

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Spalovny komunálního odpadu jako zdroj
kombinované výroby energie**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Luděk KOLÁŘ**
Osobní číslo: **E15N0055K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Spalovny komunálního odpadu jako zdroj kombinované výroby energie**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Definujte komunální odpad jako druhotný energetický zdroj pro KVET, zhodnoťte účinnost transformace při spalování.
2. Posuďte možnosti použité technologie s ohledem na omezení vzniklých znečišťujících látek.
3. Analyzujte naměřená provozní data a spočítejte energetické parametry spalovny a plnění požadovaných emisních limitů.
4. Shrňte závažnější poruchy, či nedostatky vzniklé v provozu ve vybrané spalovně, popište způsob jejich řešení, či navrhněte řešení alternativní.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou použití komunálního odpadu jako paliva pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Shrnuje vlastnosti komunálního odpadu a způsob likvidace škodlivých látek, které jsou produktem jeho spalování. Dále se zabývá problematikou opakovaně nevyhovujících provozních stavů a způsobů jejich eliminace.

Klíčová slova

Komunální odpad, spalné teplo, výhřevnost, spalovna komunálního odpadu, admisní pára, emisní pára, termodynamická účinnost, účinnost teplárny, nálep, teplosměnná plocha, akustická vlna.

Abstract

The presented master thesis deals with the issue of using municipal waste as a fuel for combined heat and power generation. It summarizes the properties of municipal waste and the method of disposal of harmful substances that are the product of its incineration. It also deals with the issue of repeatedly unsatisfactory operating conditions and ways to eliminate them.

Key words

Municipal waste, combustion heat, calorific value, municipal waste incinerator, admission steam, emission steam, thermodynamic efficiency, heating plant efficiency, stickers, heat exchange surface, acoustic wave.

Prohlášení

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

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.



podpis

V Plzni dne 14.6.2020

Luděk Kolář

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Emilovi Dvorskému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah	7
Úvod	10
Seznam symbolů a zkratk	10
1 Odpady	12
1.1 Vznik a rozdělení odpadů.....	11
1.1.1 Obecné rozdělení.....	11
1.1.2 Rozdíly ve složení KO v závislosti na lokalitě.....	13
1.2. Legislativní pojmy v odpadovém hospodářství.....	14
1.3 Spalování komunálního odpadu.....	15
1.3.1 Spalné teplo složek KO.....	15
1.3.2 Výhřevnost komunálního odpadu.....	17
1.3.3 Vlastnosti spalovaných odpadů.....	18
1.3.4 Podmínky efektivního spalování.....	20
1.3.5 Produkty spalování KO ve spalinách.....	21
1.3.6 Pevné produkty spalování KO.....	21
2 Proces čištění spalin	22
2.1 Látkový rozbor spalin.....	22
2.2 Monitorované škodlivé látky obsažené ve spalinách.....	23
2.3 Technologie čištění spalin.....	24
2.3.1 Suché čištění spalin - sušárna odpadní vody.....	25
2.3.2 Suché čištění spalin – tkaninový filtr	25
2.3.3 Mokrý čištění spalin – pračka 1	26
2.3.4 Mokrý čištění spalin – pračka 2	28

2.3.5 Katalytické čištění spalin	31
2.3.6 Pomocné systémy.....	32
2.3.7 Systém recyklace vody	32
3 Výpočet parametrů spalovny ZEVO Chotíkov.....	34
3.1 Naměřená provozní data.....	34
3.2 Výpočet výhřevnosti komunálního odpadu.....	36
3.3 Výpočet termodynamické účinnosti turbíny.....	37
3.4 Výpočet parametrů ST a NT páry.....	39
3.5 Výpočet účinnosti výroby tepelné a elektrické energie.....	40
4 Provozní problémy v provozu spalovny KO.....	43
4.1 Zanesení teplosměnných ploch kotle.....	43
4.1.1 Zákonitosti vzniku nálepů v kotli.....	45
4.1.2 Stmelené nálepy.....	46
4.1.3 Slinuté nálepy.....	47
4.1.4 Důsledky tvorby nálepů.....	48
4.1.5 Identifikace problému.....	48
4.1.6 Praktikovaný způsob odstranění nálepů teplosměnných ploch.....	49
4.1.7 Další možnosti odstranění nálepů teplosměnných ploch.....	51
4.1.8 Chemický způsob ošetření vnitřního prostoru kotle.....	52
4.2 Uvážnutí paliva v násypce.....	52
4.2.1 Identifikace problému.....	53
4.2.2 Řešení problémů spojených s uvážnutím materiálu.....	54

Závěr	56
Seznam literatury a informačních zdrojů	57
Přílohy	3

Úvod

Ruku v ruce s prudkým nárůstem lidské populace se také výrazně zvyšuje produkce odpadů. Je to samozřejmě způsobeno našimi stále se zvyšujícími požadavky na růst životního standardu, který je založen v první řadě na ekonomických principech. Bohužel. Odpady jako takové lidská populace produkovala odjakživa. Rozdíl je v tom, v jakém množství a v jakém složení lidstvo produkuje odpady dnes. Na rozdíl od dávné minulosti, kdy se v drtivé většině jednalo o odpady v přírodě rozložitelné, v minulosti nedávné, ale i dnes je situace složitější. S ekonomickým růstem souvisí rozvoj průmyslu, těžarství, dopravy, energetiky atd. Všechna zmíněná odvětví jsou zdrojem odpadů. Chceme li, aby se zpomalila naše doposud přímá cesta ke zkáze v důsledku zamoření planety odpady, je zapotřebí nakládání s odpady nějakým způsobem řídit. Musíme se především snažit snížit jejich produkci, zaměřit se na to, aby ty odpady, které jsme nuceni ukládat byly pokud možno netoxické, nemluvě o radioaktivitě. Také je třeba dbát na vývoj technologií umožňující separaci a recyklaci odpadů. A v neposlední řadě snížit na minimum objem odpadů určených pro uložení na skládky např. tím, že je budeme energeticky využívat. To znamená budovat spalovny komunálních, ale i dalších odpadů. Nejlépe pak odpady nejen spalovat, ale uvolněné teplo dále využívat. Buď přímo využít teplo pro vytápění, anebo uvolněné teplo transformovat na energii elektrickou. To vše by mělo být řízeno jednotnou koncepcí odpadového hospodářství. Samozřejmě, že ne všechny státy umí, či lépe řečeno mají snahu, anebo ekonomické možnosti naložit se svými odpady tak, aby se nestaly zátěží pro životní prostředí a problémem pro budoucí generace. Přestože je spalování odpadů snad tradičně nejstarším způsobem likvidace, z drtivé většiny se dnes skládá. Ani vyspělé evropské státy nemají k problematice nakládání s odpady vždy příkladný přístup. Přitom je jasné, že některé druhy odpadů spálením sníží svou nebezpečnost pro životní prostředí. S některými však zatím nemůžeme dělat nic jiného, než je bezpečně uložit. Proto je důležité odpady správně klasifikovat a zároveň mít dobrou představu o procentuálním zastoupení jednotlivých kategorií. Moderní spalovny KO disponují technologicky a finančně náročnými, sofistikovanými systémy čištění spalin. V souladu s platnými předpisy je nakládáno také s pevnými a kapalnými produkty spalování. Tak je spolehlivě zaručeno, že provoz takové spalovny není zátěží pro životní prostředí, ale naopak.

Seznam symbolů a zkratk

KO.....	Komunální odpad
P1.....	Pračka 1
P2.....	Pračka 2
TZL.....	Tuhé částice – poléťavý prach
TOC.....	Celkový organický uhlík
q_{KO}	Výhřevnost komunálního odpadu
M_{od}	Hmotnostní tok odluhu
i_{od}	Entalpie odluhu

Dolní indexy

a.....	Admisní
e.....	Emisní
bsa.....	Skutečná admisní dle bilančního schématu
TD.....	Termodynamický
bse.....	Skutečná emisní dle bilančního schématu
ie.....	Ideální emisní
K.....	Kotel

Horní indexy

ST.....	Středotlaká
NT.....	Nízkotlaká

1 Odpady

1.1 Vznik a rozdělení odpadů

1.1.1 obecné rozdělení

Jedním z faktorů, který ovlivňuje složení odpadů je stav ekonomiky a stupeň rozvoje průmyslu dané země. Samozřejmě, že v případě méně výkonných ekonomik je podíl kg odpadu na osobu menší. Tabulka 1 ukazuje procentuální zastoupení složení odpadu v jednotlivých typech zemí. [1]

Tabulka 1: Porovnání složení odpadu v závislosti na vyspělosti ekonomik. [1]

Složení odpadu (%)	Zaostalé	Rozvojové	Vyspělé
Papír	1-10	1-15	15-40
Sklo, keramika	1-10	1-10	4-10
Kovy	1-5	1-5	3-13
Textil	1-5	2-10	2-10
Plastické hmoty	1-5	2-6	2-10
Množství odpadu (kg/obyvatel.den)	0,4-0,6	1,1-1,98	1,54-3,97

Odpady můžeme klasifikovat podle různých kritérií. Jedním z těchto kritérií je dělba do skupin např. podle jejich skupenství s tím, že na životní prostředí mají nejzásadnější dopad odpady tuhé. [1] Navíc v případě komunálních odpadů nemá smysl brát v potaz jiné skupenství. Dalšími možnostmi je rozdělení podle místa vzniku, hygienické bezpečnosti, složení.

Podle využitelnosti :

- recyklovatelné
- energeticky využitelné
- dále nevyužitelné (nutno uložit na skládku)

Podle hygienické bezpečnosti :

- inertní
- Toxické
- Radioaktivní

Podle složení :

- organické
- anorganické

Podle místa vzniku

1.1.2 Rozdíly ve složení KO v závislosti na lokalitě

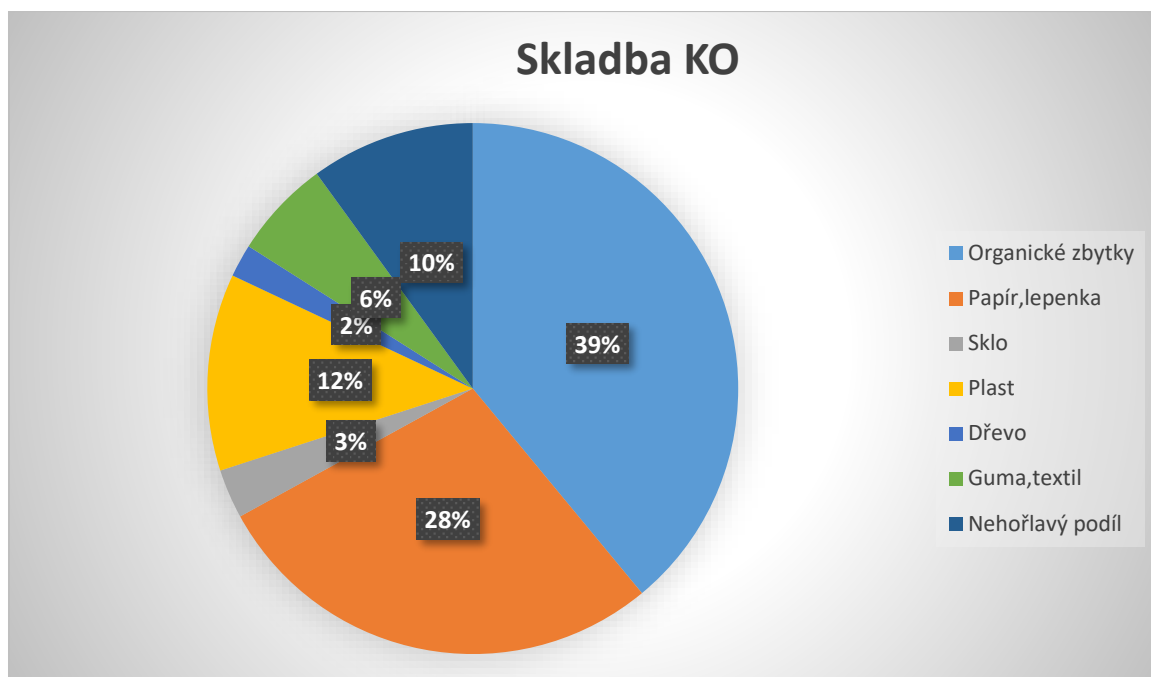
V rámci české republiky najdeme rozdíly ve skladbě a měrném množství odpadu. Pro spalování komunálního odpadu je důležitý energetický potenciál, který je v první řadě určen jeho skladbou. Ta se samozřejmě liší v závislosti na typu dané lokality. Základní rozdělení podle vyprodukovaného odpadu by šlo rozdělit asi následovně:

- **Sídlištní zástavba**, kde převažuje centrální způsob vytápění. Zároveň je zde téměř nulová možnost dalšího využití komunálního odpadu přímo v místních podmínkách. Dalším faktorem je zde nevýznamné zastoupení průmyslového odpadu. [3]
- **Venkovská zástavba** – zásadní odlišnost je zde ve způsobu vytápění. Při vytápění z velké míry tuhými palivy se nabízí možnost spalování části odpadu přímo v místě jeho vzniku. To se děje, ať už si o tom můžeme myslet cokoliv. Zároveň se zde nabízí možnost dalšího využití organických částí odpadu např. zkrmením, nebo kompostováním. Průmyslové odpady zde opět nehrají zásadní roli. [3]
- **Smíšená zástavba** je typická smíšeným způsobem vytápění. Najdeme tu topení lokální i centrální. Vytápění tuhými palivy zde bývá méně zastoupeno, převažuje plynové, či elektrické vytápění. Oproti sídlištní či venkovské zástavbě zde významnou roli hraje odpad vzniklý působením drobných živnostníků a firem zprostředkujících služby. [3]

Tabulka 2: Porovnání měrného množství, vlhkosti a podílu nespalitelných složek odpadu v závislosti na velikosti aglomerace. [1]

Počet obyvatel ve městě [tisíce]	5-20	20-50	100-500	Nad 500
Množství odpadků [kg/osoba a rok]	160	200	220	250
Podíl nespalitelných látek [%]	30-40	30-45	40-50	40-50
Vlhkost odpadků [%]	20-50	20-50	20-50	20-50

Podle statistického výzkumu společnosti AOS EKO–KOM, a.s, která se zabývá aktivitami spojenými s produkcí a likvidací komunálního odpadu, mohla by vypadat průměrná skladba KO podle grafu na obr.č.1. Byla zde použita síťová metoda s oky 8x8mm a 40x40mm. Jednotlivé frakce pak byly rozříděny do kategorií, kromě frakce podsítné (pod 8x8mm). [7]



Obr.č. 1: Průměrné zastoupení jednotlivých materiálových složek v komunálním odpadu v ČR. [1] [7]

1.2. Legislativní pojmy v odpadovém hospodářství

Odpady v ČR řeší zákon č. 185/2001 Sb., který stanovuje pravidla pro nakládání s odpady, předcházení jejich vzniku a minimalizaci negativních dopadů na životní prostředí a lidské zdraví, dále se zabývá právy a povinnostmi subjektů v odpadovém hospodářství. Zákon rovněž zpracovává předpisy evropské unie ohledně nakládání s odpady, klade důraz na dodržování ochrany životního prostředí, ochrany zdraví člověka, při trvale udržitelném ekonomickém rozvoji. [5] [7] Zabývá se omezováním nepříznivých dopadů využívání přírodních zdrojů. Jako jednu z cest uvádí zlepšování účinnosti využívání přírodních zdrojů. Definice komunálního odpadu je podle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve znění pozdějších předpisů, je dle § 4 b) následující: Komunální odpad je veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob a který je uveden jako komunální odpad v prováděcím právním

předpisu s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání. [5] [6]

Nařízení vlády o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024 definuje legislativní pojmy:

Odpad: Odpad je každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit.

Komunální odpad: Podle vyhlášky MŽP č. 381/2001 Sb. veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání. [5]

Katalog odpadů výše zmíněné vyhlášky MŽP č. 381/2001 Sb. Dále eviduje pojmy:

Využitelné složky komunálního odpadu: Jedná se o podmnožinu komunálního odpadu, která je separátně sebrána a která má potenciál buď ihned, nebo po úpravě využít jako druhotnou surovinu. Jedná se o papír, sklo, plasty, textil atd.

Směsný komunální odpad: Směsný KO je zbytkový komunální odpad bez oddělených využitelných složek.

1.3 Spalování komunálního odpadu

Položím li si otázku, co může společnost udělat pro životní prostředí v souvislosti s produkcí KO, jsem přesvědčen, že odpovědí budou tři body:

- **Snížení samotné produkce KO.** Nástrojem je např. systém vratných obalů, konec jednorázových igelitových sáčků a tašek, environmentální výchova.
- **Recyklace** je velice účinným prostředkem ke snížení množství KO. Na druhé straně ale separací především plastové podmnožiny KO se snižuje jeho výhřevnost pro další energetické využití.
- **Spalování.** Vzhledem k plánovanému omezení skládkování KO bude zřejmě spalování jedinou možností likvidace KO.

1.3.1 Spalné teplo složek KO

Komunální odpad je velice pestrá směs různých látek, různých vlastností. Jednotlivé složky mají různou frakci, vlhkost, výhřevnost atd. Proto, abychom mohli správně určit vlastnosti KO jako celku, bylo by dobré nejprve definovat jeho průměrné složení. Potom je třeba znát tepelný potenciál jeho spalitelných složek. V tabulce 3 jsou uvedeny vzorky odpadů a jejich spalné teplo.

Tabulka 3: Porovnání měrného spalovacího tepla jednotlivých složek komunálního odpadu. [1]

Materiál	Popis vzorku	Spalovací teplo (kJ.kg ⁻¹)
Papír	Kancelářský papír	14 930
	Tvrký papír	14 658
	Kartón	20 248
	Voskovaný papír	10 224
Vícevrstvý materiál (papír,plast,al folie)	Krabice (např. mléko)	23 388
	Dětská plenka	13 920
Guma	Guma	45 267
	Gumová hadice	40 715
	Gumové těsnění	25 812
	Pneumatika	30 585
Dřevo	Čerstvé štěpky	17 878
	Kůra	17 313
	Piliny	17 947
	Keře	17448
	Dubové piliny	19 568
	Pilinová briketa	19 568
Polyetylén (PE)	Potravinové obaly	47 505
Polyetylén (LDPE)	Mikrotenový sáček	45 679
Polyetylén (HDPE)	Nákupní taška	45 745
	Plastový obal	43 796
Polypropylén (PP)	Obaly (např. jogurt, tavaroh)	47 046
Polystyrén (PS)	Izolační desky	39 392
	Potravinové obaly	41 725
Polyvinylchlorid (PVC)	Podlahové krytiny	14 821
Polyetylentetraftalát	PET lahve	21 752
Textil a kůže	100% bavlna	22 628
	kůže	14 348
Organický odpad	Pomerančová kůra	14 715
Léky	Augmentin	14 177
	Ibuprofen	16 297
Nátěrové hmoty	Akrylová barva dvousložková	18 227
Ostatní	RTG snímek	23 490
	CD	23 899
	Plastový obal (např.od elektro)	41 270

Z tabulky č.3 vyplývá, že plastové a gumové složky a ostatní ropné deriváty jsou velice kvalitním palivem, svým energetickým potenciálem dokonce vysoce přesahujícím nejrozšířenější palivo našich elektráren – hnědé uhlí. Následuje papír a dřevo, nejméně měrného tepla pak obsahují organické látky a léky.



Obr.č.2: Svoz komunálního odpadu do spalovny ZEVO Chotíkov.

1.3.2 Výhřevnost komunálního odpadu

Výhřevnost je vlastností paliva, která vypovídá o energetickém obsahu obvykle v 1kg paliva. Na rozdíl od spalného tepla nezapočítává energii obsaženou ve vodní páře, která se odpaří bez užitku jako součást spalin. U spalného tepla se naopak předpokládá, že veškerá uvolněná pára z paliva zkondenzuje při předání tepla v kotli. Výhřevnost je tedy podmnožinou spalného tepla. Výhřevnost se spočítá ze změřeného spalného tepla:

$$H = Q_{\text{spal}} - r \cdot (W + 8,9 \cdot H_2) \quad [\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}], \quad (1.1)$$

H - výhřevnost $[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$,

r - latentní teplo vody $[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$,

W - obsah vody v palivu [-],

H₂ - obsah vodíku v palivu [-].

Tabulka 4: výhřevnost jednotlivých materiálových složek v komunálním odpadu. [7]

Odpad	Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]
Papír	15,7
Plasty	32,7
Textil	18,3
Organické zbytky	3,2
Štěpka, dřevo	12,4
Sklo	0,2

Graf na obrázku č.1 ilustruje průměrné složení vyprodukovaného komunálního odpadu. Na základě hodnot z tab.4 a grafu1 lze předpokládat průměrnou hodnotu výhřevnosti komunálního odpadu H_{SKO} . Tu dostaneme sumou průměrného spalného tepla složky vynásobené jejím poměrným zastoupením.

$$H_{KO} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot q_i \quad (1.2)$$

$$H_{KO} = H_{\text{papír}} \cdot k_{\text{papír}} + H_{\text{textil}} \cdot k_{\text{textil}} + H_{\text{plast}} \cdot k_{\text{plast}} + H_{\text{org}} \cdot k_{\text{org}} + H_{\text{dřevo}} \cdot k_{\text{dřevo}} + H_{\text{sklo}} \cdot k_{\text{sklo}} \quad (1.3)$$

$$H_{KO} = 15,7 \cdot 0,28 + 18,3 \cdot 0,06 + 32,7 \cdot 0,12 + 3,2 \cdot 0,39 + 12,4 \cdot 0,02 + 0,2 \cdot 0,03 \quad (1.4)$$

$$H_{KO} = \mathbf{10.67 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}} \quad (1.5)$$

1.3.3 Vlastnosti spalovaných odpadů

Každé palivo a tedy i odpady jsou určeny třemi složkami:

- hořlavinou značenou C (z anglického combustible),
- obsahem popelovin A (z anglického ash),
- vlhkostí C (z anglického water).

Stejně tak jako je to i u jiných paliv je hoření komunálního odpadu určeno poměrem jeho složek. Poměrem hořlaviny a balastu, tedy vlhkosti a popelovin. Hořlavina je ta část paliva, ze které se při exotermických reakcích uvolňuje teplo. Obsah hořlaviny je určeno materiálovým složením odpadu. Nositeli chemicky vázané energie jsou především prvky uhlík C, vodík H a síra S. [17] Vlhkost kromě materiálové závislosti pak z části podléhá vlivu počasí, a to zejména při využívání meziskladů komunálního odpadu. Nehořlavé složky pak můžeme považovat za popelovinu. Poměr všech těchto složek dále závisí jak na místě vzniku, tak ročním obdobím. Např. v topné sezóně zejména v odpadech svezných z venkovských sídel výrazně přibývá popel. Komunální odpad lze považovat navzdory vysoké výhřevnosti některých jeho materiálových složek spíše za palivo nekvalitní. Důvodem k této klasifikaci je jeho

značná proměnlivost v závislosti na více faktorech. Mimo jiné např. na lokalitách, odkud byl svezten. [4] Dalším problémem je vysoký podíl vlhkosti, která je rovněž velmi proměnlivá. Ve spalovnách komunálního odpadu je navíc velmi často jako komunální odpad spalován i odpad z průmyslové výroby. To někdy může s sebou přinášet i nepříjemné problémy, protože odpadové materiály určené například pro automobilový průmysl jsou už z důvodu bezpečnosti při silničním provozu špatně hořlavé. Jiné odpady jsou naopak hořlavé velmi, jako např. zbytky průmyslových chemikálií. Nehořlavé i vysoce hořlavé materiály samozřejmě obsahuje i odpad vyprodukovaný domácnostmi, ten je však promísen s ostatními produkty v určitém poměru. Tato promísená směs se sice liší v závislosti na lokalitě, ve které byla vyprodukována, dále také např. na ročním období, ale v zásadě známe její složení a můžeme ji považovat za palivo sice heterogenní, ale s jakýmsi předvídatelným způsobem víceméně rovnoměrně promísené. To je dobré pro regulaci a plynulou generaci páry a tedy elektřiny a tepla. Častý problém s průmyslovými odpady je v množství, které je najednou dopraveno do zásobního úložného místa (bunkru) najednou. Často se do bunkru vyloží i několik kamionů s problémovým materiálem. Může se jednat o vysoce hořlavé plasty, anebo naopak o materiál málo hořlavý. V prvním případě může dojít k odstavení z důvodu prudkého nárůstu tlaku páry, kdy řídicí systém nestačí dostatečně rychle zareagovat náhlou změnu výhřevnosti. To se stane zejména, když v momentě před změnou byla udržována generace páry při horní hranici jmenovitého výkonu kotle. Ve druhém případě dojde k nutnosti velice neekonomického provozu za aktivace systému podpurného hoření. Aby k těmto situacím nedocházelo, musí se přivezený odpad řádně promíchat za pomoci jeřábových drapáků s ostatním. To ovšem může být vzhledem k nárazovému množství přivezeného průmyslového odpadu problém.



Obr.č.3: Do násypky kotle je komunální odpad přikládán jeřábovým drapákem ze svozového místa KO.

1.3.4 Podmínky efektivního spalování

Ve spalovacích komorách spaloven komunálního odpadu se spaluje materiál, který zde hoří přímo, bez nutnosti přídavného tepla. To znamená, že palivo musí obsahovat dostatečné množství hořlavých látek, ve kterých musí být obsaženo a uvolněno více tepla, než kolik ho je zapotřebí k vysušení vlhkosti v něm obsažené. V opačném případě se musí teplo dodat pomocí stabilizačních olejových, či plynových hořáků. Takový provoz je však značně neekonomický. Za dolní hranici hoření bez nutnosti použití podpůrného paliva se dá považovat minimální výhřevnost Q_{\min} , která musí být vyšší než $5 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. [4] Tuhle podmínku zhruba představuje složení:

- obsah popelovin A max. 60 %,
- obsah vlhkosti W max. 50 %,
- obsah hořlaviny C min. 25 %.

Přitom musí platit podmínka:

$$C+W+A=100\% \quad (1.6)$$

Tabulka 5: Vlhkost a obsah popelovin obsažené v jednotlivých vybraných složkách komunálního odpadu. [7] [18]

Materiál KO	Spodní hodnota vlhkosti (%)	Horní hodnota vlhkosti (%)	Obvyklá hodnota vlhkosti (%)	Obvyklá hodnota obsahu popelovin (%)
plast	1	4	2	1,4
lepenka	4	8	5	9
papír	4	10	6	9
textil	6	15	10	12
dřevo	15	40	20	1,8
Zahradní odpad	30	80	60	20
SKO	15	40	20	18
Organické zbytky	50	80	70	5

1.3.5 Produkty spalování KO ve spalinách

Odpady se v násypce ohřívají sáláním tepla ze stěn spalovacího zařízení, na podávacích stolech pak energií spalin. V některých případech se k předeřevu odpadu využívá horký vzduch. Cílem je co nejrychleji odpad zahřát na zápalnou teplotu, která je v rozmezí mezi 240-400 °C. [1] Čím je toto zahřívání rychlejší, tím je větší šance, že se škodlivé látky neodpaří do spalin, ale že shoří ve spalovací komoře. Je nezbytné, aby spalování odpadů probíhalo při teplotách mezi 850-1200°C. Při spalování průmyslových odpadů se využívá dohořivací komora s teplotou 900-1200 °C, kde je podmínka na minimální dobu průchodu spalin 2s. Pro co možná nejúčinnější dohoření halogenovaných látek se spaliny musí prohnat dohořivací komorou v rozmezí teplot 1200-1500 °C. Minimální doba zdržení je zde 3s.[4] Přebytek kyslíku vůči stechiometrickému minimu se udržuje vyšší o 1,5-2,5 %. To aby byla jistota, že je dostatek kyslíku pro oxidaci jednotlivých složek hořlavin. Produktem spalování jsou mimo jiné i těžké kovy. K tomu dochází termickým rozkladem anorganických sloučenin. Do plynné fáze se při teplotách mezi 800-1000°C budou uvolňovat Hg,As,Se,Cd,Te,Sb a Pb. [1]

1.3.6 Pevné produkty spalování KO

Struska a popílek jsou jedinými pevnými produkty procesu spalování KO. Zabírají 25-30% hmotnostního podílu, ale pouze 10-15% původního objemu KO. V tom je vedle energetického zisku hlavní přínos spalování komunálního odpadu.[4] Je třeba si uvědomit, že úkolem spaloven není v první řadě transformace energie, ale snížení objemu, hmotnosti, snížení podílu různorodých organických látek a zachycení látek škodlivých. Např. zachycení těžkých kovů ve spalinách. Od tohoto podílu je ještě třeba odečíst množství železného odpadu, který se magnetickou separací oddělí od škváry a je určen k dalšímu využití. To je pro spalovny samozřejmě vítaným vedlejším příjmem. V pevných zbytcích, hlavně ve strusce pak zůstávají Mn,Sn,Al,Cu,Fe a Si. Za úvahu by tedy rovněž stálo, pokusit se ze škváry oddělit i nemagnetické kovy, například separací vzduchem na základě optikou řízených aktuátorů, nebo na základě rozdělení pomocí rozdílných materiálových rezonančních frekvencí. Takto očištěnou strusku lze dále využívat např. ve stavebnictví. Používá se jako podsypový materiál pod silnice. Částečně ji lze i využít jako zásypový materiál při rekultivaci skládek, které budou ukončovat provoz. Naproti tomu je popílek látka velice toxická a agresivní, kterou je nejprve třeba stabilizovat a uložit na příslušné specializované skládce.

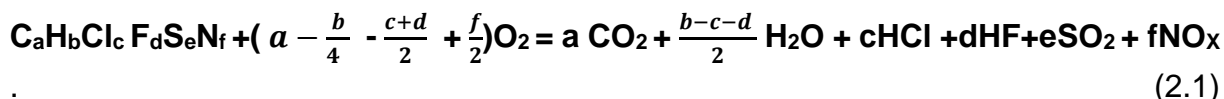
2 Proces čištění spalin

2.1 Látkový rozbor spalin

Na komunální odpad je třeba nahlížet jako na chemickou sloučeninu. Chceme-li porozumět a správně interpretovat chemické děje, které probíhají v sloučenině při hoření, měli bychom znát její chemické složení a pokusit se sestavit její chemický vzorec. Tedy složení prvků s nějakým pravděpodobným poměrem. V případě, že se tento poměr dá vyjádřit pomocí celých čísel, mluvíme o stechiometrické sloučenině. Čísla, která poměr vyjadřují se nazývají stechiometrický koeficient. Přepočteme-li hmotnost jednotlivých prvků ve 100 kg odpadu na jejich látkové množství dostaneme pro sloučeninu komunální odpad obecný vzorec:



kde velká písmena znamenají označení jednotlivých prvků sloučeniny, malé indexy pak stechiometrický koeficient. Spalování lze popsat chemickým vzorcem:



Rovnici můžeme pak interpretovat tak, že při spálení průměrného vzorku tuhého komunálního odpadu jsou produktem hoření především: oxidy dusíku NO_x , oxid uhličitý CO_2 , oxid siřičitý SO_2 , voda (ve formě vodní páry) H_2O . Kromě těchto škodlivin se mohou vyskytovat i další. Například při spalování plastů se ve spalinách vyskytují halogenní sloučeniny jako chlorovodík HCl a fluorovodík HF . Kromě toho dále polychlorované dibenzo-p-dioxiny PCDD a rovněž polychlorované dibenzofurany. Rovněž se mohou vyskytovat polycyklické aromatické uhlovodíky PAU. [1] [4]

Tabulka 6: Hodnoty látkového obsahu ve spalinách průměrného komunálního a průmyslového odpadu. [8] [11]

Látka	Hodnota - komunální odpad	Hodnota - průmyslový odpad
Úletový popílek	5 g/Nm ₃	10 g/Nm ₃
HCl	1 000 mg/Nm ₃	20 000 mg/Nm ₃
HF	10 mg/Nm ₃	50 mg/Nm ₃
SO ₂	500 mg/Nm ₃	5000 mg/Nm ₃
NO _x	400 mg/Nm ₃	600 mg/Nm ₃
CO	50 mg/Nm ₃	50 mg/Nm ₃
Pb	10 mg/Nm ₃	50 mg/Nm ₃
Zn	30 mg/Nm ₃	50 mg/Nm ₃
Cd	1 mg/Nm ₃	5 mg/Nm ₃
Hg	0.4 mg/Nm ₃	3 mg/Nm ₃
PCDD/F	2 ngTE/Nm ₃	5 ngTE/Nm ₃

2.2 Monitorované škodlivé látky obsažené ve spalinách

Škodlivé látky se měří buď v komíně, anebo se mohou měřit nad zemí. V prvním případě hovoříme o emisích, ve druhém o imisích. Emisní a imisní limity jsou dány legislativně (zákon č. 483/2008 Sb.). Následující podkapitoly popisují jakým způsobem lze v ZEVO Chotíkov snížit emisní limity sledovaných látek hluboko pod úroveň legislativně vyžadovaných hodnot. Sledovanými škodlivinami jsou především:

Oxid siřičitý (SO₂)

Jedná se o bezbarvý nehořlavý silně páchnoucí plyn, dobře rozpustný ve vodě se kterou tvoří kyselý roztok. Jeho rozpustnost je však silně závislá na teplotě. V přírodě reaguje se vzdušnou vlhkostí. Vzniká tak aerosol kyseliny sírové, ta může dále reagovat s alkalickými prašnými částicemi na sírany. Oxid siřičitý je původcem kyselých dešťů, kdy pH < 4. [9] V minulosti byly kyselé deště příčinou devastace lesních porostů především středních a východních Krušných hor. V procesu čištění spalin ZEVO Chotíkov se většina SO₂ odstraní pomocí vápenného mléka v pračce 2.

Oxidy dusíku (NO_x)

Oxid dusnatý (NO) je bez barvy a zápachu. Patří mezi tzv. skleníkový plyn.

Oxid dusičitý (NO₂) je červenohnědý štiplavě páchnoucí plyn. Přispívá k tzv. fotochemickému smogu, kdy přízemní vrstva ozónu poškozují rostliny, včetně zemědělských plodin.

Oxid dusný (N_2O) jedná se o tzv. rajský plyn. Vzniká při nízkoteplotním spalování. Patří mezi nejvýznamnější skleníkové plyny. [9]

Všechny oxidy dusíku se v procesu čištění spalin rozkládají v systému denox filtru přispěním redukčního činidla na dusík a vodní páru.

TZL

TZL neboli polévatý prach. V přírodě se vyskytuje i přirozeně bez působení člověka. Jedná se o částice o velikosti 10 nm až 0,1 mm. Samy o sobě jsou neškodné, ale při průchodu spalinovou cestou na sebe navazují další škodliviny jako dioxiny, furany a oxidy kovů. [9] Ve větší koncentraci mohou způsobovat potíže dýchacích cest. Dioxiny a furany jsou látky vysoce karcinogenní. TZL se ve spalovně zachytávají na rukávcích tkaninového a částečně i policejního filtru, dále pak v pračce. [17]

Chlorovodík (HCl), fluorovodík (HF)

Vznik především při spalování plastů. S vodou tvoří velmi silné kyseliny. [9] Jejich likvidace v čistícím procesu se provádí částečně v neutralizační nádrži, neutralizovaný roztok je atomizován do prostoru sušičky procesní vody. Suché krystaly skončí v síle popílku. [17]

Oxid uhelnatý (CO)

Bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, omezeně rozpustný ve vodě. V přírodě se vyskytuje v malém množství. Přirozeně vzniká fotolýzou oxidu uhličitého působením ultrafialového záření. Antropogenní produkce je způsobena nedokonalým spalováním při nízkých teplotách a především při nedostatečném přívodu vzduchu. Nedostatek vzdušného kyslíku je příčinou nedostatečné oxidace uhlíku na CO_2 . I poměrně malé koncentrace, které se běžně vyskytují ve městech způsobují zdravotní obtíže, a to zejména lidem trpícím např. kardiovaskulárními chorobami. Delší vystavení organismu těmto hodnotám CO způsobuje obtíže i zdravým jedincům. [9]

TOC

Jedná se o celkový organický uhlík, který se v zachytává a odstraňuje ze spalin během celého procesu.

2.3 Technologie čištění spalin

Vyčistit spaliny vzniklé spalováním komunálního odpadu, znamená „prohnat“ spaliny takovým systémem, aby na konci procesu spaliny opouštějící komín spalovny splňovaly legislativně předepsané podmínky na ochranu životního prostředí. Tento systém je náročný jak finančně, tak např. prostorově (budova pro technologie čištění spalin zpravidla zabere stejně místa, jako hala pro spalování a transformaci energie),

zrovna tak i na technickou náročnost použitých zařízení. Čištění spalin takové moderní spalovny se v zásadě sestává z:

- Rozprašovací sušárny odpadních vod
- Suchého čištění spalin, které představují tkaninový filtr pevných částic, případně ještě doplňkový tzv. policejní filtr
- Mokrý čištění spalin. Tím se rozumí pračka souproutá a protiproudá, kde spaliny sprchují proudem vody.
- Katalytické čištění, kde se principiálně stejně jako u většiny aut zbavují zplodiny přidáním čpavku oxidů dusíku
- Pomocné systémy. Sem patří např. vzduchové a sádrové hospodářství. Systém manipulace s vodou, čpavkem atd.

2.3.1 Suché čištění spalin - sušárna odpadní vody

Prvním zařízením v řetězci čištění, které přijde do kontaktu se zatím nevyčištěnými spalinami je sušárna odpadní vody. Odpadní voda z neutralizační nádrže (viz níže) se rotačním rozprašujícím zařízením (tzv. atomizérem) rozprašuje do konusové nádoby. Využitím energie spalin proudící nádobou se z rozstříkovaného produktu neutralizační nádrže – solného roztoku odpaří voda a to ještě před dopadem krystalů soli na stěnu nádoby. Tím se zároveň spaliny ochladí z asi 200°C na 165-175°C. Množstvím vysoušené odpadní vody pak lze ovlivňovat teplotu spalin za sušárnou (více odpařené vody zchladí spaliny). V tomto procesu se však odseparuje zhruba jen 10-20% pevných částic. [17] Tyto částice propadnou nádobou sušičky a jsou zachyceny do zásobní nádrže a dopraveny systémem dopravy popílků do sila popílků. Nezachycené zbytky jsou unášeny dále spalinovou cestou.

2.3.2 Suché čištění spalin – tkaninový filtr

Tkaninový filtr je druhým zařízením v cestě spalin. Navazuje na sušárnu. Jeho úkolem je hlubokovrstvá filtrace prachových částic pomocí tkaninových rukávců (hadic). Před vstupem do TF je zavedeno vyústění adsorbentu, což je směs hašeného vápna a aktivního uhlí v poměru 70% vápna + 30% uhlí. Úkolem adsorbentu je oddělení těžkých kovů (zejména rtuti), dioxinů, furanů, chloridů a oxidu siřičitého (SO₂). [17] Adsorbent, který je přiváděn před vstup spalin do TF je už částečně zreagovaný, to znamená v malé míře kontaminovaný výše zmíněnými látkami. Ze sila adsorbentu je totiž nejprve zaveden do policejního filtru. Vzhledem k tomu, že policejním filtrem prochází spaliny už téměř zbavené pevných částic, můžeme si dovolit adsorbent znovu použít a potrubní dopravou pomocí dmychadel dopravit do TF. Tkaninový filtr se skládá ze čtyř komor, které mají na vstupu a výstupu těsnící klapky. Je koncipován tak, aby se za provozu v případě potřeby dala jedna komora

odstavit, aniž by to narušilo funkci filtru. Dohromady je zde nainstalováno přes 1000 hadic z celkovou plochou asi 2800m²[9]



Obr.č.4: Tkaninový filtr. Pohled zdola na tkaninové hadice.

Znečištěné spaliny nejprve proudí tkaninovým filtrem směrem k výsypkám TF. Pak se proud spalin obrací směrem vzhůru. Z důvodu změny směru a rychlosti proudění jsou pak těžší částice odděleny a padají do výsypek. Lehčí částice jsou unášeny vzhůru a cestou uvíznou na tkaninových rukávech, kde se hromadí a odkud jsou systémem regeneračního systému tlakového vzduchu odstraňovány. Impulzy stlačeného vzduchu jsou řízeny automaticky na základě úrovně zanesení. To je vyhodnoceno na základě tlakové diference na vstupu a výstupu TF. Zachycené nečistoty opět padají dolů do výsypek a dále pak dopravním systémem do sila popílku.

2.3.3 Mokrý čištění spalin – pračka1

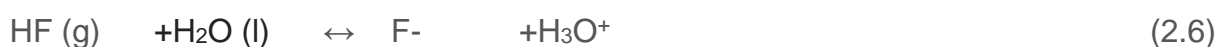
Pračka 1 se skládá z těchto částí:

- Hasící část
- Mycí část
- Kalová jímka
- Odlučovače kapek
- Výměník spalin/spaliny
- Výměník pára/spaliny

Hasící mycí část a kalová jímka jsou vyrobeny z materiálu odolávajícím velmi kyselému prostředí uvnitř pračky a jsou spojeny dohromady v jeden celek. Hasidlo má za úkol snížit teplotu přiváděných spalin ze zhruba 105 °C na potřebnou teplotu (60-75°C).[17] Děje se tak prostřednictvím rozstříkáváním pračkového kalu a servisní vody. Během normálního provozu servisní voda pouze udržuje předepsanou hladinu pračky. V případě poruchy čerpadel, či výpadku např. z důvodu přerušení dodávky el. energie, musí být v zásobní nádrži provozní vody dostatečná rezerva pro nouzové chlazení vstupních spalin minimálně po dobu 30 min. [17]

V prostoru mycí části dochází k oddělení plynných látek. Některé z těchto látek při reakci s vodou vytváří zásady, některé kyseliny. Látky zásadní pro děje v mycí části zejména chlorovodík (HCl), fluorovodík (HF), oxid siřičitý (SO₂) a také těžké kovy reagují tak, že vytváří kyseliny. Podle Bronstedovy acidobazické teorie lze při určitém konkrétním pH selektivně oddělit ze směsi konkrétní plyn. Velmi kyselé prostředí v pračce vede k oddělení oxidu sírového, za vzniku kyseliny sírové. [9] Chlorovodík a fluorovodík, jejichž rozpustnost ve vodě je extrémní se oddělí od plynné fáze jako první, už v mycí fázi. Reagují vytvořením kyseliny chlorovodíkové, respektive fluorovodíkové. Kapalná fáze spolu se zbytky prachu a popílku jsou zachyceny v kalové jímkce. Oxid siřičitý však v takto kyselém prostředí nereaguje a ve formě plynu opouští pračku a účastní se dalších reakcí v procesu čištění spalin. Spolu s ním odchází z P1 i jemné částice prachu a popílku (menší než 1µm). [17]

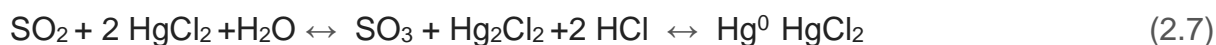
Reakce v P1:



[17]

Složitější situace vzniká u rtuti (Hg). Rtuť vytváří různé sloučeniny, které reagují mezi sebou, ale i s rtuťovými sedimenty v kalové jímkce. V mokré pračce lze absorbovat sloučeniny HgCl₂, Hg₂Cl₂. Naproti tomu kovovou rtuť Hg⁰ nelze absorbovat a ani z důvodu vysokého tlaku výparů kondenzovat ve vodě. [9] To, v jaké podobě se bude rtuť vyskytovat záleží na koncentraci chloru ve spalinách, ale stejně tak i na teplotě spalin. Při teplotách nad 900°C tvoří víc než 95% rtuti HgCl₂. Nízká hodnota pH opět zajišťuje následnou disproportionaci již absorbovaného HgCl₂. Jednou příčinou redukce je reakce s oxidem siřičitým (SO₂). [9]

Reakční rovnice HgCl_2 :



[17]

Pro správnou funkci pračky jsou důležité, aby styčná plocha plynu s kapalnou fází byla co největší. Toho se dosáhne rozstříkáním kapaliny pomocí čerpadel pračky a vhodně zvolené soustavy rozstříkovacích trysek. V pračce 1 spaliny proudí shora dolů, zrovna tak jako kapalina. Po důkladném promísení je na druhou stranu potřeba plynné a tekuté prostředí dokonale oddělit. To se děje částečně samovolně. Vlivem gravitace se drobné kapky aerosolu spojují a padají do kalové jímky. Ta část, která je unášena plynou fází se odděluje v odlučovačích kapek, aby se zabránilo přenosu nežádoucích látek do následujících částí systému čištění. Odlučovače kapek jsou lamelové labyrinty, kde dochází vlivem nárazů unášeného aerosolu do stěn ke ztrátě energie a dále opět ke slučování drobných kapek ve větší a stékání do kalové jímky opět vlivem gravitace. V kalové jímce se pak soustřeďují kyselé roztoky solí. Prostředí v kalové jímce je velmi agresivní s pH blízkí se 0. Produkty- kyseliny jsou odtud odváděny do neutralizační nádrže. [17]

2.3.4 Mokrý čištění spalin – pračka 2

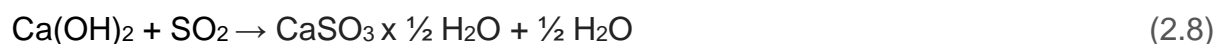
Pračka 2 se skládá z těchto částí:

- Mycí část
- Kalová jímka
- Odlučovače kapek
- Oxidační dmychadla
- Míchadlo

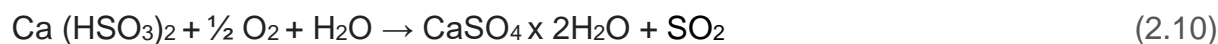
Kalová jímka je zde stejně jako v případě pračky 1 sesazena s mycí částí v jeden celek. V mycí části, kde probíhají chemické reakce jsou zde navíc umístěna 2 míchadlo, které má zabraňovat usazení hustého pračkového kalu a zároveň usnadňují promísení materiálu s dopravovaným vzduchem. Rovněž je zde poblíž míchadla vyústění oxidačních dmychadel, která dopravují vzduch. Ze vzduchu se využívá kyslík potřebný pro probíhající reakce (oxidace siřičitanu vápenatého na síran vápenatý). Těsně nad hladinou pračkového kalu vstupují do pračky spaliny. Spaliny pračku 2 opouští horní částí mycího prostoru. Z důvodu zamezení přenosu nežádoucího materiálu jsou zde instalovány 2 odlučovače kapek. První odlučovač hrubých částic je součástí pračky 2. Druhý odlučovač jemných částic odděluje obě pračky. Oba odlučovače jsou v pravidelných intervalech čištěny proudem servisní vody a odváděny zpátky do praček. Tímto způsobem se zároveň udržuje hladina praček na pokud možno konstantní úrovni.

Pračka 2 má za úkol ze spalin odstranit především SO_2 , ale také ve stopovém množství zbytky popela, HCl , HF , SO_3 . Jedná se o pračku protiproudou. To znamená, že proud spalin z pračky 1 vstupuje do pračky 2 v její spodní části, pak proudí vzhůru proti tryskami rozstříkovanému kalovému roztoku. SO_2 se zde odstraňuje ze spalin pomocí vápenného mléka. Přirozenou reakcí zde dochází ke vzniku siřičitanu vápenatého a ten v procesu nucené oxidace prostřednictvím vzduchu dopraveného oxidačními dmychadly reaguje a tvoří síran vápenatý, tedy sádru. Sádra se jako roztok z pračky 2 odvádí k dalšímu zpracování. Pro správnou funkci pračky 2 musí děje v ní probíhat zhruba při hodnotách pH okolo 6,5. Stav pH je určen především množstvím přiváděného vápenného mléka, z toho důvodu jsou ventily vápenného mléka otevírány, či zavírány na základě měření pH. [17]

Chemické reakce v pračce 2 lze popsat rovnicemi. První uvedená popisuje vznik siřičitanu vápenatého reakcí oxidu siřičitého s pračkovým kalem:



Část hydrosiřičitanu reaguje s kyslíkem a vytváří sádru, dihydrát síranu vápenatého.



[17]

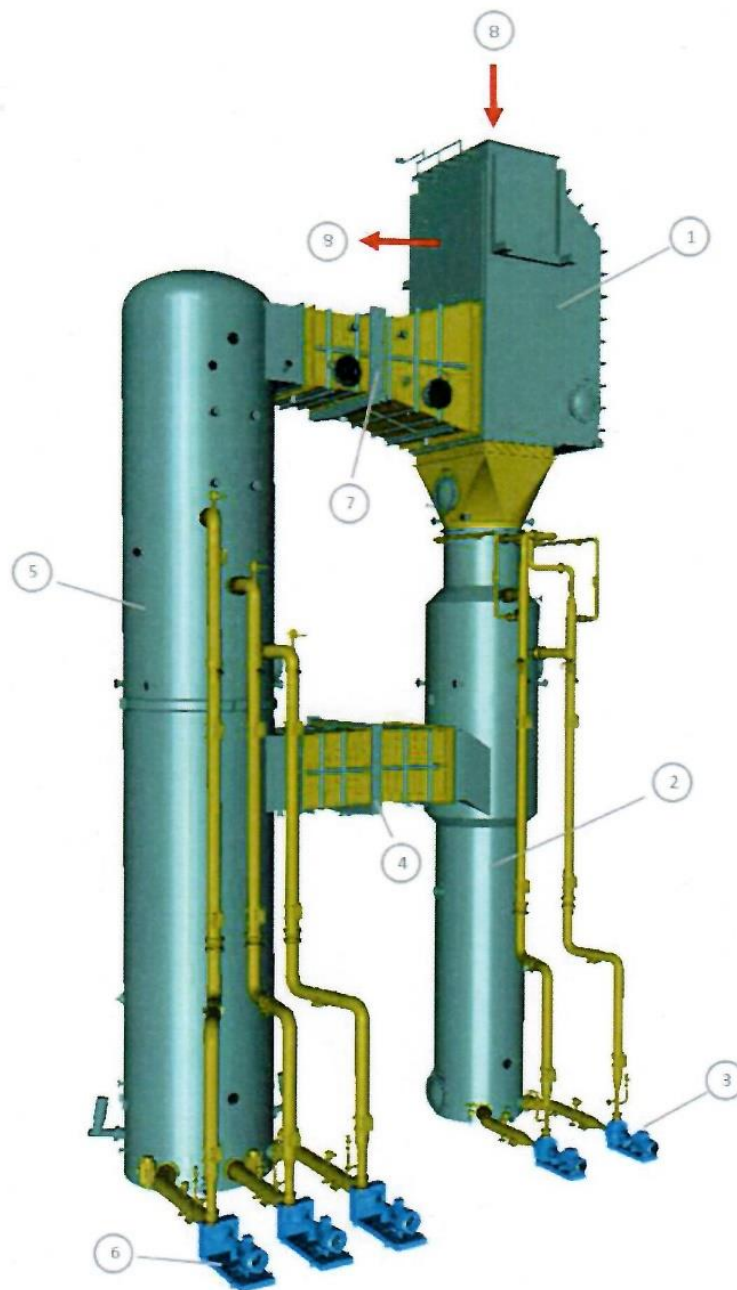
Vzduch dopravený oxidačními dmychadly nutí oxidovat zbytek siřičitanu podle rovnice (2.9), (2.10).

Zároveň dochází k reakcím oxidu sírového, kyseliny chlorovodíkové a kyseliny fluorovodíkové s pračkovým kalem.



[17]

V pračce 2 se tedy vytvoří sádrový roztok, ten je z pračky odveden do sedimentační nádrže. Ze sedimentační nádrže se vrací zpět kal s nízkým obsahem pevných částic a to v závislosti na hladinách buď znovu do pračky 2, anebo do pračky 1.



Obr.č.5: Systém praček spalin. Vpravo pračka 1. Vlevo pračka 2. Spaliny proudí do P1(2), kde jsou sprchovány pračkovým kalem. Spodním přemostěním(4) přechází do P2(5). Proudí vzhůru opět sprchovány pračkovým kalem a horním přemostěním (7) jsou přiváděny zpět do výměníku (1) na P1. Mokrý systém spaliny opouští z tepelného výměníku (9) směrem k policejnímu filtru. Ve spodní části jsou zakreslena čerpadla pračkového kalu pro P1 (3) a P2 (6). [17]

2.3.5 Katalytické čištění spalin

System katalytického čištění spalin je ve spalinové cestě zařazen za policejním filtrem a kouřovým ventilátorem. Jeho hlavním úkolem je snížit na minimum obsah oxidů dusíku, ale i dioxinů a furanů ve spalinách. Zároveň je posledním zařízením v řadě. Odtud spaliny už jen komínem opouštějí spalovnu. Spaliny, které vstupují do denox filtru se ohřívají prostřednictvím výměny tepla s již vyčištěnými spalinami z teploty 130°C (za kouřovým ventilátorem) na teplotu 215°C. Další ohřátí na teplotu cca 240°C se realizuje prostřednictvím vysokotlakého parního ohřevu a to párou přivedenou přímo z bubny. Samotná selektivní katalytická redukce se provádí na povrchu katalyzátoru čpavkovou vodou (NH₄OH). Množství čpavkové vody rozstříkované do procesu je řízeno podle množství spalin a obsahu oxidů dusíku před a za reaktorem, obsah vodních par H₂O a kyslíku O₂ v komínu.

V denox filtru se redukuje oxid dusnatý ve voštinovém katalyzátoru na dusík a vodní páru. Materiál pro katalyzátor se používá oxid titaničitý TiO₂, vanad V a wolfram W. Principem čištění spalin je přeměna škodlivin na neškodné produkty podle reakcí:



[17]

V procesu katalytického čištění dochází také ovšem v malé míře k některým dalším reakcím, které je třeba uvést. Jedná se o oxidaci uhlovodíkových sloučenin C_xH_y na oxid uhelnatý CO, respektive oxid uhličitý CO₂ a oxidaci oxidu sírového na oxid siřičitý.



[17]

V případě nutnosti (porucha) je možnost celý systém denox uzavřít a spaliny proudí obchvatem do komína.

2.3.6 Pomocné systémy

Pomocné systémy jsou nedílnou součástí v procesu čištění spalin. Patří k nim např. systém vysokotlaké a středotlaké páry. Vysokotlaká pára se v čištění spalin používá jako samostatný topný zdroj pro ohřev spalin před zařízením denox. Středotlaká pára vyexpandovaná z vysokotlakého expandéru je použita k ohřevu spalin mezi pračkou 2 a policejním filtrem.

Systém vysokotlakého vzduchu z kompresorové stanice zabezpečuje především potřebné oklepy filtračních rukávců policejního a tkaninového filtru. Kromě toho je zde samostatným ventilátorem zajištěn přetlakový těsnící vzduch sloužící k utěsnění obtokových klapek denox filtru. Tím je zamezeno úniku spalin.

Systém provozní a nouzové vody poskytuje servisní vodu ze servisní/ nouzové nádrže pro všechna zařízení systému čištění spalin. Kromě zajištění vody pro vápenné hospodářství (výroba vápenného mléka, proplach odlučovačů kapek) je zde potřeba servisní vody pro chlazení spalin před vstupem do pračky 1. Servisní voda se odebírá nad hladinou nouzové. Pro případ výpadku čerpadel, je ve spodní části nádoby dostatek vody pro chlazení spalin po dobu 30 min.

Systém dávkování chemikálií představuje především dávkovací stanici TMT15, stanici HCl a zásobovací a dávkovací jednotku NH₄OH. TMT15 je 15% roztok trisodné soli. Přidává se do neutralizační nádrže, kde pomáhá k odlučování rtuti z procesní vody pračky 1. Proplachem HCl potrubní cesty čerpadel sušárny procesní vody neutralizační nádrže v intervalu 1x týdně se zabrání jejímu nežádoucímu ucpání. Čpavková voda ze zásobní nádrže je podávacími čerpadly do řídicí stanice čpavku, pomocí stlačeného vzduchu provzdušněna a vstříkována do proudu spalin v denox filtru.

2.3.7 Systém recyklace vody

Skládá se ze sedimentační nádrže, kde sedimentuje kal pračky 2. Kal je převážně tvořen výsledkem reakcí v pračce – sádrou. Odvodem sádry prostřednictvím čerpadel pračky 2 se hustota pračkového kalu udržuje v pracovní oblasti 9-12% podílu pevných částic. [17] Sedimentační nádrž je konstruována tak, aby z jejího přepadu bylo možno opětovně zásobovat vodou s malým obsahem pevných částic celý systém mokrého čištění spalin. Voda zbavená větší částí pevných částic je odváděna zpět do recyklační nádrže. Z recyklační nádrže jsou zásobovány čistící sekvence odlučovačů kapek a tím je zároveň udržována hladina praček v potřebných mezích. Hustý kal je koncentrován v zásobní nádrži centrifugy. Zde se zbaví zbytků vody. Filtrát je odveden do filtrační nádrže. Odtud se opět znovu zásobí pračka 2. Filtrační nádrž musí být z důvodu zabránění usazení kalu vybaveno míchadlem. Sádra z centrifugy je odvedena do kontejneru.

V neutralizační nádrži jsou likvidovány všechny rozpustné produkty kyselých plynů. Neutralizace probíhá pomocí vápenného mléka, které je dávkováno na základě pH, naměřeného v neutralizační nádrži. Neutralizovaný koncentrát je likvidován v sušárně odpadní vody. Hladina nádrže musí být korigována s přihlédnutím ke koncentraci kyselin v pračce 1. Musí být zajištěn dostatečný odvod procesní vody z P1 tak, aby prostředí v pračce nebylo příliš kyselé. Odvod z P1 do sušárny je omezen teplotou spalin, jejichž energie se využívá k potřebnému vysušení. Pokud tedy hladina v NN stoupne nad určitou mez, vyvstane požadavek na zvýšení teploty spalin před sušárnou.

V tabulce 4 jsou uvedeny emisní hodnoty sledovaných škodlivin. Je měřena okamžitá hodnota, průběžná půlhodinová, denní a průběžná roční hodnota. Jednotlivé limity mohou být dočasně překročeny (obzvláště okamžitá, nebo půlhodinová). Z uvedených údajů denních a ročních hodnot je patrné, jak účinný je instalovaný systém čištění spalin ve spalovně ZEVO Chotíkov.

Tabulka 7: Naměřené emisní hodnoty škodlivin v ZEVO Chotíkov. [19]

Emise	Okamžitá hodnota	Průběžná půlhodina	Emisní limit dle normy	Průběžná denní	Emisní limit dle normy	Průběžná roční	Jednotka
SO ₂	0,2	0,4	200	0,0	25	7,8	mg.m ⁻³
NO _x	35,8	43,0	400	30,2	70	37,0	mg.m ⁻³
CO	4,4	6,0	100	6,2	25	6,7	mg.m ⁻³
TOC	0,6	0,6	20	0,7	8	0,7	mg.m ⁻³
TZL	0,07	0,07	30	0,09	2,3	0,08	mg.m ⁻³
HCl	0,02	0,02	60	0,01	8	0,02	mg.m ⁻³
HF	0,11	0,11	4	0,11	0,8	0,08	mg.m ⁻³
O ₂	10,4	10,3	-	10,5	-	10.1	%

3 Výpočet parametrů spalovny ZEVO Chotíkov

3.1 Naměřená provozní data

Provozní data jsou odečtena z řídicího systému Valmet spalovny komunálního odpadu ZEVO Chotíkov 20.3.2020 ve 20:50:

Přehřátá admisní pára:

tlak $p_a = 4,9$ Mpa,

teplota $t_a = 426$ °C,

pomocí výpočetního programu určena entalpie: **3261,34** kJ/kg.

Napájecí voda za NČ :

Teplota $t_{nv} = 131,4$ °C,

Tlak $p_{nv} = 5,95$ MPa,

pomocí výpočetního programu určena entalpie: **556,19** kJ/kg.

Sytá pára v bubnu:

tlak $p_s = 5,9$ MPa,

teplota odpovídající mezi sytosti $t = 274,49$ °C,

pomocí výpočetního programu určena entalpie: **2785,64** kJ/kg.

Hmotnostní toky:

průtok přehřáté páry do turbíny $M_{PT} = 36,55$ t/h,

průtok syté páry do denox filtru $M_{PD} = 1,3$ t/h,

průtok syté páry pro ohřev vzduchu $M_{PV} = 0,43$ t/h.

Množství komunálního odpadu přiloženého za hodinu:

$M_{KO} = 9,79 \text{ t/h.}$

Provozní hodnoty uvedené v hlavním bilančním schématu:

Tlak admisní páry $p_{bsa} = 0,492 \text{ MPa,}$

Teplota admisní páry $t_{bsa} = 425,$

skutečná entalpie $i_{bse} = 2510 \text{ kJ/kg.}$

Hodnoty předpokládáné:

účinnost kotle $\eta_K = 0,85 - 0,95,$

účinnost potrubí $\eta_p = 0,99.$

mechanická účinnost turbíny $\eta_m = 0.98,$

účinnost generátoru $\eta_g = 0,98.$

3.2 Výpočet výhřevnosti komunálního odpadu

Jedním ze způsobů, jak vypočítat výhřevnost komunálního odpadu je možnost, spočítat jí při předpokládané účinnosti kotle ze vzorce pro výpočet účinnosti kotle. Účinnost lze obecně určit z poměru energie přivedené a energie účelně zužitkované, či přeměněné. Účinnost kotle teplárny se stanoví z poměru přivedeného tepla a tepla předaného do tepelného oběhu.

$$\eta_K = \frac{Q_K}{Q_P} \quad (3.1)$$

Sama účinnost kotle se bude během provozu měnit. Bude například záviset na zatížení, či např. na zanesení teplosměnných ploch. Lze předpokládat, že se bude nacházet v intervalu 0,85-0,95.

Energie přivedenou za 1 hod. do kotle ZEVO představuje dodané hodinové množství komunálního odpadu $M_{KO} = \frac{9,79t}{h}$ o výhřevnosti q_{KO} .

Předané teplo reprezentuje rozdíl entalpií admisní páry a napájecí vody vynásobený součtem hmotnostních průtoků M_{pt} – hmotnostní průtok páry do turbíny. Z bubny kotle je rovněž odebírána sytá pára pro předehřev spalin před vstupem do denox filtru M_{PD} a pára pro ohřev primárního vzduchu kotle M_{PV} . Lze započítat i odluh z bubny kotle o hmotnostním průtokem 0,45 t/h a rozdílu entalpií vody v bubnu a vody v NN.

$$\eta_K = \frac{Q_K}{Q_P} = \frac{M_{pt}(i_a - i_{NV}) + M_{pd}(i_b - i_{NV}) + M_{PV}(i_b - i_{NV}) + M_{od} \cdot (i_{od} - i_{NV})}{M_{KO} \cdot q_{KO}}, \quad (3.2)$$

$$q_{KO} = \frac{M_{pt}(i_a - i_{NV}) + M_{pej}(i_a - i_{NV}) + M_{pd}(i_b - i_{NV}) + M_{PV}(i_b - i_{NV}) + M_{od} \cdot (i_{od} - i_{NV})}{M_{KO} \eta_K},$$

pro účinnost 0,85:

$$q_{KO} = \frac{36,55(3261,34 - 556,19) + 1,3(2785,64 - 556,19) + 0,43(2785,64 - 556,19) + 0,45(1208,07 - 556,19)}{9,79 \cdot 0,85}, \quad (3.3)$$

$$q_{KO} = \underline{\underline{12\,378,83 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}}$$

Pro účinnost 0,95:

$$q_{KO} = \frac{36,55(3261,34 - 556,19) + 1,3(2785,64 - 556,19) + 0,43(2785,64 - 556,19) + 0,45(1208,07 - 556,19)}{9,79 \cdot 0,95}, \quad (3.4)$$

$$q_{KO} = \underline{\underline{11\,077,2 \text{ kJ.kg}^{-1}}}.$$

Výhřevnost komunálního odpadu se v tomto případě pohybovala mezi 11 077,2 a 12 378,83 kJ/kg.

3.3 Výpočet termodynamické účinnosti turbíny

Pro výpočet skutečné entalpie, kterou bude nezbytné znát pro další výpočty, je třeba znát termodynamickou účinnost turbíny. [2] Pro stanovení termodynamické účinnosti turbíny jsem použil data, která uvádí hlavní bilanční schéma spalovny pro plný výkon.

admisní pára:

tlak $p_{bsa} = 0,492 \text{ MPa}$,

teplota $t_{bsa} = 425$,

vypočtená entropie $S_{bsa} = 7,7754 \text{ kJ/kgK}$,

emisní pára:

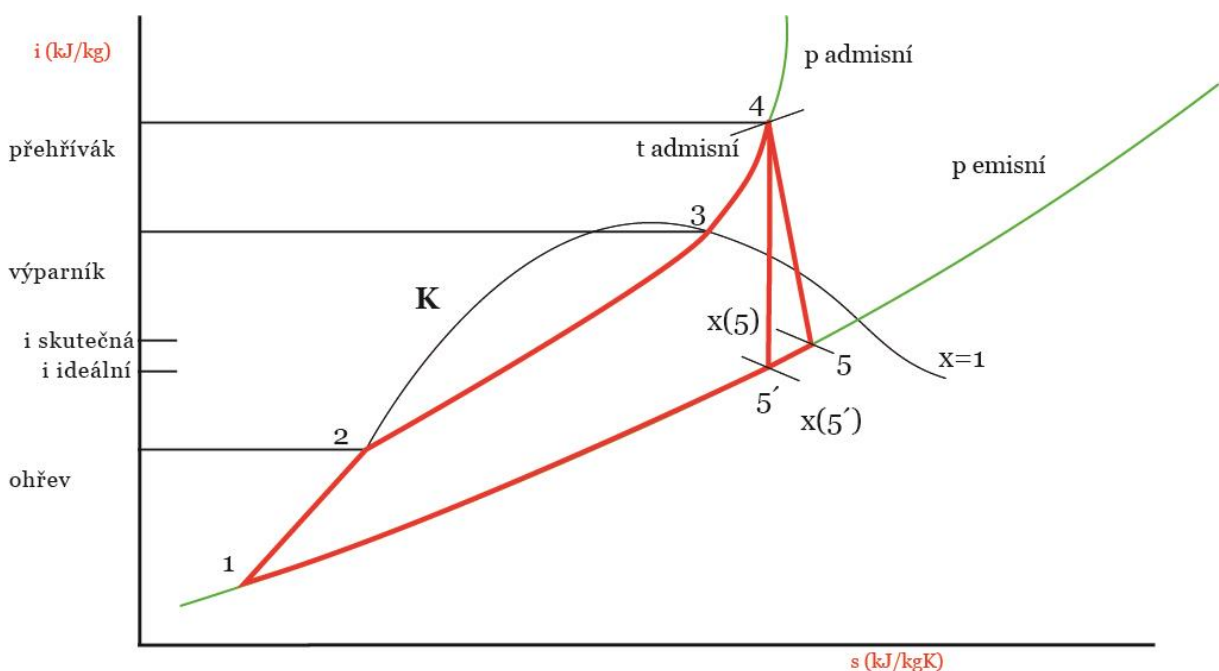
Expanze v turbíně je ideálně adiabatická. Hledaná entalpie je průsečíkem izobary emisní páry a ideální expanzní čáry turbíny. V obrázku jí představuje čára z bodu 4 do bodu 5', která je kolmá k ose S. [2] Ideální expanze tedy probíhá po izoentropě. Z toho vyplývá, že pro výpočet entalpie ideální emisní páry je možné zadat do výpočetního programu kromě tlaku entropii admisní páry:

tlak $p_e = 0,008 \text{ MPa}$,

$S_{bsa} = 7,7754 \text{ kJ/kgK}$.

Ideální odečtená entalpie je $i_e = 2434$ kJ/kg.

Skutečná entalpie je ovšem vyšší než ideální, neboť skutečná expanze neprobíhá ideálně adiabaticky z bodu 4 do bodu 5'. Entalpie odečtená z hlavního bilančního schéma je $i_{bse} = 2510$ kJ/kg. Na obrázku je znázorněna v i-S diagramu jako bod 5 na izobaře p_e



Obr.č. 6: Znázornění skutečné expanzní křivky v i-s diagramu Clausius – Rankinova cyklu.

Výpočet termodynamické účinnosti turbíny vychází ze vztahu[2]:

$$i_{bse} = i_a - \eta_{TD} \cdot h_o = i_a - \eta_{TD} \cdot (i_a - i_{ie}), \quad (3.5)$$

$$\eta_{TD} = \frac{i_a - i_{bse}}{i_a - i_{ie}},$$

$$\eta_{TD} = \frac{3254 - 2510}{3254 - 2434},$$

$$\eta_{TD} = 0,91.$$

Termodynamické účinnosti turbíny je **91%**.

3.4 Výpočet parametrů ST a NT páry

Ideální emisní pára odběrová středotlaká:

Tlak $p = 0,35$ Mpa,

Expanze v turbíně je ideálně adiabatická. Je možné zadat do výpočetního programu kromě tlaku entropii admisní páry:

$S = 6,7512$ kJ/kgK,

$i_{ie}^{ST} = 2654,19$ kJ/kg,

pro výpočet skutečné emisní ST entalpie platí vztah:

$$i_{se}^{ST} = i_a - \eta_{TD} \cdot h_o = i_a - \eta_{TD} \cdot (i_a - i_{ie}),$$

$$i_{se}^{ST} = 3261,34 - 0,91 \cdot (3261,34 - 2654,19), \quad (3.6)$$

$$i_{se}^{ST} = 2708,83 \text{ kJ/kg},$$

Ideální emisní pára odběrová nízkotlaká:

Pro ideální emisní páru opět půjde adiabatickou expanzi. Entalpii ideální emisní páry odečteme z entropie admisní páry a daného odběrového tlaku[2],

Tlak $p = 0,17$ Mpa,

$S = 6,7512$ kJ/kgK,

$i_{ie}^{NT} = 2531,87$ kJ/kg.

Pro výpočet skutečné emisní entalpie opět platí vztah:

$$i_{se}^{NT} = i_a - \eta_{TD} \cdot h_o = i_a - \eta_{TD} \cdot (i_a - i_{ie}),$$

$$i_{se}^{NT} = 3261,34 - 0,91 \cdot (3261,34 - 2531,87), \quad (3.7)$$

$$i_{se}^{NT} = 2597,52 \text{ kJ/kg},$$

3.5 Výpočet účinnosti výroby tepelné a elektrické energie

Množství odběrové páry pro parní ohřev vody

Spalovna ZEVO Chotíkov je vybavena základním a špičkovým ohřívákem pro ohřev oběhové topné vody. V základním ohříváku probíhá výměna za účasti nízkotlaké páry, ve špičkovém je využita středotlaká pára. Potřebná pára může být odebírána z neregulovaného (středotlaká) a z regulovaného (nízkotlaká) odběru z turbíny, anebo z regulačních chladících stanic. V době odečtení potřebných údajů z řídicího systému Valmet se předání tepla účastnil pouze základní ohřívák s odběrem nízkotlaké páry z regulovaného odběru turbíny. Množství páry potřebné k dodávce tepla se tedy spočítá jako podíl dodaného tepla k rozdílu entalpií skutečné emisní nízkotlaké páry a kondenzátu topné páry. Předpokládaná účinnost základního ohříváku je 99%.

Dodávka tepla $Q_t = 9.8 \text{ MWt} = 35280 \cdot 10^3 \text{ kJ/h}$

Množství odběrové páry pro ohřev vody je dáno vztahem[2]:

$$M_o = \frac{Q_t}{(i_{se} - i_{kt}) \cdot \eta_v}, \quad (3.8)$$

$$M_o = \frac{35280}{(2597,52 - 483,19) \cdot 0,99}$$

$$M_o = 16,85 \text{ t/h.}$$

Množství páry pro výrobu elektrické energie:

Z bilanční rovnice pro turbosoustrojí lze odvodit M_z , což je ta část hmotnostního toku páry, která se nepodílí na tepelném výkonu předáním tepla v základním ohříváku. [2]

$$\frac{Q_e}{\eta_m \eta_g} = \frac{3600 P_e}{\eta_m \eta_g} = M_{pt} (i_a - i_{se}^{NT}) + M_z (i_{se}^{NT} - i_{se}), \quad (3.9)$$

Kde M_{pt} je hodinové množství toku páry do turbíny,

M_o hodinové množství páry odvedené do ZO,

M_z je rozdíl mezi M_{pt} a M_o ,

$$M_z = \frac{\frac{3600P_e}{\eta_m \eta_g} - M_o \cdot (i_a - i_{se}^{NT})}{(i_{se}^{NT} - i_{se})}, \quad (3.10)$$

$$M_z = \frac{\frac{3600 \cdot 6000}{0,98 \cdot 0,98} - 15,79 \cdot 1000 \cdot (3261,34 - 2597,52)}{(3261,34 - 2510)},$$

$$M_z = 15,98 \text{ t/h.}$$

Spotřeba páry pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny:

$$M_{pt} = M_z + M_o, \quad (3.11)$$

$$M_{pt} = 15,98 \text{ t/h} + 16,85 \text{ t/h} = 32,83 \text{ t/h.}$$

Celková spotřeba páry pro kombinovanou výrobu tepla a elektřiny:

Vypočtená hodnota 32,83 t/h je teoretická hodnota, která nezapočítává nezbytnou spotřebu páry pro technologii čištění spalin, parní ohřev vzduchu a regenerační ohřev napájecí vody. Celková měřená hodnota přehřáté páry je $M_{př} = 36,55 \text{ t/h}$ o entalpii 3261,34 kJ/kg. Pro parní ohřev vzduchu (0,43 t/h) a pro denox filtr (1,3t/h) se používá sytá pára z bubnu o entalpii 2785,64 kJ/kg. $M_{syt} = 1,3+0,43 = 1,76 \text{ t/h}$.

Stanovení tepelné účinnosti při výrobě tepla η_{tt} :

Tepelnou účinností se rozumí poměr vyrobeného tepla k teplu předaného do tepelného oběhu kotlem.

$$\eta_{tt} = \frac{Q_t}{M_{př} (i_a - i_{nv}) + M_{syt} (i_b - i_{nv})}, \quad (3.12)$$

$$\eta_{tt} = \frac{35280}{36,55 \cdot (3261,34 - 556,19) + 1,76 \cdot (2785,64 - 556,19)},$$

$$\eta_{tt} = 0,3432.$$

Stanovení tepelné účinnosti při výrobě elektrické energie η_{te} :

Účinnost při výrobě elektrické energie je dána poměrem elektrické práce k teplu předaného do tepelného oběhu kotlem.

$$\eta_{te} = \frac{Q_e}{M_{př}(i_a - i_{nv}) + M_{syt}(i_b - i_{nv})} = \frac{3600P_e}{M_{př}(i_a - i_{nv}) + M_{syt}(i_b - i_{nv})}, \quad (3.13)$$

$$\eta_{te} = \frac{3600.6}{36,55 \cdot (3261,34 - 556,19) + 1,76(2785,64 - 556,19)},$$

$$\eta_{te} = 0,2101.$$

Stanovení souhrnné tepelné účinnosti η_{celk} :

$$\eta_{celk} = \eta_{te} + \eta_{tt}, \quad (3.14)$$

$$\eta_{celk} = 0,3432 + 0,2101 = 0,5533.$$

Jedná se o účinnost turbosoustrojí. Pro zjištění celkové účinnosti spalovny Zevo Chotíkov 20.3. 2020 20:50hod se musí vypočtené hodnoty vynásobit účinností kotle η_k a účinností potrubního systému η_p . Předpokládaná střední účinnost kotle $\eta_k = 0,9$. Předpokládaná účinnost potrubí $\eta_p = 0,99$.

$$\eta_{celk}^{ZEVO} = \eta_k \cdot \eta_p \cdot (\eta_{te} + \eta_{tt}) \quad (3.15)$$

$$\eta_{celk}^{ZEVO} = 0,9 \cdot 0,99 \cdot (0,3432 + 0,2101)$$

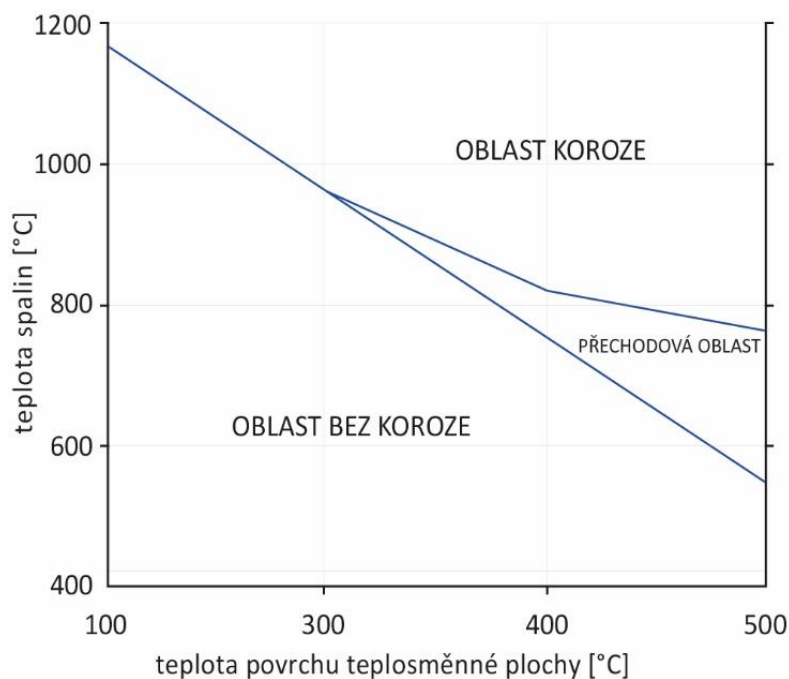
$$\eta_{celk}^{ZEVO} = \underline{\underline{0,493}}.$$

4 Provozní problémy spalovny KO

Spalovna komunálního odpadu ZEVO Chotíkov je po spalovnách v Brně, Praze – Malešicích a v Liberci naší čtvrtou spalovnou KO, která zároveň kogeneračně využívá uvolněné teplo ze spálení KO k výrobě elektrické energie a k vytápění. Spalovna ZEVO Chotíkov byla uvedena do zkušebního provozu v srpnu 2016. Řadí se k nejmodernějším zařízením svého druhu v Evropě. Samozřejmě, že po uvedení do provozu každého nového závodu vyvstane spousta drobných nedostatků, které je třeba doladit. To ovšem nebude předmětem této práce. Chtěl bych se zaměřit jen na ty problémy, které za poslední dobu vedly ve svých důsledcích k nucenému odstavení výroby. V zásadě se jedná o dvě příčiny. Jedna je závažnější, její odstranění vyžaduje vyšší náklady a způsobuje vynucení odstávky na delší dobu. Jedná se o zanesení teplosměnných ploch nálepy. Nejenže nálepy způsobí ucpávání spalínové cesty, podporují vznik koroze, ale také znamenají zvýšení tepelného odporu při předání tepla ve stěnách výparníku a přehříváku. To znamená snížení účinnosti transformace. Druhá příčina je zdánlivě méně závažná, její odstranění nevyžaduje odstavení kotle, dojde většinou jen k chvilkovému odstavení turbíny. Na druhou stranu se jedná o závadu poměrně často se opakující. Jde o uváznutí odpadu v plnicí cestě od násypky na rošt kotle, anebo uváznutí nespalitelných zbytků v mokrém vynašeči strusky.

4.1 Zanesení teplosměnných ploch kotle

Zanesení teplosměnných ploch nálepy je častou slabinou kotlů spaloven KO. Tyto nálepy jednak zhoršují přestup tepla ze strany spalin a zanáší spalinovou cestu, ale zároveň pod těmito nálepy vzniká tzv. chloridová koroze. S chloridovou korozí se setkáváme i u uhelných kotlů. Rozdíl je v koncentraci HCl ve spalinách. Na jeden nm^3 připadá v případě spalovenského kotle asi desetkrát víc HCl, než v případě spalin z uhelných zdrojů. [20] Jak je patrné z grafu na obrázku č.7 nejohroženější částí kotle budou zřejmě přehříváky, kde je vysoká teplota spalin i teplota teplosměnné plochy.



Obr.č. 7: Znázornění výskytu chloridové koroze v závislosti na teplotě spalin a teplotě povrchu teplosměnné plochy. [8]

Chloridovou korozi se výrazně zkracuje doba provozuschopnosti (disponibilita) kotle. Nálepy jsou tvořeny těmi částmi ulétavého popílku, ve kterých je obsažen vysoký podíl alkalických prvků. Jedná se o sloučeniny sodíku (Na), draslíku (K), manganu (Mn) atd. Vlivem vysokých teplot v jednotlivých tazích kotle tyto sloučeniny měknou a stávají se lepivými. To se děje při teplotách překračujících 700°C. Při vyšších teplotách okolo 900°C má směs těstovitý charakter. Nad 1100°C přechází do kapalného skupenství. Příčinou koroze kovových částí výparníku jsou pak sloučeniny obsahující síru a především chlór.[8] [20]

Tabulka č. 5: Bod měknutí vybraných sloučenin, které se zúčastňují tvorby nálepů v kotli. [8]

Samostatná sloučenina	Měkne při	Poměr sloučenin	Měkne při
NaCl	801 °C	25% NaCl – 75% FeCl ₃	156 °C
KCl	772 °C	55% ZnCl ₂ -45% KCl	230 °C
MgCl ₂	714 °C	60% KCl – 40% FeCl ₂	355 °C
CaCl ₂	772 °C	58% NaCl – 42% FeCl ₂	370 °C
FeCl ₂	676 °C	90% PbCl ₂ -10% MgCl ₂	460 °C
FeCl ₃ CaCl ₂	303 °C	49% NaCl-51% CaCl ₂	500 °C

4.1.1 Zákonitosti vzniku nálepů v kotli

Ukládání nálepů na teplosměnných částech kotle lze rozdělit do několika fází:

Vznik popela, přeměna příslušných minerálních složek, jejich měknutí a lepkavost, transport v proudu spalin a jejich zadržení na povrchu výparníku a přehříváku, přilnutí k teplosměnné ploše a následné vytvrnutí. Základními procesy, které umožňují přilnutí materiálu k vnitřním plochám kotle jsou:

- **Inerciální zaklínění.** Takto se zachytávají větší prvky od velikosti 10 μ m. Při obtékání ploch proudem spalin nemají tyto částice, kterým stojí v cestě překážka, dostatečnou energii k přechodu do sousední obtékající proudnice. Částice tedy narazí do stěny výparníku, či přehříváku. Pokud je částice lepkavá, začíná tvořit hrubý, granulovitý nános na náběžné straně. [10]
- **Termoforéza.** Částice menší než 10 μ m se pohybují podle teplotního spádu ze strany s vyšší teplotou na stranu s teplotou nižší. Teplota plamene přesahuje 1300°C, teplotní rozdíl vně a uvnitř trubek může tedy být bez mála 1000°C. Molekuly na vnější straně mají větší energii, proto při nárazu na částici jí udělují větší impuls, než molekuly z vnitřní (podstatně chladnější) strany. Termoforéza

se uplatňuje především v předním tahu kotle, kde převažuje předání tepla sáláním. [10]

- **Elektroforéza.** Vzájemným třením částic navzájem a částic se stěnami vzniká elektrostatický náboj. Jedná se o depozici částic na teplosměnných površích na základě přitahování rozdílných elektrostatických nábojů. [10]
- **Gravitace.** Gravitační vliv se uplatňuje především na těžší částice, pokud energie proudu spalin není dostatečná, aby udržela tyto částice ve vznosu.
- **Konvekční difuze.** Difundují tak v konvekčních proudech částice menší než $1\mu\text{m}$.



Obr.č. 8: Zanesení výparníkové mříže mezi druhým a třetím tahem kotle.

4.1.2 Stmelené nálepy

Nálepy v kotli lze rozdělit do dvou skupin. Na nálepy slinuté a nálepy stmelené. Se stmelenými nálepy je třeba počítat od druhého tahu kotle dál po směru proudění spalin. Typické jsou především pro přehříváky. Jedná se o tvrdé strukturované vrstvy. Základním stavebním materiálem jsou amorfní částice strusky, které jsou spojeny právě alkalickými prvky a sírany. S tímto pojivem jsou poté vázány ty plynné složky, které z kondenzují na chladnějších površích teplosměnných ploch. Tím se vytvoří základní povlak na povrchu trubek, se kterým mohou reagovat SO_2 , SO_3 a další produkty hoření. Na povrchu se vytvoří tekutý, lepkavý povlak, který slouží jako pojivo. Ve druhé fázi se

na tento lepkavý povlak zachycují různé aerosoli a také látky, jejichž bod měknutí leží nad teplotou v daném tahu kotle. Vzniká kompaktní tuhá vrstva. [10] Tímto způsobem vznikají nálepy popílkové. Jedná se o zanášení ploch popílkem.



Obr.č. 9: Zneprůchodnění přímé spalinové cesty stmelými nálepy. Přehříváky, čtvrtý tah kotle.

4.1.3 Slinuté nálepy

Slinuté nálepy mohou vznikat přímo. Především v předních tazích kotle. Vznikají nárazy roztavených částic prachu, který se nabalují jeden na druhý. Jedná se o nálepy struskové. Struskové nálepy rovněž zhoršují podmínky tepelné výměny a tedy účinnost kotle, navíc zvyšují teplotu spalin. Od určitého stupně zanesení není možné dosáhnout jmenovitého parního výkonu. Slinuté nálepy rovněž mohou vzniknout přetvořením nálepu stmelého, kdy při zvýšení teploty povrchu nálepu nad bod měknutí se nálep stmelí a sline. [10]

4.1.4 Důsledky tvorby nálepu

K neplánovanému přerušení výroby, které bylo zapříčiněno tvorbou a působením nálepy došlo za poslední dobu ve spalovně několikrát. Je třeba si uvědomit, že nálepy ve spalovenských kotlích mohou dosahovat značných rozměrů a hmotnosti. To bylo ve spalovací komoře kotle příčinou uvolnění části vyzdívky, která byla stržena odpadajícím nálepem. Část výparníku tak přišla do přímého kontaktu s prostředím kotle.

Další příčinou odstavení souvisí se zanesením přehříváků. Jedná se o svazkový přehřívák. Trubkové hady jsou umístěny vertikálně napříč vodorovným čtvrtým tahem kotle. Energie spalin je zde využívána k přehřátí páry proudící přehřívákem. Teplota páry se zde zvyšuje jednak kvůli zvýšení účinnosti a také z důvodu jistoty jejího vysušení. Přestože v této části jsou instalovány kvůli průběžnému odstraňování nánosů pneumatické oklepy, došlo zde ke značnému zanesení. Proud spalin již nemohl plně proudit přes přehřívákové hady a jeho část proudila spodem horizontálního tahu. V tom prostoru se nachází odvodnění přehříváků. Zatímco přehřívák samotný je chlazen proudící párou, jeho odvodnění nikoliv. Tak došlo vlivem abraze, koroze a teploty k degradaci materiálu trubek odvodnění a k úniku páry do spalin.

4.1.5 Identifikace problému

V prvním případě, kdy byla trhlina ve výparníkové stěně nezanedbatelná, byl jasným signálem téměř okamžitý pokles tlaku v soustavě. Voda, která posléze unikala z kotle přes mokry vynašeč pak ozřejmila podstatu problému. Ve druhém případě, kdy se nejednalo o tak masivní trhlinu se problém zachytil až s odstupem. Signálem byl rozdíl v množství napájecí vody a páry. Ten by však bylo možné přičíst také např. chybě měření. Následně bylo zjištěno nedostatečné ochlazení spalin, proudících z pračky 1 do pračky 2. Spaliny obohacené o množství páry se totiž v souproude sprše pračkovým kalem nestihly dostatečně ochladit. Dlouhodobý rozdíl mezi vygenerovanou párou a průtokem napájecí vody činil postupně až 2 m³/h.

4.1.6 Praktikovaný způsob odstranění nálepů teplosměnných ploch

Fyzicky lze nálepy odstranit při odstávce kotle, ale i za plného provozu. Metodami pro odstranění již vzniklých nálepů jsou různé. Může se jednat o vodní ostřík zanesených ploch, pneumatickým oklepem, ruční odstranění, anebo odstranění za pomoci řízené detonace. V obou případech, popsaných v kapitole 4.1.4 bylo nutné odstavit kotel, prostor vyvětrat, očistit a zavařit vzniklé trhliny. V prvním případě byly navařeny kovové trny na trubky výparníku, na kterých vyzdívka lépe drží. V druhém případě se po provedené opravě přikročilo k preventivním opatřením. Jako prevenci proti zanášení prostoru lze zintenzivnit četnost úderů pneumatických oklepů. Navíc se přikročilo k odstraňování usazenin pomocí řízené detonace. Stupeň zanešení spalinové cesty se určí na základě tlakové diference ve spalovací komoře a za čtvrtým tahem.

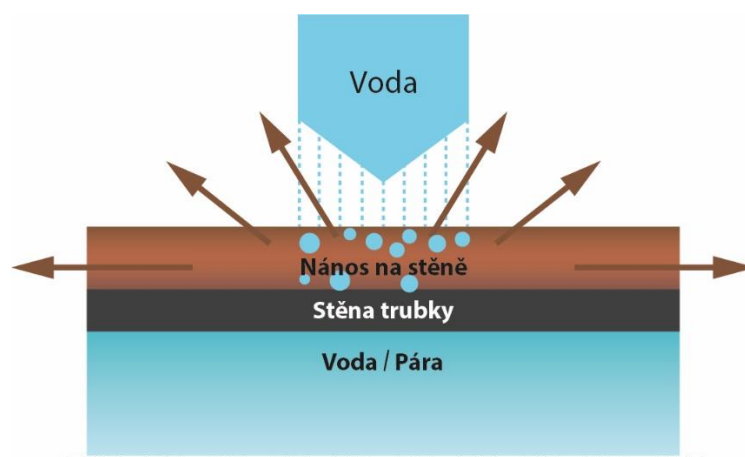


Obr.č. 10: Navaření kovových trnů na trubky výparníku.

Metodami používanými k čištění teplosměnných ploch v ZEVO Chotíkov v současné době jsou:

- **Pneumatické oklepy.** Mechanismus je umístěn na vnější straně kotle. Impulz tlakového vzduchu způsobí náraz kladiva do trubek přehříváku. Pružina pak vrátí kladivo zpět do výchozí polohy. Pneumatické oklepy jsou rozmístěny ve spodní části, v rovnoměrně podél celé délky přehříváku. Pracují v pravidelných cyklech. Tím je přehřívák kontinuálně během provozu čištěn. [13]

- **Čištění vodním ostřikem.** Kvůli zlepšení přenosu tepla byl nainstalován systém vodního ostřiku teplosměnných ploch ve druhém a třetím tahu kotle. Vysokotlaká voda je po zasunutí ocelové hadice zakončené tryskou do tahu kotle rozstříkována na nálepy. Hadice s tryskou se pohybuje ve vertikálním i horizontálním směru, přičemž se tryska natáčí. Tak se docílí rovnoměrného ostřiku. Čištění funguje na bázi jednak mechanického odstranění tlakem proudící vody, za druhé narušením struktury nálepu při prudkém odpaření vody. Voda o vysokém tlaku nejprve pronikne do struktury nálepu, poté se vlivem značných teplot okolí intenzivně odpařuje. Zvýšení tlaku a poté zvětšení objemu v drobných skulinkách a pórech materiálu je příčinou jeho narušení a rozpadu. [10] [14]



Obr.č. 11: Princip rozrušení nánosů na trubkách vodním ostřikem.[10]

- **Ruční čištění.** Z pochopitelných důvodů je třeba odstavit kotel a vyvětrat celý prostor, postavit lešení. Za dodržení všech bezpečnostních podmínek teprve poté může nastoupit směna k ručnímu čištění. Z toho všeho jasně plyne nevýhoda ručního čištění – nezbytnost odstavení kotle minimálně na několik desítek hodin.
- **Čištění řízenou detonací.** Při nárůstu rozdílu tlaků na obou koncích kotle se přikročí k čištění řízenými výbuchy. Tlaková vlna při detonaci velmi účinně čistí prostor kotle. Děje se tak za nepřerušovaného provozu, pouze za sníženého výkonu. Do otevřených revizních otvorů ve druhém, třetím tahu a pod přehříváky je postupně vsunuta dlouhá tyč s připevněnou výbušninou.

Přípevněná výbušnina je inertní k teplotám pod 1500 °C. Nevýhodou tohoto způsobu je velké množství materiálu, které se uvolní najednou. Hrozí tak ucpání dopravní cesty popílku. Navíc při použití metody řízených výbuchů vždy existuje možnost poškození zařízení.



Obr.č. 12: Příprava pro čištění řízenou detonací. Otvírání revizních otvorů v horní části kotle za plného provozu.

4.1.7 Další možnosti odstranění nálepů teplosměnných ploch

V kapitole 4.1.7 byly popsány způsoby, které se již praktikují v uvedené spalovně. Zejména použití metody čištění řízenou detonací, které je z výše uvedených způsobů neúčinnější, s sebou nese jistá rizika. Za úvahu by tedy jistě stálo prozkoumat i další existující možnosti, které se běžně praktikují. Dalšími používanými metodami odstraňování nánosů jsou parní ostřík, odstranění kuličkovým deštěm, nebo akustickým signálem.

- Ostřík vysokotlakou párou. Provádí se za provozu kotle. Tlak vysokotlaké páry z trysek mechanicky a na základě tepelného stresu naruší struskový útvar. Zbytek narušené strusky se uvolní vlivem vzniklých vysokofrekvenčních vibrací. Účinnost tohoto zařízení závisí na velikosti a pevnosti spojení útvaru s trubkami teplosměnné plochy. Metodu čištění vysokotlakou párou lze použít i pro spalovací komoru. [10][14]
- Metoda kuličkového čištění. Je vhodná pro svislé tahy s trubkovými svazky, při nižším stupni znečištění. Jde o mechanické čištění nárazy ocelových kuliček o

velikosti 4-10mm. [10] Kuličky jsou rovnoměrně v cyklech spouštěny z vrchu tahu. Vlivem gravitace narážejí do teplosměnných ploch. Tím se plochy čistí.

- Čištění akustickou vlnou. Pneumatický aktuátor produkuje nízkofrekvenční akustický signál v rozmezí 125-250Hz. [10][13] Výhodou tohoto způsobu čištění je, že zvukový signál zasáhne i těžko přístupná místa v prostoru kotle, která by se obtížně čistila jiným způsobem. Frekvence zvuku rozechvívá částice, které v důsledku se nemohou usadit a jsou unášeny dál proudem spalin. Hladina hluku v blízkosti trouby aktuátoru je kolem 150dB. Pro srovnání výstřel z děla odpovídá asi 120dB. [12] Celé zařízení je schopno dlouhodobě snášet teploty přes 800°C (použitím speciální slitiny až 1100°C). Zároveň je zhotoveno z materiálu, který dobře odolává agresivnímu prostředí uvnitř kotle. [10][14]

Jak metoda ostříku vysokotlakou párou, tak metoda kuličkového deště jsou finančně náročné a vyžadují rozsáhlý stavebně technický zásah. V případě způsobu čištění akustickou vlnou by se snad dalo uvažovat jako o reálné možnosti. Jako velkou výhodou oproti detonacím vidím v možnosti kontinuální činnosti zařízení. Tím odpadá zanášení cesty odvodu popílku po detonaci a hlavně se eliminuje riziko poškození.

4.1.8 Chemický způsob ošetření vnitřního prostoru kotle

Možnosti jak zabránit snížení účinnosti kotle, nebo dokonce jeho poškození v souvislosti s nálepy je zabránění jejich vzniku, anebo jejich odstranění. Chemickou cestou lze snižovat dopady nálepů na provozní stav zařízení tím, že budeme předcházet jejich vzniku. Chemická aditiva se běžně využívají u uhelných kotlů. Úkolem aditiv je zvýšení teploty tání popílku, snížení pevnosti usazenin, snížení korozních účinků, zvýšení viskozity roztavených krystalů a tím snížení pravděpodobnosti jejich usazení na trubkách teplosměnných ploch. Většinou se používají aditiva na bázi CaO, MgO, SiO₂, Al, Mn. [10] Na rozdíl od uhelných kotlů, kde palivo vykazuje více méně konstantní vlastnosti, spalovenské kotle pracují s materiálem, který vykazuje velkou rozmanitost jak fyzických, tak i chemických vlastností dávkování aditiv se z toho důvodu jeví jako značně složité.

4.2 Uváznutí paliva v násypce

Palivová cesta se skládá z násypky paliva a plnicí svodky. Materiálu v plnicí svodce musí být dostatečný sloupec tak, aby dokázal utěsnit přísávání falešného vzduchu do spalovacího zařízení. Tím se zároveň zabrání nežádoucímu prohoření do plnicí svodky. V důsledku neúměrného množství materiálu v násypce se může vytvořit klenba. Palivo tak nesjíždí do plnicí násypky. V násypce se tak tvoří vzduchová mezera. Plnicí svodka je z toho důvodu vybavena dvěma páry mikrovlnných sond, které jsou

umístěny proti sobě v horní části plnicí svodky. Každý pár se skládá z vysílače a přijímače. Mají za úkol detekovat vznik vzduchové mezery a v případě potřeby tento stav signalizovat operátorovi. Vzniklou situaci většinou lze pohodlně vyřešit pomocí dvojice hydraulických rozrušovačů uváznuté náplně. Rozrušovače uváznuté náplně jsou umístěny uvnitř svodky, vedeny ve svislých kolejkách. Klenbu, která se utvoří na přechodu z násypky odpadu a plnicí svodky lze odstranit pohybem desek rozrušovače směrem dolů a nahoru. Pokud materiál v násypce a svodce odpovídá svou frakcí komunálnímu odpadu, klenbu se většinou podaří rychle odstranit. Jedna dávka přiložení polypropylovým drapákem do násypky váží v průměru mezi 1,5 a 2,5 t. V takovém množství materiálu, jak si lze snadno představit, může být ukryt odpad, který svou povahou a rozměry neodpovídá palivu, pro které byl kotol navržen. Může se jednat o různé železné tyče, trubky, betonové pražce, pařezy atd. Pokud se zaklíní v násypce, ve svodce odpadu, ve svodce škváry pod roštem, anebo ve vynašeči škváry, znamená to většinou problém. Pokud se předmět zaklíní v násypce, či svodce postupuje se stejně jako u klenby z materiálů o malé a střední frakci. Rozdíl je v tom, že vyproštění materiálu trvá většinou déle. Sloupec ve svodce se neustále zmenšuje a hrozí prohoření do násypky. Kromě toho se kolem klenby vyprázdňovanou svodkou přisává do kotle falešný vzduch. Kouřový ventilátor v režimu automatické regulace zvyšuje otáčky, aby udržel podtlak v kotli. Náhlým uvolněním materiálu se opět svodka utěsňuje, tím se podtlak dostane pod hranici ochrany a kotol odstává. Odstavení trvá zpravidla jen několik minut, maximálně několik desítek minut. Uvázne-li materiál ve svodce škváry, je třeba otevřít revizní otvor a svodku ručně vyčistit. To znamená odstávku na několik desítek minut až hodin. V případě uváznutí materiálu v mokré vynašeči, je třeba odstavit. Ruční vykopání a odstranění překážky a znovu najetí v tomto případě trvá několik hodin až několik desítek hodin.

4.2.1 Identifikace problému

V první řadě signalizuje uváznutou náplň mikrovlnná čidla. Je patrné, že odpad v násypce nesestupuje. V případě zanešení svodky škváry pod roštem je třeba sledovat monitorovanou činnost vynašeče škváry. Pokud jede naprázdno (na pásový dopravník není vytlačována škvára, nebo jen malé množství) není něco zřejmé v pořádku. Většinou platí, že čím dříve se závada odhalí, tím méně času je zapotřebí k jejímu odstranění. Z toho důvodu je dobré i vizuálně kontrolovat rošt a přepad škváry průhledem. Pokud se dostane nadrozměrný zbytek do vynašeče škváry a hydraulické rameno není schopno ho spolu se škvárou vytlačit, přepne se vynašeč do čistícího cyklu. Signálem k odstavení je když rameno nedosedne do koncové polohy a na pásovou dopravu tedy není vynášen vyhořelý materiál.

4.2.2 Řešení problémů spojených s uváznutím materiálu

V případě uváznutí materiálu v násypce se dá použít výše zmíněného rozrušovače. V případě škvárové svodky, vynašeče a někdy rovněž svodky paliva není nazbyt a musí se přikročit k manuálnímu uvolnění. Osobně se domnívám, že problémům spojeným s uváznutím materiálu v násypce kotle lze předcházet využitím drtiče odpadu v maximální míře. V případě nadrceného KO v násypce k takovým případům dochází jen výjimečně v násypce kotle a vzniklé klenby jsou snadno odstranitelné rozrušovačem. Pro masivnější používání drtiče hovoří i to, že navíc některé nadrozměrné formy KO mohou z dlouhodobého hlediska snižovat životnost zařízení. Poškozují zejména rošt kotle, vynašeč škváry, pásový dopravník škváry, magnetický separátor. V některých zahraničních spalovnách je do drtiče přivedený veškerý komunální odpad. Situaci by jistě pomohl vyřešit kvalitní výkonný drtič, který by měl potřebnou kapacitu. Takovým zařízením je bezesporu drtič *Tyrannosaurus* od finské firmy *BMH Technology, Rauma*. Drtiče této firmy mají jednoduchý vysokootáčkový rotor, vyměnitelné rotorové i statorové nože, hydraulický přítlak a vyměnitelná síta podle požadované hrubosti drcení. Kapacita se pohybuje od 25 do 80 tun za hodinu. Příkon pak asi 350 -517 kW. Velmi často je drtič součástí třídící linky, kdy je odpad nejprve nadrcen na frakci asi 80mm.[15] Poté jsou separovány magnetické i nemagnetické kovy. Pomocí vzduchových separátorů jsou odstraněny nehořlavé materiály jako kameny, beton, sklo, hlína, písek atd. Takto vytríděný odpad je v další fázi znovu nadrcen a to na frakci 20mm. Takto upravené palivo vykazuje výhřevnost 18 – 24 MJ.kg⁻¹. Dalším přínosem je nižší obsah síry. Třídící linky jsou však náročné finančně i na potřebný prostor.[15]

Jak už bylo zmíněno komunální odpad je velmi komplikované palivo s proměnlivými vlastnostmi. Hlavní spalovací oblast (zóna s nejvyšší okamžitou teplotou) se v rámci roštu kotle pohybuje. Mimo jiné v závislosti na výhřevnosti KO. V případě vysoké výhřevnosti se hlavní spalovací oblast nachází v přední části roštu. Vykazuje li odpad výhřevnost nižší, nejvyšší teplota bývá v zadní části.[8] To samozřejmě vede k nerovnoměrnému teplotnímu profilu a výkyvům v okamžitém parním výkonu. Teplotní rozložení na ploše roštu jde ovlivnit např. kombinací poměru primárního a sekundárního vzduchu. V zásadě platí, že pro daný parní výkon musí být součet primárního a sekundárního vzduchu konstantní. Dalšími prostředky k ovlivnění okamžitého parního výkonu jsou regulace rychlostí podávacích stolů a pohybu roštnic kotle, snižování či zvyšování vrstvy odpadu na roštu za pomoci stavitelného hradítka. Regulační systém by v optimálním případě měl být schopen udržet 90 % parního výkonu dle požadovaného zadání s odchylkou 5%.[8] To ovšem nemůže splnit ani sebedokonalejší regulační systém, pokud nebude pracovat s palivem, které je homogenizováno v rámci určitého rozpětí. Jinak řečeno není možné udržet konstantní parní výkon pokud v jedné chvíli na roštu hoří plastové zbytky z recyklační firmy a v druhém okamžiku podávací stoly natlačí na rošt mokrý komunální odpad s velkým obsahem popele. V takovém případě nejen, že bude kolísat výkonová křivka, ale celý proces spalování ztrácí na efektivnosti. Optimálnost spalovacího procesu lze posoudit na základě několika skutečností. Především nedopal by neměl přesahovat 1%

hmotnosti paliva, koncentrace kyslíku ve spalinách se pohybuje mezi 6- 10%, oxid uhelnatý je pod limitem $50\text{mg}/\text{Nm}^3$ a platí již zmíněná podmínka 90% parního výkonu má menší odchylku než 5%. [8]

Z grafu v příloze A je patrné rozkolísání výrobní křivky páry (oranžová, druhá shora) okolo nastavené, požadovaného hmotnostní toku páry. Rozkolísání, které je důsledkem nerovnoměrného teplotního profilu na roštu kotle v závislosti na značné nehomogenitě spalovaného materiálu, v určitém časovém rozmezí dokonce ohrožuje plynulou výrobu (viz graf v příloze B). Na třetím grafu (příloha C) je patrné opětovné zklidnění situace a plnění podmínky 90% parního výkonu má menší odchylku než 5% pro daný časový úsek.

Závěr

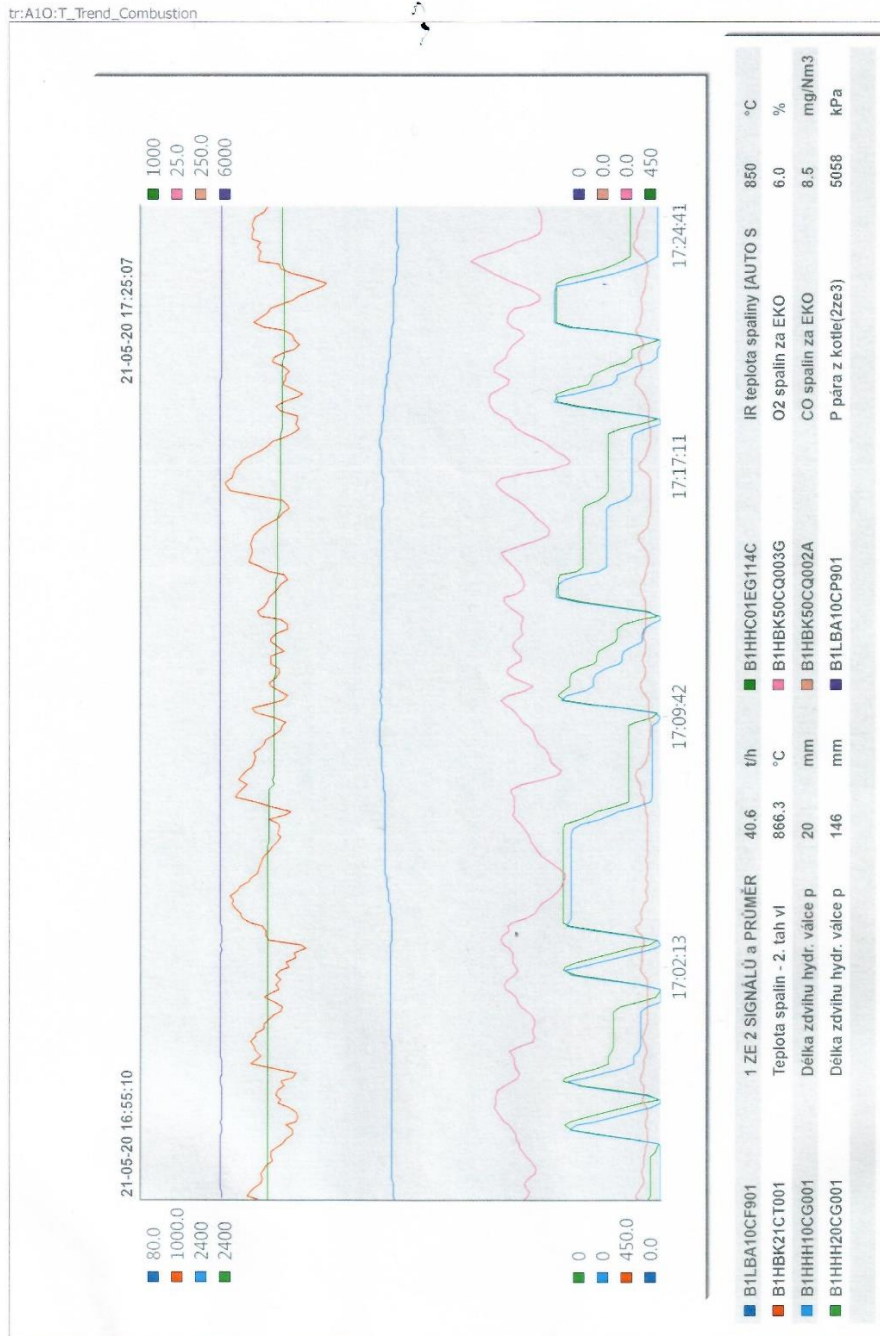
V první části práce jsem shrnul problematiku komunálního odpadu jako paliva pro výrobu KVET. Vlastnosti KO jsou závislé na jeho látkovém složení, které je ovlivněno několika faktory. Mimo jiné také lokalitou, odkud byl KO svezten. Výhřevnost KO vypočítanou z jeho průměrného republikového složení jsem určil 10.67 MJ.kg^{-1} . Jako druhou metodu pro výpočet výhřevnosti KO jsem použil bilanční rovnici kotle při předpokládané účinnosti kotle v rozmezí 0,85 – 0,95. Výsledná výhřevnost se pohybovala mezi $11\,077,2 \text{ kJ.kg}^{-1}$ a $12\,378,83 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Jedná se o hodnotu pro konkrétní hodinu ve spalovně ZEVO Chotíkov. Vyšší výhřevnost se dá vysvětlit větším obsahem plastů, neboť v uvedené spalovně se kromě odpadů vyprodukovaných domácnostmi spalují rovněž odpady z průmyslové výroby. Pevnými odpadními produkty spalování KO jsou škvára, popílek a sádra. Ze škváry je navíc separován železný odpad. Spalovna ZEVO je vybavena moderním systémem čištění spalin. Kontinuální měření emisních látek prokazuje, že škodliviny vypouštěné ve spalinách do ovzduší jsou hluboko pod zákonem stanovenými limity. V závěru práce jsem se zaměřil na problematiku nálepů v kotli. Důsledkem zanesení nálepy je omezená průchodnost spalinové cesty a je také spojeno (zejména u přehříváků) s působením chloridové koroze. Za provozu se odstranění nánosů řeší průběžně pneumatickými oklepy (ve čtvrtém tahu) a řízenou detonací. Řízená detonace s sebou nese jistá rizika poškození zařízení. Z metod používaných v ostatních provozech se jeví jako vhodná a použitelná pro spalovenské kotle metoda čištění akustickou vlnou, kterou jsem ve své práci popsal. Problematiku uvíznutí materiálu by šlo řešit masivním použitím drtiče odpadů, jak tomu je v některých zahraničních spalovnách. Navíc se tím dosáhne vysokého stupně homogenizace paliva a plynulejšího způsobu generace páry. Přivedením pouze rozdrčeného KO na rošt kotle se sice zvednou nároky na údržbu drtiče, vlastní spotřeba se zvýší zhruba o 300 – 500 kW, ale dojde k menšímu opotřebení palivové cesty, roštu, vynašeče, dopravního pásu škváry. Rovněž by se lépe a účinněji separoval magnetický odpad ze strusky. Menší nedopal ve strusce by pak znamenal ekologický přínos a zvýšené možnosti využití strusky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KLENOVČANOVÁ, Alexandra a Ivan IMRIŠ. *Zdroje a přeměny energie*. Prešov: ManaCon, 2006. ISBN 80-89040-29-2.
- [2] Ing. Emil DVORSKÝ, CSc a Ing. Pavla HEJTMÁNKOVÁ, PH.D. *Elektrárny: Zvyšování účinnosti přeměn energie v tepelných elektrárnách - příklady*. 1. Západočeská Univerzita, 1999.
- [3] LIBUŠE, Benešová. *Skladba komunálního odpadu v ČR* [online]. In: . s. 81 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: https://www.czp.cuni.cz/czp/images/stories/2012/odpady/1-skladba_komunalniho_odpadu-benesova.pdf
- [4] Ing. KŘENEK, Vladimír. *Člověk a energie*. Plzeň: Západočeská Univerzita, 2006.
- [5] ČESKÁ REPUBLIKA. ZÁKON o odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: Sbírka zákonů. Praha, 2001, 185/2001 Sb. Dostupné také z: http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/8FC3E5C15334AB9DC125727B00339581/%24file/Z%20185_2001.pdf
- [6] ČESKÁ REPUBLIKA. 352. Nařízení vlády o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024. In: Sbírka zákonů. Praha, 2014, číslo 352. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/1A9ED7F11A20B986C1257E2E00422918/%24file/NV%20352_2014.pdf
- [7] STRAKA, David. *Složení komunálních odpadů* [online]. 2019 [cit. 2020-05-27]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=192164. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. Patrik Ebl.
- [8] HYŽÍK, Jaroslav. *Úskalí a možnosti zvyšování účinnosti u energetického využívání odpadů: Odpady 2012 a jak dál aneb hříšný tanec kolem spaloven* [online]. In: . Brno, 24.12.2012, s. 1-36 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <file:///C:/Users/asus/Downloads/odpady-2012-hyzik-steo.pdf>
- [9] Bc. KUBÍČEK, Jan. *Moderní metody mokrého čištění spalin* [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://adoc.tips/moderni-metody-mokreho-itni-spalin.html>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí práce Ing. Radek Dvořák, Ph.D.

- [10] Ing. NADKANSKÁ, Hana. *Potlačení nálepů strusky v energetických kotlích přidáváním aditiva do vsázky* [online]. 2016 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/116925/NAD028_HGF_P2102_2102V009_2016.pdf?sequence=1. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita v Ostravě. Vedoucí práce Prof. Ing. Vojtěch Dirner, CSc.
- [11] JAROSLAV, Hyžík. Vybrané statě projektování zařízení na energetické využívání odpadů. In: *ENVIRONMENTÁLNÍ SOUVISLOSTI NAKLÁDÁNÍ S ODPADY* [online]. 2.10.2012, s. 1-45 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: https://www.czp.cuni.cz/czp/images/stories/2012/odpady/3-vybrane_stat_e_projektovani_evo-hyzik.pdf
- [12] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace. Měření a hodnocení*. Sdělovací technika. 58. Praha, 1998. ISBN 80-90 1936-2-5.
- [13] IPH SERVIS MORAVA, s.r.o. Zvukové ofukovače [online]. [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <http://www.iph.cz/ofukovace-zvukove.htm>
- [14] KIELAR, Jan. *Vypracujte návrh řešení čistění teplosměnných ploch u kotlů na spalování biomasy* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104925/KIE0007_FS_B2341_3907R009_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta strojní Katedra energetiky. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Bohumír Čech.
- [15] Ing. ROUČKA, Roman. Automatické třídící linky s drtiči robustní konstrukce. *Komunální technika* [online]. 15.2.2011 [cit. 2020-05-28]. Dostupné z: <https://www.komunalweb.cz/automaticke-tridici-linky-s-drtici-robustni-konstrukce/>
- [16] Ing. Emil DVORSKÝ, CSc., Ing. Pavla HEJTMÁNKOVÁ, Ph.D. a Ing. Martin KOČMICH. *Elektrárny: Výroba elektrické energie v tepelných elektrárnách - příklady*. 1. Plzeň: Západočeská Univerzita, 1994.
- [17] FRANZ, Zechner a Weiss EWALD. ZAUNER ANLAGENBAU, GMBH. *Školení FGT: Čištění spalin*. 1. 2015.
- [18] KREITH, Frank. a George. TCHOBANOGLIOUS. *Handbook of solid waste management*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2002. ISBN 00-713-5623-1.
- [19] *Interní měření*. ZEVO Chotíkov, 20-03- 2020 a 21-05-2020.
- [20] ŠTUKAVEC, Ondřej. *Přehřívák páry pro spalovny komunálních odpadů* [online]. Ostrava, 2016 [cit. 2020-06-01]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/114975/STU0064_FS_N2301_2302T006_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=n. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Vilimec.

Příloha A[19]

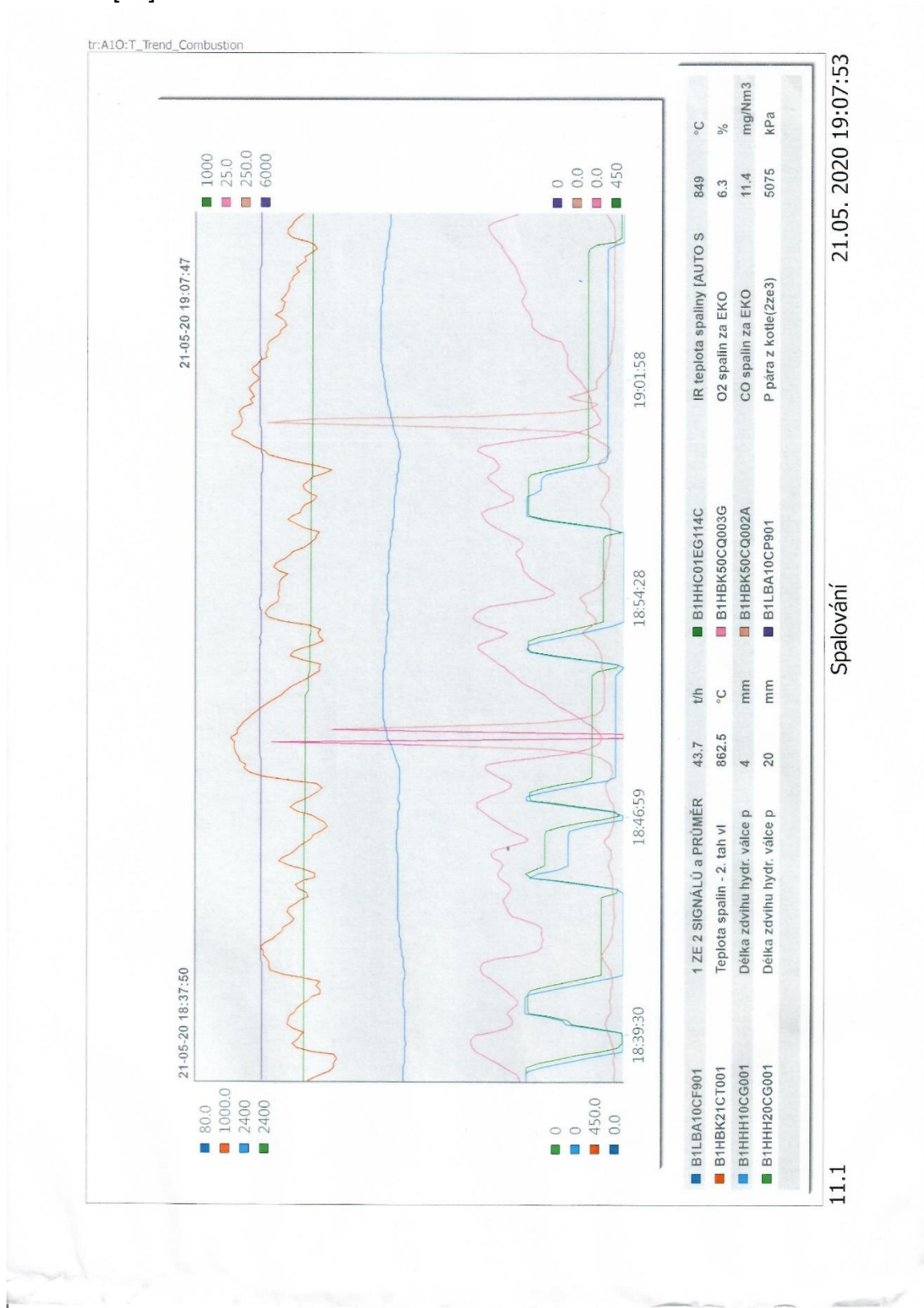


11.1

Spalování

21.05. 2020 17:25:13

Příloha B[19]

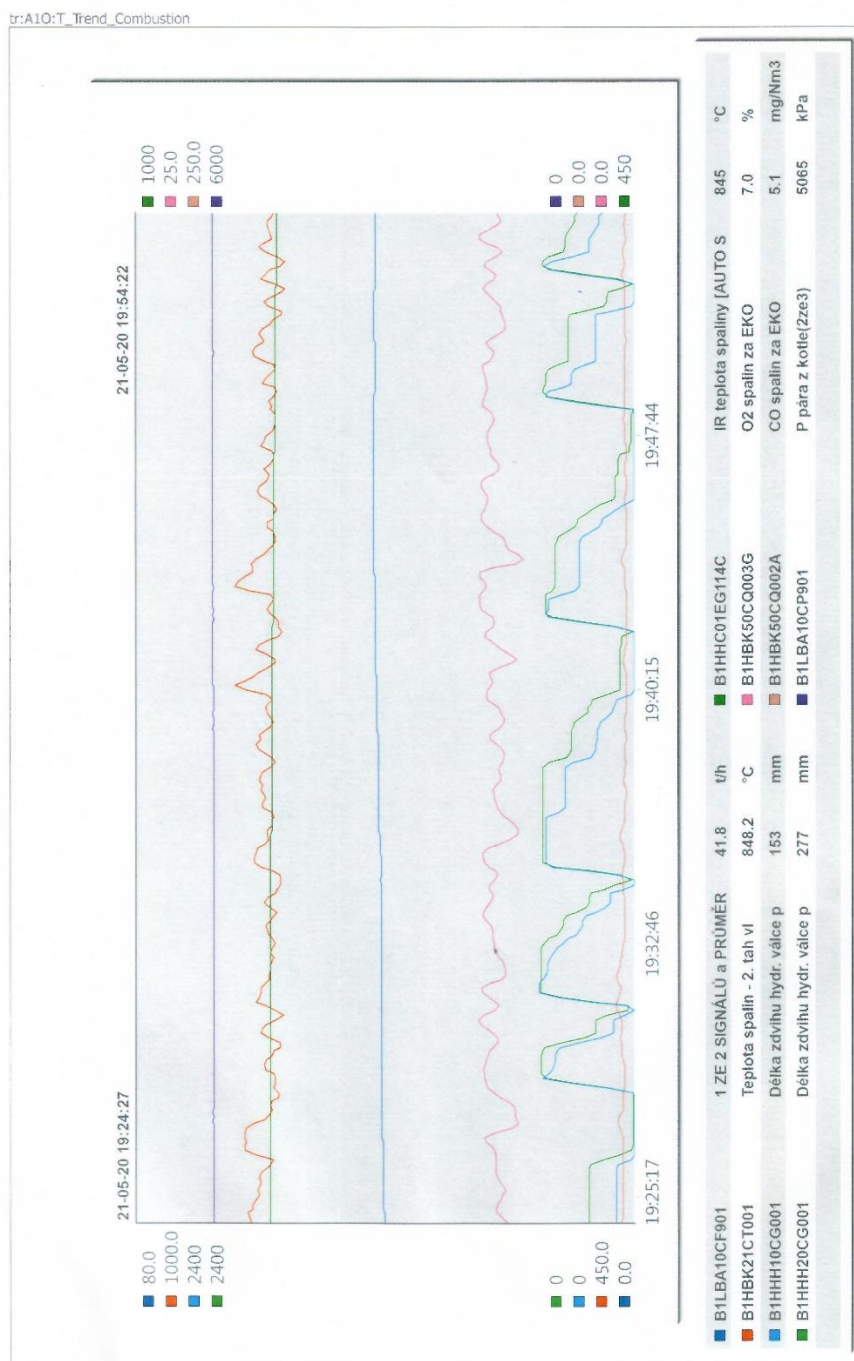


21.05.2020 19:07:53

Spalování

11.1

Příloha C[19]



21.05.2020 19:54:30

Spalování

11.1

