

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Hodnocení znečištění ovzduší z uhelné teplárny
v Klatovech**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch ŠENKÝŘ**
Osobní číslo: **E13B0261P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Technická ekologie**
Název tématu: **Hodnocení znečišťování ovzduší z uhelné teplárny v Klatovech**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište technologické zařízení teplárny.
2. Proveďte analýzu množství i složení emisí do ovzduší, porovnejte naměřené koncentrace s emisními limity a vyhodnoťte trend jejich vývoje za delší časové období.
3. Navrhněte možnosti a technologie k dalšímu omezení znečišťování ovzduší.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Jan Škorpil, CSc.**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Anotace

Cílem této bakalářské práce je zhodnocení plnění současných emisních limitů platných do 31.12.2017 a limitů nových, platných od 1.1.2018 z uhelného kotle K4 v Klatovské teplárně. Součástí práce je popis technologického zázemí teplárny, krátký úvod do problematiky vzniku škodlivin při spalování a souhrn nejpoužívanějších metod denitrifikace a odsiřování spalin. Závěr práce je věnován návrhu možností ke snížení koncentrací SO₂ tak, aby byly Klatovskou teplárnou splněny nové emisní limity.

Klíčová slova

teplárna, spalování uhlí, kotle, čištění spalin, odsiřování, denitrifikace, emise

Annotation

Goal of this thesis is to evaluate performance of meeting present emission limits valid to 31.12.2017 and new limits valid after 1.1.2018 from coal boiler K4 in Klatovy heating plant. Thesis also contain description of technologies used in the heating plant, basics of pollutants creating by burning and summary of the most used technologies for denitrification and desulphurisation of fuel gas. In conclusion there is a suggestion of desulphurisation technology that should be used in Klatovy heating plant to meet the new emission limits.

Key words

heating plant, coal burning, boilers, fuel gas cleaning, desulphurisation, denitrification, emission

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

.....

podpis

V Plzni dne 31.5.2017

Vojtěch Šenkýř

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat zaměstnancům Klatovské teplárny, zejména panu Strádalovi, za poskytnutí materiálů potřebných pro vytvoření této práce a také za ochotu při vysvětlování chodu teplárny.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 KLATOVSKÁ TEPLÁRNA – ZÁKLADNÍ TECHNICKÝ POPIS	11
1.1 POUŽÍVANÁ PALIVA.....	12
1.1.1 Hnědé uhlí	12
1.1.2 Těžký topný olej	12
1.1.3 Zemní plyn	12
1.1.4 Nafta	12
1.2 KOTLE – ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA	13
1.2.1 Kotel K1.....	13
1.2.2 Kotel K2.....	13
1.2.3 Kotel K3.....	14
1.2.4 Kotel K4.....	14
1.3 ČIŠTĚNÍ SPALIN	15
1.3.1 Kotle K1-K3.....	15
1.3.2 Kotel K4.....	15
1.4 KVET	18
1.4.1 Parní turbína STG I.....	18
1.5 DISTRIBUCE TEPLA	19
2 ANALÝZA MNOŽSTVÍ A SLOŽENÍ EMISÍ Z KLATOVSKÉ TEPLÁRNY	20
2.1 VZNIK ŠKODLIVIN VE SPALINÁCH OBECNĚ	20
2.1.1 Tuhé znečišťující látky	20
2.1.2 Oxid uhelnatý.....	21
2.1.3 Oxidy dusíku	21
2.1.4 Oxid siřičitý	21
2.2 MĚŘENÍ EMISÍ NA KOTLI K4 A SOUVISEJÍCÍ LEGISLATIVA	22
2.3 GRAFY NAMĚŘENÝCH HODNOT	25
2.3.1 Koncentrace škodlivin ve spalinách	25
2.3.2 Roční úlet škodlivin do ovzduší	27
2.4 VYHODNOCENÍ PLNĚNÍ LIMITŮ V TEPLÁRNĚ KLATOVY	29
2.4.1 Z hlediska limitů platných do 31.12.2017	29
2.4.2 Z hlediska limitů platných od 1.1.2018	29
3 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ OVLIVŇUJÍCÍCH KONCENTRACE ŠKODLIVIN VE SPALINÁCH	30
3.1 ZPŮSOBY SNÍŽENÍ OXIDŮ DUSÍKU	30
3.1.1 Primární opatření.....	30
3.1.2 Sekundární opatření	30
3.2 ODSÍŘOVÁNÍ SPALIN.....	32
3.2.1 Suchá metoda odsíření	32
3.2.2 Polosuchá metoda odsíření	34

3.2.3	<i>Mokrý metoda odsíření</i>	35
3.3	ŘEŠENÍ VHODNÉ PRO KLATOVSKOU TEPLÁRNU.....	37
4	ZÁVĚR	39
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	40
	SEZNAM PŘÍLOH	1

Seznam symbolů a zkratk

KVET	Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla (též kogenerace)
TTO	Těžký topný olej
ZP	Zemní plyn
HU	Hnědé uhlí
NV	Napájecí voda
PP	Přehřátá pára
t/h	Výkon kotle v tunách vyrobené páry za hodinu
K1/K2/K3/K4	Označení kotlů
O _C	Celková odlučivost
V	Objemový průtok
Δp_z	Tlaková ztráta
t _{MAX}	Maximální teplota nosného media
p _{MAX}	Maximální tlak nosného media
W _t ^r	Obsah veškeré vody v uhlí v původním stavu
A ^d	Obsah popela v uhlí v bezvodném stavu
S ^r	Obsah síry v uhlí v původním stavu
Q _i ^f	Výhřevnost uhlí v původním stavu
TZL	Tuhé znečišťující látky

Úvod

V této práci se zabývám návrhem možných technologií ke snížení znečišťování ovzduší z uhelného kotle K4 v Klatovské teplárně, tak aby splňoval emisní limity platné od 1.1.2018. Důvodem ke zpřísnění emisních limitů, je zajištění snižování zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší.

K návrhu samotnému je potřeba znát pozadí vzniku škodlivin obsažených v emisích z centrálního zdroje tepla v Klatovech. Proto se v kapitole první věnuji popisu technologického zařízení teplárny včetně používaných paliv.

V úvodu druhé kapitoly se věnuji obecnému popisu vzniku škodlivin. Následuje popis měření koncentrací a množství škodlivin na kotli K4, vyhodnocení hodnot naměřených mezi lety 2012 až 2016, a jejich porovnání se současnými i plánovanými limity stanovenými legislativou.

V kapitole třetí se zabývám současnými možnostmi snížení koncentrací SO_2 a NO_x ve spalinách a návrhem odsiřovací technologie vhodné k použití v Klatovské teplárně.



Obrázek 1: Kotel K4 včetně zařízení pro čištění spalin (foto autor)

1 Klatovská teplárna – základní technický popis

V roce 1968 bylo rozhodnuto o výstavbě centrálního zdroje tepla v Klatovech, primárně pro dodávku tepla velkoodběratelům jako Masokombinát Klatovy nebo podniky Kozak a Jitona, a sekundárně také pro bytový sektor. Hlavní investor stavby byl Masokombinát Klatovy. Teplárna zahájila svůj provoz v listopadu roku 1976 s celkem třemi kotli (K1, K2, K3).

V roce 1998 byla provedena první větší modernizace, při které byl nahrazen již zastaralý kotel K2 za novější s větším výkonem a účinností. Zároveň byla také zavedena kombinovaná výroba elektrické energie a tepla (dále KVET). V roce 2008 byl do provozu uveden roštový kotel s prvky fluidní technologie spalující hnědé uhlí. Do té doby bylo teplo vyráběno výhradně spalováním těžkého topného oleje (dále TTO) nebo zemního plynu.

V současné době teplárna disponuje celkem čtyřmi kotli (K1-K4) schopnými vyrobit až 61 tun páry za hodinu. Pokrytí spotřeby tepla z centrálního zdroje je z větší části zajišťováno spalováním hnědé uhlí v kotli K4, který podle potřeby doplňují ostatní kotle spalující TTO nebo zemní plyn. Mimo teplárnu samotnou, je výroba tepla zajištěna ještě v celkem 21 plynových kotelnách rozmístěných po městě. Celkově Klatovská teplárna dodává teplo pro více než 4000 bytů (59 % z celkového odběru) i pro průmysl (41 % z celkového odběru), kde největší odběratel je Klatovská nemocnice a.s.

Výrobu elektřiny zajišťuje protitlaková parní turbína o instalovaném výkonu 400 kW a také fotovoltaická elektrárna o výkonu 29,76 kW, která je využívána hlavně pro vlastní účely teplárny.

Celková roční produkce činí 250 000 GJ tepla a 1 300 000 kWh elektrické energie.

1.1 Používaná paliva

1.1.1 Hnědé uhlí

Uhlí obchodně značené jako HP1(135) pochází z Dolů Bílina provozovaných společností Severočeské doly a.s. Hruboprach o parametrech $W_t^r = 29 \%$; $A^d = 13,1 \%$; $S^r = 0,84 \%$ a $Q_i^r = 17,0 \text{ MJ/kg}$ je již v dolech upravován na zrnka o průměru do 1 cm. Uhlí je dováženo vlakem na železniční nádraží v Klatovech, odkud se převáží nákladními automobily do částečně krytého skladu o celkové kapacitě 1125 m^3 (~900t uhlí). Celková spotřeba uhlí činí přibližně 11 500 t/rok.

1.1.2 Těžký topný olej

Maximální uskladnitelná kapacita činí $2 \times 1000 \text{ t}$, takové množství vystačí přibližně na 2 roky. Výhřevnost TTO se pohybuje kolem 41 MJ/kg . Po roce 2017 se z ekonomických důvodů počítá s ukončením jeho využívání a přechodem pouze na zemní plyn.

1.1.3 Zemní plyn

Zemní plyn je dodáván přípojkou z rozvodné sítě. Má oproti TTO nižší výhřevnost, přibližně 34 MJ/kg , ale ze všech fosilních paliv produkuje při spalování nejméně škodlivin. Emise NO_x jsou v porovnání s uhlím nižší až o 30% a vzniká také nejméně CO_2 na jednotku uvolněné energie. V porovnání s hnědým uhlím se při spalování zemního plynu uvolňuje pouze 50% emisí CO_2 a 75% v porovnání s kapalnými palivy. Obsahuje také velmi malé množství sloučenin síry, takže emise SO_2 jsou také minimální. Často je označován jako ekologické palivo.

1.1.4 Nafta

Využívá se při najíždění kotle do provozu.

1.2 Kotle – základní charakteristika

Kotle K1, K2 a K3 spalují těžký topný olej a zemní plyn – tedy tekutá paliva. Takové kotle se od kotlů na paliva tuhá liší už kvůli samotné výhřevnosti paliv, která je řádově o několik desítek MJ/kg vyšší v porovnání s hnědým uhlím. Mají nižší ztráty a díky zanedbatelnému obsahu popeloviny není nutné odvádět tuhý zbytek. Spalování tekutých paliv je oproti tuhým palivům velice rychlé a je zde tedy lepší přenos tepla konvekcí. Odpadají některé ztráty vznikající spalováním paliv tuhých, jako jsou například ztráty mechanickým nedopalem a ztráty teplem tuhých zbytků. Mají jednodušší palivové hospodářství, snáze se najíždí a u správně pracujícího hořáku lze dosáhnout nižšího přebytku vzduchu (množství vzduchu dodávaného navíc tak, aby došlo ke správnému promísení s palivem).

Kotel K4 je roštový s prvky fluidní technologie. Fluidní kotle spalují palivo ve vznosu nad roštem. Vznos je udržován průtokem vzduchu skrz pórovité dno roštu. Mezi výhody fluidních kotlů od roštových patří dobrá regulace teploty spalování, a tím pádem příznivý dopad na vznik NO_x ve spalinách. Díky dostatečné době zdržení paliva v kotli, lze účinněji snížit tvorbu SO₂ přímo v kotli bez potřeby budování odsiřovacího zařízení za kotlem. Oproti roštovým kotlům mají lepší využití plochy roštu. Díky nižší teplotě spalin mají také menší komínovou ztrátu. Určitou nevýhodou je pak vyšší náročnost na granulometrii paliva.

1.2.1 Kotel K1

Instalován roku 1973, výrobce ČKD Dukla. Jmenovitý výkon 10 t/h. Kotel je konstruován na tlak 1,25 MPa. Teplota napájecí vody na vstupu do kotle je 105 °C, totožná u všech kotlů. Teplota přehřáté páry na výstupu kotle je 220 °C. Jako palivo se využívá pouze TTO.

1.2.2 Kotel K2

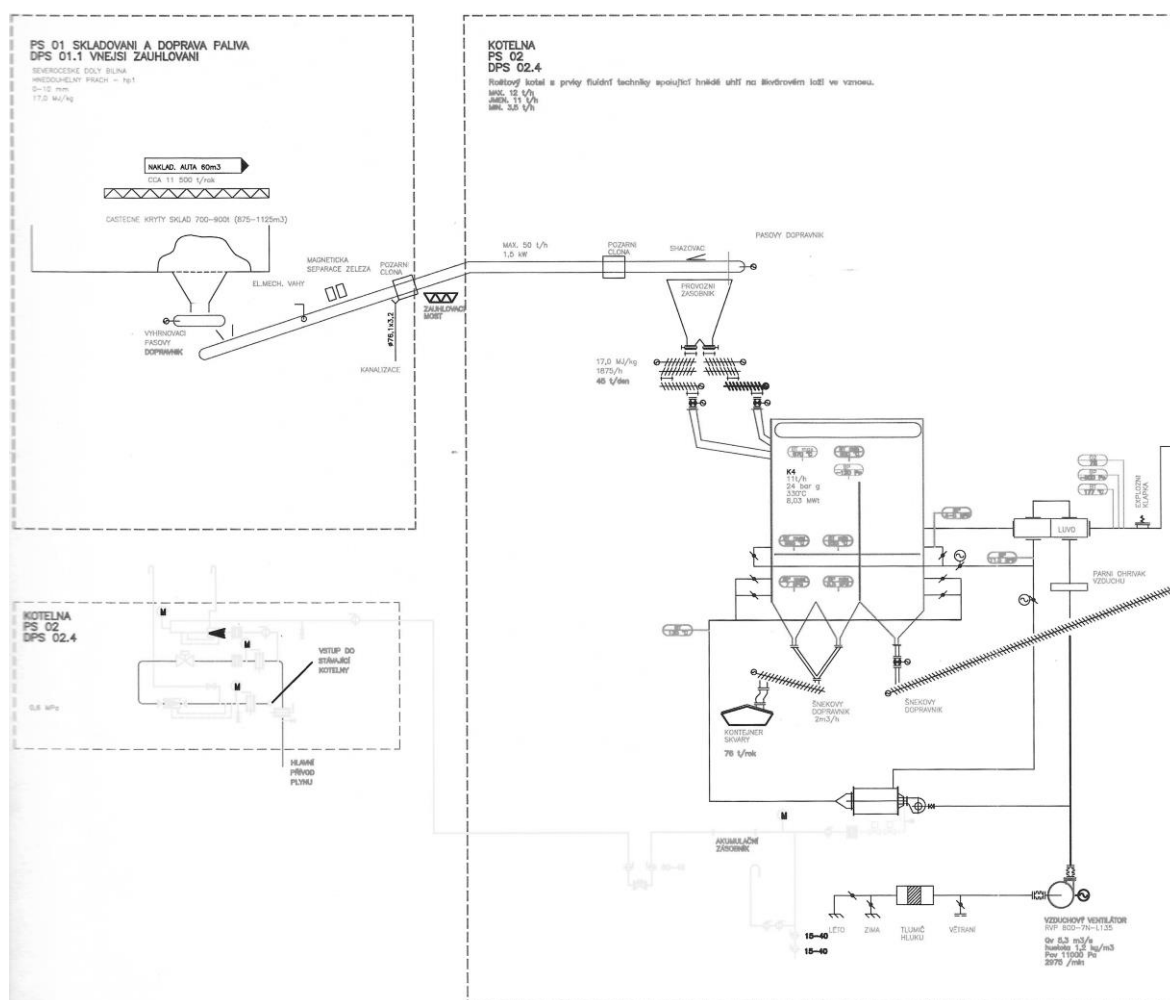
Kotel K2 prošel jako jediný z původních kotlů kompletní výměnou, a to při modernizaci v roce 1998. Dodavatel ČKD Dukla. Jmenovitý výkon činí 25 t/h. Konstrukční tlak je 2,4 MPa. Je vybaven dvěma hořáky, jak na spalování TTO, tak zemního plynu. Teplota přehřáté páry je 330 °C.

1.2.3 Kotel K3

Instalován roku 1973, výrobce ČKD Dukla. Jmenovitý výkon 15 t/h. Konstrukční tlak 1,25 MPa. Oproti kotli K2 má pouze jeden hořák schopný spalovat TTO i zemní plyn. Teplota přehřáté páry na výstupu z kotle je 220 °C.

1.2.4 Kotel K4

Nejnovější kotel, zajišťující až 75 % dodávky tepla. Dodán v roce 2008 firmou EGS Hodonín. Kotel umožňuje spalování dřevní štěrpy do objemu 20 % z primárního paliva, nicméně se spalování biomasy nevyužívá. Jmenovitý výkon 11 t/h. Jmenovitý tlak 2,5 MPa. Teplota napájecí vody 105 °C. Teplota přehřáté páry 330 °C.



Obrázek 2: Schéma kotelny K4

Pro přehlednost udávám tabulku jednotlivých parametrů pro všechny kotle:

Kotel	K1	K2	K3	K4	Celkem
Výrobce	ČKD Dukla	ČKD Dukla	ČKD Dukla	EGS Hodonín	
Rok instalace	1973	1998	1973	2008	
Jmenovitý příkon [MW _t]	8,01	19,96	11,49	9,38	48,86
Jmenovitý výkon [MW _t]	6,73	18,36	10	8,07	43,16
Jmenovitý výkon [t/h]	10	25	15	11	61
Jmenovitý výkon KVET [MW _t]	-	18,36	-	8,07	26,43
Jmenovitý tlak [MPa]	1,25	2,4	1,25	2,5	
Jmenovitá teplota PP [°C]	220	330	220	330	
Jmenovitá teplota NV [°C]	105	105	105	105	
Palivo	TTO	TTO/ZP	TTO/ZP	HU	

Tabulka 1: Sestava kotlů v Klatovské teplárně

1.3 Čištění spalin

1.3.1 Kotle K1-K3

Spaliny z kotlů spalující TTO a zemní plyn splňují stanovené emisní limity a nijak se tedy nečistí. Rozdíly od spalování tuhých paliv jsou popsány v kapitole 1.2.

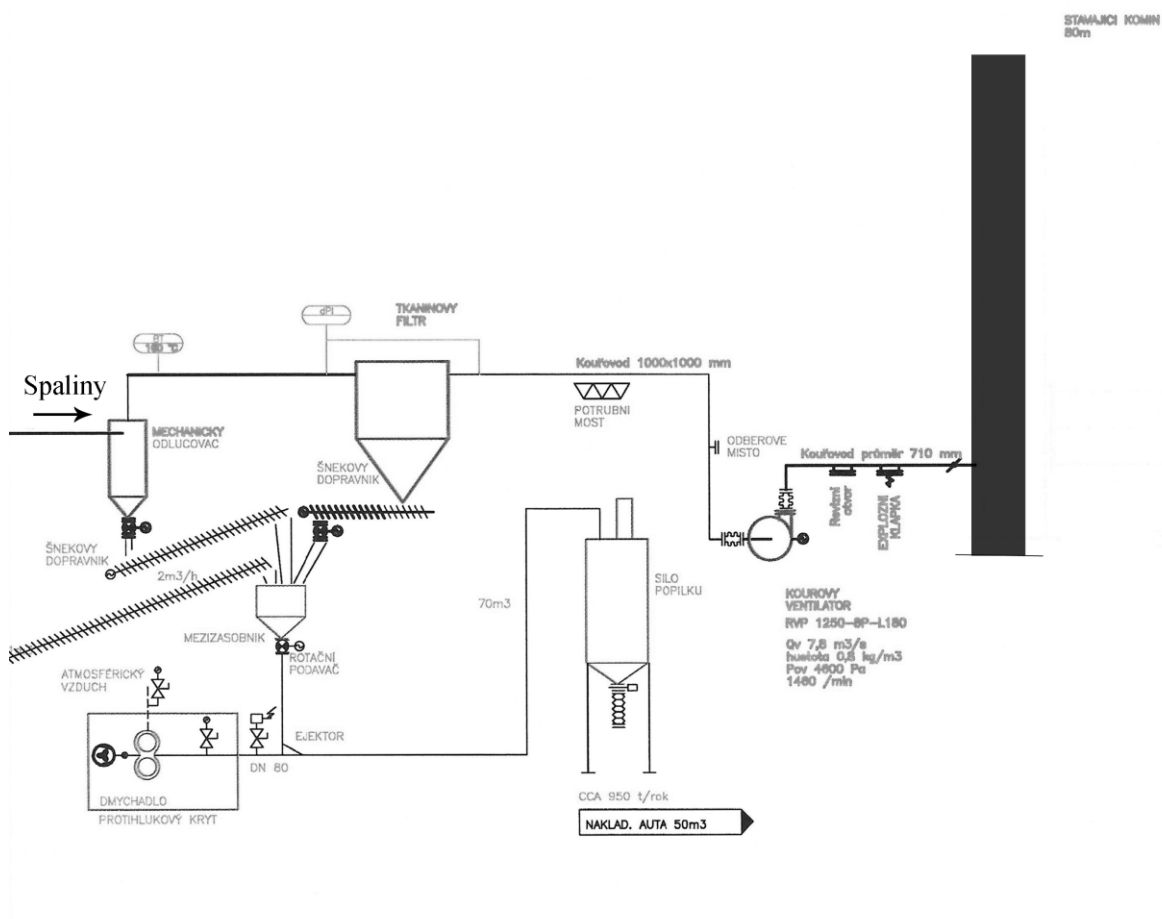
1.3.2 Kotel K4

Velká část tuhého úletu je odloučena hned za kotlem v mezitahu, kde díky svojí vlastní váze největší frakce popela klesají na dno komory. Dále spaliny putují do cyklonového odlučovače, kde se odstředivou silou odloučí větší frakce popela. Za cyklonem je řazený tkaninový filtr dočišťující spaliny od menších frakcí. Na přelomu roku 2016/2017 byla v Klatovské teplárně, jako první krok ke splnění nových emisních limitů, instalována recirkulace spalin do kotle. Část spalin se odvádí zpět do kotle, tím se dosáhne snížení obsahu O₂ a teploty. To sice snižuje účinnost spalování, ale výrazně se tím snižují emise NO_x a to až o 50 %. Dále spaliny putují kouřovodem přes kouřový ventilátor do 80 metrů vysokého zděného komína. Kouřový ventilátor je typu RVP 1250-8P-L180 a vytváří tah 7,8 m³/s.



Obrázek 3: Textilní filtr a cyklonový odlučovač za kotlem K4 (foto autor)

Popílek odloučený ze spalin je dopravován dopravníkem do mezizásobníku a dále do sila popílku odkud se odváží na skládku. Celé schéma, mimo recirkulaci spalin, je vidět na obrázku č. 4.



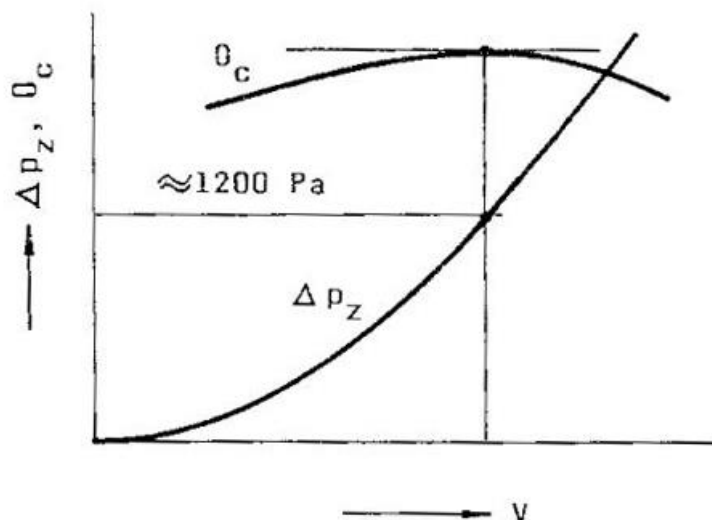
Obrázek 4: Schéma čištění spalin z kotle K4

1.3.2.1 Cyklonový odlučovač

Cyklonové (těž vírové) odlučovače patří mezi suché mechanické odlučovače. Základní princip využívaný k odloučení částic z plynu je využití jejich odstředivé síly při spirálovitém průchodu odlučovačem. Mezi výhody cyklonů patří jednoduchý princip a konstrukce, malá náročnost na obsluhu, snadná údržba a malá tlaková ztráta (klade malý odpor procházejícímu plynu). Mez odlučivosti, udávající velikost frakce, která se odloučí s 50% pravděpodobností, se pohybuje okolo 2 až 40 μm . Díky schopnosti odlučovat při vysokých teplotách i koncentracích částic v plynu a horšímu odlučování menších frakcí se hodí pro použití jako první odlučovací stupeň. Nevýhodou je větší tendence k zalepování.

Klíčovým bodem při užívání vírového odlučovače je stanovení pracovních podmínek tak, aby při příliš malém objemovém průtoku neklesala odlučivost a naopak aby při příliš velkém průtoku nezasahoval spirálový proud plynu do výsyvky a nevynášel z ní již odloučené částice.

Závislost celkové odlučivosti na objemovém průtoku ukazuje obrázek č. 5.



Obrázek 5: Závislost celkové odlučivosti O_c na objemovém průtoku V [4]

1.4 KVET

Kogenerace je výroba elektřiny a tepla v jednom technologickém řetězci s cílem co možná největšího využití tepla získaného spalováním paliva. Výrazně se snižuje jeho spotřeba, až o 1/3 oproti oddělené výrobě, a tím pádem má i příznivý dopad na množství emisí znečišťujících látek. Přispívá se tím ke snížení zátěže životního prostředí a díky menší vzdálenosti ke spotřebitelům také ke snižování ztrát v dodávkách elektřiny. To vede v konečném důsledku opět ke snížení množství spáleného paliva stejně tak jako emisí. V České republice jsou v současné době tímto způsobem dodávány 2/3 tepla.

1.4.1 Parní turbína STG I

Parní turbínu STG I dodala do Klatovské teplárny firma PBS Velká Bíteš a.s. Je napájena párou z kotlů K2 a K4, o celkovém jmenovitém výkonu 26,43 MW_t. Instalovaný elektrický výkon na turbíně činí 400 kW a je schopna pojmout 15,2 tun páry za hodinu. Pára do turbíny vstupuje pod tlakem 2,5 MPa a teplotou 330 °C. Protitlak turbíny je 1,3 MPa.

Energie získaná turbogenerátorem je při přebytku prodávána do distribuční sítě a příznivě se tak projevuje na celkové ceně za teplo.



Obrázek 6: Parní turbína STG I (foto autor)

1.5 Distribuce tepla

Teplota je rozváděna po městě centrálním zásobováním. Pára je rozváděna parovodem a tvoří tzv. primární uzavřený okruh. Parovod vede do podniků, které mají svůj vlastní výměník tepla anebo do sídlištních výměňkových stanic. Výměňková stanice slouží k převedení tepla z primárního okruhu do sekundárního, ve kterém je jako nosné médium využívána voda (horká s $t_{\text{MAX}} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $p_{\text{MAX}} = 2,5 \text{ Mpa}$ nebo teplá s $t_{\text{MAX}} = 110 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $p_{\text{MAX}} = 1,6 \text{ Mpa}$).

Teplárnou není vytápěno celé město, a to zejména z logistických důvodů. Na příliš dlouhém potrubí by vznikaly větší ztráty, proto je párou z teplárny vytápěna převážně západní část města, tedy sídliště Pod Hůrkou, sídliště u Pošty a Domažlické předměstí včetně nákupního centra Škodovka. Výměník pro Domažlické předměstí a sídliště U Pošty se nachází v Bezručově ulici, kam je parovod veden nad zemí podél koryta Drnového potoka. Sídlíště Pod Hůrkou je vytápěno z celkem 3 výměňkových stanic. Parovod

k těmto výměňkovým stanicím je veden pod zemí. Mapka rozvodů tepla v sídlišti Pod Hůrkou je uvedena v příloze č.1. Zbytek města je vytápěn z 21 plynových kotelen.

Celková kilometráž rozvodů centrálního vytápění činí: 6,427 km parovodu, 6,550 km teplovodních rozvodů a 1,732 km horkovodních rozvodů.

2 Analýza množství a složení emisí z Klatovské teplárny

Pro návrh ke snížení koncentrací škodlivin je nutné nejprve vědět, jak vznikají a jaký mají dopad na životní prostředí. Proto zde uvádím krátký vstup do této problematiky.

2.1 Vznik škodlivin ve spalinách obecně

Spalováním fosilních paliv vzniká řada látek škodlivých člověku a životnímu prostředí.

Mezi tyto látky patří:

- tuhé znečišťující látky (TZL) – vše co opouští komín v pevném skupenství
- oxid uhelnatý – CO
- oxidy dusíku – NO_x (souhrnný název pro NO a NO₂)
- oxid siřičitý – SO₂
- těkavé organické látky (VOC) – jakákoliv organická sloučenina s výjimkou metanu, která má při teplotě 20 °C tlak par 0,01 kPa nebo více nebo má odpovídající těkavost za konkrétních podmínek jejího použití [13]

Tyto látky se do procesu spalování dostávají jako součást paliva nebo okysličovadla. Palivo lze rozložit na tři složky tvořící celek – hořlavinu (h), vodu (W) a popelovinu (A). Hořlavinu lze dále dělit na aktivní, která je zdrojem chemicky vázaného tepla a skládá se z uhlíku (C), vodíku (H) a síry (S), a na pasivní, jejíž součástí je dusík (N) a kyslík (O).

2.1.1 Tuhé znečišťující látky

Tvorba TZL je spojena s obsahem popeloviny v palivu a uhlíku v hořlavině, který po ochlazení tvoří hlavní část sazí. Nicméně, jen část popílku se dostává až do spalin odcházejících z kotle, u fluidních kotlů zůstává až 90 % popílku v ohništi.

Velikost částic ovlivňuje dopad na zdraví člověka. Menší částice proniknou hlouběji do dýchacího ústrojí i do krve a mohou způsobovat řadu zdravotních problémů.

2.1.2 Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý vzniká spalováním při nedostatku kyslíku, kdy se vzduch nedostatečně promíchá s palivem, a při nedostatečně vysokých teplotách spalování. Pokud jsou teploty dostatečně vysoké spalovací vzduch se dobře promísí s palivem a CO se přemění na CO₂. Ten není označen jako znečišťující, ale jeho tvorba má také dopad na životní prostředí.

CO se v krvi velmi dobře váže na hemoglobin a zamezuje tak přenosu kyslíku po těle což může vést k otravě krve. Navzdory této skutečnosti je dopad CO na lidský organismus uváděn jako nejméně poškozující ze všech nebezpečných látek vznikajících spalováním.

2.1.3 Oxidy dusíku

Oxidy dusíku jsou zastoupeny převážně oxidem dusnatým (NO) a oxidem dusičitým (NO₂), ostatní sloučeniny jsou zastoupeny v malém množství. Spalováním tuhých paliv se tvoří převážně NO (přibližně 95 %) a až po ochlazení spalin v kouřové vlečce se mění na NO₂, který v atmosféře dále reaguje. Vznik NO_x při spalování paliv se dělí na tři stádia:

- vysokoteplotní
- palivové
- okamžité (neboli promptní)

Vysokoteplotní NO_x vznikají při vysokých teplotách nad 1100 °C z dusíku přiváděného ve spalovacím vzduchu. Palivové NO_x vznikají za nižších teplot oxidací dusíku vázaného v palivu. Promptní NO_x jsou určitou formou palivových a vznikají při nejvyšších teplotách v počátcích hoření, jejich podíl je zanedbatelný.

NO má ve stratosféře významný vliv při oslabování ozonové vrstvy, kde spolu s ozónem reaguje a vzniká NO₂ a O₂. NO₂, spolu s SO₂, se podílí na vzniku kyselých dešťů.

2.1.4 Oxid siřičitý

SO₂ vzniká spalováním síry z paliva, a uvádí se, že z 1 kg palivové síry vznikají 2 kg SO₂. Jeho hmotnostní koncentrace ve spalinách je při spalování tuhých paliv zdaleka největší ze všech měřených škodlivin. Vyhláška č. 415/2012 Sb. povoluje pouze spalování paliv s obsahem síry a jejich sloučenin pod 0,1 % hmotnosti paliva.

2.2 Měření emisí na kotli K4 a související legislativa

Četnost, způsob měření a jeho vyhodnocení jsou dány vyhláškou č. 415/2012 Sb. Provádí se jednorázové měření jedenkrát za kalendářní rok, zpravidla v zimních měsících, aby byl zajištěn dostatečný výkon kotle. Měření provádí najatá firma, loňský rok například firma Santeo Emise s.r.o. Měří se koncentrace a hmotnostní tok TZL, CO, NO_x a SO₂ ve spalinách.

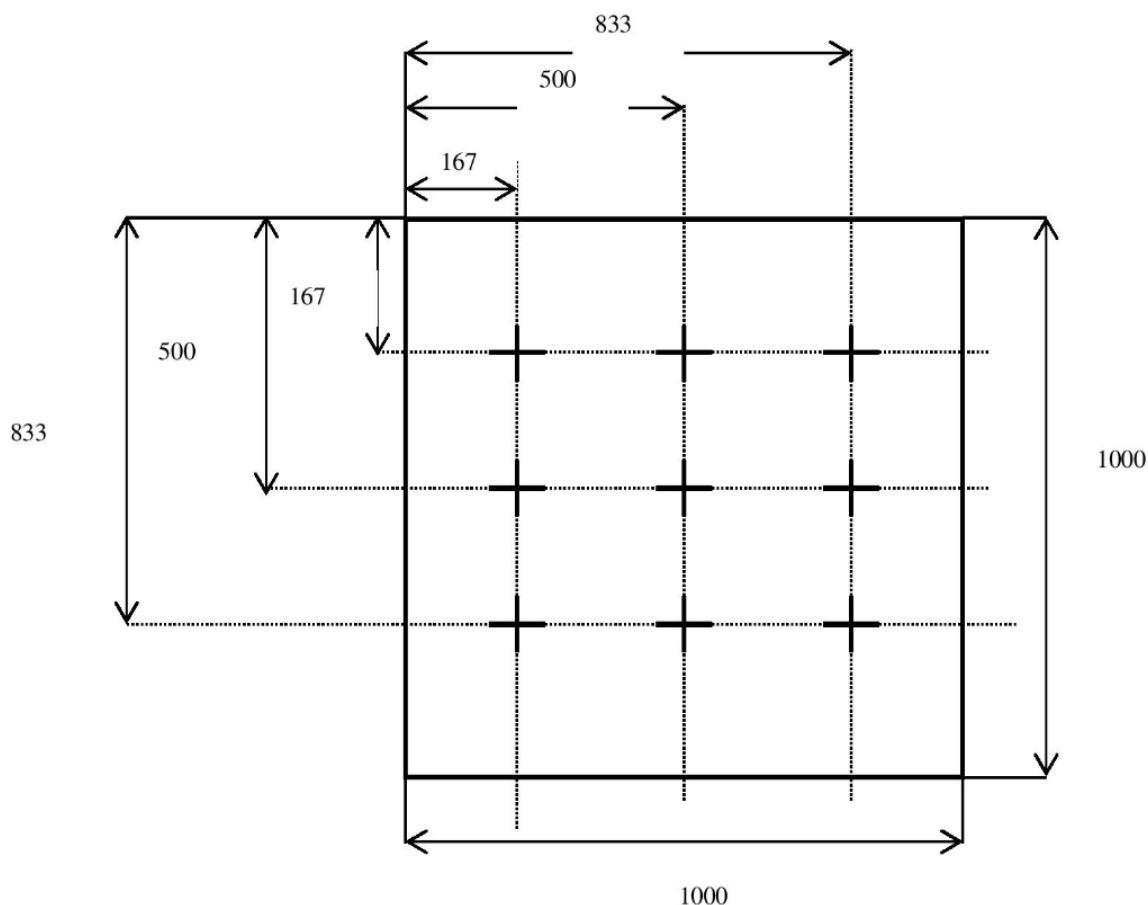
Výsledky získané měřením dokládají, zda jsou splněny specifické emisní limity a také slouží k výpočtu poplatků za znečišťování. Výpočet poplatků je v režii provozovatele.

Dále uvedený popis odpovídá měření tak, jak jej provedla firma Santeo Emise s.r.o. dne 22.12.2016 na kotli K4. Měření bylo provedeno při 95% výkonu kotle s průměrnou spotřebou paliva 1583 kg/hod.

Emise TZL se měří manuální metodou ve třech měřících intervalech. Každý interval trvá alespoň 30 minut. Měří se rychlost proudění spalin (Prandtlova trubice), barometrický tlak, teplota okolí a vlhkost, teplota a hustota spalin. Ze získaných hodnot se výpočtem stanoví hmotnostní koncentrace TZL ve spalinách.

Koncentrace ostatních znečišťujících látek se měří ve dvanácti půlhodinových intervalech. Měření se provádí pomocí přístrojů pro kontinuální měření - infračervených bezdisperzních analyzátorů. Ty využívají schopnosti některých molekul v plynu absorbovat energii fotonu z elektromagnetického záření, zejména z infračerveného spektra. Energie se sníží úměrně koncentraci měřeného plynu. Takto oslabené záření dopadá na vyhodnocující detektor. Schéma zapojení, jak pro měření TZL, tak ostatních látek, je uvedeno v příloze č. 2 resp. 3. Tabulky naměřených a vypočtených hodnot jsou v příloze č. 5 a 6.

Spaliny se měří za tkaninovým filtrem, před vstupem do kouřového ventilátoru jak je znázorněno na obrázku č. 4. Odběrové místo se nachází ve vodorovné části kouřovodu o vnitřních rozměrech 1 x 1 m. Dynamický tlak je měřen na několika místech, viz obrázek 7.



Obrázek 7: Schéma průřezu kouřovodu [8]

Celkovým výsledkem je aritmetický průměr hodnot naměřených ze všech intervalů. Výsledné koncentrace jsou vztažené na suchý plyn a referenční obsah kyslíku 6 % za normálních podmínek. Příklad tabulky s výsledky měření (z roku 2016) je uveden v příloze č 4.

Získané výsledky se porovnávají s emisními limity (tab. 2 a 3) danými vyhláškou č. 415/2012 Sb. následovně: Aritmetický průměr koncentrací z celého měření musí být menší nebo roven limitu a zároveň každá hodnota koncentrace zjištěná měřením v intervalu (tedy průměrná hodnota z půl hodinového měření) nesmí být vyšší než jeho 1,2 násobek.

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]											
	> 0,3-1 MW				> 1-5 MW				> 5-50 MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo obecně	-	650 1100 ²⁾	250	650	-	650 1100 ²⁾	250	650	2500 1500 ¹⁾	650 500 ¹⁾ 1100 ²⁾	150 100 ¹⁾ 250 ⁵⁾	400 300 ¹⁾ 650 ⁵⁾
Paliva dle § 15 odst. 5	-	650	150	300	-	650	150	300	-	650	150	300
Kapalné palivo	-	500	-	175	-	500	100	175	1700	450	100	175
Plynné palivo a zkapalněný plyn	-	200 300 ³⁾	-	100	-	200 300 ³⁾	-	100	900 ⁴⁾	200 300 ³⁾	50 ⁴⁾	100

Tabulka 2: Specifické emisní limity platné do 31. prosince 2017 [14]

Vysvětlivky:

- 1) Vztahuje se na spalovací stacionární zdroje s fluidním ložem.
- 2) Vztahuje se na spalování pevných paliv ve výtavném topeništi.
- 3) Vztahuje se na spalování propan butanu.
- 4) Vztahuje se na spalování paliv mimo veřejné distribuční sítě.
- 5) Vztahuje se na spalování biomasy pro spalování ve stacionárních zdrojích.

Druh paliva	Specifické emisní limity [mg.m ⁻³]											
	> 0,3-1 MW				> 1-5 MW				> 5-50 MW			
	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO	SO ₂	NO _x	TZL	CO
Pevné palivo	-	600	100	400	-	500	50	500	1500 ¹⁾	500	30	300 500 ³⁾
Kapalné palivo	-	130	-	80	-	130 450 ⁴⁾	50	80	1500 ⁴⁾	130 450 ⁴⁾	30	80
Plynné palivo a zkapalněný plyn	-	100 ²⁾	-	50	-	100 ²⁾	-	50	-	100 ²⁾	-	50

Tabulka 3: Specifické emisní limity platné od 1. ledna 2018 [14]

Vysvětlivky:

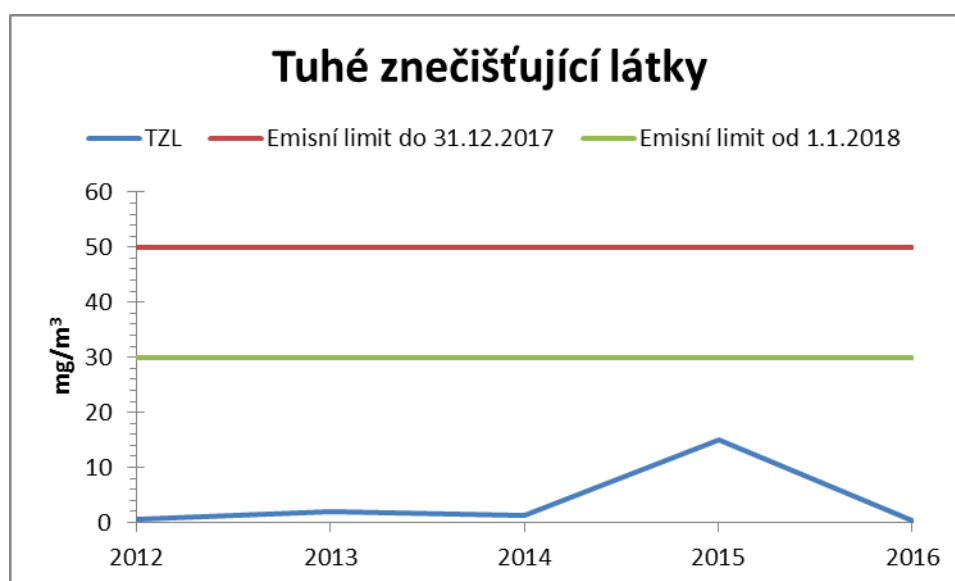
- 1) Na spalovací stacionární zdroje spalující hnědé uhlí, provozované nejvýše 3200 provozních hodin ročně, se vztahuje specifický emisní limit 2000 mg.m⁻³.
- 2) Pokud nelze této hodnoty z technických důvodů dosáhnout použitím nízkoemisních hořáků, platí specifický emisní limit 200 mg.m⁻³.
- 3) Platí v případě spalování biomasy pro spalování ve stacionárních zdrojích s výjimkou spalování výlisků z takové biomasy.
- 4) Vztahuje se na spalování těžkého topného oleje a jemu podobných kapalných paliv.

2.3 Grafy naměřených hodnot

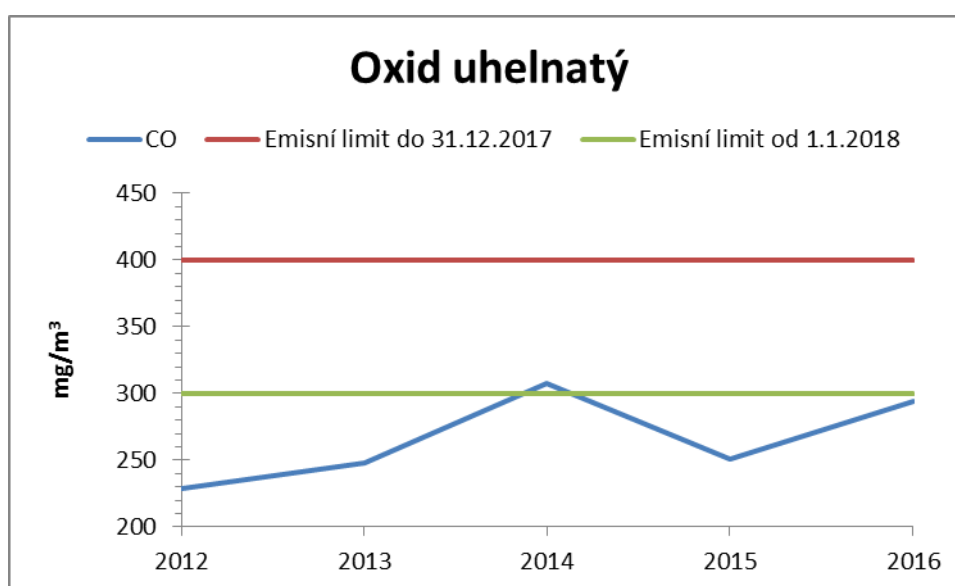
2.3.1 Koncentrace škodlivin ve spalinách

	TZL [mg/m ₃]	CO [mg/m ₃]	NO ₂ [mg/m ₃]	SO ₂ [mg/m ₃]
2012	0,6	229	540	1922
2013	1,9	248	648	1976
2014	1,2	308	453	2125
2015	15,1	251	476	2400
2016	0,3	294	304	1980
Průměr	3,8	266	484	2081

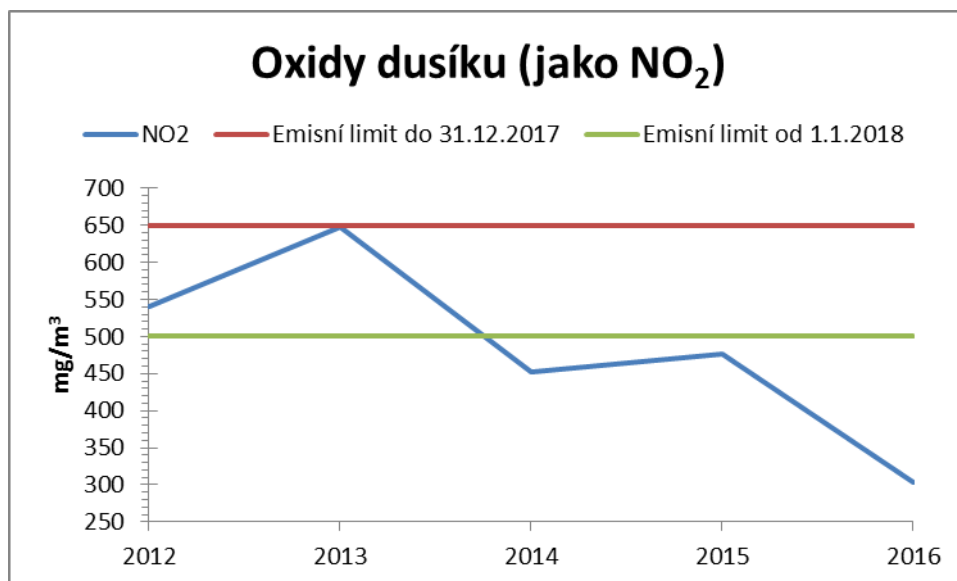
Tabulka 4: Výsledky měření koncentrací škodlivin pro r. 2012-2016



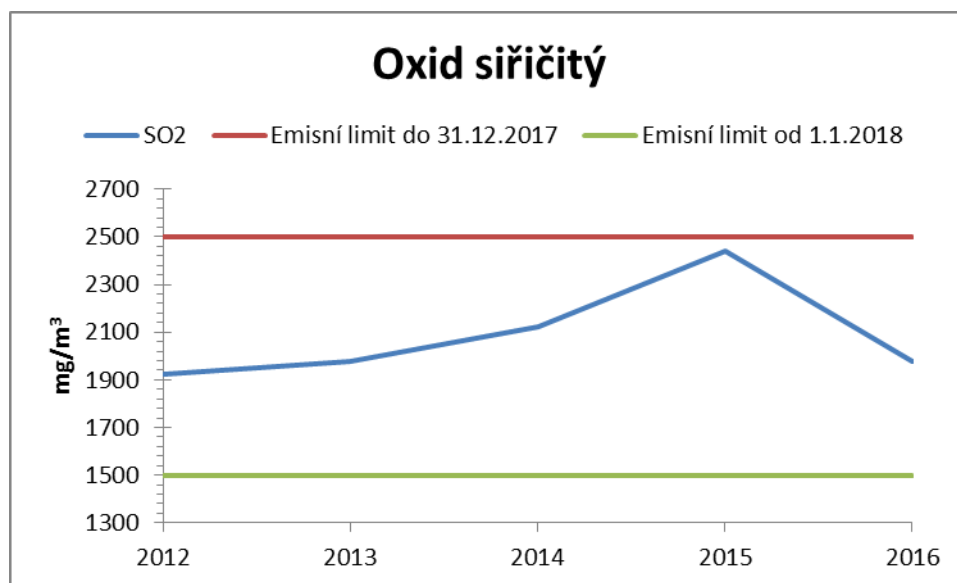
Graf 1: Koncentrace TZL za posledních 5 let



Graf 2: Koncentrace CO za posledních 5 let



Graf 3: Koncentrace NO₂ za posledních 5 let



Graf 4: Koncentrace SO₂ za posledních 5 let

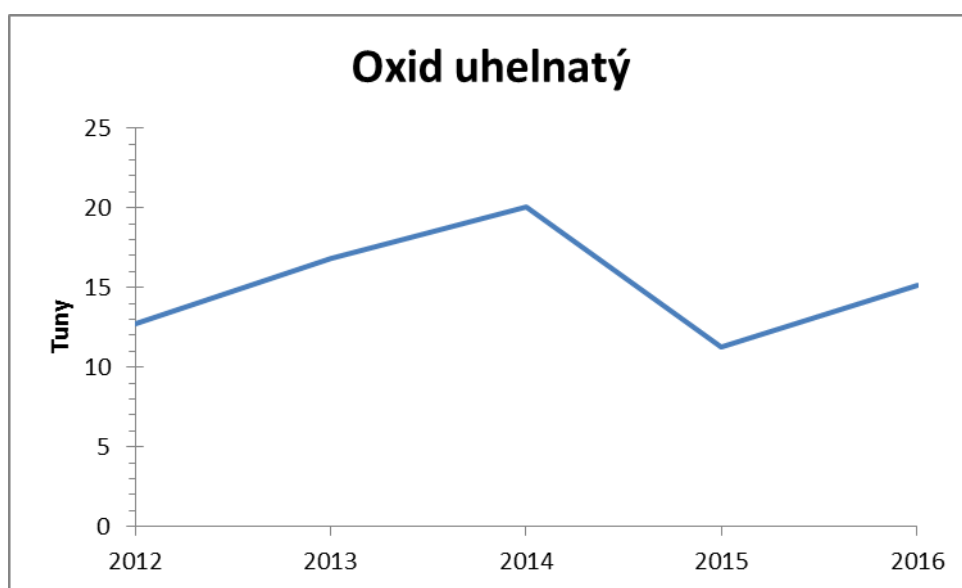
2.3.2 Roční úlet škodlivin do ovzduší

Rok	Spotřeba uhlí v tunách	Měrná výrobní emise v g na 1t spáleného paliva				Roční úlet škodlivin v tunách			
		TZL	CO	NO ₂	SO ₂	TZL	CO	NO ₂	SO ₂
2012	11365	3	1120	2620	9400	0,03	12,7	29,8	106,8
2013	11873	12	1419	3699	11299	0,14	16,9	43,9	134,1
2014	11278	7	1776	2606	12262	0,08	20,0	29,4	138,3
2015	11305	59	1000	1872	9656	0,67	11,3	21,2	109,2
2016	9600	2	1577	1634	10614	0,02	15,1	15,7	101,9

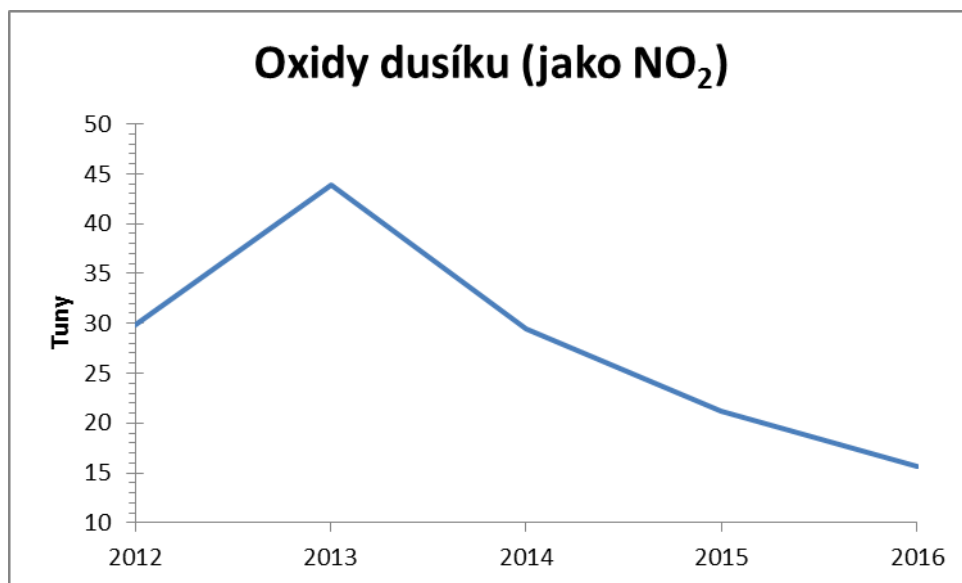
Tabulka 5: Přepočtení roční spotřeby paliva a měrných emisí škodlivin na jejich roční úlet



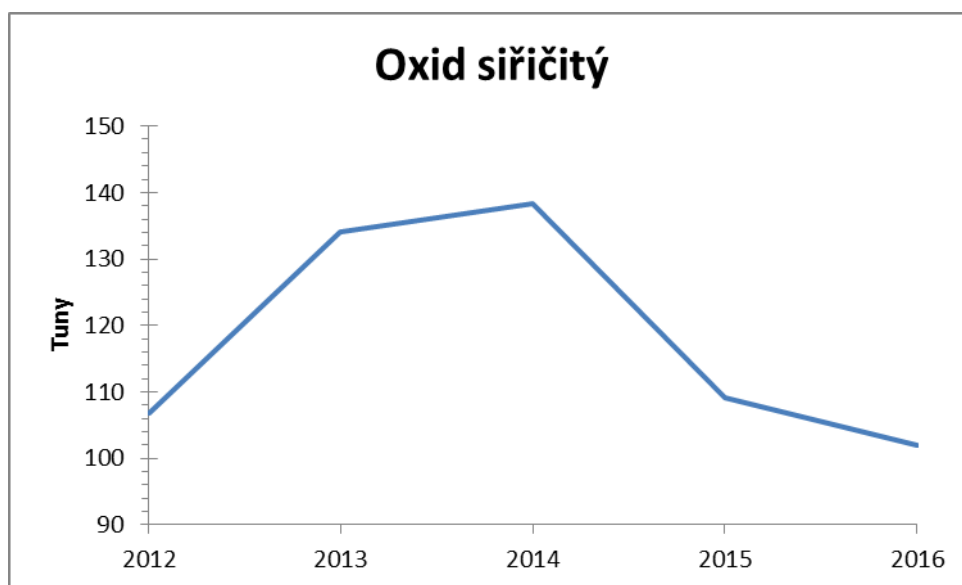
Graf 5: Roční úlet TZL za posledních 5 let



Graf 6: Roční úlet CO za posledních 5 let



Graf 7: Roční úlet NO₂ za posledních 5 let



Graf 8: Roční úlet SO₂ za posledních 5 let

2.4 Vyhodnocení plnění limitů v Teplárně Klatovy

2.4.1 Z hlediska limitů platných do 31.12.2017

Z grafů koncentrací jednotlivých škodlivin ve spalínách je vidět, že všechny naměřené hodnoty splnily v té době platné limity.

Tuhé znečišťující látky dosáhly největší koncentrace při měření v roce 2015 a to 15,1 mg/m³, tedy přibližně 30 % maximální přípustné míry znečištění. Nicméně tato hodnota zhruba 15x překročila průměrnou hodnotu dosaženou v ostatních letech.

Koncentrace CO dosáhla nejvyšší hodnoty v roce 2014 a to 308 mg/m³, tedy 77 % limitu. Od roku 2012 má rostoucí tendenci, což může být způsobeno snahou snížit emise NO_x.

Koncentrace oxidu dusíku téměř dosáhla limitu v roce 2013, kdy činila 648,2 z 650 mg/m³ povolených. Od té doby má klesající tendenci s nejnižší naměřenou hodnotou pro rok 2016, kdy pokles vůči roku 2013 činil přibližně 53 %.

Oxid siřičitý dosáhl největší koncentrace v roce 2015, a to 2440 mg/m³ což je přibližně 98 % limitu.

2.4.2 Z hlediska limitů platných od 1.1.2018

Z grafů koncentrací je patrná nutnost snížit především koncentrace SO₂ a NO_x. Oxid siřičitý má v současné době výrazně vyšší koncentrace, než dovoluje nový limit. Pro jeho splnění bude nutné snížit koncentraci alespoň o 30-40 %. Podíváme-li se na koncentrace oxidů dusíku, nepřesáhla od roku 2014 hodnotu nového limitu, ale dosahuje jemu blízkých hodnot. Možnostmi jejich snížení se podrobněji zabývám v kapitole 3.

Emise CO dosáhly pouze v roce 2014 hodnot vyšších, než bude předepisovat nový limit. Limit 300 mg/m³ by byl překonán o 8 mg/m³, tedy o 2,67 %. Blízko limitu byla koncentrace CO ještě v roce 2016, kdy dosáhla 294 mg/m³. CO vzniká nedokonalým spalováním při nedostatku vzduchu, snížení jeho koncentrace lze tedy dosáhnout přivedením více vzduchu do kotle.

3 Přehled technologií ovlivňujících koncentrace škodlivin ve spalinách

3.1 Způsoby snížení oxidů dusíku

Snížení oxidů dusíku, souhrnně označovaných jako NO_x , lze docílit samotným snížením jejich tvorby během spalování – tzv. primární opatření, anebo zachycením již vzniklých NO_x ve spalinách – tzv. sekundární opatření. V praxi lze obě metody kombinovat pro dosažení co nejnižších emisí oxidů dusíku.

3.1.1 Primární opatření

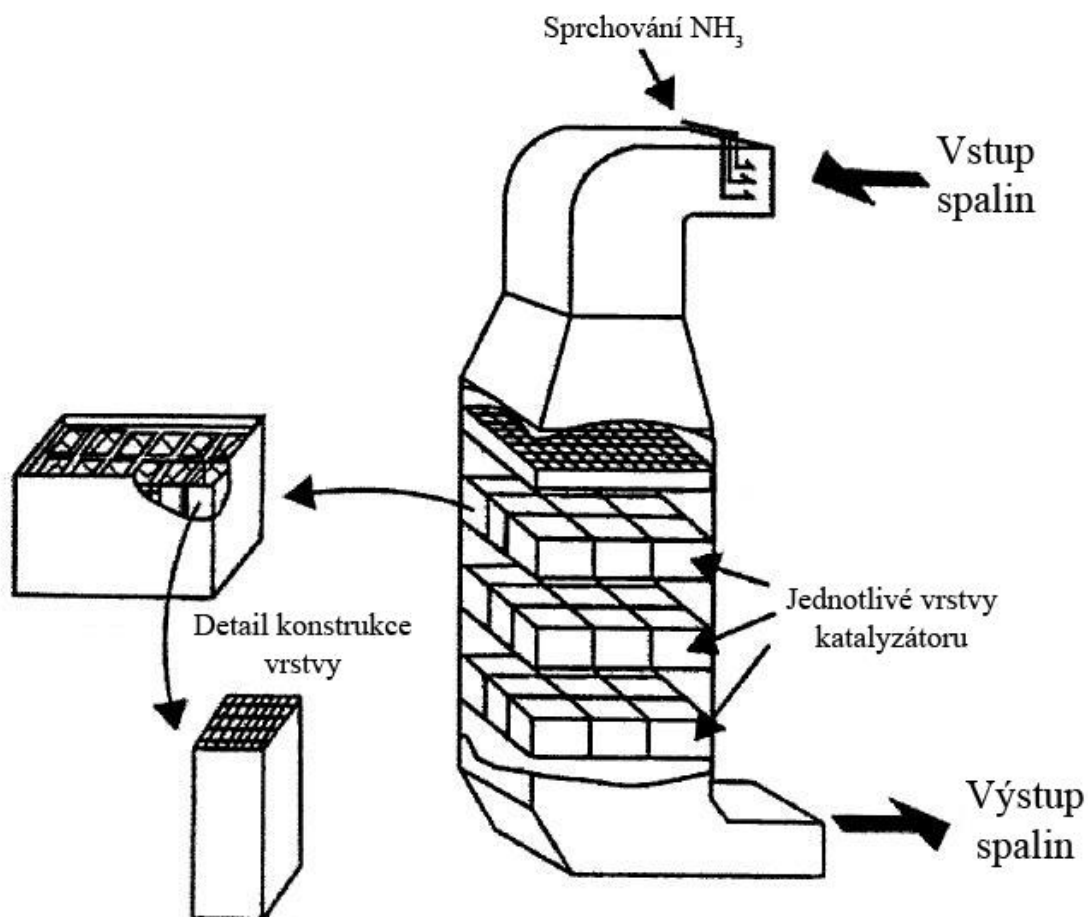
Dosáhnout snížení tvorby NO_x během spalování lze několika způsoby. Spalováním s nízkým přebytkem vzduchu nebo jeho pásmováním, kdy se spalovací vzduch dávkuje do dvou úrovní. V první úrovni je vzduchu méně a spalování probíhá při nižší teplotě, vzniklé zplodiny se poté spálí v druhém pásmu, kde je relativní přebytek vzduchu a vyšší teplota spalování. Snížením přebytku vzduchu lze také dosáhnout recirkulací spalin (viz odst. 1.3.2). Další možností je použití tzv. nízkoemisních hořáků, které vhodným přiváděním vzduchu, až ve třech prouděch, dosahují nízkých emisí NO_x .

3.1.2 Sekundární opatření

3.1.2.1 Selektivní katalytická redukce (SCR)

Metoda využívající reakce přeměňující NO_x s plynným amoniakem (NH_3) na dusík a vodu, a to při teplotách v rozmezí přibližně 170 až 500 °C.

Spaliny se promíchají se čpavkem a vertikálně proudí do katalyzátoru, což je keramická kostra potažená oxidem titaničitým a oxidem vanadičným, se kterými spaliny během průchodu reagují. Účinnost u nového katalyzátoru se pohybuje okolo 80 %. Nezreagovaný čpavek odchází se spalinami do atmosféry a je proto důležité ho správně dávkovat.



Obrázek 8: Ukázka konstrukce katalyzátoru

Mezi nevýhody metody patří náchylnost na rychlost proudění spalin, prostorová náročnost, teplota katalyzátoru nesmí klesnout pod 300 °C (dojde k usazování NH₄HSO₄), omezená životnost katalyzátoru (udávaná životnost pro tuhá paliva je 3 roky) a v neposlední řadě velké náklady na provoz. Vlastní konstrukce katalyzátoru je kvůli omezené životnosti řešena rozčleněním do několika vrstev, které se průběžně nahrazují.

3.1.2.2 Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

Redukce NO_x také probíhá reakcí s amoniakem ale bez katalyzátoru a ve vyšších teplotách (800 – 1100 °C). Rozstřík činnidla (amoniakální voda nebo močovina) probíhá za spalovací komorou, kde jsou teploty blízké výše uvedeným. Účinnost metody je závislá na správném rozmezí teplot. Pokud reakce probíhá za příliš nízkých teplot, celková účinnost klesá a nezreagovaný amoniak uniká ve spalinách. Při příliš vysokých teplotách se NH₃ přeměňuje na NO.

Metoda se vyznačuje menší účinností okolo 50 %, ale výhodou jsou nižší náklady, a to až o 80 % oproti SCR.

3.2 Odsiřování spalin

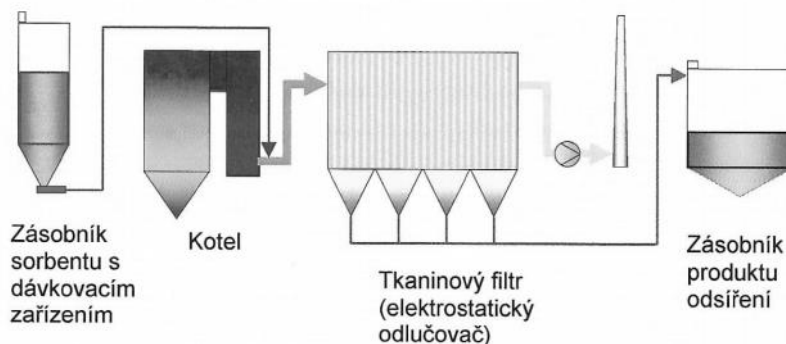
Metody pro snížení emisí oxidů síry se dělí na dvě skupiny - regenerativní, kde je aktivní látka (sorbent) vracena do procesu a neregenerativní, při níž se aktivní látka stává odpadem. Další dělení lze rozlišit podle stavu sorbentu na suchou, polosuchou a mokrou metodu. Jako sorbent je často používán oxid vápenatý (CaO), hydroxid vápenatý (CaOH₂), uhličitan vápenatý (CaCO₃) nebo dolomit Ca(CO₃)+Mg(CO₃).

3.2.1 Suchá metoda odsíření

3.2.1.1 Míchání sorbentu do topeniště nebo do spalin

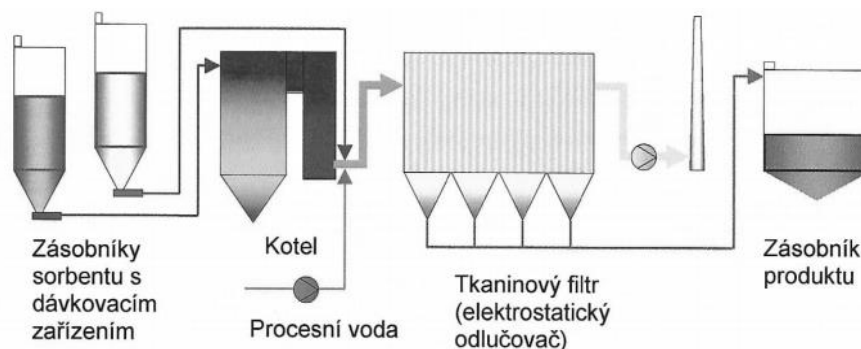
Společně zde uvedu několik provedení suchého odsíření využívajících stejného principu. Tímto principem je rozprášení sorbentu do spalovací komory anebo do spalin. Míchání sorbentu do spalovací komory lze za určitých podmínek efektivně uplatnit pouze u kotlů s fluidní technologií. Také spotřeba sorbentu je neúměrně vysoká výsledné účinnosti odsíření.

V případě míchání sorbentu do spalin (obr. č. 9), dosahuje toto provedení za vhodných podmínek lepší účinnosti, než při rozprašování do topeniště. Účinnost obou verzí se pohybuje okolo 50 %. Nevýhodou je smísení produktů odsíření s popílkem. Proto je výhodné dávkování sorbentu až za první odlučovač, a produkty odsíření odlučovat v dalším odděleném odlučovači. Tento způsob je samozřejmě nákladnější na investice i na prostor. Výhodou je možná recyklace sorbentu.



Obrázek 9: Schéma studené sorpce [10]

Dalším možným vylepšením je sorpce s kondicionováním, tzn. úprava teploty a vlhkosti (kondicionování) spalin rozprašováním vody před nebo v místě vmíchávání sorbentu. Tím se lépe využije jeho potenciálu (vlhký sorbent lépe absorbuje SO_2) a zvýší se účinnost odsíření o přibližně 10 %. Všechna výše uvedená provedení této metody lze vzájemně kombinovat (obr. č. 10). Díky poměrně vysoké spotřebě sorbentu má metoda vysoké provozní náklady, naopak jednoduchost procesu zajišťuje nízké investiční náklady.



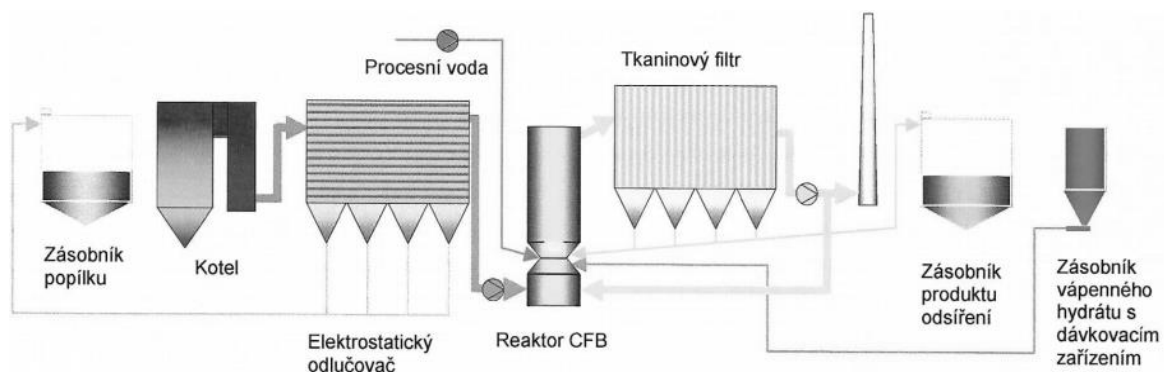
Obrázek 10: Schéma dvoustupňové suché sorpce s kondicionováním [10]

3.2.1.2 CFB odsíření

Jedná se o nejrozšířenější suchou metodu odsířování a účinností je srovnatelná s mokřím odsířováním, se kterým je v současnosti nejrozšířenější metodou odsířování vůbec.

Spaliny po odloučení popílku putují do reaktoru s cirkulujícím fluidním ložem (circulating fluidized bed – CFB), kterým prostupují vzhůru a ve kterém částice sorbentu drží ve vznosu. Toho je docíleno tvarem reaktoru, který se od místa vstupu spalin rozšiřuje, čímž pozvolna klesá rychlost proudění. Do reaktoru se ještě vstříkuje voda zvlhčující sorbent

a zároveň ochlazující spaliny. Takto se ve vznosu dokáže udržet i několik tun sorbentu po relativně dlouhou dobu. To zvyšuje účinnost celého procesu, která dosahuje více než 90 % a také snižuje spotřebu sorbentu. Účinnost zvyšuje i fakt, že produkt odsíření je zachycován v odlučovači a z části vrácen zpět do absorbéru.



Obrázek 11: Schéma CFB odsíření [10]

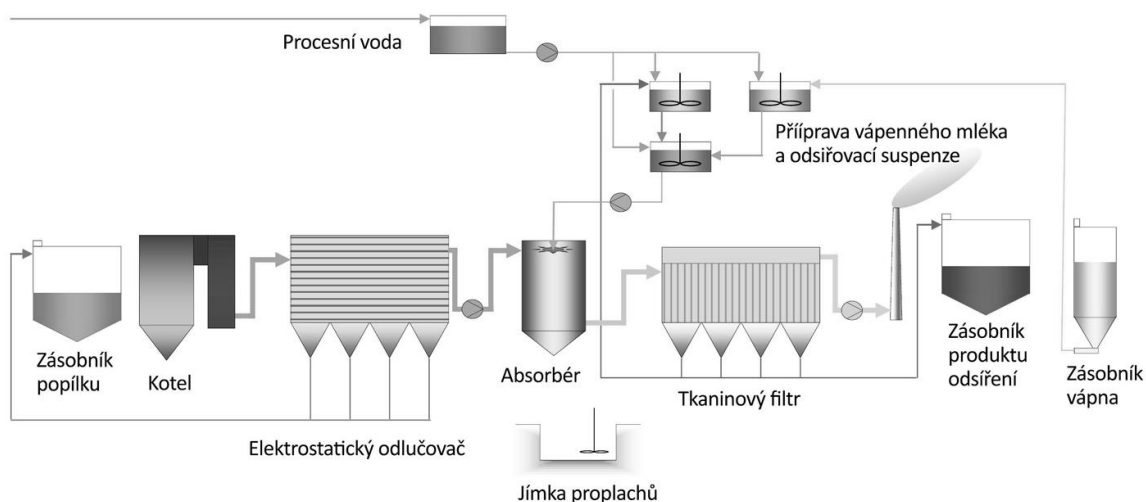
3.2.2 Polosuchá metoda odsíření

Ačkoliv by se mohlo zdát, že výše uvedené suché metody, ať už využívající kondicionování spalin nebo CFB reaktor, jsou již metody polosuché, z technologického hlediska je voda do procesu vnášena samostatně a sorbent zůstává suchý až do jeho rozprášení do spalin. Proti tomu polosuchá metoda využívá rozprášení vodní suspenze sorbentu do spalin. Tedy sorbent, zde CaO, je nejprve rozpuštěn ve vodě, často za přidání zrecyklovaného již suchého produktu odsíření.

Kapicky suspenze se v absorbéru rozpráší do spalin, po ohřátí se vysuší a zbyde jemný prach. Ten na konci procesu musí být dostatečně suchý, aby nezalepoval filtr odlučující částice popílku a další technologické zařízení. Fakt, že popílek musí být dostatečně suchý, omezuje účinnost celého procesu. Limitním faktorem je konečná tepelná kapacita spalin. Absorpce SO₂ probíhá převážně v absorbéru, ale z nezanedbatelné části také v odlučovači čímž se ještě zvyšuje doba reakce spalin a reaktantu.

Absorbér je nejčastěji válcová nádoba vespod kuželovitě zúžená do jímky. Uvnitř absorbéru je několik sprchových rovin tvořených tryskami rozstřikující suspenzi. Existuje několik provedení lišících se místem vstupu spalin do absorbéru. Trysky rozprašující suspenzi sorbentu musejí být vysoce odolné vůči korozi a ucpávání aby zaručily konstantní

rozstřík. Správné rozprašování je důležité pro promísení spalin a sorbentu.



Obrázek 12: Schéma polosuché metody odsiřování [12]

Metodu lze částečně zkombinovat se suchou vmícháváním suchého sorbentu do spalin ještě před absorber. V podstatě se tím pouze zvýší množství sorbentu v absorberu a podpoří se vysušení prachu ve spalinách. Metoda se vyznačuje středně vysokými náklady na výstavbu i provoz.

3.2.3 Mokrý metoda odsiřování

3.2.3.1 Mokrý vápencová vypírka

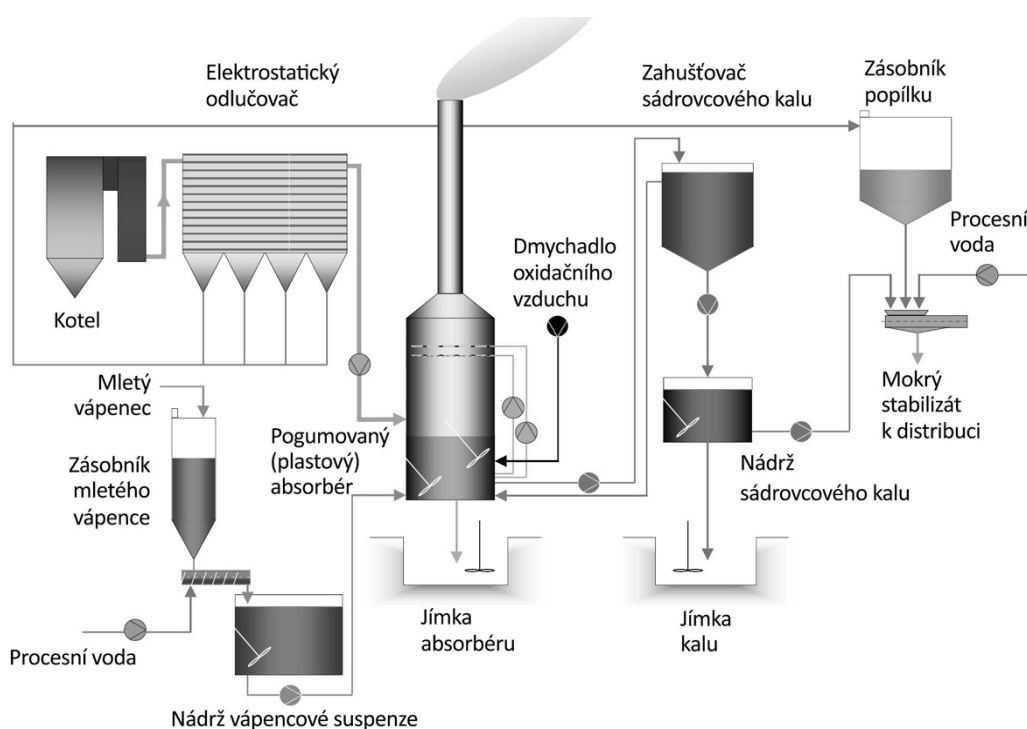
Spaliny jsou po odloučení popílku ochlazeny o několik desítek °C a vedeny do spod absorberu, kterým stoupají vzhůru zkrápěny vápencovou suspenzí. Kapičky suspenze na sebe váží SO_2 a padají do jímký vespod absorberu do které je vháněn oxidační vzduch a celou směs „probublává“.

Suspenze zachyceného siřičitanu oxiduje na síran vápenatý – sádrovec (potažmo energosádrovec), který při dostatečném zdržení v jímkce krystalizuje. Aby celý proces účinně fungoval, je nutné udržovat v absorberu mírně kyselé prostředí v rozmezí pH 3,5 až 5. Toto prostředí je velmi agresivní a způsobuje korozi, která se dá omezit pogumováním vnitřku zařízení.

Průchodem skrz absorbér se spaliny nasatí vlhkostí ze zkrápění. Aby se zabránilo úniku sorbentu a vlhkosti z absorbéru jsou spaliny na jeho výstupu vedeny přes odlučovač kapek. Ochlazené spaliny by ale v komínu nevyvolávaly dostatečný tah a jsou proto opět přehřívány teplem odebraným spalinám před vstupem do absorbéru. Tato komplikace v podobě přehřívání spalin odpadá, pokud se k vypuštění spalin do atmosféry využije chladicí věže, která má sama o sobě dostatečný tah na vynesení spalin do výšky.

Suspenze zachycená na dně jímky se odčerpá a v hydrocyklonech se odstředivou silou oddělí těžší, již zkrystalizovaný energosádrovec. Ten se dále odvodňuje až na přibližně 10 % obsahu vody a stává se předmětem obchodu, lze ho využít např. při výrobě sádrokartonu nebo sádry. Energosádrovec, jakožto produkt odsíření, je ještě čistší než sádrovec běžně se vyskytující v přírodě.

Mokrý vápencová vypírka dosahuje účinnosti odsíření i přes 95 % a je nejrozšířenější metodou odsířování zejména v uhelných elektrárnách a velkých teplárnách. Metoda je velmi efektivní nejen při odsíření, ale s podobnou účinností také čistí spaliny od těžkých kovů, fluorovodíků a chlorovodíků a částečně i snižuje emise NO_x . Investiční náklady jsou sice relativně vysoké, nikoliv už provozní náklady, které lze ještě snížit prodejem energosádrovce.



Obrázek 13: Schéma mokré vápencové vypírky [11]

3.2.3.2 Mokrý magnezitová metoda

Metoda principem fungování podobná mokré vápencové vypírce, ale ke zkrápnění a vázání SO_2 je použito suspenze oxidu hořečnatého (MgO). V jímcu absorberu po zkrápnění vzniká suspenze tvořená siřičitanem hořečnatým (MgSO_3) a MgO . Ze suspenze se po zhuštění a vysušení oddělí MgSO_3 , který lze chemicky rozložit zpět na SO_2 a MgO . Oxid hořečnatý se opětovně využije pro odsíření, tato metoda je tedy regenerativní. SO_2 lze zpracovat například na kyselinu sírovou.

3.3 Řešení vhodné pro Klatovskou teplárnu

Vzhledem k nutnosti rapidně snížit především koncentraci SO_2 se z výše uvedených technologií, jako první nabízí využití metody mokré vápencové vypírky. To potvrzuje i hojnost jejího využití napříč uhelnou energetikou. Nicméně, ačkoliv metoda dosahuje vysoké účinnosti, vzhledem k nutným investicím je výhodná spíše pro větší zdroje o příkonu řádově desítek MW a více. Také nutná výstavba dalších částí technologie jako je vápencové hospodářství, vodní hospodářství pro přípravu procesní vody, nová sila a nádrže apod. spolu se složitým provedením výstavby na návaznost jednotlivých částí a prostorovou náročností neumožňuje použití této technologie v případě teplárny v Klatovech. Ze stejných důvodů nelze doporučit žádnou z metod využívající různé formy mokré sorpce.

Fluidní technologie využívaná v kotli K4 dále nahrává použití jedné ze suchých metod odsíření, zajišťující nízké počáteční náklady a pro fluidní kotle i uspokojivou účinnost odsíření. Lze uvažovat dvě provedení této metody, a sice míchání sorbentu, konkrétně vápence nebo dolomitu, do fluidní vrstvy, anebo vmíchávání hydrogenuhličitanu sodného (tzv. soda) do spalín za kotlem.

Účinnost obou metod je přímo úměrná množství použitého aditiva a jeho zdržení ve spalovací komoře. Množství aditiva lze vyjádřit stechiometrickým poměrem Ca/S , který udává množství vápníku v aditivu ku množství síry na vstupu do odsířovacího procesu. Tento poměr se obvykle pohybuje v rozmezí 1 až 5. Dalším důležitým faktorem, ovlivňující konečnou účinnost je teplota fluidní vrstvy. V tomto ohledu přichází vhod již

instalovaná recirkulace spalin, která umožňuje jednodušší regulaci teploty fluidní vrstvy na hodnotu 850 °C, která je uváděna jako vhodná pro aditivní suché metody. Produktem odsíření je u obou metod síran, resp. siřičitan vápenatý, který je zachycován na filtru společně s popílkem.

V září roku 2015 proběhla na kotli K4 spalovací zkouška, během níž bylo vmícháno aditivum, v podobě vápence z vápenky Čertovy schody, do paliva před vstupem do kotle. Tato zkouška prokázala vhodnost použití suché aditivní metody. Nicméně pro zefektivnění této metody bude nutné přizpůsobit kotel K4 k vmíchávání sorbentu do fluidní vrstvy.

Za dodržení výše uvedených podmínek, při vhodně zvoleném množství aditiva, lze dosáhnout snížení koncentrace SO₂ o nutných 30-40 %. Účinnost lze ještě zvýšit zvýšením poměru Ca/S, což ale zvedne provozní náklady.

Ke snížení koncentrace NO_x pod limit platný od 1.1.2018 by měla stačit již instalovaná recirkulace spalin do kotle.

4 Závěr

Cílem této práce bylo provést analýzu složení a množství emisí produkovaných z uhelného kotle K4 v areálu Klatovské teplárny, a zhodnotit plnění limitů platných v době tvoření této práce a také v letech následujících.

Pro pochopení složení škodlivin, jsem v úvodu druhé kapitoly uvedl obecnou teorii jejich vzniku ve spalinách. Dále jsem v druhé kapitole, vyhodnocením získaných dat, ověřil současné koncentrace škodlivin ve spalinách, které nevyhovují novým limitům stanovených legislativou, platných od 1.1.2018. V návaznosti na toto zjištění jsem v kapitole třetí uvedl přehled technologií pro snížení koncentrací SO₂ a NO_x jakožto škodlivin nejvíce přesahujících nové limity. Součástí této kapitoly je také návrh odsiřovací technologie, která je nejvhodnější k použití v Klatovské teplárně. Jako nejvhodnější jsem zvolil metodu suchého aditivního odsíření z důvodů uvedených v samotné kapitole.

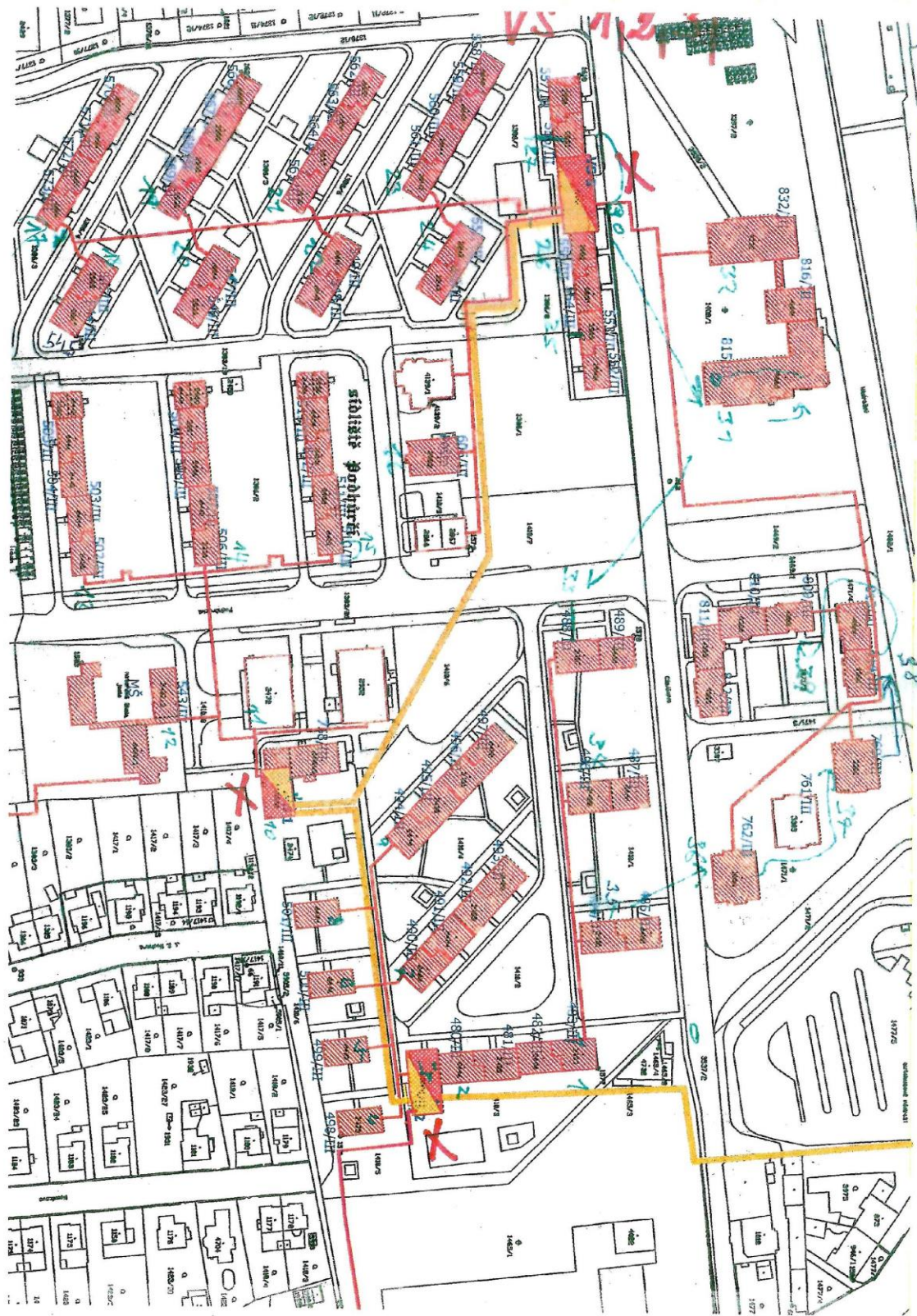
Pro dokreslení pozadí kolem vzniku škodlivin z Klatovské teplárny jsem v kapitole první uvedl popis technologického zázemí teplárny, včetně používaných paliv, způsobu rozvádění tepla po městě systémem centrálního vytápění a způsobu vyrábění elektřiny, zajišťující kogenerační výrobu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

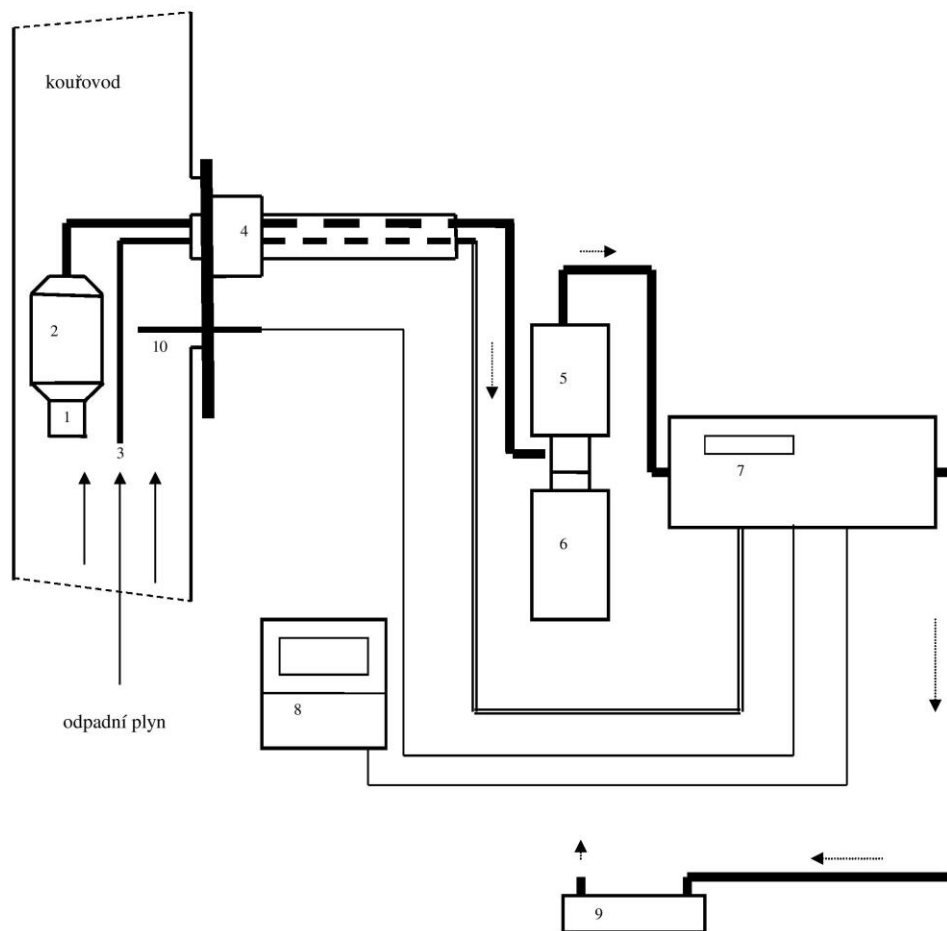
- [1] Historie a vývoj společnosti. *Klatovská teplárna a.s.* [online]. Klatovy [cit. 2017-01]. Dostupné z: <http://www.klatep.cz/klatep/historie.asp>
- [2] NOVÝ, Richard a kolektiv. *Technika prostředí*. 2. Praha: ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03492-5.
- [3] HOFFMAN, Pavel a Václav NOVÁK. *Zpracování exhalací a odpadů*. 2. Praha: ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02439-3.
- [4] HEMERKA, Jiří. *Odlučování tuhých částic*. 2. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02270-6.
- [5] *Ochrana ovzduší : vědeckotechnický dvouměsíčník České asociace pro prevenci znečišťování ovzduší*. Praha: Česká asociace pro prevenci znečišťování ovzduší, 1995. ISSN 1211-0337.
- [6] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. *Kotle - 2.část* [online]. 2012 [cit. 2017-3]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [7] HEMERKA, Jiří a František HRDLIČKA. *Emise z kotelen a ochrana ovzduší* [online]. 2004 [cit. 2017-05]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/2294-emise-z-kotelen-a-ochrana-ovzdusi-i>
- [8] ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ SANTEO EMISE S.R.O. *Protokol o autorizovaném měření emisí č. 16/181/660/K4: Měření emisí kotle na uhlí K4*.
- [9] Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET, kogenerace). *Teplárenské sdružení ČR* [online]. [cit. 2017-03]. Dostupné z: <http://www.kombinovana-vyroba.cz/>
- [10] *Odpadové fórum: Odborný měsíčník pro průmyslovou a komunální ekologii*. 2016, **17**(3).
- [11] *Schéma mokré vápencové vypírky* [online]. In: . [cit. 2017-04]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/images/tenza.cz/aktivity/technologie/odsireni/schema-mokre-odsireni.jpeg>
- [12] *Schéma polosuché metody odsiřování* [online]. In: . [cit. 2017-04]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/images/tenza.cz/aktivity/technologie/odsireni/schema-polosuche-odsireni.jpeg>
- [13] Zákon č. 201/2012 Sb.: o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [14] Vyhláška č. 415/2012 Sb.: o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů*. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1: MAPA ROZVODŮ VYTÁPĚNÍ V SÍDLIŠTI POD HŮRKOU	2
PŘÍLOHA 2: SCHÉMA ZAPOJENÍ ODBĚROVÉ APARATURY PRO MĚŘENÍ TZL [8]	3
PŘÍLOHA 3: SCHÉMA ZAPOJENÍ ODBĚROVÉ APARATURY PRO MĚŘENÍ CO, SO ₂ , NO ₂ , O ₂ [8] ..	4
PŘÍLOHA 4: VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA KOTLI K4 Z ROKU 2016 [8].....	5
PŘÍLOHA 5: TABULKA NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT KONCENTRACÍ TZL [8].....	6
PŘÍLOHA 6: TABULKA NAMĚŘENÝCH A PŘEPOČTENÝCH HODNOT KONCENTRACÍ CO, SO ₂ , NO ₂ , O ₂ [8]	7



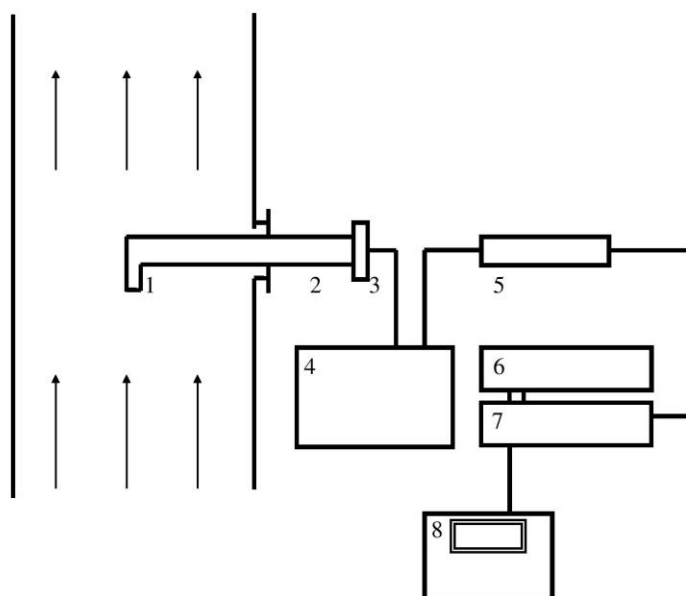
Příloha 1: Mapa rozvodů vytápění v sídlišti Pod Hůrkou



Legenda:

1. Hubice
2. KS 404 - filtr
3. Sonda na měření rychlosti
4. Držák sondy
- 5, 6 Sušící věž (5 - silikagel, 6 - centrifuga) - měření vlhkosti odpadního plynu
7. Měřicí a vyhodnocovací jednotka pro izokinetické vzorkování KS 400 CV.15/8
8. NOTEBOOK
9. Čerpadlo
10. Měření teploty odpadního plynu

Příloha 2: Schéma zapojení odběrové aparatury pro měření TZL [8]



Legenda:

1. vyhřívaná odběrová sonda
2. filtr
3. vyhřívaná hadice
4. chladič EC-C1
5. kontrolní filtr FP-2K-D
6. konvertor NO_2 - NO
7. URAS 14 E
8. počítač nebo dataloger

Příloha 3: Schéma zapojení odběrové aparatury pro měření CO , SO_2 , NO_2 , O_2 [8]

měření č.		1.	2.	3.	vážený průměr	specifický emisní limit ¹⁾
tuhé znečišťující látky (TZL)						
C _{RNS} c _(ref.O2) = 6%	mg/m _N ³	0,4	< 0,3	< 0,3	< 0,3	150 / 50 ²⁾
hmotnostní tok	mg/s	0,9	< 0,7	< 0,7	< 0,8	-
	g/hod.	3,1	< 2,6	< 2,5	< 2,7	

měření	min.	0-30	31-60	61-90	91-120	121-150	151-180	aritmetický průměr	specifický emisní limit ¹⁾
		180-210	211-240	241-270	271-300	301-330	331-360		
oxid uhelnatý (CO)									
střední hodnoty									
C _{RNS} c _(ref.O2) = 6%	mg/m _N ³	312	305	300	276	277	294	294	400
		292	284	295	309	287	296		
hmotnostní tok	mg/s	-	-	-	-	-	-	693	-
	g/hod	-	-	-	-	-	-	2496	

měření	min.	0-30	31-60	61-90	91-120	121-150	151-180	aritmetický průměr	specifický emisní limit ¹⁾
		180-210	211-240	241-270	271-300	301-330	331-360		
oxidy dusíku jako NO₂									
střední hodnoty									
C _{RNS} c _(ref.O2) = 6%	mg/m _N ³	304	268	264	272	275	306	304	650
		332	341	309	327	336	316		
hmotnostní tok	mg/s	-	-	-	-	-	-	719	-
	g/hod	-	-	-	-	-	-	2587	

měření	min.	0-30	31-60	61-90	91-120	121-150	151-180	aritmetický průměr	specifický emisní limit ¹⁾
		180-210	211-240	241-270	271-300	301-330	331-360		
oxidy siřičitý (SO₂)									
střední hodnoty									
C _{RNS} c _(ref.O2) = 6%	mg/m _N ³	2127	2121	2103	2079	2066	2040	1980	2500
		2024	1799	1856	1979	1789	1779		
hmotnostní tok	mg/s	-	-	-	-	-	-	4667	-
	g/hod	-	-	-	-	-	-	16802	

1) dle vyhlášky č. 415/2012 Sb. ze dne 21. 11. 2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování

2) zpřísněný emisní limit pro TZL povolením provozu čj. ŽP/9022/13 ze dne 5. 12. 2013

C_{RNS} - koncentrace škodliviny přepočtená na referenční obsah kyslíku za normálních stavových podmínek, suchý plyn
c_(ref.O2) - referenční koncentrace kyslíku

Měrná výrobní emise vyjádřená v g na 1 t paliva (hnědé uhlí)			
Tuhé znečišťující látky	TZL	g/t	1,7
Oxid uhelnatý	CO	g/t	1576,5
Oxidy dusíku vyjádřené jako	NO ₂	g/t	1634,4
Oxid siřičitý	SO ₂	g/t	10614,2

Příloha 4: Výsledky měření na kotli K4 z roku 2016 [8]

Datum měření		[den]	22.12.2016			
Označení měřicího místa		[-]	K4			
Plocha měřicího profilu	(1)	[m ²]	1,0000			
Normální tlak	(2)	[Pa]	101325			
Normální teplota	(3)	[°K]	273,15			
Označení zkoušky		[-]	Odběr č.1	Odběr č.2	Odběr č.3	Průměr
Čas měření rychlosti spalin v měřicím místě		[hmin]	13:20	16:00	18:40	
Čas začátku a konce odběru vzorku pro měření koncentrace tuhých částic (TZL)		[hmin]	13:30	16:10	18:50	
Průměr hubice sondy		[mm]	7,6	7,6	7,6	
Teplota okolí	(4)	[°C]	-0,40	-0,60	-0,7	-0,57
Atmosférický tlak		[Pa]	99500	99500	99500	99500
Teplota odpadního plynu v měřicím místě (průměr)	(5a)	[°C]	135,63	137,38	138,10	137,04
Dynamický tlak (průměr)	(5b)	[Pa]	10,78	10,89	10,56	10,74
Statický tlak (průměr)	(6)	[Pa]	97000	97000	97000	97000,00
Složení suchého odpadního plynu	CO ₂	[%]	10,84	11,19	11,43	11,15
	O ₂	[% obj.]	9,08	8,70	8,43	8,74
	N ₂	[% obj.]	79,15	79,18	79,21	79,18
Složení vlhkého odpadního plynu	CO ₂	[% obj.]	9,72	10,05	10,25	10,01
	O ₂	[% obj.]	8,15	7,81	7,56	7,84
	N ₂	[% obj.]	69,73	69,87	69,79	69,80
	H ₂ O	(7) [% obj.]	11,4657	11,3383	11,4657	11,42
Hustota odpadního plynu v kourfodu v normálním stavu	(8)	[kg/m ³]	1,3067	1,3092	1,3098	1,31
Hustota odpadního plynu v kourfodu za provozních podmínek (při měření)	(9)	[kg/m ³]	0,8359	0,8339	0,8328	0,83
Sřední rychlost proudění vlhkého odpadního plynu (10a) = $\frac{v}{\rho}$ [2 x (5b) / (9)]	(10a)	[m/s]	5,0783	5,1104	5,0348	5,07
Sřední rychlost proudění suchého odpadního plynu (10b) = (10a) x [100 - (7) / 100]	(10b)	[m/s]	4,4960	4,5310	4,4575	4,49
Množství suchého odpadního plynu (11) = (10b) x (1)	(11)	[m ³ /s]	4,4960	4,5310	4,4575	4,49
(12) = $\frac{(10a) \times (11) \times (3)}{[(3) + (5a)] \times (2)}$	(12)	[m ³ /s]	2,8760	2,8861	2,8343	2,87
(13) = (8) x (12)	(13)	[kg/s]	4,2447	4,2615	4,1931	4,23
Množství vlhkého odpadního plynu (14) = (10a) x (1)	(14)	[m ³ /s]	5,0783	5,1104	5,0348	5,07
(15) = (12) x 100 / [100 - (7)]	(15)	[m ³ /s]	3,2485	3,2551	3,2013	3,23
Objem odsátého množství odpadního plynu včetně vody za provozních podmínek (16a) = (17) x 1000 / (16a)	(16a)	[m ³]	0,6960	0,7080	0,7010	0,70
Objem odsátého množství odpadního plynu včetně vody v plynném normálním stavu (16b) = (16a) x (16b)	(16b)	[m ³]	0,4450	0,4500	0,4450	0,45
Hmotnost zachycených tuhých částic (17)	(17)	[g]	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
C _p - koncentrace tuhých částic ve vlhkém odpadním plynu za provozních podmínek (18a) = (17) x 1000 / (16a)	(18a)	[mg/m ³]	0,1700	0,1400	0,1400	C_p = 0,15
C _{sv} - koncentrace tuhých částic ve vlhkém odpadním plynu za normálních podmínek (18b) = (17) x 1000 / (16b)	(18b)	[mg/m ³]	0,2700	0,2200	0,2200	C_{sv} = 0,24
C _{rvn} - koncentrace tuhých částic ve vlhkém odpadním plynu, normální stavové podmínky po přepočtu na referenční obsah O ₂ (%) = (18c) = (18b) x (21 - c _{o2}) / (21 - c _{o2})	6 (18c)	[mg/m ³]	0,3400	0,2700	0,2600	C_{rvn} = 0,29
C _{ns} - koncentrace tuhých částic v suchém odpadním plynu, normální stavové podmínky (19a) = (18b) x 100 / [100 - (7)]	(19a)	[mg/m ³]	0,3000	0,2400	0,2500	C_{ns} = 0,26
C _{rns} - koncentrace tuhých částic v suchém odpadním plynu, normální stavové podmínky, po přepočtu na referenční obsah O ₂ (%) = (19b) = (19a) x (21 - c _{o2}) / (21 - c _{o2})	6 (19b)	[mg/m ³]	0,3800	0,2900	0,3000	C_{rns} = 0,32
Množství emitovaných tuhých částic při změněném provozním stavu (20) = (15) x (18b)	(20)	[mg/s]	0,8600	0,7200	0,7000	0,76
(21) = (20) x 3600 / 10 ⁶	(21)	[kg/hod]	0,0031	0,0026	0,0025	0,00

Programem jsou spočítány všechny vypočtené hodnoty se zaokrouhlením na uvedený počet desetinných míst
* Hmotnost tuhých znečišťujících látek zachycených na filtru je pod mezí detekce

Příloha 5: Tabulka naměřených a vypočtených hodnot koncentrací TZL [8]

čas měření	počet měření	CO						NO ₂						SO ₂						průběh měření					
		C ₉₅ ppm	C ₉₅ mg/m ³	cp	C ₉₅ mg/m ³	Ekv ³ mg/m ³	C ₉₅ mg/m ³	C ₉₅ ppm	cp	C ₉₅ mg/m ³	Ekv ³ mg/m ³	C ₉₅ mg/m ³	C ₉₅ ppm	cp	C ₉₅ mg/m ³	Ekv ³ mg/m ³	C ₉₅ mg/m ³	C ₉₅ ppm	cp		C ₉₅ mg/m ³	Ekv ³ mg/m ³			
1350	0:30	9,1	197,99	157,73	139,21	247,53	219,15	311,57	275,85	117,87	154,24	136,62	241,88	214,14	304,45	269,55	591,60	1077,97	954,83	169,62	1495,90	2126,8	1882,92	v provozu	30,0 min.
1400	1:30	9,0	194,47	154,92	137,23	243,12	215,25	305,14	270,15	103,98	136,06	120,51	213,36	188,90	267,79	237,09	591,77	1078,28	955,10	1694,10	1496,32	2121,2	1877,99	v provozu	30,0 min.
1450	1:50	9,0	191,98	152,84	135,47	240,01	212,49	300,06	265,65	103,04	134,82	119,42	211,43	187,19	264,33	234,02	589,12	1073,44	950,82	1682,52	1491,75	2103,5	1864,99	v provozu	30,0 min.
1500	1:52:30	8,7	180,41	143,72	127,31	225,55	199,69	276,01	244,37	108,44	141,89	125,68	222,52	197,01	272,31	241,08	594,76	1083,72	959,93	1698,63	1506,04	2078,7	1843,00	v provozu	30,0 min.
1550	1:55	8,6	182,43	145,33	128,73	228,07	202,21	276,85	245,46	110,26	144,27	127,79	226,25	200,60	274,64	243,30	595,94	1083,87	961,83	1702,00	1519,02	2066,0	1831,79	v provozu	30,0 min.
1600	1:58	8,7	192,87	153,65	136,10	241,12	213,78	293,59	260,30	122,48	160,26	141,95	251,32	222,83	306,01	271,31	586,73	1169,09	946,97	1675,70	1485,70	2040,3	1808,98	v provozu	30,0 min.
1650	1:59	8,7	191,66	152,69	135,25	239,61	212,45	292,42	259,26	132,70	173,64	153,81	272,31	241,43	332,32	294,64	580,83	1058,35	937,45	1658,86	1470,78	2024,4	1794,89	v provozu	30,0 min.
1700	1:59	8,6	188,19	149,92	132,80	235,28	208,60	283,87	251,68	137,68	180,15	159,58	282,52	230,49	340,87	302,22	522,13	951,39	842,71	1491,24	1322,14	1799,2	1595,19	v provozu	30,0 min.
1750	1:59	8,3	199,63	159,04	140,87	249,38	220,96	294,74	260,94	127,55	166,90	147,84	281,74	231,73	309,10	273,66	580,24	1002,60	888,07	1571,49	1391,21	1853,8	1643,03	v provozu	30,0 min.
1800	1:59	8,2	210,95	168,06	148,86	263,74	233,30	309,12	273,68	135,76	177,64	157,35	278,58	246,64	326,52	289,08	591,12	1077,10	954,06	1688,25	1494,68	1978,8	1751,89	v provozu	30,0 min.
1850	1:59	8,4	193,38	154,06	136,46	241,76	214,04	287,19	254,27	137,91	180,45	159,83	282,98	230,54	336,16	297,62	527,35	960,90	851,13	1516,12	1333,43	1789,1	1584,00	v provozu	30,0 min.
1900	1:59	8,4	198,20	157,90	139,86	247,79	219,38	295,61	261,71	129,16	168,88	149,59	264,84	234,47	315,94	279,72	522,18	951,47	842,78	1491,34	1320,35	1779,1	1575,12	v provozu	30,0 min.
průměr za celou dobu provozu		8,6	193,5	154,2	136,6	241,9	214,3	293,8	260,3	122,2	159,9	141,7	250,8	222,2	304,2	269,5	570,3	1039,2	920,5	1628,8	1443,1	1980,2	1754,5	celkem v	
maximální konc. během měření		9,3	267,9		335					142,9			293			675,8			1978					průměr za	360,0 min.
minimální konc. během měření		8,0	141,4		176,7					99,27			203,70			498,7			1459					dobu měření	
hmotnostní tok		mg/s			693,24							718,69							4667,29						
		g/hod			2495,65							2587,27							16802,24						

C₉₅ - koncentrace škodliviny zaznamenaná měřicím přístrojem za provozních podmínek, suchý plyn [ppm]cp - koncentrace škodliviny zaznamenaná měřicím přístrojem za provozních podmínek, vlhký plyn [mg/m³]C₉₅ - koncentrace škodliviny přepočtená na normální stavové podmínky, suchý plyn [mg/m³]cp - koncentrace škodliviny přepočtená na normální stavové podmínky, vlhký plyn [mg/m³]C₉₅ - koncentrace škodliviny přepočtená na normální stavové podmínky při referenčním obsahu kyslíku, suchý plyn [mg/m³]cp - koncentrace škodliviny přepočtená na normální stavové podmínky při referenčním obsahu kyslíku, vlhký plyn [mg/m³]