

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2016**

**David Stoklas**

# Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

## **Snižování emisí z velkých zdrojů, kontinuální měření, přístrojová technika**

Bakalářská práce

Autor: David Stoklas

Studijní program: B1701 Fyzika

Vedoucí práce: Ing. Lidmila Hyšplerová, CSc.

Odborní konzultanti: Ing. Tomáš Látal  
Dr. hab. A. Dołhańczuk-Śródka  
Mgr. Jan Loskot

Oponent: Doc. RNDr. Jan Kříž, PhD.

Hradec Králové

2016

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval pod vedením vedoucí práce samostatně a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Hradci Králové dne.....

.....

David Stoklas

**Poděkování:**

Děkuji ing. L. Hyšplerové, CSc. za vedení mé bakalářské práce a zadání zajímavého tématu. Můj dík patří také panu ing. Tomáši Látalovi za mimořádnou vstřícnost při mých konzultacích v EOP a.s. a poskytnutí materiálů a Mgr. Janu Loskotovi za rady a technickou pomoc v závěru mé práce a Dr. hab. A. Dołhańczuk-Śródke za pomoc při sestavování publikace při mých pobytech a odborné stáži na Přírodovědno-technické fakultě Univerzity Opole.

## **Anotace**

STOKLAS, David: Snižování emisí z velkých zdrojů, kontinuální měření, přístrojová technika.

Hradec Králové: Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové, 2016. Bakalářská práce, 38 s.

Bakalářská práce je součástí dlouhodobých sledování emisí prachových částic z velkých zdrojů, jejich kontinuálních měření a modelování. Jsou zde uvedeny fyzikální principy průmyslových odlučovačů prachových částic a přístrojové techniky pro jejich kontinuální měření před a po modernizaci odprašování spalin v EOP a.s. s praktickými ukázkami. Výsledky této práce slouží jako podklady pro environmentální modelování v rámci sledování rekreační česko-polské přeshraniční oblasti pomocí biomonitoringu. V samostatné příloze práce je uvedena fotodokumentace ze sběrů bioindikátorů a půdy z okolí devíti referenčních bodů 2016. Práce bude použita jako pomocný učební text pro studenty bakalářského studijního programu "Fyzikální měření a výpočetní technika" pro jejich exkurze a odborné praxe.

**Klíčová slova:** emise, tuhé znečišťující látky (TZL), moderní odlučovače spalin, kontinuální měření

**Annotation:**

STOKLAS David: Reducing of emissions from large sources, continuous measurement, instrumentation.

Hradec Králové: Faculty of Science, University of Hradec Králové, 2016. Bachelor Degree Thesis. 38 s.

Bachelor thesis is part of a long-term monitoring dust emissions from large sources, the continuous measurement and modeling. There are presented physical principles of industrial dust separators and instrumentation for the continuous measurement before and after modernization of flue gas dedusting in EOP a.s. with practical examples. The results of this study provide as a basis for environmental models of long-term biomonitoring of recreational area in the Czech-Polish border region. In the independent appendix is presented photo documentation from biomarkers and soil collections around nine reference points 2016. Thesis will be used as an auxiliary textbook for students studying bachelor study program "Physical measurements and computer equipment" for their excursions and professional practices.

Keywords: emissions, particulate matter (PM), modern flue gas dedusting, continuous measurements

## OBSAH:

1. ÚVOD.....	8
2. TEORETICKÁ ČÁST.....	9
2.1 Emise znečišťujících látek z energetických zdrojů.....	9
2.2 Odlučování tuhých látek ze spalin v uhelných elektrárnách.....	13
2.3 Kontinuální analyzátory prachových částic, měření, verifikace dat.....	20
3. ÚKOLY A CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE.....	24
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	25
4.1 Technologie odprašování v EOP před rekonstrukcí.....	25
4.2 Technologie odprašování v EOP po rekonstrukci.....	28
4.3 Kontinuální měření TZL po rekonstrukci.....	30
4.4 Grafické zpracování hodnot kontinuálního měření TZL za jeden měsíc.....	34
4.5 Princip sběru a přenosu dat při kontinuálním měření TZL.....	35
5. DISKUSE A ZÁVĚRY.....	37
Použitá literatura.....	39

## PŘÍLOHA:

1. ODBĚR VZORKŮ BIOINDIKÁTORŮ V REFERENČNÍCH BODECH
2. ELEKTRÁRNA OPATOVICE

## 1. ÚVOD

Evropská unie je třetím největším těžebním regionem na světě. Těží více jak 170 mil. tun černého a více jak 382 mil. tun hnědého uhlí a lignitu ročně. Návrat uhlí jako hlavního zdroje elektřiny je zvratem dosavadního trendu. Hlavním důvodem jsou technologické změny, které umožnily zvýšení účinnosti výroby elektřiny a tepla a zejména významné snížení emisí z těchto energetických zdrojů.

Směrnice 2010/75/EU Evropského parlamentu a Rady o průmyslových emisích zavedla nové a přísnější mezní hodnoty emisí, které jsou závazné pro spalovací zařízení v EU od ledna 2016. Tato ustanovení by měla předejít, snížit a v nejvyšší možné míře odstranit znečištění vyplývající z průmyslové činnosti.

Přeshraniční oblast Královéhradeckého a Opolského kraje zasahují emise ze dvou velkých elektráren spalujících uhlí. Jsou to elektrárna v Opatovicích nad Labem a Elektrárna v Opole. Elektrárna Opatovice (EOP a.s.) má výjimečné postavení pro svou polohu ležící v hustě zalidněné oblasti mezi krajskými městy Hradcem Králové a Pardubicemi.

Elektrárna Opole je rovněž umístěna v blízkosti velkoměsta. Volba jejich polohy byla záměrná pro plánované zásobování přilehlých aglomerací teplem. Obě elektrárny jsou v blízkosti přeshraniční rekreačně využívané oblasti s několika národními parky.

V minulosti emise z velkých uhelných elektráren představovaly pro tuto oblast mimořádně velkou ekologickou zátěž. Z těchto důvodů vedení obou firem přikládá vysokou důležitost využívání nejmodernějších technologií při odprašování, odsiřování a odstraňování oxidů dusíku ze spalin.

S tím souvisí i kontinuální monitoring emisí. Finančně velmi náročné měřicí přístroje kontinuálně monitorují obsah emisí ve spalinách. Hustá síť stanic automatického imisního monitoringu nepřetržitě monitoruje imise v dané oblasti.

Aby bylo možné zjišťovat výši příspěvku sledovaného zdroje k imisím v dané oblasti, je potřeba pravidelně provádět výpočet rozptylu kouřové vlečky zdroje. V České republice je od roku 1998 pro velké zdroje emisí povinně zaveden "Výpočet znečištění ovzduší z bodových a mobilních zdrojů SYMOS 97, „Systém modelování stacionárních zdrojů“.

Je vytipováno devět příhraničních referenčních bodů, které jsou ze strany EOP a.s. součástí pravidelně sledované sítě v rámci modelování SYMOS. Toto rekreační území je, ve spolupráci s PŘF UHK a WPT UO v rámci biomonitoringu toxických kovů podporovaném projekty EU, na česko-polské přeshraniční oblasti, dlouhodobě monitorováno.



## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Emise znečišťujících látek z energetických zdrojů

**Moderní energetické zdroje** musí respektovat stále se zpřísňující požadavky na energetické zdroje z hlediska vlivu na životní prostředí, tzn. na zatížení ovzduší emisemi, které tyto zdroje produkují. Trend omezování produkce CO<sub>2</sub> je důsledkem mezinárodních závazků (v tomto případě se jedná o tzv. Kjótský protokol), které požadují omezování podílu uhlíku z fosilních zdrojů paliv využívaného pro získávání tepla a elektrické energie.

**Palivem** je podle vyhlášky MŽP č. 357/2002, tuhý, kapalný nebo plynný hořlavý materiál určený ke spalování ve zdrojích znečišťování za účelem získání jeho energetického obsahu, který splňuje další požadavky stanovené touto vyhláškou.

Při **spalování fosilních paliv**, ale i dřeva a biomasy, vznikají v menší míře také produkty, které podle současné legislativy v ochraně ovzduší patří mezi základní znečišťující látky. Jsou to: oxid uhelnatý – CO, oxid siřičitý - SO<sub>2</sub>, oxidy dusíku - NO<sub>x</sub> (suma NO + NO<sub>2</sub>, vyjádřena jako NO<sub>2</sub>), tuhé znečišťující látky (TZL) - tuhé částice ve spalínách a organické látky (OL), vyjádřené jako celkový organický uhlík (TOC) .

Tyto **znečišťující látky** jsou svým původem vznik součástí paliva nebo oksylichovadla a ve výše uvedené formě se do ovzduší dostávají v důsledku uvolnění tepla obsaženého v palivu spalovacím procesem. Tak jak vystupují ze zdroje znečišťování, u kotelny z komína, označujeme jako **emise** a jejich maximální povolená koncentrace je omezena podle zákona o ovzduší a navazujícími předpisy tzv. **emisními limity**.

**Emise znečišťujících látek** z energetických zdrojů jsou významným faktorem, který ovlivňuje jak koncepci energetických zdrojů, tak jejich provozování.

Dle zákona č. 76/2002 o integrované prevenci a omezování znečištění, jsou nejlepší dostupné techniky BAT – *Best Available Techniques*) definované jako nejúčinnější a nejpokročilejší stadium vývoje technologií a činností a způsobů jejich provozování, navržených k předcházení, příp. k omezování emisí a jejich dopadů na životní prostředí. Dostupnými technikami se rozumí techniky vyvinuté v měřítku umožňujícím zavedení v příslušném průmyslovém odvětví za ekonomicky a technicky přijatelných podmínek s ohledem na náklady a přínosy, pokud jsou provozovateli za rozumných podmínek dostupné bez ohledu na to, zda jsou používány nebo vyráběny v České republice. Nejlepšími se rozumí nejúčinnější technika z hlediska dosažení vysoké úrovně ochrany životního prostředí.

Česká republika se po vstupu do EU řídí **emisními limity dle směrnice Evropského Parlamentu** a rady 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezení znečištění). Směrnice stanovuje s platností **od 1.1 2016 přísnější emisní limity** pro spalovací zařízení s tepelným příkonem nad 50 MW [1].

V českém právním řádu byla tato směrnice zpracována Vyhláškou 415/2012 Sb. Emisní limity udávají nejvyšší přípustné hodnoty množství emisí znečišťujících látek vypouštěných ze zdrojů znečišťování ovzduší (spalovací zařízení apod.). Jsou stanoveny na základě nejlepších dosažitelných prostředků BAT, vedoucích k omezení emisí s důsledným používáním moderní techniky a jejího maximálního provozního využívání [2].

Směrnice 2010/75/EU Evropského parlamentu a Rady ze dne 24. listopadu 2010 o průmyslových emisích zavádí nové a přísnější mezní hodnoty emisí, které jsou závazné pro spalovací zařízení v EU od ledna 2016. Zařízení ke spalování paliv o celkovém jmenovitém tepelném příkonu 50 MW a vyšším, bez ohledu na typ použitého paliva, jsou podle této směrnice o průmyslových emisích zařazována jako zdroje LCP (*Large Combustion Sources*) – zvláště velké spalovací zdroje. Jedná se převážně o veřejnou energetiku, tj. zařízení pro výrobu tepla a elektrické energie.

**Koncentrace emisí** znečišťujících látek se vyjadřují buď hmotnostní koncentrací ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  nebo až  $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$  pro dioxiny) nebo u plyných znečišťujících látek objemovou koncentrací v ppm (1  $\text{cm}^3$  znečišťující látky v 1  $\text{m}^3$  směsi, tj. koncentraci znečišťující látky  $10^{-4}$  %). Hmotnostní koncentrace je nutno uvádět a přepočítávat na normální podmínky (tlak a teplota), koncentrace objemové jsou na stavových podmínkách nezávislé.

V České republice jsou emisní limity dány zákonem o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. [2]. Tento zákon nahradil zákon č. 86/2002 Sb., a také zrušil prakticky veškeré prováděcí předpisy podle zákona č. 86/2002 Sb. [7]. Hlavním cílem zákona o ochraně ovzduší je zásadní zlepšení kvality ovzduší.

Zákon rozděluje zdroje emisí do několika skupin a určuje jim limity emisí jak pro tuhé znečišťující látky, tak pro oxid siřičitý, oxid uhelnatý a oxidy dusíku. Dále upravuje povolené množství vypouštěných znečišťujících látek do ovzduší a stanovuje způsob a frekvenci měření emisí.

a dále o zařízení s výrobou tepla pro vlastní (vnitrozávodní) spotřebu.

Od roku 2016 mají zařízení povinnost začít postupně plnit emisní limity podle přílohy č. V směrnice IED, které zpřísňují původní limity uvedené ve směrnici č. 2001/80/ES závislé na jmenovitém tepelném příkonu a typu paliva. Podle míry vlivu na kvalitu ovzduší se

stacionární zdroje znečišťování dělí na zvláště velké, velké, střední a malé. Z technologického hlediska nejpočetnější skupinou jsou spalovací zdroje, ve kterých se paliva oxidují za účelem využití uvolněného tepla (například kotle).

Spalovací zdroje se podle tepelného příkonu nebo výkonu dělí do kategorií:

zvláště velké spalovací zdroje (ZV), kterými jsou spalovací zdroje o jmenovitém příkonu 50 MW a vyšším, bez přihlídnutí ke jmenovitému výkonu, velké spalovací zdroje (V), kterými jsou spalovací zdroje o jmenovitém výkonu vyšším než 5 MW do 50 MW, nespádající do kategorie a) střední spalovací zdroje (S), kterými jsou spalovací zdroje o jmenovitém výkonu od 0,2 MW do 5 MW včetně, malé spalovací zdroje (M), kterými jsou spalovací zdroje o jmenovitém výkonu menším než 0,2 MW. Stacionární spalovací zdroje však patří mezi jmenovitě určené technologie, pro které jsou stanoveny tzv. specifické emisní limity. Zákon o ochraně ovzduší nově zavádí pojmy "emisní stropy" a "redukční cíle", které mohou být stanoveny pro vybrané znečišťující látky nebo skupiny látek pro vybraná území, pro skupiny nebo jednotlivé stacionární zdroje a lhůty pro jejich dosažení podle národního programu snižování emisí znečišťujících látek za účelem dosažení přípustné úrovně znečištění. Tato omezení souvisí s ochranou klimatického systému Země a týkají se SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC (těkavé organické látky) a NH<sub>3</sub>.

<b>Specifické emisní limity platné od 1.1.2016 [mg/m<sup>3</sup>]</b>							
Pevné palivo							
50-100MW				100-300MW			
SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL	CO
400	600	30	250	250	200	25	250

U zdrojů kategorie ZV, V a S zjišťují provozovatelé emise znečišťujících látek především měřeními a pouze ve zvláštních případech, stanovených ve Vyhlášce MŽP č. 356/2002 Sb., výpočtem. Emise se měří v místě, za kterým již nedochází ke změnám složení vypouštěných odpadních plynů do ovzduší. Měření a vyhodnocení naměřených hodnot se provádí jednorázově v termínech stanovených vyhláškou MŽP č. 356/2002 Sb. nebo nepřetržitě v průběhu roku (kontinuálním měřením). Uvedená vyhláška blíže stanovuje např. rozsah a způsob jednorázových měření znečišťujících látek u stacionárních zdrojů včetně jejich vyhodnocení, dále provádění kontinuálního měření včetně zaznamenávání a vyhodnocování naměřených dat. Zjišťování znečišťujících látek a kontrolu účinnosti spalování u malých zdrojů popisuje nařízení vlády č. 352/2002 Sb.

Mezi základní povinnosti provozovatelů ZV, V a S stacionárních, tedy i spalovacích zdrojů, patří (podle § 11 zákona č. 86/2002 Sb.) například:

uvádět do provozu a provozovat stacionární zdroje v souladu s podmínkami ochrany ovzduší, které jsou uvedeny ve stanoviscích a povoleních orgánů ochrany ovzduší, dodržovat emisní limity včetně lhůt stanovených k jejich plnění, dodržovat emisní stropy (jsou-li stanoveny), zjišťovat množství vypouštěných látek, vést provozní evidenci v rozsahu uvedeném v prováděcím předpise (Vyhláška MŽP č. 356/2002 Sb.) Provozovatelé ZV, V, S a obecně i malých stacionárních zdrojů platí poplatky za znečišťování. Poplatky menší než 500 Kč se nevyměřují. Poplatky za ZV, V a S stacionární zdroje se platí za znečišťující látky nebo stanovené skupiny látek, pro které má zdroj stanoven emisní limit. Sazby poplatků a způsob výpočtu poplatku je uveden v příloze č. 1 k zákonu o ochraně ovzduší. Vypočtený poplatek se zaokrouhluje na 100 Kč. Sazby pro tzv. hlavní zpoplatněné látky jsou uvedeny v následující Tab. 1.

Znečišťující látka	Sazba (Kč/t)
Tuhé zneč. látky	3 000
Oxid uhelnatý	600
Oxid siřičitý	1 000
Amoniak	1 000
Oxidy dusíku	800
Methan	1 000
Těkavé organické látky	2 000
Polycyklické aromatické uhlovodíky	20 000
Těžké kovy a jejich sloučeniny	20 000

Tab. 1. - Sazby pro hlavní zpoplatněné látky [3].

Znečišťující látky rozptýlené v ovzduší se v tzv. přizemní vrstvě, tj. tam, kde jsou obsahem ovzduší, které dýcháme, označují jako **imise** a nejvyšší dovolené koncentrace těchto látek jsou opět omezeny zákonnou normou ve formě **imisních limitů**.

Problematika **imisí** a dovolených imisních koncentrací je poněkud složitější a je zpracována v Nařízení vlády č. 350/2002 Sb. Obecně platí, že čím delší expozice (doba trvání příslušné koncentrace znečišťující látky v ovzduší), tím nižší je dovolená koncentrace této látky. Neomezené trvání koncentrace bez prokázaného vlivu na lidský organismus (zdraví lidí) je

vyjádřeno tzv. **ročním imisním limitem**, nejvyšší přípustnou krátkodobou koncentraci znečišťující látky vyjadřuje tzv. **1 hodinová maximální koncentrace**.

Pro běžnou potřebu vyjádření stavu znečištění v ovzduší a pro regulaci zdrojů znečištění se používají všeobecně známé maximální přípustné **24 hodinové koncentrace**, pro hodnocení CO je zaveden tzv. **8 hodinový klouzavý průměr**. Kromě imisních limitů NV č. 350/2002 Sb. zavádí i tzv. meze tolerance jako hodnoty, o které mohou být příslušné imisní limity v daném roce překročeny. Pro účely ochrany zdraví lidí jsou imisní limity a meze tolerance stanoveny pro tyto látky: SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> (frakce TZL menší než cca 10 μm), NO<sub>2</sub>, Pb, CO, benzen, Cd, NH<sub>3</sub>, As, Ni, Hg a polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH). Pro ochranu ekosystémů jsou imisní limity stanoveny pouze pro NO<sub>x</sub> a SO<sub>2</sub> ve formě ročních koncentrací. Imisní limity se uvádějí v hmotnostních koncentracích μg.m<sup>-3</sup> nebo ng.m<sup>-3</sup> [3].

## 2.2 Odlučování tuhých látek ze spalín v uhelných elektrárnách

**Palivem** je podle vyhlášky MŽP č. 357/2002, tuhý, kapalný nebo plynný hořlavý materiál určený ke spalování v energetických zdrojích za účelem získání jeho energetického obsahu, který splňuje další požadavky stanovené touto vyhláškou.

**Palivo** (tuhé nebo kapalné) se skládá ze tří základních složek, které tvoří tzv. hrubý rozbor paliva

$$h + W + A = 1 \quad [\text{kg.kg}^{-1}] \quad (1)$$

*h* je tzv. hořlavina (část palivové hmoty obsahující uvolnitelné teplo),

*W* je voda obsažená v palivu

*A* jsou inertní popeloviny v palivu

Hořlavina je tvořena pěti prvky a to C - uhlíkem, H - vodíkem, S - sírou, N - dusíkem a

O - palivovým kyslíkem [4].

**Znečišťující látky** v koncentrované podobě, tak jak vystupují ze zdroje znečišťování, (u kotelny z komína), označujeme jako **emise** a jejich maximální povolená koncentrace je omezena podle zákona o ovzduší a navazujícími předpisy tzv. **emisními limity**.

Během spalování fosilních paliv přechází anorganické nečistoty z paliva do popela a částečně opouští kotel se spalínami. Říká se jim různě: polétavý prach, nebo **tuhé**

**znečišťující látky (TZL).** Obecně se označují jako , PM (*particulate matter*). Vždy však jde o malé částice o velikosti 1 nm až 100 μm. Ze zdravotního hlediska jsou nebezpečné částice menší než 10 μm, neboť se již nezachycují na chloupkách v nose, ale pronikají až do dýchacích cest, kde se usazují a působí pak . Proto se často setkáváme s termínem **PM<sub>10</sub>**, což jsou tuhé částice menší než 10 μm, nebo **PM<sub>2,5</sub>** o rozměrech částic pod 2,5 μm. K odstraňování prашných částic ze spalin se obvykle používají (90 % případů instalací) nebo tkaninové filtry (10 % instalací).

Základem každého **odlučovacího procesu tuhých i kapalných částic** je separace částic z proudu plynu na odlučovací plochy. Využívají se odlučovací principy gravitační, setrvačný, odstředivý, elektrický, difúzní, intercepční a síťový.

Konečná odlučovací rychlost částice k odlučovacím plochám vychází z pohybové rovnice individuální částice [7], [13].

**Gravitační usazování** je nejjednodušší metodou separace částic. Pro usazovací rychlost platí vztah:

$$v = \sqrt{\frac{4a \cdot (\rho_2 - \rho) \cdot g}{3C_D \cdot \rho}} \quad (2)$$

$v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je usazovací rychlost částice,

$a$  [m] je průměr odlučované částice,

$\rho_2$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] je hustota odlučované částice,

$\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ] je hustota čištěného plynu,

$g$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ] je gravitační zrychlení,

$C_D$  je součinitel odporu, který je závislý na hodnotě Reynoldsova kritéria obtékání částice  $Re$ :

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot a}{\eta}$$

(3)

kde  $\eta$  [ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ] je dynamická viskozita a

$v$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] je relativní rychlost proudění plynu vůči částici.

Pokud  $Re < 0,2$ , pak platí  $C_D = 24/Re$  a pádovou rychlost částice lze vypočítat ze vztahu:

$$v_p = \frac{a^2 \cdot (\rho_2 - \rho) \cdot g}{18 \cdot \eta}$$

(4)

**Ggravitační princip** lze použít pouze jako předodlučovač pro odlučování velkých částic.

Často se používá kombinace gravitačního a setrvačného odlučovacího principu. Typické odlučování částic vlivem gravitační síly se děje v usazovacích komorách. Gravitační síla se neprojevuje u vylučování velmi malých částic prachu. (Brownův pohyb)

**Princip setrvačnosti** se využívá hlavně u suchých mechanických odlučovačů – prašníků, lamelových a žaluziových odlučovačů a ve filtraci při obtékání vláken.

**Působení odstředivé síly** se uplatňuje jak na částice prachu, tak i na částice plynu. V důsledku rozdílných hustot částic se jejich dráhy zakřivují různě. Následkem toho je, že tuhé částice se shromažďují při vnější straně komory s vířivým pohybem plynu nebo při vnější stěně oblouku potrubí. Při pohybu po kruhové dráze o poloměru  $r$  roste odstředivá síla se čtvercem obvodové rychlosti.

$$u_k = \frac{a^2 \cdot \rho_2 \cdot v_t^2 \cdot 2}{18\eta \cdot d}$$

(5)

$u_k$  [m.s<sup>-1</sup>] je konečná odlučovací rychlost částice,  
 $v_t$  [m.s<sup>-1</sup>] je obvodová (tangenciální) složka rychlosti rotujícího plynu,  
 $d$  [m] je průměr komory,  
 $a$  [m] je průměr odlučované částice

Konečná odlučovací rychlost částice  $u_k$  a tím i frakční odlučivost se zvyšuje se zmenšováním průměru válcové odstředivé komory  $d$  a se zvětšováním  $v_t$ , tedy průtoku komorou.

Tyto závěry platí u skutečných vírových odlučovačů pouze v omezené míře. Je nutné respektovat omezenou tlakovou ztrátu odlučovačů a složitost proudění ve vírových odlučovačích v oblastech mimo stěnu válcové komory.

**Elektrický princip** je založen na působení elektrické síly na nabitě částice s nábojem, které se nacházejí v elektrickém poli o určité intenzitě. V elektrických odlučovačích se využívá elektrických vlastností částic a elektrického pole k odstranění tuhých nebo kapalných částic z proudícího plynu. K účinnému elektrickému odlučování částic musí být splněno několik základních podmínek. Částice musí nést dostatečně velký monopolární náboj  $Q$  [C], protože přirozený náboj částic je nedostatečný, částice se před vlastním odlučováním nabíjí ionty plynu dané polarity.

K ionizaci plynu dochází při koronovém výboji v okolí vysokonapěťových elektrod. Částice musí mít vhodné elektrické vlastnosti z hlediska jejich nabíjení. V odlučovacím prostoru musí být mezi soustavou elektrod vytvořeno pole dostatečně vysoké intenzity  $E$  [ $V \cdot m^{-1}$ ]. Elektrický princip odlučování částic se používá hlavně u zdrojů s velkým objemovým průtokem plynu.

**Difúzní princip** je hlavní odlučovací princip ve filtraci při průchodu částic vláknitou vrstvou. Charakteristickým kritériem u difúzního odlučovacího principu je tzv. Pecletovo kritérium  $Pe$ , uplatňuje se hlavně u menších částic, jejichž velikost a je srovnatelná se

střední volnou dráhou molekul plynu  $l_m$  (u vzduchu  $l_m \cong 0,065 \mu m$ ).

$$Pe = \frac{v_0 \cdot d}{D_B} \quad (6)$$

$d$  [m] je charakteristický rozměr obtékaného tělesa,  
 $v_0$  [ $m \cdot s^{-1}$ ] je rychlost v nabíhajícímu proudu

$$D_B = k \cdot T \cdot B \quad (7)$$

$D_B$  [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ] je součinitel tepelné difúze,  
 $k = 1,3805 \cdot 10^{-23}$  [J/K] je Boltzmannova konstanta,  
 $T$  [K] je absolutní teplota plynu,  
 $B$  [ $s \cdot kg^{-1}$ ] je pohyblivost částice.

U difúzního odlučovacího principu se frakční odlučivost  $O_f$  zvyšuje se zmenšující velikostí částice. Difúzní a elektrický odlučovací princip jsou principy, pomocí kterých lze účinně odlučovat jemné částice.

**Intercepční princip** (přímé zachycení částice) se výrazně uplatňuje ve filtraci při průchodu plynu vláknitou nebo zrnitou vrstvou. K odloučení částice teoreticky stačí, když se při obtékání překážky střed částice přiblíží k překážce na poloměr své velikosti.

Charakteristickým kritériem je zde parametr intercepce  $\alpha$ , pro který platí:



$$\alpha = \frac{a}{d}$$

(8)

a je velikost částic,

$d$  [m] je průměr obtékaného vlákna

Na odlučování částic se pak současně podílejí tři hlavní odlučovací principy: difúzní, intercepční a setrvačný.

**Sít'ový princip** se uplatňuje při průchodu plynu hustou vlákninou nebo zrnitou vrstvou. Lze ho uplatnit i při průchodu plynu vrstvou již odloučených částic (filtrační koláč u průmyslových filtrů). Částice se odlučují zaklíněním mezi vlákny nebo již odloučenými částicemi díky své konečné velikosti [5], [6], [7].

**Technologií pro záchyt pevných částic z proudu spalin** je několik. Používají se elektrické odlučovače, suché mechanické odlučovače, mokré mechanické odlučovače a průmyslové filtry.

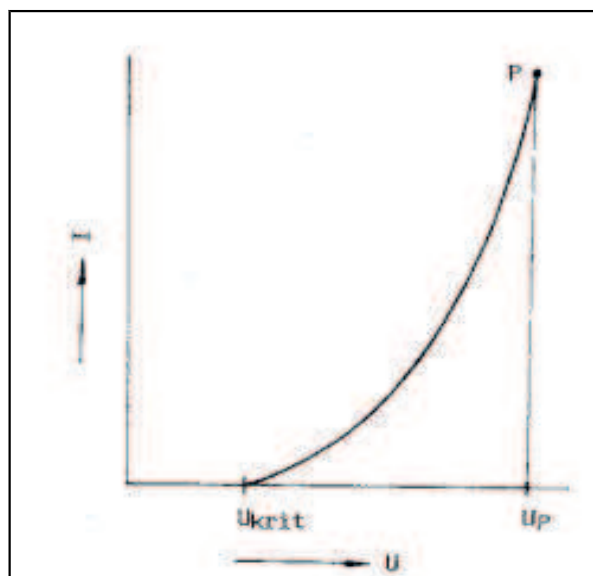
Hlavní část **elektrického odlučovače** tvoří soustava usazovacích a vysokonapět'ových elektrod. Usazovací elektrody jsou uzemněny a mají kladný náboj. Na vysokonapět'ové elektrody je přivedeno velmi vysoké stejnosměrné záporné napětí kolem 30 – 100 kV. Přivedením napětí vzniká mezi usazovacími elektrodami a vysokonapět'ovými elektrodami silné elektrické pole. Okolo vysokonapět'ových elektrod se vytvoří velké množství záporných iontů, tzv. koronový výboj. Částice prachu, které jsou obsaženy v plynu, který prochází aktivním prostorem mezi vysokonapět'ovými a usazovacími elektrodami jsou bombardovány těmito zápornými ionty, získávají záporný náboj a jsou vlivem elektrického pole přitahovány na povrch usazovacích elektrod, kde se usazují. Usazený prach se uvolňuje mechanickým oklepáváním. Prach padá do výsypek elektrického odlučovače, odkud je odváděn k dalšímu využití.

V **suchém trubkovém vertikálním elektrickém odlučovači** bývá směr proudění plynu obvykle zdola nahoru. Pro správnou funkci odlučovače je nutné, aby rychlost proudění plynu a koncentrace příměsí na vstupu do odlučovače byla co nejrovnoměrnější (různé lopatkové vestavby, rozdělovací mříže, rozváděcí žaluzie). Skříň **vertikálního komorového odlučovače** tvoří svislý rozšířený kanál. Vstupní potrubí ústí do spodní části skříňe kolmo nebo šikmo. Ve spodní části odlučovače jsou vestavby, které mají za úkol splnit požadavek rovnoměrného rozdělení rychlosti a koncentrace na vstupu do aktivní části odlučovače.

**Suchý komorový horizontální elektrický odlučovač** je nejrozšířenější typ elektrického odlučovače. Skříň tvoří v podstatě zvětšený horizontální kouřovod. Usazovací elektrody komorových elektrických odlučovačů jsou vytvořeny z jednotlivých pásů, které jsou zavěšeny v řadě tak, že tvoří rovinnou elektrodu. Oklepávání je prováděno programově v pravidelných intervalech a zajišťuje odvod usazených částic prachu z elektrod do výsypek.

**Mokrý elektrický odlučovač** mohou být horizontální i vertikální, mají kromě sršících a usazovacích elektrod ještě zvláštní skrápěcí systém, který rozptyluje vodní mlhu do prostoru mezi elektrody a na elektrody. Mokrý tuhé částice i kapičky vody jsou odlučovány v elektrickém poli, usazují se na elektrodách a stékají po nich v podobě kalové vrstvy do sběrných žlábků. mokrých elektrických odlučovačů nedochází při odloučení částice ke zpětnému strhávání částic zpět do proudu plynu, zvětšuje se permitivita částic. Používají se hlavně při požadavcích na velmi vysokou odlučivost. Indikátorem správné funkce elektrických odlučovačů je tzv. **voltampérová charakteristika** [7].

Je-li přivedené napětí  $U < U_{krit}$ , je pole mezi elektrodami elektrostatické. Jestliže je napětí  $U > U_{krit}$ , dochází ke vzniku iontů plynu a částice se v prostoru mezi elektrodami nabíjejí. Nabité částice a ionty plynu se pohybují k usazovací elektrodě a mezi soustavou elektrod teče proud. V praxi je snahou provozovat elektrické odlučovače v oblasti vysokých napětí, kde provozní napětí je blízké napětí přeskokovému  $U_p$  [V].



Obr. 1.: Voltampérová charakteristika [7]

U elektrického odlučovače platí, že čím vyšší je přivedené napětí  $U$  [V], tím vyšší je střední hodnota intenzity elektrického pole  $E$  [ $V \cdot m^{-1}$ ] v prostoru mezi elektrodami a tím vyšší je náboj  $Q$  [C] a Coulombova síla působící na částice. Zároveň se zvyšuje odlučovací rychlost částice i frakční odlučivost.

**Cyklon** je nejrozšířenější a nejpoužívanější mechanický odlučovač. Prošel dlouholetým konstrukčním vývojem. Všechny typy mají společný princip. Znečištěný plyn je po vstupu do cyklonu uveden do vířivého šroubovicového pohybu, který vyvolá odstředivou sílu a odloučení částic. Hrubé částice se odlučují prakticky ihned po vstupu do cyklónu a proběhnou celým cyklónem po stěně až do výmetného otvoru. Odlučivost cyklónu pro částice s průměrem větším jak  $10 \mu m$  je 80 – 95 % při hustotě větší než  $1000 \text{ kg} \cdot m^{-3}$  a hustotě plynu  $1 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ . Odlučivost prudce klesá pro částice s menším průměrem a hustotou. Částice zhruba pod  $5 \mu m$  jsou v cyklónu v důsledku difúze rovnoměrně rozptýleny a jejich odloučení je bez dalších spolupůsobících vlivů (například koagulace) málo pravděpodobné.

Základem **vírových odlučovačů** je vírový článek. Podle způsobu, jak se u článku dosahuje rotace plynu, jsou označovány jako s tečným vstupem, s osovým vstupem a vratným tokem, s osovým vstupem a přímým tokem atd. **Elektroodlučovače** se obvykle konstruují jako komorové se dvěma sekcemi za sebou. Vstupující popílek se nabíjí elektrickým polem, vznikajícím mezi řadami usazovacích a sršících elektrod. Působením elektrických sil se nabitý popílek pohybuje k usazovacím elektrodám a ulpívá na nich. Odloučený popílek po oklepání spadne do výsypek, z kterých je vypouštěn uzávěry do dopravního zařízení SOP.

Dříve byly filtračním materiálem **průmyslových filtrů** tkané textilie vyrobené z bavlněných nebo polyesterových vláken. V současnosti je častější užití netkaných textilií. Bavlna a polyestery jsou použitelné pouze do teplot kolem  $120 - 160 \text{ }^\circ\text{C}$ . Při větších teplotách vlákna ztrácejí pevnost, prodlužují se a zvětšují se póry a tím klesá jejich životnost a jejich filtrační schopnosti se zhoršují. Jako filtrační materiál se používá papír, keramika, netkané textilie s polopropustnými membránami z termoplastů, většinou teflonu. Mezi nejdůležitější vlastnosti filtračních látek patří jejich odlučovací schopnost, provozní tlaková ztráta a odolnost proti opotřebením. Na zachycování částic v textilním filtru spolupůsobí několik základních účinků, impakční účinek - zachycení částice po jejím nárazu na překážku (vlákno) následkem její setrvačnosti, difúzní účinek – usazení velmi malých částic na překážkách (vláknech) v důsledku Brownova pohybu, sedimentační účinek – usazení částic ve filtrační vrstvě v důsledku gravitace, síťovací účinek – přímé zachycení částic ve filtrační

vrstvě a elektrostatický účinek – působení elektrostatických sil mezi částicemi a povrchem filtrační látky. V textilních filtrech je odlučování prachu zajištěno na filtrační překážce, která ovlivňuje účinnost filtrace. Na kvalitu filtrační překážky má vliv pórovitost filtrační textilie, její síla, rozměry, povrchové vlastnosti vláken, permitivita, elektrický náboj a elektrická vodivost [7].

### **2.3 Kontinuální analyzátory prachových částic, měření, verifikace dat**

Nejčastěji používanou metodou stanovení obsahu většiny hlavních plynných znečišťujících látek v plynných směsích je infračervená absorpční spektroskopie založená na absorpci infračerveného záření měřeným plynem. Princip infračervené molekulové absorpční spektrometrie je založen na měření a interpretaci změn, které nastávají v molekulách při interakci s elektromagnetickým zářením v oblasti vlnových délek 1  $\mu\text{m}$  až 1000  $\mu\text{m}$ , což odpovídá vlnočtům v rozmezí 10  $\text{cm}^{-1}$  až 10 000  $\text{cm}^{-1}$ . Energie tohoto záření je dostačující na to, aby molekuly při absorpci změnilly svůj rotační nebo vibrační stav. Vnitřní energie molekuly se může zvýšit absorpcí elektromagnetického záření jen tehdy, jestliže dojde ke změně vektoru elektrického momentu dipólu molekuly. Intenzita infračervených absorpčních linií je úměrná velikosti této změny dipólového momentu. K absorpci infračerveného záření však může při analýze reálných plynů dojít také vlivem přítomnosti tuhých částic. Tyto částice rovněž absorbují infračervené záření, ovšem takto nabyté energie využívají ke zvýšení rychlostitranslačního pohybu. Absorpce záření v tomto případě neprobíhá kvantově, energie absorbovaného infračerveného záření se v absorpčním spektru projevuje spojitě a ruší stanovení plynných analytů [8].

Molekuly, skupiny molekul nebo komplexní ionty jsou označovány jako aktivní v infračerveném spektru, pokud u nich absorpce energetických kvant tohoto záření vyvolává nenulovou změnu dipólového momentu. Ta se projeví vznikem pásového absorpčního spektra, které je tvořeno posloupností různě širokých pásů příslušejících minimálním hodnotám propustnosti. Poloha vrcholů těchto pásů udává vlnočty charakteristický pro absorbované kvantum infračerveného záření.

$$I = I_0 e^{-kcL} \quad (9)$$

I je naměřená intenzita

$I_0$  je počáteční intenzita

k extinkční koeficient

L ... délka měřicí trasy

c ... koncentrace

po úpravě

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kcL} \quad (10)$$

Podíl intenzit označíme T – transmitance

$$\frac{I}{I_0} = T \quad (11)$$

Pro výpočet koncentrace upravíme vzorec do podoby

$$c = \frac{\ln \left( \frac{1}{T} \right)}{-kL} \quad (12)$$

Míra absorpce záření při dané vlnové délce monochromatického elektromagnetického záření  $\lambda$  je nejčastěji uváděna pomocí veličiny nazývané absorbance. Absorbance A je dána vztahem

$$A = \log \left( \frac{1}{T} \right) = -\log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (13)$$

Po dosazení do ( )

$$c = \left( \frac{2,303}{kL} \right) A \quad (14)$$

kde výraz v závorce je konstantní a dostáváme lineární závislost,

$$A = k \cdot c \quad (15)$$

která je nejvhodnější pro měření jako takové.

Při měření prachu in situ je rovněž porovnáváno zeslabení světelného paprsku při průchodu daným prostředím. Prachové částice jsou však různě velké a proto před každým uvedením přístroje do provozu je třeba provést gravimetrické měření a nový analyzátor kalibrovat na dané technologické podmínky.

Řízení energetických provozů a vyhodnocování procesů, které v nich probíhají, vyžaduje informace umožňující jednak udržet zařízení v bezpečných provozních podmínkách a jednak dosahovat optimální hospodárnosti provozu. Potřebné informace se převážně získávají přímým měřením provozních veličin, popř. také výpočtem veličin odvozených. Měří se zejména termické a hydraulické veličiny (tlaky, teploty, průtočná množství atd.), elektrické veličiny (proudy, napětí, frekvence atd.) a další veličiny, podle charakteru provozu (např. neutronový tok, perioda změny výkonu atd.).

Výsledky měření fyzikálních veličin jsou vždy zatíženy chybami, resp. neurčitostmi, jejichž velikost závisí na metrologických vlastnostech snímačů (převodníků) udávaných jejich výrobcí, pracovními podmínkami a způsobem údržby snímačů (včetně kalibrací) apod. V praxi tedy nikdy nejsou absolutně přesné. Chyby (nejistoty) měřicího zařízení vymezují okolo naměřeného údaje určité pásmo, uvnitř kterého se s jistou pravděpodobností nachází skutečná hodnota měřené veličiny.

V případě energetických zařízení se jednotlivá fyzikální veličina často měří na několika místech vzájemně propojených částí technologického zařízení – tj. jde o opakované přímé měření téže veličiny, popř. veličiny s ní kauzálně spjaté –, přičemž naměřené údaje se od sebe z principu vždy liší.

Objektivně určit, který údaj je správný a jakou chybou měření je zatížen, v praxi zpravidla nelze, a to ani při znalosti údajů o neurčitosti toho kterého snímače (uváděných jeho výrobcem, zjištěným vlastní kalibrací apod.).

Obecně pro naměřenou hodnotu veličiny  $x_i$  platí

$$x_i = x_i' + e_i \quad (16)$$

$x_i'$  je správná hodnota veličiny a  $e_i$  reprezentuje chyby měření.

Chyby měření se dělí mj. na chyby náhodné (běžné) a na chyby tzv. hrubé. Náhodné chyby jsou nevyhnutelnou součástí každého měření a jejich velikost je charakterizována směrodatnou odchylkou příslušného souboru naměřených dat.

U měřicích přístrojů je velikost náhodných chyb vymezena třídou přesnosti přístroje. Hrubé chyby jsou výraznější a překračují mezní chybu (třídu přesnosti přístroje) udávanou

výrobce. Nemají-li být výsledky daného měření znehodnoceny, musí se hrubé chyby ze souboru naměřených dat odstranit; to se dělá při použití tzv. oprav.

**Metoda vyrovnání dat** je převod reálně naměřených hodnot na hodnoty tzv. vyrovnané, které se co nejvíce blíží objektivně správným hodnotám měřené veličiny.

Vyrovnané hodnoty  $x_i^+$  se získají při použití vztahu

$$x_i^+ = x_i + v_i \quad (17)$$

$v_i$  jsou opravy.

Naměřená data se opravují tak, aby vyrovnané hodnoty měřené veličiny vyhovovaly matematickým formulacím fyzikálních zákonů zachování hmoty, energie a hybnosti a splňovaly nastavenou kritériální rovnici určující velikost oprav. Rozložení náhodných chyb se obdobně jako u jiných statistických metod předpokládá normální (gaussovské).

Vyrovnané hodnoty tudíž vyhovují dvěma základním podmínkám:

1. Vyrovnané hodnoty měřených veličin vyhovují fyzikálním zákonům, tedy jsou s nimi konzistentní, přičemž tuto podmínku lze zapsat ve tvaru
- 2.

$$F(x', y', c) = 0 \quad (18)$$

$F$  je vektor rovnic matematického modelu technologického procesu,  $x'$  vektor přímo měřených veličin,  $y'$  vektor nepřímo měřených (odvozených) veličin,  $c$  vektor přesně známých konstant.

2. Součet všech oprav naměřených dat je minimální, přičemž opravy jsou stanoveny tak, aby součet čtverců vážených (váha  $\sigma$ ) oprav byl minimální.

Co se týče velikosti oprav, musí být splněna nerovnost

$$4Q_{\text{krit}} > Q_{\text{min}} \quad (19)$$

$Q_{\text{krit}}$  je kritická hodnota  $\chi^2$  rozdělení s  $v$  stupni volnosti stanovená podle Gaussovy teorie chyb (hodnota  $Q_{\text{krit}}$  pro dané  $v$  je uvedena ve statistických tabulkách).

Pokud nerovnost (5) není splněna, znamená to, že byla při vyrovnávání dat detekována přítomnost hrubé chyby měření. V takovém případě nelze vyrovnaná data dále použít, přestože vyhovují fyzikálním zákonům, neboť není splněno kritérium Gaussova rozložení chyb. Ke sledování emisí je využíván systém kontinuálního monitorování emisí tzv. CEMS (*Continuous Emissions Monitoring System*), který pomocí vlastních hardwarových zařízení monitoruje průběhy mnoha technologických proměnných. Mimo modelovací proces CEMS je v dnešní době vyvíjeno mnoho nových metod založených například na neuronových

sítích, stochastické identifikaci systému nebo nejnovější typ metody monitorování emisí, tzv. PEMS (*Predictive Emissions Monitoring Systems*). Systém využívá modelovací nástroje, jako jsou neuronové sítě, stochastické modely, apod. a lze jím predikovat emise v reálném čase (on-line) na základě znalosti (měření) definovaných parametrů kotle, které jsou srovnávány s koncentracemi emisí [9-11].



### 3. ÚKOLY A CÍLE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Bakalářská práce je součástí dlouhodobých sledování emisí prachových částic z velkých zdrojů, jejich kontinuálního měření a modelování ve vytipovaných referenčních bodech.

Úkolem bakalářské práce je proto v teoretické části popsat fyzikální principy odlučování tuhých znečišťujících látek (TZL) ze spalin v uhelných elektrárnách, přístrojovou techniku pro kontinuální monitorování tuhých znečišťujících látek a systémy měření.

V experimentální části práce popsat inovovaný postup odprašování spalin a kontinuálního měření TZL v Elektrárnách Opatovice a.s.

Cílem je bakalářskou práci zpracovat tak, aby vytvořené texty mohly sloužit jako součást zpracovávaných studijních podpor pro exkurze a odborné praxe studentů v EOP a.s. v rámci bakalářského studijního programu „Fyzikální měření a výpočetní technika“ a magisterského studijního programu „Fyzikální měření a modelování“ a po překladu i pro výměnné stáže studentů Přírodovědno-technické fakulty Univerzity Opole (WPT UO) bakalářských, magisterských i doktorských studijních programů studijního směru „Ochrana środowiska“

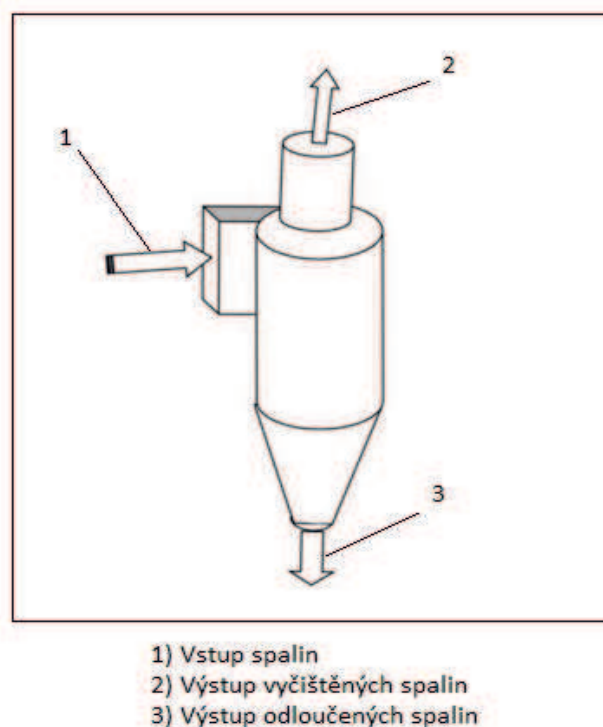
## 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1 Technologie odprašování v EOP před rekonstrukcí

V Elektrárně Opatovice byly pro dosažení potřebných parametrů používány dvě technologie snižování úletu tuhých znečišťujících látek (TZL).

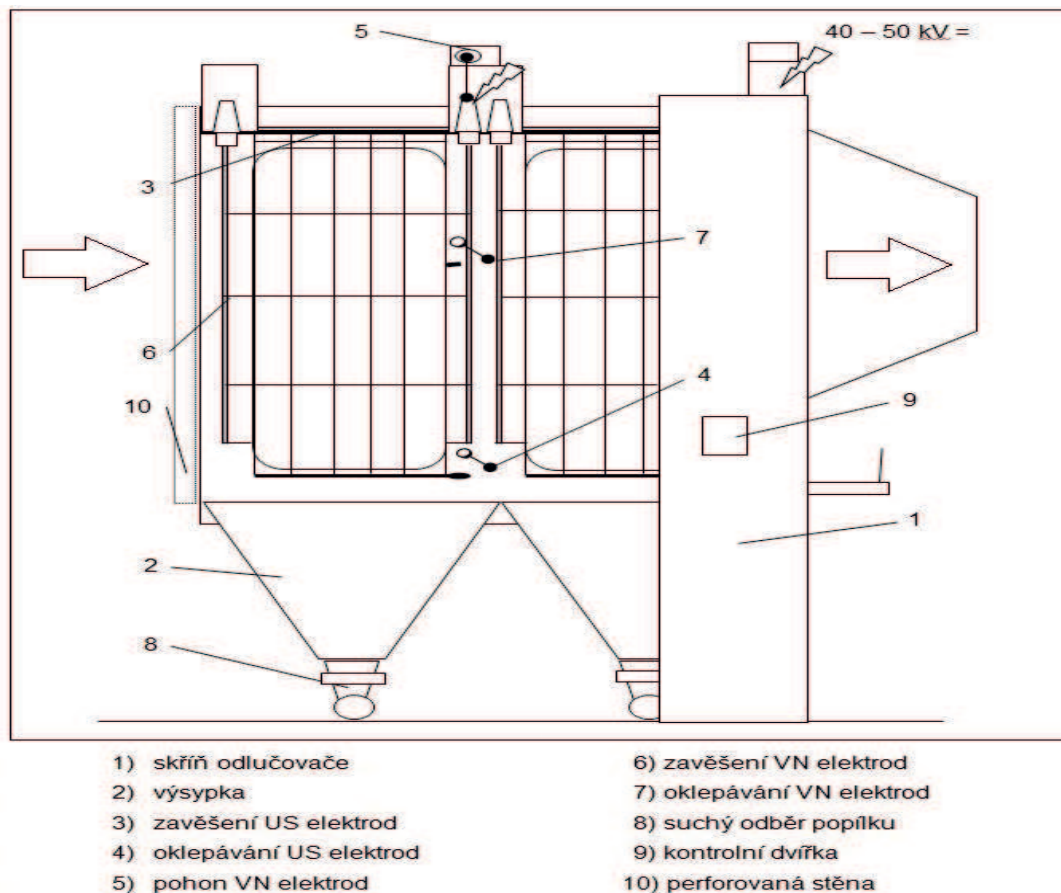
Vystupující kouřové plyny byly vedeny kouřovody, které ve spodní části měnily směr. Zde docházelo k prvnímu odloučení popelovin z plynů spadem popela do tzv. čajníků. Tam byl popel splachován proudem vody a dále transportován k dalšímu zpracování. Poté plyny vstupovaly šikmou stěnou do cyklónu typu BMM, kde byly opět TZL oddělovány gravitačně.

Pro každý kotel bylo nainstalováno 40 cyklónů. Odloučený popílek byl dopravován k následnému zpracování do SOP – suchého odběru popela.



Obr. 2. Mechanický odlučovač – cyklón [17].

Elektroodlučovače byly konstruovány jako komorové se dvěma sekcemi za sebou. Vstupující popílek se nabíjel elektrickým polem, vznikajícím mezi řadami usazovacích a sršících elektrod. Působením elektrických sil se nabitý popílek pohyboval k usazovacím elektrodám a ulpíval na nich. Odloučený popílek po oklepání padal do výsypek, z kterých byl vypouštěn uzávěry do dopravního zařízení SOP.

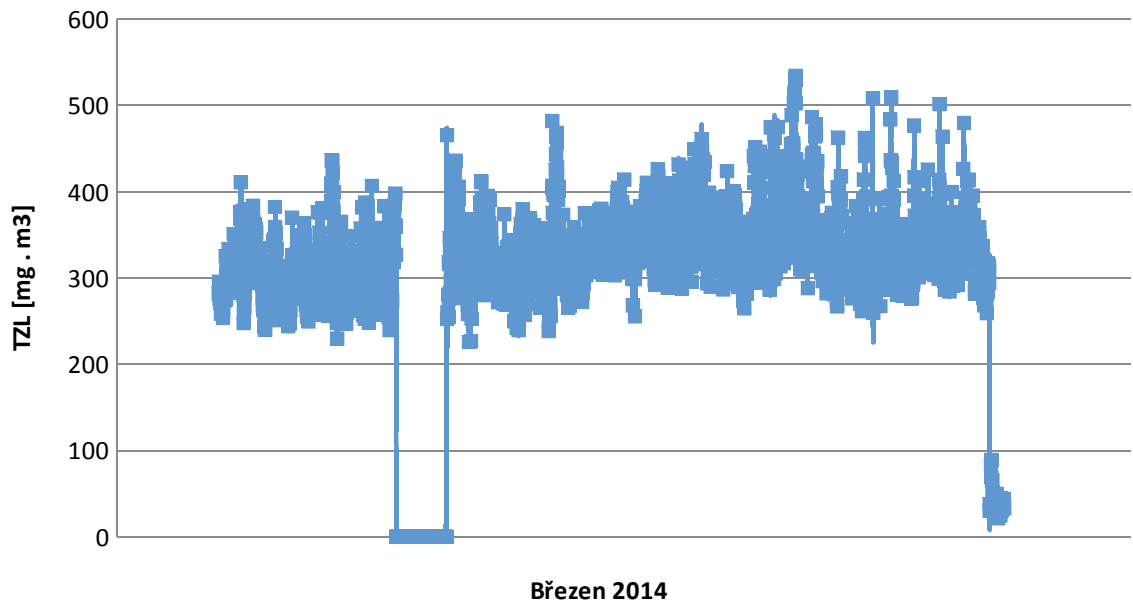


Obr. 3. Schéma elektrostatického odlučovače v EOP před rekonstrukcí [17].

Usazovací elektrody byly zavěšeny na hlavních nosnících. Jednotlivé řady usazovacích elektrod tvořily stěny s vlastním oklepáváním. Řady byly složeny z elektrod SČS 640. Každá sekce měla samostatný oklepávací mechanismus.

VN elektrody – sršící – IZODYN D 5 byly napnuty v trubkových rámech a pomocí rámu zavěšeny na nosných izolátorech. Trubkové rámy s VN elektrodami byly zavěšeny mezi řadami usazovacích elektrod. Oklepáváním se VN elektrody čistily od usazeného prachu [18].

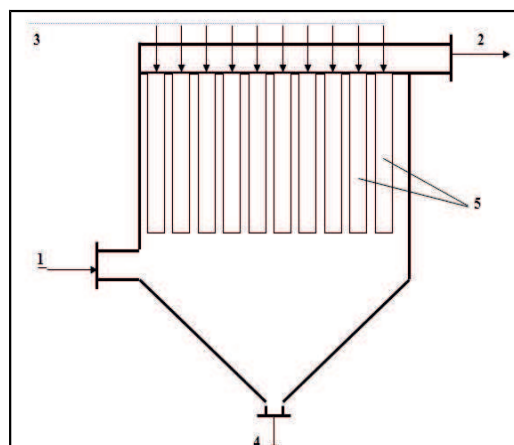
## Emise TZL v EOP před rekonstrukcí



Obr. 4.

## 4.2 Technologie odprašování v EOP po rekonstrukci

System odlučování tuhých znečišťujících látek na bázi mechanických a elektrostatických odlučovačů byl nahrazen odlučovačem moderní koncepce s nejvyšší účinností odlučování částic, patřící do kategorie BAT – *Best Available Techniques*, jako nejpokročilejší stadium vývoje technologií, činností a způsobů jejich provozování, navržených k předcházení, příp. k omezování emisí a jejich dopadů na životní prostředí. Byl instalován tkaninový filtr pro dosažení požadovaného emisního limitu TZL 100 mg/m<sup>3</sup> již před aplikací mokré odsiřovací metody a na výstupu z komínu 20 mg/m<sup>3</sup>. Pro čištění plynů s teplotou kolem 250 °C se používají vlákna typu NOMEX kombinovaná s teflonem. Rychlost proudění plynu filtrační přepážkou je 1-3 cm.s<sup>-1</sup>. Rychlost v prostoru filtru tedy musí značně klesnout proti rychlosti v potrubí. Proto komory filtrů zaujímají velký prostor a navíc jsou tepelně izolovány. Odlučivost textilních filtrů je 99,99 %. Konstrukce rámu a skříně textilních filtrů s výsypkami jsou vyrobeny z ocelových nerezových plechů. Filtrační přepážky jsou nataženy na koších z ocelových drátů. Odprašovaný plyn proudí z venkovní strany filtrační textilie a z odloučeného prachu se na textilií vytváří filtrační koláč. Filtrační materiál je ve tvaru dlouhých hadic.



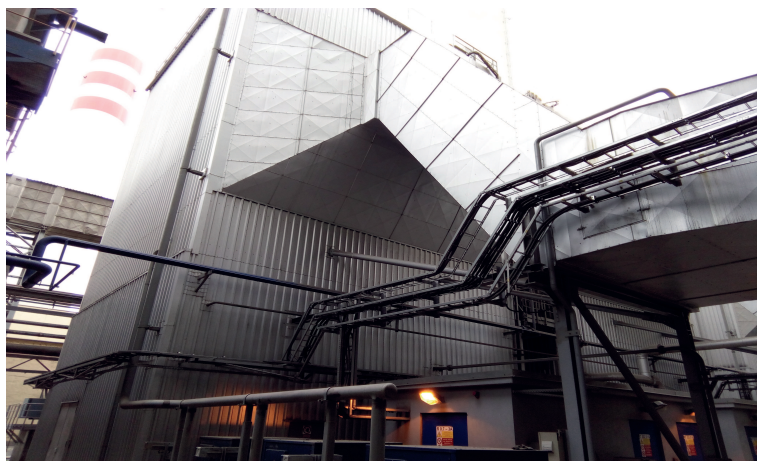
- 1-vstup plynu
- 2-výstup plynu
- 3-přívod tlakového vzduchu pro zpětný proplach
- 4-výsyp odloučeného prachu
- 5-koše s filtrační textilií

Obr. 5. Schéma textilního filtru [13].

Regenerace se provádí za provozu, zpětným proplachem, kde se část filtru (asi 1/4) na krátkou dobu odstaví a spojením prostoru filtru s atmosférou se do filtru přivede okolní vzduch, který protéká filtračním materiálem v opačném směru než čištěný plyn při vlastní filtraci. Fotodokumentace k této technologii odprašování v EOP je uvedena v samostatné příloze této práce.



Obr. 6. Technologie odprašování spalin před rekonstrukcí

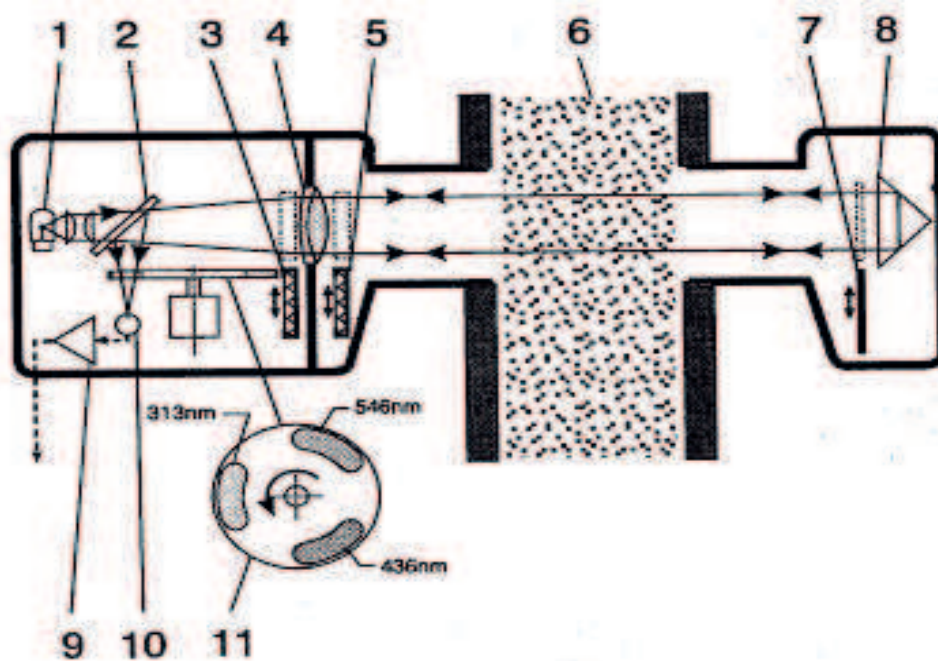
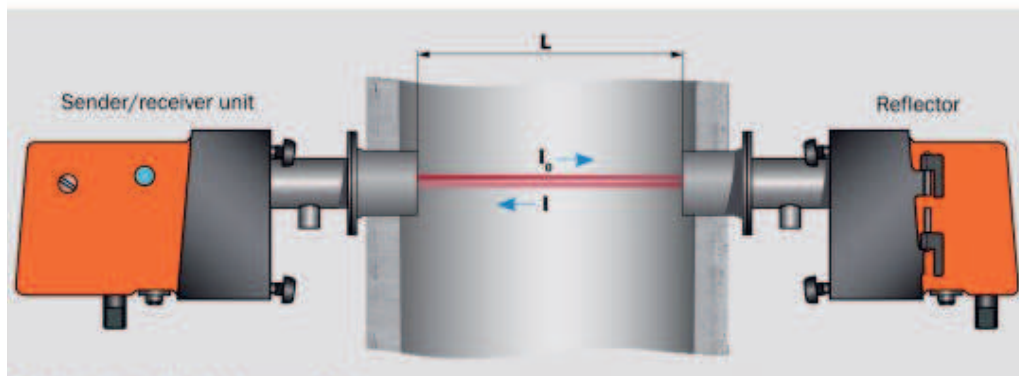


Obr. 7. Technologie odprašování spalin po rekonstrukci



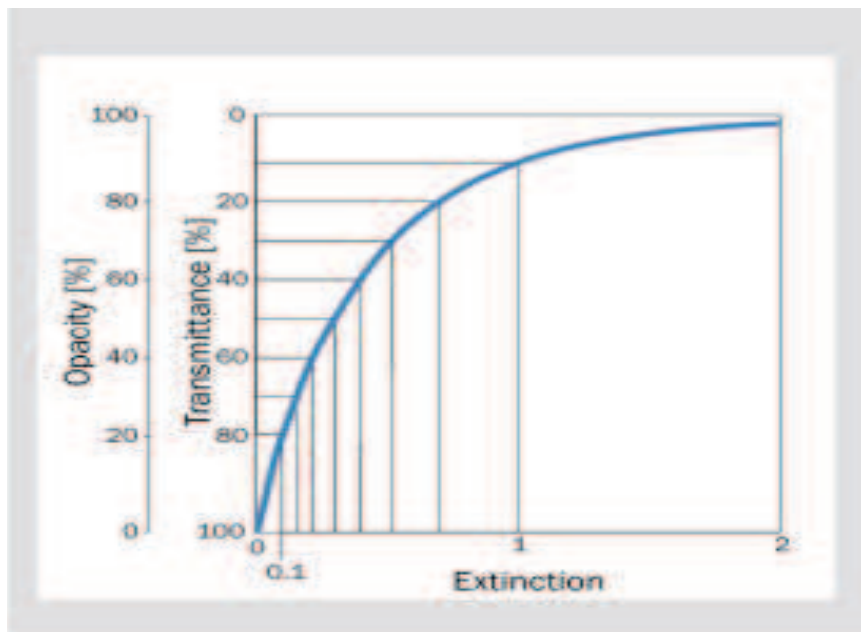
Obr. 8. Rukávový textilní filtr spalin, nejlepší dostupná technika  
BAT – *Best Available Techniques.*

### 4.3 Kontinuální měření TZL po rekonstrukci

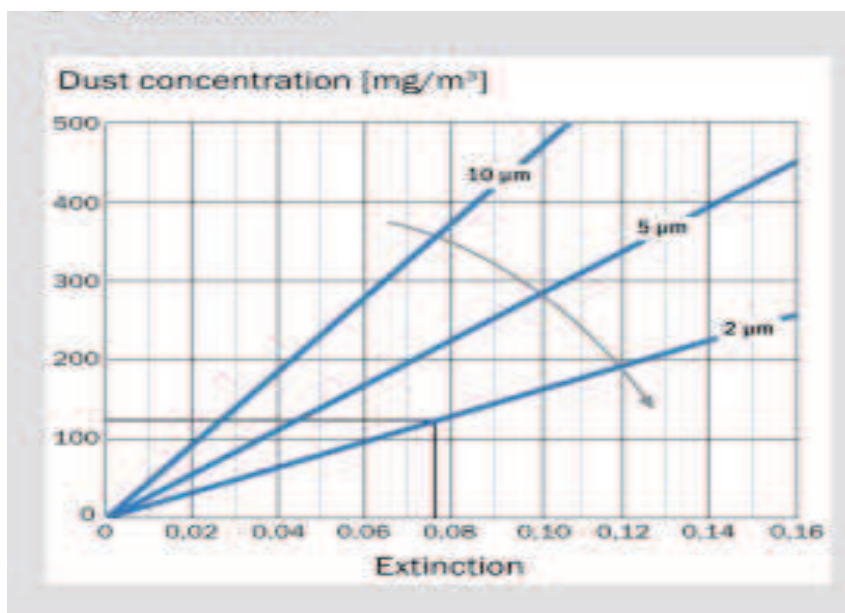


1 - zdroj záření (rtuťová výbojka), 2 - polopropustné zrcadlo, 3 - kontrolní reflektor (čistá strana), 4 - čočka, 5 - kontrolní reflektor (strana kouřovodu), 6 - kouřovod, 7 - kontrolní clona, 8 - hlavní reflektor, 9 - zesilovač, 10 - detektor záření, 11 - rotační clona s interferenčními filtry

Obr. 9. Přístrojová technika pro provozní měření koncentrace prachových částic DUSTHUNTER C200 fy SICK [13].



Obr. 10. Provozní měření koncentrace prachových částic DUSTHUNTER C200 fy SICK kalibrace I [14].



Obr. 11. Metoda stanovení koncentrace prachových částic pomocí DUSTHUNTER C200 fy SICK kalibrace II [13].

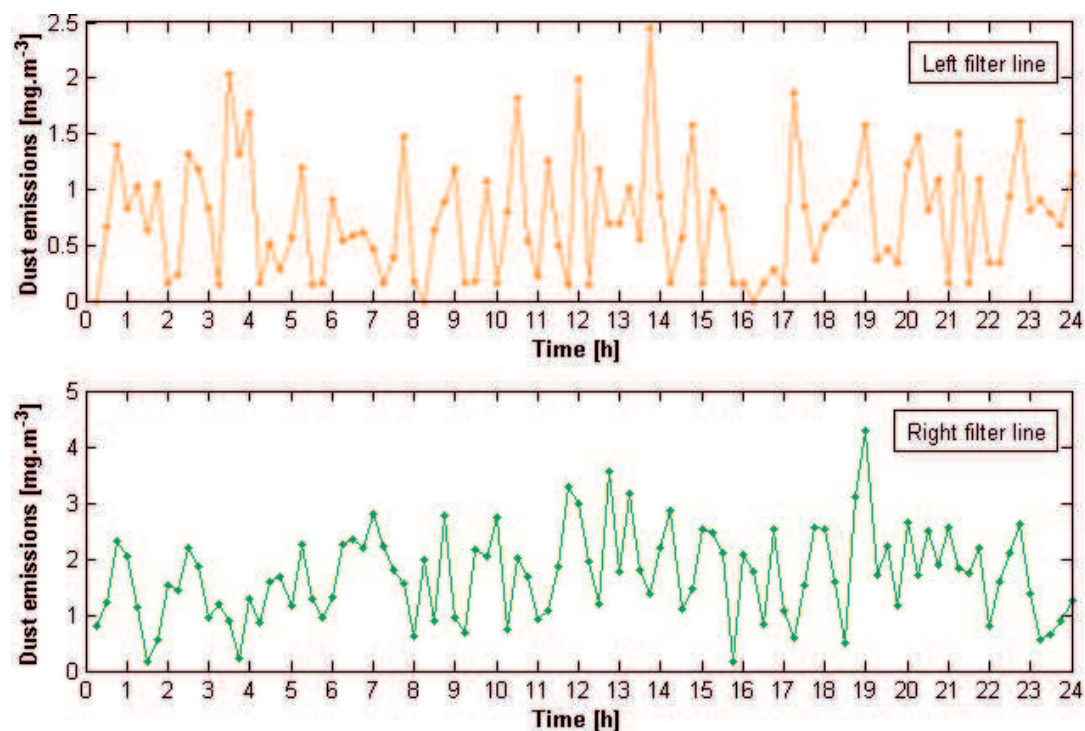


Tab. 2. Ukázka části datového souboru kontinuálního měření emisí TZL

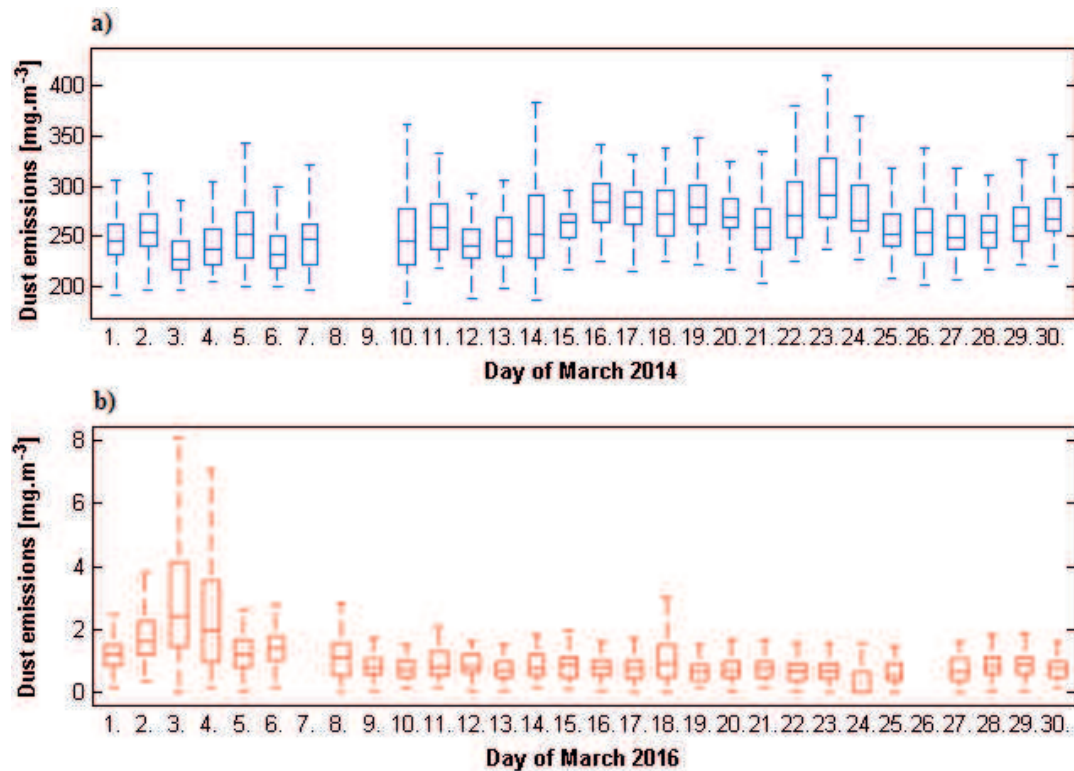
<b>DateTime</b>	<b>A607_levá strana filtru</b>	<b>A607_-pravá strana filtru</b>
út 1.3.2016 00:00:00	0	0,806158304
út 1.3.2016 00:15:00	0,667801619	1,227735043
út 1.3.2016 00:30:00	1,389099002	2,324246883
út 1.3.2016 00:45:00	0,830495298	2,051040888
út 1.3.2016 01:00:00	1,028301954	1,12192297
út 1.3.2016 01:15:00	0,636525989	0,155781493
út 1.3.2016 01:30:00	1,043220043	0,56163758
út 1.3.2016 01:45:00	0,154080302	1,518573999
út 1.3.2016 02:00:00	0,229373604	1,43165195
út 1.3.2016 02:15:00	1,317201972	2,191994905
út 1.3.2016 02:30:00	1,183753967	1,875949025
út 1.3.2016 02:45:00	0,827741623	0,939828277
út 1.3.2016 03:00:00	0,1516947	1,193048954
út 1.3.2016 03:15:00	2,032141924	0,897736728
út 1.3.2016 03:30:00	1,313065052	0,216214299
út 1.3.2016 03:45:00	1,680881977	1,276497006
út 1.3.2016 04:00:00	0,153689399	0,863690913
út 1.3.2016 04:15:00	0,517523289	1,576650023
út 1.3.2016 04:30:00	0,275236189	1,686880946
út 1.3.2016 04:45:00	0,564657986	1,160750985
út 1.3.2016 05:00:00	1,195248961	2,2616961
út 1.3.2016 05:15:00	0,150615901	1,299404979
út 1.3.2016 05:30:00	0,163836896	0,968272328
út 1.3.2016 05:45:00	0,910814583	1,315597057
út 1.3.2016 06:00:00	0,54074502	2,261044979
út 1.3.2016 06:15:00	0,590381622	2,361187935
út 1.3.2016 06:30:00	0,623565078	2,18285203
út 1.3.2016 06:45:00	0,46549949	2,78933692
út 1.3.2016 07:00:00	0,157888606	2,21823597

<b>DateTime</b>	<b>A607_levá strana filtru</b>	<b>A607_-pravá strana filtru</b>
út 1.3.2016 08:15:00	0,626012325	0,903411984
út 1.3.2016 08:30:00	0,895220578	2,772773027
út 1.3.2016 08:45:00	1,18679595	0,957039118
út 1.3.2016 09:00:00	0,161166593	0,67359221
út 1.3.2016 09:15:00	0,171992093	2,163379908
út 1.3.2016 09:30:00	1,081583023	2,049458981
út 1.3.2016 09:45:00	0,154068694	2,738886118
út 1.3.2016 10:00:00	0,802616417	0,755479872
út 1.3.2016 10:15:00	1,824687004	2,023024082
út 1.3.2016 10:30:00	0,547460794	1,68029201
út 1.3.2016 10:45:00	0,227461994	0,912829995
út 1.3.2016 11:00:00	1,265146971	1,061632037
út 1.3.2016 11:15:00	0,500848114	1,858297944
út 1.3.2016 11:30:00	0,147857502	3,279845953
út 1.3.2016 11:45:00	1,993662953	2,971184015
út 1.3.2016 12:00:00	0,148960203	1,947667003
út 1.3.2016 12:15:00	1,181228042	1,186828971
út 1.3.2016 12:30:00	0,691246808	3,57397604
út 1.3.2016 12:45:00	0,693254411	1,771221995
út 1.3.2016 13:00:00	1,007912993	3,159957886
út 1.3.2016 13:15:00	0,551335812	1,804265022
út 1.3.2016 13:30:00	2,443065882	1,385318995
út 1.3.2016 13:45:00	0,931172192	2,190311909
út 1.3.2016 14:00:00	0,156791598	2,866991043
út 1.3.2016 14:15:00	0,57773298	1,114917994
út 1.3.2016 14:30:00	1,582790971	1,465101004
út 1.3.2016 14:45:00	0,155553907	2,534662962
út 1.3.2016 15:00:00	0,977809012	2,479883909
út 1.3.2016 15:45:00	0,158027202	2,066219091
út 1.3.2016 16:00:00	0,282481402	1,760699034

4.4 Grafické zpracování hodnot kontinuálního měření TZL za jeden měsíc [19].



Obr. 12.



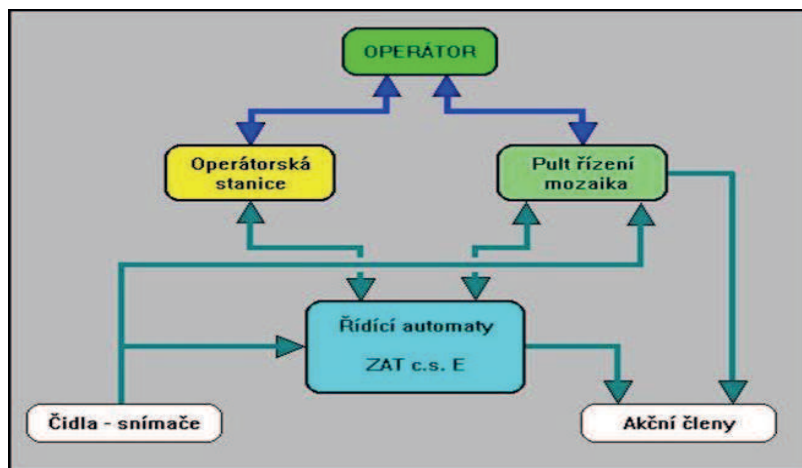
Obr. 13.

#### 4.5 Princip sběru a přenosu dat při kontinuálním měření TZL

Sběr a přenos naměřených dat v současné době probíhá podle schématu podle uvedeného na obr. 14. Snímání obsahu TZL je prováděno v oblasti za tkaninovým filtrem. Protože filtr se skládá ze dvou částí (linek), jsou použita dvě čidla - každé pro jednu linku. Měření tedy probíhá kontinuálně v obou linkách. Naměřená data udávají množství prachových částic ve splodinách v jednotkách  $\text{mg}/\text{m}^3$ .

Z čidel jsou data posílána do řídicího pultu typu „mozaika“ a do řídicího automatu ZAT. Tento programovatelný automat je určen pro řízení technologických procesů (může posílat řídicí data do akčních členů) i pro vyhodnocování stavu ovládaných zařízení.

ZAT je dále připojen k operátorské stanici a k řídicímu pultu. Komunikace ZAT s operátorskou stanicí i řídicím pultem probíhá obousměrně, operátor navíc může z řídicího pultu ovládat akční členy systému přímo, bez použití řídicího automatu ZAT. Pro řízení a monitorování procesu měření je použit softwarový nástroj Promotic, který umožňuje vytvářet aplikace přesně podle požadavků použité technologie [13]. Jedná se o tzv. SCADA (Supervisory, Control And Data Acquisition) systém neboli systém pro dohled, řízení a sběr dat. Získaná data lze dále zpracovávat a uložit např. v podobě tabulky nebo grafu .



Obr. 14. Schéma řízení sběru dat ze snímačů TZL v EOP [12].

## 5. DISKUSE A ZÁVĚRY

V Elektrárně Opatovice n. Lab. (EOP) byly před rekonstrukcí používány dvě technologie snižování úletu tuhých znečišťujících látek (TZL). Systém odlučování TZL na bázi mechanických a elektro-statických odlučovačů byl nahrazen odlučovačem moderní koncepce s nejvyšší účinností odlučování částic, patřící do kategorie BAT – *Best Available Techniques*, jako nejpokročilejší stadium vývoje technologií, navržených k předcházení, příp. k omezování emisí a jejich dopadů na životní prostředí. Byl zde instalován nákladný tkaninový filtr pro dosažení požadovaného emisního limitu TZL 100 mg/m<sup>3</sup> již před aplikací mokré odsiřovací metody a na výstupu z komínu 20 mg/m<sup>3</sup>.

Úkolem bakalářské práce bylo v teoretické části popsat fyzikální principy odlučování TZL ze spalin v uhelných elektrárnách, přístrojovou techniku pro kontinuální monitorování tuhých znečišťujících látek a systémy kontinuálních měření. V experimentální části práce popsat inovovaný postup odprašování spalin a kontinuálního měření TZL včetně sběru a přenosu naměřených dat v EOP. Cílem bylo bakalářskou práci zpracovat tak, aby vytvořené texty mohly sloužit jako součást zpracovávaných studijních podpor pro exkurze a odborné praxe studentů v Elektrárnách Opatovice a.s.

Systematický biomonitoring toxických kovů na česko-polské přeshraniční oblasti probíhal za podpory několika na sebe navazujících projektů OPPS ČR-PR, v letech 2012-2014 s názvem „Propagace výzkumu kvality životního prostředí přeshraniční polsko-české oblasti“, reg.č. PL.3.22/2.3.00/11.02553. Vyhodnocování dat a sestavování publikace uvedené v příloze této práce probíhalo při stáži na Přírodovědno-technické fakultě Univerzity Opole, podporované grantovým projektem OP VK CZ.1.07/2.2.00/28.0118 „Inovace studijních oborů zajišťovaných katedrami PřF UHK“.

V Příloze I této práce je shromážděna fotodokumentace autora z rekonstruované technologie odprašování spalin pomocí textilních filtrů z Elektrárny Opatovice n. Lab.

Sběry 90 vzorků bioindikátorů (jehličí ze smrků a borovic, listy bříz) a vzorků půdy z okolí devíti referenčních bodů jsou podrobně popsány, včetně fotodokumentace autora, v samostatné Příloze II této práce. Výsledky této práce budou sloužit jako podklady pro modelování spadů toxických kovů v TZL, v rámci sledování rekreační česko-polské přeshraniční oblasti pomocí biomonitoringu, v rámci spolupráce EOP a.s, UHK a WPT UO, podporovaného přeshraničními projekty EU.

## Použitá literatura

- [1] ÚŘEDNÍ VĚSTNÍK EVROPSKÉ UNIE: Směrnice Evropského parlamentu a Rady o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění). In: 2010/75/EU. Štrasburk, 2010, L334, sv. 53. [cit. 2016-05-29]. Dostupné z:
- [2] SBÍRKA ZÁKONŮ ČESKÁ REPUBLIKA: Vyhláška č. 415 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. Břeclav: Moraviapress, 2012. sv. 151. ISBN 1211-1244[cit. 2016-05-29].. Dostupné z:
- [3] RUBEK, J., PLISKA, J. Moderní trendy v optimalizaci provozu elektráren a tepláren. Automa, 2007, roč. 13, č. 5, s. 28-30. ISSN 1210-9592.
- [4] HEMERKA, J., HRDLIČKA, F. Emise z kotelen a ochrana ovzduší (I) [online]. Praha, 2004 [cit. 2016-05-30]. Dostupné z:
- [5] HEMERKA, J., HRDLIČKA, F. Emise z kotelen a ochrana ovzduší (II) [online]. Praha, 2004 [cit. 2016-06-3]. Dostupné z:
- [6] HEMERKA, J., HRDLIČKA, F. Emise z kotelen a ochrana ovzduší (III) [online]. Praha, 2004 [cit. 2016-06-4]. Dostupné z:
- [7] DONALDSON: Cartige filters. [online], [cit. 2016-5-18] Dostupné z:
- [8] KADLEC K.: Provozní analyzátory plynů. AUTOMA 10, (2001)
- [9] BARTOVSKÝ T.:  
Analyzátory kouřových plynů (část I) AUTOMA 8-9 (2011), s. 13-16
- [10] BARTOVSKÝ T.: Analyzátory kouřových plynů (část II) AUTOMA 12 (2011), s. 34-37
- [11] BARTOVSKÝ T.: Analyzátory kouřových plynů (část III) AUTOMA 18, 4 (2012), s. 42-45.
- [12] Elektrárny Opatovice a.s.-ekologický program
- [13] SICK. OMD41 Dust Concentration Monitor: Operating Instructions. Reute Germany,

- [14] DOŁHAŃCZUK-ŚRÓDKA A., ZIEMBIK Z., KŘÍŽ J., HYŠPLEROVÁ L., WACŁAWEK M.: Pb-210 isotope as a pollutant emission indicator. *Ecological Chemistry and Engineering S.* 2015, 22(1), 49-59.
- [15] Bubník, J., Keder, J., Macoun, J., Maňák, J. (2006): SYMOS'97, Výpočet znečištění ovzduší, Nakladatelství ČHMÚ, Praha, 46 s. ISBN 80-85813-55-6,. Dostupné na:
- [16] SLABÝ L.: Rozptylová studie. Ekolog. program elektrárny Opatovice n. Lab. 2012. 80s.
- [17] ŠTĚPÁNEK, V.: Kontinuální monitorovací systémy emisí uhelné elektrárny. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové, 2014, 50 s.
- [18] ŠTĚPÁNEK V, EMINGER S, STOKLAS D., KLÍMOVÁ S., HYŠPLEROVÁ L, KŘÍŽ J.: Emisja toksycznych metali z dużych elektrowni węglowych na czesko-polskim pograniczu. Modele matematyczne. In: Propagowanie badań jakości środowiska na transgranicznym obszarze polsko-czeskim. BASNET, Opole, 2014, s. 218-230. ISBN 978-83-916958-5-2.
- [19] LOSKOT J., ŠTĚPÁNEK V., SMOLÍK M., HYŠPLEROVÁ L., TRNKOVÁ L., KŘÍŽ J.: Modeling and biomonitoring of heavy metals from large solid fuel combustion in the czech-polish border region. *Proc ECOpole.* 2016 (v tisku).
- [22] Firemní materiály Elektrárny Opatovice
- [23] Automatizační prostředky společnosti ZAT [online]. *Automa*, časopis pro automatizační techniku. Dostupné z:
- [24] Webový portál systému Promotic [online]. Dostupné z:

# PŘÍLOHA

*Publikace:*

ŠTĚPÁNEK V, EMINGER S, STOKLAS D., JEŽ I., KLÍMOVÁ S., HYŠPLEROVÁ L, KŘÍŽ J.: Emisja toksycznych metali z dużych elektrowni węglowych na czesko-polskim pograniczu. Modele matematyczne. In: Propagowanie badań jakości środowiska na transgranicznym obszarze polsko-czeskim. BASNET, Opole, 2014, s. 218-230. ISBN 978-83-916958-5-2.