

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL  
ENGINEERING

## ANALÝZA ALTERNATIV ODSTRAŇOVÁNÍ PCDD/F PŘI SPALOVÁNÍ ODPADŮ

EVALUATION OF THE ALTERNATIVES OF PCDD/F REMOVING IN THE INCINERATION PLANTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
DIPLOMA'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

BC. LUKÁŠ FRÝBA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

DOC. ING. LADISLAV BÉBAR, CSC.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Lukáš Frýba

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Analýza alternativ odstraňování PCDD/F při spalování odpadů**

v anglickém jazyce:

#### **Evaluation of the alternatives of PCDD/F removing in the incineration plants**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Posouzení alternativních strojně-technologických řešení využívaných pro finální odstraňování persistentních organických látek vznikajících při spalování odpadů z hlediska dodatečných provozních nákladů a energetické účinnosti.

Cíle diplomové práce:

Na základě studia literárních pramenů provést rekapitulaci současného stavu techniky využívaného pro čištění spalin od persistentních organických látek, zejména PCDD/F. Pro nejčastěji používaná řešení (v počtu asi 5 až 7 alternativ) provést srovnání provozní a energetické náročnosti, zhodnotit dosažitelný export energie a dopad změněných pracovních podmínek na ukazatele efektivity výroby a využití energie.

## Seznam odborné literatury:

Joseph J. Santoleri, Joseph Reynolds and Louis Theodore: "INTRODUCTION TO HAZARDOUS WASTE INCINERATION", Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 2000, ISBN 0-471-011790-6

Dieter O. Reimann: Results of Specific Data for Energy, Efficiency Rates and Coefficients, Plant Efficiency factors and NCV of 97 European W-t-E Plants and Determination of the Main Energy Results, CEWEP Energy Report, Bamberg, Germany, October 2005 (Updated July 2006)

Integrated Pollution Prevention and Control- Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, European IPPC Bureau, Brussels, <http://ippc.cz>, available on <http://eippcb.jrc.es>, July 2005 (Updated August 2006)

M. Pavlas, L. Bébar, L. Urban, P. Stehlík: Analysis of utilizing energy from thermal processing of waste, In 17th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2006, 7th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2006, Proceedings on CD, Paper H1.5, August 27-31, 2006, Praha

T. Pařízek, L. Bébar, P. Stehlík: Metody pro snížení emisí perzistentních látek vzniklých spalováním odpadů, In 54. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2007, Proceedings on CD, 0023, 15.-18. října 2007, Srní, Šumava

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne

L.S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na zhodnocení současného stavu techniky využívané k čištění spalin od persistentních organických látek, především PCDD/F. Pro tři nejčastěji používané metody řešení bylo provedeno srovnání provozní a energetické náročnosti, kde byl zhodnocen dosažitelný export energie a dopad změněných pracovních podmínek na ukazatele efektivity výroby a využití energie. V závěrech práce jsou posouzena alternativní strojně-technologická řešení využívaná pro finální odstraňování persistentních organických látek vznikajících při spalování odpadů z hlediska dodatečných provozních nákladů a energetické účinnosti.

## **ABSTRACT**

The thesis is focused on analyzing the current status of the technology used for cleaning flue gas from persistent organic pollutants, especially PCDD/F. For the three most commonly used methods of solution operational and energy efficiency comparison was made, where achievable energy export and the impact of the change in working conditions on the efficiency indicators of energy production and use of the energy was evaluated. In conditions we considered an alternative machine-technological solutions used for the final disposal of persistent organic pollutants resulting from the waste combustion in terms of additional operating costs and energy efficiency.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Čištění spalin, persistentní organické látky, spalování odpadů, energetická účinnost, mechanické čištění spalin, chemické čištění spalin, tlaková ztráta

## **KEY WORDS**

Off-gas cleaning, Persistent organic pollutants, waste incineration, energy efficiency, mechanical off-gas cleaning, chemical off-gas cleaning, pressure drop

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

FRÝBA, L. *Analýza alternativ odstraňování PCDD/F při spalování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc..



## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI**

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma analýza alternativ odstraňování PCDD/F při spalování odpadů jsem vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Bébara, CSc. a s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 28.5.2011

Bc. Lukáš Frýba

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval doc. Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc. za odborné vedení, množství cenných rad a připomínek při tvorbě předložené práce. V neposlední řadě děkuji Ing. Petru Klimkovi za konzultaci ohledně používání programu W2E.



## OBSAH

OBSAH .....	8
ÚVOD .....	10
1 NAKLÁDÁNÍ S ODPADY .....	12
1.1 Situace v EU .....	12
1.2 Situace v ČR .....	13
1.3 Odpad ze spaloven odpadů .....	13
2 HLAVNÍ ENERGETICKÉ TOKY VE SPALOVNĚ ODPADŮ .....	15
2.1 Import tepelné a elektrické energie .....	15
2.2 Kritéria pro hodnocení spaloven .....	16
2.3 Hodnocení spaloven z hlediska efektivity výroby a využití uvolněné energie .....	17
2.4 Výchřevnost odpadu .....	18
2.5 Energetická bilance spalování .....	20
3 ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY VZNIKLÉ PŘI SPALOVÁNÍ ODPADŮ .....	23
3.1 Charakteristika látek PCDD/F .....	24
3.2 Historický pohled vzniku látek PCDD/F .....	26
3.3 Vznik PCDD/F látek .....	27
3.4 Nebezpečí v podobě PCDD/F látek .....	28
4 TECHNOLOGIE ČIŠTĚNÍ SPALIN .....	30
4.1 Proces spalování .....	30
4.2 Mechanické čištění .....	31
4.2.1 Elektrostatické odlučovače (ESP) .....	31
4.2.2 Tkaninové filtry .....	32
4.3 Chemické čištění .....	33
4.3.1 Adsorpční metody .....	33
4.4 Odstraňování POP .....	35
4.4.1 Metoda katalytické oxidace dioxinů .....	35
4.4.2 Katalytická filtrace .....	36
4.4.3 Jiné metody snižování POP .....	37
5 ENERGETICKÁ NÁROČNOST PROCESU ČIŠTĚNÍ SPALIN .....	39
5.1 Popis porovnávaných technologií .....	39
5.1.1 Technologie s mokrou vypírkou + SNCR (Alternativa I) .....	39

5.1.2	Technologie DeNOx/DeDiox před mokrým čištěním spalin (Alternativa II) ....	40
5.1.3	Technologie DeNOx/DeDiox za mokrým čištěním spalin (Alternativa III) .....	41
5.2	Výpočet množství produkovaná elektrické a tepelné energie.....	42
5.2.1	Výroba páry .....	42
5.2.2	Výroba elektrické energie a množství prodejného tepla.....	43
5.3	Spotřeba elektrické energie .....	47
5.3.1	Tlaková ztráta ve spalinovém potrubí.....	47
5.3.2	Ventilátory .....	48
5.3.3	Mokrý vypírka .....	51
5.4	Srovnání produkce a spotřeby.....	52
5.4.1	Kritérium Energy efficiency a Plant efficiency.....	52
5.4.2	Ekonomické srovnání .....	54
	ZÁVĚR .....	56
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	58
	SEZNAM SYMBOLŮ .....	62
	PŘÍLOHA 1 .....	65
	PŘÍLOHA 2 .....	66
	PŘÍLOHA 3 .....	67

## ÚVOD

Procesy termického zpracování odpadních látek, které jsou produkovány výrobní i komunální sférou, tvoří významnou složku průmyslové činnosti. Kromě výrazné redukce objemu odpadů se těmito procesy využívá kalorického obsahu odpadů k výrobě tepelné a elektrické energie.

Při procesu spalování odpadů je nezbytnou podmínkou dodržování legislativy stanovené pro vedení procesu, tvorbu exhalací, zbytky spalování a produkty vznikající v použitých technologiích. V současnosti v ČR platí pro vedení procesu spalování odpadů a maximální koncentrace znečišťujících látek v exhalacích ze spaloven Nařízení vlády ČR č.354/2002 Sb. [1], odpovídající předpisům Evropské unie [2].

Při termickém zpracování průmyslových a komunálních odpadů dochází ke vzniku spalin, obsahujících finální oxidační produkty ( $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ ) spolu s nežádoucími složkami. Sledované nežádoucí komponenty exhalací vznikající ve spalovnách odpadů jsou  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , oxidy síry ( $\text{SO}_2$ , a  $\text{SO}_3$ ), halogenovodíky ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HBr}$ ), tuhé znečišťující látky (TZL), emise těžkých kovů (ve formě elementární nebo oxidické), látky organického charakteru, které zahrnují uhlovodíky a také perzistentní organické látky (POP - Persistent Organic Pollutants).

Kombinací mechanických a chemických způsobů čištění spalin dochází k odstranění, resp. snížení obsahu nežádoucích látek pod stanovenou mez. Mechanickou cestou jsou většinou odloučeny částice jemného popílku strženého spalinami ze spalovacího prostoru pomocí odlučovačů zabudovaných do kotle a následně v elektrostatickém odlučovači (ESP) nebo rukávcoých tkaninových filtrech. Chemický princip absorpce se využívá k záchytu plyných látek kyselé ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ) nebo zásadité povahy (oxidy těžkých kovů). Tento proces je realizován prostřednictvím mokré nebo polosuché vypírky v prostředí různé alkality, případně pomocí adsorpčního čištění kontaktem se suchými alkalickými látkami.

Při provozování spaloven odpadů a hodnocení emisní situace jsou trvale sledovány obsahy perzistentních organických látek s výraznými toxickými vlastnostmi. Do skupiny POP spadají polychlorované dibenzodioxiny a polychlorované dibenzofurany (dále rovněž PCDD/F nebo zkráceně „dioxiny“), polyaromatické uhlovodíky (PAH) a polychlorované bifenylly (PCB).

Dioxiny jsou obecně definovány jako látky, které jsou nebezpečné i ve stopovém množství. Jejich vysoká chemická stabilita způsobuje dlouhé setrvávání v prostředí, a tím možnost transportu v příznivých podmínkách i tisíce kilometrů od zdrojů původu. Dioxiny a látky podobného charakteru (především polychlorované bifenylly) nejsou rozpustné ve vodě, ale ukládají se v tucích. Z tohoto důvodu jsou velmi nebezpečné pro živé organismy, u člověka poškozují imunitní a hormonální systém a způsobují poruchy metabolismu. Dle nejnovějších poznatků WHO jsou dioxiny mnohem nebezpečnější, než se v minulosti předpokládalo a ohrožují zdraví obyvatel v dlouhém časovém horizontu. Nebezpečná je především jejich schopnost bioakumulace (růst koncentrace chemické látky v organismu).

Reakce organismu na dioxiny záleží na vnímavosti jednotlivce. Odezva organismu na dioxiny se může vyskytnout již při jejich nízkých koncentracích, naopak ale nemusí vzniknout ani při koncentracích vyšších. Přítomnost dioxinů v životním prostředí je vzhledem k velmi vysoké toxicitě některých představitelů této skupiny látek významným ekologickým problémem současné doby. Jejich nálezy v různých složkách životního prostředí a v potravinách získávají stále větší společenskou publicitu. Jediným vhodným řešením je proto předcházet vzniku těchto látek a jejich následným únikům do životního prostředí. Je třeba začít u zdrojů jejich vzniku, což je cílem předložené práce, jejímž úkolem je na základě studia literárních pramenů provést rekapitulaci současného stavu techniky

využívané pro čištění spalin od persistentních organických látek, především PCDD/F. Pro tři nejčastěji používaná řešení bylo provedeno srovnání provozní a energetické náročnosti, kde byl zhodnocen dosažitelný export energie a dopad změněných pracovních podmínek na ukazatele efektivity výroby a využití energie. V závěrech práce jsou posouzeny alternativní strojně-technologická řešení využívaná pro finální odstraňování persistentních organických látek vznikajících při spalování odpadů z hlediska dodatečných provozních nákladů a energetické účinnosti.

# 1 NAKLÁDÁNÍ S ODPADY

U odpadů je možné hrubé dělení na směsné komunální odpady, průmyslové odpady a nebezpečné odpady. K jejich vzniku dochází ve všech průmyslových odvětvích, při vytváření různých produktů průmyslové výroby, v čistírnách odpadních vod a také v domácnostech. V současné době existuje několik způsobů nakládání s odpady. Nejvhodnějším a nejekologičtějším řešením je jejich vzniku předcházet. Úplně předejít vzniku odpadů většinou není možné, a proto vznikla určitá hierarchie zacházení s odpady. V hierarchii je na prvním místě prevence, dále znovu využití, recyklace, energetické využití, spalování a jako poslední možnost je ukládání odpadů na skládky. Tato práce je zaměřena právě na energetické využití a spalování odpadů a pojednává o energetické náročnosti různých technologií čištění produktů spalování, tak aby měly co nejmenší dopad na životní prostředí a zdraví organismů [3].

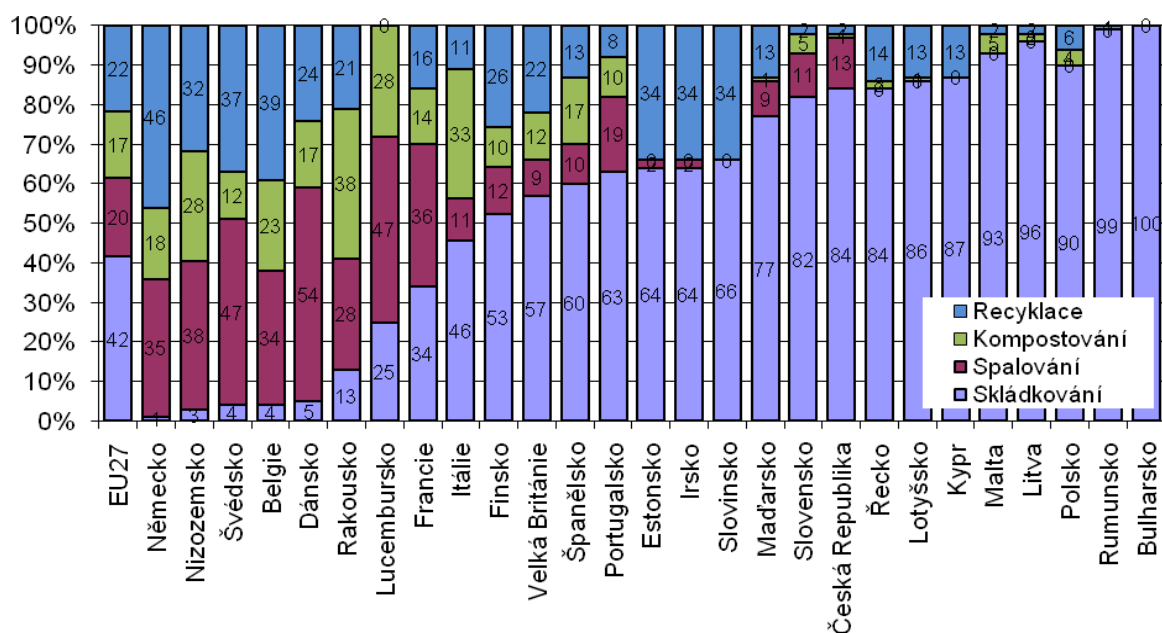
Při termickém zpracování komunálních i nebezpečných odpadů je uvolňováno množství tepla, které je obsaženo v hořlavině spalovaných odpadů. Zhodnocení obnovitelných zdrojů energie spočívá právě v důsledném využití tohoto tepla, což přispěje k omezení spotřeby primárních energetických zdrojů. Odpady je pak možné brát jako obnovitelný zdroj energie, která byla dříve vložena do výrobků, z nichž odpad pochází. Tuto energii je pak možné částečně získat při jejich spalování. Množství využitelného tepla, které se uvolňuje spalováním odpadů, závisí na technologickém i strojním řešení celého zpracovatelského komplexu, který je použit pro spalování odpadů. Efektivita využití uvolněného tepla a čištění spalin je podmíněna tím, že velikost energie, která vzniká při termickém zpracování odpadů a je exportována k vnějším spotřebitelům, musí být vyšší než veškerá energie investovaná do celého technologického procesu. Splnění této podmínky není ve všech případech termického zpracování komunálních a průmyslových odpadů samozřejmostí [3].

## 1.1 Situace v EU

V rámci EU se výhřevnost směsných komunálních odpadů (SKO) většinou pohybuje v rozmezí od 7 až 11 MJ/kg. Výhřevnost SKO zhruba 10 MJ/kg je uváděna v řadě zahraničních studií i v průzkumech z našich podmínek. V současnosti se v EU ke spalování komunálního odpadu využívá přes 400 zařízení s úhrnným výkonem cca 50 mil. t/r. Podíl spalovaných SKO tak v EU činí kolem 20 až 22 % z jejich celkové produkce (Obr. 1), která každoročně stoupá asi o 2 až 3 %. V rámci EU představuje celkové uvolněné teplo ve spalovnách komunálních odpadů, při průměrném kalorickém obsahu SKO, asi 500 až 550 PJ/r, což je 140 až 150 TWh/r, eventuálně 12 až 13 mil. tun olejového ekvivalentu (t<sub>OE</sub>). V letech 2004 až 2005 byl pro 18 zemí EU spalováním odpadů získán celkový objem energie 60 až 62 TWh/r, z něhož připadá zhruba 30 % na využití v podobě elektrické energie a 70 % na využití v podobě tepelné energie. Při průměrné účinnosti výroby elektrické energie v běžných energetických výrobcích, která závisí na druhu výchozího paliva, se pohybuje mezi 35 až 55 % (při spalování odpadů pouze zhruba 15 %). Z uvedeného vyplývá, že spalováním SKO v rámci EU se ročně uspoří primární energetické zdroje ve výši asi 8,3 mil. tun olejového ekvivalentu. I přesto, že účinnost získání energie při spalování odpadů je nižší než u běžných procesů užívaných v energetice, slouží termické zpracování odpadů k zisku tepelné nebo elektrické využitelné mimo vlastní proces. Z tohoto hlediska je možné energetické využití odpadů považovat za jednu z možností jak snížit spotřebu primárních energetických zdrojů. Do budoucna jsou plánovány takové koncepce spaloven, které budou zaměřeny především na získání elektrické energie při spalování odpadů s účinností až 30 % [3], [4], [5].

## 1.2 Situace v ČR

Statistické údaje pro Českou republiku uvádí, že v roce 2009 byl při zpracování SKO celkový zisk energie 1,04 TWh/r, tj. 89 kt<sub>OE</sub>/r. Dle ministerstva průmyslu a obchodu je zpracovatelský výkon zařízení na energetické využití odpadů deklarován ve výši 361 kt/r [6]. Využití uvolněného tepla a technologický režim spaloven SKO v ČR se poněkud liší. V případě, že by byl režim kogeneračního využití tepla z produkovaných spalin shodný s naší nejmodernější spalovnou TERMIZO a.s., Liberec, byla by dosahována roční úspora primárních energetických zdrojů cca 100 až 150 tis. tun olejového ekvivalentu. Dosahovaný efekt je však jen zlomek celkové spotřeby energie, při srovnání s celkovou energetickou spotřebou ČR, která se pohybuje ve výši cca 40 mil. t<sub>OE</sub>/r. V případě, že se průměrná roční spotřeba primárních energetických zdrojů na 1 obyvatele ČR pohybuje kolem 4 tun olejového ekvivalentu, kryje uvedený výsledek roční spotřebu energie městečka s asi 20 až 25 tisíci obyvateli. V ČR není možné bez výstavby nových zpracovatelských kapacit spaloven SKO dosáhnout úrovně úspor primárních zdrojů ve výši asi 125 tis. t<sub>OE</sub>/r [3].



Obr. 1: Nakládání s odpady v EU [7]

## 1.3 Odpad ze spaloven odpadů

Do spaloven se dostává odpad, který kromě spalitelných složek obsahuje rovněž podíl složky nespalitelné, jejíž energetické zhodnocení v procesu spalování není účelné. Určitá část nespalitelných složek, označovaná jako materiálově využívané odpadní frakce, je využitelná v dalším procesu výroby a recyklace, případně jako předmět obchodu. Větší podíl takové materiálově využívané odpadní frakce v nespalitelné složce odpadu obsahuje zejména komunální odpad. Příkladem druhotného využití nespalitelných složek je spalovna TERMIZO a.s., Liberec, jejíž hodnoty spáleného odpadu a materiálově využívané odpadní frakce jsou uvedeny v Tab. 1.

Ukazatel	Jednotka	Rok									
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Roční provoz	h	7711	7530	7930	7799	8070	8014	8102	8259	8784	7917
Spálený odpad	kt	74,3	82,8	96,3	91,1	92,6	93,1	89,9	91,2	91,9	96,8
Výroba páry	t/t	3,1	3,1	2,9	2,8	2,9	3	3,3	3,5	3,4	3,1
Tepelná energie	GJ/t	9,8	9,9	9,3	8,9	9,3	9,7	10,4	11,1	10,8	9,9
EI, energie	MWh/t	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Popeloviny výrobek	kg/t				371	381	315	308	283	270	305
Separace železa				2,4	14	15	1	17	15	14	10
Popeloviny odpad		408	402	415	25	2	15	12	18	15	0,6
Popílek		3,5	2	1,2	1	0,8	1,5	0,6	0,7	1,2	0,7
Filtrační koláč		12	13	11	13	10	13	9	9	9	7
Odpadní voda	m <sup>3</sup> /t	0,22	0,28	0,28	0,31	0,26	0,26	0,29	0,24	0,22	0,16

Tab. 1: Množství spáleného odpadu a materiálově využitě druhy odpadu ze spalovny  
TERMIZO a.s., Liberec [8]

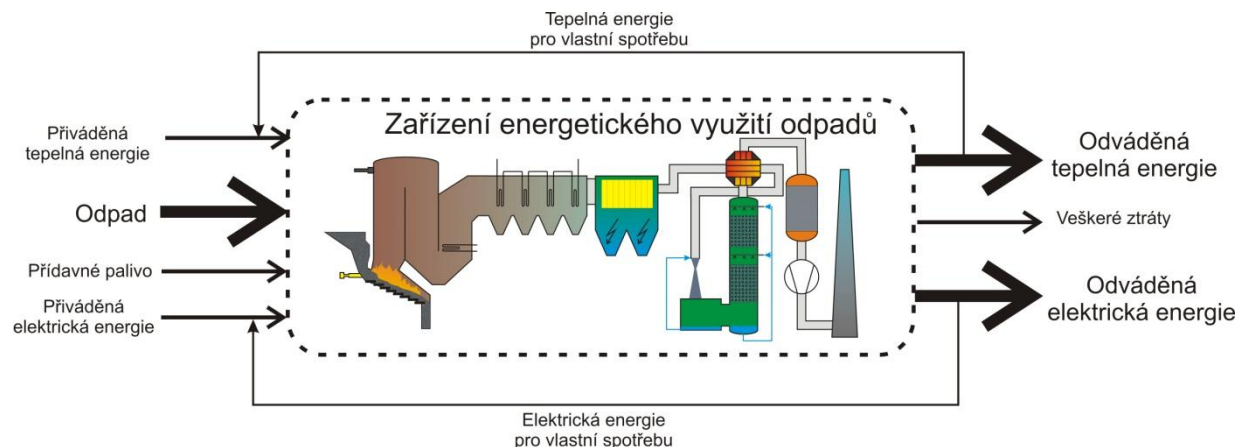
Po procesu spalování zbývají popeloviny, které prošly žárovou zónou spalovací komory, nejsou nebezpečné, ale mají podobné vlastnosti jako stavební hmoty. Je proto možné je využívat ve stavebnictví například jako podkladový materiál při výstavbě komunikací. Z popelovin je možné oddělit feromagnetickou frakci v podobě železného šrotu. Z výše uvedené tabulky vyplývá, že celková míra materiálového využití popelovin je vždy více než 95 % [8].

Ve spojitosti s otázkou globálního oteplování Země jsou hledány nové technologie, které by využitím oxidu uhličitého snižovaly jeho koncentraci v atmosféře. V současné době jsou známy pouze nákladně a nebezpečně technologie ukládající oxid uhličitý do podzemních prostor nebo do oceánu. Velká pozornost se v poslední době věnuje využití fotosyntézy řas, kterou je možné získat kvalitní produkty na bázi bílkovin, škrobů a lipidů, čímž se otevírá cesta k produkci biopaliv 2. generace [8].

## 2 HLAVNÍ ENERGETICKÉ TOKY VE SPALOVNĚ ODPADŮ

Hlavní podíl v tepelné bilanci spaloven odpadů představuje teplo uvolněné spalováním hořlaviny, kterou obsahuje daná surovina. Výjimku tvoří případy, kdy je nutné termickým způsobem likvidovat kaloricky nízkohodnotné materiály s vysokým obsahem balastních podílů (kontaminovaná zemina, stavební suť, silniční smetky, neodvodněné kaly z čistíren komunálních a průmyslových odpadních vod, apod.). Vysoké nároky na spotřebu podpůrného paliva ve stabilizačních hořácích, které udržují režim spalování v předepsaných teplotních mezích, mohou vznikat při spalování nízkovýhřevných odpadů a při dvoustupňovém spalování průmyslových odpadů. Koncepce moderních spaloven je navržena tak, že převážný podíl technologických částí ohřevů (včetně vytápění objektů) zajišťuje vlastní produkované teplo a je minimalizován přívod energie z vnějších sítí, který je využíván jen ve fázích najíždění či odstavení spalovny z provozu nebo v nouzových provozních situacích. Hlavní energetické proudy jsou znázorněny na Obr. 2.

Importovaná tepelná energie je definována jako entalpický tok v proudu upravené napájecí nebo technologické vody pro blok využití tepla. Do položky importované tepelné energie je možné na základě způsobu řešení technologické linky zařadit také dodávku přídatných ohřevných medií (pára, termoolej, zemní plyn apod.) pro další technologické ohřevy. Jako doplňující parametr pro členění vstupních entalpických toků ve spalovně z hlediska efektivity výroby a využití energie je využívána přímá souvislost nebo nesouvislost energie s výrobou tepla. Maximální soběstačnost spalovny v zásobování energií je ve stejné míře dána importem elektrické energie [9].



Obr. 2: Hlavní vstupní a výstupní energetické toky na spalovně odpadů [9]

### 2.1 Import tepelné a elektrické energie

Jak již bylo výše uvedeno, moderní spalovny využívající tepelný potenciál vzniklých spalin kogeneračním způsobem k výrobě elektrické i tepelné energie. Jsou navrženy tak, že by měly být po převážnou dobu provozu na dodávkách z vnější sítě nezávislé. Významněji se na položce importu tepelné energie nesouvisející přímo s výrobou tepla může odrazit požadavek na ohřev spalin před finálními operacemi katalytického odstraňování oxidů dusíku (SCR), případně katalytického rozkladu persistentních organických látek (POP), vč. polychlorovaných dibenzodioxinů a polychlorovaných dibenzofuranů (dioxinů).

V takových případech je ohřev spalin prováděn většinou v několika stupních a kromě rekuperace pod něj spadají i ohřevy, při kterých je využívána vlastní produkovaná nebo importovaná energie (pára, zemní plyn). Ke zvýšení teploty spalin o zhruba 10 °C je třeba nárůst vlastní spotřeby tepla cca o 25 až 50 kWh/t zpracovaného odpadu [9].

## 2.2 Kritéria pro hodnocení spaloven

Za účelem porovnání efektivity výroby energie v jednotlivých spalovnách bylo různými organizacemi vytvořeno několik kritérií, která jsou uvedena v Tab. 2. Tato kritéria mají společný cíl, kterým je porovnání velikosti energetických výstupů (vyrobené nebo exportované energie) a energetických vstupů.

Navrhováno v resp. kým	Název kritéria	Symbolický zápis	Waste-to-Energy systém
The Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP) [14]	Plant efficiency factor	$Pl_{ef} = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{E_f + I_{imp} + I_{circ}}$	$Pl_{ef} > 1$
	Energy utilization rate	$\eta = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{f_B \cdot (E_w + E_f)}$	$\eta > 0.5$
Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration (BREF) [17]	Plant efficiency	$Pl_{ef} = \frac{Q_{exp} - (E_f + I_{imp})}{E_f + I_{imp} + I_{circ}}$	-
Proposal for a Directive on waste [12]	Energy efficiency	$\eta_e = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{f_B \cdot (E_w + E_f)}$	$\eta_e > 0.6$ $\eta_e > 0.65^*$ * pro zařízení povolené po 31.12.2008

Tab. 2: Porovnání kritérií pro hodnocení spaloven z hlediska efektivity výroby a využití energie [10], [11]

Význam kritérií:

$Pl_{ef}$  (Plant Efficiency Factor)

ukazatel efektivity výroby energie (produkovaná energie ze spalování odpadu/spotřebovaná energie)  $Pl_{ef} > 1$  vyrobeno více energie, než spotřebováno

$\eta_e$  (Energy utilization rate-EUR)

ukazatel stupně využití energie

Plant Efficiency

dosazení energie exportované

Energy Efficiency

dosazení energie produkované

Aby spalování odpadů mohlo být zařazeno do kategorie energetického využívání odpadů, má být hodnota ukazatele *Energy Efficiency* vyšší než 0,60, dle pozdějších návrhů [11] pro zařízení schválených po 31. 12. 2008 vyšší než 0,65. Proti předchozím formulacím [13], [14], [15], [16] užívají novější návrhy ukazatele  $Pl_{ef}$  [12], [17] pouze velikost tepelné a elektrické energie pro export. V případě, že je vyrobeno více energie, než je spotřebováno, část získané energie může být exportována do dalších procesů, což znamená, že spalovna pracuje jako energetický zdroj. Kritéria *Plant Efficiency* a *Energy Efficiency* se liší pouze v tom, že vztah používá energii exportovanou místo energie produkované. Energie produkovaná je definována jako součet exportované a cirkulující energie. Nejde pouze o množství energie vyrobené v kotli, ale energii sníženou o ztráty související s přeměnou energie.

Spalovna je při kogeneračním způsobu využívání tepla producentem tepelné i elektrické energie a k porovnání výpočtů je nutné respektovat některá smluvní ustanovení. V případě importu elektrické energie se používá koeficient 2,6316 pro přepočet elektrických jednotek práce na tepelné. Je předpokládáno, že u jiného výrobce by tato elektrická energie byla získávána s účinností 38 % a v případě zisku energie mimo spalovnu s účinností 91 %. Proto se v novějších vyjádřeních smluvně zvyhodňuje „export tepelné energie“ koeficientem 1,0989 [18].

Uvedené vztahy pro výpočet kritérií se mírně odlišují, každý z nich dává jiné absolutní hodnoty. Absolutní hodnota kritérií je stěžejní při kategorizaci zařízení, při kterém je definováno, zda je proces považován za pouhé odstranění odpadů nebo za hodnotnější energetické využití se všemi legislativními důsledky. Legislativa, která se zabývá touto problematikou, je stále ve fázi vývoje a diskuse. Ze závěrů zasedání EP z února 2007 [19] není možné kritéria efektivity výroby a využití energie v různých spalovnách brát jako jediný a rozhodující ukazatel při kategorizaci způsobů nakládání s odpady a hodnocení úrovně procesů termického zpracování odpadů v různých spalovnách.

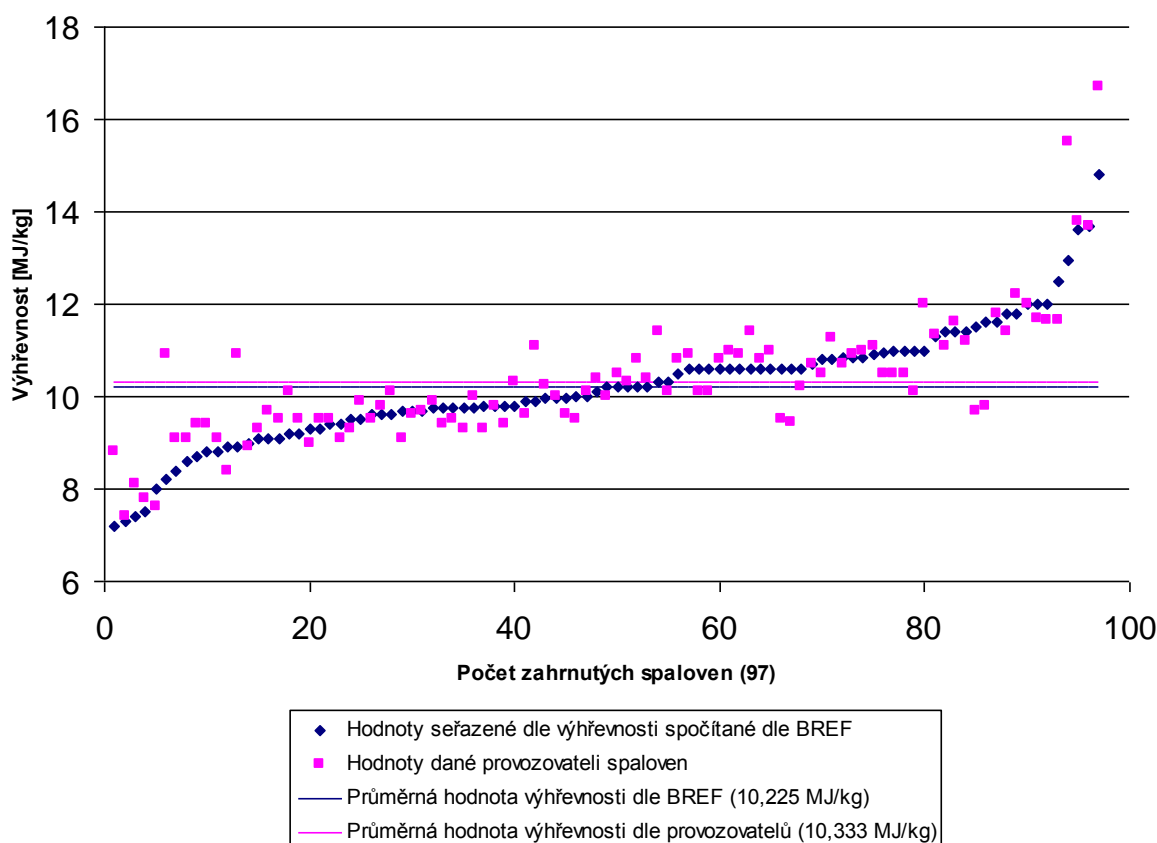
Uvedená kritéria je možné použít ke srovnání efektivity výroby energie ve spalovnách komunálních odpadů. V případě, že jsou spalovny brány jako moderní energetické zdroje, je však třeba mít postup, podle kterého je možné systémy waste-to-energy srovnat s ostatními moderními technologiemi založenými na kogenerační výrobě nebo využití jiných obnovitelných zdrojů energie, kterými je v podmínkách ČR především biomasa, což uvedená kritéria neumožňují. Kritéria nejsou použitelná pro hodnocení spaloven odpadů jako energetických zdrojů a ke kategorizaci zařízení pro energetické využití odpadů. Pomocí kritérií nejsou řešitelné např. otázky množství úspor PE ve srovnání s úsporami PE dosažených v jiných moderních technologiích, kterými jsou např. energetické zdroje spalující biomasu, kogenerační zařízení. Dále není řešitelná např. správnost limitních hodnot navržených pro kategorizaci spaloven s ohledem na potenciál jiných moderních technologií a možnost srovnání přínosu systémů WTE s přínosy jiných moderních systémů [10].

## 2.3 Hodnocení spaloven z hlediska efektivity výroby a využití uvolněné energie

V rámci sdružení provozovatelů spaloven odpadů v zemích EU (The Confederation of European Waste-to-Energy Plants, CEWEP) byla zpracována studie [18], ve které bylo hodnoceno 97 spaloven z hlediska efektivity výroby a využití uvolněné energie při spalování komunálních odpadů. Úhrnná zpracovatelská kapacita hodnocených spaloven byla 24 mil. t/r, což činí zhruba 50 % z celkového množství komunálních odpadů spalovaných v EU. Výsledky nejsou však dány do přímé souvislosti s technologickým řešením jednotlivých

spaloven, ale i přesto ukazují, že velkou část hodnocených provozoven je možné zařadit do skupiny efektivního energetického využívání odpadů (WTE) [9].

Výrobní ukazatele procesu jsou ovlivňovány základním parametrem, kterým je výhřevnost odpadu. Ve srovnání s fosilními palivy má TKO v průběhu roku značně nehomogenní složení. Pro TKO neexistují normativní postupy pro odběr vzorků ke zjišťování výhřevnosti jako pro fosilní paliva (ČSN 44 1304 [21]). Na výhřevnost TKO je zaměřena norma ČSN 06 3090 [22], kde jsou uvedeny výhřevnosti jednotlivých komponent TKO. Obsah komponent v TKO je však proměnlivý a nemůže být sledován, proto jsou údaje uvedené v této normě v provozním měřítku málo použitelné. Přesnějších hodnot výhřevnosti TKO se dosahuje zpětným výpočtem z výrobních ukazatelů konkrétní spalovny za určité období. Tento postup byl aplikován při zjišťování výhřevnosti TKO u 97 zařízení sdružených v CEWEP (Confederation of European Waste-to-Energy Plant), které byly uvedeny ve studii dr. Reimanna [20]. Průměrná hodnota byla vyčíslena na 10,3 GJ/t. Grafické znázornění zobrazuje Obr. 3. Složení TKO se v rámci jednotlivých regionů může lišit (geografie, životní úroveň), proto byla ve studii zpracována analýza podobným způsobem pro spalovnu TERMIZO a.s., Liberec, pro roky 2004 a 2005 [23], [24], [25], kde byla průměrná hodnota výhřevnosti TKO mezi 10,4 až 10,8 MJ/kg [26].



Obr. 3: Průměrná hodnota LHV u sledovaných zařízení v EU [20]

## 2.4 Výhřevnost odpadu

Po zvolení počátečních hodnot bylo pomocí výpočtu energetické bilance spalování odpadu zjištěno referenční výstupní složení spalin. Jednou z počátečních volených hodnot

je složení odpadu, z něhož je výpočtem zjištěna výhřevnost. V případě této práce jsou použity hodnoty uvedené v Tab. 3.

Složka hořlaviny	konc. složky $X_i$ [% hm.]
C	60,27
H	6,51
N	8,30
O (1)	24,82
S	0,05
Cl	0,05
<b>celkem</b>	<b>100,000</b>

Složky odpadu	[% hm.]
Hořlavina	43
Voda	22
Popeloviny	35
<b>celkem</b>	<b>100,000</b>

Tab. 3: Složení spalovaného odpadu

Pro spalné teplo a výhřevnost při spalování odpadů a biomasy, je vhodné použít vztah Institute of Gas Technology z roku 1990 (1) [27]. Pro informaci a porovnání byl výpočet proveden ještě pomocí dalších dvou vztahů, dle Channiwala z roku 1992 (2) [28] a dle Mendělejeva z roku 1897 (3) [27].

$$HHV_h [kJ/kg] = 341 \cdot C_h + 1322 \cdot H_h + 68,5 \cdot S_h - 120 \cdot (O_h - N_h) \quad (1)$$

$$HHV_h [MJ/kg] = 0,34591 \cdot C + 1,1783 \cdot H - 0,1034 \cdot O - 0,0211 \cdot A + 0,1005 \cdot S - 0,0151 \cdot N \quad (2)$$

$$HHV_h [kJ/kg] = 339 \cdot C_h + 1030 \cdot H_h + 109 \cdot (S_h - O_h) \quad (3)$$

Jednotlivá spalná tepla a výsledné výhřevnosti jsou uvedeny v Tab. 4. Pro přesnost výpočtů bylo nezbytné provést následně korekci o množství vodíku, reagujícího na halogenvodíky (4) a s kyslíkem na vodní páru (5), čímž se výhřevnost snížila o další přibližně 1 MJ/kg (záleží na množství vodíku a zvolené metodě), oproti spalnému teplu hořlaviny.

$$H_{h, \text{korig}} = H_h - \left( \frac{1,008}{35,453} \cdot Cl_h + \frac{1,008}{18,9984} \cdot F_h \right) \quad (4)$$

$$LHV = HHV_p \cdot (1 - A_p - W_p) - r_{H_2O} \cdot \left[ W_p + \frac{MW_{H_2O}}{MW_{H_2}} \cdot H_{h, \text{korig}} \cdot (1 - A_p - W_p) \right] \quad (5)$$

Z hodnot výhřevností a jejich odchylek (v uvedeném výpočtu jde o rozdíl okolo 1 MJ/kg) je patrné, že při výpočtech výhřevnosti odpadů, je nejvhodnější právě metoda IGT. Ve spalovně TERMIZO a.s., Liberec byla vypočítána průměrná výhřevnost 10,29 MJ/kg [24].

Metoda určení HHV	HHV <sub>p</sub> [kJ/kg]	HHV <sub>h</sub> [kJ/kg]	LHV [MJ/Kg]
IGT	27 179	11 687	10,5
Channiwala	25 832	11 108	10,0
Mendělejev	24 437	10 508	9,4

Tab. 4: Výhřevnost a spalná tepla odpadu podle alternativních empirických vztahů

## 2.5 Energetická bilance spalování

Výpočet energetické bilance je nutný k určení množství spalin a jejich složení. Při spalování dochází k oxidaci hořlavých složek paliva, při níž dochází k uvolnění značného energetického toku. Za ustálených podmínek lze zapsat bilanční rovnici spalování dle vztahu (6).

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} + Q_{abs} \quad (6)$$

Z této rovnice je patrné, že součet vstupních tepelných toků musí být stejný jako velikost výstupních tepelných toků. Významným parametrem v této rovnici je velikost tepelného toku absorbovaného u většiny spaloven komunálního odpadu trubkovým teplosměnným systémem, který se nachází ve spalovacím prostoru s pohyblivým roštem a je využíván k výrobě páry. Z analýzy provozu reálné spalovny lze odhadnout, že velikost tepelného toku absorbovaného teplosměnným systémem dosahuje 20 % z tepla uvolněného při spalování odpadů [29].

Rovnice pro vstupní energetické proudy lze zapsat pomocí vztahu (7) zahrnujícím veškeré vstupní tepelné toky.

$$\begin{aligned} \sum Q_{in} = & G_W \cdot LHV_W \cdot (1 - f_b) + V_{AW} \cdot i_{AW} + V_{ZP} \cdot (LHV_{ZP} + i_{ZP}) + V_{ZP} \cdot i_{ZP} + \\ & + V_{AZP} \cdot i_{AZP} + V_{AS} \cdot i_{AS1} \end{aligned} \quad (7)$$

Podobně lze zapsat rovnici pro výstupní tepelné toky (8).

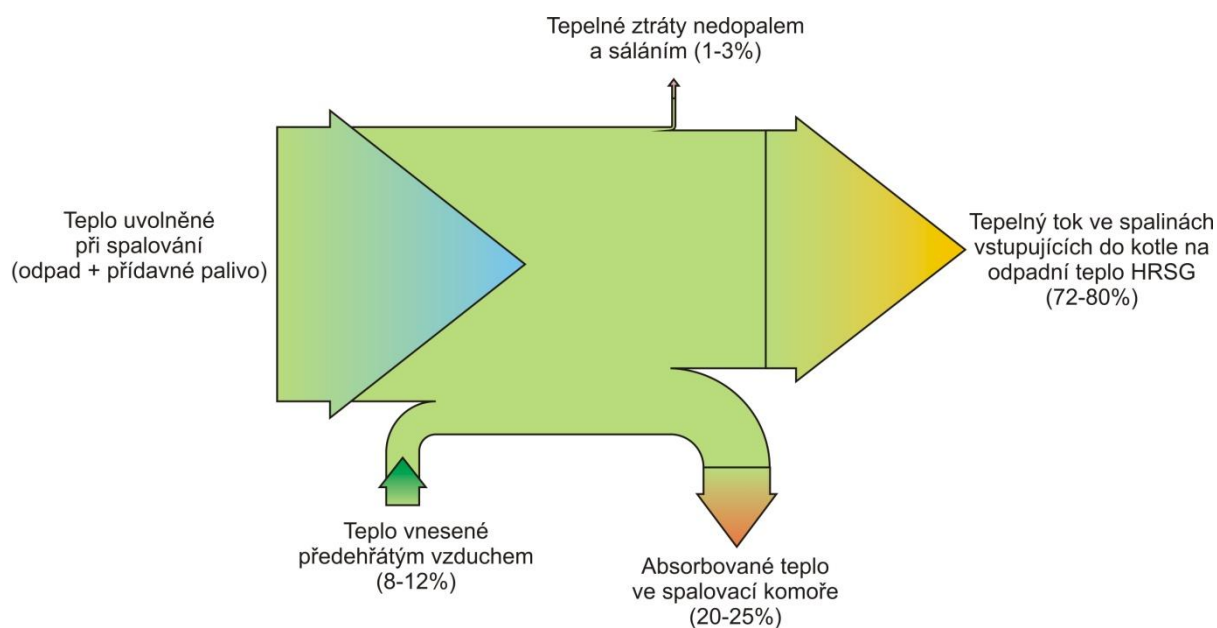
$$\sum Q_{out} = G_W \cdot s_W \cdot (1 - f_B) \cdot i_{SW} + V_{ZP} \cdot s_{ZP} \cdot i_{SZ} + V_{AS} \cdot i_{AS2} + G_r \cdot i_r + Q_{ztr} \quad (8)$$

Aby bylo možné vypočítat jednotlivé hodnoty v energetické bilanci, je nutné zvolit některé parametry. Zvolené parametry potřebné pro výpočet energetické bilance ve spalovací komoře jsou uvedeny v Tab. 5.

Množství spalovaného odpadu	12	[t/h]
Množství podpůrného paliva (ZP)	10	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]
Výhřevnost podpůrného paliva	36	[MJ/ m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
Tepelné ztráty spalovací komory	2	[GJ/h]
Nedopal hořlaviny obsažené v odpadu	1	[%]
Teplota spalovacího vzduchu	120	[°C]
Absorbované teplo teplosměnným systémem	26,07	[GJ/h]
Teplota výstupních spalin	900	[°C]

Tab. 5: Počáteční hodnoty jednotlivých podmínek pro energetickou bilanci

Vzhledem ke zvoleným parametrům je nutné určit podmínky spalování tak, aby byla teplota spalin na výstupu ze spalovací komory 900 °C. Při dodržení těchto parametrů lze upravovat podmínky spalování přebytkem spalovacího vzduchu. Z hlediska velmi malého přínosu tepelného toku některých složek v rovnicích (7) a (8) lze zanedbat množství přisávaného vzduchu pronikajícího do spalovací komory vlivem netěsností a množství energetického toku dodaného vstupní teplotou odpadu, čímž je možné zjednodušit celkový výpočet. Zjednodušené schéma energetické bilance je znázorněné na Obr. 4.



Obr. 4: Schéma energetických toků ve spalovací komoře

Výsledky bilance jsou uvedeny v Tab. 6 a lze odečíst spotřebu spalovacího vzduchu 74 690 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h. Toto množství odpovídá přebytku vzduchu 2,28 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/kg odpadu.

Proud	Měrná entalpie	Průtok	Vnesený/odvedený tepelný tok (GJ/h)	Vnesený/odvedený tepelný tok (MW)
<b>VSTUP</b>				
Entalpie ZP	24 (kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> )	10 (m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h)	0,00	0,00
Entalpie vzduchu	156 (kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> )	74690 (m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h)	11,64	3,23
Uvolněné teplo ZP	35591 (kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> )	10 (m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h)	0,36	0,10
Uvolněné teplo Odpad	10533 (kJ/kg)	12000 (kg/h)	125,14	34,76
<b>Celkem</b>			<b>137,14</b>	<b>38,09</b>
<b>VÝSTUP</b>				
Entalpie spalin	1329 (kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> )	80982 (m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h)	107,81	29,95
Absorb. Teplo			26,07	7,24
Nedopal			1,25	0,35
Tepelné ztráty SK			2,00	0,56
<b>Celkem</b>			<b>137,14</b>	<b>38,09</b>

Tab. 6: Energetická bilance jednotlivých energetických toků

Celý výpočet byl nasimulován v programu W2E [30], kde vyšlo výstupní množství spalin 81539 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h. Tento objem bude dále brán jako referenční a bude použit pro určení energetické náročnosti a účinnosti jednotlivých metod používaných v bloku čištění spalin, který slouží k odstraňování jednotlivých emisních látek za účelem splnění platných předpisů.

### 3 ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY VZNIKLÉ PŘI SPALOVÁNÍ ODPADŮ

Spalováním odpadů vzniká určité množství škodlivých látek, které je třeba ze spalin dále odstraňovat takovým způsobem, aby byly dodrženy platné předpisy a nedocházelo k úniku škodlivých látek do ovzduší. Tyto látky jsou kontinuálně nebo pravidelně jednorázově měřeny a lze je rozdělit na plynné znečišťující látky (PZL) a tuhé znečišťující látky (TZL).

Mezi kontinuálně měřené plynné znečišťující látky patří oxid uhelnatý (CO), oxidy síry (SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub>), oxidy dusíku NO<sub>x</sub> (NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>) a uhlovodíky. Do plynných znečišťujících látek měřených jednorázově v pravidelných časových intervalech patří halogenovodíky (HCl, HF, HBr) a persistentní organické látky (POP), kterým je věnována pozornost v této diplomové práci.

Mezi tuhé znečišťující látky řadíme emise prachových částic a těžkých kovů. Celkové emise tuhých znečišťujících látek jsou měřeny kontinuálně, ale měření obsahu jednotlivých těžkých kovů se obvykle provádí periodicky v časových intervalech. Výjimku tvoří některé spalovny v zahraničí, kde je měření kontinuálně i obsah rtuti.

Povolené denní průměrné emisní limity pro spalovny odpadů, dle platných zákonů, jsou uvedeny v následující tabulce Tab. 7.

Monitorovaná znečišťující látka		Maximální hodnoty dle vyhlášky 354/2002 Sb. [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
Kontinuálně monitorované emise	TZL	10
	TOC	10
	HCl	10
	HF	2
	SO <sub>2</sub>	50
	NO <sub>2</sub>	200
	CO	100
Jednorázově monitorované emise	Cd a Tl a jejich sloučeniny *	Σ0,05
	Hg a její sloučeniny *	0,05
	Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Ni, Mn, V a jejich sloučeniny *	Σ0,5
	Dioxiny a furany ** [ngTE/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	0,1
* Průměrná hodnota při odběru vzorků od 30 minut do 8 hodin ve smyslu legislativy ČR a EU		
** Průměrná hodnota při odběru vzorků od 6 do 8 hodin ve smyslu legislativy ČR a EU		

Tab. 7: Znečišťující látky a jejich maximální denní průměr v mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup> v suchém nosném plynu s obsahem 11 % O<sub>2</sub>. [31]

U kontinuálně monitorovaných emisí je nutné navíc splňovat maximální průměrné půlhodinové emisní limity. Maximální přípustné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 8.

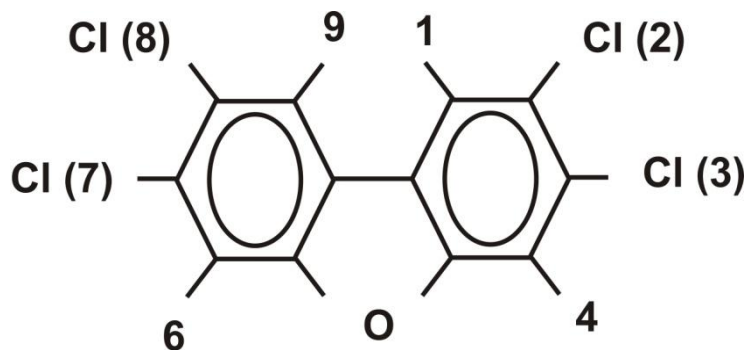
Monitorovaná znečišťující látka	Žádný z půlhodinových průměrů vzorků nesmí překročit tyto hodnoty [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	97 % průměrů půlhodinových vzorků musí splnit tento limit [mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
TZL	30	10
TOC	20	10
HCl	60	10
HF	4	2
SO <sub>2</sub>	200	50
NO <sub>2</sub>	400	200

Tab. 8: Maximální hodnoty půlhodinových průměrů u kontinuálně monitorovaných znečišťujících látek. [1]

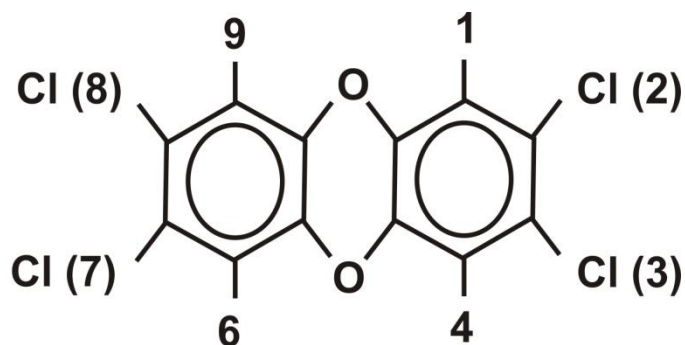
### 3.1 Charakteristika látek PCDD/F

Zjednodušený termín dioxiny je dnes běžně používán jak v odborné praxi, v ochraně životního prostředí, tak i v publikacích pro širokou veřejnost. Dioxiny spadají pod širší skupinu toxických organických látek s názvem persistentní organické polutanty (POP), která kromě dioxinů zahrnuje polycyklické aromatické sloučeniny (PAH) a polychlorované bifenyly (PCB). Celá skupina se vyznačuje toxicitou, perzistentností a bioakumulací, což znamená, že se jedná o nejedovatější látky s dlouhou dobou rozkladu a se schopností akumulace v tukových tkáních živočichů a v lidském organismu. Jsou velmi málo rozpustné ve vodě, málo těkavé, ochotně se sorbují na povrch pevných částic (vysoký koeficient K<sub>oc</sub>) a jen zvolna podléhají rozkladu. Tyto vlastnosti způsobují, že se nacházejí především v půdě, kalech a sedimentech, v rozpuštěné formě pak vzácně v povrchových či jiných vodách.

Pod název dioxiny je shrnuta skupina 210 chemických látek, které lze rozdělit na 2 skupiny s odbornými názvy polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDDs) a polychlorované dibenzo-furany (PCDFs), což jsou v různé míře chlorované tricyklické aromatické uhlovodíky. Do této skupiny látek patří 75 kongenerů PCDDs a 135 kongenerů PCDFs. Molekulární struktura těchto látek je zobrazena v následujících schématech Obr. 5 a Obr. 6 [32].



Obr. 5: 2,3,7,8 – tetrachlordibenzo-para-dioxin (TCDD) s relativní toxicitou 1, TEQ [32]



Obr. 6: 2,3,7,8 – tetrachlordibenzofuran (TCDF) [32]

Jednotlivé kongenery ze skupiny 210 sloučenin se od sebe liší počtem substituovaných atomů vodíků chlorem (1 až 8) a polohou atomů chloru na aromatických jádrech. Z této skupiny je toxických 17 kongenerů. Jedná se o kongenery, které jsou chlorované v polohách 2, 3, 7 a 8, případně dalších a jsou z toxikologického hlediska nejnebezpečnější a s tzv. koplanárními PCBs, které se vyznačují tím, že nemají žádný chlór v orto poloze. Tyto kongenery jsou zahrnuty do celkového toxikologického ekvivalentu TEQ. Za závažné z hlediska toxicity pak nejsou považovány PCDDs/Fs obsahující jeden až tři atomy chloru, což je zbývajících 193 kongenerů [33], [34], [35].

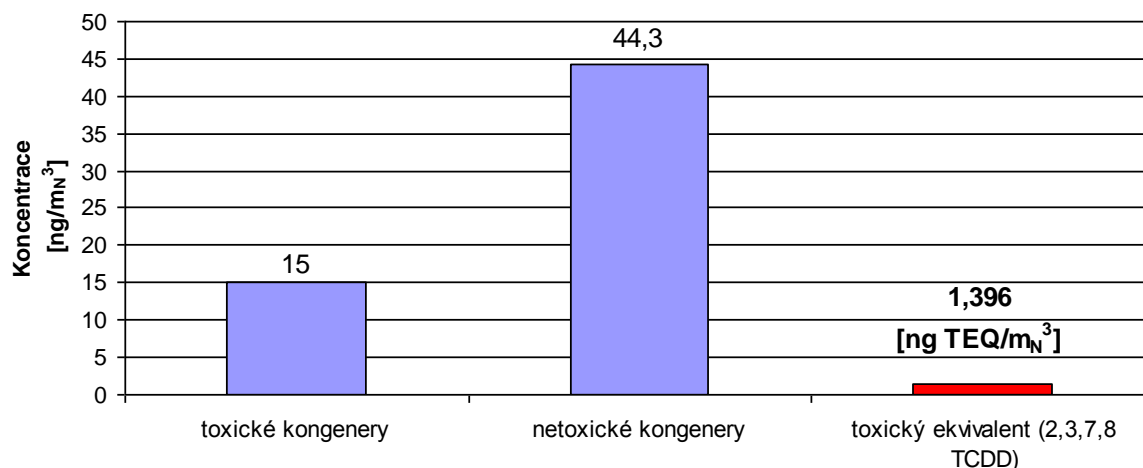
Toxicita kongenerů se výrazně liší, existují sloučeniny s vysokou toxicitou, ale i látky poměrně inaktivní. Toxicita je závislá na počtu a poloze atomů chloru v molekule. Ukazatelem toxicity jednotlivých dioxinů je tzv. toxický ekvivalent (I-TEQ), kterým je vyjádřena míra jedovatosti ve vztahu k dioxinu s nejvyšší toxicitou, jímž je TCDD (tetrachlordibenzo-p-dioxin). Dioxiny jsou přibližně sedmdesátkrát jedovatější než extrémně jedovatý kyanid draselný (KCN), který je známý jako jed cyankali. Relativní toxicita dioxidů je tabelována (Tab. 9) [1].

Kongener	Koeficient ekvivalentu toxicity [TE]	Kongener	Koeficient ekvivalentu toxicity [TE]
polychlorované dibenzo-dioxiny PCDD		polychlorované dibenzo-furany PCDF	
2, 3, 7, 8 TCDD	1	2, 3, 7, 8 TCDF	0,1
1, 2, 3, 7, 8 PeCDD	0,5	2, 3, 4, 7, 8 PeCDF	0,5
1, 2, 3, 4, 7, 8 HxCDD	0,1	1, 2, 3, 7, 8 PeCDF	0,05
1, 2, 3, 6, 7, 8 HxCDD	0,1	1, 2, 3, 4, 7, 8 HxCDF	0,1
1, 2, 3, 7, 8, 9 HxCDD	0,1	2, 3, 4, 6, 7, 8 HxCDF	0,1
1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 HpCDD	0,01	1, 2, 3, 6, 7, 8 HxCDF	0,1
OCDD	0,001	1, 2, 3, 7, 8, 9 HxCDF	0,1
		1, 2, 3, 4, 6, 7, 8 HpCDF	0,01
		1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 HpCDF	0,01
		OCDF	0,001

Tab. 9: Relativní toxicita dioxinů [1]

V celkovém množství toxických kongenerů tvoří podíl málo i vysoce toxické kongenery, což způsobuje, že celkové hmotnostní zastoupení všech kongenerů PCDD/F

nevyjadřuje úhrnnou toxicitu. Není tak možné reálně odhadnout zdravotní riziko pro lidský organismus. V exhalacích je pak výsledná hodnota obsahu dioxinů vyjádřena přepočtem zjištěných koncentrací na obsah 2,3,7,8-TCDD pomocí uvedených faktorů ekvivalentní toxicity. Množství toxických a netoxických kongenerů na výstupu z komína spalovny odpadů jsou zobrazena v grafu na Obr. 7 [32].



Obr. 7: Zastoupení toxických a netoxických kongenerů ve spalinách ze spalovny [32]

### 3.2 Historický pohled vzniku látek PCDD/F

V minulosti se nebezpečí číhajícímu v podobě dioxinů nepřikládal příliš velký význam a o jejich škodlivých účincích na živé organismy se zpočátku vědělo jen málo.

Historicky je rozsáhlejší kontaminace životního prostředí dioxiny spojená především s rozvojem výroby chloru. Chlor se začal ve velkém množství využívat po 2. světové válce. V minulosti byla považována za výhodu stabilita chloru, což ovšem způsobilo v delším časovém horizontu hromadění látek jako DDT, polychlorované bifenyly (PCB), dioxiny a freony především v půdě.

Dioxiny se do povědomí širší veřejnosti dostaly teprve v 70. letech minulého století ve spojení s válkou ve Vietnamu. Byl v ní použit postřikový prostředek Agent Orange, kontaminovaný právě dioxinem. Pravděpodobně se s ním do prostředí dostalo asi 170 kg dioxinu. Prostředek Agent Orange byl americkou armádou letecky rozprašován jako tzv. defoliant. Výhoda použití tohoto postřiku ve válečných konfliktech spočívala v tom, že po jeho aplikaci zůstala krajina úplně holá a jednotky nepřítele se neměly kam ukrýt. Tehdy se ovšem ještě nevědělo, že toxickými účinky byly zasaženy obě strany. Tyto účinky byly pozorovány až u válečných veteránů. Nejčastěji se u nich vyskytovala neplodnost, poškození jater a dokonce i rakovina.

Na našem území údajně došlo v 70. letech k vícenásobnému úniku dioxinů ve Spolaně Neratovice při výrobě pentachlorfenolu, který zde byl používán při výrobě chlorovaných pesticidů.

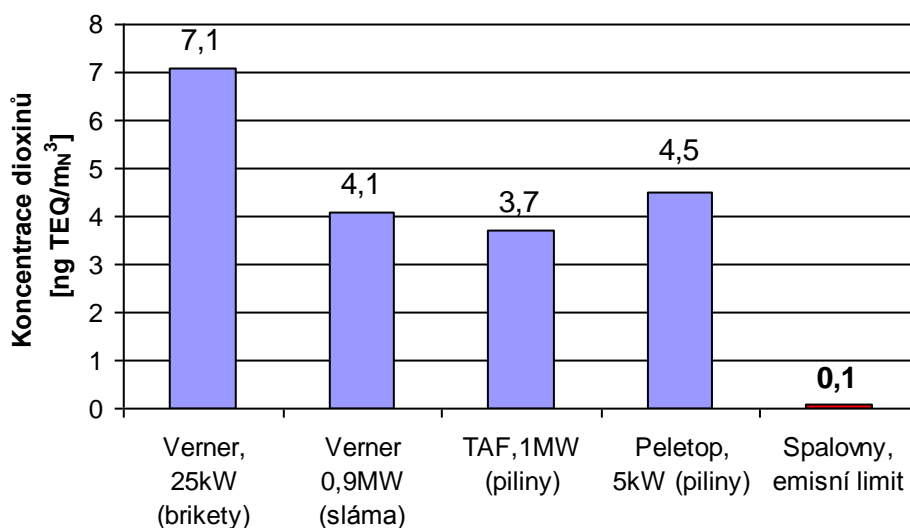
Zájem o dioxiny vzrostl v Evropě po havárii v chemickém závodě vyrábějícím prostředky na ochranu rostlin u italského Sevesu. V červnu 1976 zde explodoval reaktor na výrobu chlorovaných herbicidů. Mezi jedovatými párami, které unikly do ovzduší, bylo mimo jiné i množství dioxinů. V okolí uhynula většina drobných živočichů (ptáci, domácí zvířata). Havárie byla oficiálně přiznána až po čtrnácti dnech. Na následky intoxikace dodnes v této oblasti lidé umírají na rakovinu [35].

### 3.3 Vznik PCDD/F látek

Dioxiny tvoří součást prostředí od dávné minulosti. Již před tisíci lety vznikaly přírodními vlivy, jako jsou požáry a sopečné erupce. Později byl jejich vznik navíc podmíněn lidskou činností. Obecně lze říci, že zdrojem emisí dioxinů jsou všechny spalovací pochody, kterými je například výroba elektrické energie, vytápění domácností, doprava nebo termické zpracování odpadů.

V dnešní době jsou hlavními zdroji dioxinů spalovací procesy a chemický průmysl. K významným zdrojům dioxinů patří spalování odpadů obsahujících chlorované látky. Například spalování vysloužilé podlahové krytiny na bázi PVC a různých dalších předmětů z plastických hmot. Dioxiny vznikají také jako vedlejší produkty v chemické výrobě, kde je používán chlór (při výrobě pesticidů, PVC, bělení papíru chlórem apod.).

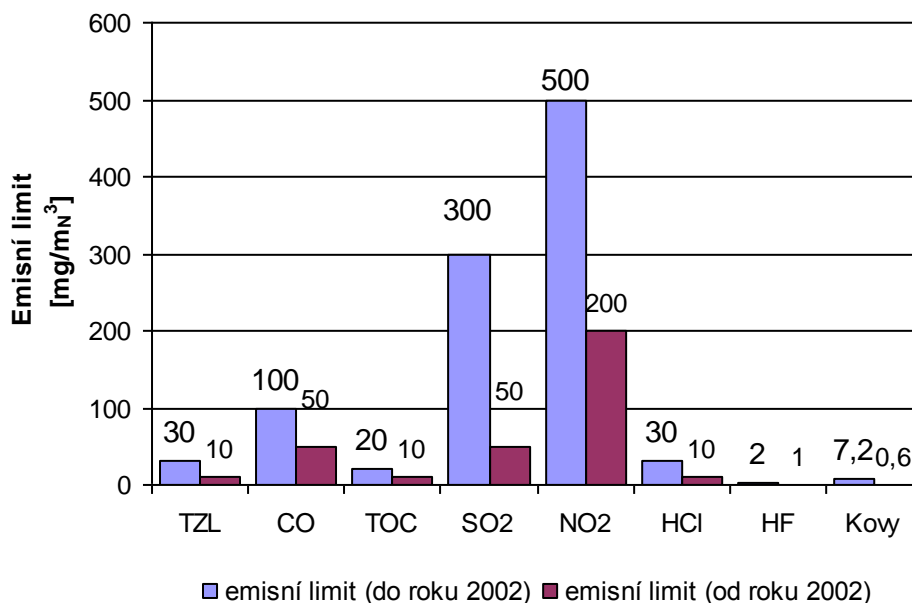
Byla provedena imisní měření, podle nichž by byl emisní limit platící pro dioxiny ze spaloven odpadů u malých zdrojů spalujících biomasu překročen 30 až 70 krát. Níže uvedený graf (Obr. 8) znázorňuje srovnání obsahu dioxinů ve spalinách z malých a středních zdrojů spalujících biomasu s povoleným obsahem dioxinů ve spalinách ze spaloven odpadů [32].



Obr. 8: Srovnání obsahu dioxinů ve spalinách z malých a středních zdrojů spalujících biomasu s povoleným obsahem dioxinů ve spalinách ze spaloven odpadů [33]

Při spalování odpadů se do exhalací dioxiny dostávají několika způsoby. Jedním z nich je nedokonalé spalování. Dioxiny jsou tepelně poměrně stabilní (zhruba do teploty 900 °C) a pokud je teplota spalování příliš nízká nebo při nedostatečné době zdržení ve spalovacím prostoru může dojít k jejich přechodu do spalin. Další způsob vzniku je z prekurzorů tvorby dioxinů, i když nejsou dioxiny ve spalovaném materiálu obsaženy, jejich vznik je možný reakcemi z určitých typů látek. Například spalováním PVC, které je považováno za tzv. prekurzor. Dioxiny jsou uvolňovány také syntézou de-novo při průchodu spalin technologickou linkou pro utilizaci tepla a čištění spalin, kdy dochází v aparátech pracujících nad teplotou 200 °C k částečné rekombinaci již rozložených dioxinů a jejich koncentrace se zvyšuje. Podíl dioxinů vzniklých takovým způsobem může výrazně překročit množství na vstupu do procesu spalování [34].

V rámci dnešní platné legislativy byl emisní limit pro dioxiny ze spaloven odpadů od roku 2002 stanoven nařízením vlády ČR č. 354/2002 Sb., při čemž byly značně zpřísněny požadavky především na emise těžkých kovů. Při porovnání maximálních možných koncentrací těžkého kovu (Hg), který je jedním z nejpřísněji sledovaných, s emisním limitem stanoveným pro dioxiny v koncových spalínách ze spaloven je jasné, že pro odstranění dioxinů jsou nastaveny mnohem přísnější požadavky. Přípustný podíl dioxinů je totiž 500krát nižší než u Hg [34]. Porovnání starých a nových emisních limitů ukazuje graf na Obr. 9.



Obr. 9: Požadavky na kvalitu spalín ze spaloven odpadů [34]

### 3.4 Nebezpečí v podobě PCDD/F látek

Jak již bylo výše uvedeno, dioxiny jsou látky nebezpečné i ve stopovém množství. Při požívání masa zasažených živočichů dochází ke kontaminaci potravních řetězců. Hlavní cesta je spojena s vodními ekosystémy a především rybím masem a tukem, které slouží jako potravina, a také jako přísada krmivových směsí pro hospodářská zvířata. Přes ně se pak dostávají do masa a mléka těchto zvířat. Další významný vstup do potravního řetězce je objemová píce hovězího dobytka, do níž se dioxiny dostávají depozicí z ovzduší [35].

Nejvíce kontaminované zdroje mezi potravinami a krmivy jsou rybí maso, tuk a moučka z oblasti Baltského a Severního moře. Obsah PCDDs/Fs je v těchto oblastech až 10 x vyšší než u ryb z jižní polokoule a Tichomoří.

Uvádí se, že na kilogram tělesné hmotnosti je tzv. "bezpečná dávka" pouze několik pikogramů. Denní limit příjmu dioxinů pro člověka je Světovou zdravotnickou organizací (WHO - World Health Organization) stanoven na 1-4 pg/kg váhy, z čehož plyne, že pro člověka s váhou 70 kg činí tzv. bezpečná dávka 70-280 pg. Z hlediska působení na lidský organismus a tím i nebezpečí vzniku onemocnění rakovinou, poruch imunity a genetického poškození organismu je tzv. bezpečná dávka relativní pojem, vzhledem k tomu, že reakce každého organismu na přítomnost dioxinů je individuální [35].

V dnešní době bylo nebezpečí v podobě dioxinů uznáno oficiálně. I když pro karcinogenní účinky dioxinů svědčily údaje již delší dobu, bylo až počátkem roku 2000

ze strany vedení National Toxicology Program při National Institute of Environmental Health Sciences USA oznámeno, že byl dioxin přeřazen z kategorie předpokládaných karcinogenů do kategorie látka se známými karcinogenními účinky na lidský organismus.

Hrozbou je v současnosti především zamořování životního prostředí dioxiny z malých zdrojů znečištění, kterými jsou rodinné domy vytápěné na tuhá paliva, starší vozidla či některé drobné podnikatelské aktivity. Problém takových zdrojů dioxinů spočívá v jejich nekontrolovatelnosti. Větší společnosti provozující zařízení, která produkují emise, jsou pod dnes již pod přísnou kontrolou a musí dodržovat poměrně přísné normy, dle kterých musí být vypouštění látek do ovzduší v souladu s úředním povolením (EIA, IPPC, emisní limity atd.). Při srovnání hmotnostní bilance vzniku dioxinů uvolněných během spalovacího procesu v zařízení k tomu určeným a v běžných domácích kamnech zjistíme, že ve druhém případě je množství vzniklých dioxinů o několik řádů vyšší [35].

## 4 TECHNOLOGIE ČIŠTĚNÍ SPALIN

Při procesu spalování vznikne velké množství škodlivých látek, které jsou odstraňovány v několika stupních. Velká část nežádoucích složek obsažených v popelovině je odstraněna přímo ve spalovací komoře. K dalšímu výraznému snížení obsahu škodlivých látek dochází v dohořovací komoře. Zde je usazována a odstraňována část popelovin, která sem byla transportována v proudu spalin ze spalovacího roštu, následně dochází k usazování popela vzniklého při dohořování. Pro dosažení potřebné čistoty spalin je tedy důležité přidat za kotel systém čištění spalin, který lze rozdělit do dvou skupin podle způsobu odstraňování nežádoucích látek. První skupinu tvoří mechanické systémy (elektrostatické filtry, tkaninové filtry) a druhou skupinou jsou chemické a fyzikálně-chemické způsoby (absorpce, adsorpce).

### 4.1 Proces spalování

Základem při opatřeních vedoucích ke snížení obsahu dioxinů ve spalinách, vznikajících spalováním odpadů, je zamezit jejich vzniku dodržováním předepsaného složení odpadu a podmínek jeho zneškodňování pomocí způsobu daného legislativou, který je uváděn pod zkratkou 3T (Temperature, Turbulence, Time):

- **temperature** (teplota) - pro průběh všech exotermních reakcí, které vedou k odstranění dioxinů, je třeba při jejich odbourání dodržení určité teploty
- **turbulence** - označuje dokonalejší promísení odpadu se spalovacím vzduchem, díky němuž je dosaženo vyšší efektivity
- **time** (čas) – doba potřebná pro úplný průběh reakcí, při dodržení dané teploty, při čemž je ovšem nutný dostatek kyslíku ve spalovací zóně.

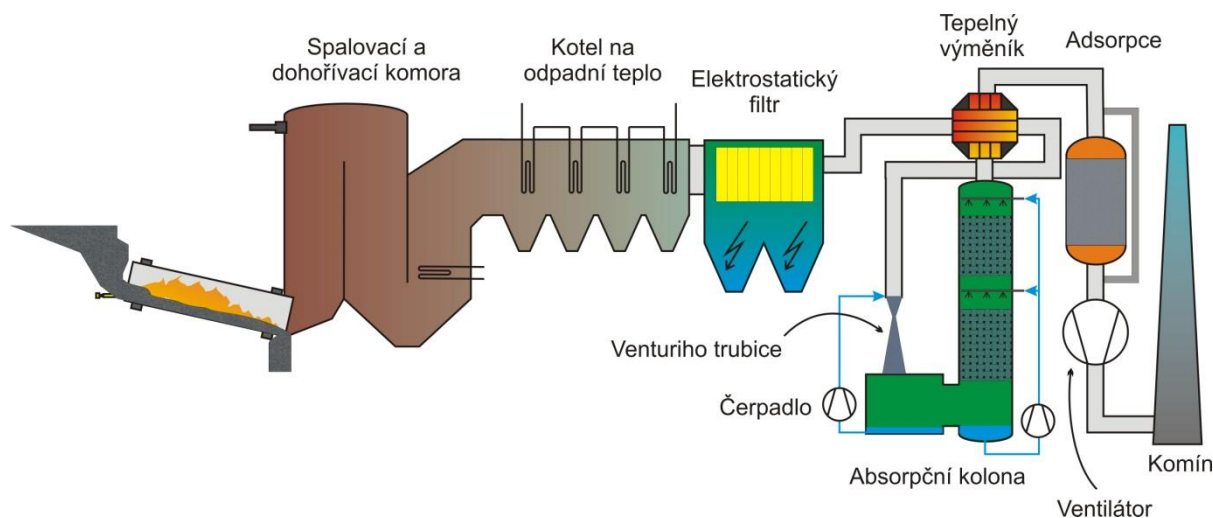
V níže uvedené tabulce (Tab. 10) jsou vyjmenovány produkty spalování spolu se škodlivými složkami, které spolu s nimi vznikají při procesu spalování, a je nutné jejich odstranění. V pravém sloupci jsou uvedeny běžně užívané způsoby odstraňování těchto škodlivých složek.

Produkt spalování	Způsob odstraňování
CO <sub>2</sub>	finální produkty spalování
H <sub>2</sub> O	
CO	režimem spalování
Popílek	mechanické čištění (filtrace)
SO <sub>2</sub>	chemické čištění (kontakt s alkalickými čidly)
HCl	
HF	
NO <sub>x</sub>	termický resp. Katalytický DENOX
Uhlovodíky, vč POP	režim spalování, adsorpce, rozklad
Těžké kovy	filtrace + chemické čištění

Tab. 10: Přehled produktů spalování a nejlepší způsob jejich odstranění

Ovšem ani dokonalý proces spalování nezamezí vzniku dioxinů, což je způsobeno mechanismem tvorby dioxinů, z čehož plyne, že je třeba použít další technologická opatření, která umožní odstranění dioxinů, tak aby byla dodržena platná legislativa. Skupina polychlorovaných dibenzodioxinů a polychlorovaných dibenzofuranů (PCDD/F), patřící k perzistentním organickým látkám, je jednou z nejvíce škodlivých a nežádoucích látek. Pro maximální zbytkový obsah látek skupiny PCDD/F je ve většině evropských zemí dán emisní limit  $0,1 \text{ ng TEQ/m}_N^3$ . Při spalování komunálních i průmyslových odpadů obsahují primárně vzniklé spaliny přibližně 1 až  $5 \text{ ng TEQ/m}_N^3$ , proto je nezbytné k vyčištění spalin před odvodem do atmosféry rozšířit technologie čištění spalin o postup, který by zajišťoval dosažení požadované kvality tohoto procesu [36].

Ve spalinách vzniklých ze spalovacích procesů se dioxiny a furany vyskytují v podobě dvou fází, kterými je plynná fáze a fáze absorbovaná na popílek, která tvoří převážnou většinu. Vzhledem k tomuto faktu se klade důraz na separační schopnosti zařízení, kterými je prach odstraňován, protože s vyšším stupněm odprášení spalin se také zvyšuje efekt odstranění dioxinů. Vhodnými zařízeními jsou elektrostatische odlučovače (ESP) a tkaninové filtry. Dioxiny v plynné fázi jsou nejčastěji odstraňovány adsorpčními metodami, kde je jako sorbent nejčastěji použit různý druh aktivního uhlí nebo hnědouhelného polokoksu. Aplikována bývá injektáž sorbentu do proudu spalin nebo adsorpční čištění průchodem pevným ložem sorbentu. Dalšími užívanými metodami pro odstraňování PCDD/F jsou rozkladné postupy, které probíhají v oxidačním prostředí za účinku selektivních katalyzátorů. Příklad možného uspořádání jednotlivých aparátů ve spalovně nebezpečných odpadů, je znázorněn na Obr. 10.



Obr. 10: Příklad uspořádání aparátů pro čištění spalin u spalovny nebezpečných odpadů [37]

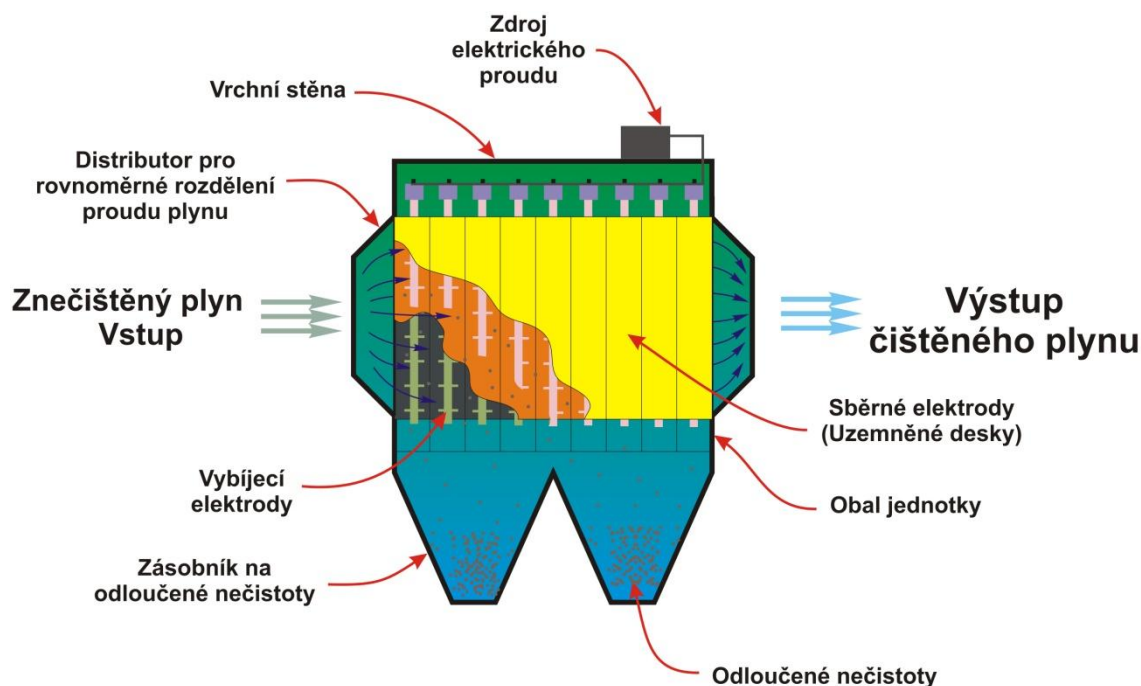
## 4.2 Mechanické čištění

### 4.2.1 Elektrostatische odlučovače (ESP)

Elektrostatický odlučovač je vhodný k odstraňování tuhých znečišťujících látek. Lze ho navrhnout pro použití až do teplot okolo  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , při nichž ovšem účinnost odstranění klesá. Optimální použití elektrostatischeho filtru je při teplotách okolo  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Čištění spalin probíhá ve třech fázích. V první fázi dochází k nabíjení částic pomocí iontů, ke kterému dochází slučováním částic s ionty za vzniku záporného náboje. Během druhé fáze se v elektrickém poli působením elektromagnetických sil tyto záporně nabitě částice usazují,

čímž dochází k jejich odstranění z proudu plynu. Ve třetí fázi jsou odstraněny usazené nečistoty pomocí kapaliny při mokřém způsobu čištění nebo pomocí oklepání z elektrod.

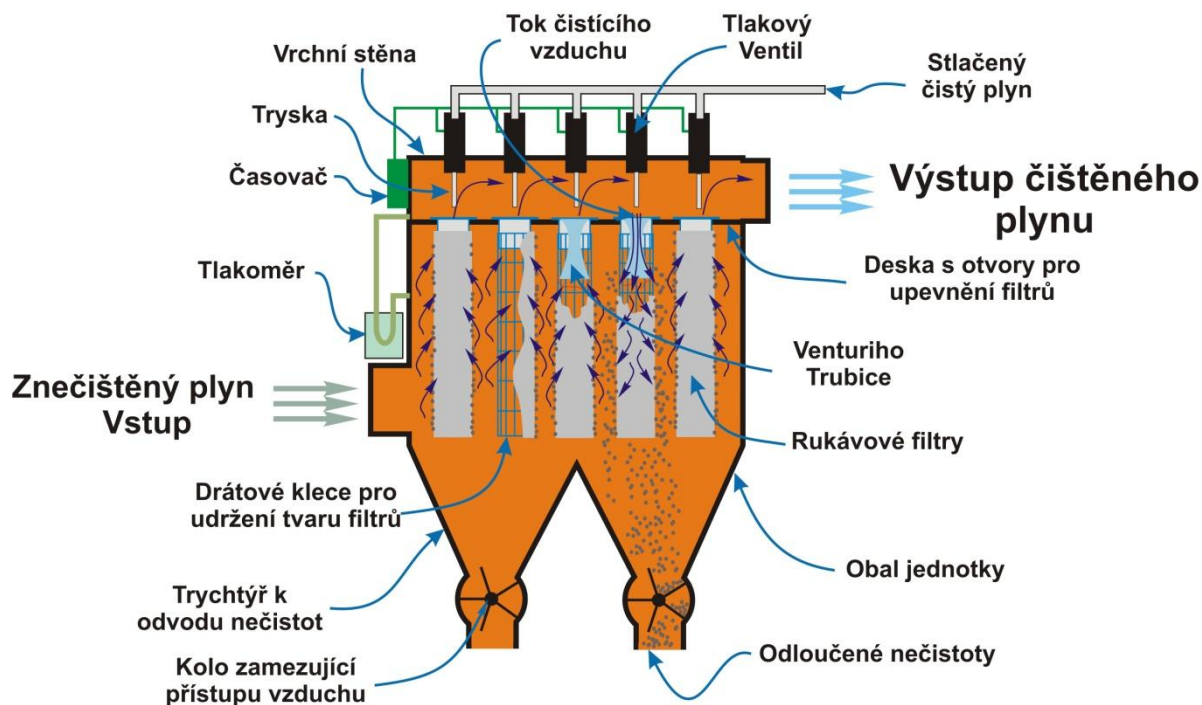
V průběhu jednotlivých fází nejprve částice získávají svůj náboj průchodem přes pole plyných iontů okolo vybíjecích elektrod. Ionty se na částice naváží a tím získají částice náboj, čímž jsou následně přitahovány elektrostatickým polem k uzemněným elektrodám. Elektrický potenciál mezi elektrodami se pohybuje okolo 20 kV [38]. Po dotyku s uzemněnou elektrodou se na ni usadí a ztratí svůj náboj. V závěru jsou pak částice odstraněny z elektrod buď oklepáním, nebo v případě mokrého elektrostatického filtru vyprány kapalinou. Elektrostatický filtr je zobrazen na Obr. 11.



Obr. 11: Elektrostatický filtr [38]

#### 4.2.2 Tkaninové filtry

Tkaninové filtry, označované někdy jako rukávové neboli rukávcové filtry (Obr. 12), jsou používány, stejně jako elektrostatické filtry, k odstraňování tuhých látek. Filtr se skládá z kovové konstrukce (plášť filtru), oddělovacího plechu (oddělení vstupního a výstupního proudu) s drátovým košem (udržení tvaru látkového rukávu) a filtrační látky, která je nejdůležitější částí celého filtru. Filtrační látka vytváří rozhraní mezi čistým a znečištěným plynem. Na rozdíl od plynu, který skrze látku projde, jsou na této látce zachytávány tuhé znečišťující látky z plynu. Těmito tuhými částicemi je filtr postupně zanášen a zvyšuje se tlaková ztráta celého filtru, proto je nutné v určitých časových intervalech látku čistit. K čištění se používá oklepávání nebo pulzní čištění tlakem vzduchu. Při oklepávání jsou rukávy připevněny na pohyblivý mechanismus, který trhavým pohybem oklepává z látky nečistoty. Ve spalovnách odpadů se ve většině případů používá tlakové čištění. U tlakového čištění je množstvím trysek vhaněný čistý vzduch v opačném směru, než probíhá čištění a tím oprašuje látku od nečistot. Při procesu čištění je odprašovaná komora odpojována od tahu ventilátoru, aby se odloučené nečistoty vlivem podtlaku opět nezachytily na rukávu filtru.

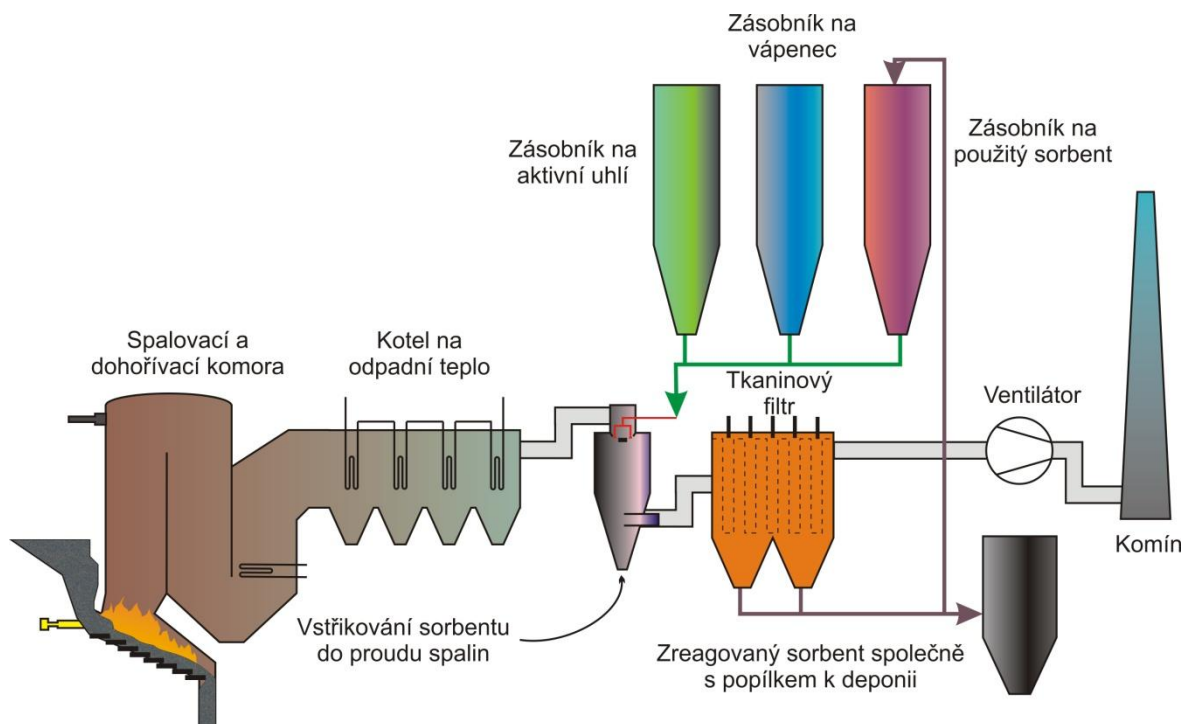


Obr. 12: Tkaninový filtr s pulzními tryskami pro čištění od usazených nečistot [38]

## 4.3 Chemické čištění

### 4.3.1 Adsorpční metody

Mezi používané adsorpční metody patří dávkování práškového aktivního uhlí (PAC) do proudu spalin (společně s jemně mletým vápencem atd.), kdy na povrchu aktivního uhlí dochází k záchytu nežádoucích složek a kyselá složky ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ) jsou navázány na alkalickou příměs. Sorbent rozptýlený ve spalinách se zachytí na povrchu tkaninového filtru, čímž vznikne vrstvička sorbentu, na níž jsou pak dokončeny reakce, kterými jsou odstraněny požadované složky spalin. Poté následuje periodické odstranění zachycené vrstvy nečistot tlakovým pulsem. Aktivní uhlí se přidává v množství asi  $50$  až  $100 \text{ mg/m}_N^3$ , ale alkalický sorbent se přidává v mírně nadstechiometrickém množství vůči kyselým složkám ve spalinách. Provozní teplota je udržována nad rosným bodem (cca  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ), maximálně  $220 \text{ }^\circ\text{C}$ . Adsorpčním čištěním spalin je způsobeno snížení koncentrace dioxinů ve spalinách. Jako adsorbent bylo použito aktivní uhlí (89 % vápno + 11% AC – active carbon tzv. SORBALIT) [39]. Aktivní uhlí je dávkované spolu s vápennou suspenzí v technologické části mokrého čištění spalin a následně rozprašováno v rozprašovací komoře [40]. Povrch aktivního uhlí slouží k záchytu nežádoucích vysokomolekulárních složek (polyaromatických sloučenin, dioxinů apod.) a také těžkých kovů (především rtuti) [36]. Schéma celého zařízení je znázorněno na Obr. 13.



Obr. 13: Adsorpční metody čištění spalin

Existuje celá řada různých výrobců sorbentů, které mají různé vlastnosti a používají se s jinými činidly. V Tab. 11 je uvedeno srovnání sorbentů, které byly experimentálně testovány v některých spalovnách v České a Slovenské republice.

V případě, kdy je použit sorbent na bázi aktivního uhlí, existuje nebezpečí vzniku horkých center v zásobnících sorbentu i filtru a jsou proto nutná ochranná opatření. Pro tento způsob odstraňování je typické, že se dioxiny pouze zachytí na sorbentu, ale nejsou zlikvidovány.

Spalovna		SAKO Brno			OLO Bratislava		DEKONTA Trmice			Rumpold Strakonice	
Spalovaný odpad		KO+jiný energetický odpad			KO+jiný energ.odpad		Zvláště nebezp. odpad			nemocniční a zvláště nebezpečný	
Zpracovatelský výkon	t/h	12	12,9	15	8	8	0,9	0,98	0,95	0,24	0,24
Produkce spalin (suché)	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h	99900	98880	108850	49980	50100	6800	6700	6400	2000	2000
měrná tvorba suchých spalin	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /kg	8,33	7,67	7,26	6,25	6,26	7,56	6,84	6,74	8,33	8,33
způsob chemického čištění		polosuchý			polosuchý		mokřý			suchý	
chemické činidlo		Ca(OH) <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O			Ca(OH) <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O		NaOH+H <sub>2</sub> O			NaHCO <sub>3</sub> +Ca(OH) <sub>2</sub>	
typ adsorbentu		SILCARBON	FLUESORB	CHEZACARB	Rheinbraun	CHEZACARB	ELBAR	NORIT	CHEZACARB	NORIT	CHEZACARB
spotřeba aktivního uhlí	g/(10 <sup>3</sup> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> )	90	98	64	154	58	380	220	80	200	100
Koncentrace PCDD/F: vstup	ngTEQ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	3,96	4,05	3,6	1,44	1,44	2,4	2,4	2,4	3,46	3,46
výstup		0,53	0,23	0,0032	0,055	0,005	0,072	0,048	0,0098	0,055	0,0084
účinnost odstranění PCDD/F	%	86,6	94,3	99,2	96,1	99,6	97,0	98,0	99,5	96,1	99,6

Tab. 11: Typické pracovní podmínky bloku čištění a účinnost odstraňování PCDD/F při použití různých adsorbentů na vybraných spalovnách komunálního a nebezpečného odpadu [41]

## 4.4 Odstraňování POP

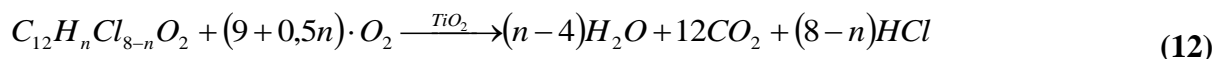
### 4.4.1 Metoda katalytické oxidace dioxinů

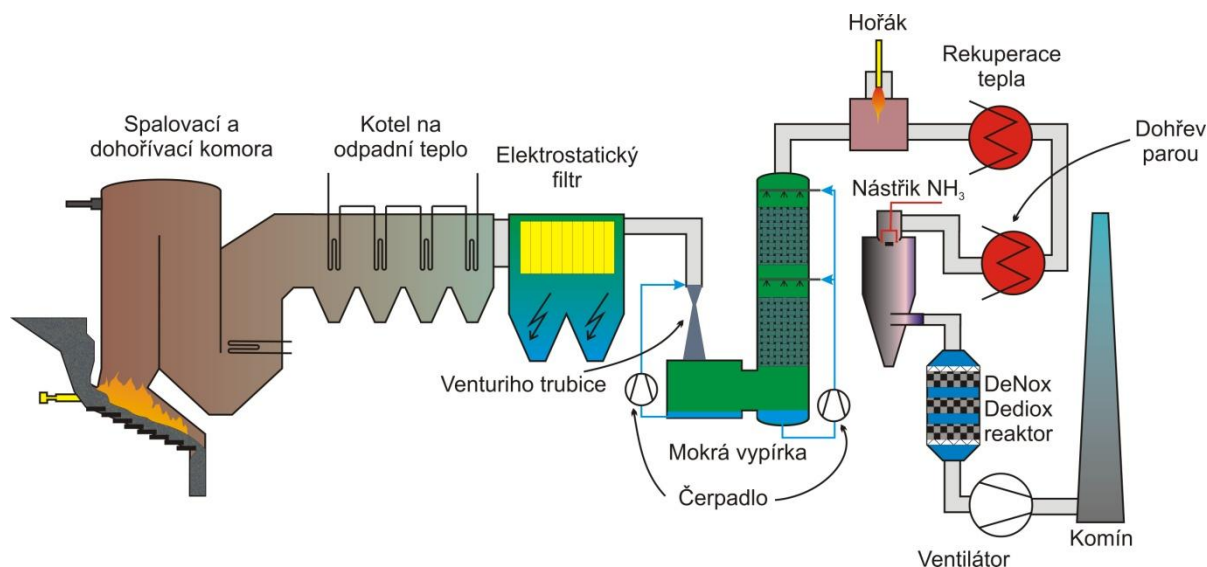
Základem této metody je katalytický blok, v němž jsou použity jeden nebo dva typy katalyzátorů. Na katalyzátorech pak probíhají reakce, které mají za následek odstranění nežádoucích složek. Běžně jsou v praxi kombinovány dvě technologie. Kombinace selektivní katalytické redukce NO<sub>x</sub> a odstranění dioxinů (DeNO<sub>x</sub>/DeDiox). Množství vzniklého HCl jsou stopová, proto není potřebné další čištění. Pro odstraňování dioxinů a furanů se používá katalyzátor na bázi TiO<sub>2</sub> a reakce probíhá dle stechiometrických rovnic (9) a (10). Pro odstraňování NO<sub>x</sub> se používá jako katalyzátor čpavek (11).



Nevýhoda této metody katalytického způsobu odstranění NO<sub>x</sub> a dioxinů spočívá v citlivosti katalyzátoru na katalytické jedy. Ty mohou způsobit deaktivaci katalyzátoru a tím snížit dobu jeho životnosti. Z těchto důvodů je ve většině případů katalytický stupeň zařazen až za mokrou vypírku (Obr. 14). Jedna z výjimek je provozována ve spalovně ZEVO Praha - Malešice, kde je zařazen katalytický stupeň před mokré čištění spalin. Toto řešení má za následek nižší životnost katalyzátoru z důvodu většího množství zanášení filtru. Provozní teplota reaktoru katalytické konverze se pohybuje v rozmezí 250 až 380 °C a teplota za pračkou spalin je přibližně 50 až 60 °C. Dohřev spalin je většinou realizován ve třech etapách. Prvním krokem může být například použití tzv. tunelového hořáku spalujícího zemní plyn, přičemž smíchání vzniklých spalin s proudem čistěných plynů vede k rychlému zvýšení teploty nad rosný bod. K dalšímu ohřátí slouží rekuperační výměník a parní ohřívák. Popsaný ohřev však vyžaduje další spotřebu přídavného paliva. Nová zařízení k ohřevu spalin způsobují vyšší tlakovou ztrátu a tím také vyšší příkon spalinových ventilátorů.

Katalytický rozklad probíhající současně s katalytickou redukcí oxidů dusíku (SCR) účinkem amoniaku se jeví jako účinné řešení při odstraňování dioxinů [42]. Je možné jej vyjádřit dle stechiometrických rovnic (11) a (12):





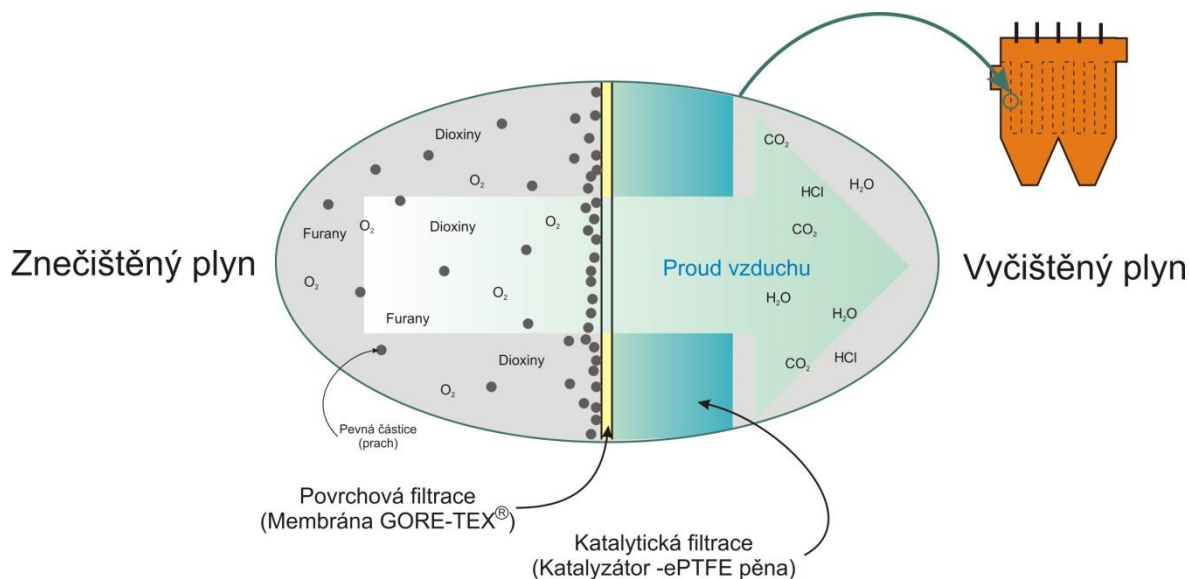
Obr. 14: Katalytická oxidace dioxinů

#### 4.4.2 Katalytická filtrace

Katalytická filtrace je založena na principu použití nového filtračního materiálu pro filtraci realizovanou v látkovém (rukávovém) filtru. Filtrační materiál je složen ze dvou základních prvků. Prvním stavebním prvkem je membrána z expandovaného polytetrafluoretylénu (ePTFE) GORE-TEX® a druhý prvek je tvořen katalytickým substrátem na bázi  $V_2O_5$  a  $TiO_2$ . Průchod spalin přes filtrační tkaninu způsobí nejprve povrchovou filtraci, která na povrchu membrány způsobí odstranění tuhých částic. Společně s nimi jsou odstraněny další látky, které jsou na tyto částice navázané. Takto odprášené spaliny dále proudí přes katalytický substrát. Tento substrát reaguje chemicky s molekulami PCDD/F a způsobuje rozklad na minimální množství  $CO_2$ ,  $H_2O$  a  $HCl$ . Filtrační plocha rukávců je periodicky regenerována pulsním způsobem a odseparovaný popílek je akumulován ve výsypce filtru. Teplotní rozmezí, ve kterém pracuje katalytický filtr, se pohybuje v rozmezí cca  $180\text{ }^{\circ}C$  až  $260\text{ }^{\circ}C$ . Účinnost odstranění dioxinů touto metodou dosahuje až 99 %. Velkou výhodou představuje malá náročnost rekonstrukce stávajícího zařízení spalovny. Je třeba pouze vyměnit filtrační materiál hadic stávajícího látkového filtru. Ve srovnání s metodou katalytické oxidace dioxinů je zachována technologie selektivní nekatalytické redukce oxidů dusíku (SNCR), dále technologie REMEDIA™ D/F nevyžaduje zpětný ohřev spalin, což způsobuje jen mírné zvýšení tlakových ztrát v bloku čištění spalin (asi o 1 až 2 kPa). To představuje mnohem menší ztráty než v případě DeNOx/DeDiox. Vítaným je také nižší nárůst provozních nákladů ve srovnání s technologií DeNOx/DeDiox (cca o 40 až 60 %), praktická bezobslužnost dioxinového filtru a zvýšená účinnost zachytu jemných prachových částic (pod  $2.5\text{ }\mu m$ ).

Princip metody REMEDIA™ D/F je znázorněn na Obr. 15 a byl poprvé použit ve spalovně komunálních odpadů v Belgii v roce 1998 a je až do současnosti provozován bez významnější ztráty aktivity. V našich podmínkách je tato technologie užívána ve spalovně komunálních odpadů TERMIZO a.s., Liberec, kde je díky jejímu použití, ve srovnání s hodnotami stanovenými českými a evropskými normami, dosahováno 1,5 až 7 násobně nižších hodnot PCDD/F v koncových spalinách. Výhodou této metody je zařazení tohoto procesu za ESP, což je ekonomicky výhodnější ve srovnání s klasickým katalyzátorem. Provozní teplota uvedeného procesu se pohybuje mezi  $250$  až  $300\text{ }^{\circ}C$ , ale díky chemické

agresivitě spalin, které sem vstupují jen částečně předčištěné, se řadí často na konec systému čištění spalin. Spaliny se musí z teploty kolem 65 °C zpětně ohřívat [31].



Obr. 15: Katalytická oxidace dioxinů [34]

#### 4.4.3 Jiné metody snižování POP

Jinými metodami, které je možné použít ke snižování emisí perzistentních látek vzniklých spalováním odpadů je např. Adiox, 4D filtrace, vstřikování hydroxidu vápenatého, vstřikování inhibitorů (etanolamíny, amoniak), vstřikování oxidačních činidel (např. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

##### Metoda ADIOX®

Jedná se o metodu pro snížení koncentrace dioxinů nebo jejich úplné odstranění, která je zatím pouze ve fázi zkoumání v laboratořích, případně ve fázi začínající aplikace do provozu spaloven. Použití metody ADIOX®, kterou vyvinula švédská firma Gotaverken Mirjo AB, bylo ve spalovnách odpadů zahájeno ve skandinávských zemích od roku 2001. Metoda je založena na principu adsorpce dioxinů na povrch plastů či gumy. Adsorpční lož je složeno ze směsi aktivního uhlí a materiálu ADIOX® (polypropylén) a je uloženo v aparátu mokré vypírky nebo v samostatném absorbéru [44], [45]. Možnost způsobu uspořádání bloku čištění spalin se zakomponovaným procesem ADIOX® je znázorněno na Obr. 16 [36].

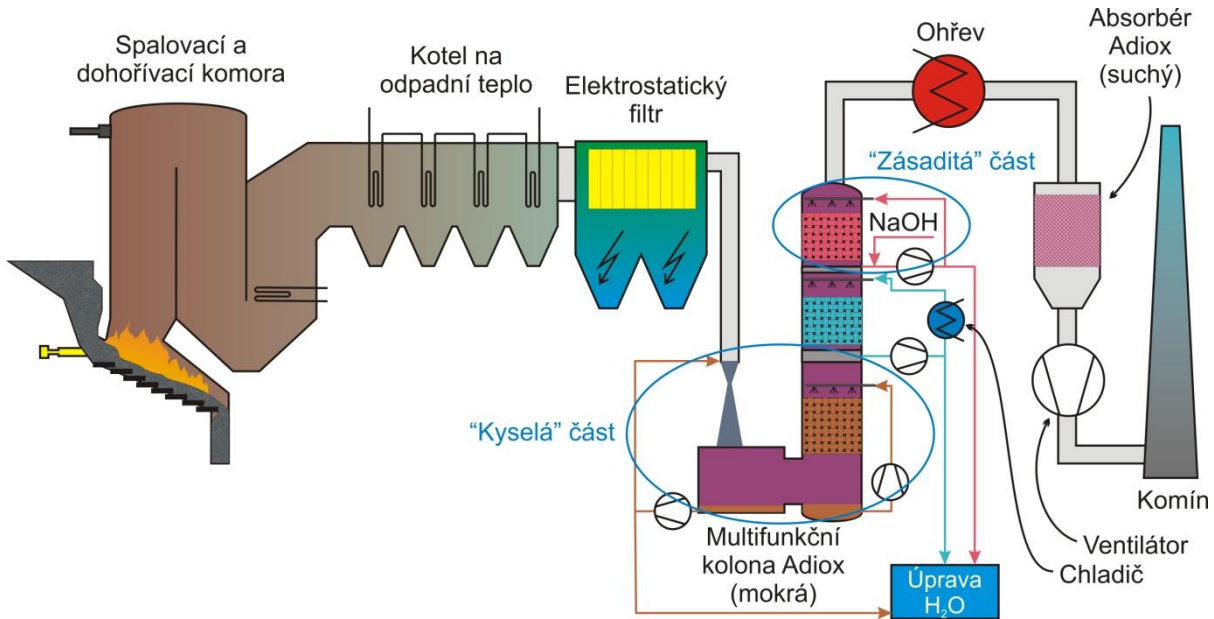
##### 4D filtrace

Pojmem „4D filtrace“ je označována technologie využívající keramické filtrační elementy CERAFIL® TOPKAT, kterou je možné použít k odstraňování 4 druhů znečišťujících látek:

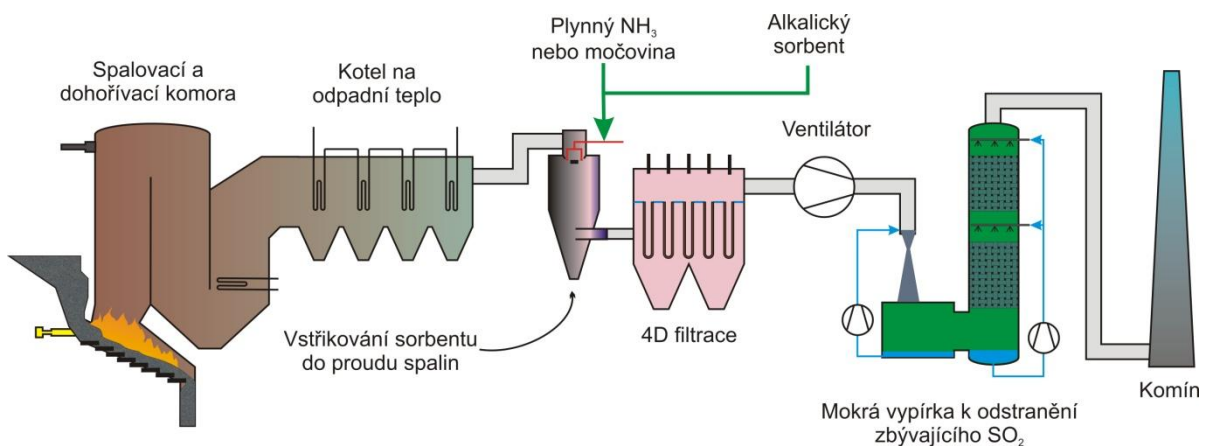
- TZL
- PCDD/F
- Kyselé složky (HCl, HF, SO<sub>2</sub>)
- NO<sub>x</sub>

Vzhledem k tomu, že filtrační systém je tvořen z dutého válce vyrobeného z porézní keramiky s katalyzátorem, je možné odstraňovat TZL a umožňuje také katalytický rozklad

PCDD/F, stejný jako u metody REMEDIA™ D/F. Výhodou oproti REMEDIA™ D/F, kde je katalyzátor nanesen na tkaninu, je větší plocha katalyzátoru díky rozprostření částic v porézní keramice o síle stěny 10-20 mm. Kromě výše zmíněných TZL a PCDD/F je díky použití katalyzátoru na bázi  $\text{TiO}_2/\text{V}_2\text{O}_5$  možné katalytické odstraňování  $\text{NO}_x$  při nástřiku  $\text{NH}_3$  nebo močoviny před tento filtr. Poměr  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  by měl být větší než 0,96. Další možností využití tohoto filtru je záchyt kyselých složek ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$ ) ve spalinách, při čemž je nutné dávkovat alkalické činidlo před filtr. Jako činidlo se používá  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , nebo  $\text{NaHCO}_3$ . Technologické schéma spalovny s použitím 4D filtrace je znázorněné na Obr. 17 [46].



Obr. 16: Metoda ADIOX



Obr. 17: Technologické schéma spalovny odpadů s technologií 4D filtrace [46]

## 5 ENERGETICKÁ NÁROČNOST PROCESU ČIŠTĚNÍ SPALIN

V následujících kapitolách jsou popsány principy fungování jednotlivých technologií a je porovnána jejich energetická náročnost. Pro srovnání byly vybrány 3 různé typy technologií využívaných k čištění spalin:

- S mokrou vypírkou + SNCR
- DeNO<sub>x</sub>/DeDiox před mokrým čištěním spalin
- DeNO<sub>x</sub>/DeDiox za mokrým čištěním spalin.

Pro porovnání jejich energetické náročnosti bylo použito množství a složení spalin z výpočtů uvedených v kapitole 2.5. Za účelem porovnání energetické spotřeby technologií byly provedeny výpočty pro jednotlivé části každé technologie, při čemž byl kladen hlavní důraz na jejich vliv na snížení výroby energie a zisk z produkovaných energií.

### 5.1 Popis porovnávaných technologií

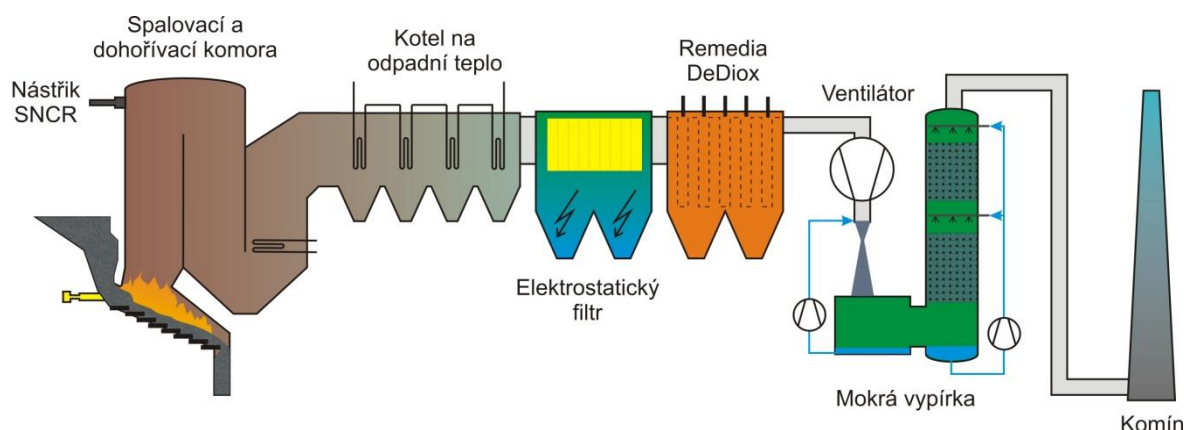
Pro každou technologii je uvedeno technologické uspořádání způsobu čištění spalin, popsán účel jednotlivých bloků a zvoleny přibližné teploty na jejich výstupu. Za účelem srovnání různých metod v předložené práci byly z množství používaných technologií k čištění spalin vybrány 3 technologie.

#### 5.1.1 Technologie s mokrou vypírkou + SNCR (Alternativa I)

Čištění spalin je při alternativě I prováděno následující posloupností operací:

**SNCR - mechanické čištění v ESP – katalytická filtrace – chemické čištění**

Uspořádání technologické linky pro tuto alternativu je znázorněno na Obr. 18.



Obr. 18: Schéma technologie čištění spalin s mokrou vypírkou + SNCR

Uvedená technologie je využívána ve spalovně komunálního odpadu TERMIZO a.s., Liberec. Proces čištění spalin je založen na selektivní nekatalytické redukci NO<sub>x</sub> (SNCR), kde je čpavková voda potřebná pro reakci NO<sub>x</sub> nastříkovaná při teplotě cca 900 až 1000 °C

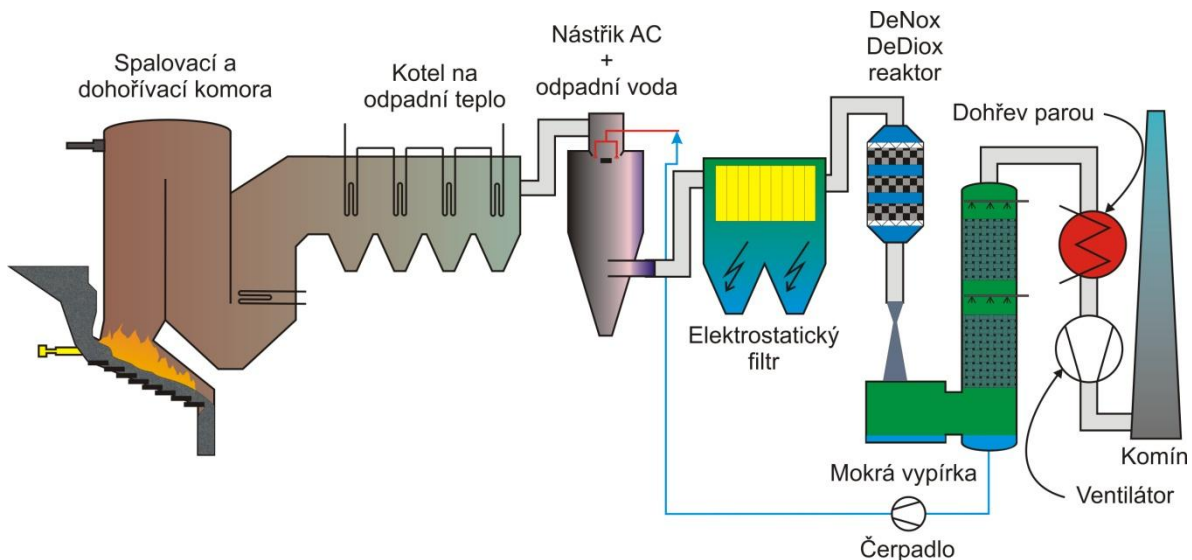
do prostoru sekundární spalovací komory. Za sekundární spalovací komorou a kotlem, kde dosahuje teplota spalin přibližně 250 °C, je umístěn elektrostatický odlučovač (ESP) pro odstranění TZL, za nímž je umístěn tzv. dioxinový filtr (REMEDIA D/F™), pro jehož funkci je potřebná teplota cca 200 až 230 °C. Dioxinový filtr, za nímž je teplota cca 200 °C, slouží ke snižování obsahu TZL a PCDD/F. Po tomto procesu následuje absorpční čištění kontaktem spalin s absorpčními roztoky s odlišnou kyselostí, čímž dochází k absorpci kyselých složek (SO<sub>2</sub>, HCl, HF) a oxidů těžkých kovů. Alkalita absorpčního roztoku je upravována roztokem NaOH. Na výstupu z mokré vypírky do komína, kterým vystupují spaliny do atmosféry, dosahuje teplota spalin kolem 60 °C.

### 5.1.2 Technologie DeNOx/DeDiox před mokrým čištěním spalin (Alternativa II)

Čištění spalin je při alternativě II prováděno následující posloupností operací:

#### Nástřik AC a odpadní vody v odpařovací komoře - mechanické čištění v ESP – katalytická oxidace dioxinů – chemické čištění

Uspořádání technologické linky pro tuto alternativu je znázorněno na Obr. 19.



Obr. 19: Schéma technologie DeNOx/DeDiox před mokrým čištěním spalin

Uvedená technologie je částečně využívána v zrekonstruované spalovně komunálního odpadu ZEVO Praha-Malešice. Tato technologie se skládá ze spalovací komory, kde dochází ke spalování odpadu a dohořivací komory. Spaliny jsou vedeny do kotle na odpadní teplo, kde je využito jejich tepelného obsahu k výrobě přehřáté páry, která se pak uplatňuje dále v procesu. Při hodnocení této varianty byla volena teplota spalin vystupujících z kotle ve výši 350 °C, provozní výsledky ukazují, že k odpaření vznikajících odpadních vod postačuje teplota spalin již na úrovni asi 300 °C. V odpařovací koloně dojde dávkováním odpadní vody z mokré vypírky s aktivním uhlím (AC) ke snížení teploty spalin na cca 250 °C. Za odpařovací kolonou je umístěn elektrostatický odlučovač (ESP) pro zachytávání TZL, za nímž při vstupu do reaktoru SCR (DeNOx/DeDiox) teplota spalin dosahuje cca 230 °C. V reaktoru probíhá selektivní katalytická redukce NOx a rozklad PCDD/F a při výstupu z reaktoru dosahuje teplota spalin cca 200 °C. Na konci technologie je umístěna mokrá

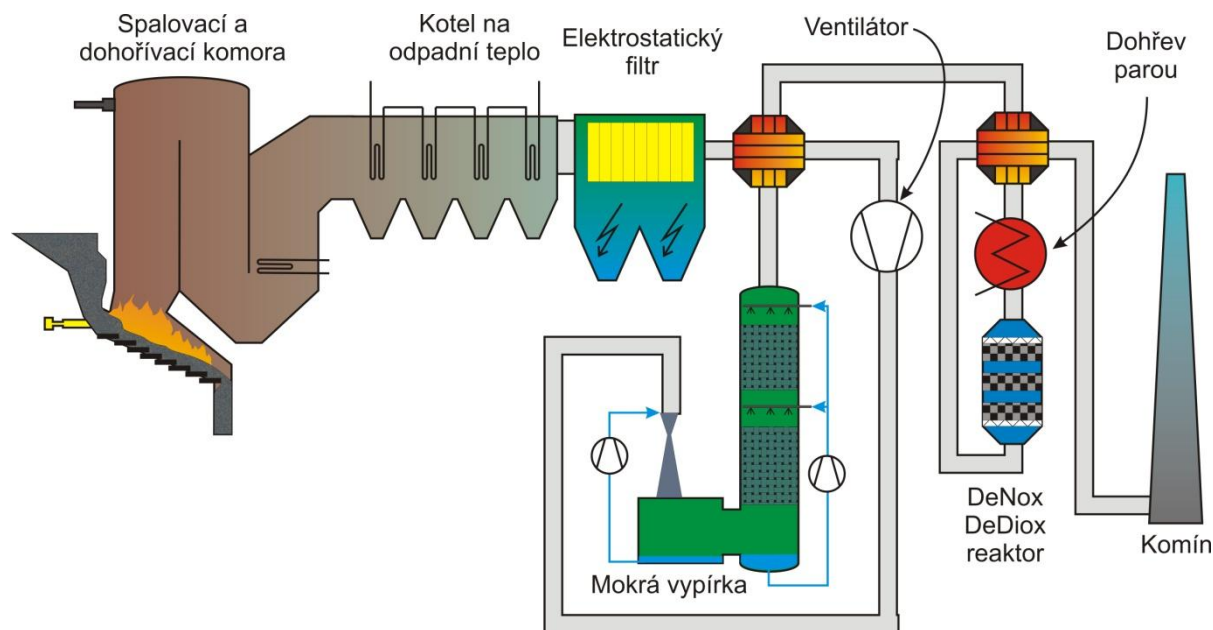
vypírka kyselých složek ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ) a těžkých kovů, při které se využívá účinku vodného roztoku  $\text{NaOH}$  a spaliny se ochladí až na cca  $60^\circ\text{C}$ . Před výstupem spalin do komína dojde k jejich ohřevu párou na teplotu  $110^\circ\text{C}$ . Následuje výstup spalin komínem do atmosféry.

### 5.1.3 Technologie DeNOx/DeDiox za mokrým čištěním spalin (Alternativa III)

Čištění spalin je při alternativě III prováděno následující posloupností operací:

#### Mechanické čištění v ESP – chemické čištění - katalytická oxidace dioxinů

Uspořádání technologické linky pro tuto alternativu je znázorněno na Obr. 20.

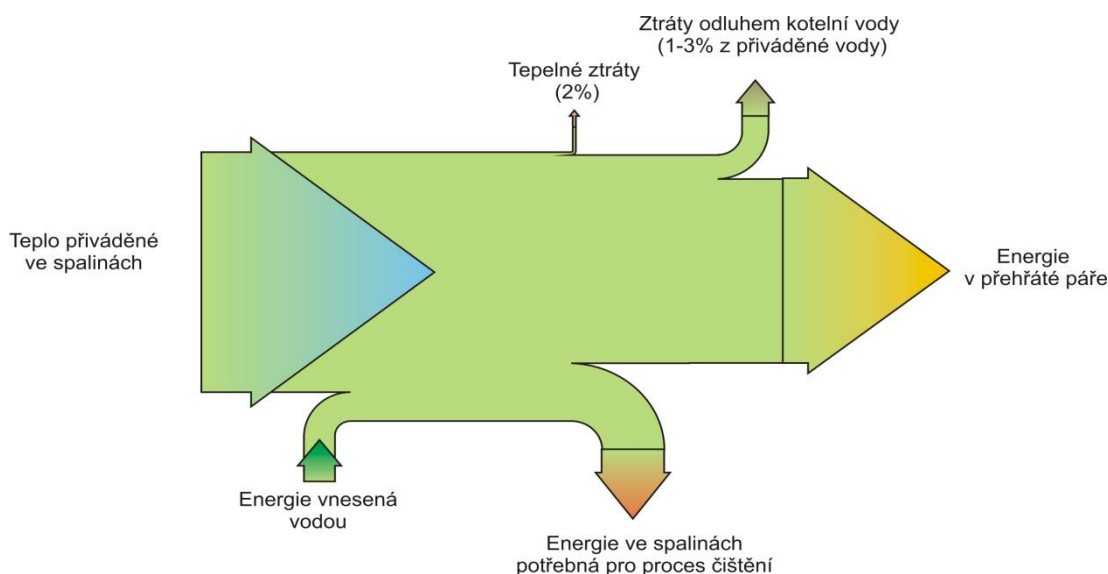


Obr. 20: Schéma technologie DeNOx/DeDiox za mokrým čištěním spalin

Při použití této metody čištění spalin se systém skládá ze spalovací a dohořivací komory. Spaliny jsou pak vedeny do kotle na odpadní teplo, kde je jejich tepelný obsah využit k výrobě přehřáté páry. Z kotle spaliny s teplotou cca  $250^\circ\text{C}$  vstupují do elektrostatického odlučovače (ESP) pro zachytávání TZL, za nímž teplota spalin dosahuje cca  $230^\circ\text{C}$ . Spaliny se pak následně ochladí v prvním výměníku tepla na cca  $140^\circ\text{C}$  a vstupují do mokré vypírky kyselých složek ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ) a těžkých kovů, při které se využívá účinku vodného roztoku  $\text{NaOH}$ . Z procesu mokré vypírky vystupují spaliny přibližně o teplotě  $60^\circ\text{C}$  a vstupují opět do prvního výměníku tepla, kde se ohřejí zpět na cca  $150^\circ\text{C}$  a následně vstupují do druhého výměníku tepla, kde je jejich teplota zvýšena až na  $180^\circ\text{C}$ . Před vstupem do reaktoru SCR (DeNOx/DeDiox) je jejich teplota zvýšena dohřevem pomocí vodní páry až na cca  $240^\circ\text{C}$ . V reaktoru probíhá selektivní katalytická redukce  $\text{NO}_x$  a rozklad PCDD/F, které sníží teplotu spalin přibližně na  $220^\circ\text{C}$ , spaliny se pak ve druhém výměníku tepla ještě ochladí až na cca  $170^\circ\text{C}$ , poté již vystupují komínem do atmosféry.



energie je však většinou doprovázena poklesem účinnosti odstranění znečišťujících látek závislé na použité metodě.



Obr. 22: Vstupní a výstupní proudy v kotli na odpadní teplo

Výše uvedená výstupní teplota spalin se při použití různých technologií může lišit. U Alternativy I je výstupní teplota spalin za HRSG 250 °C. U Alternativy II dosahuje výstupní teplota spalin z HRSG 350 °C a u Alternativy III dosahují spaliny výstupní teploty 250 °C, stejně jako u první uvedené Alternativy I.

Vyšší teplota spalin (350 °C) u Alternativy II je způsobena nástřikem odpadní vody z mokré vypírky a aktivního uhlí v odpařovací koloně za účelem dosažení optimální teploty pro ESP.

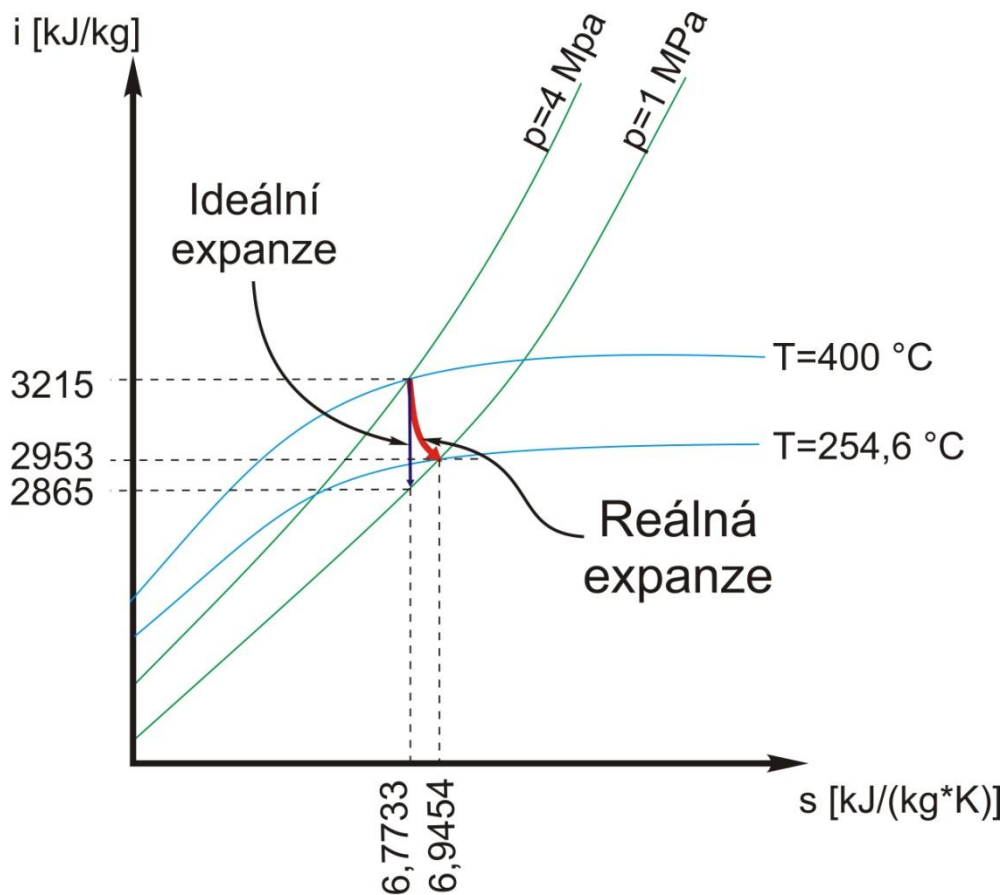
Z výše uvedeného množství spalin v kap. 2.5 jsou v Tab. 12 pro výstupní teploty 250 °C a 350 °C uvedeny vypočtené hodnoty množství vyrobené páry, přiváděné vody a množství odluhu, který slouží k částečnému odvodu nečistot z cirkulující vody.

	Výstupní teplota 250 °C	Výstupní teplota 350 °C	
<b>Množství napájecí vody</b>	34518	30602	[kg/h]
<b>Množství vyrobené páry</b>	33599	29787	[kg/h]
<b>Množství odluhu</b>	1039	921	[kg/h]

Tab. 12: Množství napájecí vody, vyrobené páry a odluhu pro výstupní teploty 250 °C a 350 °C odpovídající uvedenému množství spalin z kap. 2.5

### 5.2.2 Výroba elektrické energie a množství prodejného tepla

Pro výpočet výroby elektrické energie je třeba opět zvolit určité parametry. Nejdůležitějším parametrem je tlak po expanzi na výstupu z parní turbíny, jehož hodnota je zvolena 1 MPa (tato hodnota je užívána i ve spalovně TERMIZO a.s., Liberec). Další zvolené parametry jsou vnitřní izoentropická účinnost, jejíž hodnota je zvolena 75 % a termodynamická účinnost soustrojí turbíny s určenou hodnotou 95 %.



Obr. 23: Ideální a reálná expanze páry v turbíně v  $i$ - $s$  diagramu

Na Obr. 23 je znázorněn rozdíl ideální a reálné expanze v turbíně. Tento rozdíl má za následek menší výrobu elektrické energie a rozdílné parametry páry na výstupu. Reálné parametry na výstupu jsou uvedeny v Tab. 13.

	Teplota	Tlak	Měrná entalpie
	[°C]	[MPa]	[kJ/kg]
Para po expanzi (reálná)	254,60	1	2953,30

Tab. 13: Parametry páry za turbínou

Vzhledem k tomu, že jsou parametry turbíny u všech tří variant stejné, liší se množství vyrobené elektrické a produkované tepelné energie pouze množstvím přiváděné páry. U Alternativy I, kde není třeba zpětný ohřev spalin, je do turbíny přiváděna veškerá vyrobená pára v HRSG.

U Alternativy III se využívá část vyrobené páry pro zpětný ohřev spalin za mokrou vypírkou. Pro dosažení nejefektivnější funkce DeNO<sub>x</sub>/DeDiox reaktoru je třeba dodat energii na ohřátí spalin z teploty přibližně 210 °C na teplotu cca 240 °C. Množství potřebné páry pro tento ohřev je 1836 kg/h a je uveden bilanční tabulce (Tab. 14).

Energie potřebná na ohřátí spalin	Teplota	Průtok		Měrná entalpie	Tepelný tok		
	[°C]	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]		[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	[GJ/h]	[MW]	
<b>Vstup</b>							
Tepelný tok ve vstupních spalinách	210	81539		284,49	23,20	6,44	
<b>Výstup</b>							
Ztráta tepla v systému (2% ze vstupu)					0,46	0,13	
Tepelný tok ve výstupních spalinách	240	81539		326,76	26,64	7,40	
<b>Tepelný tok potřebný k ohřátí spalin</b>	(Vstup-Výstup)					<b>-3,91</b>	<b>-1,09</b>
Tepelná bilance ve výměníku	Teplota	tlak	Průtok	Měrná entalpie	Tepelný tok		
	[°C]	[MPa]	[kg/h]	[kJ/kg]	[GJ/h]	[MW]	
<b>Vstup</b>							
Tepelný tok v přiváděné páře	400,00	4	<b>1836</b>	3215,72	5,90	1,64	
<b>Výstup</b>							
Tepelný tok v odvedené páře	250,00	4	<b>1836</b>	1085,79	1,99	0,55	
<b>Tepelný tok potřebný k ohřátí spalin</b>	(Vstup-Výstup)					<b>3,91</b>	<b>1,09</b>

Tab. 14: Bilanční výpočet množství páry potřebný pro zpětný ohřev spalin z teploty 210 °C na 240 °C

V Alternativě II je část páry využita pro ohřev za mokrou vypírkou. Ohřev spalin za mokrou vypírkou způsobí větší tlakovou ztrátu, zvýšení objemu spalin vlivem jejich vyšší teploty a spotřebu části páry, která mohla být využita pro výrobu energie. Výhodou tohoto řešení, ve srovnání s technologií bez ohřevu, je větší životnost ventilátoru. Vzhledem k tomu, že teplota spalin je vyšší než bod varu kapaliny v mokré vypírce, dochází k odpaření kapaliny odnesené z mokré vypírky, čímž dochází k zamezení vstupu kapaliny z mokré vypírky na ventilátor. V neposlední řadě je výhodou mírné přehřátí spalin nad rosný bod, což se projeví potlačením parní vlečky za výstupem spalin do atmosféry. Množství páry potřebné pro ohřev je 2100 kg/h. Bilance uzlu ohřevu je uvedena v Tab. 15.

Energie potřebná na ohřátí spalin	Teplota	Průtok		Měrná entalpie	Tepelný tok		
	[°C]	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h]		[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]	[GJ/h]	[MW]	
<b>Vstup</b>							
Tepelný tok ve vstupních spalinách	60	81539		77,43	6,31	1,75	
<b>Výstup</b>							
Ztráta tepla v systému (2% ze vstupu)					0,13	0,04	
Tepelný tok ve výstupních spalinách	110	81539		145,65	11,88	3,30	
<b>Tepelný tok potřebný k ohřátí spalin</b>	(Vstup-Výstup)					<b>-5,69</b>	<b>-1,58</b>
Tepelná bilance ve výměníku	Teplota	tlak	Průtok	Měrná entalpie	Tepelný tok		
	[°C]	[MPa]	[kg/h]	[kJ/kg]	[GJ/h]	[MW]	
<b>Vstup</b>							
Tepelný tok v přiváděné páře	400,00	4	<b>2100</b>	3215,72	6,75	1,88	
<b>Výstup</b>							
Tepelný tok v odvedené páře	120,00	4	<b>2100</b>	506,40	1,06	0,30	
<b>Tepelný tok potřebný k ohřátí spalin</b>	(Vstup-Výstup)					<b>5,69</b>	<b>1,58</b>

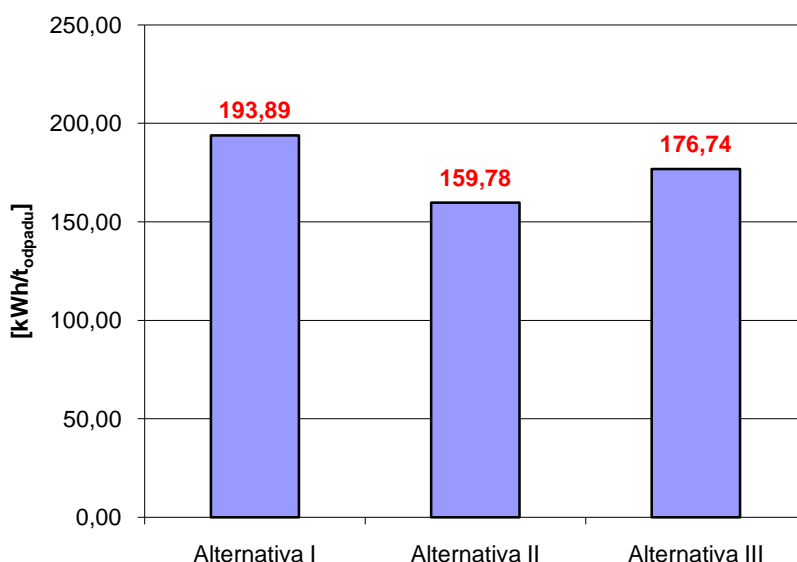
Tab. 15: Bilanční výpočet páry potřebný pro zpětný ohřev spalin z teploty 60 °C na 110 °C

Hodnoty vyrobené elektrické a tepelné energie pro všechny 3 varianty jsou uvedeny v Tab. 16 a porovnány v grafech na Obr. 24 a Obr. 25. V těchto hodnotách není započítána elektrická energie, která je k provozu zařízení potřeba. Spotřeba tepelné a elektrické energie v procesu je popsána v následujících kapitolách.

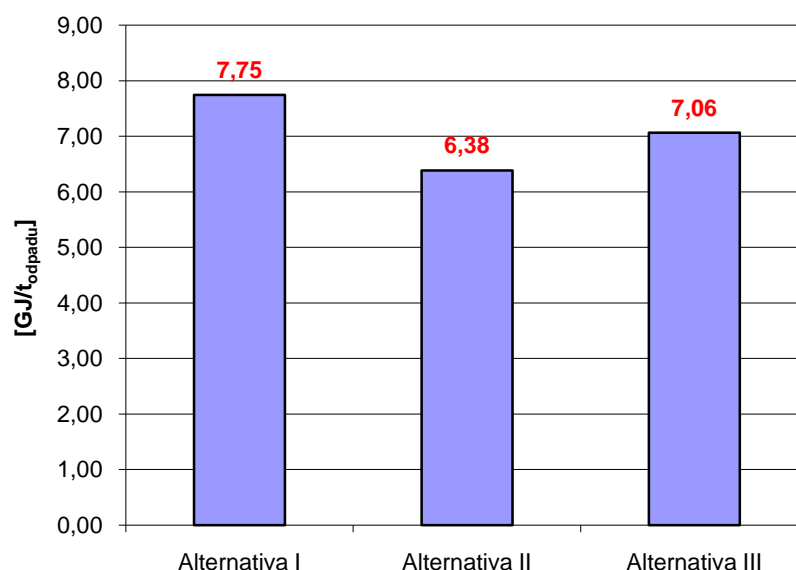
Varianta	Výstupní teplota spalín z HRSG [°C]	Výroba El. Energie		Výroba Tep. Energie		
		[MW]	[kWh/t]	[GJ/h]	[MW]	[GJ/t]
Alternativa I	250	2,33	193,89	92,97	25,82	7,75
Alternativa II	350	1,92	159,78	76,61	21,28	6,38
Alternativa III	250	2,12	176,74	84,74	23,54	7,06

Tab. 16: Souhrn produkovaných energií pro tři různé technologie

Z uvedených hodnot je zřejmé, že největší množství energie je možné získat při Alternativě I, což je způsobeno větším tepelným rozdílem, který je využit pro výrobu páry. U Alternativy II a Alternativy III je menší množství vyrobené energie spojené s odvodem části páry pro zpětný ohřev.



Obr. 24: Porovnání vyprodukované elektrické energie



Obr. 25: Porovnání vyprodukované tepelné energie

V programu W2E byla provedena simulace jednotlivých alternativ čištění spalin, jejíž výsledky jsou uvedeny v Tab. 17, společně s hodnotami vypočtenými a uvedenými v předchozích kapitolách. Modely pro jednotlivé technologie z programu W2E jsou zobrazeny na obrázcích (Obr. 32-34), které jsou obsahem příloh 1-3.

	Metoda	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III
Elektrická energie [MW]	Výpočet	2,33	1,92	2,12
	Model W2E	2,31	1,92	2,17
Tepelná energie [GJ/h]	Výpočet	92,97	76,61	84,74
	Model W2E	92,92	77,40	87,06

Tab. 17: Porovnání hodnot produkované elektrické a tepelné energie z výpočtu a z programu W2E

## 5.3 Spotřeba elektrické energie

V této části jsou popsány výpočty zařízení využívaných ve spalovnách odpadů, k jejichž provozu se využívá elektrická energie. Jedná se o zařízení přímo spojená s čištěním spalin, kterými jsou například čerpadla pro čerpání kapaliny v mokré vypírce, dopravníky pro přesun sorbetu ze zásobníku do trysky pro mísení sorbentu se spalinami a ventilátory kompenzující tlakové ztráty vzniklé průchodem jednotlivými technologickými jednotkami.

### 5.3.1 Tlaková ztráta ve spalinovém potrubí

Tlaková ztráta neznámá přímou spotřebu energie, ale její velikost ovlivňuje příkon ventilátoru, jehož výpočtu je věnována následující kapitola. Pro výpočet tlakové ztráty v potrubí je zvolena délka potrubí 100 m a průměr potrubí pro proud spalin 1,5 m. Při uvažované průměrné teplotě spalin 150 °C je průtočné množství spalin 35,1 m<sup>3</sup>/s a hustota

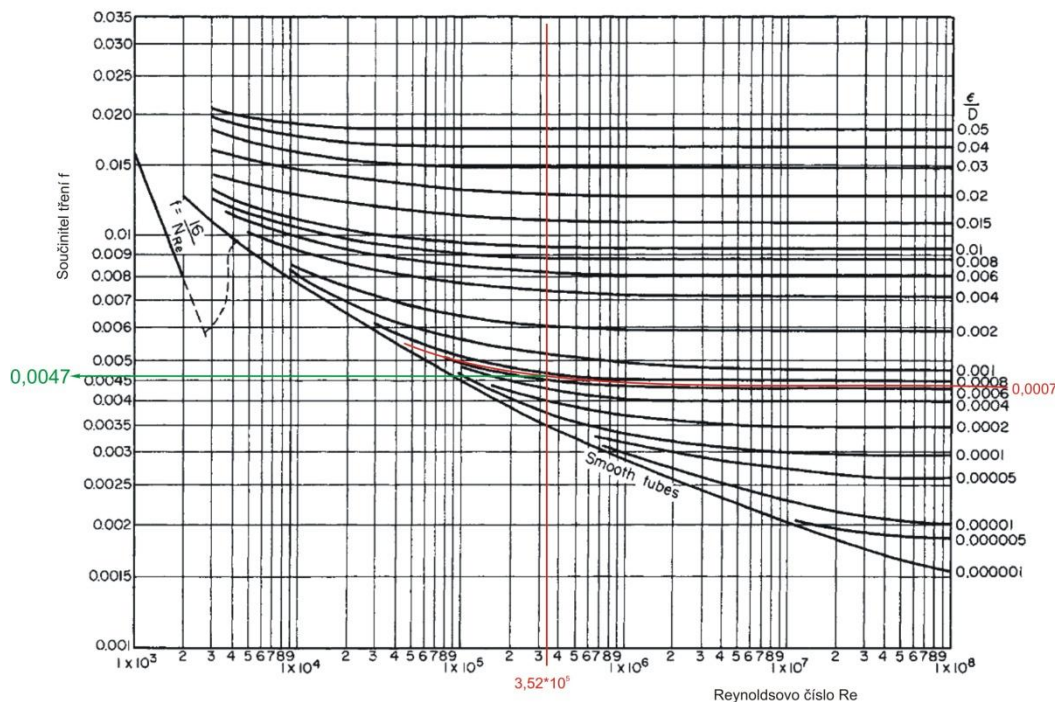
spalin  $0,83 \text{ kg/m}^3$ . Výpočet tlakové ztráty v potrubí je proveden dle Darcy-Weisbachovy rovnice (13) [48].

$$\Delta p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho \quad (13)$$

K určení tlakové ztráty pomocí Darcy-Weisbachovi rovnice je nutné určit především součinitel tření. Tento součinitel lze určit několika způsoby, například pomocí Churchilla (14) [47] pro  $Re > 4000$  nebo z tzv. Moodyho diagramu (Obr. 26) [48]. Oba způsoby uvádějí součinitel tření v závislosti na Reynoldsově čísle a relativní drsnosti, tedy poměru drsnosti a průměru potrubí.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[ \frac{0,27\varepsilon}{D} + \left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right] \quad (14)$$

Jak výpočtem součinitel dle Churchilla je  $4,7 \cdot 10^{-3}$ , tak odečtem z Moodyho diagramu dostaneme přibližně stejnou hodnotu. Výsledná tlaková ztráta na rovném potrubí s drsností 1 mm a součinitelem tření  $4,7 \cdot 10^{-3}$  je rovna přibližně 50 Pa. Z důvodu rozsahu této diplomové práce není další výpočet tlakových ztrát na nerovných prvcích potrubí prováděn a pro výpočet příkonu ventilátoru je zvolena tlaková ztráta spalin v potrubí 1 kPa.



Obr. 26: Moodyho diagram pro určení součinitele tření [48]

### 5.3.2 Ventilátory

Ve spalovnách odpadů jsou ventilátory jedny z energeticky nejnáročnějších zařízení, která jsou ovšem nezbytná k jejich provozu. Pro výpočet spotřeby elektrické energie ventilátoru je opět nezbytné zvolit určité hodnoty, kterými jsou tlakové ztráty jednotlivých

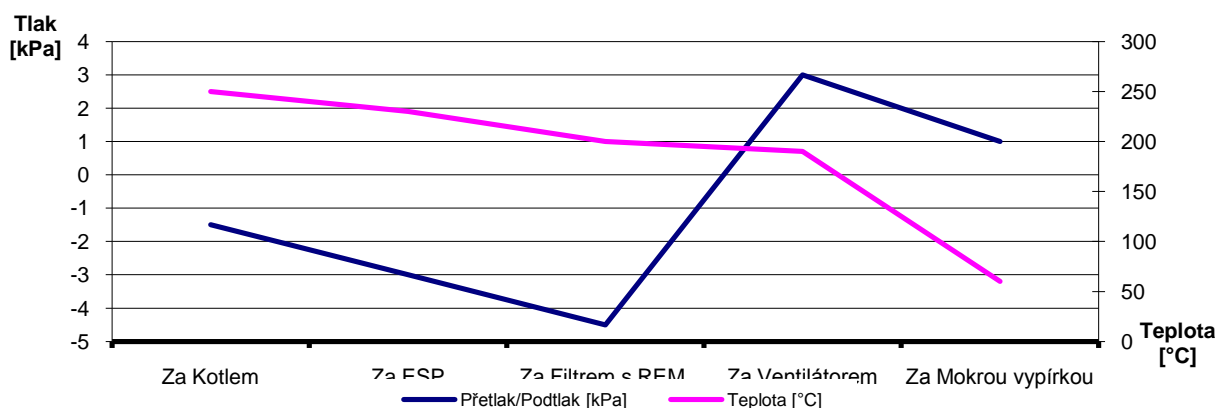
zařízení použitých technologií a účinnost ventilátoru. Tlaková ztráta potrubí je zvolena 1 kPa a účinnost ventilátoru 80 %. Příkon ventilátoru je vypočten dle vztahu (15) a závisí na množství plynu, který ventilátorem proudí.

$$P = \frac{\Delta p \cdot V}{\eta} \quad (15)$$

V tomto případě nelze použít objem spalin z kap. 2.5, kde je uvedena hodnota 81 539 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h, ale je nutné, tento objem přepočítat na reálné podmínky, při kterých je ventilátor v provozu. Zde se opět projeví rozdíl jednotlivých technologií.

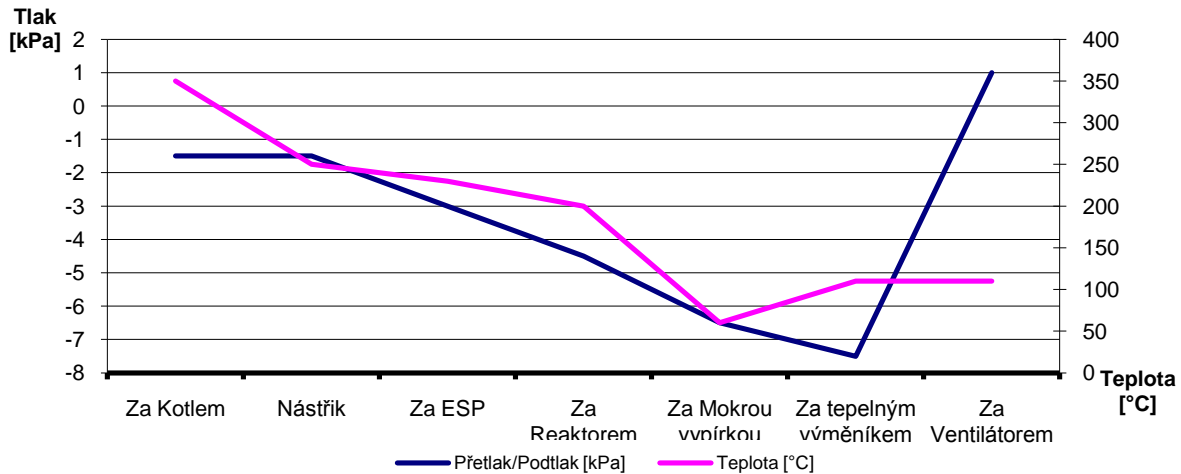
Při porovnání příkonů ventilátorů je směrodatný rozdíl v množství spalin za reálných podmínek. Při přepočtu na reálné podmínky je možné určité zjednodušení. Z důvodu relativně malé odchylky oproti normálním podmínkám je kompresibilitní faktor téměř roven 1, lze tedy pro výpočet použít stavovou rovnici pro reálné plyny. Dále je oproti normálním podmínkám při výpočtu zanedbatelný téměř totožný rozdíl tlaků. Z výše uvedeného vyplývá, že největší rozdíl v objemu spalin je způsoben teplotou spalin.

U všech 3 porovnávaných technologií je uvažována tlaková ztráta 1,5 kPa na kotli, elektrostatických a tkaninových filtrech a reaktoru pro DeNO<sub>x</sub>/DeDiox. U mokré vypírky uvažujeme tlakovou ztrátu 2 kPa. U Alternativy III je uvažována tlaková ztráta ve výměnících tepla 3 kPa a u Alternativy II je 1 kPa. Tlakový průběh a teplotní průběh spalin u Alternativy I je znázorněn na Obr. 27.



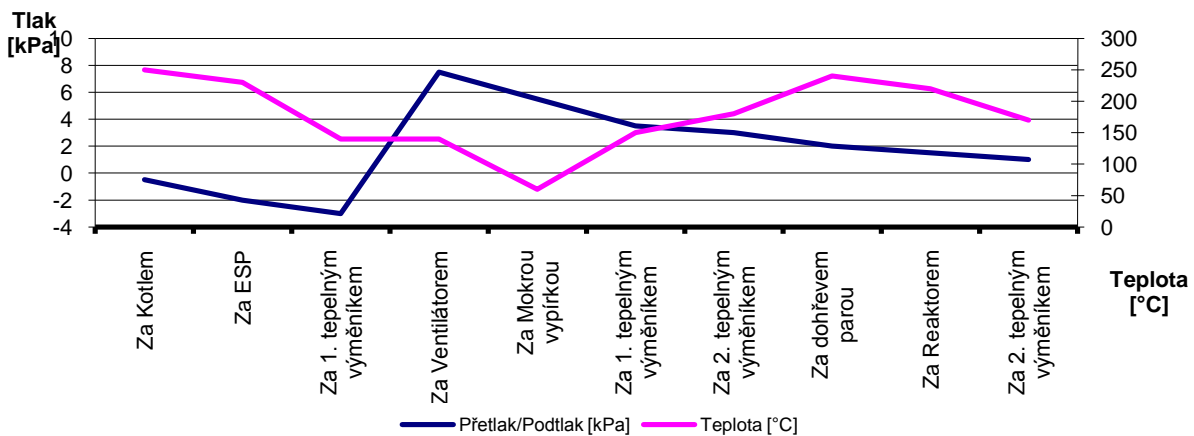
Obr. 27: Průběh tlaku a teploty spalin u Alternativy I

U Alternativy II je ventilátor umístěn před vstupem spalin do komína a pracuje při teplotě okolo 110 °C. U Alternativy I a Alternativy II se ventilátor nachází před mokrou vypírkou. Oproti Alternativě II nepracují uvedené technologie v podtlaku, ale mokrá vypírka a reaktor pracují v přetlaku. Část procesu čištění spalin probíhající v podtlaku zvyšuje příkon ventilátoru přisáváním vzduchu z okolí vlivem netěsností potrubí. V části procesu probíhající v přetlaku, kdy nedochází k přisávání vzduchu z okolí, je příkon ventilátoru nižší, což Alternativu I a Alternativu III z energetického hlediska zvyhodňuje ve srovnání s Alternativou II. Množství přisávaného vzduchu vlivem netěsností potrubí se v předložené diplomové práci neuvažuje. Tlakový průběh a teplotní průběh spalin u Alternativy II je znázorněn na Obr. 28 a u Alternativy III je znázorněn na Obr. 29.



Obr. 28: Průběh tlaku a teploty spalin u Alternativy II

U Alternativy I pracuje ventilátor při teplotě spalin 200 °C a přetlaku oproti okolí 1 kPa, resp. při tlaku 102,325 kPa. V Alternativě III je teplota spalin 140 °C, hodnota tlaku je srovnatelná s hodnotou tlaku v alternativě I. Pracovní podmínky ventilátorů jsou pro všechny 3 porovnávané technologie shrnuty v tabulce (Tab. 18), spolu s vypočtenými příkony jednotlivých ventilátorů.



Obr. 29: Průběh tlaku a teploty spalin u Alternativy III

Varianta	Teplota [°C]	V spalin [m <sup>3</sup> /s]	Tlaková ztráta [kPa]	Příkon [kW]
Alternativa I	190	38,40	7,5	360
Alternativa II	110	31,46	8,5	334
Alternativa III	140	34,26	10,5	450

Tab. 18: Příkon ventilátorů pro jednotlivé varianty

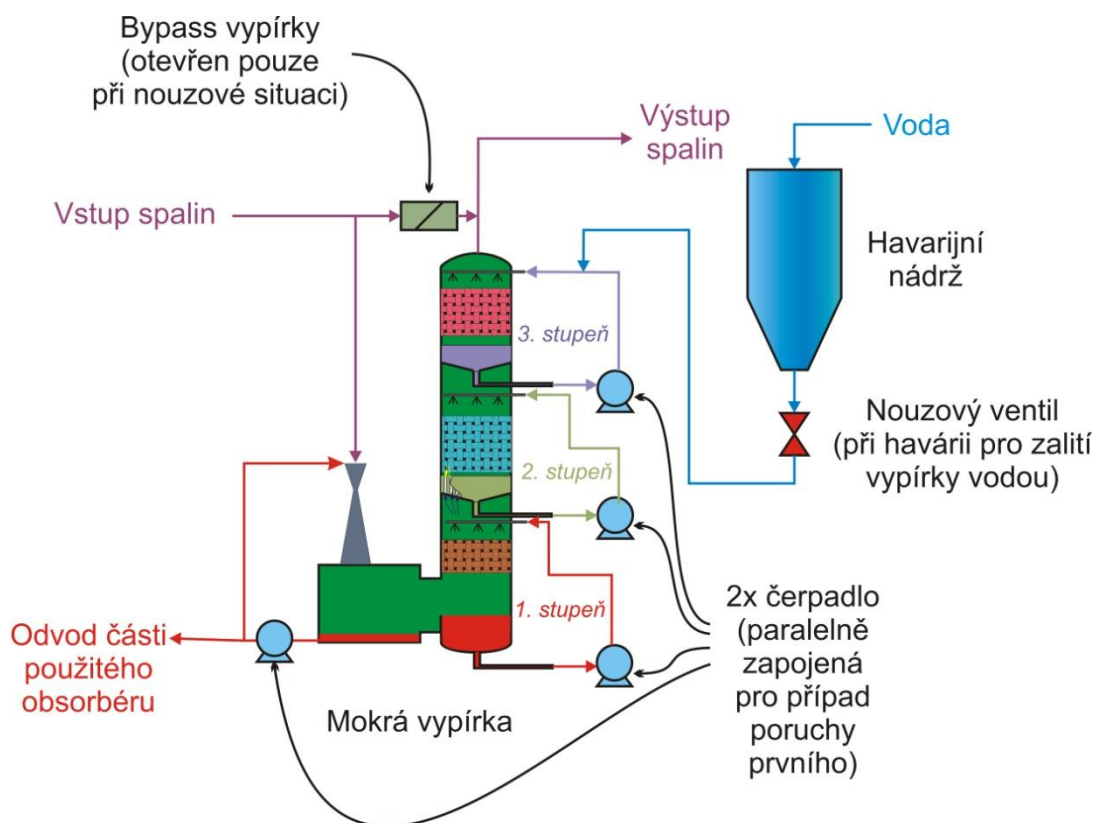
### 5.3.3 Mokrý vypírka

Na Obr. 30 je znázorněno technologické schéma mokré vypírky. Pro zajištění fungování mokré vypírky jsou nutná určitá provozně-bezpečnostní zařízení. Z hlediska provozuschopnosti je nutnou součástí bloku mokré vypírky havarijní nádrž, bypass a zdvojená čerpadla absorpční kapaliny pro jednotlivé stupně čištění spalin. Výpadek jednoho stupně delší než několik sekund by způsobil značné narušení funkčnosti mokré vypírky, což by mělo za následek nedodržení požadovaných emisních limitů.

Největší množství elektrické energie je spotřebováno v mokré vypírce čerpadly přečerpávajícími cirkulující kapalinu v jednotlivých patrech absorpční kolony. Množství čerpadel závisí na počtu stupňů mokré vypírky.

$$P_{mv} = \frac{h \cdot \rho \cdot g}{\eta_{mv}} \cdot \frac{V_{sp} \cdot 3}{1000} \quad (16)$$

Příkon čerpadla je vypočten dle vztahu (16) a je nutné vzít v úvahu několik předpokladů. Čerpadlo čerpá kapalinu do výšky 20 m, spotřeba kapaliny je zvolena 3 m<sup>3</sup> na 1000 m<sup>3</sup> spalin, hustota kapaliny 1000 kg/m<sup>3</sup>, gravitační zrychlení 9,81 m/s<sup>2</sup> a účinnost čerpadla 90 %.



Obr. 30: Technologické schéma mokré vypírky

Z výše uvedených hodnot je vypočten příkon jednoho čerpadla 23 kW bez ohledu na zvolenou technologii. Na soustavu aparátů mokré vypírky jsou při výpočtu uvažována čtyři čerpadla, čímž je hodnota celkového příkonu 92 kW.

## 5.4 Srovnání produkce a spotřeby

K porovnání jednotlivých variant jsou využita dvě kritéria popsána v kap. 2.2, kterými jsou Energy efficiency [11] a Plant efficiency [14]. V uvedeném porovnání vycházíme z údajů uvedených v předchozích kapitolách, z nichž lze porovnat spotřebu jednotlivých technologií a jejich čistou produkci elektrické energie a tepelné energie. Je tedy uvažována čistá výroba elektrické a tepelné energie, spotřeba ventilátoru na pokrytí tlakových ztrát spalin v aparátech a potrubí, které jednotlivé technologické části spojuje a spotřeba elektrické energie v mokré vypírce na pohon čerpadel. Není zde zahrnuta elektrická energie potřebná na provoz elektrostatického filtru, spotřeba ovládacích a kontrolních systémů ve spalovně nebo spotřeba na osvětlení v provozní části spalovny. Z hlediska tepelné energie se neuvažuje spotřeba tepelné energie pro vytápění budovy spalovny a spotřeba energie pro přehřev, např. spalovacího vzduchu. V Tab. 19 jsou uvedeny hodnoty exportované tepelné a elektrické energie.

Varianta	Výstupní teplota spalin z HRSG	Export El. Energie		Export. Tep. Energie		
		[MW]	[kWh/t]	[GJ/h]	[MW]	[GJ/t]
Alternativa I	250	1,88	156,3	92,97	25,82	7,75
Alternativa II	350	1,49	124,3	76,61	21,28	6,38
Alternativa III	250	1,58	131,7	84,74	23,54	7,06

Tab. 19: Souhrn exportovaných energií pro tři různé technologie

### 5.4.1 Kritérium Energy efficiency a Plant efficiency

Pro výpočet kritérií Energy efficiency a Plant efficiency jsou použity hodnoty naměřené v roce 2005 ve spalovně TERMIZO a.s., Liberec [24]. Tyto hodnoty jsou upraveny dle rozdílu v jednotlivých technologiích ve srovnání s hodnotami naměřenými ve spalovně TERMIZO a.s., Liberec. Spotřeba tepelné energie se uvažuje pro všechny varianty stejná. Stejně hodnoty dosahují i energie přídatného paliva, importovaná energie, energie odpadu a koeficient ztrát, který je zvolen 0,97 [24]. Rozdíly v hodnotách Energy efficiency a Plant efficiency způsobuje převážně množství vyprodukované tepelné a elektrické energie a spotřeba elektrické energie ve ventilátoru.

Při výpočtu kritéria Energy efficiency je nutné hodnotu produkované energie vypočítat z níže uvedeného vztahu (17), který rovněž zahrnuje koeficienty zvýhodňující produkci elektrické energie a export tepelné energie. Tyto hodnoty koeficientů jsou vypočteny z účinností, se kterými by byly vyrobeny v jiných zdrojích využívajících neobnovitelné zdroje energie. Výsledné hodnoty pro výpočet kritéria Energy efficiency jsou uvedeny v Tab. 20 a výpočet je proveden dle vztahu (18).

$$Q_{prod} = 2,6 \cdot Q_{prod,el} + 1,1 \cdot Q_{exp,t} \quad (17)$$

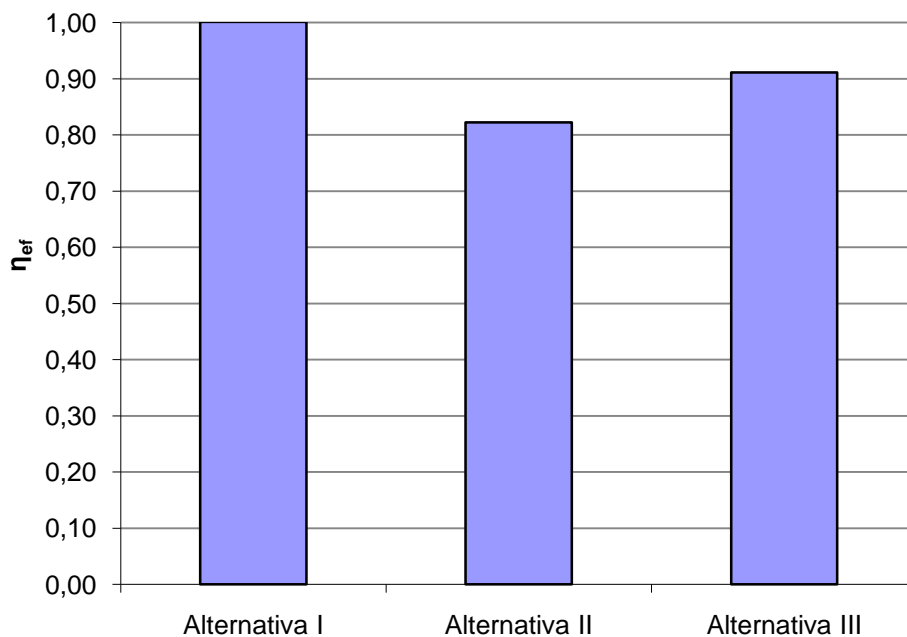
$$\eta_e = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{f_B \cdot (E_w + E_f)} \quad (18)$$

Mezní hodnotou tohoto kritéria je 0,65. V případě, že spalovna odpadů dosahuje vyšší hodnoty, lze ji zařadit mezi zařízení využívané k energetickému zhodnocení odpadů.

	Označení [Jednotka]	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III
Produkováná energie	$Q_{\text{prod}}$ [MW]	34,46	28,39	31,41
Energie přídatného paliva	$E_f$ [MW]	0,19	0,19	0,19
Importovaná energie	$I_{\text{imp}}$ [MW]	0,33	0,33	0,33
Koeficient ztrát	$f_b$	0,97	0,97	0,97
Energie odpadu	$E_w$ [MW]	34,76	34,76	34,76
<b>Kritérium <math>\eta_e</math></b>	<b><math>\eta_e</math></b>	<b>1,00</b>	<b>0,82</b>	<b>0,91</b>

Tab. 20: Stanovení kritéria Energy efficiency

Na Obr. 31 je porovnání kritéria Energy efficiency u jednotlivých variant technologií čištění spalin.



Obr. 31: Porovnání hodnot kritéria Energy efficiency

U kritéria Plant efficiency musí spalovna odpadů dosahovat hodnoty vyšší než 1, aby bylo možné ji zařadit mezi zařízení k energetickému zhodnocení odpadů. Pro výpočet tohoto kritéria je použit vztah (19).

$$Pl_{ef} = \frac{Q_{\text{exp}} - (E_f + I_{\text{imp}})}{E_f + I_{\text{imp}} + I_{\text{circ}}} \quad (19)$$

Shrnutí hodnot použitých k výpočtu je uvedeno Tab. 21, společně s výslednou hodnotou vypočteného kritéria.

	Označení [Jednotka]	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III
Exportovaná energie	$Q_{\text{exp}}$ [MW]	27,70	22,77	25,12
Energie přídavného paliva	$E_f$ [MW]	0,19	0,19	0,19
Importovaná energie	$I_{\text{imp}}$ [MW]	0,33	0,33	0,33
Cirkulující energie	$I_{\text{circ}}$ [MW]	6,17	6,14	6,26
<b>Kritérium <math>Pl_{\text{ef}}</math></b>	<b><math>Pl_{\text{ef}}</math></b>	<b>4,06</b>	<b>3,34</b>	<b>3,63</b>

Tab. 21: Stanovení kritéria Plant efficiency

Z výsledných hodnot kritérií Energy efficiency a Plant efficiency lze zařadit všechny tři technologie mezi zařízení k energetickému využití odpadů. Kritérium Energy efficiency určuje zařazení zařízení mezi spalovny odpadů nebo zařízení využívané k energetickému využívání odpadů, ale z důvodu zvýhodnění produkce elektrické energie a exportu tepelné energie neuvádí skutečnou účinnost zařízení. Z tohoto důvodu je provedena klasická účinnost využití energie v Tab. 22.

	Označení [Jednotka]	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III
Produkováná energie	$Q_{\text{prod,n}}$ [MW]	28,15	23,20	25,66
Energie přídavného paliva	$E_f$ [MW]	0,19	0,19	0,19
Importovaná energie	$I_{\text{imp}}$ [MW]	0,33	0,33	0,33
Koeficient ztrát	$f_b$	0,97	0,97	0,97
Energie odpadu	$E_w$ [MW]	34,76	34,76	34,76
<b>Kritérium <math>S\eta_e</math></b>	<b><math>S\eta_e</math></b>	<b>0,82</b>	<b>0,67</b>	<b>0,74</b>

Tab. 22: Stanovení energetické účinnosti

#### 5.4.2 Ekonomické srovnání

K porovnání technologií z ekonomického hlediska je uvažována výkupní cena elektrické energie 1 Kč za kWh/h a tepelné energie 100 Kč za GJ/h. Tyto ceny jsou využity k porovnání jednotlivých variant a určení finančních ztrát, v případě, že je část vyrobené páry použita na ohřev spalin nebo je množství vyrobené páry nižší z důvodu vyšší teploty spalin na výstupu z kotle na odpadní teplo. Jednotlivé ceny, životnost a množství materiálu potřebného pro správnou funkci filtru Remedia a reaktoru DeNox/DeDiox jsou uvedeny v Tab. 23.

Varianta	položka		jednotka	hodnota	cena [Kč/jednotka]	celková cena [mil. Kč]	roční náklady
Alternativa I	filtrační materiál	životnost filtračních hadic	rok	9			
		filtrační plocha	m <sup>2</sup>	1800	7500	13,5	1,5
	spotřeba energie ventilátorem a čerpadly		kWh/h	451	2		7,9
	<b>roční náklady</b>			<b>mil. Kč/rok</b>	<b>9,4</b>		
Alternativa II	katalyzátor	životnost katalyzátoru	rok	6			
		objem katalyzátoru	m <sup>3</sup>	28	300000	8,4	1,4
	spotřeba energie ventilátorem a čerpadly		kWh/h	426	2		7
	<b>roční náklady na provoz technologie</b>			<b>mil.</b>	<b>8,9</b>		
	energie na zpětný ohřev spalin (ochuzení exportu energií oproti tech. s mokrou vypírkou +	ztráta elektrické energie	kWh/h	1467	1		12,8
		ztráta tepelné energie	GJ/h	16,36	100		14,3
<b>roční náklady včetně snížení produkce</b>			<b>mil. Kč/rok</b>	<b>36,0</b>			
Alternativa III	katalyzátor	životnost katalyzátoru	rok	7			
		objem katalyzátoru	m <sup>3</sup>	28	300000	8,4	1,2
	spotřeba energie ventilátorem a čerpadly		kWh/h	541	2		9,5
	<b>roční náklady na provoz technologie</b>			<b>mil.</b>	<b>10,7</b>		
	energie na zpětný ohřev spalin (ochuzení exportu energií oproti tech. s mokrou vypírkou + SNCR)	ztráta elektrické energie	kWh/h	741	1		6,5
		ztráta tepelné energie	GJ/h	8,22	100		7,2
<b>roční náklady včetně snížení produkce</b>			<b>mil. Kč/rok</b>	<b>24,4</b>			

Tab. 23: Přehled ročních nákladů na provoz technologií [49]

Při porovnání finančních nákladů na provoz technologií se jeví jako ekonomicky nejvýhodnější Alternativa II. I přes nižší životnost katalyzátoru, ve srovnání s Alternativou III, je vzhledem k nižší tlakové ztrátě technologie a tedy i menší spotřebě elektrické energie její provoz levnější. Při porovnání množství produkované energie jednotlivých technologií, vychází ovšem Alternativa II jako ekonomicky nejméně výhodná. Při uvedených cenách má, ve srovnání s Alternativou I, Alternativa II nižší výnos až o 26 mil. Kč/rok, Alternativa III pak o 14 mil. Kč/rok. Z uvedeného vyplývá, že Alternativa I je ekonomicky nejvýhodnější.

## ZÁVĚR

Úvodní část předložené práce je zaměřena na přehled zpracování odpadů s co nejmenším dopadem na životní prostředí a zdraví obyvatel. Při porovnání zpracování odpadů v České republice a vyspělých zemí Evropské unie je zřejmý markantní rozdíl v přístupu a legislativě jednotlivých států. Ze závazků k Evropské unii vyplývá povinnost České republiky snížit do roku 2020 skládkování o 2 000 000 t odpadu. Ke splnění uvedeného požadavku však kapacitně nestačí ani spalovny odpadů, které jsou v současné době ve fázi přípravy k výstavbě nebo ve fázi plánování [50]. Vzhledem k možnosti využití komunálního odpadu jako možného zdroje energie, je výstavba těchto zařízení jednou z možných cest, jak se vypořádat s odpadem, pro který není v současné době jiné efektivnější využití. Díky zisku energie při energetickém zhodnocení odpadů, je dalším významným přínosem úspora primárních zdrojů energie.

Aby bylo možné dodržet legislativou stanovené přísné emisní limity pro spalovny odpadů, je nutné ze spalin odstranit znečišťující látky, které vznikají při spalování. K odstranění zmíněných nežádoucích látek ze spalin je možné použít řadu různých technologií. V předložené práci byly porovnány tři možná technologická řešení, z nichž jsou dvě používány ve spalovnách komunálních odpadů v České republice. První zvolenou technologii (Alternativa I) využívá nejnovější spalovna v ČR TERMIZO a. s., Liberec. Druhá (Alternativa II) je aplikována v kapacitně největší spalovně v ČR v ZEVO Praha – Malešice. Třetí technologie (Alternativa III) odpovídá částečnému technologickému řešení bloku finálního čištění spalin od POP v zahraničí, kdy je reaktor pro DeNOx/DeDiox instalován až za chemickým čištěním spalin a pro jeho správnou funkci je nutné spaliny zpětně ohřívat na teploty nad 200 °C.

Z hlediska produkované elektrické energie a tepelné energie je energeticky nejvýhodnější Alternativa I, která jako jediná z porovnávaných metod využívá teplo spalin, které jsou ochlazené až na teplotu 250 °C. Další výhodou je, že tato varianta nevyžaduje další zpětný ohřev spalin, čímž u ní není snižována produkce energie. U Alternativy I je vyprodukovaná energie k exportu 156,3 kWh/t odpadu a 7,75 GJ/t odpadu. Nejmenší množství tepelné a elektrické energie je vytvořeno technologií v Alternativě II. Tuto energetickou ztrátu má za následek nižší teplotní spád (výstupní teplota spalin z HRSG je okolo 350 °C) využívaný k výrobě páry a také využití části páry pro ohřev spalin za mokrou vypírkou, za účelem zvýšení životnosti spalinového ventilátoru.

Výše uvedené faktory se projeví také v hodnotách kritérií Energy efficiency, Plant efficiency a účinnosti zařízení. Tato kritéria poukazují na největší efektivnost Alternativy I ( $\eta_e=1$ ) a naopak nejmenší efektivnost Alternativy II ( $\eta_e=0,82$ ). I přes nižší hodnoty těchto faktorů u Alternativy II a Alternativy III splňují všechny tři uvedené varianty podmínky pro zařazení mezi zařízení k energetickému využívání odpadů.

Při porovnání variant z hlediska ziskovosti je nutné uvažovat roční náklady na provoz technologií čištění spalin a množství produkované energie. U porovnávaných technologií jsou rozdílné náklady na provoz spalinových ventilátorů pro kompenzaci tlakových ztrát. U Alternativy I je nutné uvažovat cenu filtračních hadic, které jsou zde oproti Alternativě II a Alternativě III navíc používány. Naopak v případě Alternativy II a Alternativy III je třeba navíc počítat s cenou katalyzátoru. V případě, že porovnáme pouze náklady na pořízení filtračního materiálu a spotřebu elektrické energie ventilátory, je nejvýhodnější použití Alternativy II. Pro celkové porovnání z hlediska výnosu je nutné zahrnout do výpočtů také menší množství prodávané energie u Alternativy II a Alternativy III, čímž je opět zvýhodněna Alternativa I, u které jsou náklady na provoz méně než poloviční oproti zbývajícím dvěma variantám.

Po shrnutí všech použitých kritérií, je tedy možné konstatovat, že nejvýhodnější se jeví použití Alternativy I, při níž je používán nástřik SNCR a katalytická filtrace pomocí technologie REMEDIA™ D/F. Zajímavé výsledky by mohlo přinést porovnání se suchými technologiemi čištění spalin, které jsou nejvíce používané u nově projektovaných spaloven odpadů. U suchých metod čištění spalin nedochází k tak významné teplotní ztrátě jako v mokré vypírce a není tedy nutné používat další dohřev spalin.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Nařízení vlády č. 354 ze dne 3. července 2002, kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu, Sbíрка zákonů č. 354/2002, částka 127, s. 7354-7482
- [2] Council Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, Official Journal of the European Communities, 28. December 2000
- [3] Bébar L., Pavlas M.: Energetický potenciál komunálních odpadů v ČR. *Odpadové fórum*, 2007, roč. 8, č. 12, s. 22. ISSN 1212-7779.
- [4] Hüner T.: Využití komunálních odpadů v energetice. *All for power*, 2011, roč. 5, č. 1. ISSN 1802-8535.
- [5] Bébar L.: Moderní technologie pro energetické využití odpadů. *All for power*, 2011, roč. 5, č. 1. ISSN 1802-8535.
- [6] Statistika energetického využívání odpadů 1905–2009. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2010. Zveřejněno dne: 20.10.2010. [cit. 15. května 2011]. Dostupné z <<http://www.mpo.cz/dokument80034.html> >
- [7] Bláha A.: Waste to Energy Plant ZEVO Malešice/Prague. *Chisa 2009*, 19. až 22. října 2009, Srní, Šumava.
- [8] Novák P., Bernát P., Doucha J., Zachleder V., Brányiková I., Straka F., Brányik T., Maršálková B.: Biopaliva 2. generace z plyných odpadů spalovny. *All for power*, 2011, roč. 5, č. 1, s. 79. Až 83. ISSN 1802-8535.
- [9] Bébar L., Pavlas M., Pařízek T., Urban L., Stehlík P.: Podmínky efektivního energetického využívání odpadů. *Chisa 2007*, 15. až 18. října 2007, Srní, Šumava. Praha: Procesní inženýrství, 2007. 243 s.
- [10] Pavlas M., Bébar L., Stehlík P.: Hodnocení spaloven komunálních odpadů jako moderních energetických zdrojů. *Chisa 2007*, 15. až 18. října 2007, Srní, Šumava. Praha: Procesní inženýrství, 2007. 243 s.
- [11] Pavlas M.: Využití výpočtových nástrojů pro efektivní využití energie z EVO a podporu legislativního procesu. *All for power*, 2011, roč. 5, č. 1. ISSN 1802-8535.
- [12] Proposal for a Directive of the European parliament and of the council on waste, presented by the Commission of the European commnuties, 21 December 2005, (2005)
- [13] Hyžík J.: Energetické využívání odpadu v Evropské unii a ve Švýcarsku. *In Sborník příspěvků z mezinárodní konference Dny spalování 2004*, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2.-3. června 2004, edit. P. Slezák, VUT Brno, 2004, s.144-155, ISBN 80-214-2650-0
- [14] Discussion paper on criteria for energy recovery in waste incineration plants, Brussels, 20 April 2004, [http://www.cewep.com/energy/energy\\_recovery](http://www.cewep.com/energy/energy_recovery) (2005)

- [15] ECJ judgement “C-458/00”, par. 32-34 in the case Commission of the European Communities v. Grand Duchy of Luxembourg, 13.02. 2003
- [16] Řanda M., Stoniš P.: Vybrané právní otázky dovozu odpadů do České republiky za účelem energetického využití. *All for power*, 2011, roč. 5, č. 1. ISSN 1802-8535.
- [17] European IPPC Bureau: Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, Brussels, available on <http://eippcb.jrc.es>, 2005
- [18] Reimann D.O.: Steigerung des nutzbaren Energiepotentials bei Einsatz von Natriumbicarbonat in der Rauchgasreinigung, In Fachtagung Energieeffizienz und Kostenminimierung mit BAT-konformer Rauchgasreinigung bei der thermischen Behandlung von Ersatzbrennstoffen, Biomasse und Abfall, Fürstenfeld, Deutschland, 25- 26. Januar 2007
- [19] Hyžík J.: Význam energetického využívání odpadů roste, *Odpadové fórum*, 2007, roč. 8, č.5, s. 26-27. ISSN 1212-7779.
- [20] Reimann D. O.: Results of Specific Data for Energy, Efficiency Rates and Coefficients, Plant Efficiency factors and NCV of 97 European W-t-E Plants and Determination of the Main Energy Results, CEWEP Energy Report, Bamberg, Germany, July 2006
- [21] ČSN 44 1304: 1989. Tuhá paliva. Metody odběru a úpravy vzorků pro laboratorní zkoušení. Praha: vydavatelství ÚNM
- [22] ČSN 06 3090 Zařízení pro termické zneškodňování odpadů. Praha: vydavatelství ÚNM
- [23] Bébar L., Pařízek T., Urban L., Puchýř R.: Hodnocení energetického využití odpadů ve spalovně komunálního odpadu TERMIZO, a.s., Liberec za rok 2004, výzkumná zpráva pro řešení výzkumného záměru MSM 0021630502, VZ-UPEI-2005-02/02, VUT Brno, prosinec 2005
- [24] Bébar L., Pařízek T., Urban L., Pavlas M.: Hodnocení energetického využití odpadů ve spalovně komunálního odpadu TERMIZO, a.s., Liberec za rok 2005, výzkumná zpráva pro řešení výzkumného záměru MSM 0021630502, VZ-UPEI-2006-02/03, VUT Brno, březen 2006
- [25] Bébar L., Pařízek T., Urban L., Stehlík P.: Monitorování provozu spalovny komunálních odpadů s ohledem na škodlivé emise a funkci dioxinového filtru v roce 2005, výzkumná zpráva pro řešení výzkumného záměru MSM 0021630502, VZ-UPEI-2005-02/04, VUT Brno, prosinec 2005
- [26] Pavlas M., Touš M., Bébar L.: Energeticky efektivní zpracování komunálních odpadů. *Chisa 2009*, 19. až 22. října 2009, Srní, Šumava. Praha: Procesní inženýrství, 2009.
- [27] Rédr, M., Příhoda, M.: *Základy tepelné techniky*. SNTL/ALFA, Praha, 1991, ISBN 80-00366-0
- [28] Channiwala, S.A.: *On Biomass Gasification Process and Technology Development - some Analytical and Experimental Investigations*. Ph.D. Thesis. India: Indian Institute of Technology, Bombay, 1992.

- [29] Jegla Z., Bébar L., Pavlas M., Kropáč J., Stehlík P.: Secondary combustion chamber with inbuilt heat transfer area. *19th International Congress of Chemical and Process Engineerin.* CHISA 2010, 28. Srpna až 1. Zář 2010, Praha
- [30] PAVLAS, M.: *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů.* Dizertační práce. Brno: FSI VUT, 2008. Vedoucí práce Petr Stehlík. 109 s.
- [31] Skálová L.: Spalovna komunálních odpadů jako energeticky účinný a environmentálně šetrný zdroj energie. *Energetika*, 2009, roč. 59, č. 6, s. 221-229. ISSN 0375-8842
- [32] Lin-Chi Wang, Wen-Jhy Lee, Perng-Jy Tsai, Wei-Shan Lee<sup>1</sup> and Guo-Ping Chang-Chien: Emissions of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans from stack flue gases of sinter plants , *Chemosphere* ,Volume 50, Issue 9, March 2003, Pages 1123-1129
- [33] Bébar L., Puchýř R.: Dioxiny a technologie pro jejich odstraňování, In Sborník přednášek semináře „Dioxiny a furany 2003“, Skalský dvůr, 5.-6. června 2003
- [34] Bébar L., Stehlík P.: Legislativní předpisy ke snižování emisí a jejich požadavky na aplikaci, sborník přednášek semináře „Dioxiny a furany 2003“, Skalský dvůr, 5.-6. června 2003
- [35] Dioxiny [online]. Praha: Arnika, 2010. [cit. 13. Října 2010]. Dostupné z <<http://www.toxickelatky.arnika.org/dioxiny>>
- [36] Pařízek T., Bébar L., Stehlík P.: Metody pro snižování emisí perzistentních látek vzniklých spalováním odpadů. *Chisa 2007*, 15. až 18. října 2007, Srní, Šumava. Praha: Procesní inženýrství, 2007. 243 s.
- [37] Jecha D.: *Absorpční čištění spalin vznikajících spalováním odpadů.* Brno: FSI VUT, 2010. 118 s., 10 s. příloh, Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [38] Brunner, Calvin R. *Incineration systems handbook.* Reston: Incinerator Consultants Incorporated, 1996. 530 s. ISBN 0-9621774-0-7
- [39] Hasselriis F. and Licatab A. (1996): Analysis of heavy metal emission data from municipal waste combustion, *Journal of Hazardous Materiále* 47 (1996) 77-102
- [40] Hsing-Cheng Hsi, Lin-Chi Wang, Tsung-Hsien Yu (2006): Effects of injected activated carbon and solidification treatment on the leachability of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans from air pollution control residues of municipal waste incineration *Chemosphere* 67 (2007) 1394–1402
- [41] Jirsa P, Nečesaný F.: Nové technologie terciálního čištění spalin realizované výrobcem a dodavatelem spaloven SMS CZ s.r.o v tuzemsku a zahraničí, *Odpadové fórum 2010*, 21. až 23. dubna 2010, Kouty nad Desnou. ISSN 1212-7779
- [42] Finoi D., Russo N., Solaro S., Sarraco G., Comaro U., Bassetti A., Specchia V. (2003): Low temperature SCR catalysts for the simultaneous destruction of NO<sub>x</sub> and dioxins, 4th European Congress of Chemical Engineering, Granada, Spain, September 21st – 25th, 2003, P-4.2-021

- [43] Goemans M., Clarysse P., Joannes J. and De Clercq P. (2003): Catalytic NO<sub>x</sub> reduction with simultaneous dioxin and furan oxidation, *Chemosphere* 50 (2003) 489–497
- [44] Hanák D.: Odstraňování nebezpečných dioxinů ze spalin vycházejících ze spalovacích zařízení, *Energetika*, č.10, s.326-327, 2006
- [45] Dioxin removal by ADIOX® and water treatment systém up-grading, Bodens Energi WTE Plant, Sweden, available on <[http://www.gmab.se/documents/Referens\\_BodensEnergiENG\\_2006\\_000.pdf](http://www.gmab.se/documents/Referens_BodensEnergiENG_2006_000.pdf)>
- [46] Schoubye P., Jensen J. R.: Catalyc Activated Ceramic Dust Filter – a new technology for combined removal of dust, NO<sub>x</sub>, dioxin, VOCs and acids from off Gates. Dostupné z: <[http://www.topsoe.com/business\\_areas/flue\\_and\\_waste\\_gas](http://www.topsoe.com/business_areas/flue_and_waste_gas)>
- [47] Oral J.: Je česká cena reálná?. *All for power*, 2011, roč. 5, č. 1. ISSN 1802-8535.
- [48] Green, Don W., Perry, Robert H: Perry's Chemical Engineers' Handbook (8th Edition). (2008). McGraw-Hill. Online version available at: <[http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?\\_EXT\\_KNOVEL\\_DISPLAY\\_bookid=2203&VerticalID=0](http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=2203&VerticalID=0)>
- [49] Pařízek T.: Redukce emisí škodlivých látek u jednotek pro termické zpracování odpadů, disertační práce, VUT Brno, Ústav procesního a ekologického inženýrství, červen, 2009
- [50] Bartoš P.: Komunální sféra, záměry jednotlivých krajů a měst ČR. *All for power*, 2011, roč. 5, č. 1. ISSN 1802-8535.

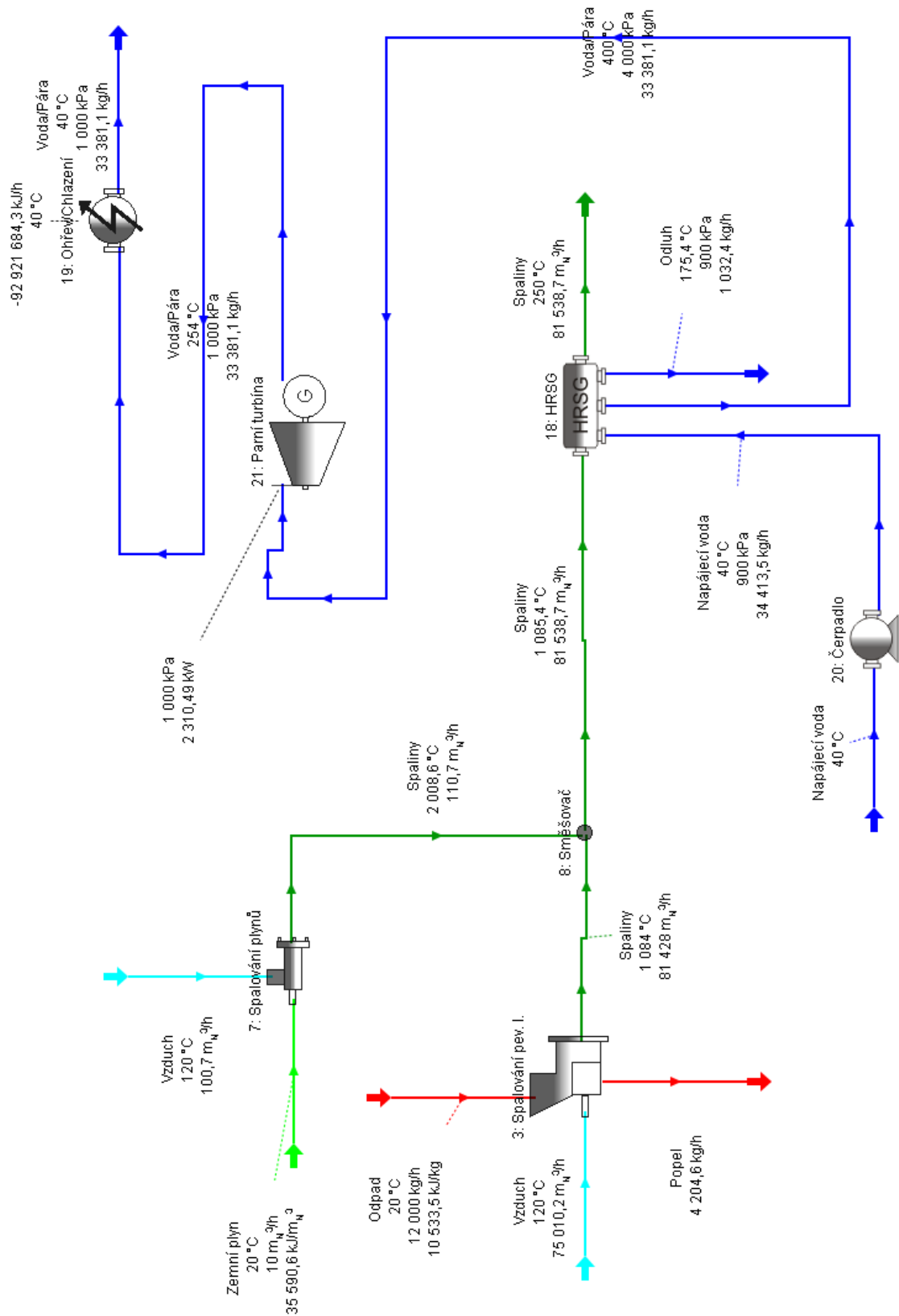
## SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
$A_p$	Obsah popelovin v palivu	[hm. zlomek]
$D$	Průměr	[m]
$E_f$	Energie importovaná do spalovacího procesu (podpurné palivo)	[MW]
$E_w$	Energie uvolněná při spalování odpadu	[MW]
$f$	Darcyho koeficient tření	[-]
$f_B$	Koeficient zohledňující tepelné ztráty zařízení a ztráty odvodem tuhých zbytků spalování ( $f_B=0,97$ )	[-]
$f_b$	Nedopal hořlaviny odpadu	[-]
$g$	Gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$G_r$	Množství tuhých zbytků	[kg/h]
$G_w$	Zpracovávané množství odpadu	[kg/h]
$h$	Výška čerpání kapaliny	[m]
$H_{h,korig}$	Množství vodíku reagujícího na vodní páru	[hm. zlomek]
$HHV_h$	Spalné teplo hořlaviny	[kJ/kg]
$HHV_p$	Spalné teplo paliva	[kJ/kg]
$i$	Entalpie	[kJ/kg]
$i_{AS1}$	Měrná entalpie přísávaného vzduchu	[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
$i_{AS2}$	Měrná entalpie přísávaného vzduchu při výstupní teplotě	[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
$i_{AW}$	Měrná entalpie spalovacího vzduchu	[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
$i_{AZP}$	Měrná entalpie spalovacího vzduchu pro spalování ZP	[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
$I_{circ}$	Energie cirkulovaná (elektrická i tepelná) potřebná pro proces (pohon ventilátorů a čerpadel, předehřev spalovacího vzduchu, předehřev napájecí vody atd.)	[MW]
$I_{imp}$	Energie importovaná nepodílející se na výrobě tepla (zemní plyn využitý v bloku čištění spalin)	[MW]
$i_r$	Měrná entalpie tuhých zbytků při výstupní teplotě	[kJ/kg]
$i_{sw}$	Měrná entalpie vzniklých spalin spalováním odpadu	[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
$i_{sz}$	Měrná entalpie vzniklých spalin spalováním ZP	[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
$i_{zP}$	Měrná entalpie přídavného paliva (ZP)	[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
$LHV$	Výhřevnost	[kJ/kg]
$LHV_w$	Výhřevnost odpadu	[kJ/kg]
$LHV_{zP}$	Výhřevnost přídavného paliva (ZP)	[kJ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup> ]
$MW$	Molární hmotnost	[kg/kmol]
$P$	Příkon	[W]
$Pl_{ef}$	Ukazatel efektivity výroby energie	[-]
$P_{mv}$	Příkon mokré vypírky	[W]

Symbol	Význam	Jednotka
$Q_{exp}$	Celkové množství exportované energie (tepelné i elektrické)	[MW]
$Q_{exp,t}$	Exportovaná tepelná energie	[MW]
$Q_{prod}$	Celková výše vyrobené energie (tepelné i elektrické)	[MW]
$Q_{prod,el}$	Produkovaná elektrická energie	[MW]
$Q_{prod,n}$	Celková produkovaná energie	[MW]
$Q_{ztr}$	Tepelné ztráty spalovací komory	[kJ/h]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
$r_{H_2O}$	Výparné teplo vody	[kJ/kg]
s	Entropie	[kJ/(kg*K)]
$s_w$	Měrné množství spalin vzniklých spalováním odpadu	$[m_N^3/kg]$
$s_{ZP}$	Měrné množství spalin vzniklých spalováním ZP	$[m_N^3/m_N^3]$
$s_{ZP}$	Měrné množství spalin vzniklých spalováním ZP	$[m_N^3/m_N^3]$
$S\eta_e$	Standartní účinnost zařízení	[-]
V	Reálný objem spalin	$[m^3]$
$V_{AS}$	Oobjem přisávaného vzduchu	$[m_N^3/h]$
$V_{AW}$	Množství spalovacího vzduchu pro spalování odpadu	$[m_N^3/h]$
$V_{AZP}$	Množství spalovacího vzduchu pro ZP	$[m_N^3/h]$
$V_{sp}$	Objem spalin	$[m^3]$
$V_{ZP}$	Množství spalovaného podpůrného paliva	$[m_N^3/h]$
w	Rychlost proudění	[m/s]
$W_p$	Obsah vody v palivu	[hm. zlomek]
$\Delta p$	Tlaková ztráta	[Pa]
$\varepsilon$	Drsnost potrubí	[m]
$\eta$	účinnost ventilátoru	[-]
$\eta_e$	Ukazatel stupně využití energie	[-]
$\eta_{mv}$	Účinnost čerpadla	[-]
$\rho$	Hustota média	$[kg/m^3]$

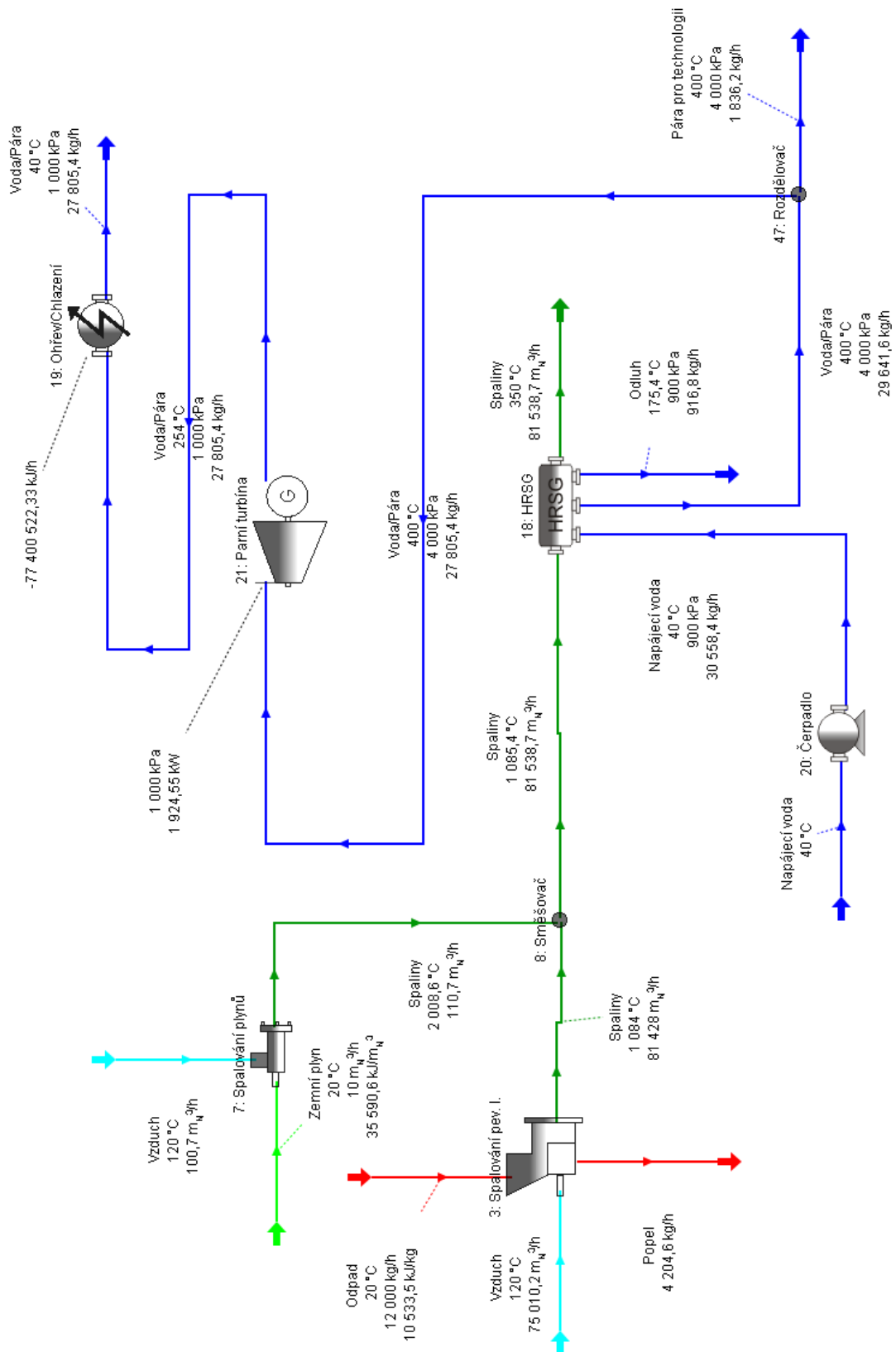
Zkratka	Význam
AC	Aktivní uhlí
BAT	Best Available Techniques (Nejlepší dostupné techniky)
BREF	Reference Document on Best Available Techniques (Referenční dokumenty o nejlepších dostupných technikách)
ESP	Elektrostatický filtr
HRSR	Kotel na odpadní teplo
PAC	Práškové aktivní uhlí
PAU	Polycyklické aromatické uhlovodíky
PCB	Polychlorované bifenyly
PCCD	Polychlorované dibenzo-p-dioxiny
PCCF	Polychlorované dibenzofurany
PE	Ekvivalent primárních zdrojů energie
POP	Persistentní organické látky
SCNR	Technologie nekatalytické selektivní redukce
SCR	Katalytická selektivní redukce
SKO	Směsný komunální odpad
SS	Suché spaliny
TEQ	Toxický ekvivalent
tOE	Tuna olejového ekvivalentu
TZL	Tuhé znečišťující látky
VS	Vlhké spaliny
WHO	Světová zdravotnická organizace
WTE	Zařízení sloužící k energetickému využití odpadů

# PŘÍLOHA 1



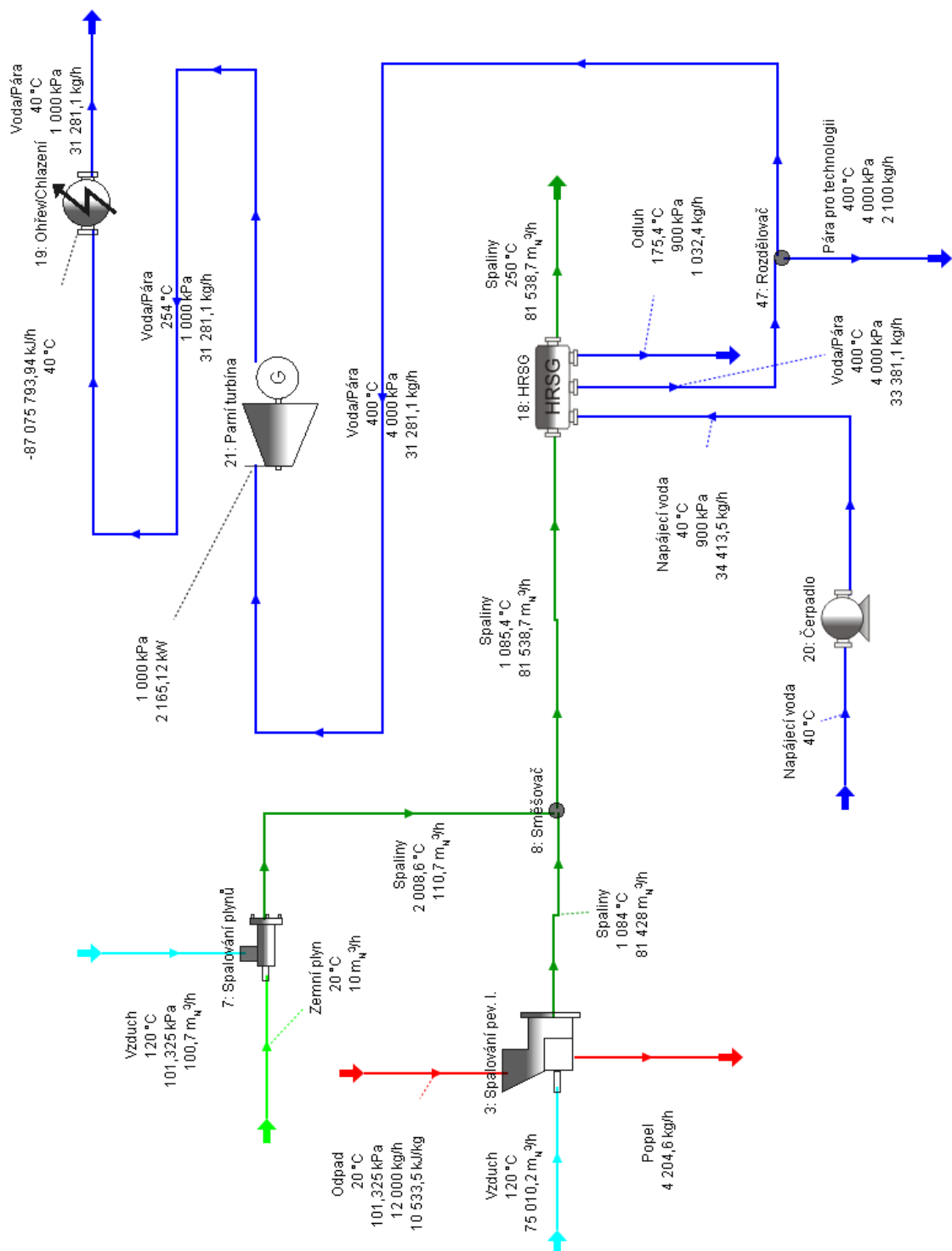
Obr. 32: Model spalovací části a systému využití tepla u Alternativy I

## PŘÍLOHA 2



Obr. 33: Model spalovací části a systému využití tepla u Alternativy II

## PŘÍLOHA 3



Obr. 34: Model spalovací části a systému využití tepla u Alternativy III