpadním plynu. Optický vysílač vysílá světlo přes plyn s prachem a na druhé straně je přijímač, který měří intenzitu došlého světla. Následně dochází k porovnání s intenzitou světla vycházející z vysílače a lze takto zjistit hmotnostní koncentrace prachu v plynu. Vysílaný světelný paprsek procházející znečištěným plynem je částicemi vlivem absorpce a rozptylu zeslabován. Prachoměry založené na principu transmise světla mohou být provedeny různě, např. společnost SICK umístila ve svých transmisních prachoměrech vysílač a přijímač na stejnou stranu a dále na obě strany jsou umístěny otočné elementy s průchozím otvorem, kontrolním reflektorem a skleněným panelem pro účely vnitřní automatické údržby (kompenzace znečištění), viz. Obr. 5.



Obr. 5 Transmisní prachoměr SICK DUSTHUNTER T [14]

Prachoměry pracující na principu rozptylu světla - příkladem může být optoelektronický přístroj s označením FW100 společnosti SICK, který je umístěn ve stávajícím ředícím tunelu na zkušebně Výzkumného energetického centra v Ostravě. Slouží k průběžnému měření koncentrací prachu v plynech při teplotách nad bodem tání částic. Přístroj pracuje na principu měření rozptýleného světla. Tento princip se z důvodu své vysoké citlivosti používá především pro měření nízkých koncentrací částic. Laserová dioda ozařuje částice prachu v proudu plynu modulovaným světlem ve viditelném rozsahu (vlnová délka cca. 650 nm). Jednotlivými částicemi rozptýlené světlo je zachycováno vysoce citlivým detektorem, který je nastaven v úhlu cca 15° k ose paprsku (Obr. 6). Přijatý signál je elektricky zesílen, a přiveden na mikroprocesor, centrální součást měřicí, řídicí a vyhodnocovací elektroniky. Vysílací výkon laserové diody je průběžně monitorován tak, že je mikročipem v laserové diodě měřena část laserového paprsku. Přijímaný signál je taktéž zesílen, a poté přiveden na monitorovací kanál mikroprocesoru [15].



Obr. 6 Optická metoda rozptylu světla [15]

3.3.2 Metoda založená na triboelektrickém jevu [16]

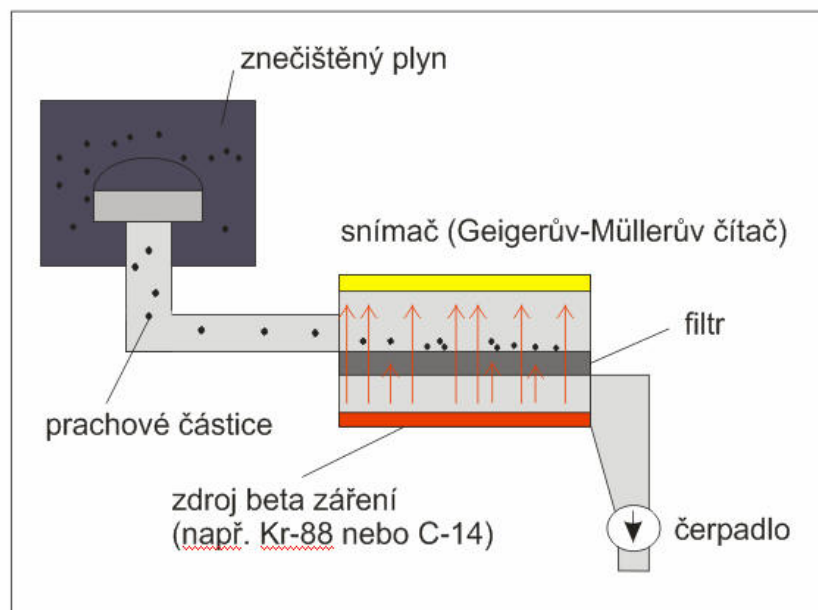
Princip měření spočívá v tom, že tuhé částice v plynu narážející a prolétající okolo elektrodynamického senzoru indukují střídavou složku proudu, která odpovídá elektrodynamickému náboji. Výsledný proud, který je přímo úměrný koncentraci tuhých částic, je zesílený a upravený v rámci senzoru a přenášený na řídicí jednotku za účelem vyhodnocení koncentrace tuhých látek v proudícím plynu. Příkladem je přístroj společnosti PCME Dust Flow nabízený pod obchodním názvem DS30a (Obr. 7) využívající elektrodynamickou technologii měření, a který je umístěn v testovací trati na porovnávací měření koncentrací tuhých částic na zkušebně Výzkumného energetického centra v Ostravě.



Obr. 7 Přístroj PCME DS30a [16]

3.3.3 Metoda využívající absorpce beta záření [17]

Metoda využívající absorpce beta záření je oproti optickým metodám zjišťování koncentrace prachu v plynu výhodná z důvodů, že měření je nezávislé na charakteru prachových částic (velikost, tvar, barva) a je vhodný pro měření širokého rozsahu koncentrací prachu. Plyn s prachovými částicemi je čerpadlem nasáván přes filtr, kde se prach usazuje (Obr. 8). Množství prachu se určuje ze zeslabení radioaktivního záření, které je vysíláno radioaktivními prvky Kr-88 nebo C-14, a je vedeno přes prachový filtr a dopadá na snímač radioaktivního záření, známý pod názvem Geigerův-Müllerův čítač. Absorpce beta záření skrze filtr a usazené prachové částice je popsána Lenardovým zákonem [17].

Obr. 8 Metoda využívající absorpce β záření , nakresleno dle [17]

4 Problematika stanovení emisí prachu z malých spalovacích zdrojů

4.1 Úvod

Stanovování emisí tuhých znečišťujících látek při spalování paliv v malých spalovacích zdrojích je značně problematické a to hned z několika důvodů, které jsou shrnuty do následujících bodů [18]:

- a) široká škála spalovacích zařízení a paliv
- b) specifický provoz jednotlivých spalovacích zařízení (příkládání, nerovnoměrnost hoření)
- c) neustále se měnící podmínky v komínu v závislosti na fázi spalovacího procesu
- d) vysoké koncentrace prachu za spalovacím zařízením
- e) závažný problém se týká rychlosti spalin v případě izokinetického odběru. Ta je za kotlem v komínu příliš nízká pro reprezentativní odběr vzorku - v kouřovodech malých spalovacích zařízení je rychlost spalin často v rozsahu 0,5 až 2 m.s⁻¹. Normy požadují rychlost, která odpovídá použité měřicí metodě – např. pro Prandtlovu sondu je diferenční tlak větší jak 5 Pa [3,4]. Což odpovídá schopnosti měřit rychlost spalin přibližně od 3 m/s (v závislosti na podmínkách v komíně a tím stavu spalin, resp. hustotě spalin).
- f) běžný provoz se může značně lišit od provozu v laboratořích, např. díky neodborného způsobu obsluhy spalovacího zařízení. Proto výsledky, které byly získány měřením v laboratoři se nemusí shodovat s výsledky v běžném provozu. Jistou pomocí je občanská osvěta co se týče provozování malých spalovacích zařízení.
- g) nejednotné metodiky pro určení koncentrace tuhých částic pro malé zdroje a z toho plynoucí nesnadná srovnatelnost výsledků získaných jednotlivými metodami

Návrh měřicí trati a odběrové aparatury vyžaduje zohlednění těchto jednotlivých aspektů. Částečným řešením výše uvedených problémů je použití ředícího tunelu.

4.2 Metody stanovení emisí tuhých částic z malých spalovacích zdrojů

Metody stanovení koncentrace tuhých látek ve spalinách při spalování tuhých látek v malých spalovacích zdrojích vycházejí z obecných metod pro stanovení tuhých částic

v proudící vzdušině, viz. kapitola 3. U malých spalovacích zdrojů je možné použít jak manuálních jednorázových metod tak metod kontinuálních s tím, že měření prachu pomocí kontinuálních metod u malých zdrojů je používáno výjimečně. Mezi kontinuální systémy, které lze použít u malých spalovacích zdrojů, lze uvést FMPS (Fast Mobility Particle Sizer) [19] a SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) [20]. Jsou však v porovnání s klasickými gravimetrickými aparaturami drahé. U jednorázových metod lze použít následující oficiální metodiky stanovení TZL u malých spalovacích zdrojů rozdělenými dle států, kde byl tento postup navržen a je používán [21,22]

- a) rakousko/německá metodika
- b) norská metodika
- c) U.K. metodika
- d) U.S. metodika
- e) australská/novozélandská metodika

První tři uvedené metodiky popisuje CEN ve standardech TC 295, a které mohou být použity při měření malých spalovacích zdrojů. Měřící laboratoř může využít jednu z těchto metod pro určení koncentrace tuhých částic. Základním předpokladem pro přesnost měření je dodržení izokinetického odběru, Rakousko/německá metodika je založena na neizokinetickém odběru plynu a následném gravimetrickém vyhodnocení. Norská a UK metodika s gravimetrickým vyhodnocením počítá s izokinetickým odběrem. UK metodika navíc umožňuje použít kromě gravimetrické aparatury i elektrostatický odlučovač tuhých částic.

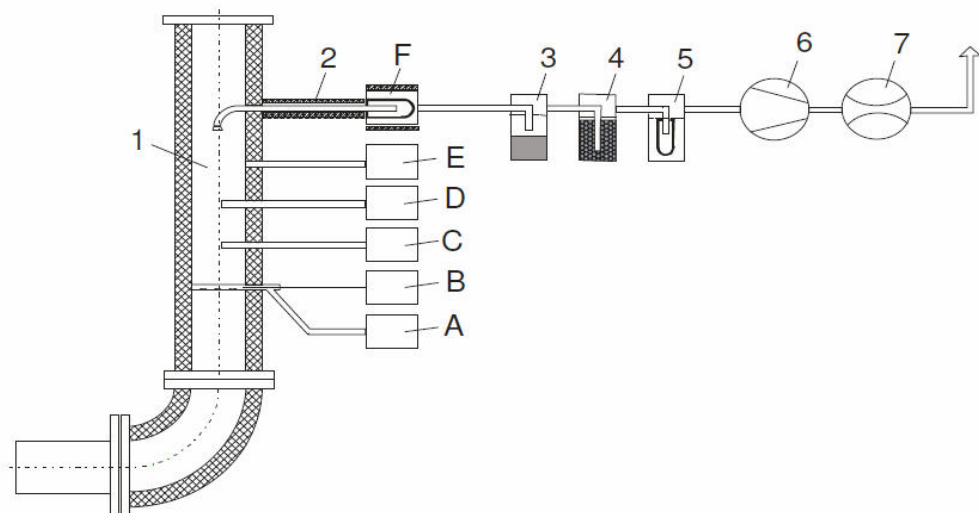
Poslední dvě uvedené metodiky představují propracované metodiky, se kterými se lze setkat mimo hranice Evropské unie. Jsou používány pro malé spalovací zdroje ve Spojených státech amerických a v Austrálii/Novém Zélandě, používající odběr tuhých látek z ředícího tunelu nebo odběr přímo z komínu.

4.2.1 Rakousko/německá metodika

V Rakousku a Německu je u testování malých spalovacích zdrojů dle norem EN13240:2005 [23], EN 13229:2005 [24] a EN 12815:2005 [25] navíc i prováděno měření tuhých částic odběrovou aparaturou, která je umístěna za kotlem dle DIN+. DIN+ je dobrovolné certifikační schéma založeno na evropských a německých existujících standardech a určuje limitní hodnoty emisí tuhých znečišťujících látek z malých spalovacích zdrojů a metodiku měření tuhých emisí.

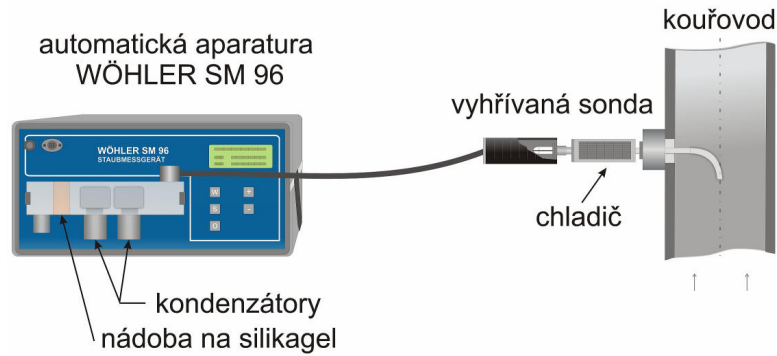
Schéma měření a měřící aparatury je zobrazeno na Obr. 9. Z uvedeného schématu vyplývá, díky absenci měření rychlosti spalin, že se jedná o neizokinetický odběr vzorku spalin. Měřící místo pro odběr tuhých částic musí být dle normy umístěno nad měřícími místy pro CO , NO_x a C_nH_m . Měření začíná tři minuty po přiložení a měřící perioda trvá třicet minut. Sonda má vstupní průměr 8 mm s rozšířením na 9,74 mm a při odběru musí být umístěna uprostřed měřícího profilu kouřovodu. Aparatura musí být navržena tak, aby v periodě 30 minut byla schopna přesát $280 \pm 28\text{l}$ spalin (přepočteno na normální podmínky). Účinnost záchytu částic filtrem musí být větší než 99,95%, pro částice $0,3\ \mu\text{m}$ DNOP. Montáž filtru musí být provedena tak, aby filtr nemohl být poškozen během zkoušky a čerpadlo bylo chráněno před vnikem částic prachu. Odběrová sonda má být navržena tak, aby nedošlo k poklesu teploty spalin pod rosný bod a teplota v zachycovači by se měla pohybovat na konstantní úrovni $70\ ^\circ\text{C}$. Dále je dle této normy požadavek měřit průměrné koncentrace O_2 a CO_2 během třicetiminutové periody odběru a po měření provést přepočet koncentrace na 13% $\text{O}_{2\text{ref}}$. Před měřením je nutné vysušení filtru při teplotě $105\ ^\circ\text{C}$ nejméně po dobu jedné hodiny a před měřením musí být filtr uzavřen ve vzduchotěsné nádobě. Po měření se filtr suší opět při teplotě $105\ ^\circ\text{C}$ po dobu nejméně jedné hodiny.

Získání výsledků koncentrace prachu vychází z podstaty gravimetrického vyhodnocování. Příkladem takovéto odběrové aparatury je kompaktní automatická souprava WÖHLER SM96 používána v Německu a Rakousku (Obr. 9).



1- měřící sekce, 2- odběrová sonda na prach, 3- vodní filtr, 4- sušící věž (silikagel), 5-ultra jemný filtr, 6- čerpadlo, A – měření CO_2 a CO , B – teplota spalin, C – měření NO_x , D – měření C_nH_m , E – měření statického tlaku

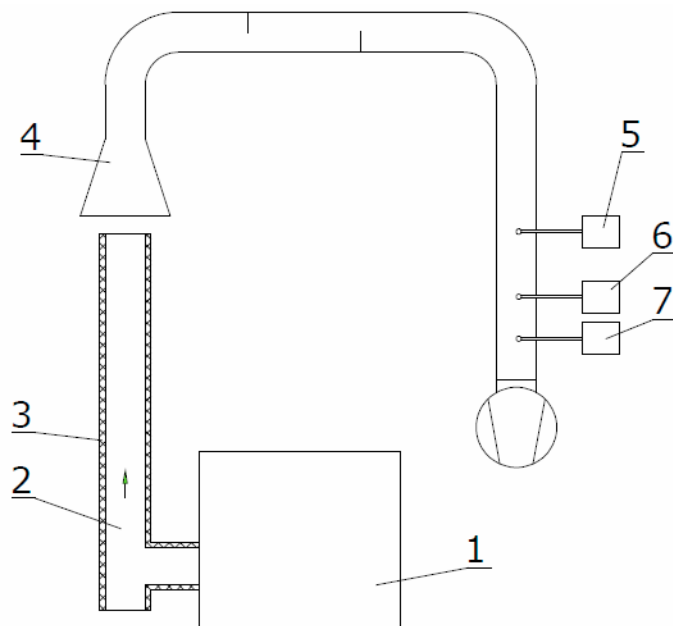
Obr. 9 Schéma aparatury dle DIN+ [26]



Obr. 10 Odběrová aparatura WÖHLER SM96 pro neizokinetické odběry [27]

4.2.2 Norská metodika [28,29]

Metodiku popisuje norská norma NS 3058 a NS 3059. Spalovací zařízení na tuhá paliva jsou testovány odběrem vzorku z ředícího tunelu. Vzorek plynu je prosáván přes rovinný filtr s pórovitostí 1 μm . Testovací palivo tvoří na vzduchu sušená smrková polena s rozměry 49 x 49 mm a vlhkostí mezi 16 a 20 %. Délka polen se mění v závislosti na rozměrech spalovací komory. Vzdálenost mezi poleny musí být 10 mm. Odběr vzorku je realizován při čtyřech výkonových úrovních uvedených v popisující normě. Teplota povrchu spalovacího zařízení při zkoušce se nesmí lišit o více jak 70 °C (začátek a konec). Výsledek měření je uveden jako gram tuhé znečišťující látky na kilogram paliva (g/kg). Schéma měření je zobrazeno na Obr. 11.



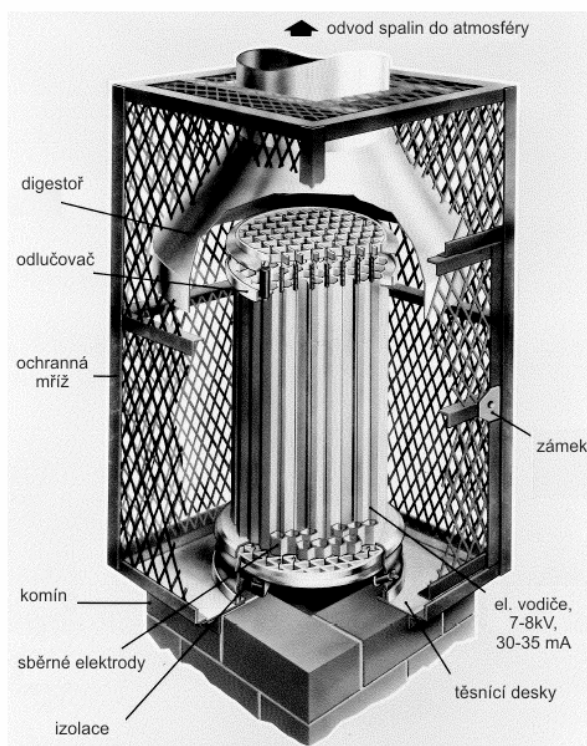
1- spalovací zařízení, 2- komín, 3- izolace, 4- digestoř, ředění spalín, 5- měření rychlosti, 6- odběr tuhých částic, 7- měření CO, NO_x a CO₂

Obr. 11 Ředící tunel používaný a umístění měřících zařízení v norské metodice [21]

4.2.3 U.K. metodika

Metodiku popisuje britská norma BS 3841 a je určena pro krbovou vložku s otevřeným ohništěm – typické spalovací zařízení ve Spojeném království. Tato norma popisuje dvě metody měření tuhých částic ve spalinách a to měření za pomoci elektrostatického odlučovače a druhá metoda spočívá v odběru vzorku z ředícího tunelu s gravimetrickým vyhodnocením. Norma je rozdělena do dvou částí BS 3841-1 [30] a BS3841-2 [31]. V první části je obecný popis měření tuhých částic včetně požadavku na spalovací zařízení a zkušební komín, který musí mít výšku 4570 ± 25 mm. Druhá část popisuje detailnější popis měřících metod – elektrostatický odlučovač a gravimetrickou metodu.

Elektrostatický odlučovač byl vyvinut pro účely měření koncentrace tuhých částic ve spalinách ze spalování v domácích malých spalovacích zařízeních na tuhá paliva. Odlučovač odlučuje tuhé částice z celkového proudu spalin během testovací periody. Celkový tok tuhých částic je určen zvážením odlučovače před započítím a po ukončení testovací periody. Emise tuhých částic jsou uváděny v gramech za hodinu (g/h) a výsledek je porovnán s maximálním emisním limitem, který činí 5 g/h pro autorizovaná paliva dle regulí Spojeného království. Odlučovač je umístěn ve vrchní části testovacího komínu a odebírá kouř z celého průřezu s minimální tlakovou ztrátou. Konstrukce elektrického odlučovače je znázorněna na Obr. 12.



Obr. 12 Elektrostatický odlučovač dle BS 3841-2 [21]

Hlavní části elektrostatického odlučovače jsou následující:

- **sběrné elektrody** – jsou vyrobeny z šestihranných trubek z hliníkové slitiny. Stěny trubek jsou 0,7 mm silné.
- **nabíjecí elektrody** – jsou vyrobeny z tažených nerezových ocelových drátů o průměru 15 mm.
- **nosné rámy** – pro uchycení jednotlivých elektrod
- **vysokonapěťová jednotka EHT (Extra-high tension power unit)** – umožňuje plynulou změnu výstupního napětí z 0 kV na 12 kV při 50 mA.
- **elektrické vytápění s měřením teploty** – pro udržení suchého odlučovače. Rozsah měření teploty musí být v rozmezí 20 až 120 °C s přesností ± 2 °C.

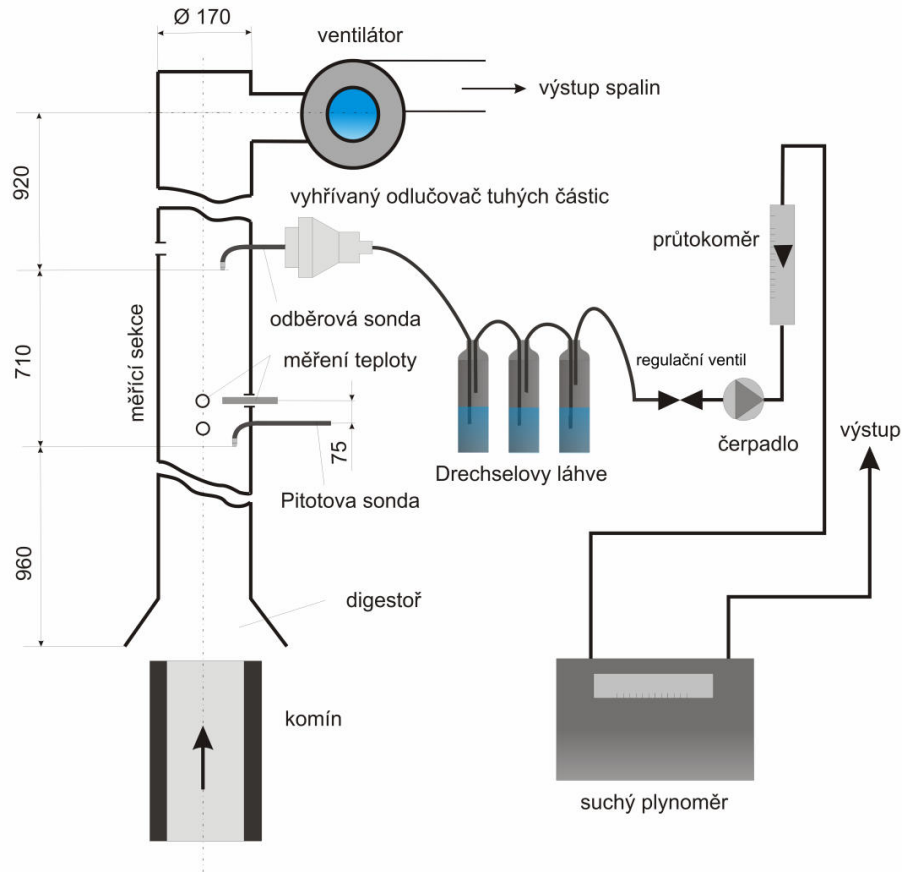
Požadavky na rozměry a provedení jednotlivých částí elektrostatického odlučovače jsou uvedeny v dané normě [31]. Výpočet hmotového toku tuhých částic je provedeno dle vztahu:

$$S = \frac{m}{t} \quad [\text{g/h}] \quad (4.1)$$

kde

- m – hmotnost tuhých částic zjištěným zvážením odlučovače [g]
- t – délka trvání testovací periody [h]

Metoda používající ředící tunel spočívá v ředění spalin na konci komínu. Ředící tunel zobrazuje schématicky Obr. 13. Vzorek spalin je odebírán po naředění spalin v odběrovém místě ředícího tunelu pomocí odběrové sondy. Ten je následně prosáván přes filtr ze skelných vláken, který je udržován při teplotě 70 °C. Vyhodnocení je provedeno gravimetricky.



Obr. 13 Měření pomocí ředícího tunelu dle BS 3841-2 nakresleno dle [21]

4.2.4 U.S. metodika

EPA US metodika představuje pokročilou metodiku měření emisí tuhých částic z malých spalovacích zdrojů spalující dřevo. Metodiku popisují několik EPA metodik, které si lze volně stáhnout z oficiálních stránek EPA. Tyto metodiky jsou následující:

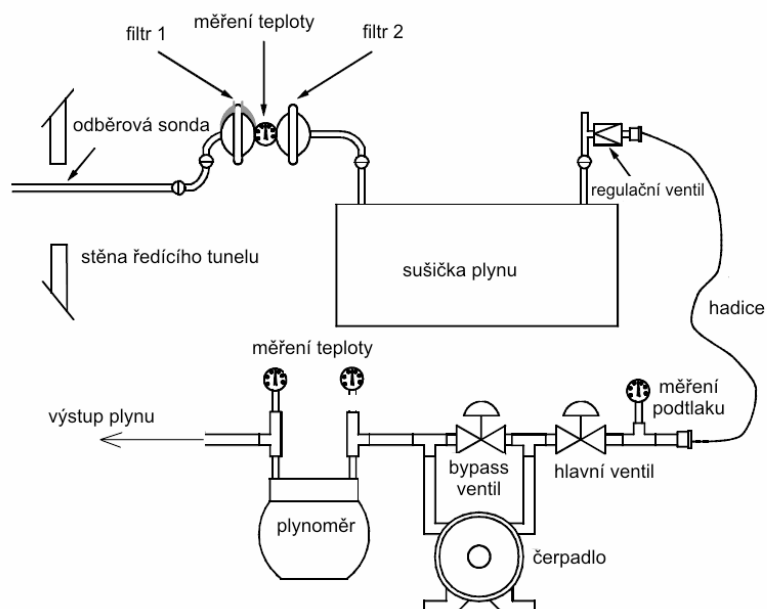
- EPA US Method 5 – Stanovení emisí tuhých částic ze stacionárních zdrojů, viz kapitola 3.2 [32]
- EPA US Method 5G – Stanovení emisí tuhých částic z malých zdrojů spalujících dřevo (metoda používající ředící tunel) [33]
- EPA US Method 5H – Stanovení emisí tuhých částic z malých zdrojů spalujících dřevo (odběr z komínu) [34]
- EPA US Method 28 – Certifikace a revize – malé spalovací zdroje spalující dřevo [35]

EPA US Method 5G popisuje měření emise tuhých látek pomocí odběru spalin z ředícího tunelu. Spaliny jsou nasávány pomocí digestoře a ředěny okolním vzduchem.

Vzorek spalín je odebírán z jednoho vzorkovacího bodu z ředícího tunelu a následně tuhé znečišťující látky jsou zachycovány na dvou filtrech ze skelných vláken (bez organických pojiv, vhodný je typ s označením Gelman A/E 41631) zapojených v sérii. Filtry (průměr filtru min. 100 mm) jsou ohřívány maximálně na 32 °C. Emise tuhých částic jsou vyhodnoceny gravimetricky. Metodika umožňuje použít jednu ze tří variant vzorkovacích tratí:

- jedna trasa s duálním filtrem s objemovým průtokem okolo 0,015 m³/min
- jedna trasa s duálním filtrem plus impingery s rychlostí odběru okolo 0,015 m³/min
- dvě trasy s duálním filtrem pracující při jakémkoliv průtoku

Vzorkovací trať dle této metodiky je schématicky zobrazena na Obr. 14.

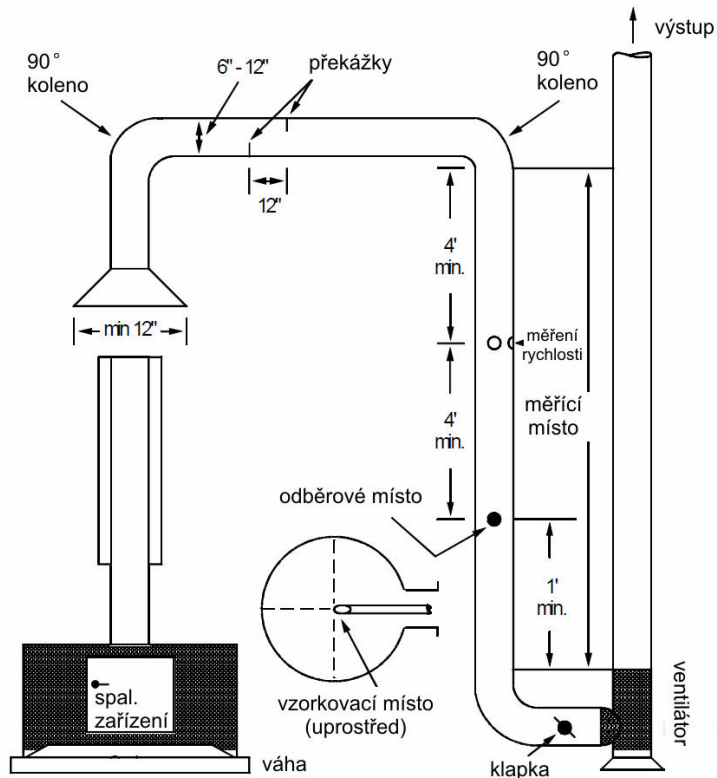


Obr. 14 Schéma měřící trasy dle EPA U.S. Method 5G [33]

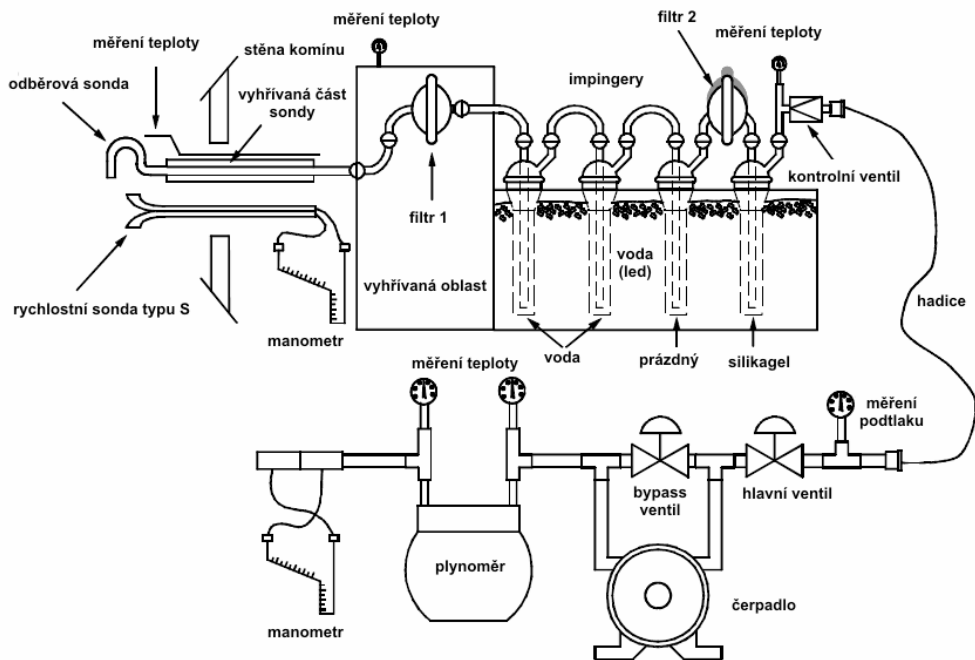
Požadavky na jednotlivé prvky vzorkovací trati jsou uvedeny podrobněji v dané normě. Norma dále popisuje požadavky na konstrukční řešení ředícího tunelu, jeho schéma je na Obr. 15.

Postup popsáný metodikou U.S. EPA Method 5H je založen na odběru vzorku spalín přímo z komínu. Vzorek s tuhými částicemi je odebírán pomocí odběrové sondy z proudu spalín v komínu a tuhé částice jsou zachycovány opět na dvou filtrech ze skelných vláken zapojených v sérii včetně s použitím impingerů. První filtr je vytápěn na teplotu maximálně 120 °C. Druhý filtr a impingery jsou chlazený vodou (ledem) a teplota zde nepřesahuje teplotu 20 °C. Vyhodnocení koncentrace tuhých částic probíhá

gravimetricky po odstranění vody z filtrů a impingerů. Schéma odběrové aparatury je totožné s aparaturou popsanou v metodě EPA Method 5 a je uvedena na Obr. 16.



Obr. 15 Ředící tunel podle U.S. metodiky [33]



Obr. 16 Odběrová aparatura pro tuhé částice Method 5, Method 5H [32,34]

4.2.5 *Australská/novozélandská metodika*

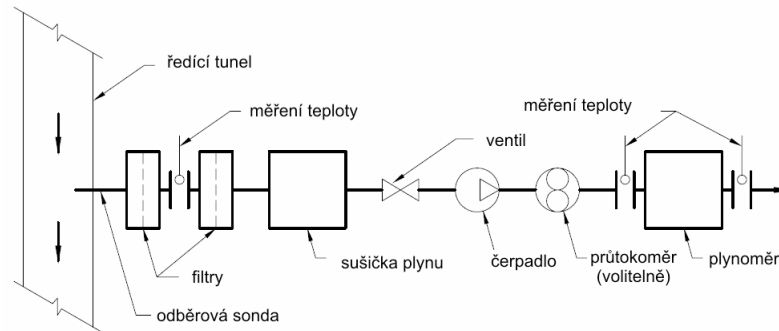
Metodiku pro stanovení emisí z malých zdrojů spalující tuhá paliva s dávkovým příkládáním pro domácí použití popisuje norma AS/NZS 4013:1999 [36] a související normy [37,38,39]. Tyto normy jsou používány pro testování těchto zařízení v Austrálii a na Novém Zélandě. Norma [36] určuje metodu stanovení tuhých částic a udává maximální emisní faktor pro vypouštěné tuhé částice ze spalovacího zařízení. Metodika je určena pouze pro zařízení na vytápění místnosti bez i s ohřevem vody. Norma není určena pro kotle na ústřední vytápění, varné sporáky, spalovací zařízení pro centrální vytápění a další zařízení pospaná v normě. Testování spalovacího zařízení spočívá v jeho umístění v kalorimetrickém prostoru s odvodem spalin do ředícího tunelu dle požadavků normy AS/NZS 4012 [38]. Spalovací zařízení je položeno na váze díky níž je možné měřit úbytek paliva při spalování. Ředící tunel musí být před započítím měření čistý a musí být provedena jeho kalibrace pomocí kalibračního koeficientu. Ředící tunel musí být provozován při jmenovitém průtoku $6 \pm 0,5$ normálních kubických metrů za minutu (normální podmínky tato norma uvažuje jako teplotu 20 °C a 101,3 kPa). Průtok plynu přes ředící tunel musí být spuštěn minimálně 10 min před samotným odběrem. Odběr vzorku spalin je realizován z ředícího tunelu při určitém spalovacím režimu. Norma určuje tři spalovací režimy- vysoký, střední a nízký výkon. Odebíraný objem vzorku je $0,0055 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{min} \pm 10 \%$. Teplota mezi filtry se musí pohybovat v rozmezí od 15 °C do 35 °C. Vývěva vzorkovací trati je vypnuta a měření je ukončeno, jestliže byla zjištěna váhou zbytková hmotnost 50 g hmotnosti naloženého paliva (hmotnost popela). Během měření musí být ukládány informace o teplotě spalin v ředícím tunelu a také doba vzorkovací periody, která nemá přesáhnout 10 minut.

Emisní faktor tuhých částic pro každý spalovací režim je počítán jako hmotnost tuhých částic v gramech na kilogram suchého paliva. Maximální povolený emisní faktor pro spalovací komoru s katalyzátorem je 2,25 g/kg a pro spalovací komoru bez katalyzátoru je 4 g/kg.

Odběrová aparatura je uvedena na Obr. 17 a požadavky na její provedení jsou následující:

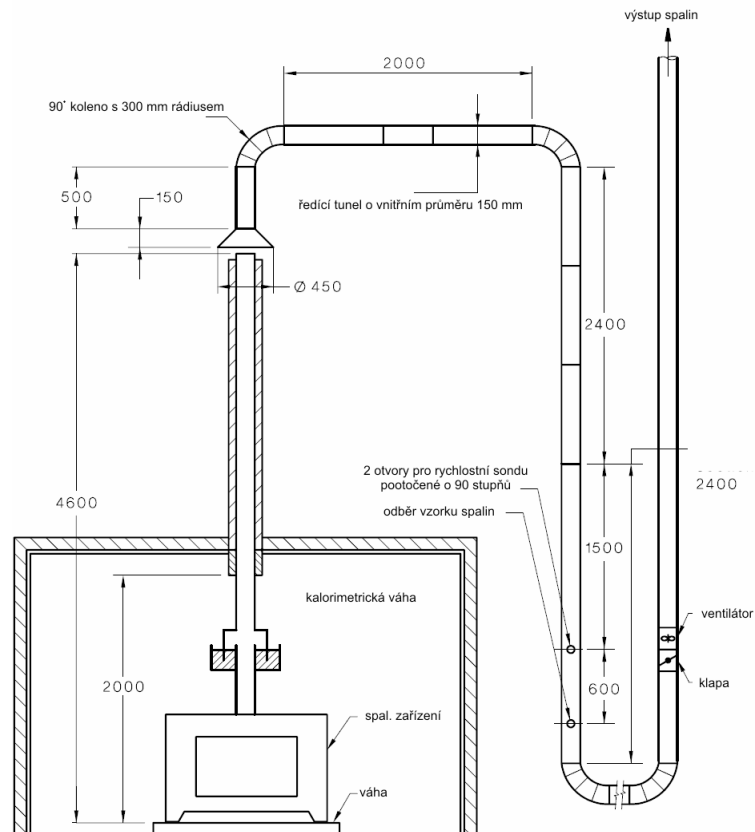
- odběrová sonda – délka 450 mm, vyrobena z nerezové oceli nebo skla s vnitřním průměrem 9,5 mm.
- dva odlučovače tuhých částic – pro filtry o průměru 50 mm.
- měření teploty – systém pro měření teploty v rozsahu 10 °C až 40 °C s přesností ± 3 °C.

- sušička plynu – musí umožnit vysušení vzorku s objemovou vlhkostí méně než 1,5%.
- plynoměr – pro měření suchého plynu s přesností 1% z objemu vzorku.
- filtry – filtr ze skelných vláken s průměrem 50 mm bez organických pojiv, vhodný je typ s označením Gelman A/E 41631
- vývěva – musí být schopná nasávat vzorek spalin při požadovaném průtoku.



Obr. 17 Odběrová aparatura pro tuhé částice - australská/novozélandská metodika [36]

Schéma konstrukčního provedení ředícího tunelu a kalorimetrické místnosti dle australsko/novozélandské metodiky je uveden na Obr. 18.



Obr. 18 Ředící tunel, provedení - australská/novozélandská metodika [36]

4.3 Dodatek k problematice měření emisí prachu u malých zdrojů

Existuje celá řada metod stanovení tuhých látek pro malé spalovací zdroje. Je nutno poznamenat, že dle nynější platné evropské legislativy u malých zdroj je požadavek na měření tuhých částic pouze u testování kotlů pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW. Zde je velice krátce uvedeno, že obsah prachu musí být stanoven elektrostatickou či gravimetrickou metodou. Dále pak je v příloze doporučena vhodná měřicí metoda (totožná s metodikou Spojeného království) s poznámkou, že je možné použít jiné národní metodiky s ohledem na požadavky normy (mezí hodnoty chyb nesmí překročit $\pm 5\%$ mezních hodnot emisí uvedené v normě) [40]. Je zřejmé, že jednotlivé metodiky poskytují rozdílné výsledky a není moc dobře možné provést v případě potřeby mezilaboratorní porovnávání. Rozdílné výsledky nejsou dané pouze rozdílným způsobem měření a použité odběrové aparatury, ale také způsobem jakým je spalovací zařízení provozováno. Uvedené metodiky jsou dále značně nejednotné v typu spalovacího zařízení, které je podrobno testování, a jeho provozování. Proto pro vytvoření jednotné metodiky je nutné sladit jaké spalovací zařízení bude testováno, dále způsob provozování spalovacího zařízení, metodiku stanovení a jednotky, ve kterých budou uvedeny výsledky měření [22].

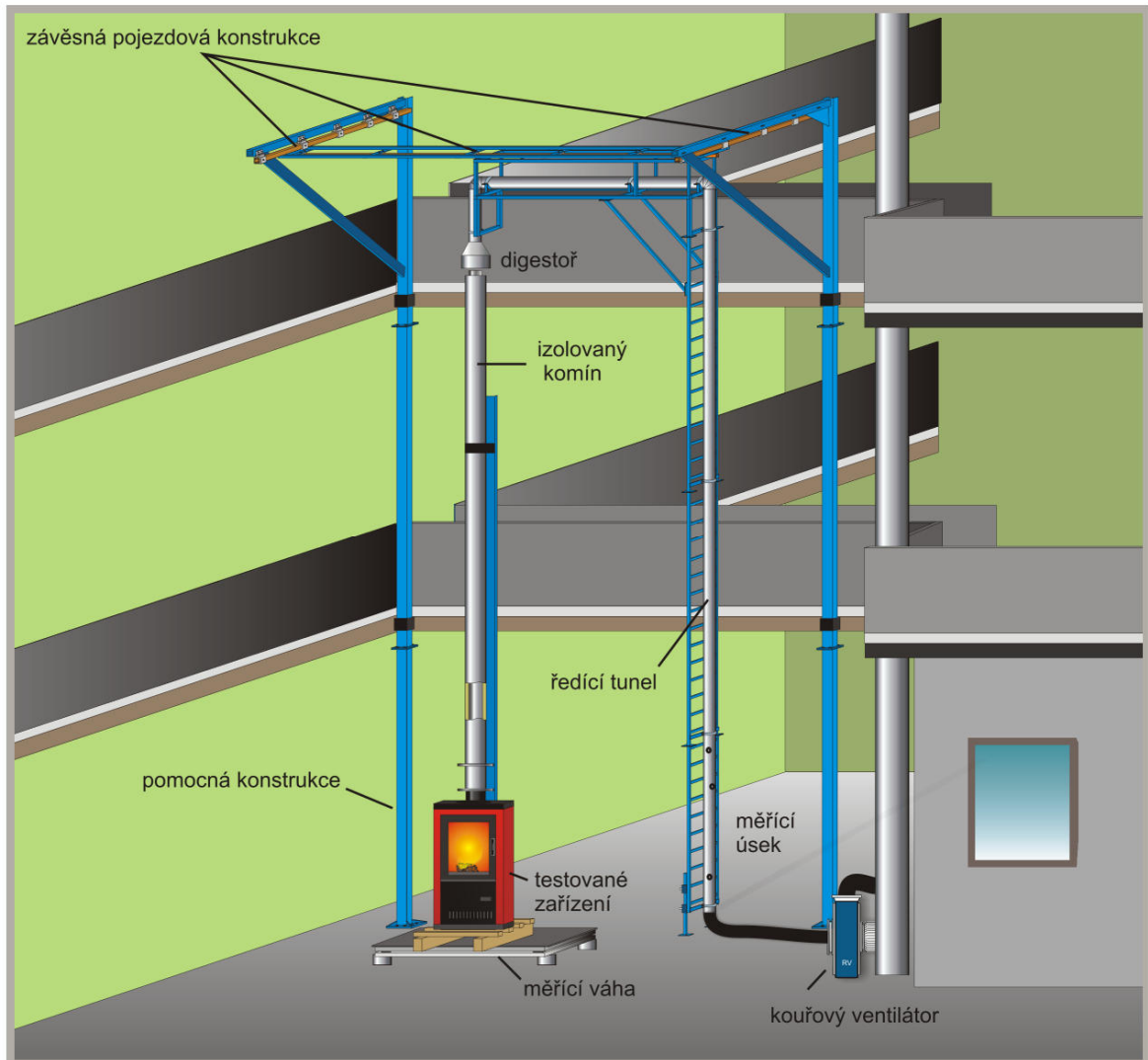
Vytvoření evropské jednotné metodiky měření tuhých látek u malých zdrojů tak představuje pro komisi CEN nelehký úkol. Je snaha vytvořit tuto metodiku, nicméně pracovní verze návrhu, která byla založena na odběru tuhých látek z ředícího tunelu, byla komisí CEN na konci roku 2008 odmítnuta [21].

5 Návrh konstrukčního řešení ředícího tunelu

5.1 Konstrukční řešení

Ředící tunel slouží k nasávání spalin z komínu a jejich naředění pomocí požadovaného množství vzduchu a používá se proto, aby se částečně vyřešily problémy spojené s problematikou stanovení koncentrace tuhých částic ve spalinách, viz. kapitola 4.1. Ředící tunel se kromě jiného používá hned z několika důvodů, např. simuluje reálné podmínky (vliv komínu- možné transformace částic ve spalinách) a tudíž je možný reprezentativní odběr, umožňuje použití přístrojů s danými provozními požadavky (např. rychlost spalin – omezení při měření rychlostní sondou), dále dává možnost využití kontinuálního měření částic pomocí citlivých snímačů, které nemohou být provozovány při vysokých teplotách a koncentracích [41].

V rámci diplomové práce je proveden návrh ředícího tunelu. Ředící tunel je navržen pro umístění do nově budované zkušebny kotlů malých výkonů Výzkumného energetického centra v Ostravě. Návrh vychází z předchozích verzí ředícího tunelu a částečně i z metodiky [33] s tím, že v tomto návrhu má ředící tunel větší rozměry s ohledem na rozměry nové haly, dále je zde nově navrženo uchycení ředícího tunelu pomocnou konstrukcí a rozebírání částí tunelu pro jeho vyčištění. Ředící tunel je řešen tak, že celkový objem spalin je nasáván digestoří do kouřovodu tunelu a ředění probíhá pomocí ručního nastavování koncové části izolovaného komínu. Mezi výhody tohoto způsobu konstrukčního řešení ředícího tunelu je jeho jednoduchost, stabilita a široké možnosti umístění měřících přístrojů. Mezi nevýhody patří jeho velké rozměry a problémy lze očekávat i při ustavování komínu na měřící váze. Vizualizace konečného návrhu je na Obr. 19.

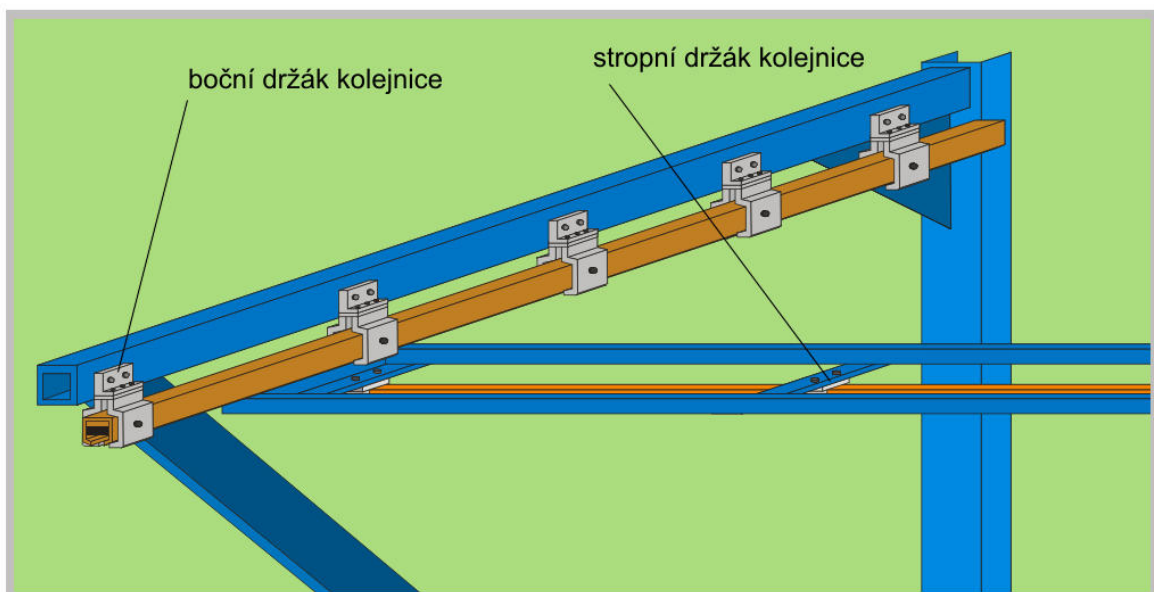


Obr. 19 Prostorová vizualizace návrhu ředícího tunelu

Díky tomu, že spalovací zařízení musí být umístěno na váze (v souvislosti s měřením úbytku hmotnosti paliva při spalování), musí být konstrukce navržena tak, aby bylo možné digestoř nastavit vůči pozici komínu. Konstrukce je proto řešena jako závěsná na pojezdových vozících, které jsou umístěny v kolejnicích (Kolejnice 82 S - STRELA 57 Rolling Center [42]). Je použito následujících typů vozíků výrobce Rolling Center:

- 2 SA dvoukolečkový závěsný vozík [43]
- 4 SA čtyřkolečkový závěsný vozík [44]

Pohyb je umožněn v obou směrech, jak ve směru vodorovném tak i příčném (dle obrázku). Kolejnice jsou uchyceny pomocí koupěných bočních a stropních držáků, viz. Obr. 20. Nutné je zabezpečení kolejnic proti vyjetí pojezdu pomocí šroubů skrze kolejnice (umístění na všech koncích kolejnic). Ustavení polohy ředícího tunelu je možné použitím vnitřních dorazů v kolejnici, lze však odhadnout, že by mohlo postačovat ustavení polohy vlastní vahou tunelu.

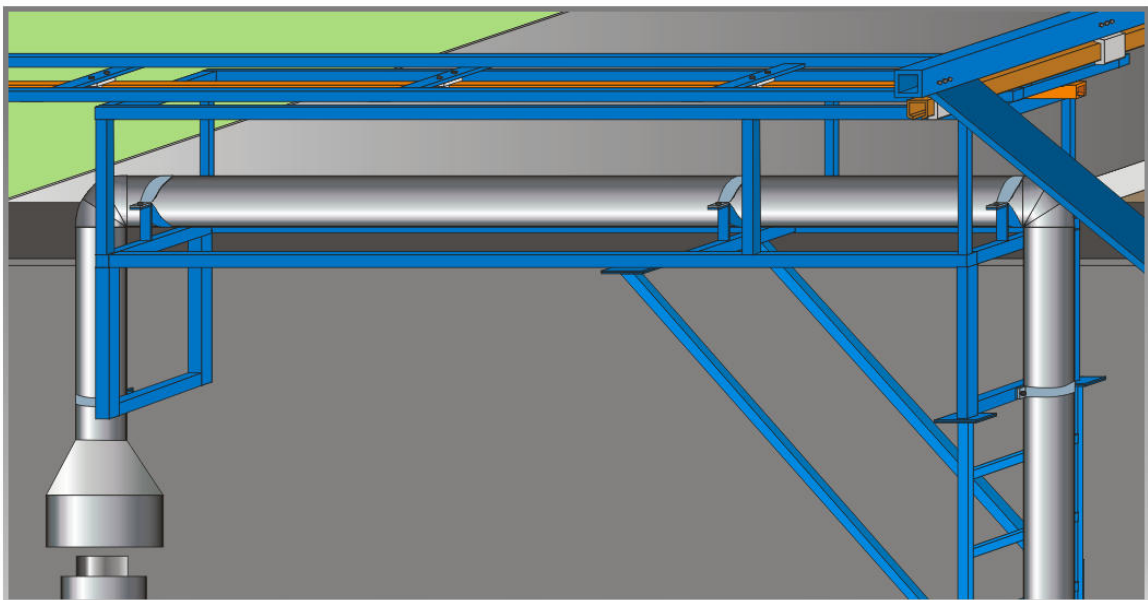


Obr. 20 Uchycení kolejnice pomocí bočních a stropních držáků

Dále je důležité, aby se konec komínu nedotýkal digestoře a spalovací zařízení, komín a podpůrná konstrukce komínu leželi přímo na váze. Tím se minimalizuje vliv dotyku komínu s ostatními částmi na přesnost měření hmotnosti. Ústí digestoře je umístěno ve výšce osmi metrů. Je zde tedy prostor pro umístění váhy, spalovacího zařízení umístěného na paletě a komínu. Je uvažováno s takovým prostorem pro komín, aby rozměry komínu vyhovovaly i zkoušce bezpečného provozu při přirozeném tahu u ČSN 13 240. Metodika požaduje délku komínu za spotřebičem na pevná paliva k vytápění obytných prostorů rozměr čtyři metry [23]. Pokud by byla dodržena přesně tato výška

komínu, umístění ústí digestoře by vycházelo pod úroveň druhé pracovní plošiny haly a byla by značně zhoršena dostupnost k ředícímu tunelu. Proto je celý ředící tunel posunut výše na úroveň druhé pracovní plošiny a je tím zlepšena manipulace s ředícím tunelem, avšak za cenu zvětšení výšku komínu na přibližně šest metrů. Hlavní nosná konstrukce je provedena z U profilu a je rozdělená na tři části, aby bylo docíleno snadnější dopravy jednotlivých dílů. Spodní část nosné konstrukce je přišroubována napevno k zemi pomocí šroubů M30. Dále, aby bylo zabráněno překlopení konstrukce, je nutné zajistit konstrukci k pracovním plošinám.

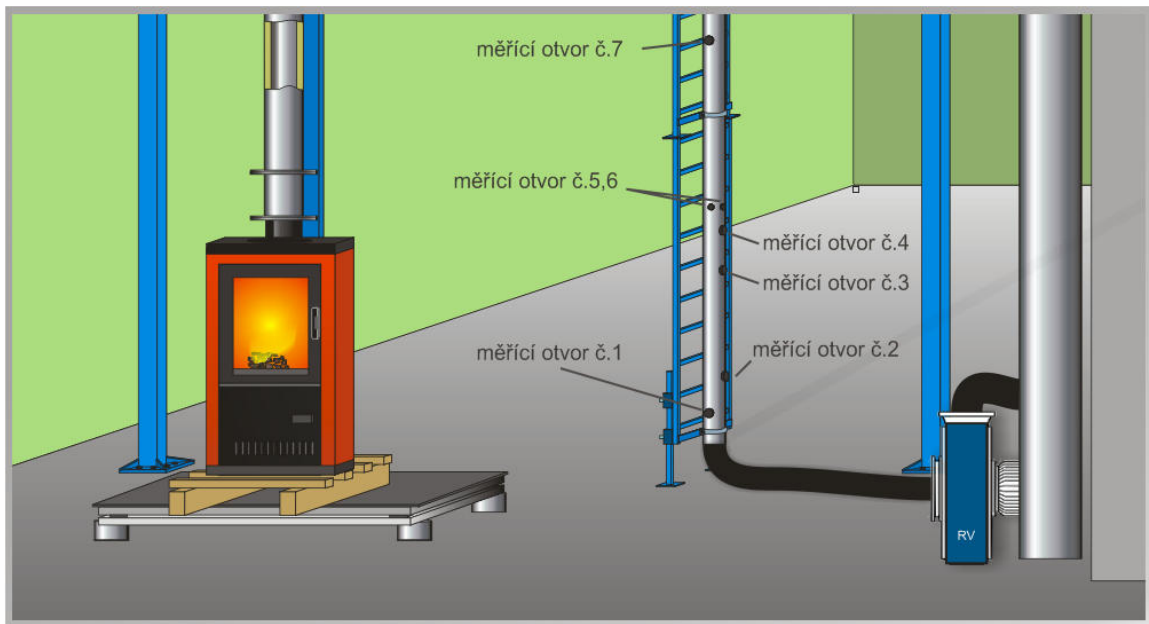
Potrubí ředícího tunelu je provedeno z nerezového plechu tloušťky 1 mm. Vnitřní průměr tunelu je 150 mm. Ředící tunel je připevněn k nosné konstrukci pomocí objímek a šroubů, viz. Obr. 21.



Obr. 21 Uchycení ředícího tunelu pomocí objímek

Rozložení měřících otvorů pro měření je zobrazeno na Obr. 22. Měřící otvory jsou následující:

- **měřící otvor č. 1 M36x3:** možnost umístění kontinuálního měření TZL
- **měřící otvor č. 2 M36x3:** odběr TZL pomocí manuální odběrové aparatury
- **měřící otvor č. 3 M36x3:** analýza spalin O_2 , CO_2 , případně dalších složek
- **měřící otvor č. 4 G3/8":** měření vlhkosti spalin
- **měřící otvor č. 5 G3/8":** měření rychlosti spalin pomocí Prandtlovy sondy
- **měřící otvor č. 6 M36x3:** měření teploty
- **měřící otvor č. 7 M36x3:** přídatná měření



Obr. 22 Rozložení měřících bodů

Přesné požadavky na provedení ředícího tunelu jsou uvedeny v příslušné sestavě KUB785-1 a související výrobní dokumentaci návrhu.

5.2 Stanovení základních provozních parametrů

5.2.1 Určení ředícího poměru [41]

Ředící poměr (Dilution ratio – DR) lze určit z kontinuálního měření koncentrace kyslíku, oxidu uhličitého nebo oxidů dusíku v komínu za kotlem i v ředícím tunelu. Následně z těchto hodnot lze určit DR výpočtem. Výpočet DR ze znalosti koncentrací kyslíku je následující:

$$DR = \frac{20,95 - O_{2K}}{20,95 - O_{2RT}} \approx \frac{\text{prtok naredených spalin}}{\text{prtok před redením}} \quad [1] \quad (5.1)$$

kde

DR	-	dilution ratio – ředící poměr	[1]
O_{2K}	-	objemová koncentrace O_2 za kotlem	[%obj.]
O_{2RT}	-	objemová koncentrace O_2 v ředícím tunelu	[%obj.]

$$\text{Platí:} \quad O_{2K} < O_{2RT} \quad (5.2)$$

Určení vhodného DR vyžaduje hluboké porozumění toho, jaký vliv má ředění na aerosolové částice rozptýlených ve spalinách. Hodnota DR je závislá na typu měřeného

zařízení a charakteru emisí škodlivin při spalování v daném zařízení. Bylo prokázáno, že pokud je nutné zachovat maximální tok tuhých částic v naředěných spalinách, je nutné nastavit ředící poměr pod hodnotu 20. Jestliže je tento poměr vyšší může docházet k tomu, že ne všechny organický materiál ve spalinách zkondenzuje na povrchu existujících částicích, ale naopak dochází k jeho dalšímu odpařování z povrchu částic. Tento jev pak snižuje celkový hmotnostní tok tuhých částic. Na druhou stranu je nutné si uvědomit, že pokud spaliny jsou naředěny nízkých ředícím poměrem, pak aerosolové částice rozptýlené ve spalinách o určitých stavových podmínkách nemusí být v souladu s aerosolovými částicemi za reálných podmínkách po vypuštění spalin do ovzduší z hlediska jejich dopadu na zdraví člověka. Z těchto důvodů je zvolení jednoho vhodného DR složitou záležitostí, závislé na mnoha parametrech a tudíž vyžadující experimentální přístup.

5.2.2 *Určení teploty plynu v měřícím úseku*

Dle literatury [41], abychom docílili odběru co největšího množství polotěkavých organických sloučenin v podobě tuhých částic, měla by se teplota v měřícím místě pohybovat pod hranicí 52 °C.

5.2.3 *Určení provozních parametrů pro návrh kouřového ventilátoru*

Určení provozních parametrů pro návrh kouřovodu vychází z mnoha parametrů, které navzájem spolu souvisí. Proto je nutné si stanovit základní podmínky, ze kterých bude výpočet vycházet. Výpočet provozních parametrů se může lišit v závislosti na druhu spalovaného paliva o rozdílném prvkovém složení (rozdílné množství spalin), výhřevnosti paliva, výkonu kotle, jeho účinnosti, naředění spalin, stavu spalin v ředícím tunelu, průměru potrubí ředícího tunelu a dalších parametrech. Postup výpočtu však zůstává stejný.

Výpočet provádím pro různé výkonové úrovně (10 kW, 20 kW, 50 kW, 100 kW, 200 kW) malých spalovacích zdrojů spalujících černé uhlí o výhřevnosti 28 MJ/kg. Prvkové složení černého uhlí použitého pro výpočet je uvedeno v Tab. 1. Na základě znalosti prvkového složení paliva je vypočteno množství spalin na spálení jednoho kilogramu paliva. Z účinnosti, výhřevnosti paliva a výkonu kotle je určena hodinová spotřeba paliva a z ní dále určeno objemové množství spalin vyprodukované zařazením za hodinu provozu při daném výkonu. Z měření objemové koncentrace kyslíku v komínu za kotlem a v ředícím tunelu je určen ředící poměr a stanoveno množství naředěných spalin a rychlost spalin v ředícím tunelu. S ohledem na maximální reálně dosažitelnou rychlost

v ředícím tunelu (stanovují 20 m/s) je vybrána maximální výkonová úroveň kotle, která může být podrobena testu. Výpočet je proveden za podpory literatury [45].

Hmotnostní podíl složky v palivu	Jedn.	
Uhlík C	1	0,631
Vodík H ₂	1	0,0397
Síra S	1	0,0056
Dusík N	1	0,0106
Kyslík O ₂	1	0,0634
Voda w	1	0,0679
Popelovina A	1	0,1817
Výhřevnost paliva Q _i	MJ/kg	28

Tab. 1 Prvkové složení černého uhlí použitého pro výpočet

Dalšími vstupními parametry jsou:

- O₂ v suchých spalínách v komíně za kotlem O_{2K} = 5 % obj.
- O₂ v suchých spalínách v ředícím tunelu O_{2RT} = 18 % obj.
- součinitel zvětšení objemu vlhkosti vzduchu ν = 1,003
- teplota spalin v ředícím tunelu t_{RT} = 50 °C
- statický tlak spalin v ředícím tunelu p_{RT} = 98,5 kPa
- vnitřní průměr ředícího tunelu d_{RT} = 0,150 m
- účinnost spalovacího zařízení η = 0,75
- výkonové úrovně, viz. Tab. 2, Tab. 3, Tab. 4

Následuje vzorový výpočet pro kotel o výkonu 100 kW.

Teoretická spotřeba kyslíku pro stechiometrické spálení 1 kg paliva

$$V_{O_2,t} = 1,865 \cdot C + 5,553 \cdot H_2 + 0,699 \cdot S - 0,7 \cdot O_2 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.3)$$

$$V_{O_2,t} = 1,865 \cdot 0,6 + 5,553 \cdot 0,0397 + 0,699 \cdot 0,0056 - 0,7 \cdot 0,0634$$

$$V_{O_2,t} = 1,357 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Teoretická spotřeba suchého vzduchu

$$V_{vz,t}^s = \frac{1}{0,21} \cdot V_{O_2,t} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.4)$$

$$V_{vz,t}^s = \frac{1}{0,21} \cdot 1,357 = 6,461 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Teoretická spotřeba vlhkého vzduchu

$$V_{vz,t}^v = \nu \cdot V_{vz,t}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.5)$$

$$V_{vz,t}^v = 1,03 \cdot 6,462 = 6,655 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Množství vzniklých suchých spalin, teoretických

$$V_{sp,t}^s = 1,855 \cdot C + 0,683 \cdot S + 0,796 \cdot N + 0,79 \cdot V_{vz,t}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.6)$$

$$V_{sp,t}^s = 1,855 \cdot 0,631 + 0,683 \cdot 0,0056 + 0,769 \cdot 0,0106 + 0,79 \cdot 6,461$$

$$V_{sp,t}^s = 6,287 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Objem vodní páry

$$V_{H_2O} = 11,1 \cdot H + 1,244 \cdot w + (\nu - 1) \cdot V_{vz,t}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.7)$$

$$V_{H_2O} = 11,1 \cdot 0,0397 + 1,244 \cdot 0,0697 + (1,03 - 1) \cdot 6,461$$

$$V_{H_2O} = 0,719 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Množství vzniklých vlhkých spalin, teoretických

$$V_{sp,t}^v = V_{sp,t}^s + V_{H_2O} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.8)$$

$$V_{sp,t}^v = 6,287 + 0,719$$

$$V_{sp,t}^v = 7,006 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Výpočet přebytku vzduchu z naměřeného kyslíku ve spalinách

$$n = 1 + \frac{V_{sp,t}^s}{V_{vz,t}^s} \cdot \frac{O_{2K}}{20,95 - O_{2K}} \quad [1] \quad (5.9)$$

$$n = 1 + \frac{6,287}{6,461} \cdot \frac{5}{20,95 - 5}$$

$$n = 1,305$$

Množství vzniklých vlhkých spalin

$$V_{sp}^v = V_{sp,t}^v + (n - 1) \cdot V_{vz,t}^v \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.10)$$

$$V_{sp}^v = 7,006 + (1,305 - 1) \cdot 6,655$$

$$V_{sp}^v = 9,036 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Množství vzniklých suchých spalín

$$V_{sp}^s = V_{sp,t}^s + (n-1) \cdot V_{vz,t}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.11)$$

$$V_{sp}^s = 6,287 + (1,305 - 1) \cdot 6,461$$

$$V_{sp}^s = 8,251 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Výpočet průřezu ředícího tunelu

$$S_{RT} = \frac{\pi \cdot d_{RT}^2}{4} \quad [m^2] \quad (5.12)$$

$$S_{RT} = \frac{\pi \cdot 0,15^2}{4}$$

$$S_{RT} = 0,018 m^2$$

Výpočet ředícího poměru DR dle vzorce (5.1)

$$DR = \frac{20,95 - 5}{20,95 - 18} = 5,407$$

Množství naředěných vlhkých spalín po spálení 1 kg paliva lze získat zjednodušeným výpočtem:

$$V_{sp,RT}^v = V_{sp}^v \cdot DR \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.13)$$

$$V_{sp,RT}^v = 9,036 \cdot 5,407$$

$$V_{sp,RT}^v = 48,858 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

Potřebné množství paliva pro dosažení potřebného tepelného výkonu 100 kW

$$m_{pal} = 3,6 \cdot \frac{P}{Q_i \cdot \eta} \quad [kg \cdot h^{-1}] \quad (5.14)$$

$$m_{pal} = 3,6 \cdot \frac{100}{28 \cdot 0,75}$$

$$m_{pal} = 17,143 kg \cdot h^{-1}$$

Průtok naředěných spalín při spálení 17,143 kg paliva za 1 hodinu

$$V_{sp,mpal}^v = V_{sp,RT}^v \cdot m_{pal} \quad [m_N^3 \cdot h^{-1}] \quad (5.15)$$

$$V_{sp,mpal}^v = 48,858 \cdot 17,143 = 837,573 m_N^3 \cdot h^{-1}$$

Průtok naředených spalín – efektivní podmínky

$$V_{sp,mpal,ef}^v = V_{sp,mpal}^v \cdot \frac{p_N}{p_{RT}} \cdot \frac{T_{RT}}{T_N} \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (5.16)$$

$$V_{sp,mpal,ef}^v = 837,573 \cdot \frac{101325}{98500} \cdot \frac{273,15 + 50}{273,15}$$

$$V_{sp,mpal,ef}^v = 1019,230 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Průměrná rychlost spalín v ředícím tunelu pak je:

$$v_{sp} = \frac{V_{sp,mpal,ef}^v}{S_{RT}} \cdot \frac{1}{3600} \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (5.17)$$

$$v_{sp} = \frac{1019,230}{0,018} \cdot \frac{1}{3600}$$

$$v_{sp} = 16,02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

V následující tabulce je výpočet proveden pro další výkonové úrovně:

Jmenovitý výkon kotle	kW	10	20	50	70	100	200
Účinnost kotle	1	0,75					
Spotřeba paliva	kg·h ⁻¹	1,71	3,43	8,57	12,00	17,14	34,29
Množství naředených spalín	m _N ³ ·h ⁻¹	83,751	167,502	418,756	586,258	837,512	1675,023
Množství naředených - efektivní	m ³ ·h ⁻¹	101,92	203,85	509,62	713,46	1019,23	2038,47
Průměrná rychlost spalín v potrubí	m·s ⁻¹	1,60	3,20	8,01	11,21	16,02	32,04

Tab. 2 Průtok naředených spalín při různých výkonových úrovních – DR = 5,4

Další tabulka ukazuje změnu hodnot při změně ředícího poměru (O_{2RT}=18,5 % obj.) a při zachování ostatních vstupních parametrů ze zadání:

Jmenovitý výkon kotle	kW	10	20	50	70	100	200
Účinnost kotle	1	0,75					
Spotřeba paliva	kg·h ⁻¹	1,71	3,43	8,57	12,00	17,14	34,29
Množství naředených spalín	m _N ³ ·h ⁻¹	100,843	201,686	504,216	705,903	1008,432	2016,865
Množství naředených spalín - efektivní	m ³ ·h ⁻¹	122,72	245,45	613,62	859,07	1227,24	2454,48
Průměrná rychlost spalín v potrubí	m·s ⁻¹	1,93	3,86	9,65	13,50	19,29	38,58

Tab. 3 Průtok naředených spalín při různých výkonových úrovních – DR = 6,5

Jmenovitý výkon kotle	kW	10	20	50	70	100	200
Účinnost kotle	1	0,85					
Spotřeba paliva	kg·h ⁻¹	1,51	3,03	7,56	10,59	15,13	30,25
Množství naředěných spalin	m _N ³ ·h ⁻¹	73,898	147,796	369,490	517,287	738,981	1477,962
Množství naředěných spalin - efektivní	m ³ ·h ⁻¹	89,93	179,86	449,66	629,53	899,32	1798,65
Průměrná rychlost spalin v potrubí	m·s ⁻¹	1,41	2,83	7,07	9,90	14,14	28,27

Tab. 4 Průtok naředěných spalin při různých výkonových úrovních – DR = 5,4, změna účinnosti zařízení

Z předchozího je zřejmé, že díky množství vstupních parametrů, se můžou hodnoty při výpočtech značně měnit a změna jedné vstupní veličiny (např. účinnost spalovacího zařízení) způsobí výraznou změnu dalších veličin, např. průtok naředěných spalin (viz. Tab. 4). Je nutné vzít i v úvahu, že ředící poměr je potřeba nastavit tak, aby byla dosažená požadovaná teplota spalin v ředícím tunelu. Celkový proces proto vyžaduje optimalizaci jednotlivých veličin vstupujících do výpočtu.

Na základě předchozích výpočtů navrhuji, aby kouřový ventilátor byl zvolen pro následující maximální hodnoty:

- $V_{sp,mpal}^v = 1000 \text{ m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}$ - maximální objemový průtok spalin v ŘT
- $v_{sp} = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ - maximální rychlost v ředícím tunelu

Ředící tunel pak bude vhodný pro měření malých spalovacích zařízení o výkonu do 100 kW (při optimalizaci vstupních parametrů i více).

6 Návrh odběrové aparatury

6.1 Úvod

Navržená sestava odběrové aparatury je zobrazena na Obr. 23. Využívá gravimetrické metody stanovení koncentrace prachu ve spalínách. Sestava vyhovuje normě [3] a současně normě [4]. Základními součástmi této navržené odběrové aparatury jsou:

- hubice sondy
- nosná trubka sondy tvořící s hubicí jako celek odběrovou sondu
- vytápěná sestava filtru – odlučovač tuhých částic včetně regulovaného vyhřívání
- spojovací pryžové hadice
- kondenzátor s cirkulačním ochlazovačem
- systém kontinuálního měření vlhkosti
- systém měření rychlosti spalin v ředícím tunelu
- systém pro měření objemu odebraného vzorku
- systém pro řízení odběru vzorku pro dosažení isokinetických podmínek
- PC včetně modulu záznamu dat
- sada tlakoměrů
- čerpadlo vzorku
- přídatné zařízení (např. váha, Petriho misky a pod.)

Proto, aby byly výsledky měření uznány jako platné, je třeba dosáhnout následujícího [4]:

- proud plynu v potrubí místě odběru vzorku má dostatečně rovnoměrný a ustálený rychlostní profil
- odběr vzorku probíhá bez poruch proudění plynu pomocí ostrohranné hubice vystavené proudu plynu za izokinetických podmínek odběru vzorku
- vzorkovací trať je sestavena a používaná tak, aby se předešlo kondenzaci vodní páry, vzniku chemických reakcí, aby se omezilo usazování prachu na

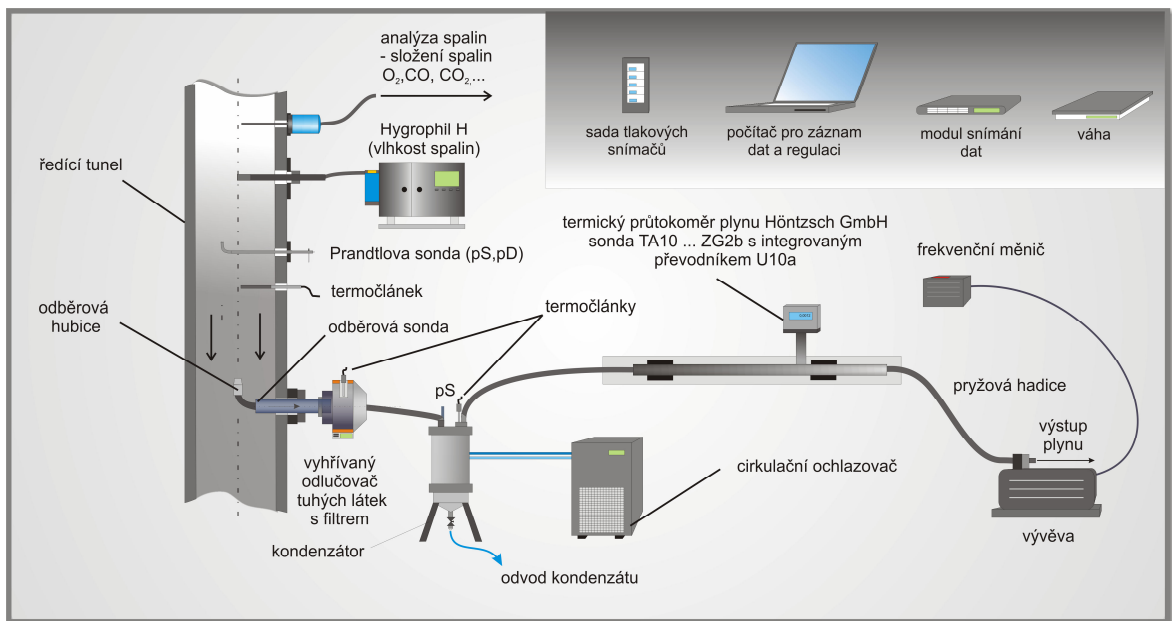
těchto částech vzorkovací tratě, které předcházejí filtru, a aby trať byla plynotěsná

- prach usazený na těchto částech vzorkovací tratě, které předchází filtru, je zahrnut do výpočtu

Při návrhu bylo vybíráno ze dvou variant odběrové aparatury:

- měřící trať bez odstranění vody před plynoměrem
- měřící trať s odstraněním vody před plynoměrem

Byl zvolen návrh odběrové aparatury, kde je odstraněna vlhkost před plynoměrem a podle toho je i přizpůsoben výpočet koncentrace prachu ve spalinách.



Obr. 23 Navržená odběrová aparatura

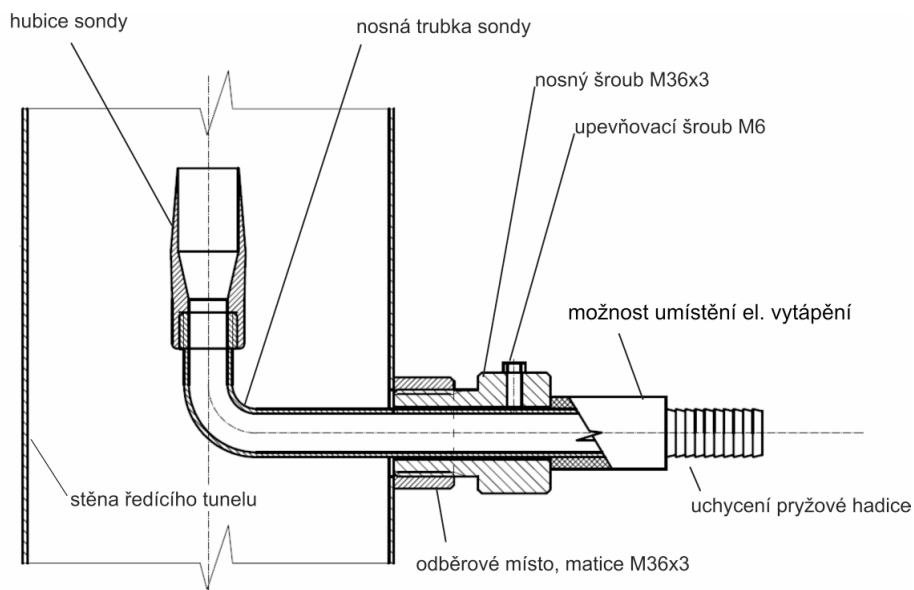
6.2 Odběrová sonda

Odběrovou sondu navrhují podle požadavků norem [3] a [4]. Odběrová sonda se skládá z odběrové hubice a nosné trubky sondy. Je předpoklad, že vzorek spalin bude odebírán z ředícího tunelu kruhového průřezu o průměru 150 mm a jeho plocha bude tedy menší jak $0,1 \text{ m}^2$ (průměr potrubí je menší jak 0,35 m) a tomuto vyhovuje dle uvedených norem jeden vzorkovací bod. Z tohoto důvodu může být odběrová sonda z konstrukčního hlediska zjednodušena. Podstatné je především zkrácení nosné trubky sondy, která je během měření ustavena v odběrovém místě napevno a nedochází jejímu posouvání (Obr. 24). Díky zkrácení délky nosné části sondy je možné vyloučit použití vyhřívání této části,

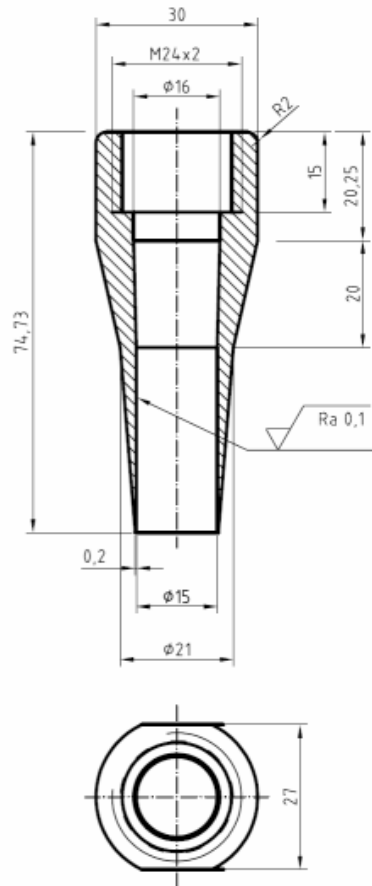
protože by zde nemělo docházet ke kondenzaci par, a ohřev části trati před filtrem je realizován pomocí vyhřívaného zachycovače tuhých částic s filtrem. Na konci nosné trubky v případě nutnosti lze navíc umístit vytápění pomocí topných pásků [46]. Dále je zde na konci provedeno vroubkování pro uchycení pryžové hadice. Hadice trati je uchycena pomocí kovových objímek mezi odběrovou sondou a zachycovačem tuhých částic. Sonda je k měřicímu otvoru přišroubována pomocí nosného šroubu M36x3 k matici odběrového místa a zajištěna šroubem M6.

Hubice sondy je navržena podle požadavků gravimetrických norem. Ústí hubice je ostré natolik, aby bylo co nejméně narušeno proudění spalin. Tloušťka ústí hubice je 0,2 mm. Byla snaha navrhnout sondu tak, aby byly vnitřní změny průměrů plynulé. Dále, aby nebyly konstrukčním řešením vytvořené překážky jakéhokoliv tvaru, kde by mohlo docházet k usazování prachových částic během vzorkování. Vnitřní části sondy jsou hladce obrobena s drsností $Ra = 0.1$, aby nedocházelo na vnitřním povrchu k usazování částic.

Výrobní dokumentace odběrové sondy jsou přiloženy k diplomové práci (sestava KUB785-2). Pro dosažení izokinetického odběru musí být připravena pro měření sada hubic o různých vnitřních průměrech. Norma [4] zakazuje použití hubic s vnitřním průměrem menších jak 6 mm. Je doporučováno použití hubic s vnitřním průměrem více jak 8 mm. V přiložené výkresové dokumentaci navržené sondy jsou hubice o průměru 10, 15, 18, 20 a 25 mm včetně jejich výrobních výkresů a z jejich provedení je zřejmé, jak by vypadaly další hubice v rozsahu např. 6 až 30 mm, kde vnitřní průměr je odstupňován s krokem např. 1 mm. Hubice o vnitřním průměru 15 mm je na Obr. 25. Pro zjednodušení jsou vytvořeny výrobní výkresy pouze těchto pěti hubic s různými vnitřními průměry.



Obr. 24 Umístění odběrové sondy v potrubí ředícího tunelu



Obr. 25 Odběrová hubice Ø15

6.3 Sestava filtru (odlučovač tuhých částic)

Sestava filtru (nebo také odlučovač tuhých částic) slouží jako nosič filtru z křemenných vláken průměru 110 mm. Odlučovač musí být vytápěn a to tak, aby nedocházelo ke kondenzaci par obsažených ve spalinách. Teplota v odlučovači musí být regulovatelná pomocí regulátoru teploty [4]. Součástí odlučovače je termočlánek, který poskytuje informaci o teplotě pro regulátor. Uvedení přesného provedení a konkrétního konstrukčního řešení je mimo rámec této práce.

6.4 Odstranění vlhkosti ze vzorku před měřidlem proleklého množství plynu

K odstranění vlhkosti navrhuji použít kondenzátor, který umožňuje dosažení zbytkové vlhkosti menší než 10 g vody na metr krychlový při maximálním průtoku plynu [4]. Takto vysušený vzorek, který je za kondenzátorem, je uvažován dle normy jako suchý plyn a podle toho je přizpůsoben výpočet koncentrace prachu. Cirkulace chladicí vody je zajištěna ochlazovačem s uzavřenou cirkulací chladicí vody, např. ochlazovač společnosti Medingen, informace o něm jsou dostupné na stránkách [47]. Kondenzátor je opatřen

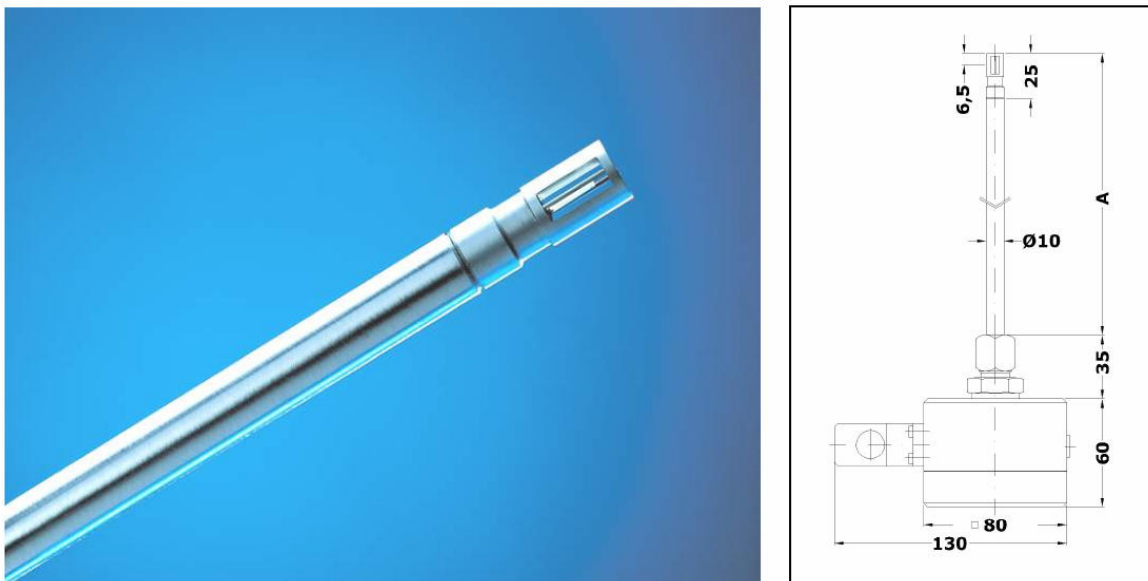
měřením statického tlaku (podtlaku v kondenzátoru) a měřením teploty vzorku po vychlazení.

6.5 Systém měření průtoku plynu

Systém měření průtoku plynu procházející přes odběrovou trasu patří mezi základní prvky aparatury. Pro měření množství proteklého vzorku navrhuji termický průtokoměr se sondou TA10... ZG2b s integrovaným převodníkem U10a společnosti Höntzsch. Jedná se o průtokoměr, kde měření průtoku plynu je založeno na principu přenosu tepla mezi plynem a vyhřívaným tělískem umístěným v tomto plynu. Snímač se skládá z citlivého termického snímače vyrobeného technologií tenkých vrstev (Obr. 26). Měřicí část obsahuje elektricky vyhřívané niklové odporové tělísko a niklový teplotní snímač. Vyhodnocení rychlosti plynu probíhá z teplotního rozdílu mezi teplotou plynu a teplotou vyhřívaného niklového tělíska [48]. Výhodou tohoto přístroje spočívá v jeho širokém rozsahu měření (měření rychlostí od 0,2 m/s až 200 m/s). Dále mezi výhody patří nízké nejistoty měření i při malých průtocích vzorku a možnost měření v širokém rozmezí teplot a tlaků. Je potřeba poznamenat, že samozřejmostí u tohoto druhu průtokoměru je nutnost provedení jeho kalibrace. Základní technické parametry průtokoměry jsou uvedeny v Tab. 5.

Termický průtokoměr měří následující veličiny:

- standardní rychlost N_v
- standardní objemový průtok N_V
- a celkový proteklý standardní objem vzorku



Obr. 26 Termická sonda TA10 [48]

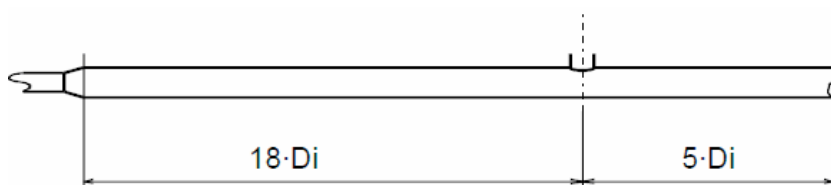
Standardní podmínky u přístrojů Höntzsch je teplota $t_s=21\text{ °C}$ a tlak $p_s=1014\text{ hPa}$. Přepočítání na normální podmínky ($t_n=0\text{ °C}$ a tlak $p_n=101,325\text{ Pa}$) používaných u nás lze jednoduše provést pomocí stavové rovnice plynu. Přístroj umožňuje programování přes rozhraní RS232 po připojení s PC díky přiloženému softwaru. K přístroji je připojen převodník U10a s LCD displejem, který zobrazuje ve dvou řádkách standardní objemový průtok v m^3/h a celkový standardní objem proteklého vzorku plynu.

Výrobce uvádí, že přístroj je odolný vůči plynu znečištěným prachovými částicemi, což je důležitý poznatek s ohledem na možnost protržení filtru. Sondu může poškodit trvalejší vystavení toku prachových částic, které by působily abrazií na povrch sondy.

Vnitřní průměr měřicího potrubí D_i	25 mm
Měřicí rozsah standardního průtoku (0,2 až 60 m/s)	0,26 – 77 m_s^3/h
Chyba měření	při rychlostech do 40 m/s je chyba $\pm 2\% + 0.02\text{ m/s}$ z měřené hodnoty, jinak 2,5 %
Rozsah teplot vzorku	-10 až +140 °C
Rozsah okolní teploty (pro přístroj s LCD displejem)	-5 až +50 °C
Max. pracovní přetlak	1,6 MPa
Analogový výstup	4 ... 20 mA
PC rozhraní	RS232
Vnitřní průměr měřicího potrubí	25 mm
Měřicí rozsah standardního průtoku (0,2 až 60 m/s)	0,26 – 77 m_s^3/h
Zdroj napájení	24 V DC +/- 5 %
LCD převodníku U10a	podsvětlený, 2 x 16 digit., řádek 1 – průtok plynu řádek 2 – objem vzorku celkem

Tab. 5 Technické parametry průtokoměru TA10... ZG2b s integrovaným převodníkem U10a [48]

Měřicí sondu je nutné uložit do potrubí, které zajistí ustálení proudu plynu. Výrobce ve svém návodu určuje rozměry takového potrubí. Jestliže rozměr D_i je 25 mm, tak část potrubí před měřicím místem musí být dlouhá minimálně 450 mm a za tímto místem 125 mm.



Obr. 27 Rozměry měřicího potrubí pro ustálení proudu [48]

6.6 Čerpadlo vzorku

Gravimetrické normy určují, že čerpadlo plynu musí být plynotěsné (pokud je použit plynoměr za sacím čerpadlem), korozivzdorné a musí být schopno dosáhnout maximálního vypočteného průtoku za podmínek odběru vzorku [4]. Tlak na sací straně čerpadla vlivem tlakové ztráty postupným zanášením filtru částicemi a tlakové ztráty měřící trasy může dosáhnout hodnot až 50 kPa_{abs}.

Výkon vývěvy je u navržené aparatury řízen frekvenčním měničem. Pro tyto účely se běžně používají lamelové vývěvy bez olejového mazání. Vývěvu tvoří stator, kde se otáčí excentricky položený válec s lamelami, které se volně posouvají v drážkách vlivem odstředivé síly. Posuvem lamel je docíleno plynule se měnícího pracovního prostoru. Na jedné straně dochází k nasávání plynu a na straně druhé k jeho kompresi a výtlačku.

Kvalitní lamelové vývěvy vzduchem chlazené vyrábí firma Becker Pumps Corp.. Pro účely navrhované aparatury vybírám vývěvu z jejich nabídky (Obr. 28). Firma Becker dodává na trh lamelové vývěvy chlazené vzduchem v typových řadách VT 4.10/4.16/4.25/4.40 lišící se vzájemně od sebe různým sacím výkonem.



Obr. 28 Lamelová bezmazná vývěva Becker VT4.XX [49]

6.6.1 Volba typu vývěvy

Vychází ze znalosti maximálního průtoku skrze odběrovou trasu. Maximální průtok závisí na více vstupujících veličin, tj. rychlost spalin v potrubí, teplotě a statickém tlaku spalin v měřícím úseku a také na zvolené velikosti průměru odběrové hubice. Dále je nutné vzít v úvahu předpokládané koncentrace tuhých látek. Pro izokinetický odběr vzorku plynu platí, že rychlost proudění plynu v potrubí se rovná rychlosti proudění plynu v ústí odběrové hubice, tedy

$$v' = v_s' \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (6.1)$$

kde

v'	-	rychlost plynu v potrubí	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
v_s'	-	rychlost plynu v ústí odběrové hubice	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

Efektivní průtok vzorku spalín za podmínek v potrubí q_{vg} přes odběrovou hubici je dán vztahem:

$$q_{vg} = v_s' \cdot a \cdot 3600 = v_s' \cdot \frac{\pi \cdot \left(\frac{d_s}{1000}\right)^2}{4} \cdot 3600 \quad [\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (6.2)$$

kde

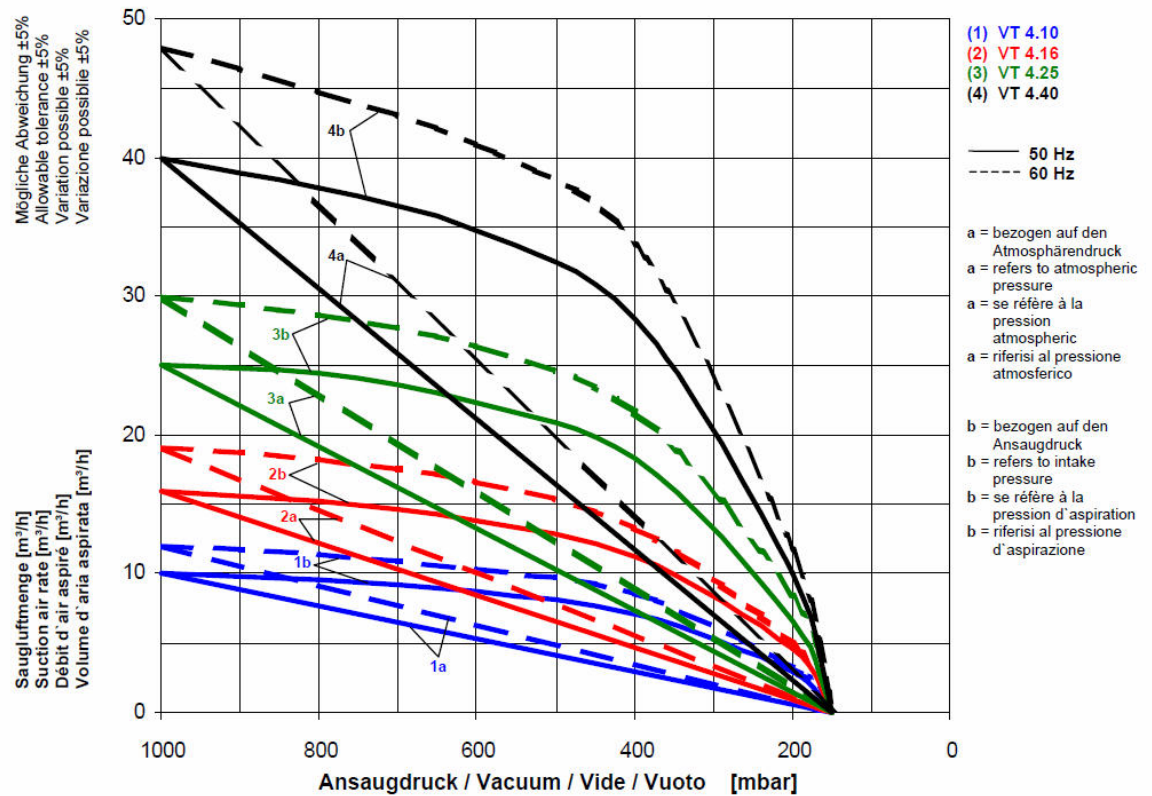
a	-	efektivní plocha ústí hubice sondy	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
d_s	-	vnitřní průměr hubice	$[\text{mm}]$

V případě, že maximální návrhová rychlost plynu v ředícím tunelu je například 8 m/s a použitá sonda má vnitřní průměr odběrové hubice $d_s = 18$ mm, pak efektivní průtok v ústí odběrové hubice musí být

$$q_{vg} = 8 \cdot \frac{\pi \cdot \left(\frac{18}{1000}\right)^2}{4} \cdot 3600 = 7,329 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Při splnění požadavku na těsnost trasy odběrové aparatury lze říci, že tento průtok je shodný s průtokem na sací straně vývěvy (po přepočtu na jednotný stav plynu). Jinými slovy, tento průtok musí být vývěva schopna prosát při daných podmínkách plynu. Ve skutečnosti však tento průtok bude o něco menší vlivem odstranění vlhkosti ze vzorku. S ohledem na přibližný výpočet za účelem návrhu vývěvy lze použít tento zjednodušený postup.

Výrobce ve své technické dokumentaci uvádí diagram podle něhož lze vybrat vhodný typ, viz. Obr. 29. Na ose x jsou hodnoty podtlaku (až 150 mbar_{abs}) a osa y představuje objemový průtok plynu v metrech krychlových za hodinu. Barevně jsou vyznačeny jednotlivé typy. Čárkovaná čára představuje výkon vývěvy při frekvenci 60 Hz a plná čára výkon při 50 Hz. Dále je zde označení křivek a , b podle toho k jakému stavu plynu je průtok vztažen. Křivky s označením a jsou vztaženy k atmosférickému tlaku (1000 mbar = 100 kPa) a křivky s označením b jsou vztaženy k tlaku na sací straně vývěvy. Křivky jsou zpracovány pro teplotu plynu 20 °C.



Obr. 29 Diagram pro volbu vhodného typu vývěvy Becker řady VT4 [49]

Přepočet objemového průtoku q_{Vg} na podmínky charakteristiky a je podle stavové rovnice plynu a je následující:

$$q'_{Vg} = q_{Vg} \frac{(p_{amb} + p_s) \cdot T_a}{p_a \cdot T_s} \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (6.3)$$

kde

p_s	-	podtlak plynu v měřicím místě ředícího tunelu	[Pa]
p_a	-	referenční tlak charakteristiky a	[Pa]
p_{amb}	-	tlak okolí	[Pa]
T_s	-	termodynamická teplota vzorku v měřicím místě	[K]
T_a	-	termodynamická teplota charakteristiky a	[K]

Díky tomu, že hodnota podtlaku p_s v ředícím tunelu je nízká a tlaky p_a a p_{amb} jsou si skoro rovny, lze poměr tlaků při zjednodušeném výpočtu návrhu vývěvy zanedbat a vztah se zjednoduší na:

$$q'_{Vg} = q_{Vg} \cdot \frac{T_a}{T_s} \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (6.4)$$

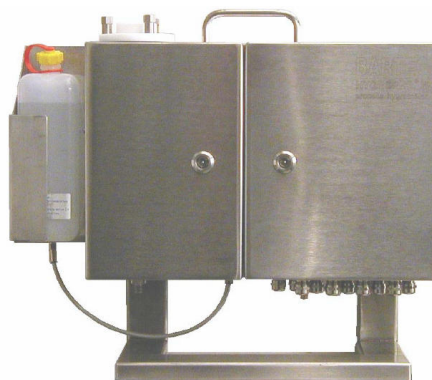
Při předpokladu teploty spalin v měřicím místě ředícího tunelu bude 50 °C pak dle vzorce (6.4) se spočítá q'_{vg} :

$$q'_{vg} = 7,329 \cdot \frac{273,15 + 20}{273,15 + 50} = 6,649 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Tohoto průtoku musí vývěva dosáhnout při tlaku na sací straně 50 kPa. Z těchto poznatků a podle grafu navrhuji vývěvu Becker VT 4.16. Podrobnější technické parametry tohoto přístroje jsou dostupné na stránkách výrobce [49].

6.7 Měření vlhkosti spalin v ředícím tunelu

Vlhkost je měřena kontinuálně přímo v potrubí v objemových jednotkách. Výhodou je online měření vlhkostí a tím možnost počítat s vlhkostí spalin pro výpočet hustoty vlhkého plynu pro nastavení izokinetického vzorkování. Další výhodou je, že není za potřebí zjišťovat hodnoty vlhkosti pomocí kondenzační metody, ale je možné přímo využít údaje z kontinuálního měření vlhkosti. Kontinuální měření vlhkosti spalin patří mezi problematické měření a v podstatě pro tyto účely je k dispozici na trhu pouze jeden přístroj. Navrhuji pro tyto účely přiřadit k odběrové aparatuře přístroj s obchodním názvem Hygrophil H4230 společnosti Bartec/Benke. Po písemné konzultace s panem Ing. Viktorem Tekáčem, PhD. z ústavu plynárenství, koksochemie a ochrany ovzduší VŠCHT v Praze, který má dlouholeté zkušenosti s měřením vlhkosti, byl tento přístroj doporučen jako vhodný pro umístění do ředícího tunelu za účelem měření vlhkosti spalin. Výhodou procesního vlhkoměru Hygrophil H4230 je vysoká odolnost vůči korozi a znečištění. Vzhledem k využití standardní měřicí psychrometrické metodě vykazuje vysokou přesnost stanovení objemového podílu vodních par ve spalinách a je možné jeho použití i jako referenčního přístroje [50]. Měřicí skříň přístroje Hygrophil H je na Obr. 30 a jeho technické údaje jsou uvedeny v Tab. 6.



Obr. 30 Hygrophil H4230 [50]

Technické údaje			
Měření vlhkosti			
Měřicí princip	Psychrometrické měření vlhkosti plynů metodou náporového paprsku (patentováno)		
Měřicí čidla	Pt 100/ 4-vodič podle DIN IEC 751		
Přesnost výpočtu	≤ 0,01%		
Doba výpočtu	ca. 2s		
Doba ustálení	t ₉₀ = 90s (při SH-skok z 10 na 190 g/kg)		
Průtok plynu/vzduchu	max. 14 NI/min		
Přívod vody	max. 25 ml/h (peristaltické čerpadlo)		
Zásobník na vodu	2l (postačí po dobu cca 3 dnů)		
Přívod stlačeného vzduchu	1...5 bar (spotřeba vzduchu max 4000 NI/hod)		
Měřené veličiny			
Měřená veličina	Měřicí rozsah	Rozlišení	Druh
Suchá teplota TT	0...150 °C	0,1 °C	Primárně
Vlhká teplota HT	0...150 °C	0,1 °C	
Teplota T1	0...200 °C		
Absolutní tlak SP	500...1500 hPa	1 hPa	Výpočet
Rosný bod DT	0...100 °C	0,1 °C	
Objem. podíl H ₂ O VOL%	0...100 %	0,1 %	
Měrná vlhkost MH	10...1000 g/kg	1 g/kg	
Specifická vlhkost SH	10...1000 g/kg	1 g/kg	
Entalpie h	10...1000 kJ/kg	1 kJ/kg	
Aktuální tlak vod. Par VP	10...1000 hPa	1 hPa	
Deficit nasycení DVP	0...1000 hPa	1 hPa	
Výstupy signálů			
Analogový výstup	2 galvanicky oddělené výstupní kanály, ke každému lze přiřadit měřicí rozsah, signalizace poruchy funkce, programovatelný		
Výstupní signál	0...20 mA nebo 4...20 mA programovatelný, lineární		
Příp. zástrčka	≤ 500 Ω		
Přesnost	≤ 0,1 % z aktuální měřené hodnoty		
Rozhraní pro přenos dat			
Feldbus (RS485)	Profibus DB		
Elektro data			
Napájení	Měřicí přístroj: AC 90 – 264 V 48...62 Hz, ca 30 VA Topná hadice AC 230 V (115 V), ca. 100 VA/m		
Podmínky okolí			
Příp. pracovní teplota	+5...+50 °C		
Jmenovité podmínky	23°C ±2 °C / 220V ± 2%		
Příp.skladovací teplota	-20...+70 °C (bez vody)		
Třída klimatu	KWF nach DIN 40040		
Mechanické údaje			
Pouzdro	Pouzdro z nerezové oceli; stupeň izolace IP64 podle DIN 40050		
Rozměry	455×437×185 mm (bez úchyty)		
Vrtání pro montáž na stěnu	4× M4, 230 × 30 mm		
Hmotnost	ca. 12,5 kg		
Připojení			
Elektrické připojení	Šroubovací svorky 0,5-1,5mm ² ; Kabelové průchodky M 16x1,5		
Připojení stlačeného vzduchu	G 1/4"		
Připojení otápěné hadice	G 3/8" (IP54), univerzální těsnící kužel DKR DIN 3863		

Tab. 6 Technické parametry Hygrophil H4230 [50]

6.8 Ostatní přístroje a součásti odběrové aparatury

V předchozích kapitolách byly podrobněji popsány základní prvky odběrové aparatury. Mezi další důležité prvky aparatury patří Prandtlova sonda pro měření rychlosti spalin v potrubí, s tím souvisí umístění tlakoměrů pro měření statického a diferenčního tlaku na sondě. Atmosférický tlak během měření je měřen barometrem. Další tlakoměr bude je umístěn v kondenzátoru pro měření tlaku spalin v tomto místě, není nezbytný, ale jeho použití zde je doporučeno pro kontrolu podtlaku v odběrové trase. Měření teploty je

v odběrovém místě v ředícím tunelu a další je umístěn na výstupu plynu z kondezátoru odběrové trasy.

Během měření je nutno sledovat koncentrace kyslíku a oxidu uhličitého pro výpočet hustoty suchého plynu. Spojením výsledků vlhkosti spalin z přístroje Hygrophil H je možné přímo vypočítat hustotu vlhkého vzduchu pro přesné nastavování izokinetických podmínek odběru a pro konečné vyhodnocení.

Frekvenční měnič nastavováním frekvence plynule mění výkon vývěvy podle potřeby izokinetického vzorkování. Pro zpracování dat a regulaci izokinetiky je k dispozici modul snímání dat z přístrojů v kombinaci s PC a softwaru, který je speciálně naprogramovaný pro tyto účely.

Mezi odběrovou aparaturu lze zařadit i další doplňkové příslušenství jako je váha, Petriho misky, exsikator a další příslušenství podrobně popsáno v literatuře [3] a [4].

6.9 Výpočet koncentrace TZL dle navržené aparatury

Dále je přiložen výpočet koncentrace tuhých znečišťujících látek dle výše navržené aparatury. Výpočet je zpracován v MS Excel a skládá se z části, kde se vkládají vstupní data z jednotlivých přístrojů včetně hodnot charakterizující měření a z části, kde je následně z těchto hodnot proveden výpočet. Pro příklad zde uvádím výpočet s konkrétními hodnotami. Označení veličin je totožné s normou [3] a může se mírně odlišovat od označení uvedeného v kapitole 5, kde je označení provedeno podle jiné literatury.

6.9.1 Vstupní data

Základní údaje o měření

Datum měření	1.1.2011
Označení měření	1-1
Filtr č.	75
Průměr filtru	110 mm
Čas počátku měření	12:28:00
Čas konce měření	13:08:00
Délka doby odběru	$t = 2400,00$ s (dopočteno z předchozích)
Průměr měřicího profilu	$d_{RT} = 150,00$ mm

Prandtlova sonda v potrubí

Statický tlak (podtlak) na sondě	$p_e = -27$ Pa
Diferenční tlak na sondě	$\Delta p_{Pt} = 11,9$ Pa

$$\text{Teplota spalin v potrubí } t_{RT} = 96,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Odebraný objem (suchý, normální) - data z průtokoměru

Objem na začátku	$V_{\text{počáteční}} = 750,261 \text{ m}_N^3$
Objem na konci	$V_{\text{konečný}} = 755,504 \text{ m}_N^3$
Odebraný objem	$V_{g,N} = 5,243 \text{ m}_N^3$ (rozdíl $V_{\text{konečný}} - V_{\text{počáteční}}$)

Pozn. Objemy jsou po přepočtu na normální podmínky (teplota 273,15 °C a tlak 101325 Pa).

Objemový zlomek plynných složek suchých spalin

Kyslík	$\varphi (\text{O}_2) = 18,3 \%$
Oxid uhličitý	$\varphi (\text{CO}_2) = 2,5 \%$
Dusík	$\varphi (\text{N}_2) = 79,2 \%$ (dopočteno do 100%)

Vlhkost spalin - průměrná hodnota po čas měření z přístroje Hygrophil H

Vodní pára	$\varphi' (\text{H}_2\text{O}) = 4,600 \%$
-------------------	--

Hmotnost filtru- zjištěno vážením

Hmotnost filtru před	$m_{\text{před}} = 1,1229 \text{ g}$
Hmotnost filtru po	$m_{\text{po}} = 1,4131 \text{ g}$
Hmotnost prachu ostatní (oplach)	$m_{\text{oplach}} = 0,0000 \text{ g}$
Navážka celkem	$m = (m_{\text{po}} - m_{\text{před}}) + m_{\text{oplach}} = 0,2902 \text{ g}$ $m = 290,2 \text{ mg}$

Použité konstanty

Atmosférický tlak	$p_{\text{amb}} = 99522 \text{ Pa}$
Termodynamická normální teplota	$T_N = 273,15 \text{ K}$
Normální tlak	$p_N = 101325 \text{ Pa}$
Hustota O₂ (plynný stav)	$\rho_N^* (\text{O}_2) = 1,4290 \text{ kg} \cdot \text{m}_N^{-3}$
Hustota CO₂ (plynný stav)	$\rho_N^* (\text{CO}_2) = 1,9769 \text{ kg} \cdot \text{m}_N^{-3}$
Hustota N₂ (plynný stav)	$\rho_N^* (\text{N}_2) = 1,2505 \text{ kg} \cdot \text{m}_N^{-3}$
Hustota H₂O (plynný stav)	$\rho_N^* (\text{H}_2\text{O}) = 0,8043 \text{ kg} \cdot \text{m}_N^{-3}$
Vnitřní průměr hubice	$d_s = 20,00 \text{ mm}$
Kalibrační faktor Prandtlovy sondy	$K_{Pt} = 0,998$

6.9.2 Výpočet

Objemové zlomky plynných složek ve vlhkých spalínách

$$\text{Kyslík: } \varphi'(O_2) = \varphi(O_2) \cdot \frac{100 - \varphi'(H_2O)}{100} = 18,3 \cdot \frac{100 - 4,6}{100} = 17,5 \%$$

$$\text{Oxid uhličitý: } \varphi'(CO_2) = \varphi(CO_2) \cdot \frac{100 - \varphi'(H_2O)}{100} = 2,5 \cdot \frac{100 - 4,6}{100} = 2,4 \%$$

$$\text{Dusík: } \varphi'(N_2) = \varphi(N_2) \cdot \frac{100 - \varphi'(H_2O)}{100} = 79,2 \cdot \frac{100 - 4,6}{100} = 75,5 \%$$

Hustota suchého plynu za normálních podmínek:

$$\rho_N = \frac{1}{100} [\varphi(O_2) \cdot \rho_N^*(O_2) + \varphi(CO_2) \cdot \rho_N^*(CO_2) + \varphi(N_2) \cdot \rho_N^*(N_2)] \quad [\text{kg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$$

$$\rho_N = \frac{1}{100} (18,3 \cdot 1,4290 + 2,5 \cdot 1,9769 + 79,2 \cdot 1,2505)$$

$$\rho_N = 1,301 \text{ kg} \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Hustota vlhkého plynu za normálních podmínek: $[\text{kg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$

$$\rho'_N = \frac{1}{100} [\varphi'(O_2) \cdot \rho_N^*(O_2) + \varphi'(CO_2) \cdot \rho_N^*(CO_2) + \varphi'(N_2) \cdot \rho_N^*(N_2) + \varphi'(H_2O) \cdot \rho_N^*(H_2O)]$$

$$\rho'_N = \frac{1}{100} (17,5 \cdot 1,4290 + 2,4 \cdot 1,9769 + 75,5 \cdot 1,2505 + 4,6 \cdot 0,8043)$$

$$\rho'_N = 1,280 \text{ kg} \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Hustota suchého plynu v reálných podmínkách:

$$\rho = \rho_N \cdot \frac{T_N}{p_N} \cdot \frac{p}{T} = \rho_N \cdot \frac{T_N}{p_N} \cdot \frac{p_{\text{amb}} + p_e}{T_N + t_{RT}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$\rho = 1,301 \cdot \frac{273,15}{101325} \cdot \frac{99522 - 27}{273,15 + 96}$$

$$\rho = 0,946 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Hustota vlhkého plynu v reálných podmínkách:

$$\rho' = \rho'_N \cdot \frac{T_N}{p_N} \cdot \frac{p}{T} = \rho'_N \cdot \frac{T_N}{p_N} \cdot \frac{p_{\text{amb}} + p_e}{T_N + t_{RT}} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$\rho' = 1,280 \cdot \frac{273,15}{101325} \cdot \frac{99522 - 27}{273,15 + 96}$$

$$\rho' = 0,930 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Rychlost spalín ve vzorkovacím bodě:

$$v' = K_{pt} \sqrt{\frac{2}{\rho'}} \cdot \sqrt{\Delta p_{pt}} \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$v' = 0,998 \sqrt{\frac{2}{0,930}} \cdot \sqrt{11,9}$$

$$v' = 5,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Efektivní plocha ústí hubice

$$a = \frac{\pi \cdot d_s^2}{4} \quad [\text{m}^2]$$

$$a = \frac{\pi \cdot 0,02^2}{4}$$

$$a = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Odebraný objem dle průtokoměru (přepočteno na reálné podmínky spalín v potrubí):

$$V_g = V_{g,N} \cdot \frac{T_N + t_{RT}}{p_{amb} + p_e} \cdot \frac{p_N}{T_N} \quad [\text{m}^3]$$

$$V_g = 5,243 \cdot \frac{273,15 + 96}{99522 - 27} \cdot \frac{101325}{273,15}$$

$$V_g = 7,216 \text{ m}^3$$

Průtok vlhkých spalín ředícím tunelem:

$$\dot{V}'_{sp} = v' \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 5,05 \cdot \frac{\pi \cdot 0,15^2}{4} = 0,089 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 0,089 \cdot 3600 = 321 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\dot{V}'_{sp,N} = \dot{V}'_{sp} \cdot \frac{T_N}{p_N} \cdot \frac{p_{amb} + p_e}{T_N + t_{RT}} = 0,089 \cdot \frac{273,15}{101325} \cdot \frac{99522 - 27}{273,15 + 96} = 0,065 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{V}'_{sp,N} = 0,065 \cdot 3600 = 234 \text{ m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\dot{m}'_{sp} = \dot{V}'_{sp} \cdot \rho' = 321 \cdot 0,930 = 298,5 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Průtok suchých spalín ředícím tunelem

$$\dot{V}'_{sp} = \dot{V}'_{sp} \cdot \frac{100 - \varphi'(\text{H}_2\text{O})}{100} = 0,089 \cdot \frac{100 - 4,6}{100} = 0,085 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 0,085 \cdot 3600 = 307 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\dot{V}'_{sp,N} = \dot{V}'_{sp} \cdot \frac{T_N}{p_N} \cdot \frac{p_{amb} + p_e}{T_N + t_{RT}} = 0,085 \cdot \frac{273,15}{101325} \cdot \frac{99522 - 27}{273,15 + 96} = 0,062 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\dot{V}'_{sp,N} = 0,062 \cdot 3600 = 223 \text{ m}_N^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$\dot{m}_{sp} = \dot{V}'_{sp} \cdot \rho = 307 \cdot 0,946 = 290,4 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

Hmotnostní koncentrace částic vztažená na jednotku objemu suchých spalín za N.P.

$$\rho_N(\text{TL}) = \frac{m}{V_{gN}} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$$

$$\rho_N(\text{TL}) = \frac{290,2}{5,243}$$

$$\rho_N(\text{TL}) = 55,3 \text{ mg} \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Hmotnostní koncentrace částic vztažená na jednotku objemu suchých spalin za reálných podmínek (ředící tunel):

$$\rho(\text{TL}) = \frac{m}{V_g} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$\rho(\text{TL}) = \frac{290,2}{7,216}$$

$$\rho(\text{TL}) = 40,2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Hmotnostní koncentrace částic vztažená na jednotku objemu vlhkých spalin za N.P.

$$\rho'_N(\text{TL}) = \rho_N(\text{TL}) \cdot \frac{100 - \varphi'(\text{H}_2\text{O})}{100} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}_N^{-3}]$$

$$\rho'_N(\text{TL}) = 55,3 \cdot \frac{100 - 4,6}{100}$$

$$\rho'_N(\text{TL}) = 52,3 \text{ mg} \cdot \text{m}_N^{-3}$$

Hmotnostní koncentrace částic vztažená na jednotku objemu vlhkých spalin za reálných podmínek (ředící tunel):

$$\rho'_N(\text{TL}) = \rho(\text{TL}) \cdot \frac{100 - \varphi'(\text{H}_2\text{O})}{100} \quad [\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}]$$

$$\rho'_N(\text{TL}) = 40,2 \cdot \frac{100 - 4,6}{100}$$

$$\rho'_N(\text{TL}) = 38,6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Hmotnostní tok tuhých částic v potrubí ředícího tunelu:

$$q_m(\text{TL}) = \rho'_N(\text{TL}) \cdot \dot{V}'_{sp,N} \quad [\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$q_m(\text{TL}) = 38,6 \cdot 0,089$$

$$q_m(\text{TL}) = 3,435 \quad [\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}]$$

7 Závěr

Měření koncentrace tuhých znečišťujících látek, jak vyplývá z této práce, představuje nelehký úkol a to zvláště u malých spalovacích zařízení. Volba správné metodiky včetně měřicí trasy a odběrové aparatury pro stanovení koncentrace těchto látek vyžaduje zohlednění a vyřešení mnoha úskalí. V první části práci byly obecně popsány tuhé znečišťující látky a metody jejich stanovení. Mezi tyto metody patří metoda jednorázová (gravimetrická) a metody kontinuální. Na základě první zmiňované metody s ohledem na testování malých spalovacích zdrojů je navržena odběrová aparatura, kde jednotlivé prvky aparatury jsou schématicky zobrazeny na Obr. 23. Jedná se o aparaturu s externí filtrací spalin po dílčím odběru spalin. Měřicí trať je přizpůsobena tak, aby k odstranění vody docházelo před plynoměrem. Měření průtoku plynu je provedeno termickým průtokoměrem se sondou TA10-ZG2b s integrovaným převodníkem U10a společnosti Höntzsch. Podle navržené aparatury byl proveden vzorový výpočet koncentrace TZL ve spalinách. V rámci návrhu odběrové aparatury je navržena odběrová sonda, která se skládá z nosné trubky sondy, sady vyměnitelných hubic o různých vnitřních průměrech, a eventuálně i z vytápění konce sondy pomocí elektricky vytápěných pásků, aby nedocházelo k nežádané kondenzaci par před filtrací tuhých částic. Konstrukční provedení odběrové sondy vyhovuje normě [3] a [4]. Jako příloha k diplomové práci jsou přiloženy výrobní výkresy odběrové sondy (sestava KUB785-2).

Práce se dále podrobně zabývá metodikami stanovení koncentrací tuhých částic u malých zdrojů. Těchto metodik je k dispozici celá řada, avšak díky tomu, že se vzájemně od sebe více či méně odlišují, je problém provést vzájemné porovnávání výsledků získaných těmito metodami. Snaha Evropské unie je vytvořit jednotnou metodiku. Nicméně pracovní verze návrhu, která byla založena na odběru tuhých látek z ředícího tunelu, byla komisí CEN na konci roku 2008 odmítnuta a pracuje se na novém návrhu.

Hlavní náplní práce byl konstrukční návrh měřicí trati pro nově budovanou testovací laboratoř VEC. S ohledem na požadavky a možnosti nové testovací laboratoře byl navržen ředící tunel, kde dochází přes digestoř k nasávání spalin a jejich ředění pomocí okolního vzduchu. Měřicí otvory (celkem sedm měřících míst) jsou umístěny na konci ředícího tunelu. Odvod spalin je realizován přes kouřový ventilátor. Práce obsahuje stanovení základních provozních parametrů, které se můžou lišit v závislosti na vstupních parametrech a požadavcích daného způsobu testování spalovacího zařízení. Prostorová vizualizace návrhu ředícího tunelu je na Obr. 19. Součástí práce jsou kompletní výkresy pro výrobu ředícího tunelu (KUB785-1).

8 Seznam použité literatury

- [1] ČR. *Zákon o ochraně ovzduší* č. 86/2002 Sb.
- [2] NOVÝ, R. *Technika prostředí*. Praha : ČVUT, 2002.
- [3] ČSN ISO 9096:1998 *Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace a hmotnostního toku tuhých částic v potrubí - Manuální gravimetrická metoda*
- [4] ČSN EN 13284-1 *Stacionární zdroje emisí - Stanovení nízkých hmotnostních koncentrací prachu - Manuální gravimetrická metoda*
- [5] NOSKIEVIČ, Pavel; KOLONIČNÝ, Jan; OCHODEK, Tadeáš. *Malé zdroje znečišťování*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2004. 108 s.
- [6] HNILICOVÁ, Helena. *Emise PM10 a jejich zdroje*. [cit. 2010-06-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/sd2008-prednaska-hh-emise-pm10-a-jejich-zdroje.pdf>>.
- [7] Vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 356/2002 Sb.
- [8] Polétavý prach. *IRZ.cz* [online]. [cit. 2011-04-29]. Dostupný z WWW: <<http://irz.cenia.cz/irz/new/node/179>>
- [9] KELEMEN, M. – MAŤAŠOVSKÁ, T.: Meranie koncentrácie prachu v prostredí. *Automa*, 2004, roč. 10, č. 12
- [10] ISO 12141:2002 *Stationary source emissions - Determination of mass concentration of particulate matter (dust) at low concentrations - Manual gravimetric method*
- [11] *TESO a.s.* [online]. 2001 [cit. 2010-06-10]. Dostupné z WWW: <www.teso.cz>.
- [12] *TESO a.s.*, *Návod k použití izokinetické gravimetrické aparatury*
- [13] *SICK* [online]. 2010 [cit. 2010-12-25]. [Www.mysick.com](http://www.mysick.com). Dostupné z WWW: <<https://www.mysick.com/eCat.aspx?go=DataSheet&Cat=Row&At=Fa&Cult=English&ProductID=18274>>.
- [14] DUSTHUNTER T Transmissiometer. *SICK* [online]. 2010, 1, [cit. 2010-12-25]. Dostupný z WWW: <http://www.sick.fi/sickmaihak/product/categories/dust/dusthunter_t100/en.toolboxpar.0002.file.tmp/PI_DUSTHUNTER-T_en_8012685.pdf>.
- [15] Sick MAIHAK, *Návod k použití prachoměru FW100*
- [16] PCME, *PCME DS30a prospekt*,]. Dostupný z WWW: <http://www.pcme.co.uk/pdf_data/ds30a_c.pdf>
- [17] ESM Andersen Instruments - Solutions for Particulate Measurements. [online]. [cit. 20. 12. 2004]. Dostupný z WWW: <<http://www.esm-online.de/andersen/product/group6/betaa.htm>>

- [18] ABRLA, Pavel. *Problematika přesnosti stanovení emisí z malých spalovacích zařízení*. [cit. 2010-06-10]. Dostupný z WWW: <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_v/papers/03-Abrla.pdf>.
- [19] FAST MOBILITY PARTICLE SIZER™ SPECTROMETER. TSI [online]. [cit. 2011-04-29]. Dostupný z WWW: <http://www.tsi.com/en-1033/segments/particle_instruments/2268/fast_mobility_particle_sizer%E2%84%A2_spectrometer.aspx>.
- [20] SCANNING MOBILITY PARTICLE SIZER™ SPECTROMETERS. TSI [online]. [cit. 2011-04-29]. Dostupný z WWW: <http://www.tsi.com/en-1033/products/2212/scanning_mobility_particle_sizer%E2%84%A2_spectrometers.aspx>.
- [21] *Solid fuel small combustion installation* [online]. France : Bio Intelligence Service, April 2009 [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <http://www.ecosolidfuel.org/docs/BIO_EuP_Lot%2015_Task1_v4_200906.pdf>.
- [22] *Stanovení TZL ze spalovacích zařízení malých výkonů* [online]. Ostrava : VEC-VŠB, 2009 [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.iczt.cz/cs/doc/stanov.pdf>>.
- [23] EN 13240:2005 *Spotřebiče na pevná paliva k vytápění obytných prostorů – Požadavky a zkušební metody*
- [24] DIN EN 13229:2005 *EN-Inset appliances including open fires fired by solid fuels - Requirements and test methods*
- [25] DIN EN 12815:2011 *Residential cookers fired by solid fuel - Requirements and test methods*
- [26] DIN+ EN 13240 *Certification Scheme Room Heaters (Solid Fuel Stoves) with low-pollution combustion*
- [27] Časové průběhy emisí znečišťujících látek při spalování dřeva. KUBESA, Petr; BRANC, Michal. *V rámci projektu SP/2010205 „Studie tvorby tuhých znečišťujících látek v průběhu spalovacího procesu u malých spalovacích zdrojů“*. Ostrava : VEC, 2010.
- [28] NS 3058-2:1994: *Enclosed wood heaters - Smoke emission - Part 2: Determination of particulate emission*
- [29] NS 3059:1994: *Enclosed wood heaters - Smoke emission – Requirements*
- [30] BS 3841-1:1994. *Determination of smoke emission from manufactured solid fuels for domestic use. General method for determination of smoke emission rate*
- [31] BS 3841-2:1994. *Determination of smoke emission from manufactured solid fuels for domestic use. Methods for measuring the smoke emission rate*
- [32] US EPA METHOD 5 – *Determination of particulate matter emissions from stationary sources*

- [33] US EPA METHOD 5g – *PM Wood Heaters from a Dilution Tunnel*
- [34] US EPA METHOD 5h – *PM Wood Heaters from a Stack*
- [35] US EPA Method 28 – *Certification and auditing of wood heaters*
- [36] AS/NZS 4013:1999 *Domestic solid fuel burning appliances - Method for determination of flue gas emission*
- [37] AS/NZS 2918:2001 *Domestic solid fuel burning appliances - Installation*
- [38] AS/NZS 4012:1999 *Domestic solid fuel burning appliance - Method for determination of power output and efficiency*
- [39] AS/NZS 4014:1999 *Domestic solid fuel burning appliances—Test duele*
- [40] ČSN EN 303-5 *Kotle pro ústřední vytápění - Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční nebo samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 300 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení*
- [41] *Clean biomass combustion in residential heating: particulate measurements, sampling, and physicochemical and toxicological characterisation* [online]. Kuopio, Finland : University of Kuopio, 1/2008 [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.bios-bioenergy.at/uploads/media/Paper-Obernberger-Biomass-Combustion-in-Residential-Heating-2008-01-01.pdf>>.
- [42] *DD Technik* [online]. [cit. 2011-04-30]. Kolejnice 82 S (STRELA 57) velká. Dostupné z WWW: <<http://www.kovani-panty-zamky.cz/p/2027-Kolejnice-82-S-%28STRELA-57%29-velka-Sina-pro-posuvne-zavesene-dvere-a-vrata->>.
- [43] *DD Technik* [online]. [cit. 2011-04-30]. 2 SA Dvoukolečkový závěsný vozík pro velkou kolejnici 82 S Rolling Center. Dostupné z WWW: <<http://www.kovani-panty-zamky.cz/p/2046-2-SA-Dvoukoleckovy-zavesny-vozik-pro-velkou-kolejnici-82-S-Rolling-Center/?rid=a6c6e2cf4187fd5b00cfe4f47be66964>>.
- [44] *DD Technik* [online]. [cit. 2011-04-30]. Kolejnice 82 S (STRELA 57) velká. Dostupné z WWW: <<http://www.kovani-panty-zamky.cz/p/2049-4-SA-Ctyrkoleckovy-zavesny-vozik-pro-velkou-kolejnici-82-S-Rolling-Center/?rid=a6c6e2cf4187fd5b00cfe4f47be66964>>.
- [45] NOSKIEVIČ, Pavel. *Spalování uhlí*. Ostrava : Ostrava : VŠB-Technická univerzita, 1998. 62 s.
- [46] *DiracIndustries* [online]. [cit. 2011-04-30]. Průmyslové topné kabely. Dostupné z WWW: <http://www.diracindustries.com/czcz/product_detail.php?ProductType_id=32>.
- [47] *PD Group* [online]. [cit. 2011-04-30]. Circulation-cooler. Dostupné z WWW: <http://www.pd-pgw.de/html/kreislaufkuhler_e.html>.

[48] *HÖNTZSCH* [online]. [cit. 2011-04-30]. Sensor TA10 ... ZG2b with integrated transducer U10a. Dostupné z WWW: <

http://www.hoentzsch.com//upload/messprinzip_pdf/u314_ta10zg2b_dop_e.pdf>.

[49] *Becker* [online]. [cit. 2011-04-30]. Rotary vane vacuum pumps. Dostupné z WWW: <

<http://www.ynna.cz/data/sortiment/vyvevy/vt-4,10-4,40-tu.pdf>>.

[50] *Ekotechnika* [online]. [cit. 2011-04-30]. Hygrophil H. Dostupné z WWW: <

http://www.ekotechnika.com/files/Hygrophil%20H%204230_CZ.pdf >.

9 Přílohy

KUB785-1 Sestava ředícího tunelu se souvisejícími výrobními výkresy

KUB785-2 Sestava odběrové sondy se souvisejícími výrobními výkresy

Příloha č. 1 CD-ROM obsahující:

- text diplomové práce (diplomová práce.doc),
- určení provozních parametrů ŘT (provozní parametry ŘT.xls, Microsoft Excel 2003),
- výpočet dle navržené odběrové aparatury místností (odběrová aparatura.xls, Microsoft Excel 2003),
- výrobní výkresy (AutoCad 2002)