



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

STŘEDOTONÁŽNÍ SPALOVNA ODPADŮ - SYSTÉM ČIŠTĚNÍ SPALIN

INCINERATION PLANT OF MIDDLE TREATMENT CAPACITY – FLUE GAS CLEANING SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ KREJČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV BÉBAR, CSc.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Krejčí

který/která studuje v **magisterském 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:

Středotonážní spalovna odpadů - systém čištění spalin

v anglickém jazyce:

Incineration plant of middle treatment capacity – flue gas cleaning system

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro regionální zásobování energiemi bude perspektivně vhodné zvolit kombinaci zdrojů spalujících klasická fosilní paliva s provozem spalovny odpadů.

Menší lokality jsou charakterizovány sezónními výkyvy a menšími nároky na dodávku energií, což limituje zpracovatelský výkon spalovny odpadů zařazené do systému energetického zásobování. Pro středotonážní spalovnu o zpracovatelském výkonu ca 10 až 20 kt/r budou posouzeny alternativní řešení bloku čištění spalin vznikajících spalováním odpadů.

Cíle diplomové práce:

S respektováním požadavků na celoroční i sezónní potřebu tepelné energie v modelovém regionu je požadováno navrhnout vhodnou zpracovatelskou kapacitu středotonážní spalovny odpadů, jež by byla zařazena do regionálního energetického komplexu. Je požadováno navrhnout alespoň dvě moderní alternativy čištění spalin pro splnění platných emisních limitů pro zvolenou středotonážní spalovnu odpadů a diskutovat uvažovaná řešení.

Seznam odborné literatury:

- 1) Stehlik, P., (2014), Up-to-date waste to energy approach, In 5th International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorization, WasteEng 2014, Rio de Janeiro, August 25-28, 2014, Proceedings on CD, ISBN 979-10-91526-03-6
- 2) Santoleri, J. J., Reynolds J. and Theodore L., (2000), Introduction to Hazardous Waste Incineration, Second Edition, John Wiley & Sons, New York, ISBN 0-471-011790-6
- 3) Pavlas, M., Bébar, L., Urban L., Stehlík, P., (2006), 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, August 27-31, 2006, Praha
- 4) Bébar, L., Pavlas, M., Pařízek T., Urban, L., Stehlík, P., (2007), Podmínky efektivního energetického využívání odpadů, In Sborník 54. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2007, Proceedings on CD, 15.-18. října 2007, Srní, Šumava, ISBN: 80-86059-47-2
- 5) Pařízek, T., Bébar, L., Stehlík, P., (2007), Metody pro snížení emisí perzistentích látek vzniklých spalováním odpadů, In 54. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2007, Proceedings on CD, 15.-18. října 2007, Srní, Šumava
- 6) Pavlas, M., Bebar, L., Kropáč, J., Stehlik, P., (2009), Waste to energy - an evaluation of the environmental impact, Chemical Engineering Transactions, 18, p. 671-676
- 7) 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, L332/91-L332/111, 28. 12. 2000
- 8) Directive 2008/98/EC of the European Parliament of 18 November 2008 on the Waste, Official Journal of the European Union, L312/3-30, 22.11.2008

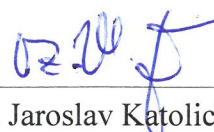
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 24.11.2014



prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
Ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

ABSTRAKT

Analýza regionálního zásobování energiemi ukazuje, že perspektivně může být vhodné zvolit kombinaci zdrojů spalujících klasická fosilní paliva s provozem zařízení pro energetické využití odpadů. Vychází se ze skutečnosti, že regionální potřeby tepelné energie jsou charakterizovány menšími nároky na dodávku energií, avšak relativně významnými sezonními výkyvy požadavků na dodávku tepelné energie. Tyto okolnosti limitují zpracovatelský výkon uvažovaného zařízení, které by mohlo být zařazeno do systému energetického zásobování regionu.

Cílem předkládané diplomové práce bylo pro modelový případ regionu navrhnout zařízení pro energetické využití odpadu odpovídající kapacity a posoudit alternativní řešení bloku čištění spalin vznikajících spalováním odpadů. Součástí práce jsou bilanční rozvahy dvou alternativních řešení systému čištění spalin a to jak z pohledu materiálových, tak i energetických spotřeb. Předkládané hodnocení ekonomické náročnosti alternativních uspořádání bloku čištění spalin zahrnuje stránku provozních nákladů a dopadů na zisk z výroby energie.

ABSTRACT

Analysis of the regional energy supply, shows that suitable alternative may be a combination of primary energy sources with the municipal solid waste-to-energy plant. Starting from the fact that the regional thermal energy needs are characterized by smaller power demand, but relatively significant seasonal fluctuations in heat supply. These factors limit the processing performance of the considered waste-to-energy plant that could be included in the system of regional energy supply.

The aim of the thesis was to propose adequate treatment capacity for regional waste to energy plant and explore alternative solutions in off-gas cleaning for exhaust gases generated during incineration of MSW. The balance sheets of two alternative solutions off-gas cleaning are part of the thesis, both in terms of material and energy consumption. Presented evaluation of economic demands alternative arrangement of off-gas cleaning includes operating costs and the impact on earnings from energy production.

Klíčová slova

Energetické využití odpadu, středotonážní spalovna odpadu, systém čištění spalin, suchá sorpce, katalytická filtrace, selektivní katalytická redukce, provozní náklady

Key words

Waste to energy, incineration plant of middle treatment capacity, off-gas cleaning, dry sorption, catalytic filtration, selective catalytic reduction, operating costs

Bibliografická citace

KREJČÍ, T. *Středotonážní spalovna odpadů – systém čištění spalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Středotonážní spalovna odpadů – systém čištění spalin“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Ladislava Bébara, CSc., a s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Brně dne 26. května 2015

.....
Bc. Tomáš Krejčí

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc., za vstřícnost, ochotu, obětovaný čas a velké množství cenných rad v průběhu vedení práce a po dobu studia. Dále děkuji Ing. Jiřímu Kropáčovi, Ph.D., za konzultaci problematiky softwaru W2E. V neposlední řadě děkuji Ing. Radimu Puchýřovi Ph.D. a všem zaměstnancům společnosti EVECO Brno za velké množství cenných rad a zkušeností během dosavadní spolupráce.

Upřímné poděkování patří také mým rodičům a všem blízkým za jejich podporu, trpělivost a pomoc po celou dobu mého studia.

OBSAH

1. MOTIVACE PROBLÉMOVÉ SITUACE	10
1.1 FORMULACE PROBLÉMU.....	11
1.2 CÍLE ŘEŠENÍ PROBLÉMU	11
2. SOUČASNÝ STAV PRODUKCE ODPADŮ	12
2.1 VÝVOJ PRODUKCE ODPADŮ.....	13
2.2 SOUČASNÝ STAV NAKLÁDÁNÍ S ODPADY	14
3. UPLATŇOVANÉ TRENDY VE STROJNĚ- TECHNOLOGICKÉM ŘEŠENÍ ZAŘÍZENÍ EVO V EU	16
3.1 MÍRA ZASTOUPENÍ TECHNOLOGIE ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ SPALITELNÝCH KO V EU	16
3.2 ROZLOŽENÍ ZPRACOVATELSKÉ KAPACITY ZAŘÍZENÍ EVO	19
3.3 VÝHŘEVNOST JAKO PARAMETR STUPNĚ VYTRŘIDĚNÍ (RECYKLACE)	20
3.4 TECHNOLOGICKÉ ŘEŠENÍ SYSTÉMU ČIŠTĚNÍ SPALIN VYUŽÍVANÝCH ZAŘÍZENÍCH EVO.....	21
4. SYSTÉM ČIŠTĚNÍ SPALIN.....	24
4.1 LEGISLATIVNÍ OMEZENÍ.....	24
4.1.1 Emisní limity stacionárních energetických zdrojů	26
4.2 PRODUKTY VZNIKAJÍCÍ BĚHEM SPALOVÁNÍ ODPADU	27
4.2.1 Redukce množství oxidu uhelnatého a organického uhlíku	28
4.2.2 Tuhé znečišťující látky.....	29
4.2.3 Oxidy síry a halogenovodíky.....	29
4.2.4 Oxidy dusíku.....	29
4.2.5 Těžké kovy.....	30
4.2.6 Perzistentní organické polutanty	30
4.3 SYSTÉM ČIŠTĚNÍ SPALIN JAKO KLÍČOVÁ ČÁST TECHNOLOGIE	31
5. POPIS ALTERNATIVNÍCH ZPŮSOBŮ ČIŠTĚNÍ SPALIN.....	32
5.1 SELEKTIVNÍ NEKATALYTICKÁ REDUKCE NO _x	32
5.2 SUCHÁ SORPCE POMOCÍ NaHCO ₃ A Ca(OH) ₂	33
5.2.1 Neutralizace kyselých složek dávkováním NaHCO ₃	34
5.2.2 Neutralizace kyselých složek dávkováním Ca(OH) ₂	35
5.3 FILTRACE	36
5.3.1 Látková filtrace.....	36
5.3.2 Katalytická filtrace	37
5.4 ADSORPCE POMOCÍ UHLÍKATÝCH SORBENTŮ	38
5.5 SELEKTIVNÍ KATALYTICKÁ REDUKCE NO _x	38

6.	STŘEDOTONÁŽNÍ SPALOVNA ODPADŮ.....	40
6.1	LOKÁLNÍ PODMÍNKY ZAČLENĚNÍ ZAŘÍZENÍ EVO DO REGIONU	40
6.2	ZPRACOVATELSKÝ VÝKON UVAŽOVANÉHO ZAŘÍZENÍ EVO.....	41
7.	STROJNĚ- TECHNOLOGICKÉ ŘEŠENÍ STŘEDOTONÁŽNÍ JEDNOTKY ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ ODPADŮ	43
7.1	POPIS JEDNOTLIVÝCH PROVOZNÍCH SOUBORŮ	43
7.1.1	Skladování odpadu.....	43
7.1.2	Spalovací zařízení.....	43
7.1.3	Utilizace tepla	45
7.1.4	Systém čištění spalin – popis variantních řešení.....	46
7.1.5	Pomocné provozní soubory systému čištění spalin	49
7.2	PARAMETRY NA VSTUPU DO TECHNOLOGICKÉ JEDNOTKY.....	50
7.2.1	Charakteristika spalovaného odpadu	50
7.2.2	Složení spalovacího vzduchu.....	52
7.2.3	Vstupní předpoklady pro tvorbu bilančních modelů	53
7.3	MATERIÁLOVÁ A ENERGETICKÁ BILANCE PROCESU	56
7.3.1	Spalovací zařízení.....	56
7.3.2	Výroba páry.....	57
7.3.3	Systém čištění spalin.....	58
7.3.4	Energetická náročnost systému čištění spalin	60
7.4	DIMENZOVÁNÍ HLAVNÍCH APARÁTŮ.....	66
7.4.1	Suchá sorpce pomocí NaHCO_3	66
7.4.2	Návrh SCR reaktoru.....	67
8.	EKONOMICKÁ BILANCE TECHNOLOGICKÉHO ŘEŠENÍ	70
9.	ZÁVĚR.....	73
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	75
	SEZNAM OBRÁZKŮ	78
	SEZNAM TABULEK.....	79
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	80
	SEZNAM PŘÍLOH	81

1. MOTIVACE PROBLÉMOVÉ SITUACE

Produkce odpadu je bezpodmínečně udávána mírou lidské činnosti a všeobecných potřeb obyvatelstva. Není tedy divu, že v poslední době problematika nakládání s odpadem přešla do stadia „kam s ním“. Kapacity dnešních skládek odpadu, které jsou mimo jiné hojně zastoupené, docházejí a je cílem od nich ustupovat. V návaznosti na tuto situaci je vytvořena řada metod nakládání s odpadem, které se obecně vyznačují vyšší náročností než skládkování. Jednou z těchto metod je i energetické využití odpadu, které doposud nemá v ČR vybudovanou silnou základnu zařízení. Přitom v mnoha zemích Evropy je tato technologie stěžejním způsobem nakládání s odpady.

Primárním účelem zařízení k energetickému využití odpadu (EVO) je především snížení objemu odpadu. Celkově se jedná o snížení až na zhruba 10 % z původního množství a cca třetinu hmotnosti. Vzhledem k průměrné výhřevnosti odpadu okolo 10,5 MJ/kg, je tato výhřevnost dosti podobná výhřevnosti nevytříděného hnědého uhlí pro energetické účely, která se pohybuje od 11 až do 15 MJ/kg [1]. Energie ukrytá ve spalovaném množství odpadu se při spalování uvolňuje a transformuje na energii v podobě tepla či elektrické energie, lze tedy konstatovat, že spalováním odpadu dochází k určité úspoře neobnovitelných fosilních paliv.

Evropským trendem je výstavba zařízení EVO především vyšších zpracovatelských jednotek, to je ovšem vzhledem k produkci odpadu a s tím spojené velké svozové oblasti v řadě lokalit nereálným řešením. Z tohoto důvodu je možným řešením výstavba zařízení nižších zpracovatelských výkonů, která mohou napomoci při řešení odpadové situace přímo v místě jejího vzniku a blízkém okolí (regionálním měřítku). Tato zařízení nižších zpracovatelských kapacit dále mohou představovat jistý potenciál v oblasti částečného zásobování regionu tepelnou energií.

Výroba tepla je spojena především s nutností odbytu v dané lokalitě, což vyžaduje výstavbu tohoto typu zařízení v relativně blízké vzdálenosti lidských obydlí. Tato skutečnost způsobuje vlnu nevole a odporu při plánování výstavby daných zařízení, neboť lidé nejsou obeznámeni s principem funkce spaloven a s účinností jejich systému čištění spalín ani s nastavením legislativního rámce udávajícího přípustnou hranici znečištění těmito zařízeními. V ČR tedy občané zařízení EVO vesměs odmítají, a neexistuje zde tedy silná základna pro budoucí řešení nakládání s odpadem v případě omezení skládkování odpadu.

1.1 Formulace problému

Z důvodu chybějících zařízení EVO nižších zpracovatelských kapacit na území ČR a zmapování situace v oblasti energetického využití odpadu v zemích EU je v rámci diplomové práce (DP) proveden strojně-technologický návrh takového zařízení, které bude vhodné pro energetické zásobování určité předem zvolené lokality. V závislosti na zpracovatelském výkonu zařízení bude navržen optimální systém čištění spalin pro splnění daných emisních limitů, který představuje jednu z nejdůležitějších a nejnákladnějších částí celého zařízení EVO.

1.2 Cíle řešení problému

Prvotním cílem této práce je analýza situace energetického využívání odpadu a demonstrace technologických řešení (kapacita, spalovací zařízení, využívané postupy čištění spalin s ohledem na používané typy sorbentů), k tomuto účelu poslouží přehled jednotlivých technologických řešení zařízení EVO v evropských zemích a státech východní Evropy.

Na základě takto získaných informací a všeobecného respektování požadavků na celoroční a sezonní spotřebu tepelné energie a produkci odpadu v daném regionu je vypracován návrh optimální zpracovatelské kapacity zařízení EVO. Pro zvolenou kapacitu se v rámci DP požaduje zpracování dvou alternativních řešení systému čištění spalin s využitím nejmodernějších způsobů využívaných v této oblasti. Tato řešení musejí zaručovat splnění platných emisních limitů stanovených příslušnou legislativou v oblasti ochrany ovzduší.

V rámci strojně-technologického řešení systému čištění spalin je požadováno zpracování základních bilančních rozvah hlavních uzlů technologie čištění spalin, stanovení energetické náročnosti příslušných spotřebičů a diskuse výsledků.

2. SOUČASNÝ STAV PRODUKCE ODPADŮ

Nynější situace v oblasti nakládání s odpady je převážně vztahována k hierarchii nakládání s odpady, viz obr. 1, která byla prvně zmíněna ve směrnici Evropského parlamentu o odpadech 2006/12/ES [2]. Na základě této směrnice byly členské státy EU vyzvány k implementaci tohoto postupu do svých strategií, aby byl v problematice nakládání s odpady zajištěn srovnatelný rozvoj. Tato směrnice byla promítnuta do české legislativy v zákoně č. 383/2008 Sb. [3], kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech [4].



Obr. 1 Hierarchie nakládání s odpady

Z obr. 1 je patrné, že nejvýznamnějším a zároveň obtížně dosažitelným bodem hierarchie je předcházení vzniku odpadů, což v současné záplavě obalového materiálu není zrovna snadná a do jisté míry reálná cesta. Následuje opětovné využití odpadu, jeho recyklace a materiálové využití. Namísto následné likvidace odpadního materiálu (skládováním či spalováním bez energetického využití) lze využít jeho energetického potenciálu.

Základním pilířem odklonu od skládkování bylo vydání směrnice 1999/31 ES [5], kterou se členské země EU zavázaly ke snížení skládkovaného množství biologicky rozložitelných komunálních odpadů (BRKO) v následujícím rozsahu:

- snížení BRKO ukládaného na skládky o 25 % do roku 2010 v porovnání s množstvím ukládaným v roce 1995,
- snížení BRKO ukládaného na skládky o 50 % do roku 2013 v porovnání s množstvím ukládaným v roce 1995,
- Snížení BRKO ukládaného, na skládky o 75 % do roku 2020 v porovnání s množstvím ukládaným v roce 1995.

Uvedená směrnice byla zapracována do směrnice 2006/12/ES o odpadech [2].

Vymezení základních pojmů

Podle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb. se odpadem rozumí každá movitá věc, které se osoba zbavuje, má v úmyslu nebo povinnost se jí zbavit. [4].

Komunální odpad (KO)

Je to veškerý odpad vznikající na území obce a při činnosti fyzických osob, který je uveden jako komunální odpad v příslušném katalogu odpadů stanoveném vyhláškou Ministerstva životního prostředí č. 381/2001 Sb., vyjma odpadů vznikajících u právnických či fyzických osob oprávněných k podnikání. [4]. Ve zmíněné vyhlášce spadají KO do skupiny 20 a patří k nim i podskupina odpadů z obcí pod katalogovým číslem 15 01.

Komunální odpad jako takový je tvořen ze tří hlavních částí: první z nich tvoří složky odděleného sběru (papír, lepenka, plasty, kovy), dále jsou to odpady pocházející ze zahrad a parků [biologicky rozložitelný odpad (BRKO), zemina atd.] a poslední, nejvíce zastoupenou složkou jsou tzv. ostatní komunální odpady, kam spadá především směsný komunální odpad (SKO) a objemný odpad (OO).

Směsný komunální odpad (SKO)

Za SKO je považován odpad vznikající v domácnostech, popř. v podnicích, které nemají výrobní proces. V současné době zaujímá SKO více jak polovinu celkového množství KO. Podle katalogu odpadu je SKO zařazen pod číslem 20 03 01.

Objemný odpad (OO)

Nedílnou součástí KO je i OO pocházející z domácností, který vzhledem ke svým rozměrům či hmotnosti není možné ukládat do sběrných nádob. Za takovýto odpad je považován především nábytek, různé typy obalového materiálu, podlahové krytiny atd.

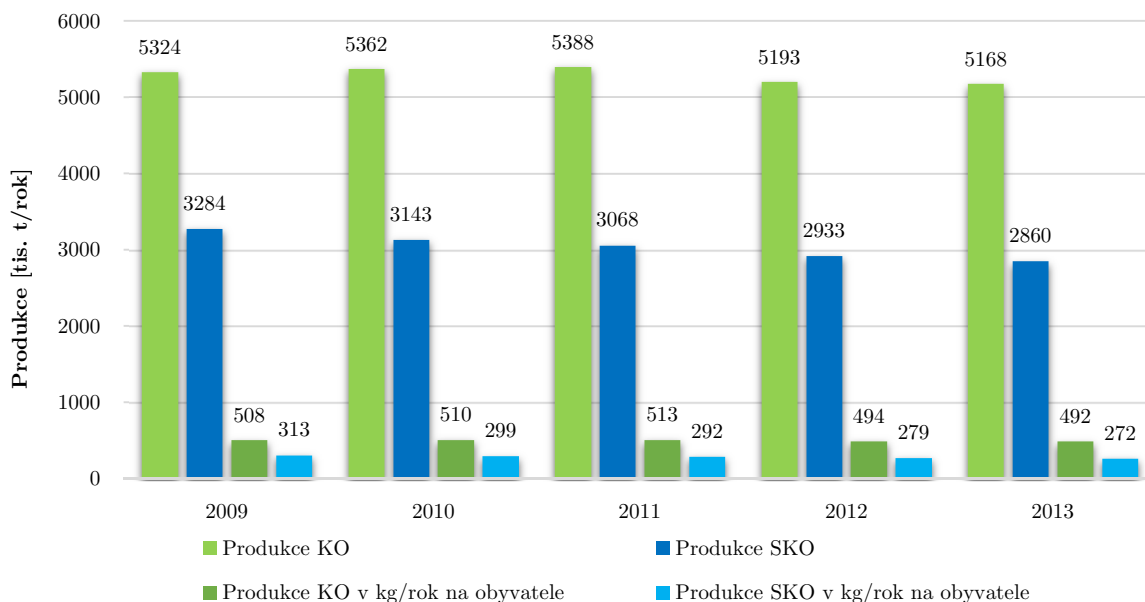
2.1 Vývoj produkce odpadů

Odpady neodmyslitelně patří mezi nejvýznamnější vedlejší produkty spjaté s lidskou činností charakterizovanou především mírou materiálové spotřeby.

Podle statistických údajů informačního systému odpadového hospodářství (ISOH) je produkce KO v uvažovaném období od roku 2009 až do roku 2013 ve stagnujícím stavu a kolísá okolo množství 5,3 až 5,2 mil. tun ročně, viz obr. 2.

V uvažovaném období je průměrná produkce KO po přepočtu na obyvatele 503 kg/rok. Vezmeme-li v úvahu vývoj v mezidobí roku 2009 až 2013 poklesla produkce KO o 16 kg. Z pohledu vývoje produkce SKO (cca 55 % KO) lze pozorovat ještě strmější pokles, který například v období mezi lety 2012 a 2013 dosahuje meziročního poklesu 2,5 %. V uvažovaném mezidobí roku 2009 a 2013 poklesla produkce o více než 40 kg na obyvatele.

Průměrná produkce SKO je 291 kg na obyvatele za rok. Snížení produkce SKO je způsobeno jak poklesem produkce KO, tak především zvýšením separace složek odděleného sběru. [6]



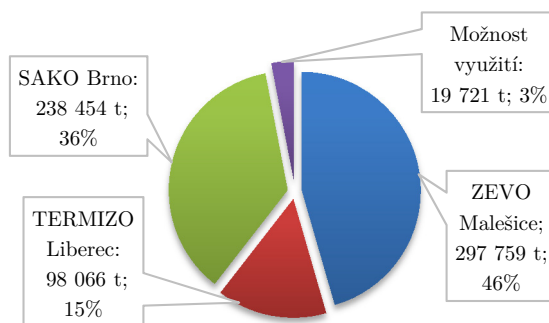
Obr. 2 Produkce KO a SKO v ČR v letech 2009 až 2013 (data ISOH) [6]

2.2 Současný stav nakládání s odpady

Problematika nakládání s vysokým množstvím odpadů je v posledním období hojně diskutovaným tématem a to především z pohledu ochrany životního prostředí. Vezmeme-li v úvahu situaci v nakládání s odpady v ČR, dospějeme k závěru, že více jak polovina (53,6 %) [6] produkovaného komunálního odpadu (KO) končí na skládkách odpadu. Z dlouhodobého pohledu, je možné pozorovat trend postupně se snižujícího podílu konečné likvidace odpadu uložením na skládky, neboť dochází k obecnému zvyšování podílu ostatních způsobů nakládání s KO. V roce 2009 představovalo množství skládkovaného KO 64 % z celkové produkce, kdežto v roce 2013 již 53,6 %. [6]

V uvažovaném mezidobí došlo ke zvýšení využití KO o 13 %, nyní představuje již 42 %. Takto markantní nárůst je způsoben především zvýšením podílu materiálového využití složek KO, kde došlo k nárůstu o 7 % vůči roku 2009.

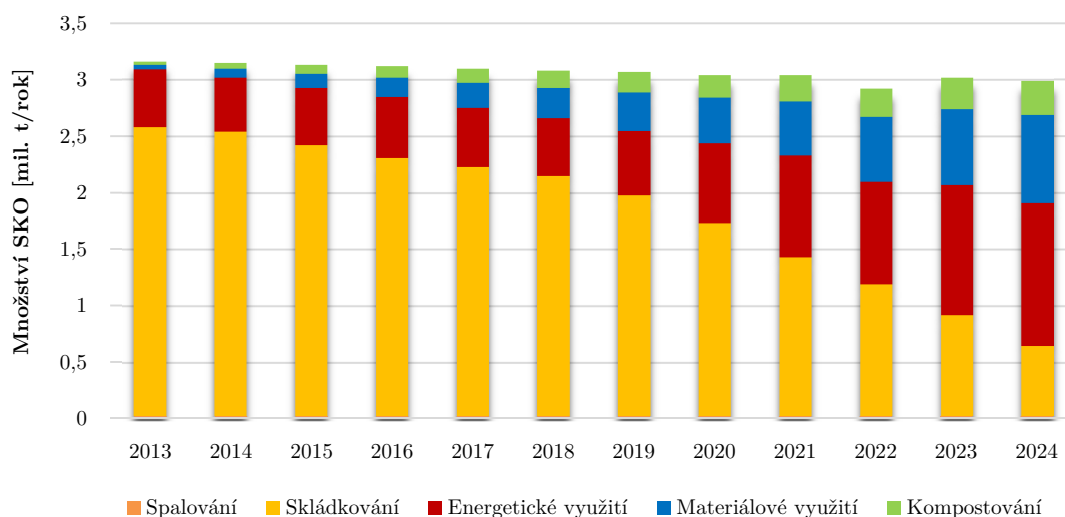
Energetické využití KO vykazuje ve sledovaném období nárůst o cca 6 %, na němž se celkově nakládání s KO podílí z 12 %, cca 634 tis. tun ročně. Celková kapacita všech 3 zařízení (SAKO Brno, TERMIZO Liberec, ZEVO Malešice) se pohybuje okolo 654 tis. tunami ročně, což představuje využití stávající kapacity na 97 %, jak uvádí Suzová [7]. Po uvažované dostavbě zařízení EVO v Chotíkově lze počítat výhledově s navýšením kapacity o 100 tis. tun a tím s využitím cca 14,5 % z celkové produkce KO.



Obr. 3 Energetické využití odpadu v roce 2012 v zařízeních EVO ČR [7]

Vzhledem k současné situaci odklonu SKO od skládkování, jenž byl podpořen zákonem č. 229/2014 Sb., kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů [8], stanovuje se ke dni 1. 1. 2024 zákaz ukládání veškerého SKO, recyklovatelného a využitelného odpadu na skládky. Skutečností je fakt, že stávající kapacity zařízení určených ať už k materiálovému či energetickému využití nedosahují potřebných kapacit pro pokrytí odkloněného množství odpadu.

V návaznosti na výše zmíněný odklon od skládkování SKO byla v rámci nového POH vypracována prognóza nakládání s SKO v období od roku 2013 až do roku 2024, která jasně poukazuje na zvýšení podílu energetického využití SKO o téměř 60 %, viz obr. 4. Takto markantní nárůst zpracovatelské kapacity nelze zvládnout bez výstavby dalších projektů, které však v současné době naráží na odpor ze strany ekologických skupin a v neposlední řadě nejsou prozatím nijak podporovány ani ze strany státu. Právě chybějící podpora ze strany státu by mohla napomoci výstavbě těchto zařízení a tím i splnění závazku odklonění SKO od skládkování.



Obr. 4 Prognóza nakládání s SKO v ČR v letech 2013 až 2024 (data POH) [6]

3. UPLATŇOVANÉ TRENDY VE STROJNĚ- TECHNOLOGICKÉM ŘEŠENÍ ZAŘÍZENÍ *EVO* V EU

V rámci diplomové práce byla vytvořena aktualizovaná databáze zařízení *EVO* (viz příloha č. 3) mapující současnou situaci v evropských zemích. Databáze posloužila k analyzování současné situace energetického využití KO a demonstrování používaných technologických řešení. V této kapitole jsou detailně statisticky zpracována data získaná při tvorbě databáze spolu s popisem vyplývajících dílčích závěrů.

Součástí databáze jsou údaje o 454 zařízeních ve 20 státech Evropy. Databáze sestává ze 4 jednotlivých bloků:

- základní údaje o spalovně,
- instalovaná kapacita spaloven,
- konfigurace systému čištění spalin,
- typy použitých sorbentů a dosahované množství výroby energií.

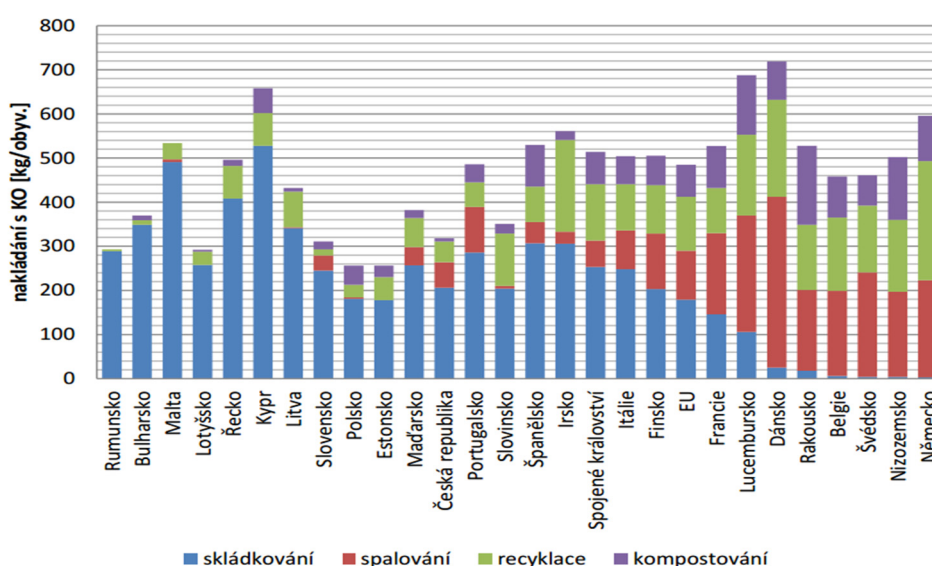
K vytvoření databáze bylo využito stávajících dat organizace ISWA (International Solid Waste Association) [9] a jejich doplnění o data poskytovaná provozovateli jednotlivých zařízení.

3.1 Míra zastoupení technologie energetického využití spalitelných KO v EU

Současná situace v oblasti nakládání s KO je udávána mírou produkce a způsoby využití vzniklého množství. V posledních desetiletích byl patrný trend vzrůstající produkce KO v závislosti na stoupající životní úrovni obyvatelstva, který byl nejvíce znatelný v rozvinutějších státech Evropy. Postoj jednotlivých zemí k problematice nakládání s odpady je značně rozdílný (viz obr. 5). Situace je především ovlivněna stávající platnou legislativou jednotlivých států a jejich postojem k plnění závazků vůči Evropské směrnici o omezení skládkování odpadů (směrnice 1999/31/EC).

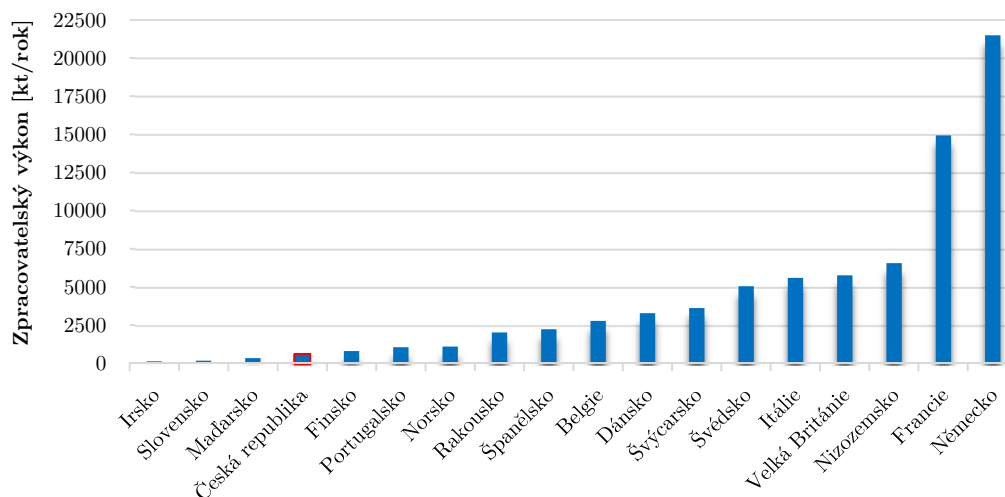
Z hlediska způsobů nakládání s odpady je v méně rozvinutých státech, mezi které patří mimo jiné i ČR, z větší míry stále upřednostňováno ukládání KO na skládky před jiným způsobem využití (obr. 5).

Naproti tomu v rozvinutějších státech je podíl skládkování odpadu ve srovnání s ostatními metodami nakládání mizivý a soustředí se především na materiálovou recyklaci, energetické využití a v neposlední řadě na kompostování biologicky rozložitelné frakce KO.



Obr. 5 Produkované množství SKO a způsoby nakládání v evropských zemích [10]

Všeobecný postoj jednotlivých zemí k problematice WtE je patrný z následujících grafů, viz obr. 6 a obr. 7, popisujících míru zastoupení energetického využití KO. Situace plně koresponduje s výsledky udávanými v obr. 5, rozvinutější evropské státy disponují značným počtem zařízení EVO a jsou tedy schopny redukce velkého množství KO za účelem energetického využití.



Obr. 6 Množství spalovaného odpadu v evropských státech (využitá data z období let 2009 až 2013)

Z obr. 6 a obr. 7 dále vyplývá, že energetické využití odpadu v ČR je výrazně pod průměrem států západní Evropy, které v posledních letech značně zvýšily svou zpracovatelskou kapacitu a jsou tedy schopny redukovat velkou měrou své produkované množství spalitelných KO.

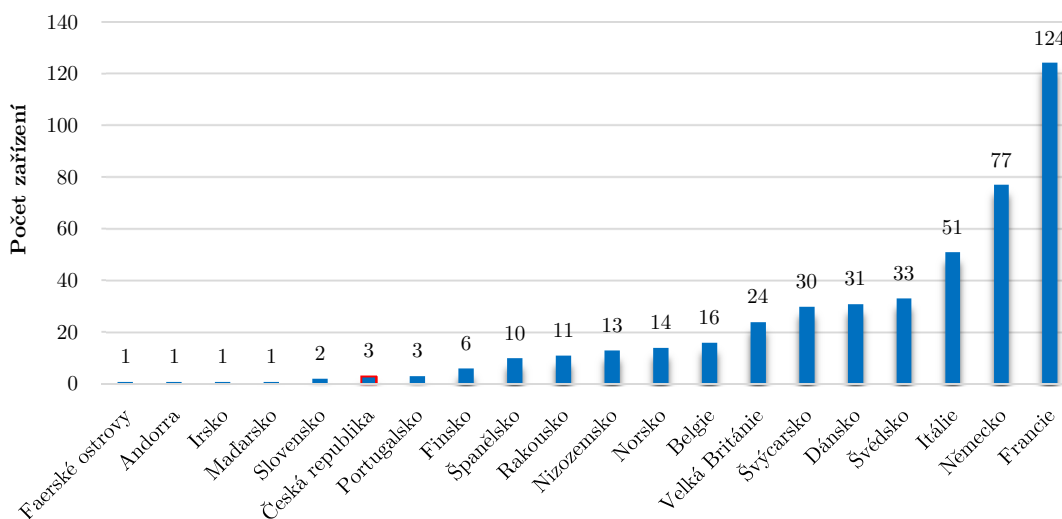
Faktorem přímo ovlivňujícím konečný výběr metody snižování množství odpadu je především legislativa příslušného státu, která určuje způsoby nakládání s KO.

Z následujícího obr. 7 je vidět značný nárůst v podobě počtu zařízení EVO ve státech, které množství KO ukládaného na skládky omezily (např. Francie, Itálie), či úplně zakázaly (např. Německo, Švýcarsko, Dánsko, Rakousko, Velká Británie).

Do jisté míry se do počtu zařízení k energetickému využití odpadu promítá i fakt, že spalitelný KO se stal zajímavou komoditou. Ačkoli jsou spalovny zatíženy vysokou počáteční investicí do jejich výstavby, představují v případě dostatečného odběru tepelné energie a produkce elektrické energie značný zdroj příjmů.

Jak již bylo zmíněno, spalovny odpadu vyžadují značné počáteční investice, což znamená, že se jedná o vysoce nákladný způsob využití KO. Počáteční investice se pohybují v jednotkách miliard korun (jedná-li se o zařízení větších kapacit). Zde je nutno podotknout, že vysoký počet zařízení využívajících spalitelný KO se nachází spíše v rozvinutějších státech EU, jako jsou např. Německo, Švédsko, Dánsko a Belgie, které mají HDP vyšší než např. Maďarsko, ČR a Slovensko.

V minulosti byla výstavba spaloven podporována EU v formou dotací, které v některých případech představovali až 40 % celkového objemu počáteční investice. Tato značná podpora se odrazila ve vlně výstavby velkého počtu zařízení především v Německu.



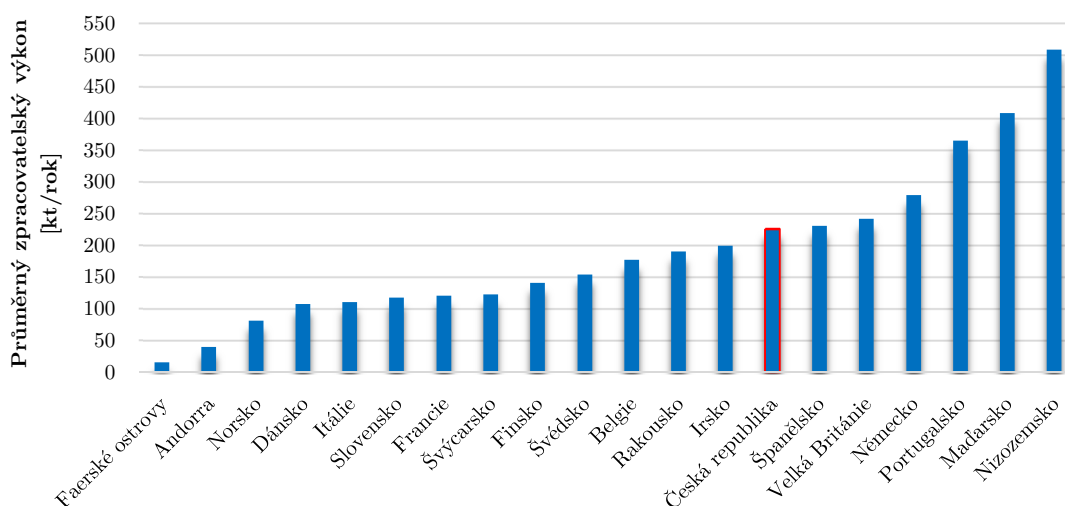
Obr. 7 Počet spaloven v jednotlivých státech Evropy

Z obr. 9 je patrné převládající využití zařízení s kapacitou okolo 200 kt/rok. Situace je ovlivněna především velkou mírou zastoupení zařízení převyšujících kapacitu 250 kt/rok (viz obr. 9), kde je soustředěno 54 % odpadu z celkové zpracovatelské kapacity.

V zásadě lze konstatovat, že vyšší počet malokapacitních zařízení EVO může řešit situaci v místě vzniku odpadu a blízkém okolí. Nedochozí tak k velkému zatížení životního prostředí vlivem dopravy požadovaného množství odpadu na velké vzdálenosti. Z hlediska optimalizace kapacity je nutné uvažovat o způsobu využití vyrobené energie (nastavení kogeneračního režimu na výrobu elektřiny, popřípadě na výrobu tepla).

3.2 Rozložení zpracovatelské kapacity zařízení EVO

Celková zpracovatelská kapacita stávajících 454 zařízení EVO činí 79 mil. tun odpadu ročně, to znamená, že z celkové produkce odpadu cca 257 mil. t/rok je možno redukovat cca 30 % z celkového množství vytvořených odpadů. Ve skutečnosti dochází ke spalování cca 22 %, což svědčí o existenci určité zpracovatelské rezervy.



Obr. 8 Průměrná kapacita spaloven v jednotlivých státech Evropy

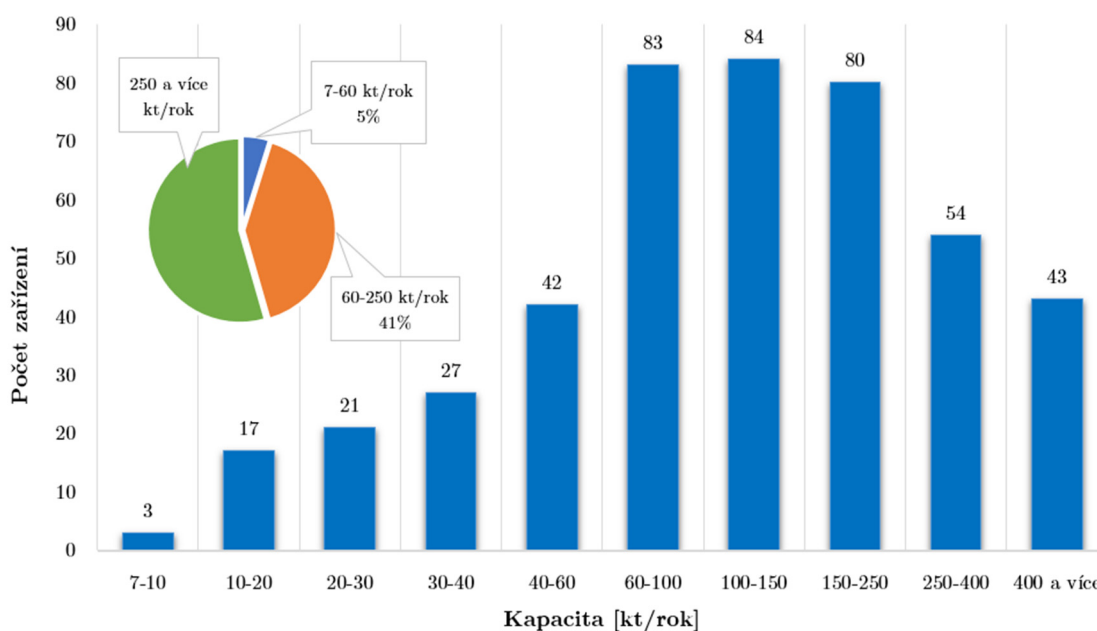
Jíž zmíněné převládající zastoupení zařízení převyšujících svojí kapacitou 250 kt/rok je způsobeno v první řadě výstavbou zařízení v evropských metropolitních městech, které vzhledem ke značné produkci odpadu řeší situaci zařízeními vyšších kapacit.

Využití zařízení o takové kapacitě nemá v ČR opodstatněný význam, neboť jediné metropolitní město zařízením EVO takového typu již disponuje.

Jak vyplývá z obr. 9, v celkovém počtu 247 zařízení EVO tzv. střední kapacity (60 až 250 kt/rok) je zpracováno 41 % (32,4 mil. t/rok) odpadu. Uvažujeme-li v rámci ČR průměrnou roční produkci spalitelného odpadu cca 300 kg/os, jsou tato zařízení svojí kapacitou vhodná spíše pro řešení v oblasti krajských měst, která disponují dostatečnou produkcí spalitelných druhů KO i možností upotřebení produkovaného tepelné energie.

Nezanedbatelnou komoditou spaloven odpadů jsou i zařízení „malých kapacit“ (7 až 60 kt/rok), kde je soustředěno asi 5 % (4 mil. t/rok) zpracovatelského množství KO, k redukcí daného množství KO je využito 110 zařízení EVO. V závislosti na množství zařízení v této oblasti lze předpokládat i nadále vývoj v podobě výstavby nových zařízení, která povedou k řešení situace nakládání s odpady v regionálním měřítku. Hlavním ovlivňujícím parametrem volby těchto zařízení je odbyt tepla v dané lokalitě, neboť vzhledem k relativně nízkému množství vyrobené páry nižších parametrů je množství vyrobené elektrické energie silně limitováno.

Dosažitelná výroba elektrické energie u zařízení „malých kapacit“ není natolik vysoká, aby podstatně ovlivnila energetickou bilanci regionu.



Obr. 9 Rozložení zpracovatelské kapacity podle instalovaného výkonu zařízení v EU

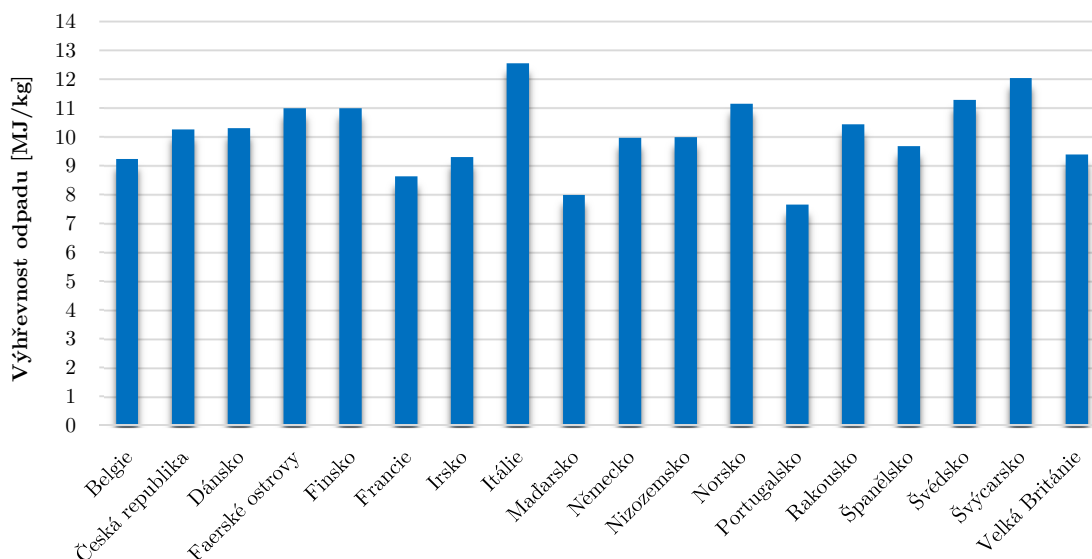
3.3 Výhřevnost jako parametr stupně vytrídění (recyklace)

Vzhledem k energetickému využití spalitelného SKO v zařízeních EVO je jedním ze základních parametrů jeho dostatečná výhřevnost. Složení SKO je různorodé a mění se v závislosti na mnoha faktorech, kterými jsou především původ odpadu a stupeň vytrídění. Zejména stupeň vytrídění hraje hlavní roli ve výhřevnosti SKO, neboť separací určitých složek odpadu (kovy, sklo, biologický odpad) se dosáhne výrazného zvýšení výhřevnosti, kdežto naopak separací látek typu papír nebo plasty výhřevnost snižujeme.

Jelikož byly stanoveny nové cíle EU v oblasti recyklace materiálů, je do budoucna nutné uvažovat i se snížením výhřevnosti SKO, neboť cílem je zvýšení recyklace SKO na 70 %. Snížení výhřevnosti odpadu se projeví na klesajícím výkonu zařízení, která vzhledem k nasmlouvané dodávce energií budou muset situaci kompenzovat vyšším množstvím SKO.

Průměrná hodnota výhřevnosti SKO využívaná v zařízeních EVO se v jednotlivých státech Evropy pohybuje v intervalu od 7,5 do 12,5 MJ/kg, viz obr. 10. Rozdílné hodnoty výhřevnosti v jednotlivých státech jsou způsobeny především stupněm vytrídění recyklovatelných složek, popřípadě zařazením dotřídovacích linek separujících jednotlivé frakce k dalšímu využití.

U některých států jako jsou Itálie nebo Švýcarsko, vykazujících spalování odpadu o výhřevnosti okolo 12 MJ/kg, je možné předpokládat významný podíl obsahu obalového a živnostenského odpadu spolu se separací biologické složky odpadu, která obvykle zaujímá bezmála 40 % objemu SKO. Opakem těchto států jsou Portugalsko, Maďarsko, kde se hodnota výhřevnosti odpadu pohybuje okolo 8 MJ/kg.



Obr. 10 Průměrná hodnota výhřevnosti spalovaného odpadu ve státech EU

3.4 Technologické řešení systému čištění spalin využívaných v zařízeních EVO

Jedním z nejdůležitějších provozních souborů celého zařízení EVO je bezesporu systém čištění spalin vznikajících při termické oxidaci odpadu. Volba vhodného typu čištění spalin se odvíjí od místních legislativních požadavků udávajících emisní limity a také od investičních a provozních nákladů na danou technologii.

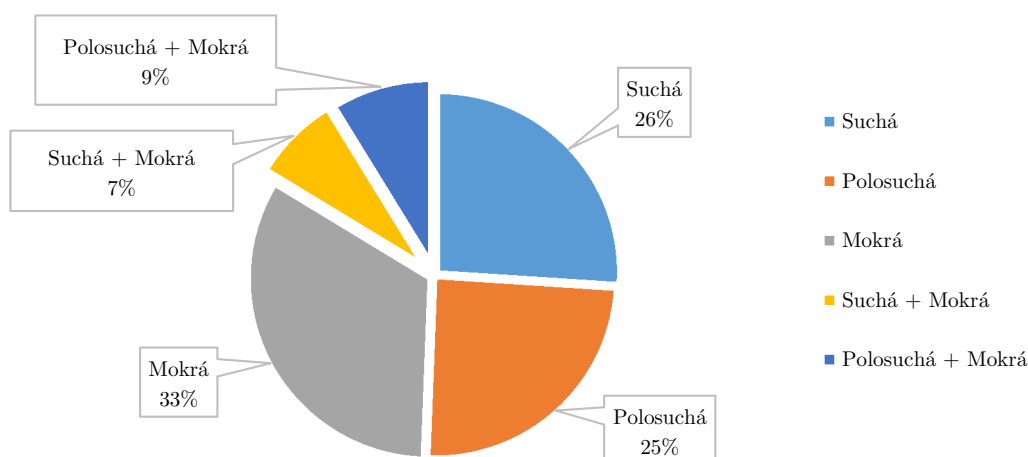
Rozdílné emisní limity v jednotlivých státech EU zásadně ovlivňují volbu vhodného způsobu čištění spalin s ohledem na dosažitelné účinnosti jednotlivých technologií čištění spalin.

Z celkového pohledu rozlišujeme 3 základní typy technologie čištění spalin: suché čištění s využitím práškových sorbentů [$\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaHCO_3], polosuché (roztok alkalické suspenze vápenného mléka, při kontaktu se spalinami dochází k odpaření vody) a mokré [propírání spalin roztokem NaOH , či vápenným mlékem $\text{Ca}(\text{OH})_2$].

Detailnější popis vybraných technologií čištění spalin je uveden v kapitole 4.3, popřípadě v referenčním dokumentu BREF/BAT [11], který stanovuje soubor nejlepších dostupných technologií sloužících k čištění spalin.

V rámci databáze zařízení EVO byla statisticky zpracována data o způsobech čištění spalin spolu s četností zastoupení jednotlivých aparátů vyskytujících se v reálných provozních zařízeních. Součástí databáze jsou údaje o používaných typech sorbentů.

Četnost využití jednotlivých způsobů čištění spalin je na obr. 11. Zastoupení jednotlivých metod v celkové škále uvažovaných zařízení je takřka rovnocenné, s převládající volbou suchého a polosuchého čištění spalin.



Obr. 11 Zastoupení zvolených technologií čištění odpadních plynů

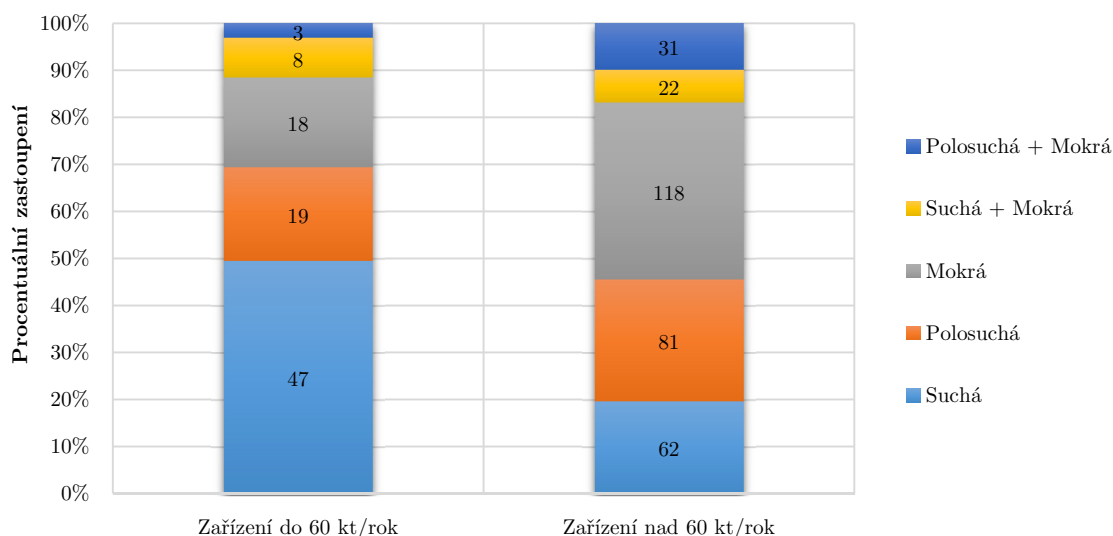
Jak již bylo řečeno, odvíjí se volba vhodné metody čištění spalin od množství produkovaných spalin a jejich znečištění, je tudíž přímo závislá na množství zpracovaného odpadu, což potvrzuje obr. 12.

Četnost aplikace jednotlivých technologií čištění spalin u zařízení EVO je znázorněna na obr. 12, z něhož je jasně patrná převládající volba suchého čištění spalin u zařízení s nižší kapacitou. Vyšší četnost využití dané metody je dána především jednodušší technologickou skladbou a nižšími investičními a provozními náklady. Účinnost suchého čištění se odvíjí od typu použitého sorbentu a typu filtračních elementů.

Z pohledu zařízení vyšších kapacit převládá především metoda mokrého čištění, která je podle dokumentu BREF/BAT považována za neúčinnější metodu odstraňování kyselých polutantů. Četnost využití mokrého čištění je způsobena i dobou realizace daných zařízení, neboť této technologii se hojně využívalo zejména v předchozích letech. Tato metoda se vyznačuje především vysokými investičními náklady na stavební část i vysokými provozními náklady vyplývajícími z nutnosti zpracování použitého pracího roztoku.

V nezanedbatelné míře se využívá i kombinace metod čištění, což především u zařízení vyšších zpracovatelských kapacit vede k úspoře provozních nákladů vlivem využití primárně suché a polosuché metody s následným pokrytím koncentračních špiček sekundární mokrou metodou.

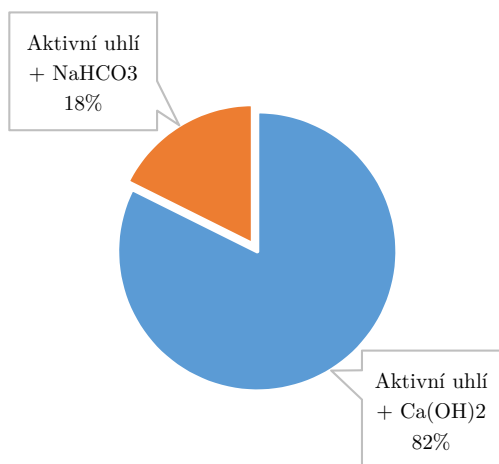
Technologie suchého čištění spalin je dostatečně účinná pro splnění emisních limitů kyselých složek (HCl, SO₂, HF). Ke snížení obsahu množství kyselých složek se využívá dávkování vápenatých nebo sodných práškových sorbentů, které při procesu čištění chemicky reagují s kyselými složkami za vzniku pevných solí.



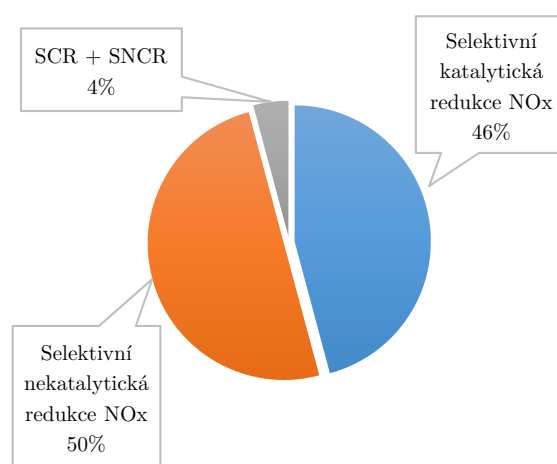
Obr. 12 Závislost zpracovatelské kapacity na volbě systému čištění spalin

Kombinace suchého čištění spalin a dávkování aktivního uhlí se pozitivně projevuje na snížení emisí těžkých kovů a látek typu PCDD/F. Na obr. 13 je znázorněno zastoupení jednotlivých typů sorbentů v kombinaci s aktivním uhlím, využívaných v zařízeních EVO. Převládající využití kombinace vápenatého hydrátu $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ a aktivního uhlí je způsobena především nižší cenou vápenného hydrátu a zároveň rozdílnými pracovními teplotami mezi hydrogenuhličitanem sodným (NaHCO_3) a aktivním uhlím.

Obr. 14 ukazuje mírně převládající využití metody SNCR oproti SCR. Vysoké zastoupení metody SCR je primárně způsobeno převahou zařízení vyšších kapacit, pro které je metoda SNCR kvůli vysokým provozním nákladům neudržitelná. Dále to může být způsobeno i zpřísnujícími se limity na koncentrace NO_x , kterých použitím SNCR není možno dosáhnout.



Obr. 13 Kombinace sorbentů při suché metodě



Obr. 14 Zastoupení metod redukce NO_x

4. SYSTÉM ČIŠTĚNÍ SPALIN

Následující kapitola bude zaměřena na klíčové aparáty systému čištění spalin, s cílem prokázat schopnosti redukce všech uvažovaných znečišťujících látek vznikajících během spalování odpadu, s ohledem na plnění emisních limitů stanovených příslušnou místní legislativou. Budou diskutovány technologie využití při návrhu systému čištění spalin pro zařízení EVO s ohledem na zpracovatelský výkon zařízení.

4.1 Legislativní omezení

Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, příslušná legislativa státu přímo či nepřímo ovlivňuje způsoby nakládání s SKO. V této kapitole jsou popsány hlavní předpisy, které stanovují omezující podmínky a nároky na proces energetického využití, a to především na systém čištění spalin.

Směrnice Evropského parlamentu a rady 2000/76/ES [12]

Tato směrnice se vztahuje na zařízení určená ke spalování pevných i tekutých odpadů a také ke spoluspalování, při kterém mohou vznikat emise znečišťující ovzduší, vodu či půdu. S ohledem na tyto produkty deklaruje striktní požadavky na zařízení ke spalování a spoluspalování.

- Spalovací zařízení musí být navrženo tak, aby spaliny vznikající spalováním byly za posledním přívodem spalovacího vzduchu podrobeny teplotě min 850 °C po dobu minimálně 2 sekund. Tohoto stavu musí být dosaženo i při nejméně příznivých podmínkách.
- Každá linka spalovacího zařízení musí být vybavena nejméně jedním pomocným hořákem, který v případě poklesu teploty pod úroveň 850 °C za posledním přívodem spalovacího vzduchu automaticky sepne a zaručí požadovanou teplotu v dohořivací komoře. Hořák musí být použit i v případě najíždění a odstavování zařízení.
- Provoz zařízení musí zaručovat takovou úroveň spalování, aby bylo dosaženo maximálního obsahu organických látek v popelu 3 % (nedopalu) nebo aby ztráta žíháním suchého zbytku spalování nepřevýšila 5 %.
- Spalovací zařízení musí být automatizovaným systémem, který zastaví dávkování odpadu při nedodržení a nedosažení teploty za posledním přívodem spalovacího vzduchu 850 °C, když bude vlivem poruch či selhání překročena jakákoli mezní koncentrace emisí.
- Spalovací zařízení musí být vybaveno, navrženo a provozováno tak, že bude dosaženo plnění mezních hodnot emisí do ovzduší stanovených místní legislativou.
- Veškeré vznikající teplo po spálení má být využito co největší měrou.

- Dopravování a skladování popelovin vznikajících z čištění spalin musí být navrženo tak, aby nedocházelo k rozptýlení do okolí, tzn. skladování v zásobnících či kontejnerech.
- V zařízení ke spalování musí být zajištěno kontinuální měření následujících látek: NO_x, CO, TZL, TOC, HCl, HF SO₂ a NH₃.
- Nejméně dvakrát ročně musejí být ověřovány koncentrace těžkých kovů a dioxinů a furanů (PCDD/F), avšak minimálně jedno měření musí být provedeno v intervalu 3 měsíců po dobu prvních 12 měsíců od uvedení do provozu.
- Výsledky měření koncentrací znečišťujících látek musejí být přepočteny na normální podmínky (teplota 273,15 K, tlak 101,325 kPa) a na obsah kyslíku v suchých spalinách 11 %.

Vyhláška č. 415/2012 Sb., o přípustné úrovni znečišťování [13]

Do vyhlášky jsou implementovány jednotlivé body výše popsané směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/76/ES [12]. Navazuje na zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, [14] a stanovuje specifické emisní limity, viz tab. 1, a podmínky pro stacionární zdroje tepelně zpracovávající odpad. Současně jsou deklarovány způsoby provedení a vyhodnocování emisních měření.

Hodnoty emisních limitů pro zařízení EVO a ostatní zdroje jsou pro snadnější srovnání vztaženy na normální podmínky (teplota: 0 °C, tlak: 101,325 kPa) a přepočteny na suché spaliny při uvažovaném referenčním obsahu kyslíku 11 obj. %. Koncentrace sledovaných látek jsou vyjádřeny v mg/m³_N. Níže stanovenými emisními limity je zaručeno, že limity pro spoluspalování odpadu nebudou vyšší, než u stacionárních zdrojů spalujících čistě jen odpad.

Znečišťující látka	Spalování odpadu	Pevné palivo	Biomasa	Kapalné palivo	Plynné palivo
TZL	10,00	20	30	17	-
TOC	10,00	-	-	-	-
SO ₂	50,00	1000	1500	833	-
NO _x	200,00	333	500	72	56
CO	50,00	200	500	44	28
HCl	10,00	-	-	-	-
HF	1,00	-	-	-	-
PCDD/F	0,1	-	-	-	-
Hg	0,05	-	-	-	-
Cd	0,05	-	-	-	-
ostatní těžké kovy	0,50	-	-	-	-

Tab. 1 Srovnání emisních limitů pro zdroje 5 až 50 MWt [13]

¹ LTO – zkratka pro lehký topný olej, pro který platí koncentrace NO_x 250 mg/m³_N.

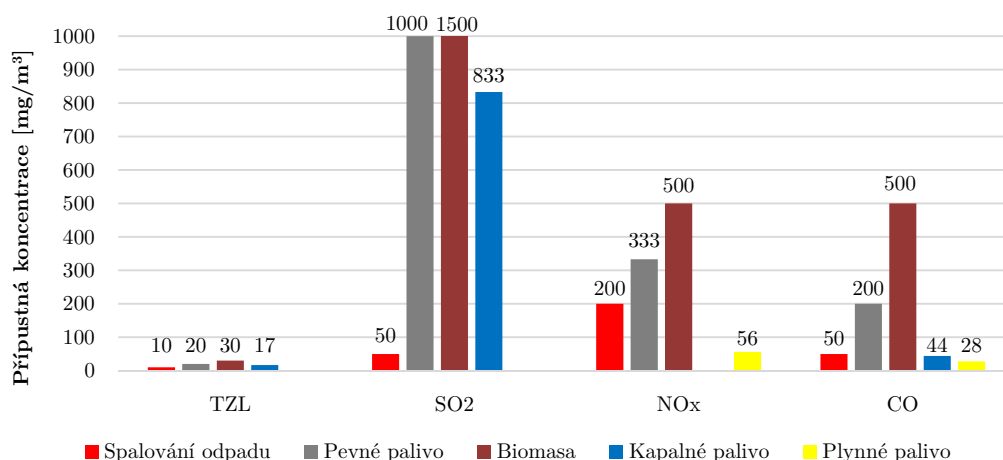
Zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší [14]

Tento zákon je plně v souladu se směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU [15] o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění - IPPC). Kromě všeobecného usnesení o prevenci vzniku emisí zákon stanovuje následující:

- V případě, že z emisního měření vyplývá překračování specifických emisních limitů v době delší jak 4 hodiny, je provozovatel nucen bezodkladně zařízení odstavit a až do doby, než dojde k odstranění příčin zařízení neprovozovat.
- Provozovatel je nucen bezprostředně kontaktovat inspekci o překročení specifických emisních limitů.
- Kromě kontinuálního měření stupně znečištění je v zařízeních EVO nutné kontinuálně měřit teplotu ve spalovací komoře, koncentraci O₂, teplotu a vlhkost vyčištěných spalin.

4.1.1 Emisní limity stacionárních energetických zdrojů

Pro srovnání stávající situace platných emisních limitů pro zařízení EVO jsou v tab. 1 uvedeny hodnoty platných emisních limitů podle vyhlášky č. 415/2012 [13] pro zařízení k výrobě tepla a elektrické energie (5 až 50 MW_t). Markantní rozdíl vzhledem k ostatním zdrojům jasně stanovuje míru znečištění zařízeními EVO, a je tedy patrné, že zatížení životního prostředí těmito zařízeními není nijak zásadní v porovnání například s uhelnými kotli a kotli na biomasu. Dalším rozdílem oproti stacionárním zdrojům je množství sledovaných látek pokrývající prakticky všechny škodliviny vznikající spalováním. Současné požadavky na redukci emisí jsou tak přísné, že například hodnoty CO a TZL jsou u spaloven stanoveny na nižší úrovni než u kotlů na zemní plyn, a v případě SO₂ jsou limity o více jak 95 % nižší než u kotlů na biomasu a pevné palivo. Pro názornost jsou na obr. 15 graficky porovnány emisní limity vybraných znečišťujících látek platné pro spalování odpadů s limity pro stacionární zdroje spalující rozdílná pevná paliva.



Obr. 15 Srovnání emisních limitů vybraných látek pro zdroje 5 až 50 MW_t

4.2 Produkty vznikající během spalování odpadu

Technologie energetického využití odpadu, ať již komunálního či průmyslového je doprovázena produkcí plynných odpadních látek (emisí), které je zapotřebí před vypuštěním do atmosféry snížit na požadované hodnoty. Množství emisí vypouštěných do ovzduší závisí především na chemické struktuře spalovaného odpadu, dokonalosti spalovacího procesu a skladbě aparátů systému čištění spalin.

Spaliny ze spalování odpadu jsou mnohasložkovou směsí chemických prvků a sloučenin, ať už látek bez nebezpečných vlastností, jakými jsou dusík, oxid uhličitý a vodní pára, tak z pohledu životního prostředí právě složek s neblahým účinkem. Mezi tyto složky patří především škodliviny kyselého charakteru, jako jsou oxidy síry zastoupené oxidem siřičitým (SO₂), chlorovodík (HCl) vznikající termickým rozkladem chlorovaných plastů a fluorovodík (HF), eventuálně bromovodík (HBr) vznikající rozkladem příslušných halogenovaných sloučenin. Podstatný podíl znečišťujících látek opouštějících spalovací komoru zaujímají úletové částice TZL a v neposlední řadě se ve spalinách vyskytují sloučeniny těžkých kovů, především oxidy Cd, Hg, Cr, Cu, Zn, Pb a výšemolekulární organické sloučeniny, převážně polyaromatického charakteru.

Hlavní produkty	CO ₂	oxid uhličitý	finální produkty
	H ₂ O	voda ve formě vodní páry	
Oxid uhelnatý a oxidy síry	CO	oxid uhelnatý	optimalizace spalování
	SO ₂	oxid siřičitý	<ul style="list-style-type: none"> • suché čištění pomocí alkalických (vápenných či sodných) práškových adsorbentů, • mokrá sorpce kontaktem a alkalickými činidly [NaOH, Ca(OH)₂].
	příp. SO ₃	oxid sírový	
Halogenovodíky	HCl	chlorovodík	
	HF	fluorovodík	
	HBr	bromovodík	
Tuhé znečišťující látky	TZL		Elektrostatické odlučovače (ESP), filtrace, cyklony, usazovací komory
Oxidy těžkých kovů	(Cd, Hg, Cr, Cu, Zn, Pb)		<ul style="list-style-type: none"> • Adsorpce na povrchu uhlíkatých sorbentů, • Absorpční čištění kontaktem s kyselými činidly.
Perzistentní látky (POP)	PAU	polycyklické aromatické uhlovodíky	<ul style="list-style-type: none"> • Katalytická rozklad • Katalytická filtrace • Adsorpce na povrchu uhlíkatých sorbentů
	PCB	polychlorované bifenyly	
	PCDD	polychlorované dibenzo-p-dioxiny	
	PCDF	polychlorované dibenzo-furany	
Oxidy dusíku	NO _x		<ul style="list-style-type: none"> • Selektivní nekatalytická redukce (SNCR) • Selektivní katalytická redukce (SCR)

Tab. 2 Produkty vznikající spalování odpadu a nejvyužívanější způsoby jejich odstranění

Kritéria ovlivňující proces spalování

Dokonalosti spalování nebo také „úplné oxidace paliva“ je dosaženo při dodržení daných podmínek, a to především splněním tzv. parametru 3T (temperature, time, turbulence)², dále požadavku na přebytek kyslíku zajišťujícího oxidaci paliva a dobrého směšování odpadu s oxidačním plynem, tedy drcení. Nedokonalost spalování je způsobena nedodržením některého z těchto parametrů a vede tak k nedostatečné degradaci organických látek a složek vyskytujících se ve spalovaném palivu. Mezi hlavní negativní vlastnosti patří především zhoršení kvality spalin (tmavost kouře), popílku a tuhých zbytků ve formě škváry. Nedokonalý průběh spalování je důsledkem vzniku oxidu uhelnatého (CO) a navýšením koncentrace organických látek (TOC) ve spalinách. Podmínky provozu spaloven průmyslového a nebezpečného odpadu viz tab. 3:

Teplota spalin	min.	850°C při obsahu Cl < 1% hm.
	min	1 100°C při obsahu Cl > 1% hm.
Dostatečná doba zdržení ³		2 s
Zbytkový obsah hořlaviny		max. 3 % hm. v tuhých zbytcích (ztráta nedopalem)
		max. 5 % hm. ztráta žiháním

Tab. 3 Podmínky provozu spaloven [12]

4.2.1 Redukce množství oxidu uhelnatého a organického uhlíku

Jak již bylo zmíněno, oxid uhelnatý (CO) je spolu s organickým uhlíkem (TOC) produktem nedokonalého spalování a množství těchto látek je tedy závislé na provozu spalovacího zařízení. Vznik CO ve spalinách probíhá jako vedlejší produkt hoření látek obsahujících uhlík a při nedostatku oxidačního činidla, kterým je kyslík (nutnost přívodu vzduchu s obsahem kyslíku větším, než je stechiometrický). Zvýšené koncentrace obsahu CO ve spalinách mohou být způsobeny lokálním poklesem obsahu O₂ vlivem nedostatečného promíchání spalin se spalovacím vzduchem nebo vlivem přítomnosti rychle hořících látek. Dalším parametrem je nedodržení teploty přeměny (600 až 700 °C) na oxid uhličitý (CO₂). S produkcí CO úzce souvisí i obsah TOC, který je závislý na přeměně látek na bázi uhlíku. Čím dokonaleji probíhá přeměna látek, tím nižší je obsah CO ve spalinách a podobně tomu je i u množství TOC.

Metody redukce množství CO a TOC:

- recirkulace spalin – dopálení vzniklého CO,
- řízený přívod spalovacího vzduchu – nastavení vzduchových trysek k zajištění turbulentního toku spalin (rotace proudu spalin),
- dodržení teplotního pole.

² Temperature – teplota, Time – čas, Turbulence – turbulence.

³ Dostatečná doba zdržení je charakterizována setrváním spalin při teplotě převyšující požadovanou hodnotu.

4.2.2 Tuhé znečišťující látky

Hlavním představitelem TZL jsou úletové částice prachu uvolňující se postupným prohoříváním paliva. Na celkový obsah TZL ve spalinách působí řada ovlivňujících parametrů, jako jsou např. zastoupení popelovin ve spalovaném odpadu, konstrukce hlavních částí spalovací komory (typ komory, typ roštu, velikost spalovací komory), provozní parametry (množství spalovacího vzduchu pod rošt, podtlak ve spalovací komoře a s tím spojená rychlost spalin). Díky své velikosti a hmotnosti jsou tyto částice unášeny proudem spalin ze spalovací komory. Vzhledem k vysokému měrnému povrchu částic vůči škodlivinám typu těžkých kovů nebo, PCDD/F jsou částice perfektním nositelem těchto látek, neboť dochází k adsorpci na jejich povrchu. V případě vysoce jemných částic prachu (zejména pod 2,5 μm) představuje tato okolnost velké riziko úletu znečištěných látek ze systému čištění spalin, neboť tato frakce je těžko zachytitelná zařízeními pracujícími na principu mechanické filtrace. Podíl této frakce je avšak vůči celkovému objemu mizivý. V rámci diplomové práce se uvažuje s odstraňováním TZL na principu mechanické filtrace podrobněji popsané v kapitole 5.3.1.

4.2.3 Oxidy síry a halogenovodíky

Oxidy síry (SO_x) a skupina halogenovodíků, zastoupená především chlorovodíkem (HCl) a fluorovodíkem (HF), jsou ve spalinách obsaženy v závislosti na vstupní koncentraci síry, chloru a fluoru (S , Cl , F). Díky závislosti plynných emisí těchto složek na vstupní koncentraci látek v palivu je pro optimalizaci pokrytí koncentračních špiček vhodné proces tvorby plynných látek kyselého charakteru kontinuálně monitorovat. Na základě znalosti výstupních koncentrací je dávkováno příslušné aditivum. Důvodem snižování těchto látek jsou především jejich korozivní vlastnosti spojené s výskytem provozních problémů na zařízení v případě dosažení rosného bodu nebo v případě tvorby usazenin. Součástí DP je návrh suchého čištění spalin pomocí vápenatých a sodných práškových sorbentů blíže popsaných v kapitole 5.2.

4.2.4 Oxidy dusíku

Skupina oxidů dusíku (NO_x) je zastoupena ve spalinách především ve formě oxidu dusnatého (NO), oxidu dusičitého (NO_2) a oxidem dusným (N_2O). Z pohledu legislativy je skupina oxidů dusíku vyjádřena jen pomocí NO a NO_2 , neboť tyto dvě skupiny tvoří majoritní podíl (95 % NO a jen 5 % NO_2). Tvorba oxidů dusíku je ovlivněna způsobem vzniku, kdy rozlišujeme tři způsoby (termické, palivové a promptní).

První skupina termických NO_x významněji vzniká při teplotách nad 1000 $^\circ\text{C}$ při reakcích mezi vzdušným dusíkem (N_2) a kyslíkem (O_2) přiváděným ve spalovacím vzduchu. Mechanismus tvorby NO_x termickým způsobem se nazývá Zedlovičův [16]. Působením vysoké teploty dochází k rozštěpení N_2 a spolu s O_2 vytváří oxidy dusíku. Za teplotu vzniku termických NO_x není považována teplota ve spalovacím prostoru, ale konkrétně teplota plamene. Právě spalovací vzduch se negativně projevuje na tvorbě NO_x , neboť je do procesu spalování kontinuálně přiváděn s jistým přebytkem, který se podle BREF [11]

pohybuje v rozmezí od 1,5 až do 2,5. Snížení produkce lze dosáhnout optimalizací spalovacího procesu (nejnižší množství přebytku vzduchu, recirkulace spalin atd.).

Produkce palivových oxidů dusíku je přisuzována spalovanému palivu a jeho obsahu dusíkatých látek, které vlivem oxidační reakce přecházejí na oxidy dusíku. Tato skupina je nejhojněji zastoupena v celkovém množství vzniklých NO_x . Jediným způsobem snižování produkce NO_x je separace biologické frakce bohaté na dusíkaté látky.

Skupina promptních NO_x vznikajících oxidací uhlovodíkových radikálů je v celkovém srovnání příspěvků jednotlivých způsobů tvorby zanedbatelná. Způsoby redukce NO_x jsou následně diskutovány v kapitolách 5.1 a 5.5.

4.2.5 Těžké kovy

Jelikož stupeň přetřídění komunálních odpadů od nebezpečných odpadů závisí pouze na zodpovědnosti obyvatelstva (náklady na dotřídění jsou vysoké), je zde riziko výskytu různých forem odpadu, nevyjímaje i baterií, akumulátorů, elektrozařízení, barev a dalších nebezpečných látek. A s tím spojené i jisté riziko výskytu těžkých kovů. Tato skupina látek zastoupených Cd, Hg, Cr, Cu, Zn, Pb, Tl, As, Co, Ni aj. vykazuje silně toxické vlastnosti a v některých případech, jako např. arsen či chrom, dokonce i karcinogenní účinky. Některé sloučeniny těžkých kovů vykazují za podmínek spalování nezanedbatelný tlak svých par, že částečně přecházejí i do plynné fáze. Pak se ve spalinách vyskytují mimo oxidů unášených ve formě TZL, také ve formě par. Toto je typické zejména pro rtuť (Hg), jejíž přítomnost ve formě par je nezanedbatelná a z hlediska emisí Hg dokonce převažující. Vzhledem ke schopnosti těžkých kovů vázat se na částice s vysokým měrným povrchem byly vyvinuty metody adsorpce na uhlíkatých sorbentech, které jsou dále diskutovány v kapitole 5.4.

4.2.6 Perzistentní organické polutanty

Mezi největší hrozby poslední doby z pohledu negativních vlivů na lidský organismus, jsou považovány polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD) a dibenzo-furany (PCDF) vznikající během spalování jako vedlejší produkt z odpovídajících prekurzorových látek na bázi chloru. Tyto sloučeniny se vyskytují v naší přítomnosti odjakživa a jsou spojeny s procesem hoření. Charakteristikou těchto látek je především vysoká toxicita spojená s relativně velkou odolností proti chemickému a biologickému rozkladu. V atmosféře jsou tyto látky přítomny jak v plynném stavu tak i jako navázané na pevné částice. [17] K negativním vlastnostem těchto látek patří i fakt, že se ukládají v tukových tkáních organismů a již při malých koncentracích ovlivňují lidský organismus (karcinogenita, negativní vliv na reprodukční schopnosti atd.), jak blíže popisuje [18]. Obecná skupina tzv. dioxinů je tvořena více než 210 kongenery, z čehož 17 kongenerů představuje potenciální vliv na zdraví člověka. V případě spalování odpadu, ať již komunálního či průmyslového posuzujeme především tyto typy dioxinů:

- polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD),
- polychlorované dibenzo-furany (PCDF).

Způsoby předcházení vzniku dioxinů:

- optimalizace s ohledem na dokonalost spalování,
- teplota při spalování 1 100 °C až 1 200 °C.

Způsoby odstraňování dioxinů:

- katalytická filtrace – průchod implementovanou vrstvou katalyzátoru ve filtrační tkanině popř. keramice,
- selektivní katalytická redukce (SCR) – DeNO_x/DeDiox,
- adsorpce na povrchu uhlíkatých sorbentů – většinou aktivní uhlí.

Možnosti odstranění dioxinů a furanů podrobně diskutuje Pařízek [19].

4.3 Systém čištění spalin jako klíčová část technologie

První spalovny odpadu se vyznačovaly pouze spalovací komorou, do které byl kontinuálně přiváděn odpad. Produkty vznikající při spalování byly přes příslušný komín odváděny do atmosféry bez jakéhokoli opatření snižujícího dopad na životní prostředí. Od té doby prodělala zařízení ke spalování odpadu obrovský vývoj jak při využití energie uvolněné ze spalování tak i v technologii čištění spalin. Tento technologický pokrok především udávaly postupně zpřísňující se požadavky na výstupní koncentrace škodlivin.

V současné době, kdy se nedovoluje provozování zařízení, která nesplňují legislativou předepsané limity koncentrace škodlivin vypouštěných do atmosféry, jsou systémy čištění spalin považovány za klíčový soubor při návrhu zařízení EVO jako celku.

Na systém čištění spalin je vzhledem k optimalizaci nutné nahlížet jako na jednotný provozní soubor. V zásadě je důležité mít při návrhu systému čištění spalin na paměti, že čím více aparátů zvolíme, tím vyšší investice bude zapotřebí, porostou provozní náklady způsobené vlivem navýšení tlakových ztrát a také můžeme čelit zvýšenému riziku výskytu provozních komplikací. Z tohoto pohledu se jeví jako výhodné využívat modernější technologie čištění spalin spojující více operací do jednoho konstrukčního celku, což v celkovém zhodnocení investiční ceny v porovnání se schopností odloučení vede k úsporám. Bližší informace k porovnání konvenčních a moderních technologií čištění spalin udává Kropáč [20].

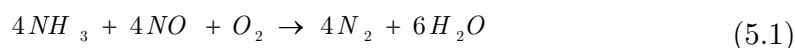
5. POPIS ALTERNATIVNÍCH ZPŮSOBŮ ČIŠTĚNÍ SPALIN

V této kapitole budou podrobněji popsány jednotlivé technologie snižování množství vznikajících produktů spalování, s nimiž se počítalo při komplexním návrhu technologického uspořádání linky čištění spalin.

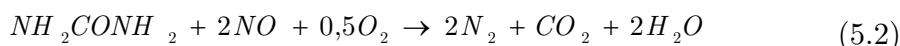
5.1 Selektivní nekatalytická redukce NO_x

Při selektivní katalytické redukci (*Selective Non-Catalytic Reduction*) dochází vlivem reakce mezi redukčním činidlem (čpavková voda (NH₄OH, močovina NH₂CONH₂) a příslušnými oxidy dusíku (NO, NO₂) k redukci jejich množství o 30 až 70 %. [11]

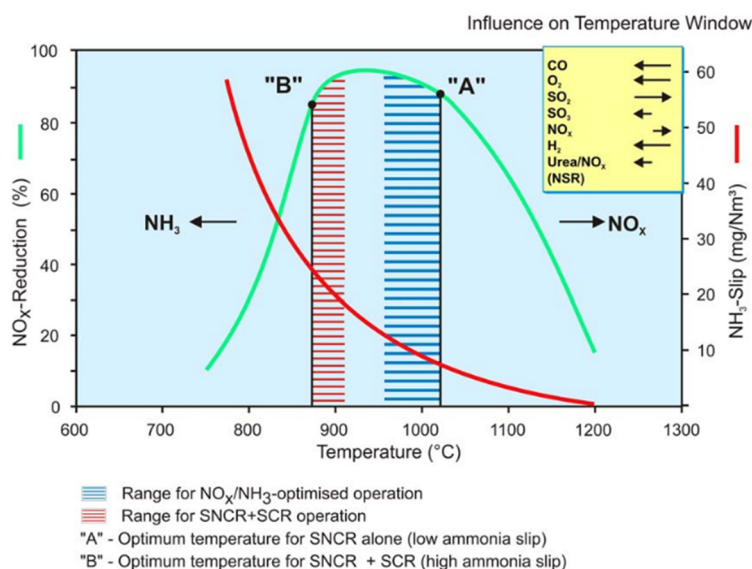
Stechiometrický průběh reakce čpavku s oxidem dusnatým:



Stechiometrický průběh reakce močoviny s oxidem dusnatým:



Vhodné teplotní rozmezí pro dávkování redukčního činidla je od 750 do 1 050 °C, v závislosti na použitém redukčním činidle (NH₄OH 850–950 °C; NH₂CONH₂ 950 až 1050 °C). V případě nedodržení požadované teploty dochází ke snížení účinnosti a popřípadě k opětovnému vzniku NO_x při teplotách přesahujících hranici 1 050 °C.



Obr. 16 Vliv teplotního okna na redukci NO_x⁴ [21]

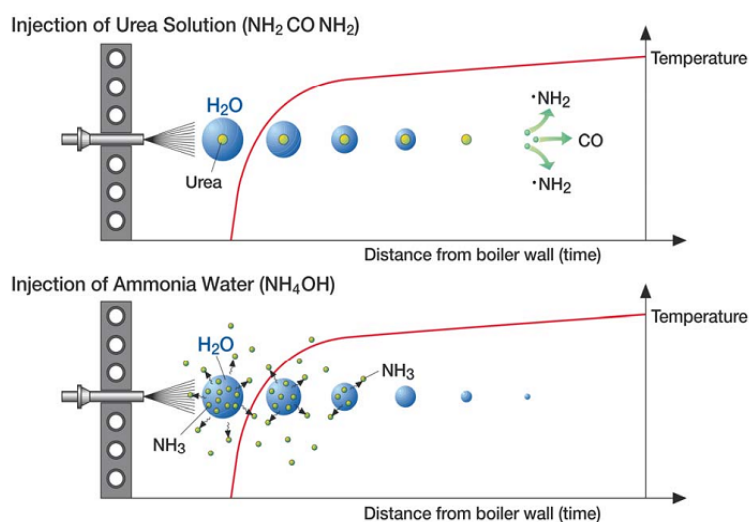
⁴ „A“ optimální teplota pro SNCR (nízký čpavkový skluz).

„B“ optimální teplota pro SNCR se současným SCR (vysoký čpavkový skluz využitý SCR).

Influence on Temperature Window – Ovlivnění teplotního okna.

Z tohoto důvodu je největší důraz kladen na měření teplotního okna, využívá se moderních způsobů akustického snímání (AGAM). [22] [23] [24] Teplotní okno se v závislosti na proměnlivosti složení odpadu může měnit (vliv CO, O₂, SO₂, viz obr. 16 vpravo nahoře), proto je využito dávkování činidla ve více rovinách.

Stupeň konverze oxidů dusíku (NO_x) je závislý jak na teplotě, viz obr. 16, turbulenci, tak i na přístupu redukčního činidla k molekulám NO_x, proto se využívá speciálních trysek zajišťujících jemnou disperzi kapiček činidla, jako atomizačního média se využívá tlakového vzduchu o tlaku cca 6 barů.



Obr. 17 Vliv typu reagentu na distribuční vzdálenosti⁵ [21]

Z obr. 17 je patrné, že při využití čpavkové vody (NH₄OH) snižujeme distribuční vzdálenost, neboť dochází k podstatně rychlejšímu odpaření molekul NH₃ než v případě použití močoviny, u které nejprve dochází k odpaření obalové vrstvy H₂O a až po odpaření H₂O dochází k rozkladu močoviny na amonné radikály (-NH₂), které reagují s NO_x.

Hlavní výhodou této technologie je především její jednoduchost a značně nižší investiční náklady než v případě SCR. Z provozního hlediska je sice vyšší spotřeba činidla než u SCR, ale nedochází k tlakovým ztrátám, které se projevují na příkonu spalínového ventilátoru.

5.2 Suchá sorpce pomocí NaHCO₃ a Ca(OH)₂

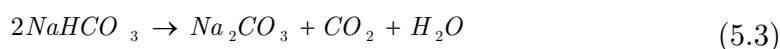
Jak vyplývá z databáze zařízení EVO, v dnešní době se k odstranění kyselých složek ze spalín suchou metodou využívá především dávkování práškového sorbentu hydroxidu vápenatého Ca(OH)₂ nebo hydrogenuhličitanu sodného NaHCO₃, známého jako „soda bikarbona“. Sorbenty reagují s kyselými složkami ve spalínách za vzniku pevných, snadno oddělitelných solí.

⁵ Injection of Ammonia Water (NH₄OH) – vstříkávání čpavkové vody (NH₄OH), Injection of Urea solution (NH₂CONH₂) – vstříkávání močoviny (NH₂CONH₂), Distance from boiler wall (time) – vzdálenost od zdi kotle (čas), Temperature – teplota.

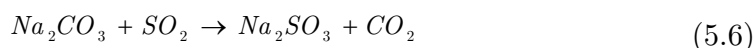
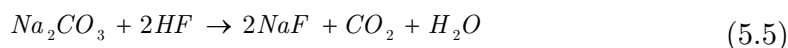
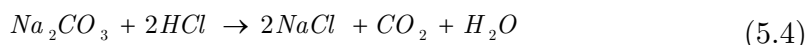
5.2.1 Neutralizace kyselých složek dávkováním NaHCO_3

Jedná se o technologii s obchodním názvem „BICAR“, kterou vyvinula společnost Solvay [25]. Princip spočívá v dávkování jemně mletého sorbentu (granulometrie pod $30\ \mu\text{m}$) do proudu spalin za účelem neutralizace HCl , HF , SO_2 , který se při teplotě vyšší jak $140\ ^\circ\text{C}$ tepelně rozkládá (kalcinační proces) na uhličitán sodný Na_2CO_3 při současné produkci CO_2 a H_2O , viz rovnice (5.3). Vzniklý uhličitán se vyznačuje vyšším měrným povrchem a pórovitostí. Ideální teplota pro zajištění optimální rychlosti rozkladu je 200 až $230\ ^\circ\text{C}$. Vyšší teploty se nedoporučují vzhledem k provozním teplotám filtračních elementů a také kvůli začínající sintraci při teplotách nad $300\ ^\circ\text{C}$. Chemická reakce probíhá při stechiometrickém přebytku od $1,2$ do $1,5$. [11] K zajištění správné doby zdržení sorbentu s kyselými složkami spalin a stupně promísení je využito reaktoru suché sorpce, tzv. kontaktoru. Tuhé zbytky v podobě solí jsou společně s popílkem a nezreagovaným sorbentem odloučeny na filtračních elementech.

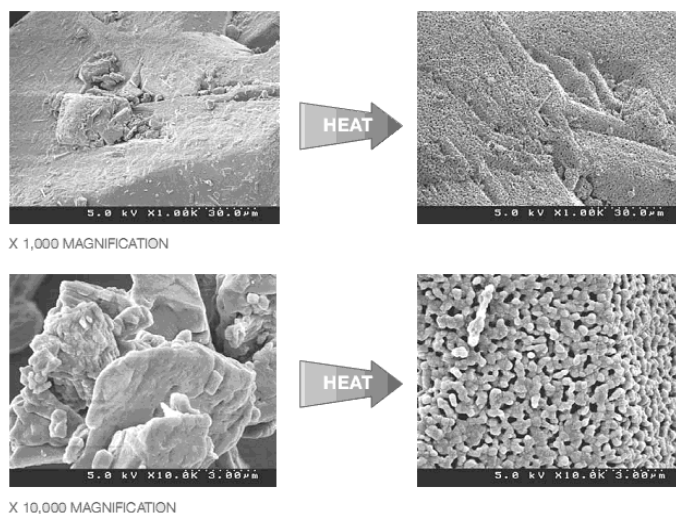
Kalcinace



Neutralizace



Oxidace

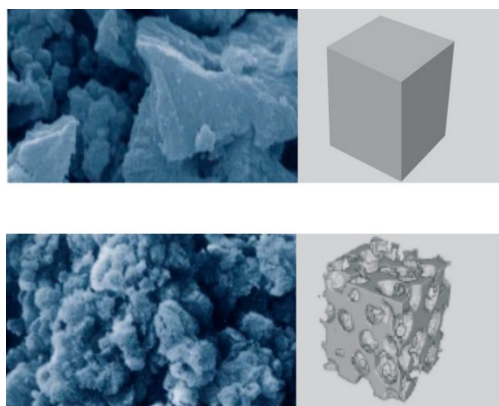


Obr. 18 Povrch částice NaHCO_3 po kalcinaci [26]

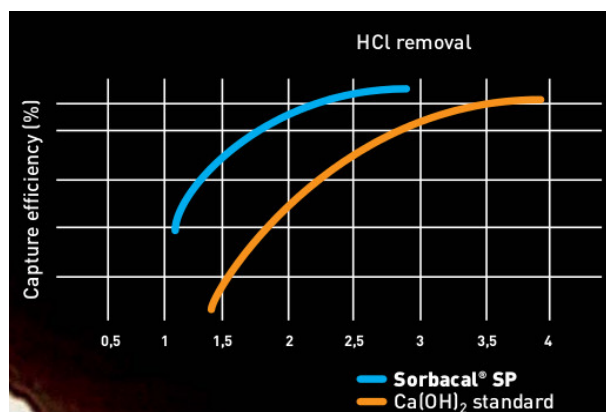
5.2.2 Neutralizace kyselých složek dávkováním $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Za účelem neutralizace HCl , HF , SO_2 může být, obdobně jako u dávkování NaHCO_3 , do proudu spalin dávkován práškový sorbent $\text{Ca}(\text{OH})_2$, popřípadě speciálně upravený hydrát pod obchodním názvem „Sorbacal SP“ [27]. Oproti technologii BICAR jsou z důvodu zvyšující se účinnosti procesu spalin před dávkováním $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vlhčeny procesní vodou. Při vlhčení musí být respektováno zvýšení rosného bodu závislého na množství SO_2 a množství H_2O ve spalinách. Tato technologie se vyznačuje především nižší provozní teplotou okolo $150\text{ }^\circ\text{C}$. Stechiometrický přebytek sorbentu se pohybuje v rozmezí hodnot 1,8 až 2

Při dávkování $\text{Ca}(\text{OH})_2$ odpadá nutnost mletí sorbentu. V případě Sorbacal SP je povrch $40\text{ m}^2/\text{g}$ a v případě vápenného hydrátu $15\text{ m}^2/\text{g}$, pórovitost je $0,2\text{ cm}^3/\text{g}$ oproti $0,08\text{ cm}^3/\text{g}$. Použitím takto upraveného sorbentu můžeme dosáhnout úspory o cca 25 % dávkovaného množství. Rozdíl je patrný z obr. 19 a obr. 20.

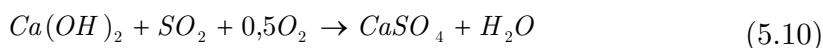
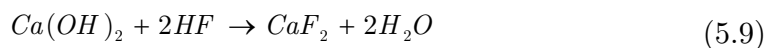
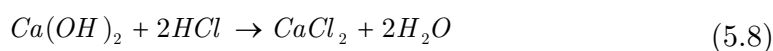


Obr. 19 Rozdíl ve struktuře vápenného hydrátu a Sorbacal SP [27]



Obr. 20 Rozdíl v účinnosti zachycení HCl [27]

Princip suché sorpce pomocí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ je popsán následujícími rovnicemi:



Pro zvýšení efektivity využití $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se v praxi využívá částečná recyklace použitého sorbentu, kdy po finálním odprášení na filtračních elementech je část výsledného filtračního koláče pomocí šnekového dopravníku dopravována zpět do reaktoru. Reaktor je ve většině případů navrhován jako reaktor s cirkulující fluidní vrstvou.

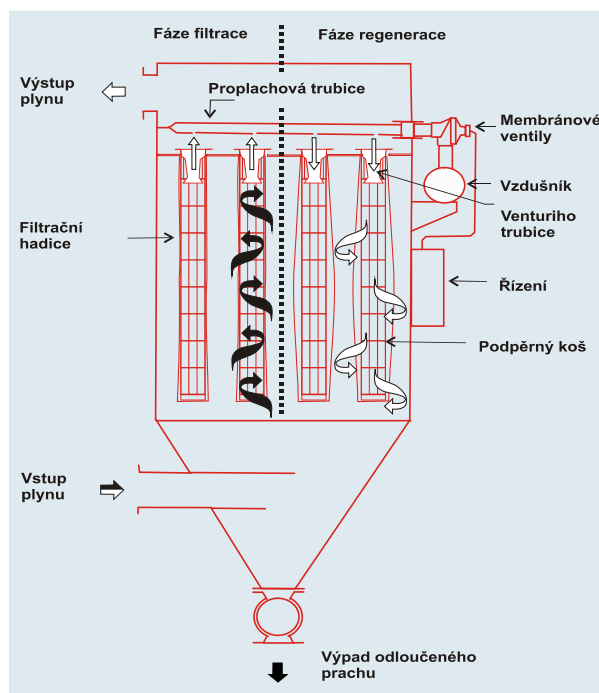
5.3 Filtrace

5.3.1 Látková filtrace

Úletové částice prachu, popílku a příslušných práškových sorbentů jsou odlučovány průchodem přes filtrační elementy, které jsou nejčastěji zastoupeny látkovými filtračními hadicemi. Tyto filtrační hadice jsou uloženy v trubkovnicích jednotlivých filtračních komor a osazeny podpěrnými koši k vyztužení hadic a v ústí Venturiho trubicemi.

Zásadním parametrem filtračních rukávců je použitý filtrační materiál, který se vyznačuje určitou tepelnou a mechanickou odolností vůči vnějším vlivům znečištěných spalin. Pro zvýšení filtračních schopností a odolnosti jsou filtrační rukávce vybaveny tenkou teflonovou membránou (PTFE) na straně kontaktu, která zajišťuje separaci velmi jemných částic a napomáhá regeneraci. Porozita membrány zaručuje průchod molekul spalin skrz, ale větší prachové částice se separují na jejím povrchu. Zachycené tuhé částice (prach, popílek, sorbenty) vytvářejí na povrchu tzv. filtrační koláč, který je z filtrační tkaniny periodicky odstraňován při regeneraci tlakovým vzduchem. Při nárůstu tlaku vlivem pulsu tlakového vzduchu dochází k narušení vrstvy filtračního koláče, který se následně usazuje ve výsypce filtru.

Volba vhodného typu filtračních materiálů závisí na složení vstupních spalin a provozní teplotě (až do 250 °C). Filtrační hadice nejsou vhodné pro provoz při riziku kondenzace spalin, neboť by mohlo docházet k zaslepení pórů filtrační tkaniny, ani do provozů s možností výskytu jisker.



Obr. 21 Schéma provedení látkového filtru [28]

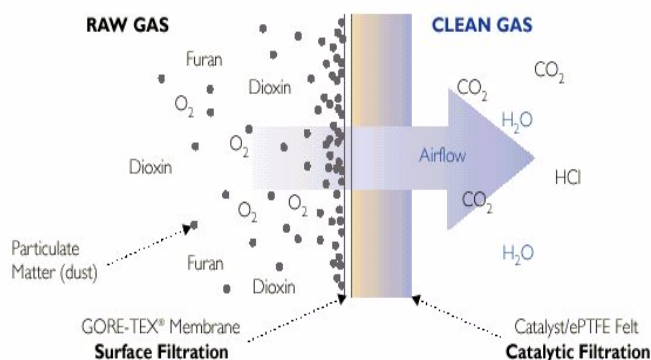
5.3.2 Katalytická filtrace

Stejně jako látková filtrace je i katalytická filtrace založena na mechanické filtraci, s tím rozdílem že je zde využito implementované vrstvy katalyzátoru jak na povrchu filtrační tkaniny (Remedia D/F společnosti W. L. Gore) [29], tak v matrici porézní keramiky (Cerafil® TopKat společnosti Clear Edge) [30]. Hlavním účelem katalytické filtrace je rozklad dioxinů a furanů (PCDD/F) a tím spojení více operací čištění spalin do jednoho aparátu.

U tkaninových rukávců se jedná o vlákna expandovaného polytetrafluoretylenu (ePTFE), do kterých je implementován katalyzátor na bázi $\text{TiO}_2/\text{V}_2\text{O}_5$. Při průchodu spalin přes něj dochází k rozkladu PCDD/F na elementární sloučeniny. Princip funkce je na obr. 22. Běžné rozmezí provozních teplot je od $180\text{ }^\circ\text{C}$ do $230\text{ }^\circ\text{C}$ a tlaková ztráta se pohybuje okolo 1,5 až 2 kPa. Účinnost redukce PCDD/F udávaná výrobcem je více než 90 % [29], ale ve skutečnosti se pohybuje okolo 99 %.

U keramických elementů se dá hovořit o tzv. 4D-filtraci, neboť spojuje hned 4 jednotkové operace čištění (**DeDust**, **DeNO_x**, **DeDiox** a **DrySorption**)⁷ a vytváří tak kompaktní řešení, vedoucí ke snížení investičních a provozních nákladů vlivem redukce počtu aparátů. Vlastní katalyzátor je obdobně na bázi $\text{TiO}_2/\text{V}_2\text{O}_5$. Další výhodou keramických filtračních elementů je provozní teplota (až $900\text{ }^\circ\text{C}$) a odolnost, která výrazně převyšuje použitelnost ostatních druhů filtračních elementů. Tlaková ztráta keramických elementů se pohybuje od 2 do 2,5 kPa.

Regenerace je v obou případech prováděna řízeným přívodem tlakového vzduchu. V případě využití je ale nutné počítat s vyššími investičními náklady na filtrační elementy.



Obr. 22 Princip funkce filtrační tkaniny Remedia D/F⁶ [29]



Obr. 23 4D filtrační element [30]

6 Raw Gas – znečištěné spaliny, Clean Gas – čisté spaliny, Particulate Matter (Dust) – pevné částice (prach), Surface Filtration – povrchová filtrace, Catalyst / ePTFE Felt – katalytická plst z expandovaného polytetrafluoretylenu, Air Flow – tok plynu, GORE-TEX Membrane – membrána GORE-TEX.

⁷ DeDust – zkratka pro odstranění prachových částic (TZL), DeNO_x – katalytický rozklad oxidů dusíku (NO_x), DeDiox – katalytický rozklad dioxinů a furanů (PCDD/F), DrySorption – snížení obsahu kyselých složek (HCl, HF, SO_x).

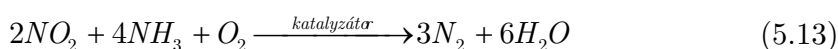
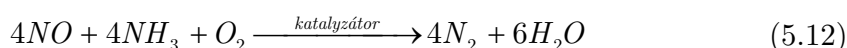
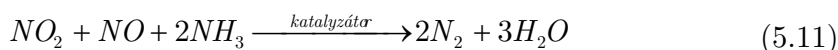
5.4 Adsorpce pomocí uhlíkatých sorbentů

Adsorpce je proces, při kterém dochází k navázání těžkých kovů a popřípadě PCDD/F ze spalin na povrchu adsorbentu (nejčastěji uhlíkatý sorbent). Sorbenty mohou být ve formě práškové, granulí nebo pelet. Adsorpce je výrazně účinnější při nižších teplotách (pod 160 °C). Sorbent je nejčastěji tvořen směsí práškového aktivního uhlí a přírodního zeolitu, které svým vysokým měrným povrchem a pórovitostí dokážou adsorbovat velké množství těžkých kovů a případně i látek typu PCDD/F. Po nadávkování do spalin není potřeba přídavného aparátu k zajištění kontaktu sorbentu se spalinami (chemisorpce), neboť adsorpce je zajištěna průchodem přes vytvořený filtrační koláč. Vzhledem k provozní teplotě adsorbentu se v praxi hojně využívá kombinace dávkování vápenného hydrátu společně s aktivním uhlím, viz obr. 13. Popřípadě se může využít pevného lože, přes které proudí spaliny; u tohoto provedení je nutné dbát zvýšené pozornosti při monitoringu koncentrace CO spojené s iniciací hoření.

5.5 Selektivní katalytická redukce NO_x

Při selektivní katalytické redukci (Selective Catalytic Reduction) dochází k rozkladu oxidů dusíku zastoupených primárně oxidem dusnatým (NO) a oxidem dusičitým (NO₂) na elementární dusík (N₂) a vodu (H₂O). Souběžně probíhá i redukce PCDD/F rozštěpením jejich řetězců.

Reakci NO_x lze vyjádřit pomocí rovnic (5.11), (5.12) a (5.13). Princip spočívá v adsorpci molekuly čpavku (nastříknutého do proudu spalin před vstupem do reaktoru) na povrchu katalyzátoru, k němuž následně difunduje molekula NO, a společně na povrchu reagují za vzniku N₂ a H₂O, které jsou poté desorbovány z povrchu katalyzátoru (Eley-Ridealův princip). [31] Aktivní místa katalyzátoru jsou následně regenerovány difundujícím kyslíkem. Katalyzátor slouží jako urychlovač reakcí, čímž snižuje teplotu reakce na 180 až 450 °C. Konkrétně se u zařízení EVO využívá rozmezí teplot od 210 do 320 °C. [11] Reakční rychlost je závislá na reakční teplotě. Obecně platí, že redukce NO_x probíhá s vyšší reakční rychlostí než v případě PCDD/F. Stupeň konverze je závislý na chemickém složení a aktivní ploše (měrný povrch) katalyzátoru, teplotě reakce, rychlosti spalin, době kontaktu, přebytku NH₃ a obsahu O₂ ve vstupních spalinách. Zařazení katalyzátoru je výhodnější na stranu odprášených spalin, vzhledem k potlačení zanášení aktivních míst.



Katalyzátorové lože je tvořeno buďto volně sypaným katalyzátorem (granule), nebo seskupením voštinových bloků (honeycomb), popřípadě deskovitým provedením. Látky obsažené v katalyzátoru se skládají z nosiče TiO_2 s přídavkem aktivních látek typu V_2O_5 a WO_3 . Chemické složení katalyzátoru je firemním know-how výrobců. [32] [33] [34]



Obr. 24 Provedení katalyzátoru Honeycomb [33]



Obr. 25 Provedení deskového katalyzátoru [33]

Nevýhodou SCR je především vysoká investiční cena použitého katalyzátoru, tlaková ztráta, spotřeba plynu na regeneraci katalyzátoru a také nízká životnost katalyzátoru (cca 25 000 hodin). Mezi výhody tohoto systému patří především kombinace redukce NO_x se současnou redukcí PCDD/F, vysoká účinnost, malý čpavkový skluz a žádné vedlejší produkty.

6. STŘEDOTONÁŽNÍ SPALOVNA ODPADŮ

Analýza regionálního zásobování energiemi prováděná v souběžné diplomové práci [35] ukazuje, že perspektivně může být vhodné zvolit kombinaci zdrojů spalujících klasická fosilní paliva s provozem zařízení EVO. Vychází se ze skutečnosti, že regionální potřeby tepelné energie jsou charakterizovány menšími nároky na dodávku energií, avšak relativně významnými sezonními výkyvy požadavků na dodávku tepelné energie. Tyto okolnosti limitují zpracovatelský výkon uvažovaného zařízení EVO, které by mohlo být zařazeno do systému energetického zásobování regionu.

Na základě dat poskytnutých 7 společnostmi zajišťujícími distribuci tepla v eventuelních centrech regionů byly vybrány 2 reprezentativní regiony, pro které byla navržena optimální zpracovatelská kapacita zařízení EVO. Podrobnější informace o jednotlivých regionech jsou uvedeny v [35].

6.1 Lokální podmínky začlenění zařízení *EVO* do regionu

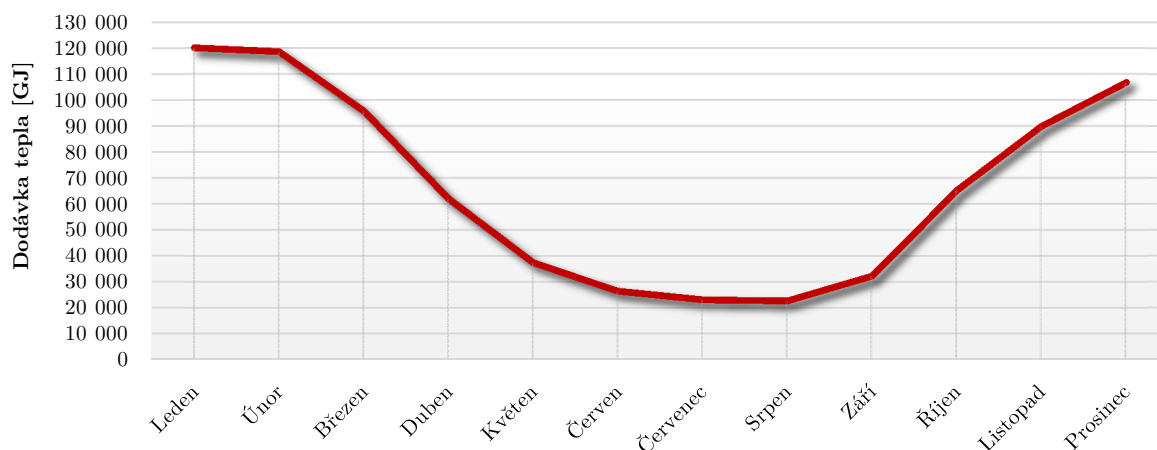
Limitujícími parametry pro návrh zpracovatelské kapacity zařízení EVO jsou především produkce odpadu v daném regionu, která se odvíjí od velikosti svozové oblasti, a dále také celoroční a sezonní spotřeby tepla v rámci sítě CZT uvažovaného centrálního města regionu.

Produkce odpadu

Na základě analýzy produkce odpadu v uvažovaném regionu bylo zjištěno, že v období mezi lety 2012 a 2013 činila produkce SKO včetně objemného odpadu zhruba 268 kg na osobu. Při uvažovaném počtu obyvatel 209 700 to činí cca 56,2 tisíc tun odpadu za rok. [35]

Současný stav dodávek tepla

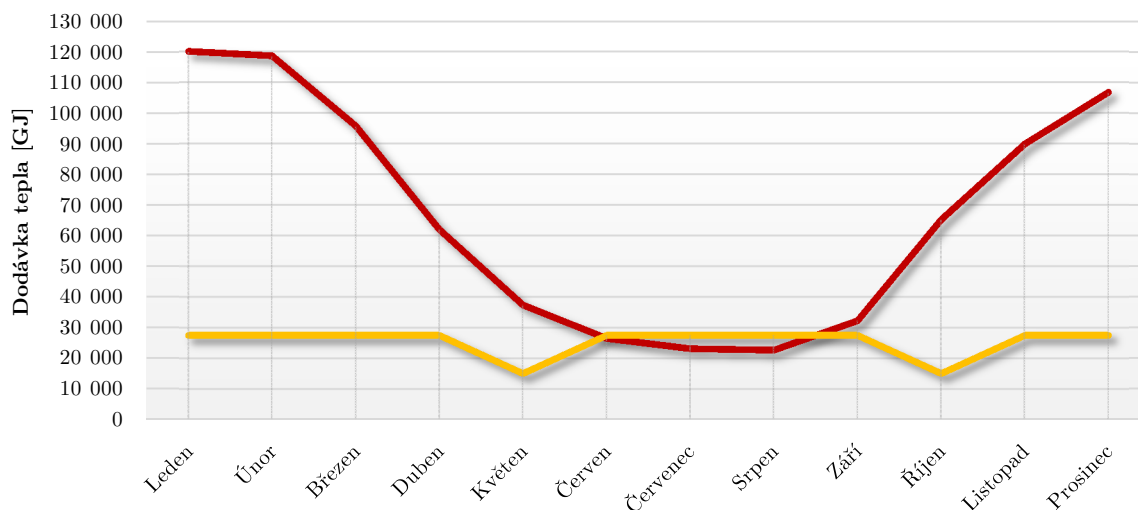
Jak již bylo zmíněno, výstavbu zařízení limituje především nutnost využití vyrobeného tepla, a proto se uvažuje s lokalitou centra zvoleného regionu, s počtem obyvatel přibližně 23 tisíc. Nejmenovaná společnost zajišťující výrobu a dodávku tepla v daném centru regionu disponuje dvěma stacionárními zdroji, které v období mezi lety 2011 a 2013 zajišťovaly výrobu cca 799 920 GJ za rok. Průměrné měsíční dodávky tepla do CZT v uvažovaném období jsou uvedeny na obr. 26. [35]



Obr. 26 Průměrné měsíční dodávky tepla do CZT v období let 2011 až 2013 [35]

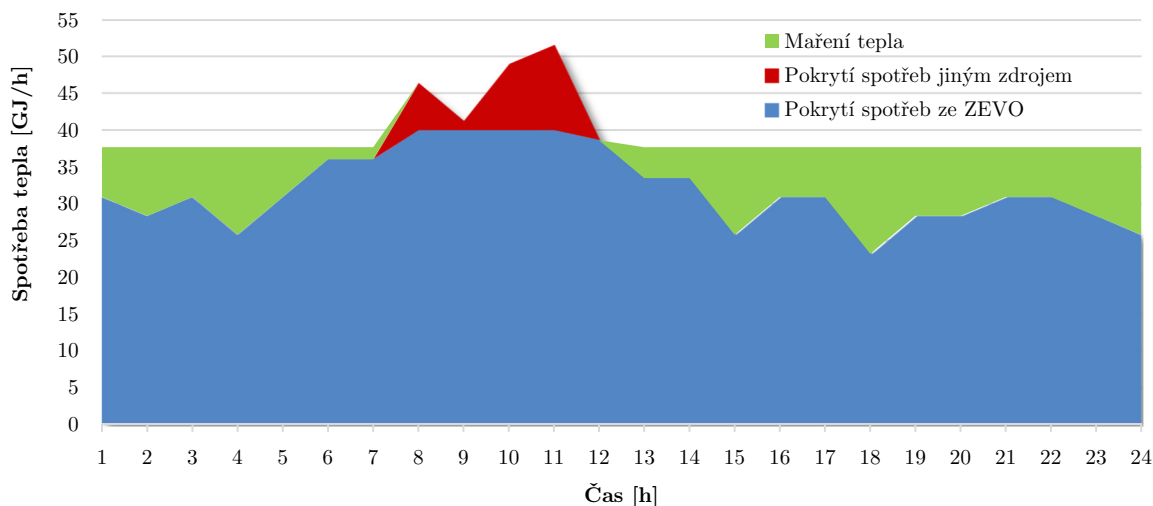
6.2 Zpracovatelský výkon uvažovaného zařízení EVO

S ohledem na výše zmíněné podmínky v daném regionu byl zvolen režim výroby tepla s částečným mařením v letním období, viz obr. 27, neboť výroba tepla v rámci zařízení EVO převyšuje spotřebu tepla v letních měsících. Vzhledem k uvažované svozové oblasti a množství odpadu v tomto regionu byla zvolena odpovídající kapacita 40,5 tisíc tun odpadu za rok, což při fondu pracovní doby (FPD) 8000 hodin, činí 5,06 tun odpadu za hodinu. Pokles v dodávce zařízení EVO v měsíci dubnu a říjnu je způsoben plánovanými dvěma 14denními odstávkami. Celková roční dodávka tepla činí cca 290 000 GJ, což z celkového pohledu představuje 36,5 % krytí spotřeb regionu. Výroba elektrické energie činí 5,3 GWh a odhadované množství mařeného tepla během roku je 12 600 GJ.



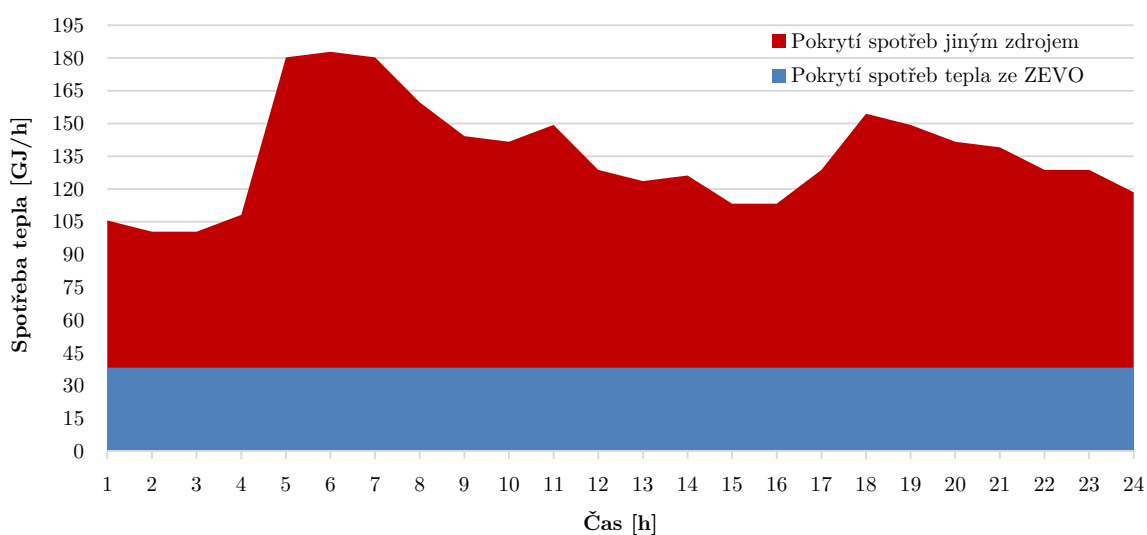
Obr. 27 Měsíční dodávky tepla ze zařízení EVO [35]

Na základě poskytnutých dat o průběhu dodávek tepla v letním období, viz obr. 28 (referenční letní den), je patrné, že pro zajištění požadované dodávky tepla zařízení EVO nestačí, a bude tedy nutné využít záložního zdroje, který je schopen krýt případné špičky v dodávce tepla.



Obr. 28 Pokrytí aktuálních spotřeb tepla v průběhu letního dne [35]

Z referenčního zimního dne jasně vyplývá, že primární množství požadované výroby tepla je zajišťováno prostřednictvím zdrojů spalujících klasická fosilní paliva. Zařízení EVO je schopno pokrýt spotřebu tepla daného regionu z cca 25 %. V průběhu zimního období nedochází k maření vyrobeného tepla.



Obr. 29 Pokrytí aktuálních spotřeb tepla v průběhu zimního dne [35]

7. STROJNĚ- TECHNOLOGICKÉ ŘEŠENÍ STŘEDOTONÁŽNÍ JEDNOTKY ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ ODPADŮ

7.1 Popis jednotlivých provozních souborů

Jelikož je DP zaměřena především na návrh systému čištění spalin, jsou bloky spalovacího zařízení a utilizace tepla pojednány jen okrajově, podrobnější popis situace návrhu těchto bloků je diskutován v [35].

7.1.1 Skladování odpadu

Svoz odpadu je zajišťován nákladními automobily, které jsou po přijetí na bránu zařízení patřičně evidovány a zváženy na příslušné silniční váze. U váhy jsou instalovány detektory ionizujícího záření, v případě iniciace alarmu je nutno zdroj záření identifikovat a naložit s ním podle příslušných předpis. Svozové vozy následně vysypávají odpad do skladovacího bunkru **J101**, odkud je transportován k dalšímu využití. Prázdné nákladní vozy jsou při opouštění areálu opět zváženy a hmotnostní rozdíl mezi vstupem a výstupem evidován.

Skladovací bunkr je plně zastřešený prostor skládající se ze dvou částí. První z nich je příjmová část odpadu **J101**, do které je odpad vyskladňován ze svozových vozů a odkud je za pomoci jeřábu přepravován. Příjmová část bunkru **J101** je vybavena třemi výsypnými místy, ze kterých materiál padá do prostoru bunkru. Dvě z nich jsou určena pro svozové nákladní automobily dopravující SKO a jedno místo je určeno pro skladování velkoobjemového odpadu (OO). V prostoru výsypného místa velkoobjemového odpadu je umístěn drtič odpadu **S103** sloužící k homogenizaci tvaru před dávkováním do násypky **C105** spalovacího zařízení. Obsluha polypového drapáku **C104** zajišťuje plnění drtiče **S103** a následnou homogenizaci odpadu v prostoru druhé sekce bunkru **J102**. Homogenizace odpadu je prováděna systematickým přemísťováním odpadu pomocí polypového drapáku **C104** s cílem vytvoření optimální směsi pro následné dávkování do násypky **C105**.

V prostoru obou sekcí bunkru **J101** a **J102** je trvale udržován podtlak odsáváním vzduchu, který je následně využit jako primární spalovací vzduch ve spalovacím zařízení. Celý prostor bunkru je kontinuálně měřen na obsah CO signalizující vznik požáru, z tohoto důvodu je celý prostor vybaven sprinklerovým hasicím systémem. Největší riziko vzniku požáru je spojeno s drtičem odpadu, proto je prostor násypky drtiče opatřen skrápěcím zařízením.

7.1.2 Spalovací zařízení

Násypka odpadu C105

Odpad určený pro spalování je pomocí polypového drapáku **C104** dávkován do násypky **C105**. Násypka je vyústěna do plnicí šachty, která pomocí nožových šoupat **H106** odděluje

prostor beranového podavače **C107**. Ve spodní části šachty je umístěn beranový podavač **C107**, který tlačí dávkované množství odpadu přímo do spalovací komory **CH201** a zajišťuje požadovanou vrstvu odpadu na roštu **G202**. Prostor odpadem mezi oběma šoupaty vyplněný odpadem charakterizuje dávkované množství odpadu na jeden cyklus. Po otevření spodního šoupěte se odpad sesune do plnicího prostoru podavače **C107**. Uzavírací šoupata **H106** zajišťují těsnost mezi spalovacím prostorem a okolím, neboť ve spalovací komoře **CH201** je stabilně udržován mírný podtlak. Prostor nad podavačem je vybaven tryskami technologické páry, které v případě detekce požáru automaticky přivedou páru, čímž dojde k vytěsnění kyslíku potřebného k hoření. Násypka je kontinuálně chlazená chladicí vodou.

Spalovací komora CH201

Vlastní proces spalování probíhá ve spalovací komoře **CH201** vybavené dvěma tahy. První tah se skládá z dohořivací komory **CH203**, ve které jsou umístěny průchody pro trysky **I301** technologie selektivní nekatalytické redukce oxidů dusíku (SNCR), a ve druhém tahu je jako první ve směru proudění spalin umístěn přehřívák **SH204**, poté výparník **VA205** a následně ekonomizér **HE206**. Spalovací komora **CH201** je opatřena žáruvzdornou vyzdívkou, která vlivem částečné akumulace tepla dokáže krýt teplotní výkyvy spalování.

Nad vstupem do komory je umístěn zapalovací hořák **B214** na zemní plyn sloužící při najíždění k zapálení vrstvy odpadu. Při normálním provozu je tento hořák odstaven.

V prostoru mezi spalovací komorou **CH201** a dohořivací komorou **CH203** je umístěn přívod sekundárního spalovacího vzduchu. Sekundární vzduch je nasáván z prostoru kotelny pomocí ventilátoru sekundárního vzduchu **V219** o teplotě cca 30 °C, otáčky ventilátoru jsou řízeny frekvenčním měničem (FM).

Nad přívodem sekundárního spalovacího vzduchu je umístěn výkonový hořák **B215** sloužící primárně pro zajištění požadované teploty spalin 850 °C za posledním přívodem spalovacího vzduchu. Z tohoto důvodu je hořák udržován v pohotovostním režimu (minimální výkon) a v případě potřeby zvýší svůj výkon k zajištění této teploty. Výkonový hořák **B215** dále slouží při najíždění linky.

Vratisuvný rošt G202

Tento typ roštu vyvinula firma Martin speciálně pro spalování odpadů [36]. Rošt tvoří dvě sady roštnic, z nichž jedny jsou pevné a druhé se pohybují ve vratisuvném pohybu a přehazují odpad na předchozí roštnice, přičemž dochází k intenzivnímu stupni promíchání, omílání a tím k odkrývání nespáleného materiálu a tím ke zlepšení vyhoření. Rošt lze rozdělit do tří sekcí: v první sekci od sálavého tepla dochází nejprve k vysušení, poté ke zplynění a vznícení, ve druhé sekci k samovolnému hoření a poslední sekci je dohořivací prostor. Roštnice ve zmíněné sekci 1 jsou chlazeny chladicí vodou, aby nedocházelo k brzkému zahoření vrstvy spalovaného odpadu. Všechny pohyblivé roštnice lze samostatně ovládat a tím řídit průběh spalování v jednotlivých sekcích.

Do prostoru pod roštnice je po předeřtátí přiváděn primární spalovací vzduch spolu s recirkulovaným množstvím spalin (uvažováno pouze u varianty č. 1 čištění spalin). Primární spalovací vzduch a recykl spalin jsou přiváděny do všech tří sekcí, přičemž každá sekce je samostatně regulovatelná.

Přívod primárního spalovacího vzduchu zajišťuje ventilátor **V217** řízený frekvenčním měničem, který nasává primární vzduch z prostoru bunkru. Nasávaný vzduch prochází přes výměník tepla **HE218**, také označovaný jako LUVO (pára/vzduch). V tomto výměníku **HE218** je spalovací vzduch předeřtíván párou po expanzi na teplotu 130 °C a při tlaku cca 104 kPa (abs.) je přiváděn pod rošt.

Škvárové hospodářství

Vyhořelý odpad ve formě popelovin a tuhých zbytků (škváry) je veden do vodního uzávěru odpopelňovacího zařízení, společně s popílkem odstraněným z prostoru druhého tahu. Ochlazená struska společně s popílkem je vyhrabovákem **C209** dávkována na pásový dopravník škváry **C210**, který zajišťuje dopravu škváry do kontejneru **C212**. Nad pásovým dopravníkem je umístěn magnetický separátor **SE211** kovového odpadu zajišťující oddělení kovového odpadu od škváry a jeho dopravu do kontejneru kovového odpadu **CO213**.

7.1.3 Utilizace tepla

Horké spaliny procházející obratovou komorou dohořívací komory vstupují do sekce výměny tepla, kde předávají energii obsaženou ve spalinách přes teplosměnné plochy nosnému médiu (vodě). Odebrané teplo slouží k výrobě páry, která průchodem přes protitlakovou turbínu expanduje a pohání generátor produkující elektrickou energii. Pára po expanzi následně putuje do sítě centrálního zásobování teplem (CZT).

Napájecí voda po příslušných chemických a termických úpravách, popsaných v [35], je čerpána pomocí čerpadel napájecí vody do ekonomizéru II **HE312**, kde dochází k odebrání zbytkového tepla spalinám a tím k předeřtátí napájecí vody. Po průchodu ekonomizérem II **HE312** putuje napájecí voda do prostoru kotle, který je řešen jako vodotrubný protiproudého uspořádání s parním bubnem. Kotel je složen ze tří sekcí (ekonomizér **HE205**, výparník **VA204**, přehřívák **SH203**).

Zanášení teplosměnných ploch kotle je během provozu řešeno pomocí parních ofukovačů a dále se využívají 2 plánované odstávky (14 dní) během roku, kdy se provede komplexní čištění.

Po průchodu všemi sekcemi je napájecí voda přeměna na ostrou páru, která putuje do sekce výroby energií.

V případě uvažované varianty č. 2 čištění spalin je část ostré páry před vstupem na turbínu odebrána k předeřtívání spalin před vstupem do SCR reaktoru **R318**.

S ohledem na zpracovatelskou kapacitu se uvažuje s využitím protitlaké turbíny (tzv. točivé redukce). Detailní návrh turbíny popsán v [35]. Vstupní pára o parametrech

uvedených v tab. 8 expanduje na lopatkách turbíny, čímž dochází k pohonu generátoru. Pára po expanzi je následně podrobena technologickému odběru množství určeného k předehřátí spalovacího vzduchu ve výměníku **HE218** (LUVO) a poté vedena do výměníkové stanice CZT.

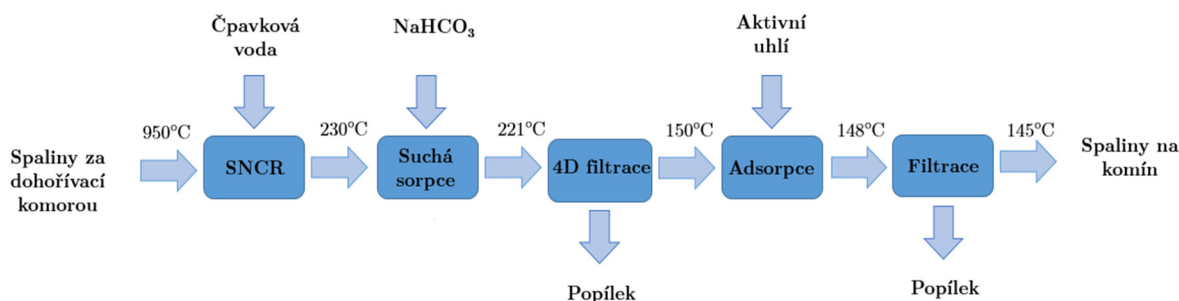
7.1.4 Systém čištění spalin – popis variantních řešení

Vniklé spaliny jsou pomocí nuceného tahu vyvolaného spalinovým ventilátorem odváděny ze spalovacího prostoru a po předání patřičného tepla napájecí vodě vstupují do systému čištění spalin.

S ohledem na splnění cíle se v rámci DP předpokládá návrh dvou základních variant systému čištění spalin, které budou kontinuálně zabezpečovat plnění emisních limitů uvedených v tab. 1.

Varianta č. 1

Navrhované řešení spočívá v suché sorpční metodě neutralizace kyselých složek za pomoci dávkování jemně mletého hydrogenuhličitanu sodného, tzv. bicaru (NaHCO_3), s následným průchodem přes 4D-filtrační elementy. Dočištění spalin od těžkých kovů a látek typu PCDD/F je realizováno pomocí adsorpce na povrchu dávkovaného uhlíkatého sorbentu a odprášením na látkovém filtru. Detailní technologické schéma je v příloze č. 2.



Obr. 30 Blokové schéma varianty č. 1

Pro uvažovanou variantu řešení byl navržen třístupňový systém čištění spalin, kdy jako první stupeň je využito selektivní nekatalytické redukce NO_x (SNCR). Na základě proměření teplotního profilu dohořivací komory **CH203** pomocí akustického snímání teploty (AGAM [23], [22], [24]) a vyhodnocení vstříkovací roviny je do spalin vstříkován 25% roztok čpavkové vody (NH_4OH). Vždy je v provozu pouze jedna ze dvou vstříkovacích rovin. Trysky na vstříkovacích kopích **I301** zajišťují jemnou disperzi kapek, které se rovnoměrně rozprostřou po průřezu dohořivací komory **CH203**. Uvažovaná účinnost redukce NO_x je 60 %, čímž je zajištěno snížení pod limitní koncentraci NO_x stanovenou v tab. 1.

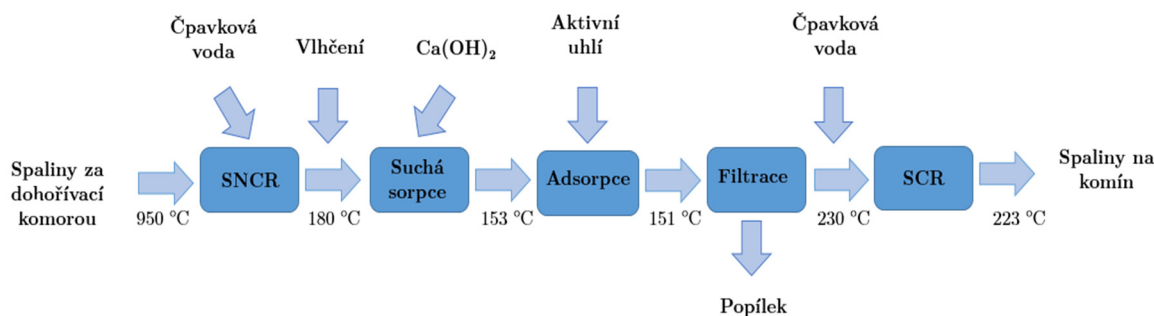
V rámci druhého stupně čištění je na výstupu z utilizačního kotle do spalin pneumaticky dávkován jemně mletý bicar, který je pomocí injektážních trysek **I302 A/B** dávkován do spalinovodu. K zajištění požadované reakční doby a vhodného stupně promíchání se spalinami je spalinovod zaústěn do reaktoru suché sorpce, tzv. kontaktoru **K303**. Kontaktor **K303** je řešen jako válcová nádoba s vnitřní vestavbou ve tvaru šroubovice. Spaliny opouštějící kontaktor **K303** jsou vedeny do komorového filtru **F304** s filtračními elementy z porézní keramiky (4D filtrace), kde dochází k finální neutralizační reakci spalin procházejících přes vrstvu filtračního koláče složeného z nezreagovaného sorbentu, vzniklých solí a popílku. Při průchodu spalin porézní keramikou dochází k odprašení, rozkladu látek typu PCDD/F, těkavých uhlovodíků a částečné redukci NO_x vlivem přítomnosti implementované vrstvy katalyzátoru. Filtrační elementy jsou v nastavených periodických cyklech oklepávány pomocí tlakového vzduchu, tzv. Pulse-Jet cleaning system (dále jen Pulse Jet) **PJ305**.

Za filtrem **F304** je řazena klapka, jejíž pomocí je část spalin odvětvena zpět do spalovacího prostoru a za pomoci recirkulačního ventilátoru **V311** dopravována pod rošt. Zbylé spaliny jsou vedeny do ekonomizéru II. **HE312**, kde za účelem zvýšení účinnosti adsorpce dochází ke snížení teploty spalin na 150 °C. Tlakové ztráty na spalinové trase jsou kompenzovány zařazením primárního spalovacího ventilátoru **V313**. Ve spalinovém potrubí za ventilátorem jsou vytvořeny průchody pro dávkovací trysky **I314** směsi aktivního uhlí a zeolitu. Částice aktivního uhlí zajišťují adsorpci těžkých kovů a látek typu PCDD/F na svém povrchu, společně s aktivním uhlím je dávkován přírodní zeolit, který ochraňuje filtrační tkaninu před vytvářením krusty na povrchu filtru při eventuální kondenzaci. Spaliny společně se sorbenty jsou zaústěny do komorového filtru **F315**, který je osazen látkovými filtračními rukávci. Stejně jako u 4D filtru jsou filtrační elementy regenerovány tlakovým vzduchem (Pulse Jet) **PJ316**.

K zajištění požadovaného výstupního tlaku na komíně a k pokrytí tlakových ztrát na filtru **F315** je za komorou filtru zařazen sekundární spalinový ventilátor **V322**.

Varianta č. 2

Toto variantní řešení spočívá ve využití kondicionované suché sorpce za pomoci dávkování hydroxidu vápenatého, tzv. hydrátu (Ca(OH)₂). Díky nižší teplotě spalin při dávkování hydrátu je společně do proudu dávkováno i aktivní uhlí. Oproti variantě č. 1 je využito jen jednoho komorového filtru. S uvažováním možnosti snížení emisních parametrů na emitující množství NO_x pod hodnotu 100 mg/m³_N, bylo v této variantě počítáno se zařazením reaktoru selektivní katalytické redukce NO_x (SCR). Detailní technologické schéma je v příloze č. 2.



Obr. 31 Blokové schéma varianty č. 2

Obdobně jako u varianty č. 1 je v prvním stupni čištění použita technologie SNCR k redukci NO_x , s použitím 25% roztoku čpavkové vody. Očekávaná účinnost této technologie je 60 %, čímž dosáhneme výstupní koncentrace NO_x v rozmezí hodnot 170 až 180 $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$.

Spaliny o teplotě 230 °C za utilizačním kotlem procházejí přes ekonomizér **HE302**, kde je jejich teplota vlivem přehřevu napájecí vody do kotle snížena na 180 °C. Poté co spaliny opustí ekonomizér **HE302**, jsou ve sprchovém chladiči **I303** vlhčeny procesní vodou k zajištění vyšší sytosti spalin, která se pozitivně projevuje na účinnosti suché sorpce. K dávkování sorbetů [$\text{Ca}(\text{OH})_2$, aktivní uhlí] je využito dávkovacích trysek **I305** a **I306**, které jsou zaústěny do rektoru **R307** řešeného jako reaktor s fluidní vrstvou bez vnitřní vestavby. Spaliny poté vstupují do komorového filtru **F308** osazeného látkovými rukávci. Jelikož hydrát je dávkován ve vysokém přebytku, je část filtračního koláče odebírána a pomocí šnekových dopravníků **C312** a **C313** dopravována zpět do směšovače **I304** před reaktor **R307**. Pro udržení fluidní vrstvy ve vzhledu (rychlosti spalin reaktorem) v případě poklesu výkonu je řazen pomocný ventilátor **V316**, který využívá část odvětvěných spalin za ventilátorem **V317**. Při maximálním výkonovém režimu je tento ventilátor mimo provoz.

Odprášené spaliny z filtru **F308** procházejí přes primární spalinový ventilátor **V317** do rekuperačního výměníku tepla **HE 318** (spaliny/spaliny), který zpětně ohřívá spaliny na teplotu přibližně 200 až 210 °C. K dohřátí spalin na požadovanou teplotu 230 °C pro vstup do SCR reaktoru **R322** jsou spaliny vedeny do výměníku **HE319** (spaliny/pára), kde dochází k nepřímému ohřevu spalin ostrou párou z kotle. Z hlediska zajištění provozní teploty SCR reaktoru **R322** je předřazen přímý ohřev hořákem na zemní plyn **B320**. Před vstupem spaliny procházejí přes směšovací modul **I321**, ve kterém dochází k nástřiku 25% roztoku čpavkové vody (NH_4OH) jako reagentu pro následnou reakci spalin s katalyzátorem. Vlastní reaktor **R322** je vybaven vícevrstevným katalyzátorem voštinového typu se dvěma pracovními hladinami a jednou rezervní. Výstupní spaliny procházejí přes rekuperační výměník I **HE319** a následně vstupují do rekuperačního výměníku II **HE324**,

kde je využito zbytkového tepla k přehřevu spalovacího vzduchu. Tlakové ztráty reaktoru a jednotlivých výměníků kompenzuje sekundární spalinový ventilátor **V325**.

7.1.5 Pomocné provozní soubory systému čištění spalin

V této kapitole budou detailněji popsány pomocné provozní soubory využívané při variantě č. 1.

Zásobní síla a doprava sorbentu

V obou uvažovaných variantách čištění spalin se počítá se skladováním hlavních práškových sorbentů v zásobních silech. V případě skladování redukčního činidla je využito zásobní nádrže.

V případě varianty č. 1 se předpokládá skladování NaHCO_3 a aktivního uhlí v samostatných silech. Sorbenty jsou do areálu zařízení dopravovány pomocí cisternových vozů a za pomoci plnicího potrubí pneumaticky dopravovány do zásobních sil **S403** (NaHCO_3) a **S411** (aktivní uhlí + zeolit).

Provedení obou sil je obdobné, pouze s tím rozdílem, že v případě NaHCO_3 se uvažuje s dvojicí vyprazdňujících výsypek z důvodu dvou nezávislých dávkovacích proudů. Silo sorbentu **S403** na výduchu obsahuje odprašující filtr **F404**, který je opatřen samostatnou regenerací tlakovým vzduchem (Puls Jet). Výsypky sil jsou vybaveny vybradisky (vzduchové čeříče) **PJ405**. Výsypky jsou uzavírány pomocí ručních nožových šoupat **H406**.

Doprava sorbentu ze zásobního sila **S403** je realizována pomocí šnekového dopravníku **C407** s výpadem do turniketového podavače **TR 409**, odkud je v případě varianty č. 1 sorbent přísáván do nárazového mlýnu **M408**, který je proveden jako přetlakový. Po patřičném snížení velikosti povrchu je sorbent pomocí ventilátoru **V410** foukán přes dávkovací trysku **I302** do spalinového potrubí.

Obdobně tomu je i v případě dávkování směsi aktivního uhlí a zeolitu. Doprava je realizována pomocí dmyhadla **BL423** vytvářejícího patřičný přetlak, kterým je směs přiváděná do ejektorového podavače **E424** (změna podtlakové dopravy na přetlakovou) dopravována přes dávkovací trysku **I314** do spalinového potrubí.

Zásobní nádrž redukčního činidla a jeho doprava

Obdobně jako v případě dopravy sorbentu je do zařízení pomocí cisternových vozů dopravován 25% roztok čpavkové vody. Vypouštění je prováděno propojením vypouštěcí hadice cisterny s potrubním rozvodem. Redukční činidlo je následně přečerpáno pomocí stlačeného vzduchu do zásobní nádrže **T401**, která je beztlaková, dvouplášťového provedení s vnitřním vyhříváním a venkovní izolací. Nádrž je vybavena 2 dávkovacími čerpadly **P402**, z nichž jedno je provozní a druhé slouží jako záloha v případě poruchy. Nádrž je opatřena čidlem měření obsahu plynného NH_3 a příslušnými bezpečnostními prvky.

Skladování a doprava popelovin

Popeloviny společně s nezreagovaným sorbentem (NaHCO_3) se po regeneraci shromažďují ve vytápěné výsypce filtru. Odtud v pravidelných intervalech přes pneumaticky ovládanou dvojklapku **H307** odcházejí a pomocí šnekového dopravníku jsou dopravovány do ejektorového podavače **E310**, ve kterém je popílku za pomoci dmýchadla **BL309** udělena patričná rychlost pro přepravu do zásobního sila popílku **S411**. Silo je vybaveno prvky měření hladiny, odprašujícím filtrem **F415** na výduchu, vybradisky **PJ418**, otápěnou výsypkou a nožovým šoupětem **H412** na výpadu. Vyprazdňování sila se provádí otevřením dálkově ovládané klapky **H413** a vyprazdňující hubice **N414**, která je zaústěna do příslušného cisternového vozu. Obdobně tomu je v případě dopravy a skladování směsi aktivního uhlí a zeolitu.

Kompresorovna

Tlakový vzduch je nezbytně nutným médiem pro správnou funkci pneumatických prvků i prvků MaR. V rámci zařízení se počítá s dodávkou tlakového vzduchu o výstupní tlaku 6 barů.

K výrobě tlakového vzduchu poslouží šroubový kompresor **BL601** udržující tlak ve vzdušníku **T602** na požadované hodnotě 6 barů. Součástí stanice jsou filtrační prvky zajišťující kvalitu tlakového vzduchu, filtry, odlučovače kondenzátu a zbytkového oleje. Tlakový vzduch pro technologické účely je před vstupem do systému sušen v adsorpční sušičce **HE603** na teplotu $0\text{ }^\circ\text{C}$ a v případě použití pro prvky MaR je vymrazován na teplotu $-40\text{ }^\circ\text{C}$.

7.2 Parametry na vstupu do technologické jednotky

V následujících podkapitolách budou popsány základní vstupní proudy zařízení EVO, s nimiž se počítalo při materiálové a energetické bilanci celého zařízení.

7.2.1 Charakteristika spalovaného odpadu

Pro následné energetické zhodnocování odpadu je nejdůležitější znalost suroviny vstupující do zařízení a ovlivňující parametr výhřevnosti. Na základě prvkového složení odpadu lze stanovit měrné tvorby jednotlivých polutantů ve spalinách. Uvažované složení odpadu bylo stanoveno na základě několika parametrů:

- vykazující složení odpadu spalovny Termizo Liberec (výroční zprávy),
- provozní zkušenosti z provozu SAKO Brno [7],
- výstupy z databáze zařízení EVO.

Při stanovení složení vzorku SKO bylo přihlédnuto k průměrné zástavbě ve zvoleném regionu.

Elementární složení odpadu				
Veličina	Jednotka	Referenční stav		
		Hořlavina	Suchý vzorek	Vlhký vzorek
uhlík (C)	% hm.	55,2	32,57	26,05
vodík (H)	% hm.	6,3	3,72	2,97
dušík (N)	% hm.	3,0	1,77	1,42
kyslík (O)	% hm.	33,0	19,47	15,58
síra (S)	% hm.	1,0	0,59	0,47
chlor (Cl)	% hm.	1,0	0,59	0,47
fluor (F)	% hm.	0,5	0,30	0,24
fosfor (P)	% hm.	0,0	0,00	0,00
obsah vody	% hm.			20,00
anorganický podíl	% hm.		41,00	32,80
obsah hořlaviny	% hm.	100,0	59,00	47,20

Tab. 4 Elementární složení vzorku odpadu

Stanovení výhřevnosti vzorku odpadu

Význam parametru výhřevnosti je při návrhu zásadní, neboť právě výhřevnost udává množství energie získané z odpadu. Nejčastější metodou stanovení výhřevnosti je výpočet podle elementárního složení, dále je možné využít kalorimetrie či zpětného výpočtu výhřevnosti na základě provozních dat spalovny, jak popisuje Kropáč [20]. V DP se uvažuje s výpočtem výhřevnosti na základě znalosti složení hořlaviny. Pro výpočet výhřevnosti odpadu bylo využito stanovení spalného tepla, viz rovnice (7.1) podle Institute of Gas Technology (1990).

Výpočet spalného tepla hořlaviny

$$HHV_h = 341 \cdot C_h + 1322 \cdot H_h + 68,5 \cdot S_h - 120 \cdot (O_h - N_h) \quad (7.1)$$

kde jednotlivé proměnné C_h , H_h , O_h (% hm.) vyjadřují hmotnostní podíl jednotlivých složek v hořlavině.

Výpočet spalného tepla paliva

$$HHV = HHV_h \cdot (1 - A - W) \quad (7.2)$$

kde proměnná A vyjadřuje anorganický podíl (popeloviny) a W vyjadřuje podíl vody v palivu.

Přepočtení spalného tepla na výhřevnost

$$LHV = HHV - r_{H_2O} \cdot W_{celk.} \quad (7.3)$$

kde proměnná r_{H_2O} je výparné teplo vody při 20 °C (kJ/kg).

Celkové množství H_2O , které přejde z paliva do spalin

$$W_{celk.} = W_p + \frac{MW_{H_2O}}{MW_{H_2}} \cdot x_{H,korig} \cdot B_p \quad (7.4)$$

Korekce spalného tepla na výhřevnost

$$x_{H,korig} = H_h - \left(\frac{MW_H}{MW_{Cl}} \cdot Cl_h + \frac{MW_H}{MW_F} \cdot F_h \right) \quad (7.5)$$

Pro srovnání bylo využito novějších vztahů pro stanovení HHV⁸ a LHV⁹ za pomoci rovnice (7.6) publikované podle Hammerschlanga (2007) [37] a rovnice (7.7) podle Velzyho a Grilla (2007) [37].

$$HHV \left(\frac{BTU}{lb} \right) = 14544 \cdot C + 62028 \cdot \left(H - \frac{O}{8} \right) + 4050 \cdot S \quad (7.6)$$

$$LHV \left(\frac{BTU}{lb} \right) = HHV - [WH_2O + (9 \cdot WH)] \cdot 1050 \quad (7.7)$$

Hodnoty výhřevnosti palivového vzorku v závislosti na metodě výpočtu					
Metoda	Období		BTU/lb	kJ/kg	Odchylka %
Institute of Gas Technology	1990	Spalné teplo	4 790	11 142	-
		Výhřevnost	4 303	10 010	-
Hammerschlang	2007	Spalné teplo	4 441	10 329	7,3
Velzy a Grillo	2007	Výhřevnost	3 951	9 190	8,2

Tab. 5 Hodnoty výhřevnosti palivového vzorku

S jistotou nelze prohlásit, která z metod výpočtu je výhodnější, neboť obě varianty vycházejí z empirických rovnic. Z tohoto důvodu se pro další výpočty uvažuje s výhřevností podle Institut of Gas Technology, tedy s hodnotou 10,01 MJ/kg odpadu.

7.2.2 Složení spalovacího vzduchu

Stechiometrická spotřeba spalovacího vzduchu udává teoretické množství vzduchu, které je zapotřebí ke kompletní oxidaci spalitelných složek obsažených v palivu. Stechiometrické množství vzduchu se odvíjí od elementárního složení palivového vzorku, viz tab. 4. Pro zajištění požadovaného obsahu kyslíku nutného pro správnou oxidaci paliva je spalovací vzduch přiváděn s určitým přebytkem, aby docházelo ke kompletnímu vyhoření směsi a předešlo se tak zvyšujícímu se obsahu nedopalu a produkci CO charakterizujícím nedokonalost spalovacího procesu.

⁸ HHV – High heat value – Spalné teplo.

⁹ LHV – Low heat value – Výhřevnost.

Množství potřebného spalovacího vzduchu a s tím spojená produkce spalin je v rámci DP počítána za pomoci softwaru W2E. Pro správný průběh výpočtu je nutné v softwaru zadat vstupní složení spalovacího vzduchu, viz tab. 6 a tab. 7.

Parametry spalovacího vzduchu			
Charakteristika	Jednotka	Primární vzduch	Sekundární vzduch
Teplota	°C	10	30
Tlak	kPa	101,325	101,325
Relativní vlhkost	%	50	20

Tab. 6 Parametry spalovacího vzduchu na vstupu do systému

Složení spalovacího vzduchu		Primární vzduch	Sekundární vzduch
Prvek	Jednotka	Vlhký vzduch	
N ₂	% obj.	77,61	77,43
Ar	% obj.	0,93	0,93
CO ₂	% obj.	0,03	0,03
O ₂	% obj.	20,82	20,77
H ₂ O	% obj.	0,60	0,83

Tab. 7 Složení spalovacího vzduchu

7.2.3 Vstupní předpoklady pro tvorbu bilančních modelů

Vzhledem ke složitosti procesu spalování a následného využití energetického obsahu ve spalinách je při návrhu nutno stanovit řadu okrajových podmínek, které vychází z obecných zkušeností z provozu zařízení EVO.

Vstupní předpoklady:

- Vzhledem ke zpracovatelskému výkonu zařízení EVO se **uvažuje** s maximální výrobou tepelné energie.
- K výrobě elektrické energie se **uvažuje** s využitím protitlaké turbíny (točivé redukce).
- **Neuvažuje se** se spotřebou páry na úpravu napájecí vody.
- **Neuvažuje se** se ztrátami v síti CZT.
- Spotřeba sekundárního paliva se **uvažuje** jen v případě stabilizačního hořáku (4 m³_N/h), neuvažována spotřeba v případě přímého ohřevu spalin ani v případě regenerace katalyzátoru.
- V rámci bilance se **uvažuje** s poměrem primárního a sekundárního spalovacího vzduchu 4 : 3.

- Ve variantě čištění spalin pomocí NaHCO_3 se **uvažuje** s řízeným recyklem 20 % z celkového množství spalin.
- Ve variantě čištění spalin pomocí Ca(OH)_2 se **neuvažuje** s recyklem z důvodu nízké teploty spalin.
- V obou variantách se **uvažuje** přísáváním vzduchu jednotlivých aparátů, viz tab. 11.
- V rámci bilance se **uvažují** tepelné a tlakové ztráty jednotlivých aparátů, viz tab. 9, tab. 10.
- **Neuvažuje se** se spotřebami elektrické energie na dopravu aditiv.

Pro následný výpočet materiálové a energetické bilance zařízení EVO v rámci uvažovaného regionu byly stanoveny hlavní parametry technologie, viz tab. 8. Množství spalovaného odpadu bylo optimálně zvoleno v závislosti na požadavcích daného regionu z pohledu zásobování teplem (detailněji pojednáno v kapitole 6.1). Fond pracovní doby je zvolen na základě výstupů z databáze EVO a při uvážení 2 plánovaných odstávek během ročního provozu. Zvolené parametry páry se odvíjejí od roční zpracovatelské kapacity s předpokladem primární výroby tepelné energie.

Hlavní zadávací parametry				
Charakteristika			Jednotka	Hodnota
Spalovací komora	Všeobecné	množství spalovaného odpadu	kt/r	40,5
		zpracovatelský výkon	kg/h	5 062,5
		fond pracovní doby (FPD)	h/r	8 000,0
	Odpad	teplota vstupního odpadu	°C	20,0
		výhřevnost odpadu	kJ/kg	10 010,2
		měrné teplo odpadu	kJ/kg.K	2,0
	Vzduch pro spalování	teplota spalin za spalovací komorou	°C	950,0
		teplota recyklu spalin	°C	210,0
		teplota spalovacího vzduchu po předeřevu	°C	130,0
		teplota sekundárního spalovacího vzduchu	°C	30,0
		poměr primárního vzduchu vůči sekundárnímu	-	4/3
	Sekundární palivo	spotřeba zemního plynu	m ³ _N /h	4,0
		teplota spalovacího vzduchu pro ZP	°C	10,0
		přebytek spalovacího vzduchu pro spalování ZP	-	1,05
	Tuhé zbytky	množství nedopalu	%	2,0
teplota tuhých zbytků		°C	600,0	
měrné teplo tuhých zbytků		kJ/(kg.K)	1,0	
HRSG	Parametry páry	teplota generované páry	°C	320,0
		tlak generované páry	bar (a)	26,0
			MPa	2,6
		teplota spalin na výstupu z HRSG	°C	230,0
		teplota napájecí vody na vstupu do ekonomizéru	°C	105,0
koeficient odľuhu a odkalu	%	2,0		

Tab. 8 Zadávací parametry pro bilanční výpočty

Z pohledu energetické bilance zařízení jsou nezanedbatelnou součástí provozu i tepelné a tlakové ztráty, které se přímo podílejí na výtěžnosti daného procesu. Pro modelový případ se uvažovalo s tepelnými ztrátami vlivem sálavého tepla jednotlivých aparátů na spalinové trase. Tlakové ztráty byly odhadnuty v závislosti na technologickém provedení jednotlivých zařízení a s ohledem na provozní zkušenosti. V úvahu byly dále brány i netěsnosti jednotlivých aparátových celků a s tím spojené přísávání falešného vzduchu, které se stejně jako tlakové ztráty negativně projevuje na výkonu spalinových ventilátorů.

Přehled nastavených hodnot pro jednotlivé aparáty a proudy využité v bilančním modelu je uveden v tab. 9, tab. 10 a tab. 11.

Zvolené hodnoty tlakových ztrát			
Charakteristika	Jednotka	Varianta č. 1	Varianta č. 2
		Hodnota	Hodnota
HRSG	kPa	1,5	1,5
kontaktor	kPa	0,5	-
katalytický filtr	kPa	2,3	-
ekonomizér	kPa	0,3	0,3
tkaninový filtr	kPa	2,0	2,0
rekuperační výměník	kPa	-	0,3
parní ohřívák	kPa	-	0,3
SCR reaktor	kPa	-	2,0

Tab. 9 Tlakové ztráty jednotlivých aparátů na spalinové trase

Zvolené hodnoty tepelných ztrát			
Charakteristika	Jednotka	Varianta č. 1	Varianta č. 2
		Hodnota	Hodnota
spalovací komora	% z $Q_{\text{uvol.}}$	2	2
HRSG	% z $Q_{\text{přev.}}$	2	2
kontaktor	% z $Q_{\text{přev.}}$	2	-
katalytický filtr	% z $Q_{\text{přev.}}$	4	-
ekonomizér	% z $Q_{\text{přev.}}$	1	1
tkaninový filtr	% z $Q_{\text{přev.}}$	4	4
předehřev spal. vzduchu	% z $Q_{\text{přev.}}$	1	1
rekuperační výměník I	% z $Q_{\text{přev.}}$		1
rekuperační výměník II	% z $Q_{\text{přev.}}$	-	1
parní ohřívák	% z $Q_{\text{přev.}}$	-	1
SCR reaktor	% z $Q_{\text{přev.}}$	-	2

Tab. 10 Tepelné ztráty jednotlivých aparátů na spalinové trase

Zvolené hodnoty přisávání falešného vzduchu			
Charakteristika	Jednotka	Varianta č. 1	Varianta č. 2
		Hodnota	Hodnota
spalovací komora	%	2,0	2,0
kontaktor	%	0,5	-
katalytický filtr	%	1,5	-
tkaninový filtr	%	1,5	1,5
SCR reaktor	%	1,5	1,5

Tab. 11 Přisávání na spalínové trase

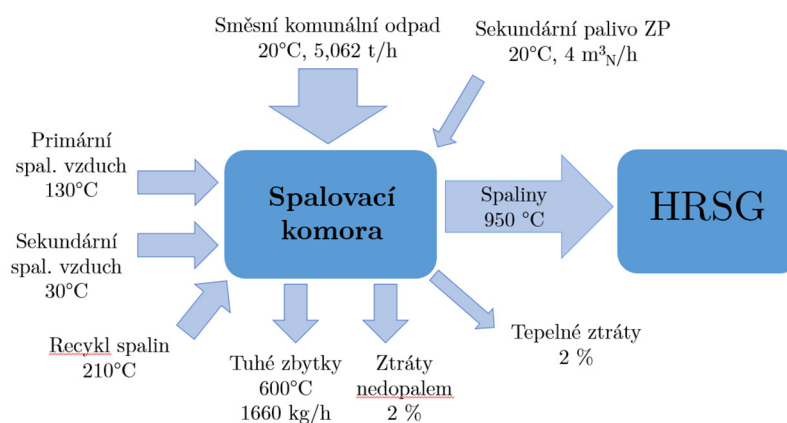
7.3 Materiálová a energetická bilance procesu

Pro detailní materiálovou a energetickou bilanci procesu spalování SKO byly vytvořeny modely (příloha č. 1) za použití softwaru Waste to Energy (W2E), který je dlouhodobě vyvíjen na ÚPEI¹⁰ sekcí zabývající se termickými procesy. W2E je nástroj pro modelování a simulaci technologických procesů v oblasti energetického využití odpadů a biomasy. [38] K vytvoření bilančního modelu je využito modulárních bloků v grafickém uživatelském rozhraní. Software se vyznačuje především simulací spalovacího zařízení spolu se zařízeními k využití uvolněného tepla, mimo jiné systém obsahuje výpočtové bloky jednotlivých hojně využívaných technologií čištění spalin. Způsob tvorby bilančních modelů a popis jednotlivých prvků diskutuje Kropáč [20].

7.3.1 Spalovací zařízení

Na základě vstupního množství odpadu 5 t/h o daném složení a výhřevnosti, uvedených v tab. 4 a tab. 5, byla provedena materiálová a energetická bilance spalovacího zařízení. Při bilanci je uvažována spotřeba sekundárního paliva 4 m³N/h, což se na teplotě ve spalovací komoře vzhledem ke vstupnímu množství odpadu nikterak zásadně neprojeví. Teplota ve spalovací komoře je díky primárnímu, sekundárnímu vzduchu a recyklu udržována na hodnotě 950 °C. Do bilančního výpočtu jsou zahrnuty ztráty tepla radiací a konvekcí prostřednictvím hodnoty 2 % a ztráty nedopalem 2 %, viz tab. 8. Na obr. 32 jsou znázorněny jednotlivé proudy, které vstupují a vystupují ze spalovací komory.

¹⁰ ÚPEI – Ústav procesního a ekologického inženýrství VUT v Brně.



Obr. 32 Bilanční schéma spalovací komory

Hmotová bilance spalovacího vzduchu					
Charakteristika	Jednotka	Primární spalovací vzduch	Sekundární spalovací vzduch	Recykl	Celková produkce spalín
varianta č. 1	m ³ _N /h	15 182	11 386	7 728	29 366 ¹¹
varianta č. 2	m ³ _N /h	19 274	14 456	-	36 474

Tab. 12 Hmotová bilance spalovacího vzduchu

V případě využití recyklu spalín dochází ke snížení množství primárního a sekundárního množství vzduchu, viz tab. 12.

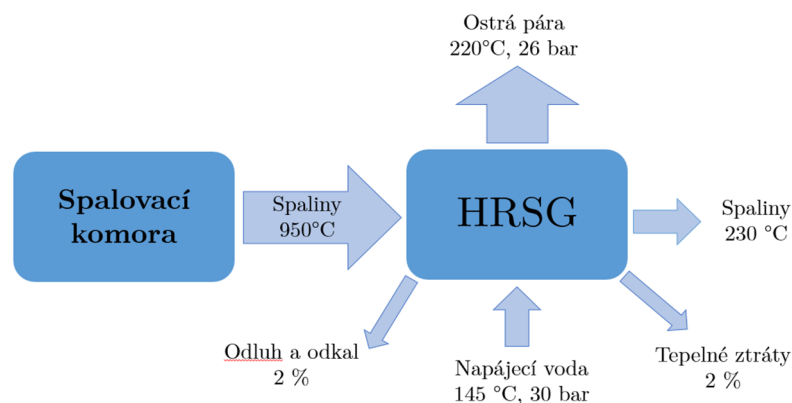
7.3.2 Výroba páry

Jak je podrobněji popsáno v kapitole 7.1.3 a patrné z obr. 33, spaliny o teplotě 950 °C vystupující z dohořovací komory vstupují do utilizačního kotle (HRSG) za účelem výroby páry o teplotě 320 °C a tlaku 26 barů. Teplota napájecí vody na vstupu do HRSG se liší v závislosti na zařazení ekonomizéru a pohybuje se okolo 145 °C. Koeficient odluhu je stanoven na 2 % a tepelné ztráty 2 % z tepla převedeného (tab. 10). Teplota spalín za HRSG je 230 °C. Množství vyrobené páry u jednotlivých variant je uvedeno v tab. 13.

Hmotová bilance výroby páry		
Charakteristika	Jednotka	Množství vyrobené páry
varianta č. 1	kg/h	16 484
varianta č. 2	kg/h	15 700

Tab. 13 Hmotová bilance výroby páry

¹¹ Hodnota produkce vlhkých spalín nezahrnuje přisávání ve spalovací komoře.



Obr. 33 Bilanční schéma utilizačního kotle (HRSG)

7.3.3 Systém čištění spalin

V rámci bilančních výpočtů systému čištění spalin byly vytvořeny dva modely ve W2E, viz příloha č. 1.

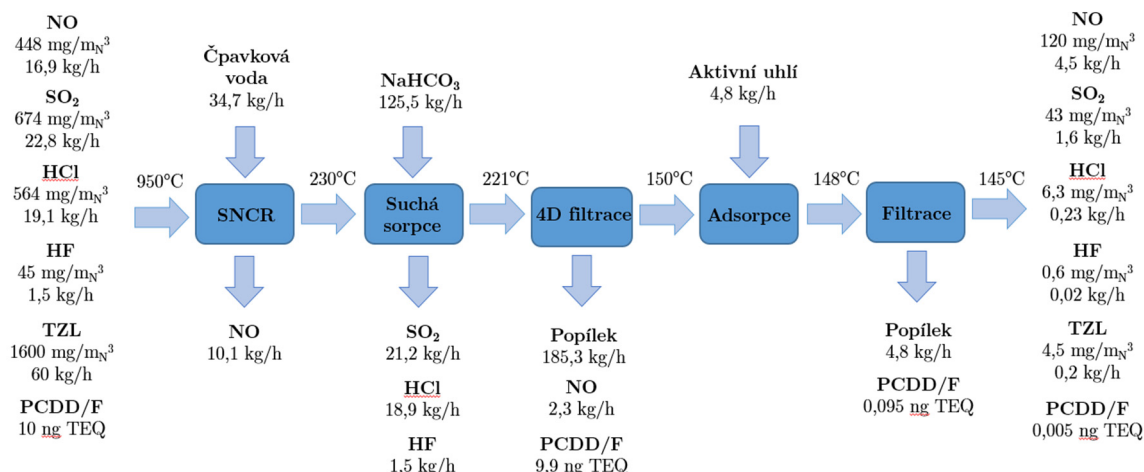
Uvažovaná varianta č. 1

Technologické řešení varianty č. 1 je detailněji popsáno v kapitole 7.1.4. Pro bilanci varianty č. 1 systému čištění spalin byly zvoleny předpoklady uvedené v tab. 14.

Předpoklady hmotové bilance varianty č. 1			
Charakteristika		Jednotka	Hodnota
SNCR	Účinnost snižování NO _x	%	60,0
	Stechiometrický přebytek redukčního činidla α	-	0,9
	Uvažovaný čpavkový skluz	mg/m ³ _N	< 5
	Množství NO _x vyjádřeno pomocí majoritního NO [mg/m ³ _N]		
Suchá sorpce NaHCO ₃	Účinnost snižování SO ₂	%	93,0
	Účinnost snižování HCl	%	98,8
	Účinnost snižování HF	%	98,5
	Stechiometrický přebytek NaHCO ₃ α	-	1,2
4D Filtrace	Účinnost snižování NO _x	%	30,0
	Účinnost snižování PCDD/F	%	99,0
	Uvažovaná koncentrace popílku za filtrem	mg/m ³ _N	< 6,0
	Vzniklé soli a nezreagovaný sorbent odloučen na filtru spolu s TZL		
Adsorpce	Dávkování aktivního uhlí	mg/m ³ _N	150,0
	Uvažovaná účinnost redukce PCDD/F	%	95 - 99
Filtrace	Uvažovaná koncentrace popílku za filtrem	mg/m ³ _N	< 6,0
	Dávkované množství aktivního uhlí spolehlivě odloučeno na filtru		

Tab. 14 Předpoklady hmotové bilance čištění spalin variantou č. 1

Na obr. 34 je uvedena hmotová bilance systému čištění spalin pro variantu č. 1, která splňuje všechny výše popsané předpoklady. Vstupní koncentrace jednotlivých znečišťujících látek jsou vztaženy na suchý plyn.



Obr. 34 Hmotová bilance čištění spalin pro variantu č. 1

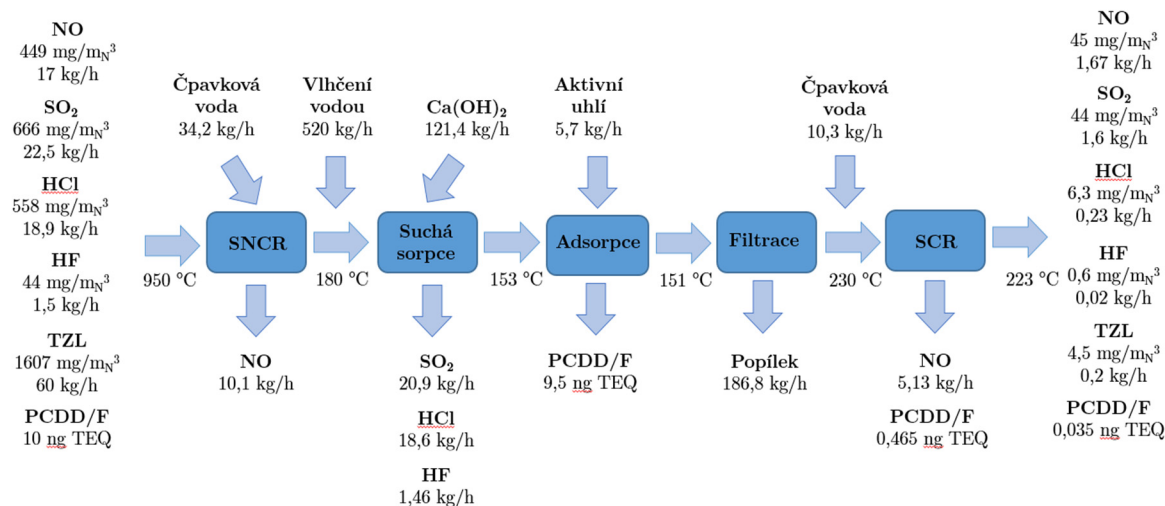
Uvažovaná varianta č. 2

Variantské řešení č. 2 spočívá v primárním snižování množství NO_x pomocí zástřiku čpavkové vody (SNCR), kondicionované suché sorpci $\text{Ca}(\text{OH})_2$ k odstranění kyselých složek (SO_2 , HCl , HF), v adsorpci těžkých kovů a dioxinů na povrchu aktivního uhlí, v odprašení na tkaninovém filtru a následném průchodu reaktorem SCR k sekundárnímu snižování NO_x a dioxinů. Předpoklady pro tuto variantu jsou shrnuty v tab. 15.

Předpoklady hmotové bilance varianty č. 2			
Charakteristika		Jednotka	Hodnota
SNCR	Účinnost snižování NO_x	%	60,0
	Stechiometrický přebytek čpavkové vody α	-	0,9
	Uvažovaný čpavkový skluz	$\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$	< 5
	Množství NO_x vyjádřeno pomocí majoritního NO.		
Suchá sorpce $\text{Ca}(\text{OH})_2$	Teplota procesní vody pro vlhčení	$^{\circ}\text{C}$	10,0
	Účinnost snižování SO_2	%	93,0
	Účinnost snižování HCl	%	98,8
	Účinnost snižování HF	%	98,5
	Stechiometrický přebytek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ α	-	2,0
	V rámci hmotnostní bilance neuvažováno s recyklem sorbentu.		
Adsorpce	Dávkování aktivního uhlí	$\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$	150,0
	Uvažovaná účinnost redukce PCDD/F	%	95 - 99
Filtrace	Uvažovaná koncentrace popílku za filtrem	$\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$	< 6,0
	Vzniklé soli, nezreagovaný sorbent a aktivní uhlí odloučeno na filtru spolu s TZL.		
SCR	Stechiometrický přebytek čpavkové vody α	$\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$	0,7
	Účinnost snižování NO_x	%	80,0
	Účinnost snižování PCDD/F	%	85-95
	Při zpětném ohřevu před SCR reaktorem neuvažováno se spotřebou ZP		
	Neuvažováno se spotřebou ZP na regeneraci katalyzátoru		

Tab. 15 Předpoklady hmotové bilance čištění spalin variantou č. 2

Hmotová bilance varianty č. 2 je uvedena na obr. 35. Při výpočtu jsou uvažovány všechny výše zmíněné předpoklady. Koncentrace jednotlivých znečišťujících látek jsou vztaženy na suchý plyn.



Obr. 35 Hmotová bilance čištění spalin pro variantu č. 2

7.3.4 Energetická náročnost systému čištění spalin

Podobně jako hmotnostní spotřeba aditiv se do náročnosti procesu čištění promítají i spotřeby elektrické energie a tepla. Největšími spotřebiči elektrické energie jsou ventilátory, drtič odpadu, čerpadla napájecí vody, dmýchadla pseudopravy, mlýn sorbentu, šnekové dopravníky, turnikety, otopy výsypek a prvky MaR. Vnitřní spotřeba tepla procesní linky je ovlivněna především nutným přehřevem primárního spalovacího vzduchu, zpětným ohřevem spalin a spotřebou páry k odplynění.

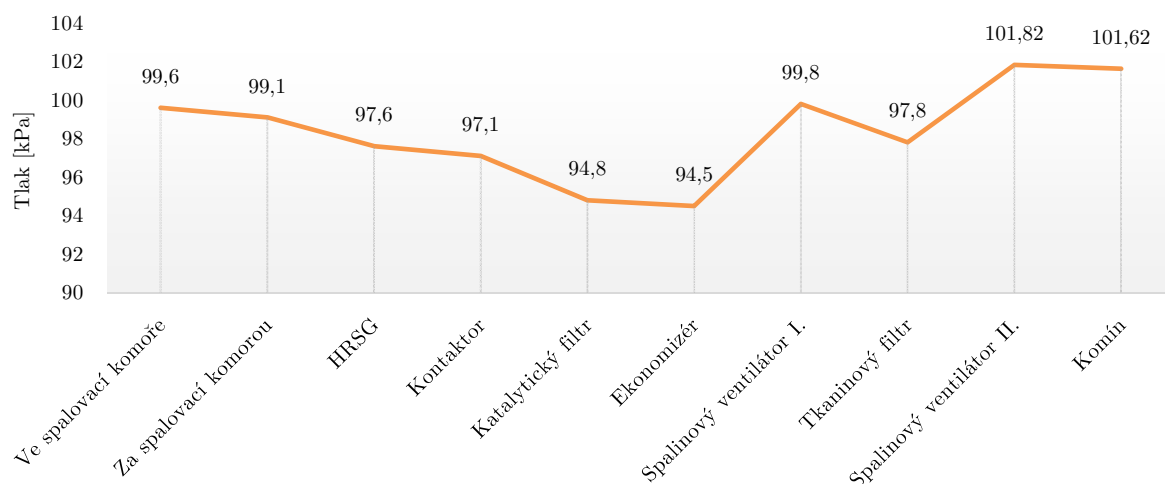
Stanovení příkonu ventilátorů

Ventilátory tvoří jedny z nejvíce energeticky náročných strojů v zařízení EVO. Slouží k dopravě proudů spalovacího vzduchu či spalin do spalovacího prostoru a kompenzaci tlakových ztrát vzniklých na spalinové trase.

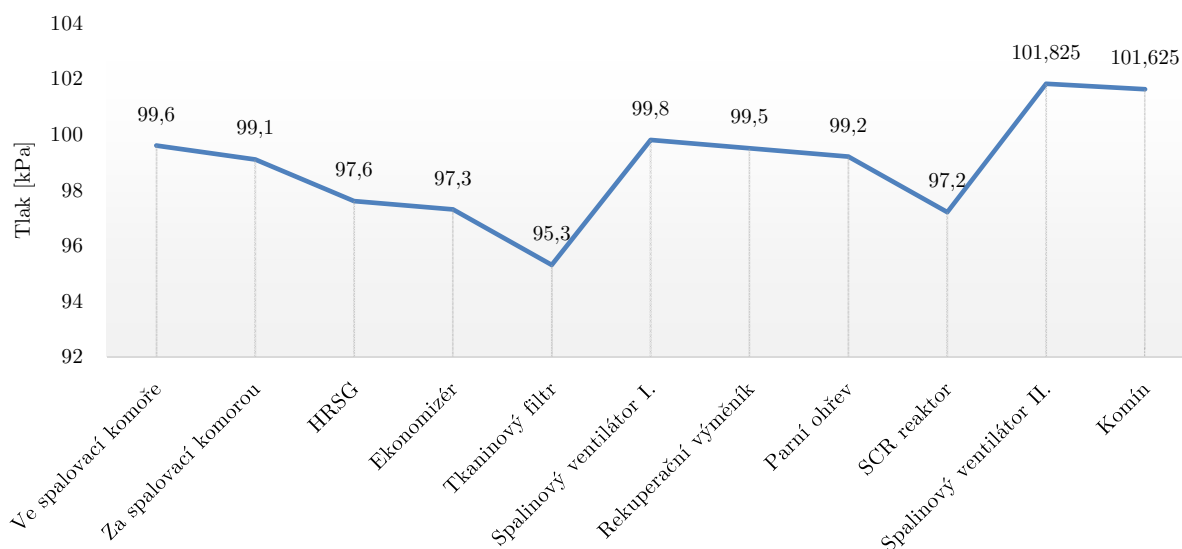
V rámci DP byly tlakové ztráty potrubních soustav zahrnuty do ztrát jednotlivých aparátů na spalinové trase, uvedených v tab. 9. Na obr. 36 a obr. 37 je znázorněn průběh tlaku na spalinové trase pro obě uvažované varianty.

Pro výpočet příkonu jednotlivých ventilátorů byla použita rovnice (7.8). Uvažované hodnoty účinností a rozměry byly stanoveny na základě příslušných charakteristik ventilátorů udávaných výrobcem.

$$P = \frac{\Delta p \cdot V}{\eta} \quad (7.8)$$



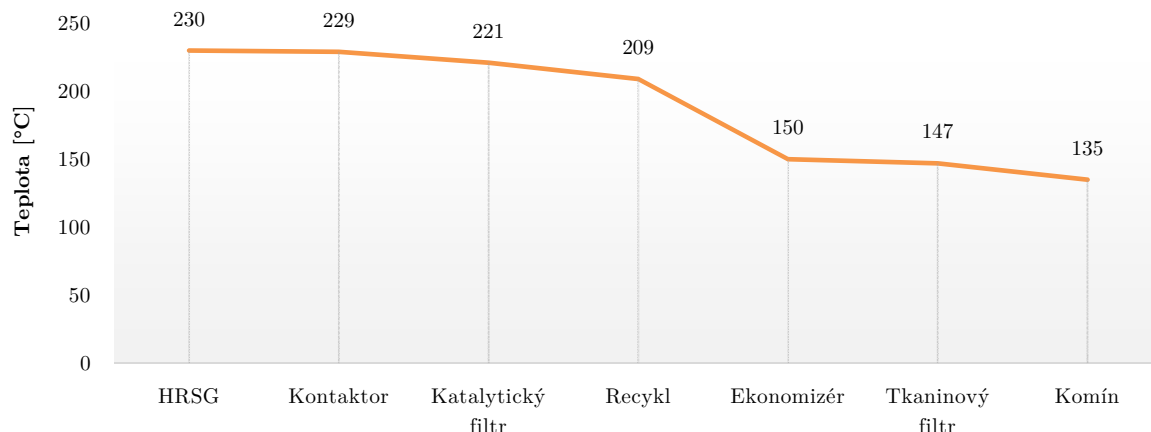
Obr. 36 Průběh tlaku na spalinové trase (varianta č. 1)



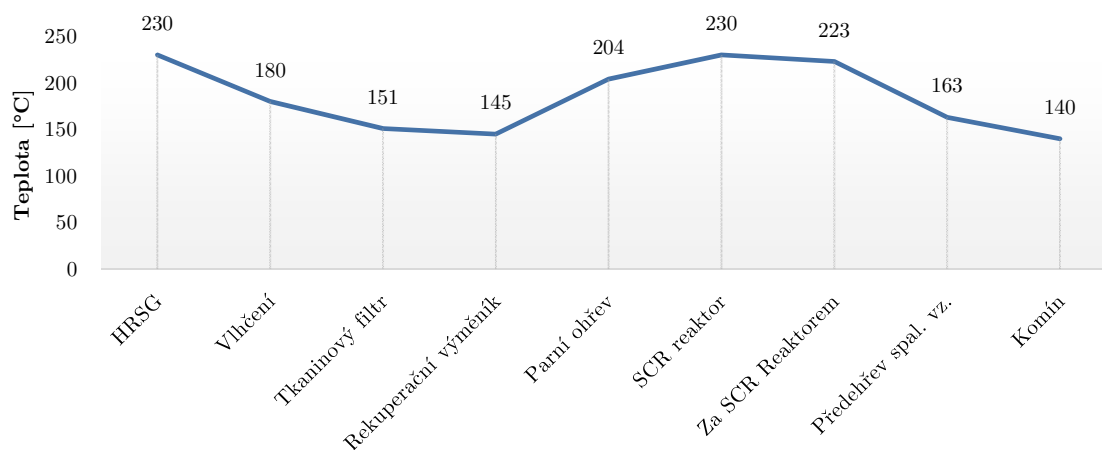
Obr. 37 Průběh tlaku na spalinové trase (varianta č. 2)

Na příkonu ventilátorů se mimo tlakové ztráty podílí i objem dopravovaného média, a tedy teplota a tlak. Objem dopravovaného média je nutné přepočítat na reálné podmínky, při nichž ventilátor pracuje. Obecně platí, že ventilátory by měly být umístěny na chladnější straně spalin vlivem dopravy menšího množství spalin, který vede ke snížení příkonu. Na obr. 38 a obr. 39 je uveden teplotní profil jednotlivých variant.

Vzhledem k vysokým tlakovým ztrátám na spalinové trase je u obou variant využito dvou spalinových ventilátorů, aby nedocházelo k vysokému podtlaku především na filtračních elementech a tím ke zhoršení regenerace filtru. K plynulé regulaci otáček ventilátoru se uvažuje s řízením pomocí frekvenčního měniče (FM), uvažovaná účinnost FM je 98 % a účinnost motoru 97 %.



Obr. 38 Teplotní profil u varianty č. 1



Obr. 39 Teplotní profil u varianty č. 2

Výpočet ventilátorů varianty č. 1						
Položka	Spalinový ventilátor I	Spalinový ventilátor II	Recirkulační ventilátor	Ventilátor primárního vzduchu	Ventilátor sekundárního vzduchu	Jednotky
množství spalin	30 913,4	31 377,1	7 728,0	15 181,9	11 386,4	m ³ _N /h
teplota spalin	150,0	142,2	209,2	10,0	30,0	°C
reálný průtok spalin	51 293,9	49 431,5	14 570,6	15 737,5	12 637,0	m ³ /h
tlaková diference	4,8	4,0	5,1	2,7	2,7	kPa
účinnost ventilátoru	79,5	80,0	78,0	80,0	80,0	%
příkon ventilátoru	86,0	69,14	26,4	14,6	11,7	kW
příkon (M+FM)	90,5	72,7	27,8	15,4	12,3	kW
průměr kola	1 250,0	1 120,0	710,0	900,0	900,0	mm
otáčky	1 460,0	1 460,0	2 900,0	1 460,0	1 460,0	min ⁻¹

Tab. 16 Příkony jednotlivých ventilátorů varianty č. 1

Výpočet ventilátorů varianty č. 2					
Položka	Spalinový ventilátor I	Spalinový ventilátor II	Ventilátor primárního vzduchu	Ventilátor sekundárního vzduchu	Jednotky
množství spalin	38 464,7	39 042,8	19 274,5	14 455,7	m ³ /h
teplota spalin	150,0	140,0	10,0	30,0	°C
reálný průtok spalin	63 024,1	61 942,3	19 980,1	16 043,4	m ³ /h
tlaková diference (Δp)	4,0	5,2	2,7	2,7	kPa
účinnost ventilátoru	73,0	81,0	80,0	80,0	%
příkon ventilátoru	95,9	111,0	18,6	14,9	kW
příkon (M+FM)	100,9	116,8	19,5	15,7	kW
průměr kola	1 250,0	1 250,0	900,0	900,0	mm
otáčky	1 460,0	1 460,0	1 460,0	1 460,0	min ⁻¹

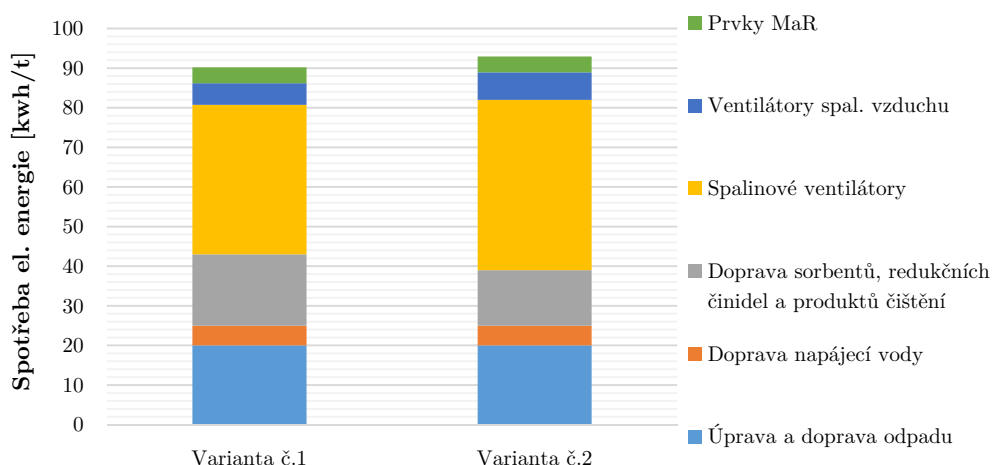
Tab. 17 Příkony jednotlivých ventilátorů varianty č. 2

Celková spotřeba elektrické energie na dopravu jak spalovacího vzduchu, tak převážně na pokrytí tlakových ztrát je u varianty č. 1 vyčíslena na 43,2 kWh/t odpadu, což při uvažované zpracovatelské kapacitě činí 218,7 kW. Ve variantě č. 2 se předpokládá spotřeba 50 kWh/t odpadu, což odpovídá 252,9 kW. I když jsou tlakové ztráty na spalinové trase v součtu víceméně stejné, vykazuje varianta č. 2 spotřebu o 3 kW větší, což je způsobeno především větším objemem dopravovaného množství spalin.

Pro ostatní spotřebiče elektrické energie byly spotřeby rozděleny do jednotlivých provozních sekcí, viz tab. 18. Pro obě varianty se předpokládá spotřeba 20 kWh/t na úpravu a manipulaci s odpadem, skutečná situace se může lišit v závislosti na provozování drtiče odpadu. Vyšší spotřeba elektrické energie pro dopravu sorbentů u varianty č. 1 je způsobena zařazením nárazového mlýnu.

Charakteristika	varianta č. 1	varianta č. 2
	kWh/t	kWh/t
úprava a doprava odpadu	20	20
doprava napájecí vody	5	5
doprava sorbentů, redukčních činidel a produktů	18	14
prvky MaR	4	4

Tab. 18 Ostatní spotřebiče elektrické energie



Obr. 40 Grafické znázornění vnitřních spotřeb elektrické energie

Z tab. 19 je patrné, že uvažovaná variantní řešení nepřekračují svou vlastní spotřebou výrobu, a lze je tedy považovat za nezávislé na vnější dodávce elektrické energie. Vlastní spotřeba je vyčíslena na 90,2 kWh/t odpadu v případě varianty č. 1 a 92,9 kWh/t u varianty č. 2. Například Reimann [39] uvádí vlastní spotřebu zařízení EVO při kogenerační výrobě tepla a elektrické energie na hranici 121 kWh/t.

Charakteristika	Spotřeba el. energie	Výroba el. energie	Exportovaná el. energie
	kWh/t	kWh/t	kWh/h
varianta č. 1	90,2	130,4	40,2
varianta č. 2	92,9	121	28,1

Tab. 19 Zhodnocení výroby elektrické energie

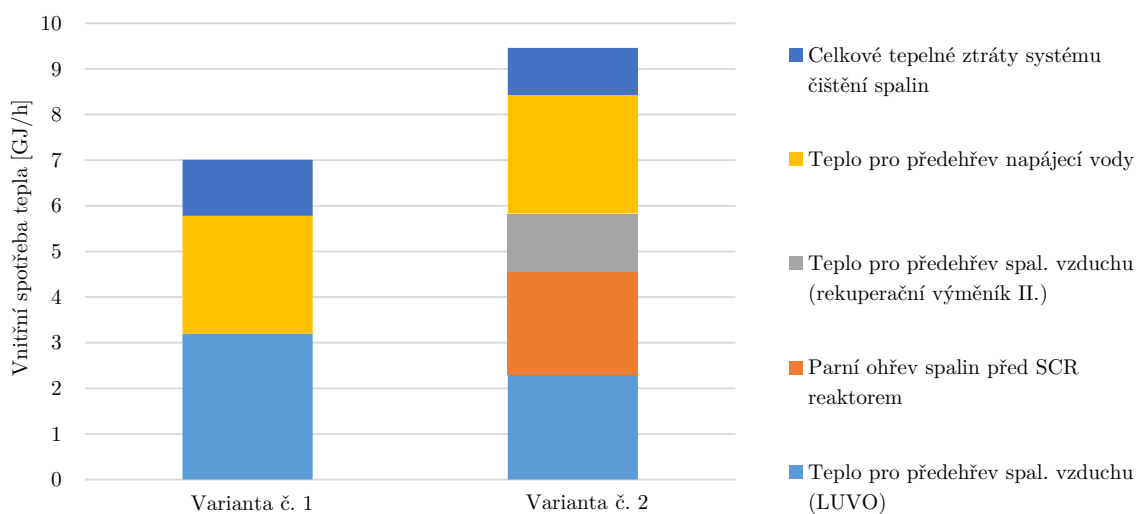
Teplná bilance systému čištění spalin

Jak vyplývá z bilančních schémat ve W2E, které popisuje tab. 20, jsou největšími spotřebiteli tepla výměníky předehřevu primárního spalovacího vzduchu, tzv. LUVO, využívající k ohřevu odvětenou páru po expanzi. Ve variantě č. 1 dochází k jednostupňovému ohřevu vstupního vzduchu o teplotě 10 °C na výchozí teplotu 130 °C, což se projevuje spotřebou 3,2 GJ/h. Naproti tomu u varianty č. 2 je prvotně využito předehřevu z 10 na 80 °C v LUVO (2,3 GJ/h) a poté je využito zbytkového tepla spalin předaného v rekuperačním výměníku II (1,27 GJ/h). Zvolením dvoustupňového předehřevu dosáhneme snížení spotřeby páry po expanzi o více než 570 kg/h.

Ve variantě č. 2 spotřebu tepla negativně ovlivňuje SCR reaktor, který vyžaduje zpětný ohřev spalin na teplotu 230 °C. Vzhledem k tak vysoké teplotě je nutné využít ostrou páru (740 kg/h), čímž se množství vyrobené elektrické energie snižuje téměř o 30 kWh.

Vnitřní spotřeba tepla variantních řešení			
Varianta č. 1	Charakteristika	Hodnota	
		GJ/h	MW
	teplo pro předehřev spal. vzduchu (LUVO)	3,20	0,89
	teplo pro předehřev napájecí vody	2,58	0,72
	celkové tepelné ztráty systému čištění spalin	1,23	0,34
	celkové spotřebované teplo v systému	7,01	1,95
Varianta č. 2	Charakteristika	Hodnota	
		GJ/h	MW
	teplo pro předehřev spal. vzduchu (LUVO)	2,30	0,64
	parní ohřev spalin před SCR reaktorem	2,26	0,63
	teplo pro předehřev spal. vzduchu (rekuperační)	1,27	0,35
	teplo pro předehřev napájecí vody	2,60	0,72
	celkové tepelné ztráty systému čištění spalin	2,25	0,62
	celkové spotřebované teplo v systému	10,68	2,97

Tab. 20 Tepelná bilance variantních řešení



Obr. 41 Grafické znázornění vnitřních spotřeb tepla

Celková vlastní spotřeba tepla u varianty č. 1 vykazuje o 3,67 GJ/h nižší spotřebu než varianta č. 2, což je způsobeno především zpětným ohřevem spalin před SCR reaktorem, ke kterému je potřeba bezmála 2,3 GJ/h.

Tepelné ztráty jednotlivých zařízení se promítají do tepelné bilance necelými 1,3 GJ/h u varianty č. 1 a o téměř 40 % vyššími v případě varianty č. 2 (2,25 GJ/h). Takovýto nárůst je způsoben především mařením tepla řízeným vlhčením spalin procesní vodou, čímž vzniká ztráta cca 1,22 GJ/h.

7.4 Dimenzování hlavních aparátů

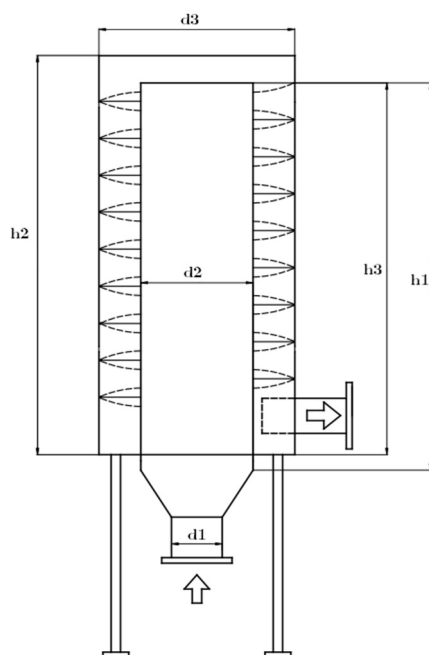
V následujícím bloku je uvedena rozměrová specifikace jednotlivých aparátů podílejících se na čištění spalin. Vzhledem k podobnosti výpočtu je návrh filtrů proveden jen pro variantu č. 1.

7.4.1 Suchá sorpce pomocí NaHCO_3

Dimenze aparátů suché sorpce vycházejí z technologického řešení varianty č. 1 popsané v kapitole č. 7.1.4 a patrně z proudového schématu uvedeného v příloze č. 2. Suché čištění obsahuje reaktor suché sorpce, tzv. kontaktor, a 4D filtr.

Kontaktor

Pro zajištění požadované reakční doby a stupně promísení sorbentu se spalinami je pro variantu č. 1 navržen reaktor suché sorpce s vnitřní vestavbou ve tvaru šroubovice viz obr. 42. Šroubovice napomáhá turbulenci spalin se sorbentem a zvyšuje tak účinnost suché sorpce. Celkový objem kontaktoru je $88,9 \text{ m}^3$, což zajišťuje setrvání spalin po dobu 4,4 s. Hlavní rozměry kontaktoru jsou uvedeny v tab. 21.



Obr. 42 Schéma provedení kontaktoru

Návrhový výpočet kontaktoru		
Charakteristika	Jednotka	Hodnota
reálný průtok spalin	m^3/h	72 852
průměr spalinovodu d_1	m	1,3
průměr vnitřního potrubí d_2	m	1,5
vnitřní průměr kontaktoru d_3	m	4,0
výška vnitřního potrubí h_1	m	7,7
délka překrytí h_3	m	6,7
výška reaktoru h_2	m	6,9
stoupání šroubovice s	-	0,6
počet otáček šroubovice n	-	17,0
objem kontaktoru V	m^3	88,9
doba zdržení ve vnitřním potrubí t_1	s	0,7
doba zdržení v meziprostoru t_2	s	3,7
celková doba zdržení t	s	4,4

Tab. 21 Návrhové hodnoty kontaktoru

Filtrace

Pro stanovení požadovaného počtu filtračních elementů je zásadní skutečný průtok spalin filtrem a hodnota přípustného zatížení filtračních elementů, která je udávána výrobcem. V našem případě se jedná o 4D filtrační elementy společnosti Clear-Edge. [30] Při stanovení počtu rukávců je uvažováno s 10% rezervou filtrační plochy, čímž je zabezpečena správná funkce filtru v závislosti na provozních stavech. Součástí filtru je regenerace tlakovým

vzduchem (Pulse-Jet) a elektrický ohřev jehlanové výsyvky pro zabezpečení kondenzace. Pracovní teplota filtru je 230 °C.

Návrhový výpočet filtru			
Charakteristika	4D filtr	Látkový filtr	Jednotka
skutečný objemový průtok	72 393,4	51 797,9	m ³ /h
skutečný objemový průtok	1 206,6	863,3	m ³ /min
maximální zatížení filtru	1,0	1,0	m ³ /m ² za min
minimální filtrační plocha	1 207,0	863,0	m ²
délka	3 000,0 ¹²	4 000,0	mm
průměr hadice	150,0	150,0	mm
plocha 1 ks	1,4	1,9	m ²
počet trubic/hadic	863,0	458,0	ks
počet hadic + rezerva	960,0	504,0	ks
filtrační plocha všech hadic	1 344,0	857,7	m ²
filtrační rychlost	0,9	0,9	m ³ /m ² za min
počet komor	4,0	2,0	ks
Rozměrový návrh filtru			
počet hadic v řadě	15,0	16,0	ks
počet řad	16,0	16,0	ks
rozteč mezi hadicemi	0,25	0,25	m
rozteč mezi řadou	0,25	0,25	m
délka řady	4,0	4,25	m
rozměr kolmý na řadu	4,25	4,25	m
plocha komory na trubkovnici	17,0	18,1	m ²
mezera mezi komorami	1,0	1,0	m
šířka filtru	9,5	4,25	m
délka filtru	9,0	9,5	m
plocha filtru	85,5	40,4	m ²

Tab. 22 Návrhové hodnoty filtrů pro variantu č. 1

Obdobně je proveden výpočet látkového filtru pro odprášení směsi zeolitu a aktivního uhlí. Rozdíl nastává ve volbě filtračních elementů, kde je využito „obyčejných“ filtračních rukávců s velmi tenkou teflonovou membránou (PTFE) na straně kontaktu, která zajišťuje dobrou regeneraci filtru a také zlepšuje filtrační schopnosti. Pracovní teplota tohoto filtru je 150 °C, což se projevuje nižším průtokem skutečných spalin, cca 51 800 m³/h, čemuž odpovídá 504 filtračních rukávců viz tab. 22.

7.4.2 Návrh SCR reaktoru

Ve variantě č. 2 se počítá s využitím selektivní katalytické redukce NO_x, kdy spaliny společně s vstříkovaným množstvím čpavku o teplotě 230 °C prostupují vertikálně dvěma patry katalyzátoru. Uvažovaný katalyzátor je voštinového typu, tzv. honeycomb. V rámci

¹² Uvažovaný rozměr délky filtračního elementu je maximální, který udává společnost Clear-Edge [30].

výpočtu se uvažuje s vyjádřením NO_x pomocí majoritně zastoupeného NO. Pro výpočet objemu katalyzátoru se předpokládá nevratná redukce NO_x .

Předpoklady pro volbu řádu chemické reakce:

- V systému se neuvažuje s produkcí meziproductů.
- Reakce probíhá v uzavřeném systému (neuvažuje se výměna hmoty).
- V systému se neuvažuje s průběhem dalších reakcí.

Na základě výše popsaných předpokladů se uvažuje s reakcí 1 řádu mezi čpavkem a NO za přítomnosti katalyzátoru. Reakční rychlost zanikajícího NO je popsána rovnicí (7.9). Vzhledem k rozsahu práce a cílům DP bylo uvažováno se závislostí rychlostní konstanty k pouze na koncentraci NO.

$$r_{\text{NO}} = k \cdot c_{\text{NO}} = k \cdot c_{\text{NO}}^0 \cdot (1 - x_{\text{NO}}) \quad (7.9)$$

Při výpočtu se uvažuje s konstantním složením spalín s konstantní teplotou. Pro výpočet SCR reaktoru je použit zidealizovaný model trubkového reaktoru s pístovým tokem s předpokladem ideálního promíchání v radiálním směru. Bilanční rovnici pístového reaktoru popisuje rovnice (7.10).

$$F \cdot c_{\text{NO}}^0 \cdot (1 - x_{\text{NO}}) = r_{\text{NO}} \cdot dS + F \cdot c_{\text{NO}}^0 \cdot (1 - x_{\text{NO}} - dx_{\text{NO}}) \quad (7.10)$$

Po matematických úpravách dostaneme bilanční rovnici odstranění NO v trubkovém reaktoru s pístovým tokem, viz rovnice (7.11).

$$\frac{r_{\text{NO}}}{c_{\text{NO}}^0} = \frac{dx_{\text{NO}}}{d\left(\frac{S}{F}\right)} \quad (7.11)$$

Vlastní výpočet objemu katalyzátoru vychází z provozních dat (W , F , S , c_{NO}^0 , c_{NO}) poskytnutých společností EVECOCO Brno, která již takové zařízení realizovala. Díky těmto datům bylo možné stanovit stupeň konverze x_{NO} pro realizované zařízení a následně rychlostní konstantu k , s jejíž pomocí je možné vypočítat povrch katalyzátoru při nových podmínkách. Postup výpočtu popsán rovnicemi (7.12), (7.13), (7.14), kde s_k je měrný povrch katalyzátoru, v tomto případě je využito katalyzátoru společnosti CERAM. [32]

$$k = \frac{F}{S} \cdot \ln \frac{1}{1 - x_{\text{NO}}} \quad (7.12)$$

$$S = \frac{F}{k} \cdot \ln \frac{1}{1 - x_{\text{NO}}} \quad (7.13)$$

$$W = S \cdot s_k \quad (7.14)$$

Jednotlivé zadávací parametry výpočtu spolu s dosaženými výsledky jsou obsaženy v tab. 23. Při výpočtu rozměrů reaktoru je do výšky započteno rezervní volné patro pro katalyzátor.

Návrhový výpočet SCR reaktoru			
vstupní koncentrace NO _x	jako NO ₂	mg/m ³	180
	jako NO	ppm	88
		mol/m ³	0,004
očekávaná výstupní koncentrace NO _x	jako NO ₂	mg/m ³	45
	jako NO	ppm	21,9
		mol/m ³	0,001
stupeň konverze NO, x_{NO}		-	0,75
průtok spalin reaktorem, F		m ³ _N /h	39 042
rychlostní konstanta, k		mol.m/h	11,9
měrný povrch katalyzátoru, s _k		m ² /m ³	790
objem katalyzátoru, W		m ³	5,75
rezerva		%	8
objem katalyzátoru + rezerva, W		m ³	6,21
celkový povrch katalyzátoru, S		m ²	4 909
Rozměry voštin			
průřez		m	0,15 x 0,15
hloubka		m	0,55
počet voštin v bloku		ks	16
Rozměrový návrh			
počet pater		ks	2
počet voštinových elementů		ks	510
plocha katalyzátoru na patře		m ²	5,76
počet bloků		ks	16
rozvržení bloků na patře		-	4x4
Rozměr patra			
průřez		m	2,4 x 2,4
hloubka patra s roštem		m	0,7
rozměr mezi patry		m	1,0
celková výška reaktoru		m	5,1

Tab. 23 Návrhové hodnoty SCR reaktoru pro variantu č. 2

8. EKONOMICKÁ BILANCE TECHNOLOGICKÉHO ŘEŠENÍ

Ekonomické hodnocení navrženého řešení provozních nákladů systému čištění spalin zahrnuje všechny spotřeby médií pro zajištění chodu systému čištění spalin jako celku.

Do ekonomické bilance byly zahrnuty i náklady na zpracování odpadních produktů (škvára a popílek), ačkoli v případě škváry lze hovořit o tzv. inertním materiálu, který může pro zařízení EVO představovat určitý zdroj příjmů jako materiál využitelný ve stavebnictví. Bohužel v současné době není pro tento materiál odbyt, a je tedy nutné ho skládkovat na skládkách inertního odpadu (S-IO), což pro zařízení EVO při uvažované produkci tvoří nemalé náklady, viz tab. 24. Popílek je vzhledem k obsahu vyluhovatelných solí, jemných částic TZL a aktivního uhlí považován za nebezpečný odpad a je tedy nutné ho uskladnit na skládkách nebezpečného odpadu (S-NO), tudíž je zatížen vyšším zpracovatelským poplatkem.

Z důvodu srovnání provozních nákladů jednotlivých variant je zahrnuta i vlastní spotřeba elektrické energie, která jak je blíže specifikováno již v kapitole 7.3.4 nepřekračuje výrobu a systém je tedy soběstačný. V celkové ekonomické bilanci se v dané situaci uvažuje pouze s prodejem přebytků. Výkupní cena elektrické energie 1,5 Kč za kWh je uvažována v závislosti na uzavření dlouhodobé smlouvy o odběru. Obdobně je tomu u všech ostatních provozních médií uvedených v tab. 24 a tab. 25.

Kromě provozních nákladů je do ekonomické bilance zahrnuto množství mařené energie spojené s vlhčením a zpětným ohřevem spalin ve variantě č. 2, kterým dochází k finanční ztrátě snížením výrob tepla a elektrické energie, viz tab. 26.

Zhodnocení provozních nákladů varianty č. 1							
Náklady na pokrytí spotřeb	Charakteristika	Množství	Jednotka	Cena za jednotku	Jednotka	Celkem	Jednotka
		elektrická energie	457	kWh	1,5	Kč/kWh	685
	zemní plyn	40	kWh	2,0	Kč/kg	80	Kč/h
	čpavková voda	33	kg/h	5,5	Kč/kg	180	Kč/h
	Bicar	120	kg/h	7,5	Kč/kg	901	Kč/h
	aktivní uhlí	5	kg/h	35,0	Kč/kg	172	Kč/h
Náklady na likvidaci produkovaného odpadu	škvára	1 660	kg/h	0,4	Kč/kg	664	Kč/h
	popílek	185	kg/h	8,0	Kč/kg	1 480	Kč/h
Celkové provozní náklady v rámci systému čištění spalin						4 162,0	Kč/h
						33,3	mil. Kč/rok

Tab. 24 Přehled ročních provozních nákladů uvažované varianty č. 1

Varianta č. 1 vykazuje vyšší provozní náklady spojené s relativně vysokou cenou 7,5 Kč/kg za NaHCO₃ (bicar) oproti ceně 3 Kč/kg za Ca(OH)₂ (hydrát). To v celkovém součtu představuje úsporu více než 4,3 mil. Kč ročně při použití Ca(OH)₂ 4,3 mil. Kč ročně při použití Ca(OH)₂.

Kvůli vyšší spotřebě čpavkové vody u varianty č. 2 (nástřík čpavkové vody před SCR reaktor) o více jak 10 kg/h jsou provozní náklady na toto redukční činidlo téměř o 0,5 mil. Kč ročně vyšší než u varianty č. 1.

Do spotřeb zemního plynu nejsou zahrnuty spotřeby na regeneraci katalyzátoru, které mohou negativně ovlivnit výsledné provozní náklady varianty č. 2.

Zhodnocení provozních nákladů varianty č. 2							
Náklady na pokrytí spotřeb	Charakteristika	Množství	Jednotka	Cena za jednotku	Jednotka	Celkem	Jednotka
		elektrická energie	470,3	kWh/h	1,5	Kč/kWh	705
	zemní plyn	40,0	kWh	2,0	Kč/kg	80	Kč/h
	čpavková voda	43,2	kg/h	5,5	Kč/kg	238	Kč/h
	technologická voda	0,52	m ³ /h	40,0	Kč/m ³	21	Kč/h
	hydrát	119,8	kg/h	3,0	Kč/kg	359	Kč/h
	aktivní uhlí	4,9	kg/h	35,0	Kč/kg	172	Kč/h
Náklady na likvidaci produkovaného odpadu	škvára	1 660,0	kg/h	0,4	Kč/kg	664	Kč/h
	popílek	185,0	kg/h	8,0	Kč/kg	1 480	Kč/h
Celkové provozní náklady v rámci systému čištění spalin				3 719,0		Kč/h	
				29,8		mil. Kč/rok	

Tab. 25 Přehled ročních provozních nákladů uvažované varianty č. 2

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, je u varianty č. 2 nutné zpětně ohřívat spaliny ostrou parou před vstupem do DeNO_x, čímž dochází ke snížení výroby tepla, tak elektrické energie, které se promítnou do celkové bilance snížením zisku o více jak 2 mil. Kč ročně. Vlhčením spalin snižujeme výrobu o 1,25 GJ tepla za hodinu, a to při přepočtu na exportované teplo odpovídá ztrátě 1 mil. Kč ročně.

Ekonomické zhodnocení energetické náročnosti							
Energie vynaložená na zpětný ohřev spalin před SCR reaktorem	Charakteristika	Množství	Jednotka	Cena	Jednotka	Celkem	Jednotka
		tepelná energie na zpětný ohřev spalin	2,3	GJ/h	100,0	Kč/GJ	225,0
	snížení výroby elektrické energie zpětným ohřevem	30,0	kWh	1,1	Kč/kWh	33,0	Kč/h
Zmařená energie vlhčením	ztráta tepla	1,25	GJ/h	100,0	Kč/GJ	125,0	Kč/h
Celkový ušlý zisk				383,0		Kč/h	
				3,1		mil. Kč/rok	

Tab. 26 Celkový ušlý zisk systému čištění spalin varianty č. 2

Z pohledu celkových provozních nákladů je ekonomicky výhodnější varianta č. 2, což je ovlivněno především nižší cenou vápenného hydrátu, který výrazně ovlivňuje celkovou ekonomickou bilanci (úspora více než 4,8 mil. Kč ročně). Oproti variantě č. 1 jsou roční provozní náklady o 0,4 mil. Kč nižší.

Předložené hodnocení ekonomické náročnosti alternativních uspořádání bloku čištění spalín zahrnuje stránku provozních nákladů a dopady na zisk z výroby energie. Návazné práce v tomto směru budou vyžadovat posouzení z pohledu investičních nákladů a respektování aktuálních cenových relací i lokálních podmínek v místě předpokládané realizace.

9. ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce se soustřeďuje na problematiku čištění spalin u zařízení EVO nižších zpracovatelských výkonů, které se jeví jako perspektivní řešení nakládání s odpady v regionálním měřítku.

Úvodní část předkládané diplomové práce byla věnována současnému stavu produkce a nakládání s odpady na území ČR a předpokládanému vývoji situace s ohledem na očekávané omezení skládkování odpadů, které radikálně ovlivní současný stav odpadového hospodářství. Z detailní analýzy vytvořené databáze zařízení EVO vyplývá, že současný stav odpadového hospodářství ČR značně zaostává za vývojem v ostatních evropských zemích, které již v předchozích letech zásadně změnily postoj a vydaly se směrem materiálového a především energetického využití odpadu. Cílem POH je zvýšit kapacitu zařízení EVO do roku 2024 o více než 60 % (750 kt/rok). Splnění tohoto záměru se musí odrazit ve vlně výstavby nových zařízení, které svojí kapacitou napomohou k řešení dané situace.

S ohledem na celoroční dodávku tepla, sezonní vývoj a množství produkovaného odpadu byla pro modelový region navržena optimální zpracovatelská kapacita 40,5 tis. tun odpadu. Zařízení o takovéto kapacitě by bylo schopné krýt současnou spotřebu tepla v regionu z 36,5 %, což by znamenalo značnou úsporu fosilních paliv, která v současné době zajišťují dodávky tepla.

S ohledem na kapacitu zařízení EVO a trend využití převážně suchých způsobů čištění spalin u nižších zpracovatelských výkonů, byla navržena dvě alternativní řešení: varianta č. 1 založená na suché sorpci s využitím katalytické filtrace a varianta č. 2 založená na kondicionované suché sorpci s následným katalytickým rozkladem NO_x a PCDD/F. Z pohledu technického řešení jsou oba návrhy aparátového uspořádání plně v souladu s referenčním dokumentem o nejlepších dostupných technologiích (BREF) a vycházejí z výsledků vytvořené databáze zařízení EVO. Uvažované technologie byly voleny s ohledem na maximální možnou efektivitu při nejnižších provozních nákladech. V případě varianty č. 2 se uvažovalo s budoucím zpřísněním emisních limitů na množství vypouštěných NO_x.

Součástí předkládané práce je strojně-technologický návrh zařízení EVO s detailním popisem jednotlivých provozních uzlů, které zajišťují provozuschopnost zařízení jako celku. Aby bylo možné jednotlivé varianty detailněji zhodnotit, byla pomocí softwaru W2E provedena materiálová a energetická bilance, podle níž varianta č. 2 vykazuje vyšší spotřebu redukčního činidla (čpavkové vody) a oproti variantě č. 1 se uvažuje se spotřebou procesní vody k vlhčení spalin.

Na základě energetického srovnání se jeví varianta č. 1 jako výhodnější řešení, neboť z důvodu využití vyšších teplot na straně čištění spalin nedochází ke zpětným ohřevům a maření tepla.

Spotřeba elektrické energie, která je výrazně ovlivněna provozem spalinových ventilátorů, je nižší u varianty č. 1 díky nižšímu průtoku spalin. Ale vzhledem k využití recirkulace spalin, je nutné zařazení pomocného ventilátoru, který tento rozdíl minimalizuje.

Pro budoucí zhodnocení investičních nákladů a představu o zastavěné ploše je v rámci předkládané práce proveden návrh klíčových aparátů systému čištění spalin. Pozornost byla věnována především aparátům suché sorpce varianty č. 1, výpočtu objemu kontaktoru s vnitřní šroubovicovou vestavbou v závislosti na době setrvání spalin a dále optimálnímu návrhu katalytického a tkaninového filtru s využitím 4D filtračních elementů a látkových rukávců. Vzhledem k výslednému počtu 4D filtračních elementů u katalytického filtru je nutné počítat s vyšší investiční náročností.

V rámci DP byla provedena rozvaha o potřebné velikosti katalytické náplně pro blok selektivní katalytické redukce SCR oxidů dusíku (NO_x). Výsledné množství katalyzátoru voštinového typu je $6,21 \text{ m}^3$.

Poslední část DP práce je zaměřena na ekonomické zhodnocení provozních nákladů, které snižují celkovou ziskovost uvažovaného zařízení. Při porovnání provozních nákladů spojených se spotřebami a nákladů vynaložených na likvidaci odpadu je varianta č. 2 o 3,5 mil. Kč ročně úspornější než varianta č. 1. Avšak při uvážení energetické náročnosti z důvodu zpětného ohřevu a nutnosti vlhčení spalin vykazuje varianta č. 2 snížení zisku o 3,1 mil. Kč ročně, čímž se rozdíl mezi variantou č. 1 a č. 2 minimalizuje na hodnotu 0,4 mil. Kč ročně.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SEVERNÍ ENERGETICKÁ, A.S.. *Katalog uhlí* [online]. 2014 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.sev-en.cz/cz/uhli/katalog-uhli.pdf>
- [2] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Directive 2006/12/EC on waste* [online]. 2006 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006L0012:EN:NOT>
- [3] PARLAMENT ČR. Zákon č. 383/2008 Sb., kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech. In: *Sbírka zákonů České republiky* [online]. 2008 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2008-383>
- [4] PARLAMENT ČR. Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech. In: *Sbírka zákonů České republiky* [online]. 2001 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185#cast3>
- [5] THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Directive 1999/31/EC on landfill of waste* [online]. 1999 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31999L0031:EN>
- [6] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. *Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024* [online]. 2014 [cit. 2015]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/\\$FILE/OODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/$FILE/OODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf)
- [7] SUZOVÁ, J.. *Je spalovna strašák, nebo smysluplné zařízení ?*. Brno, 2014.
- [8] PARLAMENT ČR. Zákon č. 229/2014 Sb. kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech. In: *Sbírka zákonů České republiky* [online]. Praha, 2014 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-229>
- [9] ISWA WtE State of the Art Report. In: *Confederation of European Waste-to-Energy Plants* [online]. 2012 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.cewep.eu/information/data/iswawtestateoftheartreport/index.html>
- [10] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Produkce, využití a odstranění odpadů* [online]. 2014 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.czso.cz/csu/>
- [11] THE EUROPEAN IPPC BUREAU. *Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration* [online]. 2006 [cit. 2015]. Dostupné z: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/wi_bref_0806.pdf
- [12] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. In: *Směrnice 2000/76/ES o spalování odpadu* [online]. 2000 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0076&from=CS>

- [13] PARLAMENT ČR. Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejich zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů České republiky* [online]. 2012 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [14] PARLAMENT ČR. Zákon 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů České republiky* [online]. 2012 Částka 69 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [15] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *Směrnice 2010/75/EU o průmyslových emisích* [online]. 2010 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=EN>
- [16] BEÉR, J.. Minimizing NOx emissions from stationary combustion - reaction engineering methodology. . Chem. Eng. Science, 1994, roč. 49, s. 4067-4083.
- [17] WATTERSON, J.. *Compilation of EU Dioxin Exposure and Health Data Task 3 - Environmental Fate and Transport*. Culham, 1999.
- [18] VAN DEN BERG, M., L. BIRNBAUM, A. BOSVELD a et AL.. Toxic Equivalency Factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for Humans and Wildlife. 12. 1998 č. 106. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1533232/pdf/envhper00535-0049.pdf>
- [19] PAŘÍZEK, T.. *Redukce škodlivých látek u jednotek pro termické zpracování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2009, 136 s. . Disertační práce.
- [20] KROPÁČ, J.. *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh sestavy čištění spalín z procesu termického zpracování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2012, 159 s. . Disertační práce.
- [21] HEIDE, B.. Technologies for NOx reduction. In: *ms-umwelt.de* [online]. 2010 [cit. 2015]. Dostupné z: http://www.ms-umwelt.de/english/downloads/Advanced_SNCR_Technology_for_Power_Plants_Power_Gen_Las_Vegas_2011.pdf
- [22] Z&J Technologies. In: *t-matrix 2D Gas Temperature Measuring system* [online]. 2013 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.zjtechnologies.de/uploads/media/t-matrix-Internet-d-e.pdf>
- [23] *TMT - Tapping Measuring Technology* [online]. Dostupné z: http://www.tmt.com/uk/docs/standard/page.cfm/TMT-SOMA-blast-furnace-gas-temperature-measurement_152.htm
- [24] BONNENBERG DRESCHKE Projektentwicklung GmbH. In: *Agam MMP - Acoustic Pyrometer* [online]. Dostupné z: http://www.budi.de/produkte/agam/agam%20MMP%20Blatt_engl_040504.pdf
- [25] *Solvair Solutions* [online]. 2013 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.solvairsolutions.com/EN/OurProcesses/DrySorbentInjection.aspx>

- [26] UCEKAJ, V.. *Analýza možnosti nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2010, 153 s. . Disertační práce.
- [27] Sorbacal®. In: *Flue gas treatment - Products and Solutions (Sorbacal® SP)* [online]. 2008 [cit. 2015]. Dostupné z:
http://www.sorbacal.com/sites/sorbacal/files/pdf/Brochure_Sorbacal_SP_EN.pdf
- [28] ZVVZ - ENVEN ENGINEERING, A.S.. *Látkové filtry* [online]. 2015 [cit. 2015]. Dostupné z:
<http://www.zvvz.cz/zvvz-enven/produkty/latkove-filtry/popis-funkce.html>
- [29] REMEDIA D/F catalyc filter system. In: *Remedia Catalytic Filter System Overview* [online]. 2000 [cit. 2013]. Dostupné z:
http://www.gore.com/MungoBlobs/175/391/remedia_overview.pdf
- [30] CLEAR EDGE. *Cerafil TopKat* [online]. 2010 [cit. 2014]. Dostupné z:
www.clearedge.com/cerafil_topkat/
- [31] VEJVODA, J., P. MACHAČ a P. BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, Ústav plynárenství, koksochemie a ochrany prostředí, 2002.
- [32] *SCR Honeycomb catalysts* [online]. Dostupné z: <http://www.ceram-ibiden.com/index.php?tabid=322>
- [33] JOHNSON MATTLEY STATIONARY EMISSIONS CONTROL. *SINOx®* [online]. 2014 [cit. 2015]. Dostupné z: <http://www.jmsec.com/cm/Products/SCR-Catalysts.html>
- [34] HALDOR TOPSOE A/S. *DNX® catalyst features* [online]. 2014 [cit. 2015]. Dostupné z:
<http://www.topsoe.com/products/dnx-hd>
- [35] KRŇÁVEK, Martin. *Regionální energetické využití odpadů*. Brno: Vysoké učení tecnické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2015. Diplomová práce.
- [36] Martin GmbH. In: *Reverse-acting grate vario* [online]. 2013 [cit. 2015]. Dostupné z:
http://www.martingmbh.de/media/files/technologie/update_1/Rueckschub-Rost_Vario_08_13.pdf
- [37] KLINGHOFFER, N. a M. CASTALDI. *Waste to energy conversion technology*. Philadelphia: Woodhead, 2013. ISBN 978-0-85709-011-9.
- [38] *Waste to Energy (W2E)*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2015.
- [39] O., Reimann.. Results of Specific Data for Energy, Efficiency Rates and NCV of 97 European W-t-E Plants and Determination of the Main Results. In: . Bamberg, Germany: CEWEP Energy Report, October 2005 (Updated July 2006).

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Hierarchie nakládání s odpady.....	12
Obr. 2 Produkce KO a SKO v ČR v letech 2009 až 2013 (data ISOH) [6]	14
Obr. 3 Energetické využití odpadu v roce 2012 v zařízeních EVO ČR [7]	15
Obr. 4 Prognóza nakládání s SKO v ČR v letech 2013 až 2024 (data POH) [6]	15
Obr. 5 Produkovávané množství SKO a způsoby nakládání v evropských zemích [10]	17
Obr. 6 Množství spalovaného odpadu v evropských státech (využitá data z období let 2009 až 2013)	17
Obr. 7 Počet spaloven v jednotlivých státech Evropy.....	18
Obr. 8 Průměrná kapacita spaloven v jednotlivých státech Evropy	19
Obr. 9 Rozložení zpracovatelské kapacity podle instalovaného výkonu zařízení v EU	20
Obr. 10 Průměrná hodnota výhřevnosti spalovaného odpadu ve státech EU.....	21
Obr. 11 Zastoupení zvolených technologií čištění odpadních plynů	22
Obr. 12 Závislost zpracovatelské kapacity na volbě systému čištění spalin.....	23
Obr. 13 Kombinace sorbentů při suché metodě	23
Obr. 14 Zastoupení metod redukce NO _x	23
Obr. 15 Srovnání emisních limitů vybraných látek pro zdroje 5 až 50 MWt	26
Obr. 16 Vliv teplotního okna na redukci NO _x [21].....	32
Obr. 17 Vliv typu reagentu na distribuční vzdálenosti [21].....	33
Obr. 18 Povrch částice NaHCO ₃ po kalcinaci [26].....	34
Obr. 19 Rozdíl ve struktuře vápenného hydrátu a Sorbacal SP [27]	35
Obr. 20 Rozdíl v účinnosti zachycení HCl [27].....	35
Obr. 21 Schéma provedení látkového filtru [28]	36
Obr. 22 Princip funkce filtrační tkaniny Remedica D/F [29].....	37
Obr. 23 4D filtrační element [30].....	37
Obr. 24 Provedení katalyzátoru Honeycomb [33].....	39
Obr. 25 Provedení deskového katalyzátoru [33]	39
Obr. 26 Průměrné měsíční dodávky tepla do CZT v období let 2011 až 2013 [35].....	41
Obr. 27 Měsíční dodávky tepla ze zařízení EVO [35]	41
Obr. 28 Pokrytí aktuálních spotřeb tepla v průběhu letního dne [35].....	42
Obr. 29 Pokrytí aktuálních spotřeb tepla v průběhu zimního dne [35]	42
Obr. 30 Blokové schéma varianty č. 1	46
Obr. 31 Blokové schéma varianty č. 2	48
Obr. 32 Bilanční schéma spalovací komory	57
Obr. 33 Bilanční schéma utilizačního kotle (HRSG)	58
Obr. 34 Hmotová bilance čištění spalin pro variantu č. 1	59
Obr. 35 Hmotová bilance čištění spalin pro variantu č. 2	60
Obr. 36 Průběh tlaku na spalínové trase (varianta č. 1).....	61
Obr. 37 Průběh tlaku na spalínové trase (varianta č. 2).....	61
Obr. 38 Teplotní profil u varianty č. 1.....	62
Obr. 39 Teplotní profil u varianty č. 2.....	62
Obr. 40 Grafické znázornění vnitřních spotřeb elektrické energie	64
Obr. 41 Grafické znázornění vnitřních spotřeb tepla	65
Obr. 42 Schéma provedení kontaktoru.....	66

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání emisních limitů pro zdroje 5 až 50 MWt [13]	25
Tab. 2 Produkty vznikající spalování odpadu a nejvyužívanější způsoby jejich odstranění	27
Tab. 3 Podmínky provozu spaloven [12]	28
Tab. 4 Elementární složení vzorku odpadu	51
Tab. 5 Hodnoty výhřevnosti palivového vzorku	52
Tab. 6 Parametry spalovacího vzduchu na vstupu do systému	53
Tab. 7 Složení spalovacího vzduchu	53
Tab. 8 Zadávací parametry pro bilanční výpočty	54
Tab. 9 Tlakové ztráty jednotlivých aparátů na spalinové trase	55
Tab. 10 Tepelné ztráty jednotlivých aparátů na spalinové trase	55
Tab. 11 Přisávání na spalinové trase	56
Tab. 12 Hmotová bilance spalovacího vzduchu	57
Tab. 13 Hmotová bilance výroby páry	57
Tab. 14 Předpoklady hmotové bilance čištění spalin variantou č. 1	58
Tab. 15 Předpoklady hmotové bilance čištění spalin variantou č. 2	59
Tab. 16 Příkony jednotlivých ventilátorů varianty č. 1	62
Tab. 17 Příkony jednotlivých ventilátorů varianty č. 2	63
Tab. 18 Ostatní spotřebiče elektrické energie	63
Tab. 19 Zhodnocení výroby elektrické energie	64
Tab. 20 Tepelná bilance variantních řešení	65
Tab. 21 Návrhové hodnoty kontaktoru	66
Tab. 22 Návrhové hodnoty filtrů pro variantu č. 1	67
Tab. 23 Návrhové hodnoty SCR reaktoru pro variantu č. 2	69
Tab. 24 Přehled ročních provozních nákladů uvažované varianty č. 1	70
Tab. 25 Přehled ročních provozních nákladů uvažované varianty č. 2	71
Tab. 26 Celkový ušlý zisk systému čištění spalin varianty č. 2	71

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AGAM	Acoustic Gas Temperature Measurement (akustické snímání teploty)
BREF/BAT	Reference Document (referenční dokument BAT)
BRKO	biologicky rozložitelný komunální odpad
CZT	centrální zásobování teplem
DP	diplomová práce
EKO	ekonomizér
EVO	energetické využití odpadu
FM	frekvenční měnič
FPD	fond pracovní doby
HDP	hrubý domácí produkt
HRSG	Heat Recovery Steam Generator (kotel na odpadní teplo)
IPPC	International Prevent Pollution Control (integrovaná prevence a omezování znečištění)
ISOH	informační systém odpadového hospodářství
ISWA	International Solid Waste Association
KO	komunální odpad
LF	lehká frakce
MaR	Measuring and Regulation (měření a regulace)
NO	nebezpečný odpad
OO	objemný odpad
PAU	polycyklické aromatické uhlovodíky
PCB	polychlorované bifenoly
PCDD/F	polychlorované dibenzodioxiny / dibenzofurany
POH	plán odpadového hospodářství
PTFE	polytetrafluorethylen
SCR	Selective Catalytic Reduction (selektivní katalytická redukce)
SKO	směsný komunální odpad
SNCR	Selective Non Catalytic Reduction (selektivní nekatalytická redukce)
TOC	těkavé organické látky
TZL	tuhé znečišťující látky
ÚPEI	Ústav procesního a ekologického inženýrství
WtE	Waste to Energy (energie z odpadu)
ZP	zemní plyn

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Bilanční schémata W2E

V1505_B01 – Bilance – varianta č. 1

V1505_B02 – Bilance – varianta č. 2

Příloha 2 – Technologická schémata

V1505_T01 – Systém čištění spalin – varianta č. 1

V1505_T02 – Systém čištění spalin – varianta č. 2

Příloha 3 – Databáze zařízení EVO

Příloha 4 – CD s diplomovou prací včetně příloh