

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav procesního a ekologického inženýrství

Ing. Jiří Kropáč

**POKROČILÝ VÝPOČTOVÝ NÁSTROJ PRO NÁVRH SYSTÉMU ČIŠTĚNÍ
SPALIN Z PROCESU TERMICKÉHO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ**

**ADVANCED COMPUTATIONAL TOOL FOR FLUE GAS CLEANING
SYSTEM DESIGN IN THERMAL PROCESSING OF WASTE**

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

Oponenti: prof. Ing. Jiří Klemeš, CSc.
Ing. Vladimír Ucekaj, Ph.D.

Datum obhajoby: 2. 11. 2012

Klíčová slova

Čištění spalin, spalování odpadů, výpočtový systém, energetické využití odpadu, matematické modelování, simulační výpočty.

Keywords

Flue gas cleaning, waste combustion, computational system, energy recovery of waste, mathematical modelling, simulation.

Místo uložení dizertační práce

Ústav procesního a ekologického inženýrství, FSI, VUT v Brně

© Jiří Kropáč, 2012

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK	4
1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V ŘEŠENÉ OBLASTI	6
2.1 Energetické využití odpadu.....	6
2.2 Typické technologie pro termické zpracování odpadů	6
2.3 Trend ve vývoji systémů čištění spalin	7
2.4 Škodlivé emise a emisní limity	8
2.5 Opatření pro snižování koncentrace škodlivin ve spalinách	10
2.6 Atributy energetického využití odpadů.....	11
2.7 Interakce čištění spalin s ostatními systémy technologie spalovny	13
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	14
4 HLAVNÍ VÝSLEDKY A PŘÍNOS PRÁCE	16
4.1 Analýza systému čištění spalin	16
4.2 Moderní výpočtový nástroj pro modelování systémů čištění spalin.....	16
4.2.1 Simulační software W2E a jeho charakteristika	17
4.2.2 Návrh postupů pro modelování systému čištění spalin pomocí W2E	17
4.2.3 Modely aparátů.....	18
4.3 Aplikace simulačního systému.....	18
4.3.1 Jednotky pro energetické využití MSW	19
4.3.2 Spalovny průmyslových a nebezpečných odpadů.....	19
4.3.3 Aplikace v dalších oblastech – spalování problematických paliv na bázi biomasy	20
5 ZÁVĚR.....	22
LITERATURA	24
ŽIVOTOPIS.....	26
PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY	27
ABSTRAKT	28
ABSTRACT	28

SEZNAM ZKRATEK

- BAT – Best Available Techniques – Nejlepší dostupné technologie
BREF – BAT Reference Document – Referenční dokument BAT
ESP – Electrostatic Precipitator – Elektrostatický odlučovač
EU – European Union – Evropská Unie
HRSG – Heat Recovery Steam Generator – Kotel na odpadní teplo
IHW – Industrial and Hazardous Waste – Průmyslový a nebezpečný odpad
MSW – Municipal Solid Waste – Tuhý komunální odpad
PAH – Polychlorinated Aromatic Hydrocarbons – Polycyklické aromatické uhlovodíky
PCDD/F – Polychlorinated Dibenzo Dioxins and Furans - Dioxiny
SCR – Selective Catalytic Reduction – Selektivní katalytická redukce
SNCR – Selective Non-Catalytic Reduction – Selektivní nekatalytická redukce
TOC – Total Organic Carbon – Celkový organický uhlík
VOC – Volatile Organic Compounds – Těkavé organické sloučeniny
WtE – Waste to Energy – Energetické využití odpadů

1 ÚVOD

Jedním z problémů dnešní společnosti je nutnost zpracovat velké množství vznikajícího odpadu. Poté, co je vytvořen, je nutné jej šetrně zpracovat. Z mnoha hledisek nejvýhodnějším způsobem odstraňování s odpadem je jeho recyklace, kterou bohužel nemůžeme uplatnit pro všechny druhy odpadů. V tomto případě je nezbytné zajistit zpracování a zneškodnění způsobem, který zabezpečí trvalé zamezení škodlivých vlivů odpadů na životní prostředí.

Termické zpracování se při porovnání s dalšími způsoby nakládání s odpady, hlavně s nejrozšířenějším skládkováním, prezentuje řadou výhod. Dochází k významnému snížení objemu tuhého odpadu až na 10 až 15 % původního objemu a snížení hmotnosti odpadu až na jednu třetinu. Vedle snížení objemu a hmotnosti spočívají výhody (hlavně v případě průmyslových a nebezpečných odpadů) v zamezení vzniku ekologických škod při skládkování, v sterilnosti zbytků a v neposlední řadě v možnosti využití kaloricky hodnotných odpadů k produkci tepelné či elektrické energie. Spalování zpracuje odpad velmi rychle, s možností kontroly plyných i tuhých produktů spalování. Provozované spalovny komunálních odpadů v ČR jsou považovány za zařízení sloužící k energetickému využití odpadů (WtE – Waste to Energy).

V České republice má pro budování nových jednotek termického zpracování odpadu význam také závazek snížení podílu biologicky rozložitelného odpadu ukládaného na skládky oproti roku 1995. Závazek vůči evropskému společenství byl v roce 2003 transformován do Plánu odpadového hospodářství [1]. Dle 6. hodnotící zprávy plnění plánu odpadového hospodářství [2] není tento cíl plněn, naopak, v roce 2010 bylo skládkováno více biologicky rozložitelného odpadu než v referenčním roce 1995.

Z výstupních procesních proudů technologie WtE je značná pozornost upřena na plyné produkty spalování a jejich znečištění škodlivými látkami. Problematika emisí ve spalinách je sledována odbornou i laickou veřejností, což vedlo ke stanovení velmi přísných emisních limitů. Dodržení požadavků na plyné emise řeší systémy čištění spalin, které jsou nedílnou součástí spalovacích jednotek.

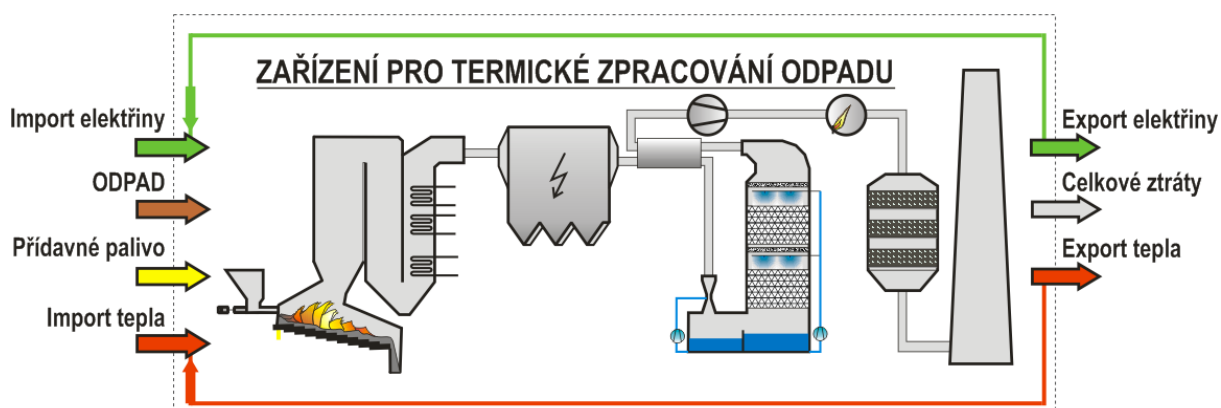
Návrh systémů čištění spalin je aktuální jednak kvůli stále se zpříšňujícím emisním limitům, a také v souvislosti s přípravami nových spaloven (např. KIC Karviná, ZEVO Chotíkov). Využívání vysoce účinných systémů snižování emisí ve spalinách má vliv na energetické vstupy a výstupy procesu a s tím související provozní a investiční náklady. Důležitým ohledem je vzájemná provázanost všech částí technologie spalování odpadu a současně velké množství proveditelných variant systému. Proto je nutné při návrhu a posouzení konkrétních jednotek využívat simulačních prostředků. Práce s komerčními systémy je uživatelsky složitá a je náročná na vstupní data. Proto byl na pracovišti autora vyvinut specializovaný software W2E (Waste-to-Energy). Spojuje v sobě nástroje pro modelování toků procesních proudů a energie, které doplňují specializované doplňky a nástroje k modelování jednotek termického zpracování odpadu. Vznikem a využitím nástroje

pro posouzení vlivu systému čištění spalin na energetickou účinnost se zabývá tato práce.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ V ŘEŠENÉ OBLASTI

2.1 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADU

Obecně platí, že převyšuje li energie získaná procesem termického zpracování odpadu (obr. 1) množství energie do procesu vložené, pak je zařízení hodnoceno jako energetické využití odpadů. To je běžné ve většině evropských spaloven [3]. V ostatních případech by se jednalo o jiné hodnocení termického zpracování, tedy jen o odstraňování odpadu. Energetické vstupy a výstupy procesu jsou ovlivněny mimo jiné i použitými technologiemi pro čištění spalin. Přísné emisní limity jsou důvodem pro složité systémy snižování emisí ve spalinách, které jsou spojeny s vyšší spotřebou energií. Tím je negativně ovlivněno využití energie paliva na spalovně. Návrh vhodného systému čištění spalin proto představuje kompromis mezi legislativními požadavky, energetickými faktory a investičními a provozními náklady.



Obr. 1 Hlavní energetické vstupy a výstupy na spalovně odpadů, znázorněna je možnost nahrazení importu energie částí vlastní produkce elektřiny a tepla

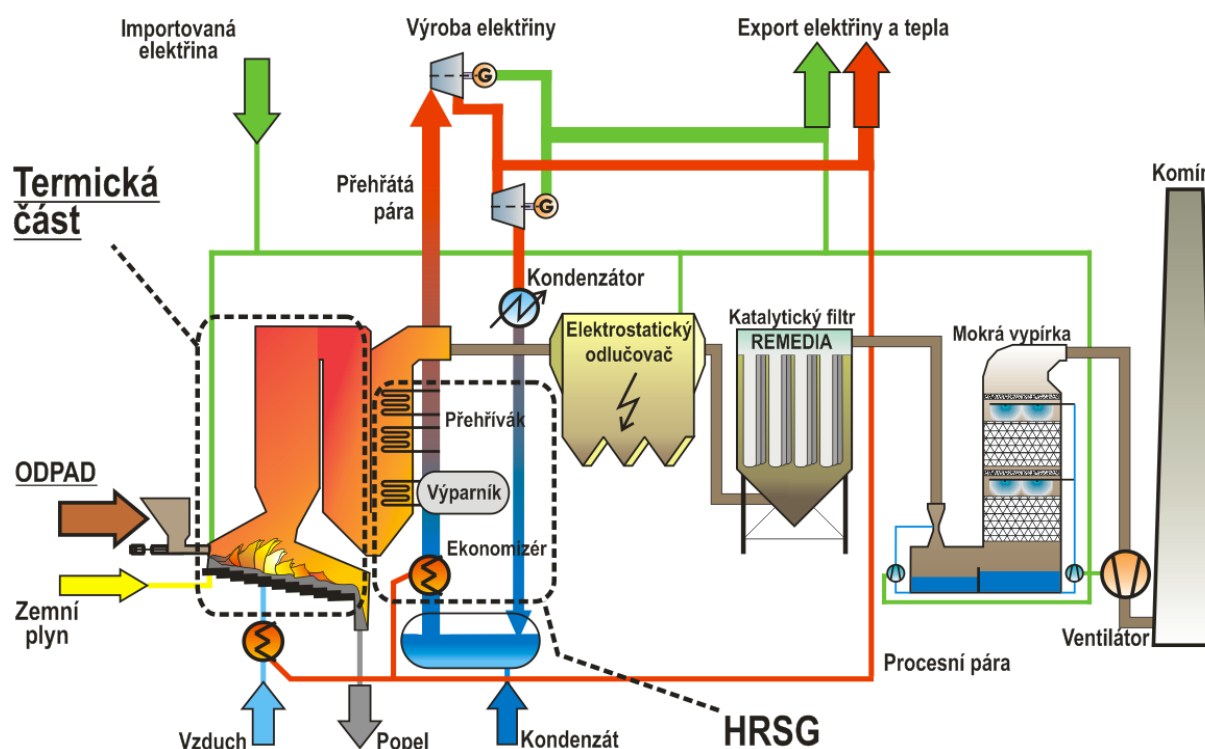
2.2 TYPICKÉ TECHNOLOGIE PRO TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

Koncepce zařízení pro termické využití odpadů se v podstatných znacích shodují. Základní technologické řešení spaloven odpadů sestává jednak z termického bloku, kde probíhá samotné spalování za legislativně stanovených podmínek, ze systému pro využití tepelného obsahu vzniklých spalin a systému čištění vzniklých spalin k dosažení požadované kvality exhalací vystupujících do atmosféry.

Spalování tuhého komunálního odpadu (MSW) a nebezpečného a průmyslového odpadu (IHW) je nejobvyklejším a dlouhodobě ověřeným způsobem termického zpracování odpadu. Jako spalování a spoluspalování se označuje tepelný rozklad

materiálů s dostatečnou dostupností kyslíku pro úplnou oxidaci – dokonalé spalování. Vysoký tepelný obsah spalin vzniklých spalováním je možné využít řadou způsobů, např. k produkci tepla a elektřiny. Příklad provedení je zobrazen na schématu technologie spalovny TERMIZO a.s., Liberec [4], na obr. 2.

Obecné uspořádání technologie spaloven IHW **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** odpovídá spalovnám MSW, několik odlišností je v termickém bloku. Pro spalování se v termické části obvykle využívá dvoustupňové spalování, zařízení bývají navržena pro spalování pevného i kapalného odpadu.



Obr. 2 Zjednodušené schéma spalovny MSW s vyznačenými hlavními procesními proudy

2.3 TREND VE VÝVOJI SYSTÉMŮ ČIŠTĚNÍ SPALIN

Historický vývoj průmyslového spalování odpadu začal na přelomu 19. a 20. století přičemž prvotním účelem bylo cestou spalování dosáhnout hygienizaci odpadních materiálů. Základním zařízením byla pouze spalovací komora a vzniklé plynné produkty spalování byly bezprostředně odváděny komínem do atmosféry. Jako druhá generace spaloven se označují obdobná zařízení s využitím uvolněného tepla spalin. Mezi tato zařízení patřila i původní brněnská spalovna, která byla provozována v letech 1904 až 1941. Třetí generace spaloven, která se začala uplatňovat až na počátku sedmdesátých let, se vyznačovala prvními opatřeními pro čištění spalin, konkrétně odstranění tuhých částic, na které je vázána řada dalších škodlivin. V osmdesátých letech zažila velký rozmach ekologická hnutí, což se projevilo i na procesu spalování odpadů. V této době byly realizovány spalovny, jejichž technologie řešila kvalitu nejen plynných exhalací, ale i dalších výstupních proudů. Lze konstatovat, že současné moderní spalovny odpadů představují jedny

z nečistších zdrojů energie a lze je obvykle hodnotit jako zařízení pro energetické využití odpadů.

Od doby, kdy byly první spalovny odpadu uvedeny do provozu, dosáhly použité technologie značných pokroků, které vedly k současným vysoce účinným systémům. Technologický vývoj je zvláště zřetelný v oblasti spalování MSW. Technologie osmdesátých a devadesátých let využívaly většinou uspořádání, kdy každá technologická operace byla prováděna v jednom aparátu. V posledním desetiletí jsou stále častěji využívány technologie spojující více operací (především pro čištění spalin) do jednoho aparátu. To vede k jednoduššímu a efektivnějšímu uspořádání spaloven MSW a také ke zlepšení parametrů celé jednotky.

2.4 ŠKODLIVÉ EMISE A EMISNÍ LIMITY

Přehled škodlivých produktů spalování je v tab. 1. Velký význam z hlediska tvorby škodlivin má kvalita spalování. Podmínkou dokonalého spalování je přívod spalovacího vzduchu s množstvím kyslíku větším jak stechiometrickým a jeho dostatečný přístup k reagujícím složkám paliva a spalin v termickém bloku.

Legislativa v oblasti zpracování odpadů klade na spalovny odpadů řadu náročných technologických požadavků. Před odvodem spalin do atmosféry je nutné snižovat množství škodlivin ve spalinách pro dodržení legislativních požadavků. V porovnání s ostatními palivy jsou české emisní limity stanovené pro spalování odpadů nejvíce přísné, jak je zřetelné z porovnání průměrných denních hodnot emisních limitů v tab. 2. Od 1. ledna 2014 a 2018 budou hodnoty pro ostatní paliva zpřísněny dle nového zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší, který vstoupil v platnost 1. září 2012 [5].

Škodlivina	Popis
CO ₂	<u>Oxid uhličitý</u> (a vodní pára) jsou konečnými oxidačními produkty při spalování uhlikatých paliv, včetně odpadů.
CO	<u>Oxid uhelnatý</u> je hlavní produkt nedokonalého spalování.
TZL	Mezi <u>tuhé znečišťující látky</u> ve spalinách patří částice popelovin unesené proudem spalin ze spalovací komory (úletové popeloviny, průměr větší jak 1 μm) a aerosoly (např. soli KCl, NaCl, K ₂ SO ₄ , průměr menší jak 1 μm), které jsou výsledkem reakcí mezi draslíkem nebo sodíkem a chlorem nebo sírou.
NO _x	<u>Oxidy dusíku (NO_x)</u> jsou produktem oxidace dusíku. Rozeznávají se tři způsoby tvorby oxidů dusíku ve spalinách: palivové, termické a promptní oxidy dusíku.
SO ₂	Emise <u>oxidů síry</u> jsou výsledkem kompletní oxidace síry z paliva. Jedná se hlavně o toxický oxid siřičitý (SO ₂ , více než 95 %) a při nižších teplotách o oxid sírový (SO ₃), který se v atmosféře slučuje s vlhkostí ze vzduchu na H ₂ SO ₄ .
HCl	Část chloru z paliva reaguje s vodíkem a do spalin se uvolní jako <u>chlorovodík</u> .
HF	Přítomností fluoru v palivu a jeho reakcí s vodíkem se může objevit také <u>fluorovodík</u> .
PAH	Uhlovodíky vznikají jako meziprodukt při konverzi uhlíku a vodíku z paliva na CO ₂ a H ₂ O. <u>Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH)</u> jsou karcinogenní. <u>Těkavé organické sloučeniny (VOC)</u> postupně kondenzují a tvoří emise tuhých částic. <u>Dioxiny (PCDD/F)</u> se v důsledku akumulace vyskytují všude v prostředí kolem nás. Jejich tvorbu ovlivňuje mnoho podmínek a nelze ji plně potlačit.
NH ₃	<u>Amoniak (čpavek)</u> může v malém množství vznikat za velmi nízkých teplot jako mezistupeň při tvorbě NO _x . Některá opatření pro snižování emisí využívají čpavku jako činidla, jeho nedokonalé dávkování se také může projevit v koncových spalinách.
Těžké kovy	<u>Těžké kovy</u> z paliva (např. měď, olovo, rtuť, kadmium) mohou zůstat v popelovinách, odpařit se do spalin, nebo také pokrýt povrch emitovaných částic.

Tab. 1 Přehled škodlivých složek ve spalinách [6]

Znečišťující látka	Jednotka	Emisní limit pro různé energetické zdroje a spalovny. Provedeno po přepočtu na 11 % O ₂ v suchých spalinách.					
		Spalovny odpadů	Uhelné kotle	Kotle na dřevo	Kotle na mazut	Plynové kotle	Fluidní kotle
TZL	mg/m _N ³	10	100	250	55	50	50
TOC	mg/m _N ³	10	-	50	-	-	-
HCl	mg/m _N ³	10	-	-	-	-	-
HF	mg/m _N ³	1	-	-	-	-	-
SO ₂	mg/m _N ³	50	1667	2500	945	19	533
NO _x	mg/m _N ³	200	435	650	250	111	267
CO	mg/m _N ³	50	267	650	97	55	167
PCDD/F	ngTEQ/m _N ³	0,1	-	-	-	-	-

Tab. 2 Porovnání emisních limitů pro různá paliva [7], [8]

2.5 OPATŘENÍ PRO SNIŽOVÁNÍ KONCENTRACE ŠKODLIVIN VE SPALINÁCH

Do procesu čištění spalin jsou řazeny různé technologie dle výstupních parametrů a znečištění produkovaných spalin. Používané metody se dají dělit dle způsobu zamezení emise škodlivin na primární a sekundární opatření.

Primární opatření slouží především k eliminaci škodlivin zamezením jejich tvorby. Také výrazně přispívají k dosažení podmínek dokonalého spalování, kterými jsou dostatečně vysoká teplota, účinné směšování prchavých látek z paliva s kyslíkem ze vzduchu a dostatek času pro vyhoření všech spalitelných plynů ve spalinách. Omezení tvorby škodlivin lze obecně provést těmito úpravami spalovacího procesu a vlastností paliva [9], [6]:

- změnou složení paliva a vlhkosti paliva,
- změnou velikosti částic paliva,
- vhodnou volbou typu a konstrukce spalovacího zařízení,
- kontrolou a optimalizací spalovacího procesu,
- přívodem sekundárního vzduchu,
- přívodem sekundárního paliva,
- zavedením katalytických konvertorů,
- zavedením recyklu spalin [10].

Čištění spalin od již vytvořených škodlivin se uskutečňuje jejich neutralizací nebo odebráním z proudu spalin prostřednictvím sekundárních opatření pro čištění spalin. Ty většinou představují aparáty umístěné za předchozími bloky spalovny. Mezi nejčastěji používané aparáty a technologie patří:

- usazovací komory pro odprášení spalin. Kvůli nízké účinnosti a značným rozměrům nejsou jako samostatné aparáty na spalovnách instalovány, nicméně efektu usazování částic se využívá v různých částech spalinového vedení.
- cyklónové a multicyklónové odlučovače. Dle BREF nemohou popisované odlučovače dosáhnout dostatečně nízké úrovně emisí částic pro současné spalovny odpadů, mohou však být aplikovány pro předčištění spalin [9].
- elektrostatické odlučovače (ESP). Částice se nejprve nabijí elektrickým nábojem, poté jsou vedeny elektrostatickým polem a přitahovány ke sběrným elektrodám. Mají vysokou účinnost (až 99 %) i pro velmi malé částice.
- tkaninové filtry. Spaliny se filtrují od tuhých částic přes materiál rukávců, které jsou zavěšeny v uzavřené konstrukci. Dle teploty a míry znečištění spalin lze použít různé textilie a polymery.
- keramické filtry. Oproti tkaninovým filtrům jsou odolnější vůči nepříznivým pracovním podmínkám. Mohou například pracovat i při teplotách až 900°C.
- katalytické filtry. Spojují povrchovou filtraci tuhých částic s katalytickým zneškodňováním dalších škodlivin ve spalinách (např. dioxiny, NO_x).

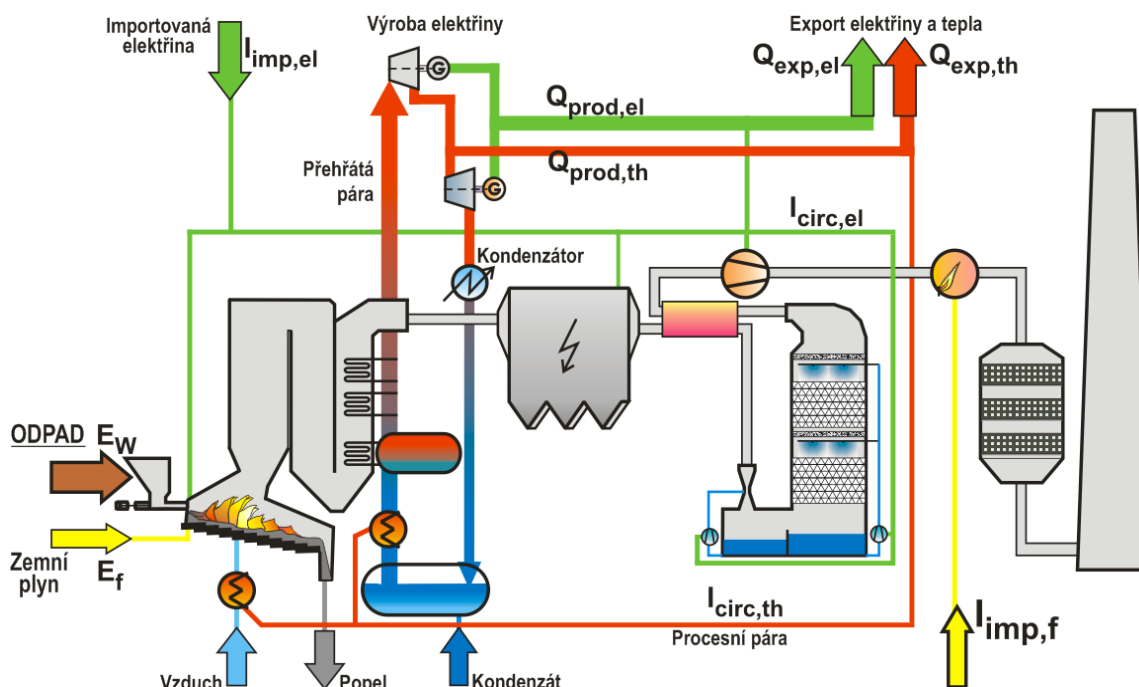
- mokrá vypírka. Zařízení absorpčně odstraňuje ze spalin především plynné škodliviny kyselého charakteru (SO₂, HCl, HF).
- suchá a polosuchá vypírka. Spaliny jsou od kyselých plynů čištěny pomocí sorbentu dávkovaného do proudu spalin. Kyselé plyny reagují se sorbentem, přičemž jsou produkovány pevné soli, které jsou zachyceny na filtru.
- adsorpční metody. Škodliviny (dioxiny, těžké kovy) se navazují na povrch porézních materiálů (aktivní uhlí, zeolity, atd.).
- selektivní nekatalytická/katalytická redukce (SNCR/SCR). Technologie slouží k odstranění oxidů dusíku ze spalin prostřednictvím reakcí se čpavkovým činidlem. Nekatalytická redukce probíhá při teplotě 850 až 950°C s běžnou účinností okolo 40 až 60 %. S katalyzátorem probíhá redukce při nižších teplotách 200 až 450 °C. Účinnost procesu bývá obvykle vyšší než 90 %.

2.6 ATRIBUTY ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ ODPADŮ

Každé opatření pro čištění spalin ovlivňuje produkci energie například prostřednictvím tlakových ztrát, nutností ohřevu nebo zvýšením teploty za kotlem. Pro posouzení účinnosti využití energie ve spalovnách (komunálního) odpadu a souvisejících vlivů na prostředí byla stanovena různá kritéria. Vztahy pro jejich výpočet (1 až 3) jsou uvedeny v tab. 3. Energetické proudy použité pro výpočet jsou zřejmé z obr. 3, jejich pojmenování je vysvětleno v poznámce tohoto obrázku.

Energy efficiency (<i>RI</i> faktor), [-]	$\eta_e = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{0.97 \cdot E_w + E_f}$	[11]	(1)
Primary Energy Savings (<i>PES</i>), [GJ/t]	$PES = (Q_{exp}) - (E_f + I_{imp})$	[12]	(2)
Specific primary energy savings (<i>pes</i>), [-]	$pes = \frac{PES}{E_w + E_f + E_{imp}}$	[13]	(3)

Tab. 3 Kritéria pro hodnocení energetické účinnosti



Pozn.: E_W – energie dodaná do procesu spalování odpadu (nebo alternativního paliva); E_f – energie importovaná do spalovacího procesu (např. přídavné palivo); I_{circ} – cirkulovaná energie (elektrická a/nebo tepelná) nutná pro proces (např. pro ventilátory a čerpadla, predehřev spalovacího vzduchu nebo napájecí vody, atd.); I_{imp} – importovaná energie nepodílející se na výrobě tepla (např. energie pro potřeby systému čištění spalin); Q_{prod} – produkovaná energie (elektrická a/nebo tepelná); Q_{exp} – exportovaná energie (elektrická a/nebo tepelná); el - elektrická (index); th - tepelná (index);

Obr. 3 Popis hlavních energetických proudů pro vyhodnocení energetické účinnosti spaloven odpadu, použité značení odpovídá BREF/BAT pro spalování odpadu [9]

Vztahy z tab. 3 jsou použitelné i pro analýzy týkající se různých forem energie (tepelné, elektrické). Rozdíly mezi účinnostmi výroby tepla a elektřiny jsou zohledněny pomocí konverzních faktorů, které vycházejí z případné účinnosti výroby tepla a elektřiny v referenčních jednotkách. Pro výrobu tepla se uvažuje účinnost výroby v referenčních zdrojích $\eta_{th}^{Ref} = 91\%$, účinnost výroby elektřiny v referenčních zdrojích je $\eta_{el}^{Ref} = 38\%$. Vznik a hodnoty konverzních faktorů ukazují vztahy (4) a (5) v tab. 4. Tímto způsobem lze porovnávat produkci a spotřebu různých forem energie.

Konverzní faktor pro produkci elektřiny	$100/\eta_{el}^{Ref} = 100/38 = 2.6$	(4)
Konverzní faktor pro produkci tepla	$100/\eta_{th}^{Ref} = 100/91 = 1.1$	(5)

Tab. 4 Konverzní faktory zohledňující různou účinnost výroby tepelné a elektrické energie v referenčních zdrojích [9]

2.7 INTERAKCE ČIŠTĚNÍ SPALIN S OSTATNÍMI SYSTÉMY TECHNOLOGIE SPALOVNY

Většina opatření pro snižování emisí bývá umístěna na konci spalinové cesty, a je propojena s ostatními systémy zařízení různými technologickými proudy. Termický systém a blok využití tepla ovlivňují parametry systému čištění především prostřednictvím vlastností spalin. Teplota spalin bývá hlavním kritériem pro určení pořadí aparátů. Na druhou stranu, aparáty pro čištění spalin se mohou projevit na charakteristikách celé spalovny, například kvůli spotřebě vyráběné nebo dodávané energie, nebo kvůli nežádoucímu zvýšení výstupní teploty spalin z kotle.

Pro návrh systému čištění spalin je zásadní informace o celkovém množství spalin. Ne vždy je možné vycházet z konkrétních provozních hodnot, pro kvalitní odhad produkce spalin je nezbytné zpracovat celkovou bilanci technologie, především termické části a bloku využití uvolněného tepla.

Za zásadní parametr, který ovlivňuje celou bilanci zařízení, lze považovat výhřevnost odpadu. S ohledem na nehomogenitu a proměnlivost spalovaného odpadu v čase se jeho výhřevnost určuje velmi obtížně. Výhřevnost se tedy dá velmi nepřesně odhadnout z druhového složení odpadu, většinou se ale odhaduje zpětně z údajů o dosaženém výkonu výroby páry a z dalších technologických parametrů systému.

Údaje z provozu spaloven byly zpracovány formou matematických modelů vytvořených v programech W2E a MS Excel. Výpočty modelů byly založeny na hmotnostních a energetických bilancích a sloužily např. k odhadu některých technologických parametrů spalovny, posouzení energetické náročnosti a výkonnostních parametrů, analýze měnících se vstupních parametrů, ověření předpokladů a výsledků z jiných prací.

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Hlavním cílem práce bylo vytvoření výpočtového systému, který umožní analýzu a sofistikovaný návrh systému čištění spalin v technologiích pro termické zpracování odpadů. Práce navazuje na již vytvořené výpočtové systémy. Dalším cílem práce tedy bylo shromáždění dat a poznatků o procesech používaných pro snižování koncentrací škodlivin ve spalinách.

Výstupem dizertační práce je výpočtový nástroj jako podklad pro následnou integraci do podoby softwarového systému s uživatelsky přívětivým rozhraním – software W2E – který je dlouhodobě vyvíjen na školitelském pracovišti autora. Tento software byl doposud zaměřen hlavně na energetické a hmotnostní bilancování termického bloku a zařízení pro využití tepla. Po tomto rozšíření bude ve W2E možné modelovat průběh celé spalinové trasy spaloven odpadu, jak je ukázáno na obr. 4.

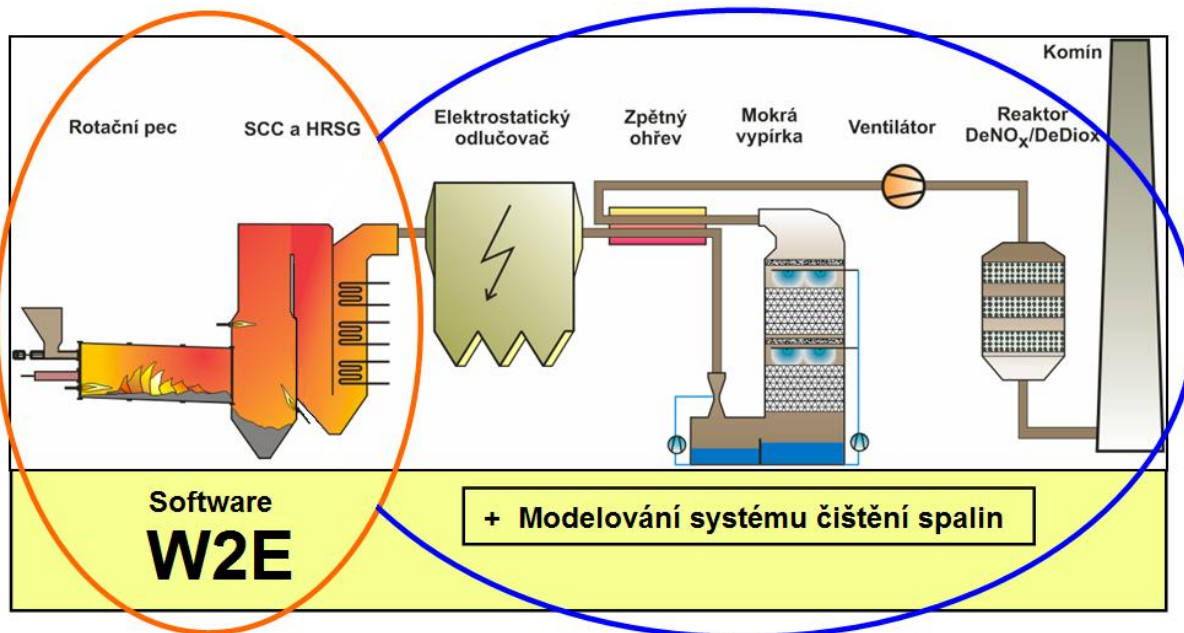
Nástroj je využitelný pro hodnocení aparátové skladby procesu z pohledu zajištění splnění přísných emisních limitů, energetické náročnosti a přijatelných provozních a investičních nároků. Provázanost mezi technologickými systémy a operacemi při spalování odpadů ovlivňuje i výrobní ukazatele celé technologie a opodstatňuje rozšíření systému W2E.

Provedení nástroje ve W2E představuje prostředí pro využitelné uchování teoretických poznatků a zkušeností z měření. Nástroj spojuje a uchovává předchozí poznatky a práce, současně je snadno přístupný pro další rozvoj dle výsledků budoucích prací v předmětné oblasti.

Podklady pro integraci nástroje do software W2E byly vytvořeny na základě publikovaných provozních zkušeností, pracovních podmínek a teoretických poznatků o technologiích pro čištění spalin.

Tvorba nástroje a tedy i obsah práce sestávala z těchto dílčích cílů:

- rozbor problematiky a popis teoretických poznatků o návrhu systémů čištění spalin.
- tvorba souborů výpočtových vztahů umožňujících modelování technologií systému čištění spalin, simulaci jejich provozních stavů a analýzu jeho vlivu na energetické parametry spalovací jednotky.
- tvorba souborů provozních hodnot pro nastavení souborů výpočtových vztahů.
- sestavení podkladů pro rozšíření již existujícího simulačního software W2E dle vytvořených souborů výpočtových vztahů a provozních hodnot.
- ověření navržených souborů výpočtových vztahů a provozních hodnot při analýze čištění spalin ze spalování MSW a IHW.



Obr. 4 Rozšíření současného provedení software W2E (oranžová elipsa) o nástroj pro modelování systémů čištění spalin (modrá elipsa)

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY A PŘÍNOS PRÁCE

4.1 ANALÝZA SYSTÉMU ČIŠTĚNÍ SPALIN

Snížení obsahu sledovaných látek pod stanovenou mez je prováděno kombinací mechanických a chemických způsobů čištění spalin stručně uvedených v kap. 2.5. Při návrhu tohoto technologického systému je nutno uvažovat velké množství proveditelných variant, a to s ohledem na vzájemnou provázanost všech částí technologie.

Součástí práce jsou:

- detailní popis fungování používaných technologií. Popsány jsou vstupy a výstupy procesů, provozní podmínky fungování, účinnosti odlučování a další relevantní informace.
- přehledy provozních hodnot potřebných pro modelování jednotlivých aparátů. Tabelovanou formou jsou přehledy provozních hodnot pro používané technologie uvedeny v příloze práce.
- přehled využití jednotlivých technologií v současných spalovnách. Popsány jsou aparáty využívané na třech českých spalovnách MSW, dále jsou zpracovány soubory informací z 200 evropských spaloven komunálního odpadu. Pro plnění platných legislativních limitů systém čištění spalin obvykle sestává z následujících metod:
 - mechanické odprášení.
 - SNCR nebo SCR pro odstranění NO_x.
 - absorpční rozklad kyselých složek spalin (SO₂, HCl, HF).
 - adsorpční nebo katalytické opatření pro snižování dioxinů.
- popis faktorů ovlivňujících volbu vhodných aparátů a jejich uspořádání na spalinové cestě. Obecná hlediska hodnocení technologie představuje přístup „3E“ (Environmental, Energy, Economy – ochrana prostředí, energetika, ekonomie). Mezi sledované parametry patří především:
 - investiční a provozní náročnost,
 - účinnost snižování emisí pro plnění emisních limitů,
 - pracovní teplota a další provozní podmínky,
 - vliv na parametry celé technologie.

4.2 MODERNÍ VÝPOČTOVÝ NÁSTROJ PRO MODELOVÁNÍ SYSTÉMŮ ČIŠTĚNÍ SPALIN

Dosažení cílů práce bylo podmíněno vytvořením souborů dat a poznatků, který vychází z publikovaných provozních zkušeností, doporučených pracovních podmínek i teoretických poznatků k operacím uplatňujících se při čištění spalin, aby ve spojení se softwarovým systémem W2E bylo možno navrhovat i posuzovat alternativní technologická řešení procesu termického zpracování odpadů. Podklady vytvořené v rámci předkládané disertační práce umožní rozšíření systému W2E o

nové výpočtové bloky představující technologie a procesy používané pro snížení emisí znečišťujících látek ve spalinách. Provázanost jednotlivých provozních souborů a operací při termickém zpracování odpadů se promítá i do hodnocení výrobních ukazatelů celé technologie a opodstatňuje rozšíření systému W2E.

4.2.1 Simulační software W2E a jeho charakteristika

Specializovaný software W2E (Waste-to-Energy) [14] je dlouhodobě vyvíjen na školitelském pracovišti autora a navazuje na již vytvořené výpočtové systémy [15]. Spojuje v sobě nástroje pro modelování toku energie a výpočet některých chemických reakcí. Byl vytvořen na platformě Java, a uplatňuje sekvenčně modulární přístup [16]. Program W2E se ukázal být plnohodnotným nástrojem při simulačních výpočtech. Výsledky modelů byly ověřeny srovnáním se skutečnými provozními hodnotami např. v [17]. Vyhodnocení energetické účinnosti spalování MSW v tomto nástroji byla předvedena v [18].

Princip tvorby modelu odpovídá jiným podobným systémům, je založen na tvorbě technologického schématu (flowsheet) v grafickém uživatelském prostředí. Při tom se užívá různých výpočtových bloků a specializovaných aplikací, které jsou propojeny vstupními a výstupními proudy a umožňují tak simulaci komplexních technologických zařízení. Výsledkem je model hmotnostních a energetických bilancí na zařízení, doplněný o řadu specializovaných aplikací orientovaných na spalování odpadu, např. formuláře pro vyhodnocení vlastností paliva nebo spalin. K dispozici je také aplikace „Formulář energetické toky“ pro posouzení kritérií reprezentující využití energie v zařízení a úsporu primárních zdrojů.

4.2.2 Návrh postupů pro modelování systému čištění spalin pomocí W2E

Na základě poznatků z oblasti vysoce účinného čištění spalin byly navrženy nové výpočtové bloky a doplňky softwaru W2E, které umožní stavebnicové sestavování výpočtových modelů linek na čištění spalin. Navržené prostředí je určeno pro odhad a analýzu těchto charakteristik systémů čištění spalin:

- splnění emisních limitů (účinnost čištění) – kritický parametr je účinnost systému při snižování konkrétní škodlivé složky ve spalinách.
- teplotní průběh (pracovní teploty, tepelné ztráty) – pomocí tepelných ztrát a pracovních teplot aparátů lze sledovat teplotní průběh na spalinové cestě.
- energetická náročnost (spotřeba energie, tlakové ztráty) – s provozem systému čištění spalin je spojena především zvýšená spotřeba spalinového ventilátoru. Dále se může projevit spotřeba čerpadel technologické vody a zchlazení spalin jejím odpařením.
- spotřeba materiálů (voda, přídatné palivo, činidla, sorbenty) – materiálová spotřeba je určena dle stechiometrie chemických reakcí nebo nastavena měrným dávkováním vztaženým např. ke spalinám. Průtok vody může být určen i tepelnou bilancí.

- hrubý odhad ekonomické náročnosti – vychází jednak ze spotřeby energií a materiálů pro odhad provozních nákladů, ale mohou být odhadnuty i investice dle základního rozměrového návrhu.

4.2.3 Modely aparátů

V dizertační práci je popsán výpočet a funkce nových bloků pro modelování čištění spalin ve W2E. Sledovaly se především procesy se spotřebou materiálu (mokrý, suchý nebo polosuchý sorpce, adsorpce, SNCR a SCR) a energie (mokrý vypírka, aparáty způsobující tlakovou ztrátu). Byly navrženy tyto bloky:

- Obecný blok „odstranění emisí“.
- Rukávcový filtr.
- Cyklon/multicyklon.
- Mokrý vypírka (NaOH nebo $\text{Ca}(\text{OH})_2$).
- Injektáž sorbentu – suchá/polosuchá vypírka (NaHCO_3 nebo $\text{Ca}(\text{OH})_2$).
- Injektáž čpavku nebo močoviny – SNCR a SCR.
- Kontaktor.
- Injektáž aktivního uhlí.
- Spalinový ventilátor.
- Celkový přehled (kontrola emisí).

4.3 APLIKACE SIMULAČNÍHO SYSTÉMU

K ověření použitelnosti a koncepce výpočtového systému před jeho následnou implementací do softwarové podoby sloužily dále uvedené případové studie.

Prezentována je rozsáhlá případová studie týkající se návrhu systému čištění spalin u jednotky energetického využití MSW o kapacitě 100 kt/r, která:

- posuzuje 5 variant systému čištění spalin a hodnotí snížení emisí, měrnou produkci a spotřebu energie a materiálů a kritéria energetického využití odpadu.
- pro dvě vybrané varianty dále hodnotí optimální provozní režim při současném čištění spalin suchou a mokrou metodou.

Jako zařízení pro energetické využití odpadu nelze hodnotit spalovny IHW, jak je předvedeno ve studii spalovny nebezpečného odpadu s kapacitou 3 MW, kde:

- jsou posouzeny 4 alternativy uspořádání technologií pro čištění spalin. I zde je sledováno snížení emisí, měrné produkce a spotřeby energie a materiálů a kritéria energetického využití odpadu.
- byl vyhodnocen podíl odpadu a přídavného paliva na produkci energie.

Využitelnost výpočtového systému i mimo oblast termického zpracování odpadu byla předvedena na studii vhodného provedení aparátů a odhadu parametrů technologie čištění spalin spalovny kontaminované biomasy o výkonu 1 MW.

4.3.1 Jednotky pro energetické využití MSW

Analyzována byla především spotřeba energie a materiálů použitých technologií a vliv na produkci energie na spalovně o zvoleném výkonu 100 kt/rok. Porovnáno je několik alternativ systému čištění spalin. Varianty byly voleny pro dostatečné snížení škodlivin a vyhovění emisním limitům, řazení aparátů na spalinové cestě odpovídá pracovním teplotám zvolených technologií. Varianty 1 a 2 porovnávají katalytickou filtraci a adsorpční odstranění dioxinů. Varianta 3 vychází z druhé varianty, není zde ovšem zaveden recykl spalin a nástřík sorbentu je nahrazen mokrou pračkou. Uspořádání 4 a 5 vychází z technologie navržené společností EVECO Brno s.r.o. [19], kdy je využito účinného katalytického filtru a kombinace suchého předčištění a mokrého dočištění kyselých plynů (SO_2 , HCl , HF).

Posuzovány byly dva možné režimy využití produkované páry, představující zaměření na produkci elektřiny v kondenzační turbíně a na kogenerační produkci elektřiny a tepla. Byly určeny měrné hodnoty produkce elektřiny 509 až 594 kWh/t v kondenzačním režimu a 375 až 437 kWh/t při kogeneraci. Produkce elektřiny je však snížena vlastní spotřebou zařízení, která se v běžných provozních režimech pohybuje na úrovni 55 až 75 kWh/t. Zřetelná je soběstačnost procesu v zásobení energiemi. Systém čištění spalin ovlivňuje spotřebu elektřiny především provozem spalinového ventilátoru, který souvisí s tlakovými ztrátami použitých aparátů.

Hodnoty kritéria energetické účinnosti pro kategorizaci procesu jako energetické využití dosahují sledovaná uspořádání spalovny pouze při kogenerační výrobě elektřiny a tepla. Nejmenší účinnosti využití energie paliva je dosahováno při uspořádání, kdy se projevila vysoká tlaková ztráta na spalinové cestě, a nepřítomnost recyklu spalin. Energeticky nevýhodná třetí varianta ovšem vykazuje nejlepší účinnost snižování emisí. Vystává proto otázka, zda je vhodnější využívat vysoce účinný systém čištění spalin spojený s menší energetickou účinností, nebo upřednostnit méně účinné uspořádání spojené s vyšší produkcí energie (která by jinak byla pravděpodobně vyrobena s vyššími emisemi na méně „čistém“ zdroji), které ovšem postačuje pro bezpečné splnění stanovených emisních limitů.

4.3.2 Spalovny průmyslových a nebezpečných odpadů

Ve studii prezentované v této kapitole je provedena rozvaha o velikosti získatelné tepelné resp. elektrické energie s ohledem na různá uspořádání systému čištění spalin. Provedené srovnání je zajímavé zejména ve vztahu k získatelné energii při spalování MSW, resp. posouzení možnosti hodnocení zařízení IHW jako zařízení pro energetické využití odpadů. Současně jsou posouzeny podmínky dvoustupňového spalování odpadů, zejména z hlediska tvorby spalin a spotřeby přídavného paliva. Jako modelový případ je uvažováno spalování odpadu o výhřevnosti 15 GJ/t ve spalovně se zpracovatelským výkonem 5 kt/r, čemuž pro uvažovaný roční fond pracovní doby 7000 h/r odpovídá hodinový výkon zpracování odpadu 720 kg/h a termický výkon rotační pece 3 MW.

Při tomto jednotném termickém výkonu jsou posouzeny režimy pro dvě úrovně výstupní teploty spalin z dohořivací komory, které odpovídají režimům spalování odpadů s obsahem chloru pod 1 % hm, respektive nad 1 % hm Cl. Za běžný provozní režim lze považovat teploty 800 až 900°C v rotační peci a 1 150°C v dohořivací komoře.

Dvoustupňové spalování průmyslových a nebezpečných odpadů je ve srovnání se spalováním MSW spojeno s vyšší měrnou tvorbou spalin a obvykle nezanedbatelnou spotřebou přídavného paliva, která degraduje velikost tepla získaného spalováním vlastního, mnohdy kaloricky hodnotného odpadu. Vyšší tvorba spalin zvyrazňuje měrné nároky aparátů systému čištění spalin vztažené na tunu paliva. Z hlediska vlivu na využití energie odpadu ovšem výrazně převažuje spotřeba přídavného paliva nad nároky systému čištění spalin.

Měrné produkce elektrické energie dosáhly formálně velmi vysokých hodnot. Po odečtení energie vnesené přídavným paliv je však produkce dále zredukována na 630 až 690 kWh/t v kondenzačním režimu, a 455 až 500 kWh/t při kogeneraci. Hodnoty produkce elektřiny jsou však dále sníženy vlastní spotřebou zařízení (především systém čištění spalin), která v běžných provozních režimech pohybuje na úrovni 130 až 200 kWh/t.

Vyhodnocení kritéria měrných úspor primární energie potvrzuje, že spalovny IHW mohou dosahovat uspokojivých hodnot jen v provozních režimech vedených prakticky bez spalování přídavného paliva, tedy i v prvním spalovacím stupni v blízkosti legislativně požadované teploty pro daný typ odpadu. Tyto režimy však nejsou provozně běžné, a technologie některých zařízení je ani nemožňuje.

Z pohledu bilance energetických vstupů a jejich podílu na teple předaném v utilizačním kotli tedy lze spalovny průmyslových odpadů označit za systémy, ve kterých dochází ke spoluspalování odpadu a výrazného množství hodnotného fosilního paliva, které by mohlo být s vyšší účinností využito v jiném procesu. Výroba energie může snižovat provozní náklady a externí spotřebu energie, nicméně, primárním účelem spaloven ovšem zůstává likvidace těchto problematických materiálů.

4.3.3 Aplikace v dalších oblastech – spalování problematických paliv na bázi biomasy

Vytvořený výpočtový systém může najít využití i v jiných oblastech než je spalování odpadů. Příkladem je volba vhodného provedení aparátů a odhad parametrů technologie čištění spalin při spalování kontaminované biomasy.

Spalování biomasy pro energetické nebo topné účely je významnou možností jak získat energii z obnovitelných zdrojů. Pro dodržení emisních limitů spalin na komíně v českých podmínkách obvykle postačuje multicyklón nebo ESP. Zvyšující se poptávka po palivech z biomasy je v posledních letech konfrontována s reálnou dostupností tohoto materiálu, což vede ke zvýšenému zájmu o spalování méně

kvalitních biomasových paliv. Při spalování těchto materiálů (např. parkety, dřevotříska, mořené dřevo) lze očekávat vyšší tvorbu škodlivin, s tím souvisí vyšší nároky na čištění vzniklých spalin.

Prezentován je návrh technologie pro čištění spalin ze spalovny znečištěné (kontaminované) biomasy s výkonem 1 až 3 MW. Technologie navržená společností EVECO Brno, s.r.o. [19] využívá suché sorpce v kombinaci s katalytickou filtrací REMEDIA a je vhodná i pro případné zpřísnění emisních limitů pro biomasu na úroveň běžnou v EU. Suchá sorpce spočívá v nástřiku jemně mletého NaHCO_3 do spalin, neutralizaci kyselých složek (SO_2 , HCl , HF) v kontaktoru. Podmínkou je minimální doba kontaktu sorbentu se spalinami 2 s. Následuje odloučení produktů neutralizace a nezreagovaného sorbentu na katalytickém filtru. Ten spojuje filtraci tuhých částic ve spalinách a katalytický rozklad dioxinů a částečně i oxidů dusíku.

Je možná řada variant konkrétního provedení použitých technologií. U katalytické filtrace byla určena filtrační plocha a navrženo její rozdělení na jednotlivé rukávce. Pro návrh kontaktoru byla uvažována tyto čtyři tvarová provedení:

- kontaktor válcového tvaru o průměru odpovídajícím průměru rovného spalinového potrubí, výška v tomto případě odpovídá minimální délce potrubí pro dodržení zdržné doby.
- kontaktor válcového tvaru o výšce 5 m, což odpovídá dispozičním možnostem pokusné kotelny (testovací jednotka firmy EVECO na spalování biomasy o výkonu 1 MW provozovaná v Kojetíně).
- kontaktor válcového tvaru se šroubovicovou vestavbou.
- kontaktor hranolového tvaru (několik hranolových segmentů).

Podle některých posuzovaných hodnot se ukazují jako nejvhodnější provedení s kontaktořem válcového tvaru, avšak tyto varianty neodpovídají dispozičním možnostem pokusné spalovny. Toto provedení ale může být použitelné na jiném zařízení.

Provedení kontaktoru se šroubovicovou vestavbou a segmentové provedení kontaktoru (několik spojených segmentů hranolového tvaru) jsou kvůli kompaktnímu uspořádání méně prostorově náročné, provedení se šroubovicovou vestavbou je zároveň konstrukčně a materiálově nejnáročnější. U varianty s hranolovými segmenty souvisí tlaková ztráta s počtem použitých segmentů a přechody mezi nimi. S vyšším počtem segmentů tlaková ztráta výrazně narůstá.

5 ZÁVĚR

Energetické využití odpadů je v současnosti nedílnou součástí odpadového hospodářství vyspělých zemí EU. Kvůli náročným legislativním požadavkům kladeným na tyto technologie (které se týkají kvality výstupních proudů ve všech skupenstvích) nedochází k výraznému znečištění prostředí, naopak, výroba energie z odpadu bývá řazena mezi nejčistší energetické zdroje. Vysoký stupeň technologické vyspělosti a spolehlivosti je mimo jiné spojen s použitím vysoce účinného systému čištění plyných produktů. Provedení tohoto systému má přímý vliv na parametry technologie jako celku a její energetickou účinnost. Vytvoření výpočtového systému pro návrh systému čištění spalin ve stádiu koncepčního návrhu a pro odhad jeho vlivu na energetické parametry spalovacího procesu je předmětem této práce.

V úvodu dizertační práce je představena legislativa v předmětné oblasti, popsána situace spalování odpadu v České republice, dále jsou uvedeny typické technologie pro zpracování různých druhů odpadu a také simulační nástroje použitelné pro modelování provozu. Na příkladu dvou provedení čištění spalin na jednotkách WtE je ilustrován současný trend využívání aparátů slučujících více procesů odstraňování škodlivin ze spalin. V další části práce je systém čištění spalin prezentován jako součást komplexní technologie. Popsány jsou vznikající škodlivé emise a jejich legislativní limity, používaná opatření pro redukci emisí a kritéria pro hodnocení energetické účinnosti procesu. Uvedena je i analýza hodnot z dalších částí provozu spalovny pro získání kvalitních souborů dat, které představují vstupní parametry procesu modelování systému čištění spalin.

V rešeršní části práce je popsána funkce dostupných technologií a aparátů. Současně byly identifikovány používané a obvyklé technologie a byly vytvořeny souhrnné přehledy provozních účinností, pracovních podmínek a dosahovaných parametrů. Na tomto základě byly uceleny poznatky o předmětné problematice do podoby nástroje pro posouzení různých variant uspořádání na spalínové cestě. Ten je tvořen soubory výpočtových vztahů pro odhad parametrů a modelování systému čištění spalin a posouzení jeho vlivu na energetické parametry spalovací jednotky. Vytvořený nástroj lze považovat za základ pro další vývoj systému, zaměřený na podrobnější výzkum a popis jednotlivých technologií v rámci budoucích výzkumných prací. V této práci byl systém čištění spalin uvažován jako celek, provedení nástroje v software W2E představuje prostor pro využitelné uchování teoretických poznatků a zkušeností z měření a provozu.

Výpočtový nástroj byl aplikován a současně ověřen při analýze různých uspořádání aparátů čištění spalin na typických jednotkách pro spalování komunálního a nebezpečného odpadu. Dle určených parametrů byl nejprve odhadnut vliv řešení čištění spalin na využití energie spalovaného komunálního odpadu. Velký význam má tlaková ztráta aparátů a teplotní profil spalínové cesty. Z pohledu kvality výstupních spalin jsou dosažitelné koncentrace škodlivin výrazně pod emisními limity, ovšem takto vysoká účinnost může být spojena s nižší produkcí energie. Z porovnání hodnot emisních limitů je patrné, že by úbytek energie byl

pravděpodobně nahrazen zdrojem spojeným s produkcí většího množství emisí. Posouzení, zda je vhodnější nastavení systému na minimální emise nebo na maximalizaci energetické produkce je otázkou konkrétní diskuse mezi investorem, veřejností a státní správou. Při spalování nebezpečného a průmyslového odpadu účinnost využití energie paliva v procesu závisí především na spotřebě přídavných paliv, která převyšuje energetické nároky systému čištění spalin. Významný vliv přídavného paliva (obvykle zemní plyn) je důvodem, proč tyto procesy nelze označit jako energetické využití. Termické zpracování v tomto případě představuje především bezpečné zneškodnění problematického odpadu a jeho spoluspalování s hodnotným fosilním palivem. Oproti spalovnám komunálního odpadu zde dochází k vyšší měrné spotřebě systému čištění spojené s vyšší měrnou tvorbou spalin z procesu.

Výpočtový nástroj byl koncipován pro systémy čištění spalin z termického zpracování odpadů. Je ovšem využitelný i pro tvorbu modelů čištění na spalinách pocházejících z jednotek, které využívají jiné druhy paliva. S ohledem na případné zpřísnění emisních limitů ze spalování biomasy je v práci předvedena analýza návrhu aparátů suché sorpce a katalytické filtrace na biomasové spalovně o výkonu 1 MW. Problematika návrhu a analýzy čištění plynných produktů spalování začíná být aktuální také u velkých energetických zdrojů a spoluspalování tuhých alternativních paliv, kde dojde ke zpřísnění emisních limitů dle nového zákona č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. Také zde může najít předvedený nástroj své uplatnění.

LITERATURA

- [1] Vláda ČR, „Nařízení vlády č. 197/2003 Sb., o Plánu odpadového hospodářství České republiky“, 2012. [Online na WWW]: <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=4154>. [cit.: 03-zář-2012].
- [2] Ministerstvo životního prostředí ČR, „Šestá hodnotící zpráva o plnění nařízení vlády č. 197/2003 Sb., o Plánu odpadového hospodářství ČR za rok 2010“, 2012.
- [3] D. O. Reimann, „CEWEP Energy Report (Status 2001 - 2004) - Results of Specific Data for Energy, Efficiency Rates and Coefficients, Plant Efficiency factors and NCV of 97 European W-t-E Plants and Determination of the Main Energy Results“, CEWEP - Confederation of European Waste-to-Energy Plants, Bamberg, 2006.
- [4] „Termizo a.s.“, 2012. [Online na WWW]: http://www.termizo.mvv.cz/index_en.html. [cit.: 17-čer-2012].
- [5] Parlament ČR, „Zákon 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší“, [Online na WWW]: <http://www.psp.cz/ff/9a/09/6a/08.htm>. [cit.: 12-zář-2012].
- [6] S. van Loo a J. Koppejan, Ed., *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Routledge, 2007.
- [7] The European Parliament and the Council of the European Union, „Directive 2000/76/EC on the incineration of waste“, 04-pro-2000. [Online na WWW]: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32000L0076:EN:NOT>. [cit.: 16-čer-2012].
- [8] Vláda ČR, „Nařízení vlády 352/2002 Sb. kterým se stanoví emisní limity a další podmínky provozování spalovacích stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší“, 2002. [Online na WWW]: <http://www.psp.cz/ff/33/89/6a/08.htm>. [cit.: 12-zář-2012].
- [9] The European IPPC Bureau, „Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration“, 2006. [Online na WWW]: <http://eippcb.jrc.es/reference/wi.html>. [cit.: 17-čer-2012].
- [10] G. Liuzzo, N. Verdone, a M. Bravi, „The benefits of flue gas recirculation in waste incineration“, *Waste Management*, roč. 27, čís. 1, s. 106–116, 2007.
- [11] The European Parliament and the Council of the European Union, „Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives“, 2008. [Online na WWW]: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008L0098:EN:NOT>. [cit.: 17-čer-2012].
- [12] The European Parliament and the Council of the European Union, „Directive 2004/8/EC on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market“, 2004. [Online na WWW]: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32004L0008:EN:NOT>. [cit.: 18-čer-2012].

- [13] M. Pavlas, M. Touš, P. Klimek, a L. Bébar, „Waste incineration with production of clean and reliable energy“, *Clean Technologies and Environmental Policy*, roč. 13, čís. 4, s. 595–605, 2011.
- [14] ÚPEI FSI VUT v Brně, „Waste to Energy (W2E) Software“, 2012. [Online na WWW]: <http://www.ypei.fme.vutbr.cz/w2e/english>. [cit.: 18-čer-2012].
- [15] P. Stehlik, R. Puchyr, a J. Oral, „Simulation of processes for thermal treatment of wastes“, *Waste Management*, roč. 20, čís. 5–6, s. 435–442, 2000.
- [16] M. Touš, L. Bébar, L. Houdková, M. Pavlas, a P. Stehlík, „Waste-to-Energy (W2E) software -a support tool for decision making process“, in *Chemical Engineering Transactions*, 2009, roč. 18, s. 971–976.
- [17] J. Kropáč, M. Pavlas, M. Fusek, P. Klimek, a M. Touš, „Waste-to-energy systems modelling using in-house developed software“, *Chemical Engineering Transactions*, roč. 25, s. 533–538, 2011.
- [18] M. Pavlas, M. Touš, a L. Bébar, „Energy efficient processing of waste“, in *Chemical Engineering Transactions*, 2010, roč. 21, s. 841–846.
- [19] EVECŮ Brno, „EVECŮ Brno - Zařizení pro ekologii a energetiku - Czech“, 2012. [Online na WWW]: <http://www.evecobrno.cz/>. [cit.: 10-čvc-2012].

ŽIVOTOPIS

Osobní informace

Příjmení, jméno Kropáč, Jiří
Datum narození 30. března 1984
Stav svobodný
Adresa Charváty 30, 783 74 (okr. Olomouc)

Kontakt

Mobilní telefon +420 605 841132
E-mail kropac@upei.fme.vutbr.cz

Vzdělání

2008 – dosud Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně,
Procesní a ekologické inženýrství, Ph.D. student

2003 – 2008 Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně,
Konstrukční a procesní inženýrství, Ing.
Diplomová práce: Technicko-ekonomická analýza dat z
provozu moderní spalovny komunálních odpadů

1999 – 2003 Střední průmyslová škola strojnická, Olomouc, maturita

Znalosti a dovednosti

Jazykové znalosti

anglický jazyk středně pokročilý

Počítačová gramotnost

práce v programech W2E, MS Office, Maple, AutoCad, Corel Draw

Pedagogické zkušenosti

2010 – 2012 vedení cvičení Základy procesní technologie na Fakultě strojního
inženýrství VUT v Brně

Další dovednosti

Řidičský průkaz sk. B

Zájmy

Četba, sport (český fotbal)

PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY

- [1] A. Tabasová, J. Kropáč, V. Kermes, A. Nemet, and P. Stehlík, “Waste-to-energy technologies: Impact on environment,” *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 146–155, Srpen 2012.
- [2] J. Kropáč, L. Bébar, and M. Pavlas, “Industrial and Hazardous Waste Combustion and Energy Production,” *Chemical Engineering Transactions*, no. 28, pp. 673–678, 2012.
- [3] J. Kropáč, M. Pavlas, M. Fusek, P. Klimek, and M. Touš, “Waste-to-energy systems modelling using in-house developed software,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 25, pp. 533–538, 2011.
- [4] M. Pavlas, L. Bebar, J. Kropac, and P. Stehlik, “Waste to energy - An evaluation of the environmental impact,” in *Chemical Engineering Transactions*, 2009, vol. 18, pp. 671–676.
- [5] Z. Jegla, L. Bébar, M. Pavlas, J. Kropáč, and P. Stehlík, “Secondary combustion chamber with inbuilt heat transfer area - Thermal model for improved waste-to-energy systems modelling,” in *Chemical Engineering Transactions*, 2010, vol. 21, pp. 859–864.
- [6] J. Kropáč, L. Bébar, and P. Stehlík, “Spalování průmyslových a nebezpečných odpadů a výroba energie,” in *Sborník Chisa 2011*, Srní, Šumava, 2011, p. 25 stran.
- [7] J. Kropáč, M. Pavlas, M. Šarlej, and P. Stehlík, “Systémy čištění spalin při spalování biomasy,” in *Sborník Chisa 2009*, Srní, Šumava, 2009, p. 18 stran.
- [8] L. Bébar, M. Touš, J. Kropáč, and P. Stehlík, “Současný stav a očekávané vývojové trendy termického zpracování odpadů,” in *Sborník Chisa 2009*, Srní, Šumava, 2009, p. 23 stran.
- [9] T. Juřena, J. Hájek, and J. Kropáč, “Physical and chemical properties of biomass for CFD modelling of grate combustion,” in *Sborník Chisa 2011*, Srní, Šumava, 2011, p. 12 stran.

ABSTRAKT

Disertační práce spočívá v popisu vývoje výpočtového nástroje pro analýzu a sofistikovaný návrh systému čištění spalin z termického zpracování odpadů. Posouzením aparátové skladby pro zajištění procesu čištění spalin z pohledu energetické náročnosti, teplotního průběhu spalinové cesty, a zajištění splnění emisních limitů umožní nástroj sledování vlivu systému čištění spalin na energetickou účinnost současné spalovny odpadů. Práce navazuje na již vytvořené výpočtové systémy. Její výstup bude integrován do podoby softwarového systému s uživatelsky přívětivým rozhraním.

Tvorba výpočtového systému vychází z rešerše provedené v předmětné oblasti. V práci jsou uvedeny soubory provozních hodnot a výpočtových vztahů popisující současné technologie využívané pro snižování škodlivých emisí ve spalinách z termického zpracování odpadu.

ABSTRACT

The thesis describes the development of a computational tool that allows sophisticated analysis and design of flue gas cleaning technologies for thermal treatment of waste. The assessment of a technological composition of the process in terms of energy consumption, temperature of the flue gas stream and ensuring the fulfilment of emission limits allows estimating the influence of flue gas cleaning system on parameters of an up-to-date waste incinerator. The work is based on an already created computational system. Its output will be integrated into a software system with a user-friendly interface.

Creation of the computational system is based on the performed research in the given area. The work presents sets of operational values and relationships describing current technologies used to reduce harmful emissions in the flue gas from thermal treatment of waste.