



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

SIMULACE TECHNOLOGIÍ PRO TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADU

SIMULATION OF TECHNOLOGIES FOR TERMAL TREATMENT OF WASTE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

BC. TOMÁŠ VENHODA

VEDOUČÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. MARTIN PAVLAS PH.D.

BRNO 2013

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá termickým zpracováním odpadu, tedy spalovny nebezpečného odpadu a energetickým využitím komunálního odpadu, jejich popisem a analýzou legislativních podmínek. Pomocí vytvořených výpočtových modelů spalovacích jednotek posuzuje dle hmotnostních a energetických bilancí vliv systému čištění spalin a různých provozních režimů na produkci energie. Na tomto základu jsou porovnány produkce energie z termického zpracování nebezpečného a komunálního odpadu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Energetické využití odpadu, čištění spalin, spalování odpadů, simulační model

ABSTRACT

This thesis mainly deals with the thermal treatment of waste - hazardous waste incineration and energy recovery municipal waste incinerators - their descriptions and analysis of legislative conditions. The flue gas cleaning system energy production in different operating modes is assessed by energy and mass balances. Computational models are developed for this purpose. On this basis, productions of energy from thermal treatment of hazardous and communal waste were compared.

KEY WORDS

Energy recovery of waste, flue gas cleaning, incineration of waste, simulation model

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

V Brně, 24. května 2013

.....

Bc. Tomáš Venhoda

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VENHODA, T. *Simulace technologií pro termické zpracování odpadu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval Ing. Martinu Pavlasovi, Ph.D. za odborné vedení, množství cenných rad a připomínek při tvorbě předložené diplomové práce.

Obsah

Seznam symbolů	4
Seznam zkratk	5
1 Úvod.....	6
1.1 Legislativa v oblasti termického zpracování odpadů.....	8
1.2 Způsoby nakládání s odpadem.....	10
1.2.1 Recyklace – materiálové využití odpadu	12
1.2.2 Skládkování.....	12
1.2.3 Energetické využití odpadu.....	12
2 Současná zařízení pro termické zpracování odpadu	15
2.1 Výchřevnost odpadu	15
2.2 Spalování odpadů v České republice	18
2.3 Popis technologie spalování odpadů.....	20
2.3.1 Termický blok	22
2.3.2 Systém využití tepla spalin.....	23
2.4 Současné technologie pro čištění spalin	24
2.4.1 Škodliviny ve spalinách	25
2.4.2 Katalytická filtrace PCDD/F	26
2.4.3 Selektivní katalytická redukce PCDD/F	27
2.4.4 Mokrý vypírka	28
2.4.5 Suché čištění kouřových plynů	29
2.4.6 Selektivní nekatalytická redukce.....	29
2.4.7 Selektivní katalytická redukce NO _x	30
2.5 Kritéria hodnocení energetické účinnosti odpadů.....	31
3 Výpočtové modely spalování odpadu	32
3.1 Nastavení parametrů simulačního modelu pro spalování IHW	33
3.1.1 Nastavení prvního stupně spalování.....	36
3.1.2 Nastavení druhého stupně spalování	37
3.1.3 Nastavení systému využití tepla.....	37
3.2 Nastavení parametrů simulačního modelu pro MSW	38
3.3 Simulační softwarový systém W2E	40
4 Odhad energetické náročnosti jednotky dle použitého řešení systému čištění spalin.....	41
4.1 Posuzovaná uspořádání systému čištění spalin.....	41
4.2 Snížení emisí u jednotlivých metod čištění spalin.....	43
4.3 Náklady na provoz a spotřební materiál	45
4.4 Spotřeba energie ventilátoru při spalování odpadu.....	48
4.5 Posouzení výroby energie a spotřeby paliva z modelu spalovny IHW	49
4.6 Měrná produkce tepla a elektřiny z produkované páry.....	52
4.7 Výsledné hodnoty bilančního modelu spaloven MSW a IHW	52
4.8 Vyhodnocení energetické účinnosti	53
5 Závěr.....	55
Použitá literatura	56
Seznam příloh.....	60

Seznam symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
A_p	Obsah popelovin v palivu	[% hm.]
C_h	Obsah uhlíku v hořlavině	[% hm.]
E_f	Importovaná energie (např. přídatným palivem)	[kWh/t]
E_w	Energie dodaná spalováním odpadu	[kWh/t]
H_h	Obsah vodíku v hořlavině	[% hm.]
$H_{h,korig}$	Korigovaný obsah vodíku v hořlavině	[% hm.]
HHV_h	Spalné teplo hořlaviny	[kJ/kg]
HHV_p	Spalné teplo paliva	[kJ/kg]
$i_{ST,HP,NET}$	Měrné zvýšení entalpie páry v kotli	[GJ/t]
I_{imp}	Importovaná energie pro potřebu čištění spalin	[kWh/t]
LHW_w	Výhřevnost odpadu	[kJ/kg]
$\dot{m}_{ST,w}$	Pára z odpadu bez podílu páry vyrobené z importované energie	[t/r]
\dot{m}_w	Množství spalovaného odpadu	[kg/h]
MW_{H_2O}	Molární hmotnost vody	[kg/mol]
MW_{H_2}	Molární hmotnost vodíku	[kg/mol]
N_h	Obsah dusíku v hořlavině	[% hm.]
O_h	Obsah kyslíku v hořlavině	[% hm.]
Q_{exp}	Exportovaná elektrická nebo tepelná energie	[kWh/t]
Q_{prod}	Produkována elektrická nebo tepelná energie	[kWh/t]
Δp	Rozdíl mezi výtlakem a sáním	[Pa]
P_{vent}	Příkon ventilátoru	[kW]
r_{H_2O}	Výparné teplo	[kJ/kg]
S_h	Obsah síry v hořlavině	[% hm.]
t_B	Teplota spalin za kotlem	[°C]
\dot{V}	Skutečný průtok spalin	[m ³ /h]
W_p	Obsah vody v palivu	[% hm.]
η_{vent}	účinnost ventilátoru	[-]

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
3T	Turbulence, Temperature, Time – Turbulence, teplota, čas
BAT	Best Available Techniques – Nejlepší dostupné technologie
BREF	BAT Reference Document – Referenční dokument BAT
BREF CWW	BREF for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector – BREF pro zpracování odpadních vod a plynů v chemickém průmyslu
BRO	Biologicky Rozložitelný Odpad
DK	Dohořivací komora
HRSG	Heat Recovery Steam Generátor – Kotel na odpadní teplo
IHW	Industrial and Hazardous Waste – Nebezpečný odpad
LHV	Lower Heating Value – Výhřevnost
MSW	Municipal Solid Waste – Tuhý komunální odpad
PCDD	Polychlorované dibenzo-p-dioxiny
PCDF	Polychlorované dibenzo-furany
pes	Specific primary energy savings - měrné úspory primární energie
PES	Primary Energy Savings – primární úspory energie
R1	Energy efficiency – energetická účinnost
RP	Rotační pec
SCC	Secondary Combustion Chamber – Dohořivací komora
SCR	Selective Catalytic Reduction – Selektivní katalytická redukce
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction – Selektivní nekatalycká redukce
ÚPE	Úspory primární energie
WTE	Waste to Energy – Energetické využití odpadu

1 Úvod

Likvidace odpadu je v současnosti aktuální téma. V minulosti, kdy lidé žili kočovným životem, nebyly s nakládáním odpadu většinou problémy. Ty nastaly v době průmyslové společnosti a spotřebního způsobu života, kdy lidstvo se začalo rozrůstat a produkovat více nevyužitých materiálů, tím se odpady začaly hromadit. V posledních desetiletích proběhla řada změn v české i evropské legislativě, které mají za cíl odpovědné a bezpečné nakládání s těmito materiály.

Směrnice evropské komise 2008/98/EC [10] vyžaduje nakládání s odpady způsobem bez ohrožení lidského zdraví a životního prostředí. Z těchto požadavků vyplynula hierarchie pro nakládání s odpady. Na prvním místě hierarchie je zamezení vzniku odpadu a jeho opětovné využití. Další vhodné možnosti nakládání s odpady jsou recyklace a energetické využití, na posledním místě v hierarchii je skládkování jinak nevyužitelného odpadu. Recyklace a opětovné využití odpadů je nejvýhodnější, protože vede k jeho zpětnému materiálovému využití. Nelze je však uplatnit pro všechny druhy odpadů. Skládkování je v ČR nejrozšířenější způsob nakládání s odpady, bohužel však představuje nejméně přijatelný způsob. Má negativní vliv na životní prostředí uvolňováním škodlivin do atmosféry a spodních vod. Například uvolňovaný methan má 21x větší vliv na změnu klimatu a globální oteplování než oxid uhličitý [21]. Přicházíme také o materiálové a energetické zdroje, které mohou být v odpadech obsaženy.

Termické zpracování je předmětem této práce a patří mezi způsoby energetického využití odpadů. V současné době je tato problematika velice aktuální - zásoby fosilních paliv se vyčerpávají a je nutné najít náhradní zdroje. Odpad je možnou alternativou, výhřevnost komunálního odpadu se pohybuje na úrovni hnědého uhlí okolo 8-12 MJ/kg a výhřevnost průmyslového odpadu v rozmezí cca 15-20 MJ/kg [1].

Termické zpracování využívá energetický potenciál chemicky vázaný v odpadním materiálu, který lze vhodným postupem proměnit na tepelnou a elektrickou energii a využít tak kalorický obsah odpadu. Je rychlým a bezpečným procesem s kontrolou plynných a tuhých produktů, řada nebezpečných látek se přemění na bezpečné. Výhodné je termické zpracování také z hlediska snížení hmotnosti na třetinu a objemu až na desetinu původního materiálu a zamezení možného vzniku ekologických škod při skládkování.

Produkované spaliny při spalování odpadu je nutné účinně čistit, což ovlivní parametry spalovny i produkci energie. V této diplomové práci je vliv odhaován pomocí matematických modelů využívajících software W2E.

Systémy využívající energii z odpadu se nazývají Waste-to-Energy (WTE). Energie může být získávána nejen spalováním, ale i produkcí paliva jako je methan, methanol, ethanol nebo syntetická paliva. K tomu se využívají technologie termického rozkladu bez přítomnosti externě dodávaných činidel jako je vzduch, kyslík, vodní pára nebo oxid uhličitý. Tyto technologie jsou například pyrolýza, zplyňování. Mezi WTE technologie patří i výroba bioplynu z biologicky rozložitelného odpadu (BRO).

V současné době dochází v Evropě k omezování skládkování, projevilo se i v legislativě, která je závazná i pro ČR. Tím dále roste význam termického zpracování.

Spalovny komunálního odpadu (Municipal Solid Waste – MSW) působí v ČR pouze tři. Konkrétně ZEVO v Malešicích v Praze, SAKO v Brně a Termizo Liberec. V České republice je dále

v provozu řada spaloven nebezpečných a průmyslových odpadů (Industrial and Hazardous Waste – IHW). Tato zařízení využívají různé metody pro čištění spalin, která se liší svým vlivem na celkovou energetickou účinnost jednotky. Různé metody jsou v práci porovnány na základě hmotnostních a energetických bilancí různých částí spalovacích jednotek.

1.1 Legislativa v oblasti termického zpracování odpadů

Pro provoz spaloven platí velmi přísné podmínky, které sledují kvalitu všech výstupních materiálových proudů a také některé provozní parametry. S postupem času se podmínky pro provoz spaloven a jejich emisní limity neustále zpřísňují a novelizují. Nejnověji platí od 1. září 2012 nový zákon č.201/2012 Sb. o ochraně ovzduší. Je náhradou mj. za zákon č.86/2002 Sb. a nařízení č.354/2002 Sb, které řešily problematiku spalování odpadu v posledním desetiletí.

Doporučené způsoby o nejlepších evropských technologiích zpracování odpadu BAT (Best Available Techniques) uvádí dokument BREF (Best Available Techniques Reference Documents). Metody nejsou závazné, ale udává, zda je provoz v souladu se směrnicí 2008/1/EC.

Relativně novým legislativním předpisem je novela zákona o odpadech 154/2010 Sb., která vymezuje pojmy např.:

- Využití odpadů – *“činnost, jejímž výsledkem je, že odpad slouží užitečnému účelu tím, že nahradí materiály používané ke konkrétnímu účelu, a to i v zařízení neurčeném k využití odpadů podle § 14 odst. 2, nebo že je k tomuto konkrétnímu účelu upraven; v příloze č. 3 k tomuto zákonu je uveden příkladný výčet způsobů využití odpadů“*
- Spalování odpadů – *“Spalování odpadu ve spalovně komunálních odpadů, která dosahuje vysokého stupně energetické účinnosti, se považuje za využívání odpadů způsobem uvedeným pod kódem R1 v příloze č. 3 k tomuto zákonu. Výše požadované energetické účinnosti a vzorec pro její výpočet je uveden v příloze č. 12 k tomuto zákonu. “*
- Materiálové využití odpadů - *“způsob využití odpadů zahrnující recyklaci a další způsoby využití odpadů jako materiálu k původnímu nebo jiným účelům, s výjimkou bezprostředního získání energie. “*

Dalším souvisejícím předpisem je nařízení vlády č. 206/2012 Sb., kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu. Dále jsou uvedeny podmínky, při kterých se na spalitelné kapalně odpady a oleje nevztahují stejná pravidla jako na nebezpečné odpady. Hodnoty emisních limitů pro plynné emise ze spalování odpadu jsou zobrazeny v Tab. 1. Novela 206/2012 Sb. udává také další provozní podmínky (Tab. 2) jak pro MSW, tak pro IHW.

Důležitým souvisejícím předpisem je zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů, Česká legislativa je tak v souladu s nařízením evropského parlamentu 2000/76/EC o spalování odpadu [17], respektive s nařízením 2010/75/EU o průmyslových emisích [30]. ČR stejně jako ostatní státy EU musí zpracovávat odpady v souladu s hierarchií nakládání s odpady a uvedenou evropskou legislativou.

Znečišťující látka	Dříve platné denní průměry emisních limitů pro emise ze spaloven dle Vyhlášky 117/1997Sb. (mg/m _N ³)	Obecně platné denní průměry emisních limitů pro emise ze spaloven dle nařízení 354/2002Sb. a 206/2012 Sb. (mg/ m _N ³)	Emisní limity dle předpisu 2000/76/EC	
			Denní průměr (mg/ m _N ³)	Půlhodinový průměr (mg/ m _N ³)
Tuhé znečišťující látky	30	10	10	30
CO	100	50	50	150/100
Organické látky	20	10	10	20
SO ₂	300	50	50	200
NO ₂	500	200/400	200/400	400
HCl	30	10	10	60
HF	2	1	1	4
Těžké kovy				
I.skupina (Cd,Tl)	0,2	0,05+0,05	-	0,05+0,05
II.skupina (As,Co,Ni,Cr)	2,0	0,5		0,5
III.skupina (Pb,Cu,Mn)	5,0			
PCDD+PCDF	nestanoveno	0,1	-	0,1

Tab. 1 Emisní limity pro spalovny odpadu [17]

Parametr	Požadovaná hodnota	Poznámky
Teplota (za posledním přívodem kyslíku)	min. 850°C min. 1100°C	Surovina Cl < 1% hm. Surovina Cl > 1% hm.
Doba zdržení (za posledním přívodem kyslíku)	min 2 s	Při teplotě převyšující požadovanou hodnotu
Zbytkový obsah hořlaviny	max. 3% hm., event. max. 5% hm.	v tuhých zbytcích ztráta žíháním

Tab. 2 Předepsané provozní parametry pro spalovny odpadů [1]

Dalšími posledními aktualizacemi zákonů a směrnic o spalovnách a WTE technologiích jsou:

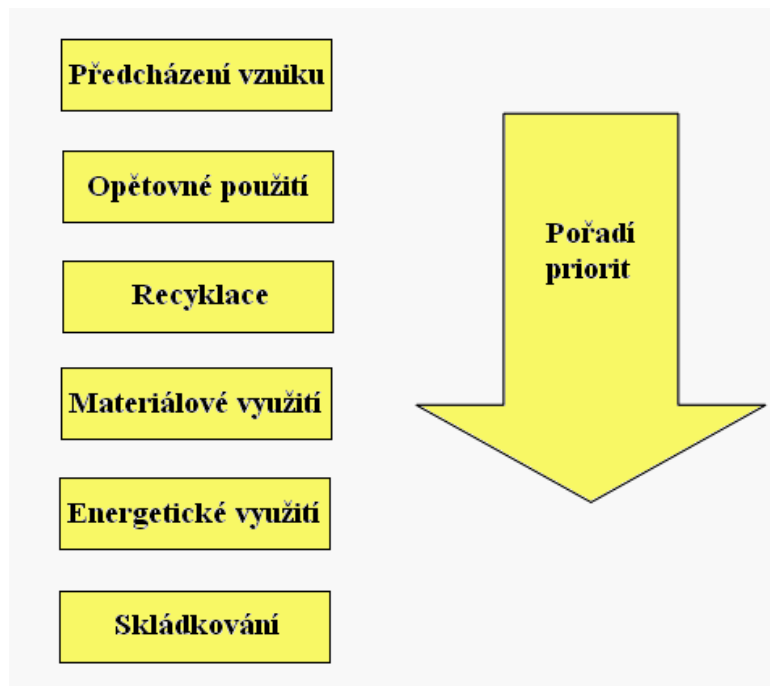
- Zákon č. 154/2010 Sb., kterým se mění zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů.
- Zákon č. 172/2010 Sb., kterým se mění zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů.
- Zákon č. 164/2010 Sb., kterým se mění zákon č. 695/2004 Sb., o podmínkách obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů.
- Směrnice Evropské komise 2010/75/EU, která nahrazuje Směrnicí 2000/76/EC o spalování odpadu a 2008/1/EC o integrované prevenci a omezování znečištění.

REACH (Registrace, Evaluace a Autorizace Chemických látek) – dle Nařízení Evropského parlamentu (ES) č.1907/2006 musí mít spalovny u stavebních výrobků z odpadů od prosince 2010 registraci REACH. Registrace REACH se netýká zpracování odpadu, avšak týká se výrobků z odpadu. Jedná se o nařízení pro registraci, hodnocení, oprávnění a omezení chemických látek platné ve všech členských státech Evropské unie. Má za cíl kontrolovat rizika chemických látek, které mohou vyvolávat rakovinu, neplodnost, genetické vady, nebo které mohou mít nepříznivý vliv na životní prostředí. Cílem je zajistit co nejpodrobnější informace související s chemickými látkami na kterémkoli bodě životního cyklu látek. Tato registrace dokládá mimořádnou chemickou a environmentální bezpečnost při použití tohoto materiálu na stavbách.

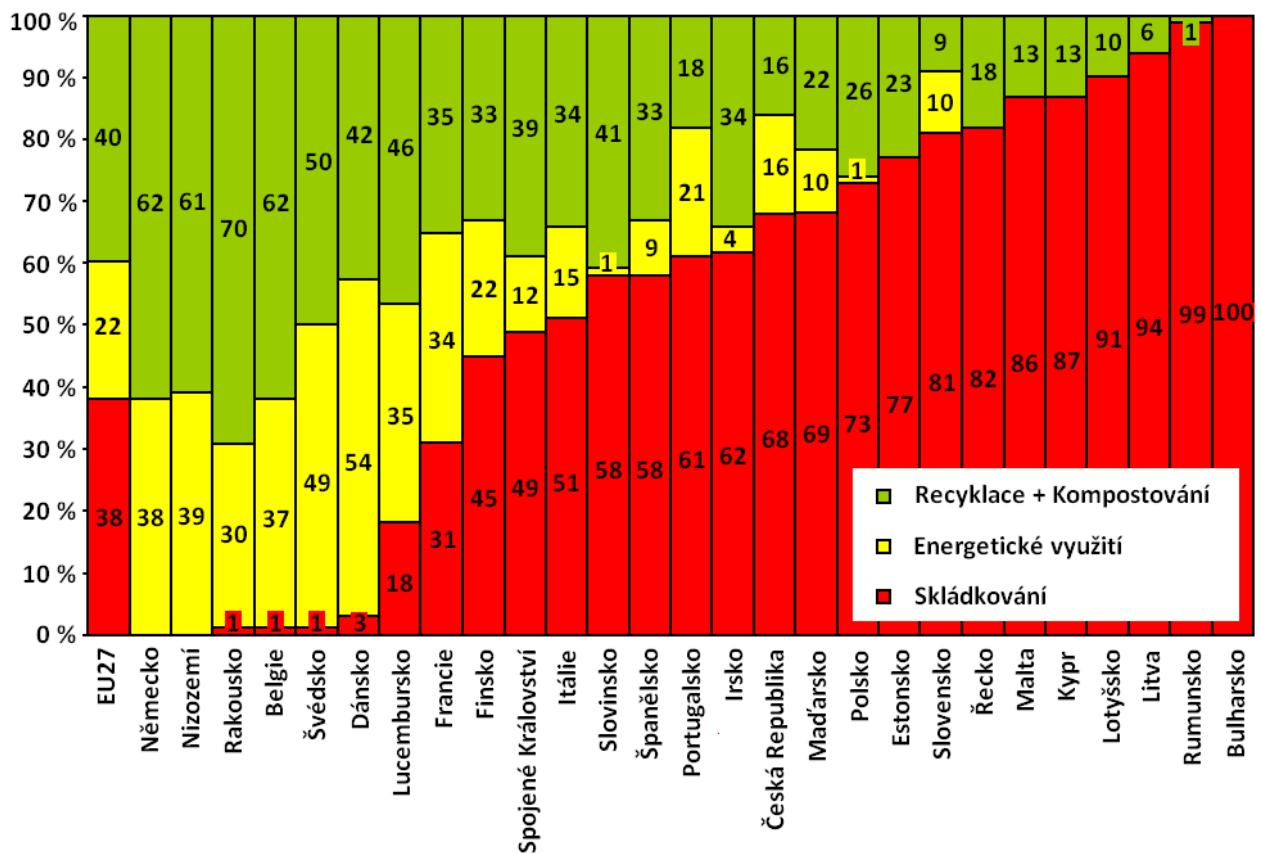
Zabývá se také pokyny týkajícími se odpadů a zpětně získaných látek. Podle rámcové Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES zveřejněné dne 22. listopadu 2008 se látky, které poté, co byly součástí odpadu, přestaly být odpadem, považují za zpětně získané látky.

1.2 Způsoby nakládání s odpadem

Z hierarchie nakládání s odpadem (Obr. 1) vyplývá, že nejlepším a ideálním způsobem nakládání s odpady je zamezení jeho vzniku nebo jeho opětovné využití. S rozvojem průmyslu a s rostoucím počtem obyvatelstva na Zemi se však musíme vypořádat s rostoucím množstvím odpadů. Nakládání s komunálním odpadem v Evropě za rok 2010 je zobrazeno v Graf 1. Z uvedených hodnot je zřejmé, že ČR oproti evropskému průměru zaostává v recyklaci a energetickém využití, většina MSW je skládkována.



Obr. 1 Hierarchie nakládání s odpadem dle směrnice 2008/98/EC [10]



Graf 1 Nakládání s komunálními odpady v Evropě v roce 2010 podle Eurostatu [12]

1.2.1 Recyklace – materiálové využití odpadu

Recyklace je po zamezení a opětovném využití nejvýše v hierarchii nakládání s odpady (Obr. 1). Největší výhodou je opětovné využití materiálu a tím jeho vrácení do procesu, ve kterém odpad vznikl. Další výhodou je úspora energií a nákladů na likvidaci. Nevýhodou je případná technologická náročnost a možná ekonomická omezení, kvůli kterým není tato metoda vhodná pro všechny druhy odpadů.

Směrnice EU č. 98/2008 definuje recyklaci jako jakýkoli způsob využití, jímž je odpad znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky, ať pro původní nebo pro jiné účely. Zahrnuje přepracování organických materiálů, ale nezahrnuje energetické využití a přepracování na materiály, které mají být použity jako palivo nebo jako zásypový materiál [10].

1.2.2 Skládkování

V ČR je skládkování nepoužívanější způsob nakládání s odpady. Jedná se však o plýtvání surovinami a má i spoustu dalších nevýhod. U skládek komunálního odpadu, který je chemicky nestabilní, se vyskytuje zápach v okolí, hrozí průsaky a kontaminace spodní vody a uvolňování skleníkových plynů do ovzduší. Převážně se jedná o plyny CO₂ a CH₄.

V ČR i v ostatních zemích Evropské unie je snaha o omezení skládkování a zvýšení energetického využití odpadu a recyklace. V ČR byl v roce 2008 [11] podíl skládkování odpadů 83%, v roce 2010 tento podíl klesl na 68% [12] hlavně na úkor energetického využití. Tento trend probíhá i v ostatních zemích EU. Směrnice 99/31/ES [2] vyžaduje snížení skládkování biologicky rozložitelných odpadů oproti roku 1995 na 75% v roce 2010, na 50% v roce 2013 a na 35% v roce 2020. Závazky o omezení skládkování BRO jsou již zmíněny v úvodu. Podíl skládkování v ČR i EU je viditelný na Graf 1, který ukazuje, že ČR zaostává za ostatními zeměmi EU. Nejlépe se daří nakládat s odpadem v Německu a Nizozemí, kde se neupravený komunální odpad již vůbec neskládkuje, a ve Švýcarsku, které není členem EU a kde je skládkování komunálního odpadu zakázáno. Oproti nim si nejhůře vede Bulharsko, které skládkuje veškerý komunální odpad.

Nelze skládkovat všechny druhy odpadu, např. kapalný, hořlavý, infekční, výbušný odpad atd. Takový odpad je nutno bezpečně zpracovat ve spalovnách IHW. Každou skládku po zaplnění její maximální kapacity je nutno rekultivovat a uzavřenou monitorovat a pečovat o ni nejméně 30 let [9].

1.2.3 Energetické využití odpadu

Termické zpracování spočívá v likvidaci odpadu a snižuje v něm množství organických kontaminantů. Vedlejším pozitivem je energetické využití, kterému se bude tato diplomová práce zabývat podrobněji v následujících kapitolách. Při pohledu na Graf 1 v kap. 1.2 je vidět podíl termického zpracování roste jak v ČR, tak v EU. V roce 2010 stoupl podíl energetického využití odpadů oproti roku 2008 [11] o 2% v ČR i v EU. Z grafu je též viditelné, že recyklace a energetické využití se doplňují. V zemích s vysokou mírou recyklace se též hojně využívají moderní spalovny.

Nejčastěji se využívá přímého spalování odpadu, další způsoby využití jsou pyrolýza, zplyňování a výroba bioplynu z BRO.

Způsoby energetického využití:

• Spalování

Nejčastějším způsobem energetického využití odpadů je spalování. Dochází k termickému rozkladu materiálu ve spalovací komoře za přítomnosti nadstechiometrického množství kyslíku, čímž se rozumí vyšší množství, než odpovídá měrné spotřebě kyslíku dle stechiometrických spalovacích rovnic. V tomto procesu se uvolňuje teplo, CO₂, vodní pára, plynné spaliny a tuhé zbytky ve formě popela. Teplo je odváděno spaliny do HRSG a předáváno teponosnému médiu. Ve spalovnách se spaluje MSW, IHW, kaly z čistíren a nemocniční odpad.

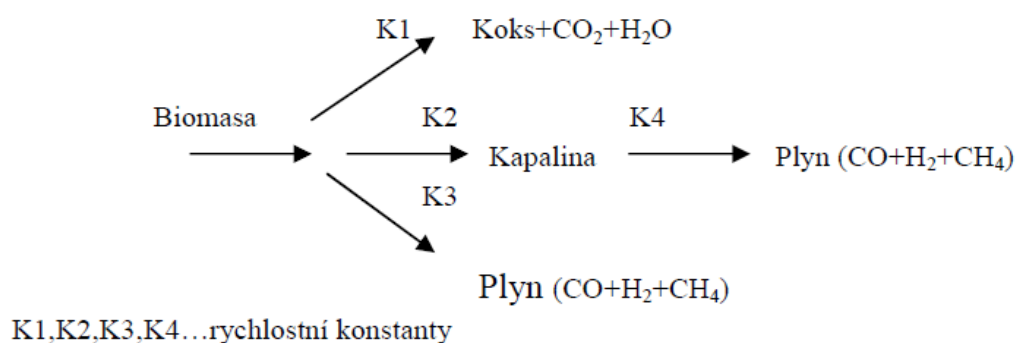
Příklady rovnic dokonalého hoření:

- Obecně: palivo + vzduch → oxid uhličitý + voda + teplo + škodliviny
- Methanolu: $2 \text{CH}_3\text{OH} + 3 \text{O}_2 \rightarrow + 2 \text{CO}_2 + 4 \text{H}_2\text{O}$
- Ethanolu: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3 \text{O}_2 \rightarrow 3 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CO}_2$
- Methanu: $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

• Pyrolýza

Pyrolýza je termický rozklad organických složek probíhající bez přítomnosti vzduchu nebo jiných externě dodávaných činidel. Probíhá při teplotách 500-750°C a atmosférickém, zvýšeném nebo sníženém tlaku. Nejčastěji však pod barometrickým tlakem při vysokých teplotách [13]. Průběh znázorněný na Obr. 2, ukazuje pyrolýzu biomasy za vzniku tuhých, kapalných i plyných produktů.

Při pyrolýze se využívají převážně biomateriály v různých formách, v zahraničí se však využívají i pneumatiky a plasty. Využití je ve výrobě tepla, elektřiny, NH₃, CH₄ atd.



Obr. 2 Mechanismus pyrolýzy [13]

- **Zplyňování**

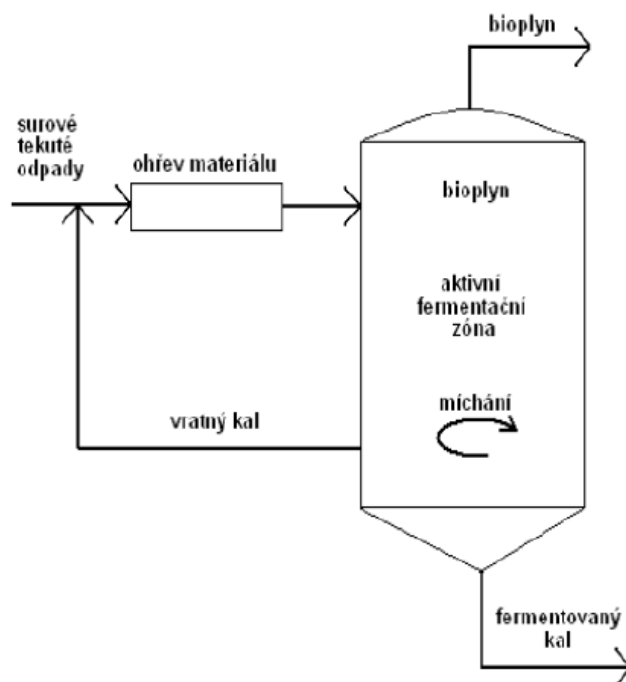
Dochází k přeměně organických složek paliva na plynné produkty. Proces probíhá ve zplyňovacím reaktoru pomocí zplyňovacího média, kterým může být vodní pára, H_2 , CO_2 , O_2 a jejich směsi. Podstatou je výroba generátorového plynu. Zplyňování není příliš výhodné, plyn se obvykle musí ještě čistit. Nejprve dochází k sušení materiálu, pyrolýze, oxidaci tuhé fáze a nakonec k redukci v redukční zóně [13]. Reakce probíhá v rozmezí teplot 500 - 1000°C a při podstechiometrickém množství kyslíku.

- **Anaerobní fermentace**

Při anaerobní fermentaci vzniká bioplyn v biologickém procesu z organické hmoty (BRO) bez přístupu vzduchu. Schéma fermentační jednotky je znázorněno na Obr. 3. Bioplyn je směsice plynů. Skládá se převážně z methanu, který je obsažen přibližně ze dvou třetin. Třetinu obsahuje oxid uhličitý a v malém množství se vyskytuje vodík a amoniak.

Celý proces probíhá ve 4 fázích [13]:

- Hydrolýza – rozklad makromolekulárních organických látek na nízkomolekulární látky
- Acidogeneze – rozklad na organické kyseliny
- Acetogeneze – oxidace látek na CO_2 , H_2 a CH_3COOH (kyselina octová)
- Methanogeneze – závěrečná fáze, vznik bioplynu



Obr. 3 Schéma fermentační jednotky [13]

2 Současná zařízení pro termické zpracování odpadu

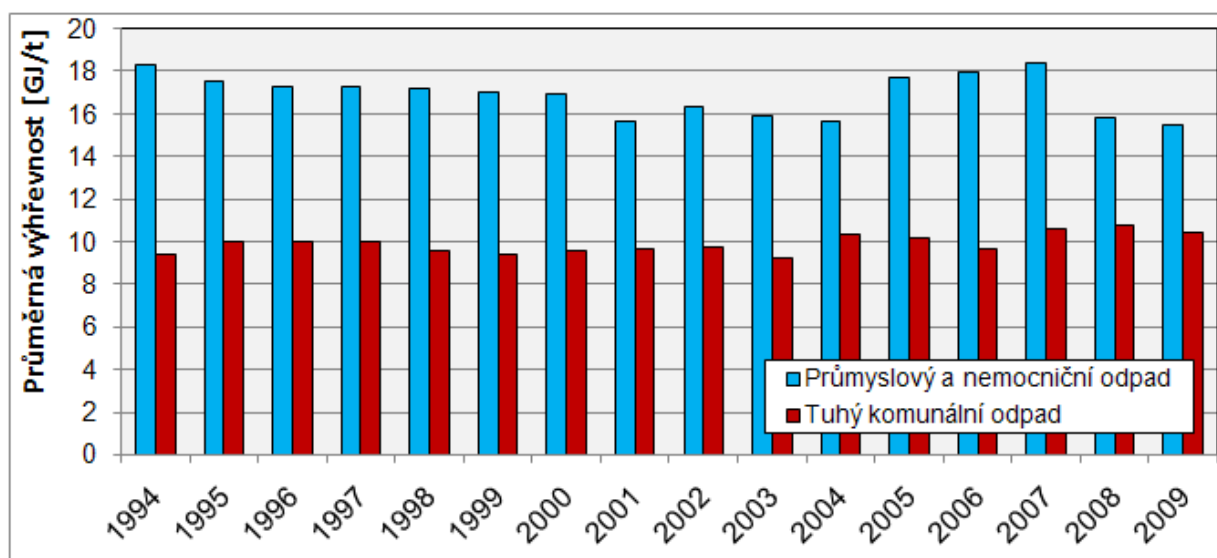
Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů definuje odpad jako každou movitou věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit a přísluší do některé ze skupin odpadů uvedených v příloze k tomuto zákonu [15]. Cílem spalování odpadů je snížení objemu, snížení a kontrola dopadů na životní prostředí a produkce energie.

Technologie spaloven se částečně liší podle druhu odpadů, pro který jsou určeny. Termicky se běžně zpracovávají tyto dvě základní kategorie:

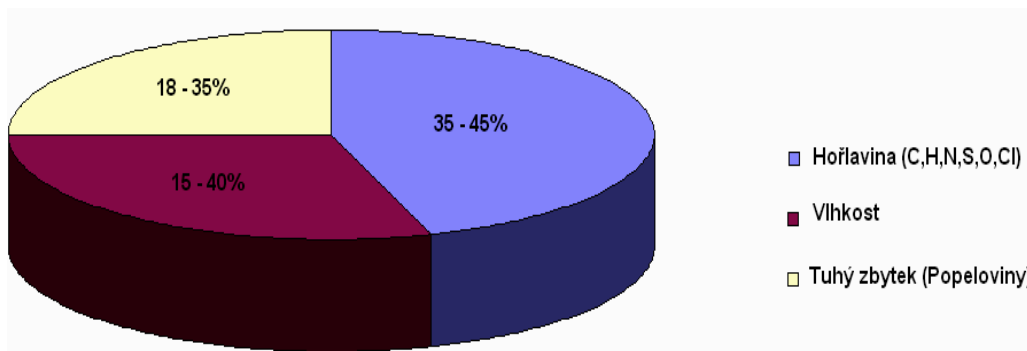
- Komunální odpad (MSW) – veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání [15]
- Nebezpečný odpad (IHW) - odpad vykazující jednu nebo více nebezpečných vlastností uvedených v příloze k tomuto zákonu [15]. Příloha udává nebezpečné vlastnosti např. hořlavost, výbušnost, toxicitu, karcinogenitu, atd.

2.1 Výhřevnost odpadu

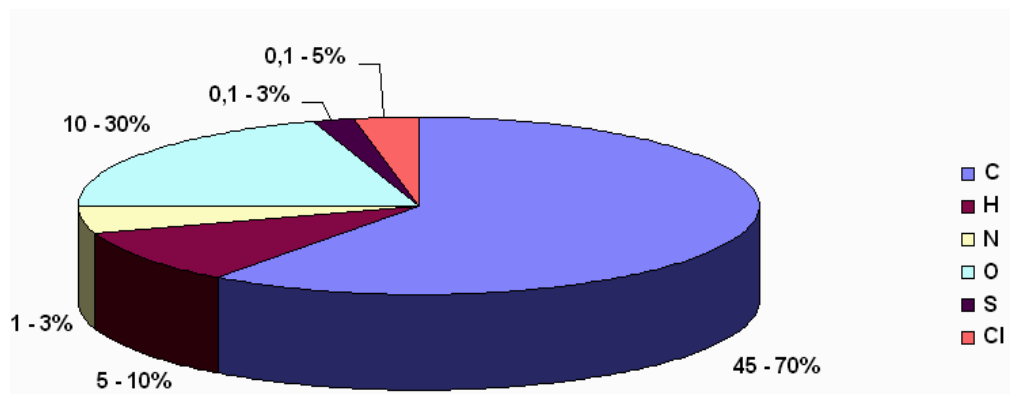
Důležitým parametrem při spalování odpadu a celkové bilanci zařízení je výhřevnost (LHV – Lower Heating Value), která se v českých podmínkách pohybuje v rozmezí 8 – 12 MJ/kg pro MSW a 15-19MJ/kg pro IHW (Graf 2). Tyto hodnoty výhřevnosti odpovídají rovněž evropským podmínkám. Hodnota se liší v závislosti na složení odpadu, jehož možné složení je znázorněno na Graf 3, a na složení hořlaviny (Graf 4).



Graf 2 Srovnání vývoje deklarované průměrné výhřevnosti komunálních, resp. průmyslových a nemocničních odpadů spalovaných v ČR v letech 1994 až 2009 [25].



Graf 3: Složení paliva MSW [14]

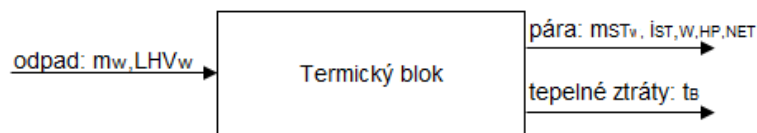


Graf 4: Složení hořlaviny MSW [14]

Určit reprezentativní hodnotu výhřevnosti IHW a MSW je velice obtížné, protože v průběhu spalování je tento odpad nehomogenní a proměnlivý. Zjišťování výhřevnosti experimentálně je proto v provozu velmi obtížné a nevhodné. Hodnota LHV se tedy odhaduje pomocí empiricky daných vzorců z chemického složení odpadu nebo zpětně z dosaženého výkonu výroby páry a dalších parametrů podle rovnice (1). Tento přístup je uveden v dokumentu BREF a vychází z tepelné bilance výroby páry spalováním odpadu zobrazené na Obr. 4.

$$LHV_w = 1,133 \cdot \frac{\dot{m}_{ST,w}}{\dot{m}_w} \cdot i_{ST,HP,NET} + 0,008 \cdot t_B - 0,801 \quad (1)$$

kde LHV_w výhřevnost odpadu [kJ/kg],
 $\dot{m}_{ST,w}$ pára vyrobená z odpadu bez podílu páry vyrobené z importované energie [t/r],
 \dot{m}_w množství spalovaného odpadu [kg/h],
 t_B teplota spalin za kotlem [°C],
 $i_{ST,HP,NET}$ měrné zvýšení entalpie páry v kotli [GJ/t].



Obr. 4 Tepelná bilance výroby páry

Při výpočtu výhřevnosti z chemického složení paliva se nejprve určí hodnota spalného tepla, od které se odečte kondenzační teplo. Pro výpočet spalného tepla existuje několik vztahů, například rovnice podle Mendělejeva (2), Dulonga (3) nebo Institute of Gas Technology (4) [32].

$$HHV_h = 339 \cdot C_h + 1030 \cdot H_h + 109 \cdot (S_h - O_h) \quad (2)$$

$$HHV_h = 339,1 \cdot C_h + 1214,2 \cdot H_h - 151,8 \cdot O_h + 104,7 \cdot S_h \quad (3)$$

$$HHV_h = 341 \cdot C_h + 1322 \cdot H_h + 68,5 \cdot S_h - 120 \cdot (O_h - N_h) \quad (4)$$

kde	HHV _h	spalné teplo hořlaviny [kJ/kg]
	C _h	obsah uhlíku v hořlavině [% hm.]
	H _h	obsah vodíku v hořlavině [% hm.]
	O _h	obsah kyslíku v hořlavině [% hm.]
	S _h	obsah síry v hořlavině [% hm.]
	N _h	obsah dusíku v hořlavině [% hm.]

Kondenzační teplo udává výparné teplo vlhkosti paliva. Vlhkost je dána množstvím vody, která v odpadu při spalování reaguje s kyslíkem (5). Pro výpočet je obsah vodíku v hořlavině korigován dle množství vody pro reakce s halogenvodíky (6), které probíhají přednostně.

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

$$H_{h,korig} = H_h - \left(\frac{1,008}{35,453} \cdot Cl_h + \frac{1,008}{18,9984} \cdot F_h \right) \quad (6)$$

kde	H _{h,korig}	korigovaný obsah vodíku v hořlavině [% hm. hořlaviny],
	HHV _p	spalné teplo paliva [kJ/kg],
	A _p	obsah popelovin v palivu [% hm.],
	W _p	obsah vody v palivu [% hm.],
	r _{H₂O}	výparné teplo [kJ/kg],
	MW _{H₂O}	molární hmotnost vody [kg/mol],
	MW _{H₂}	molární hmotnost vodíku [kg/mol].

2.2 Spalování odpadů v České republice

Jak již bylo zmíněno dříve, ČR zaostává za ostatními státy EU v energetickém využívání odpadů. Spalovny komunálního odpadu jsou v ČR tři, v Praze Malešicích, Liberci a Brně. V roce 2011 se kapacita spaloven po rekonstrukci v Brně a v Praze zvýšila. Celkově jsou spalovny v ČR nyní schopny spálit cca 650 000t MSW za rok. Jejich produkce je znázorněna v Tab. 3.

Další spalovny MSW o celkové kapacitě 600 000t/r se plánují vybudovat v Karviné, Opatovicích, Chotíkově [33], Mydlovarech a v Jihlavě. V současné době má nejblíže k realizaci spalovna v Chotíkově u Plzně (kapacita 200 000 t/r). Stavba spalovny v Karviné (192 000 t/r) se odložila z důvodu neobdržení dotace z EU.

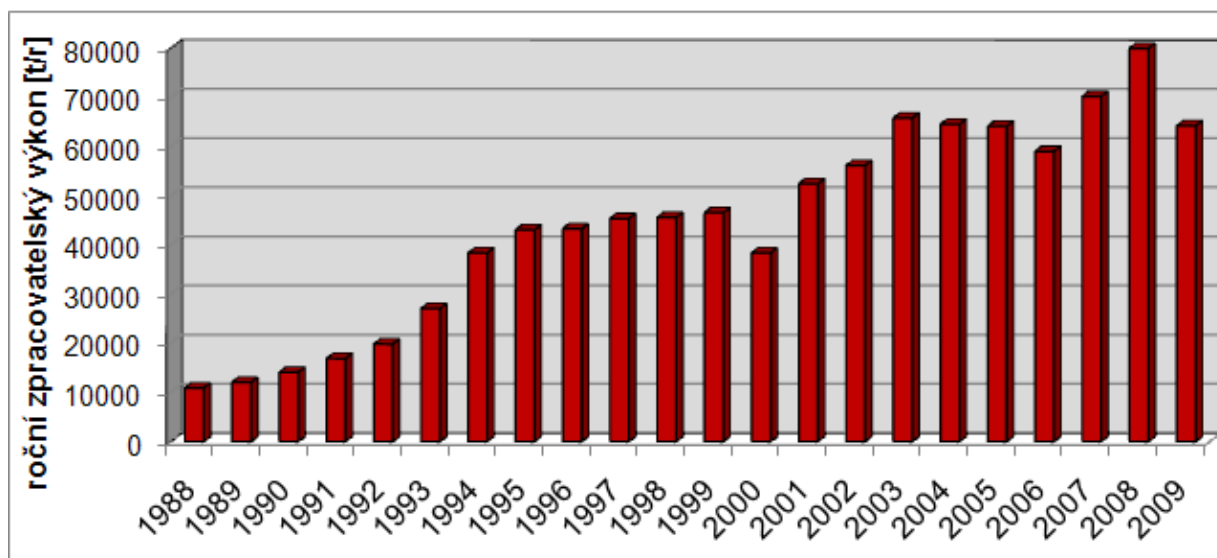
Spalovna	Kapacita [t/r]	Spálený odpad za rok 2011 [t]	Vyrobené teplo za rok [GJ]	Vyrobená elektřina za rok [MWh]
Sako Brno	240 000	232 985	2 117 268 (rok 2011)	71 174 (rok 2011)
Termizo Liberec	96 000	94 300	961 860 (rok 2011)	23 575 (rok 2011)
ZEVO Praha Malešice	320 000	310 000	cca 850 000	cca 60 000

Tab. 3 Produkce MSW za rok 2011 v ČR [18], [19], [22]

V roce 2012 v ČR působí 27 spaloven průmyslových a nemocničních odpadů. Jejich kapacita a produkce je zobrazena v Tab. 4. Celková kapacita zpracovaného odpadu se za poslední roky pohybuje od 60 do 80 kt/r, což zobrazuje Graf 5.

Provozovatel (lokality)	Kapacita t/rok	Spáleno v roce 2010 [t]	Provozovatel (lokality)	Kapacita t/rok	Spáleno v roce 2010 [t]
Zentiva, k.s., Praha	1 000	492	Pardubická krajská nemocnice, a.s.	750	1 000
SITA CZ a.s., Praha Motol	2 940	2 520	OMNICON s.r.o., Těchonín	356	400
AVE Kralupy s.r.o.	10 000	3 722	SPORTEN, a.s. Nové město na Moravě	864	244
Purum s.r.o., Kolín	1 400	1 006	RUMPOLD s.r.o., Jihlava	1 500	1 431
Nemocnice Rudolfa a Stefanie Benešov, a.s.,	1 000	984	E K O T E R M E X, a.s., Pustiměř	3 840	3 439
RUMPOLD s.r.o., Jihlava	1 500	1 490	Nemocnice Znojmo, příspěvková organizace	780	744
T.O.P. EKO, spol. s r.o., Plzeň	2 400	1 928	MEGAWASTE - EKOTERM, s.r.o., Prostějov	4 000	3 989
SITA CZ a.s., Trmice	16 000	14 491	SITA CZ a.s., Olomouc	750	856
Spolek pro chemickou a hutní výrobu, a.s. Ústí nad Labem	5 000	2 555	DEZA, a.s., Valašské Meziříčí	10 000	5 140
SPL Jablonec nad Nisou, s.r.o.	2200	1420	SITA CZ a.s.	4 700	5 269
NELI servis, s.r.o., Liberec	400	365	Uherskohradištská nemocnice a.s.	350	284
Fakultní nemocnice Hradec Králové	1 000	978	ArcelorMittal Frýdek-Místek a.s.	1 600	787
Oblastní nemocnice Trutnov a. s.	1 000	146	SITA CZ a.s., Ostrava	18 400	18 248
Hamzova odborná léčebna pro děti a dospělé	750	612			

Tab. 4 Přehled spaloven IHW v ČR [20]



Graf 5 Roční spalované množství průmyslových a nemocničních odpadů v ČR [1]

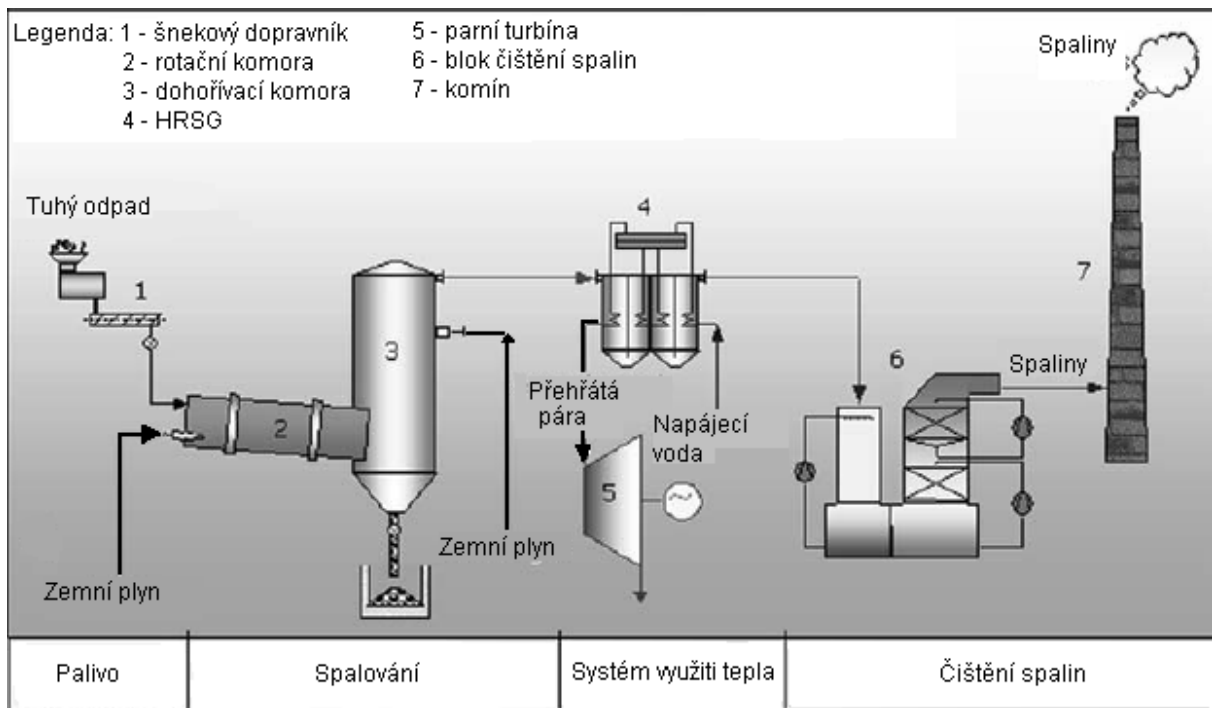
2.3 Popis technologie spalování odpadů

Konkrétní technologické řešení spalovny má řadu modifikací dle požadavků provozovatele. Různé bývají např. provedení přehřevu spalovacích vzduchů a napájecí vody, typ turbíny nebo provozní teploty.

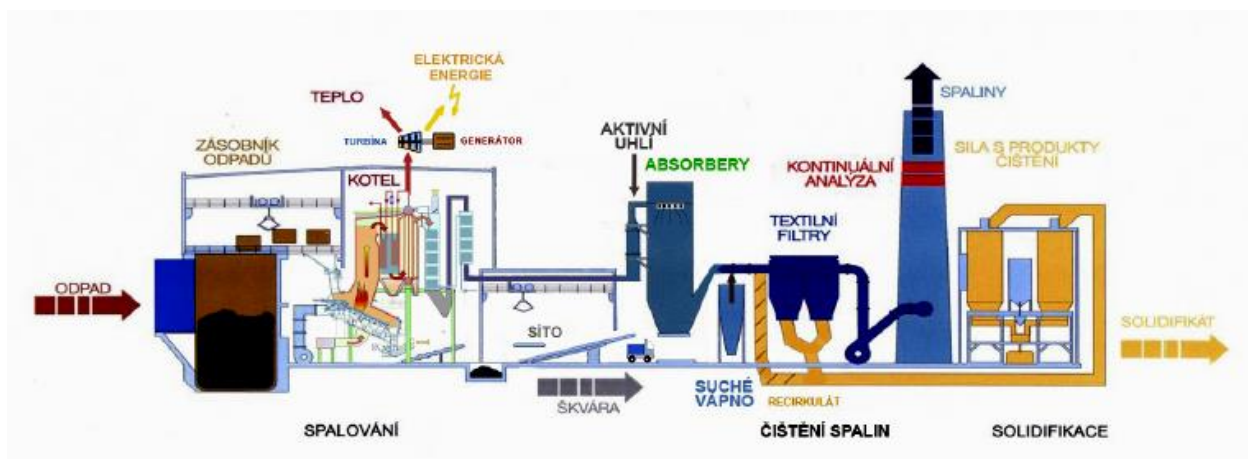
Základní technologické řešení spaloven odpadu se obvykle dělí na tři části:

- Termický blok – dochází k tepelnému rozkladu spalovaného materiálu a uvolnění energie vázané v palivu do spalin
- Systém využití tepla spalin – spaliny předávají tepelnou energii vodě a páře, z napájecí vody se produkuje přehřátá pára
- Systém čištění spalin

Jednotlivým částem se věnují následující kapitoly. Technologie spaloven MSW a IHW je podobná, odlišnosti se vyskytují hlavně v termickém bloku popsaném níže. Zjednodušené schéma spalovny IHW zobrazuje Obr. 5 a spalovny MSW Obr. 6.



Obr. 5 Zjednodušené schéma spalovny nebezpečného odpadu [3]



Obr. 6 Schéma spalovny komunálního odpadu SAKO Brno po rekonstrukci v letech 2008 až 2011 [4]

2.3.1 Termický blok

Odpad se zpracovává takovým způsobem, aby bylo dosaženo dokonalého rozkladu všech sloučenin a splněny podmínky tzv. 3T, které značí Turbulence (turbulence), Temperature (teplota) a Time (čas) [8]. Technologie pro dosažení 3T ovlivňují vznik škodlivin CO, VOC a dioxinů. Patří mezi primární opatření pro snížení emisí ve spalínách, která jsou podrobněji popsána v kap. 2.4.

Spalovací (oxidační) proces lze členit dle teplot v reakčním prostoru na procesy [4]:

- Nízkoteplotní s teplotou reakčního prostoru do 1000°C;
- Vysokoteplotní s teplotou reakčního prostoru nad 1000°C.

Ve spalovnách průmyslových a nebezpečných odpadů se za účelem tepelného nebo termického rozkladu odpadu pomocí technologie spalování s přebytkem vzduchu (oxidační režim) jako první fáze procesu používá rotační pec. V termickém bloku probíhá spalování hořlavé složky odpadu a prakticky veškeré teplo obsažené v hořlavině odpadu se uvolní. Do procesu dále pokračují spaliny s malým množstvím úletového popílku. Pro udržení teplotního režimu rotační pece v nastavených mezích, je nutné kontrolovat množství přiváděného vzduchu do pece v závislosti na výhřevnosti odpadu [1]. Nadstechiometrické množství vzduchu v tomto případě slouží také jako chladicí médium. Spalování probíhá v sytném nebo tavném režimu. V případě spalování pod teplotou tavení popelovin probíhá sytný režim a tvoří se sytké popeloviny. Tavného režimu se dosáhne při teplotách nad teplotou tavení popelovin, která se pohybuje mezi 900 - 1000°C. Konstrukčně jednodušší je sytný režim, energeticky je však výhodnější tavný režim [25]. Teplota spalin pocházejících z první fáze spalování IHW, tedy spalin z rotační komory, se zvyšuje na požadovanou teplotní úroveň v dohořivací komoře pomocí hořáků napájených přidávaným palivem, kterým je nejčastěji zemní plyn.

Ve spalovnách komunálních odpadů se používají různé typy pecí, především s roštovým ohništěm, lze použít také rotační nebo fluidní pec. V samotném ohništi teplota dosahuje hodnot v rozmezí 950 - 1100°C [23]. Při těchto teplotách nastane termicko-oxidační rozklad odpadu na jednotlivé složky. Na konci roštu propadá do vodní lázně popel (možný je i suchý odvod popela), který představuje tuhé zbytky ze spalování a je tvořen hlavně popelovinami z paliva.

Kvalita spalin za pecí neodpovídá požadavkům na stupeň termického rozkladu. Proto je proces dokončen v tzv. dohořivací (sekundární) komoře (Secondary Combustion Chamber – SCC). Jejím účelem je dokončení oxidačních procesů. Podíl chlóru rozhoduje o minimálních teplotách při požadovaných podmínkách v dohořivací části dle legislativy (Tab. 2). U spaloven MSW je obvykle zpracováván odpad s podílem chlóru menším než 1%, proto je minimální teplota spalin v SCC 850°C po dobu minimálně dvou sekund. Spaliny musí u spaloven IHW dodržet po dobu dvou sekund minimální teplotu 1100°C, spalovaný odpad má obsah chlóru větší než 1% a není přijímán na skládky ani do spaloven MSW. Teploty je nutno udržet minimálně po stanovenou dobu za posledním přívodem vzduchu, měřeno v blízkosti vnitřní stěny nebo v jiném reprezentativním místě spalovací komory. Tato hodnota je dána legislativou [5]. Spaliny vycházející ze sekundární komory jsou vedeny do systému využití tepla.

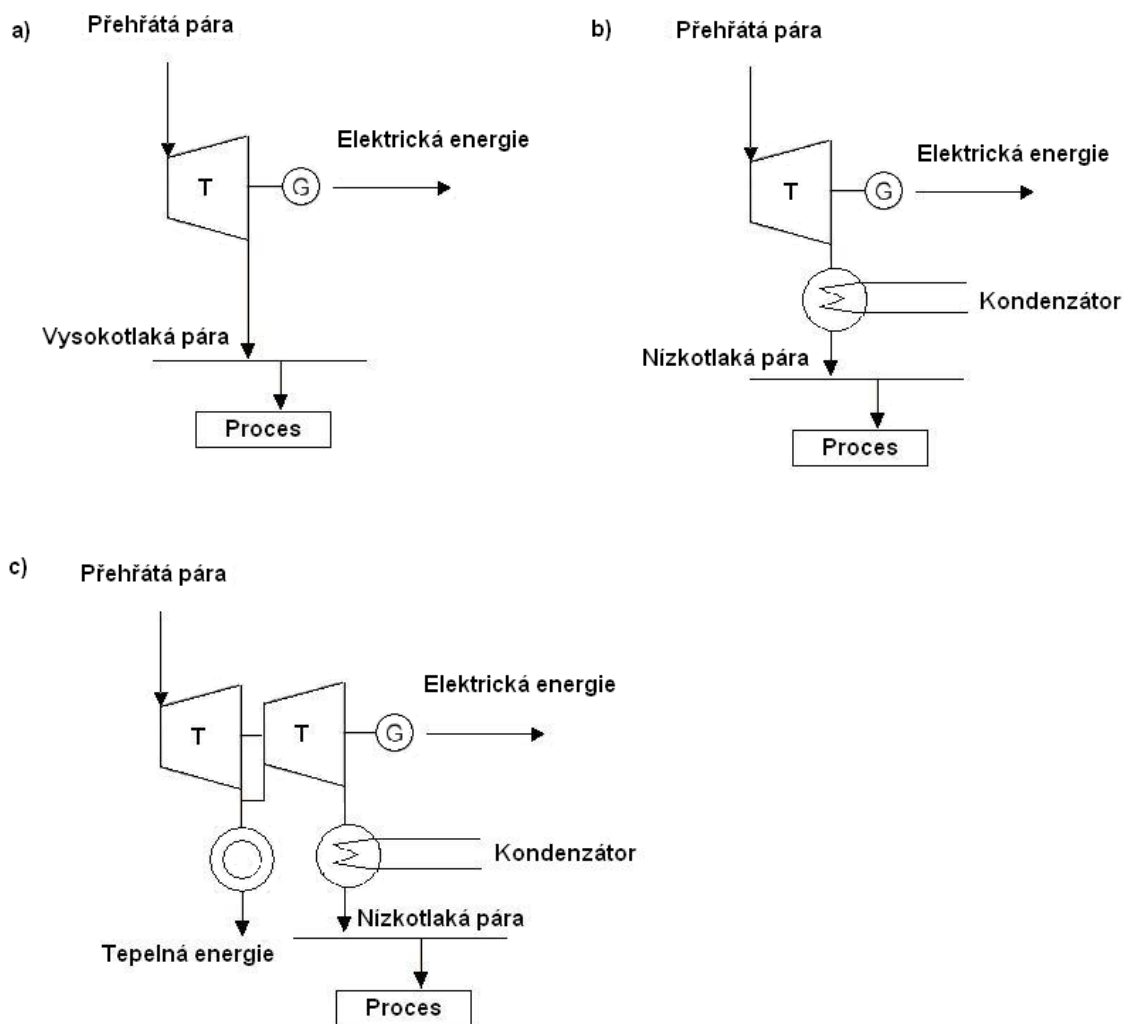
2.3.2 Systém využití tepla spalin

Energetický obsah spalin se využívá nejčastěji k produkci přehřáté páry, také jej lze využít přímo v technologii, např. pro předehřev spalovacího vzduchu. Napájecí voda se přivádí do kotle na odpadní teplo (HRSG – Heat Recovery Steam Generator) a za použití energie ze spalin se generuje přehřátá pára. Lze ji využít pro export do sítě centrálního zásobování teplem nebo pro generování elektrické energie jak ve vlastní, tak i mimo vlastní technologii.

HRSG má tři hlavní části:

- ekonomizér – předehřev napájecí vody na teplotu pod mezí sytosti,
- výparník – odpařování napájecí vody a produkce syté páry,
- přehřívák – zvyšování teploty a tlaku syté páry, produkce přehřáté páry.

Parametry vyráběné páry jsou ovlivněny podmínkami v lokalitě provozu spalovny. Nejčastěji požívané parametry přehřáté páry jsou přibližně 400°C a 4MPa [1]. Produkce páry o vyšších parametrech může být spojena se zvýšením rizika koroze. Produkce elektřiny je možná pomocí protitlakého, odběrového nebo kondenzačního uspořádání turbín. Schémata jsou názorně zobrazena na Obr. 7. V protitlaké turbíně expanduje pára na tlak, který obvykle odpovídá parametrům sítě zásobení teplem, nebo požadavkům procesu. Na výstupu se nastavuje protitlak nad atmosférickými hodnotami, dle využití obvykle 1MPa. Je vhodná v případě stálého a rovnoměrného odběru nízkotlaké páry [1]. Kondenzační turbína se využívá pro maximální produkci elektrické energie z vyrobené páry. V tomto případě veškerá pára expanduje v turbíně až na tlak výrazně pod atmosférickými hodnotami (je možné dosáhnout výstupního tlaku 5 až 15 kPa), následně je nutné v chladiči provést kondenzaci. Výsledný kondenzát se obvykle po úpravě vrací zpět do HRSG jako napájecí voda [6]. Odběrové uspořádání turbín se skládá z propojené protitlaké a kondenzační turbíny. Část páry mezi nimi se odebírá pro topné účely. Odběrová a protitlaká turbína umožňuje kogeneraci, tj. kombinovanou produkci tepla a elektřiny.



Obr. 7 Možná uspořádání turbín pro využití tepla přehřáté páry: a) Protitlaké, b) Kondenzační, c) Odběrové s jedním odběrem

2.4 Současné technologie pro čištění spalin

System čišění spalin je nedílnou součástí technologie pro termické zpracování odpadu. Zabezpečuje snižování znečišťujících látek propouštěných do okolí pod emisní limity stanovené právními předpisy. Spaliny obsahují tuhé znečišťující částice, zplodiny dokonalého a nedokonalého spalování a těžké kovy. Musí splňovat emisní limity zobrazené v Tab. 1. V případě jejich nesplnění hrozí vysoké pokuty či vyřazení z provozu.

Technologie pro snižování množství škodlivin ve spalinách lze odlišit na primární a sekundární opatření. Primárním opatřením se rozumí zamezování tvorby škodlivin ve spalovací komoře a sekundárním opatřením odstraňování škodlivin z již vytvořených spalin. Při nestandardních stavech provozu spalovny se mohou vyskytovat problémy v podobě snížené účinnosti čištění. Primárním opatřením proti tvorbě škodlivin je především dostatečná kvalita spalování – dosažení podmínek spalování pomocí tzv. podmínek 3T (viz kap. 2.3.1). Další primárními opatřeními je např. úprava složení a vlhkosti paliva, změna velikosti částic paliva, přívod sekundárního paliva, přívod sekundárního vzduchu, vhodná konstrukce spalovacího zařízení atd.

Sekundárními opatřeními jsou aparáty pro čištění spalin, obvykle se umísťují na spalinovou cestu za HRSG, výjimkou bývá nástřik čpavku v SCC pro nekatalytickou redukci. Organický uhlík, rtuť a těžké kovy se převážně odlučují zároveň s hlavními skupinami škodlivin.

Technologie lze rozdělit podle snižování hlavních druhů znečišťujících látek [3]:

- odstraňování NO_x - selektivní nekatalytická redukce (SNCR) a selektivní katalytická redukce (SCR),
- snižování dioxinů – katalytická filtrace, katalytický reaktor DeNO_x/DeDiox
- tuhé znečišťující látky - oddělovače, cyklóny, elektrostatické odlučovače a látkové filtry,
- zachycování znečišťujících látek na různých typech adsorpčních látek - adsorpční technologie, např. aktivní uhlí pro čištění dioxinů, rtuti nebo těkavých organických sloučenin,
- čištění kouřových plynů od anorganických sloučenin (HCl, HF), oxidu siřičitého (SO_2) a často i těžkých kovů mokrou, suchou nebo polosuchou absorpcí.

2.4.1 Škodliviny ve spalinách

Současná legislativa vztahující se k provozu jednotek termického zpracování odpadů (směrnice 2000/76/ES) vyžaduje kontinuální měření následujících látek: oxid dusnatý a oxid dusičitý (tzv. oxidy dusíku NO_x), oxid uhelnatý (CO), tuhé látky, organický uhlík (TOC), anorganické sloučeniny chloru označované jako chlorovodíky (HCl), anorganické sloučeniny fluoru označované jako fluorovodíky (HF) a oxid siřičitý (SO_2). Kromě těchto kontinuálních měření nařizuje i jednorázová měření obsahu těžkých kovů v plynné, kapalně i tuhé fázi, včetně jejich sloučenin koncentrovaných polychlorovaných dibenzo-p-dioxinů a polychlorovaných dibenzo-furanů (PCDD + PCDF), obecně známých jako dioxiny.

Oxid uhličitý (CO_2) a vodní pára jsou konečnými oxidačními produkty při spalování uhlíkatých paliv, včetně odpadů. Jedovatý **oxid uhelnatý** (CO) je hlavní produkt nedokonalého spalování a indikátor kvality spalovacího procesu. Při dostatečné dostupnosti kyslíku oxiduje na méně nebezpečný oxid uhličitý.

Mezi **tuhé znečišťující látky** (TZL) ve spalinách patří částice popelovin unesené proudem spalin ze spalovací komory a aerosoly (např. soli KCl, NaCl, K_2SO_4). Další částice vznikají při nedokonalém spalování a tvoří saze a zkondenzovaný dehet. Na povrch TZL se adsorbují těžké kovy a dioxiny. Zachycené částice je třeba po zachycení ze spalin bezpečně zpracovat.

Emise **oxidů dusíku** (NO_x) jsou produktem oxidace dusíku. Rozeznávají se tři způsoby tvorby oxidů dusíku: palivové (rozhodující je velikost přebytku vzduchu a množství dusíku v palivu při teplotách 600 až 800°C), termické (při teplotách nad 1200°C dle dostupnosti kyslíku) a promptní oxidy dusíku (množství vytvořených oxidů dusíku stoupá s teplotou).

Emise **oxidů síry** (SO_x) 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_2SO_4 .

Chlor může při teplotách nad 550°C zapříčinit vysokoteplotní korozi teplosměnných ploch kotle. Část chloru reaguje s vodíkem a do spalin se uvolní jako **chlorovodík** (HCl). Přítomností fluoru v palivu a jeho reakcí s vodíkem se může objevit také **fluorovodík** (HF).

Uhlovodíky vznikají jako meziprodukt při konverzi uhlíku a vodíku z paliva na CO_2 a H_2O . **Polycyklické aromatické uhlovodíky** (PAH) jsou karcinogenní. **Těkavé organické sloučeniny** (VOC) postupně kondenzují a tvoří emise tuhých částic. Objevit se může také tvorba **metanu** (CH_4). Tvorba uhlovodíků je stejně jako emise oxidu uhelnatého způsobena nízkou teplotou a nedostatečnou prodlevou spalin v termickém bloku, nebo nedostupností potřebného kyslíku. **Amoniak** (čpavek, NH_3) může v malém množství vznikat za velmi nízkých teplot jako mezistupeň při tvorbě NO_x . **Ozón** (O_3) může vznikat nepřímo atmosférickými reakcemi mezi oxidem uhelnatým, metanem, těkavými organickými sloučeninami a oxidy dusíku.

Mezi složky paliva patří také **těžké kovy** (např. měď, olovo, rtuť, kadmium). Ty mohou zůstat v popelovinách, odpařit se do spalin, nebo také pokrýt povrch emitovaných částic. Jejich odstranění na úroveň stanovenou legislativou bývají dostačující účinné separační postupy pro odstranění popílku ze spalin. Spolu s palivem se do procesu může dostat i **rtuť** (Hg) která bývá zachycena v systému čištění spalin [25].

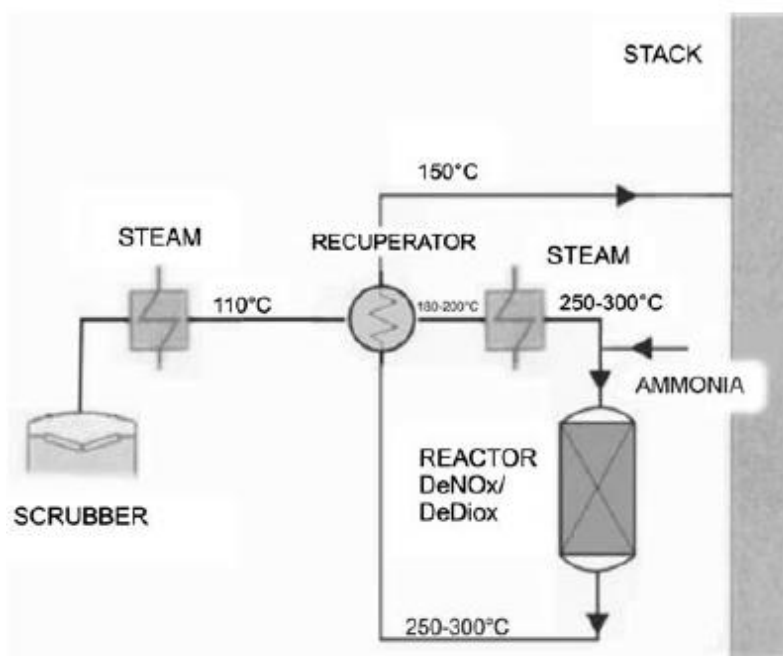
2.4.2 Katalytická filtrace PCDD/F

Princip je založen na umístění speciálních katalytických látek ve filtračních materiálech. Řadí se mezi technologie REMEDIA D/F od společnosti GORE [34] nebo 4D filtry Cerafil TopKat [35]. Pevné tuhé částice jsou efektivně mechanicky odděleny současně s chemickým rozkladem značného množství dioxinů a určité části NO_x obsažených ve spalinách.

Vnější filtrační vrstva se skládá z membrány, která propustí méně než 1 mg/m_N^3 jemných částic popílku [27]. Filtrací dochází také k odloučení tuhých zbytků z absorpčního čištění spalin (suchá nebo polosuchá vypírka) nebo z adsorpčního odlučování dioxinů aktivním uhlím. Část dioxinů navázaná na popílek se odloučí společně s filtrací tuhých částic. Tímto způsobem se snižují také těžké kovy a rtuť navázaná na popílek. Jemnější částice obsahují více navázaných škodlivin z důvodu vyššího měrného povrchu. Po mechanické filtraci na povrchu rukávce spaliny vstupují do vrstvy, kde jsou obsaženy katalyticky aktivní látky pro ničení dioxinů. Katalytická filtrace snižuje emise PCDD/F s celkovou účinností přesahující 99% [27]. Vnější filtrační vrstva se od usazeného popílku regeneruje pravidelně za použití pulzního tryskového čištění systému nebo mechanických vibrací. Výhodou je, že dochází k rozkladu dioxinů na méně škodlivé látky, což se projeví na jejich nižší koncentraci v zachyceném popílku oproti adsorpčnímu čištění.

2.4.3 Selektivní katalytická redukce PCDD/F

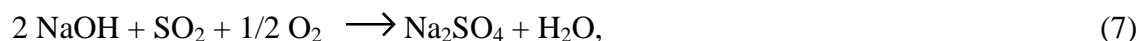
Pro katalytické odstranění dioxinů společně se selektivní katalytickou redukcí NO_x lze využít katalytický reaktor s katalyzátorem určeným pro rozklad dioxinů (Obr. 8.). Jedná se o efektivní řešení odstraňování oxidů dusíku a dioxinů ($\text{DeNO}_x/\text{DeDiox}$), které probíhá v katalytickém reaktoru při teplotách v rozmezí 200 - 300°C [3]. Technologie pracuje s vysokou účinností, nevýhodou však je citlivost některých katalyzátorů na znečištění spalin. Je vhodné umístit reaktor za zařízení pro mechanické a chemické čištění, aby byl odstraněn prach z kouřových plynů. Z toho důvodu se v některých případech musí spaliny přehřívát na požadované teploty pro katalytické reakce. Další nevýhodou je snížené odstraňování NO_x , protože redukce dioxinů a oxidů dusíku jsou konkurující reakce. Podle použitého katalyzátoru a provozních podmínek na rektoru lze rozlišit mezi aparáty DeNO_x (vysoká účinnost redukce NO_x , částečná redukce PCDD/F), DeDiox (především redukce dioxinů, okrajově redukce oxidů dusíku) a reaktory $\text{DeNO}_x/\text{DeDiox}$.



Obr. 8 Schéma $\text{DeNO}_x / \text{DeDiox}$ technologie
(scrubber–vypírka, steam-pára, recuperator-rekuperátor, reactor-reaktor, amonia-amoniak, stack-komín)

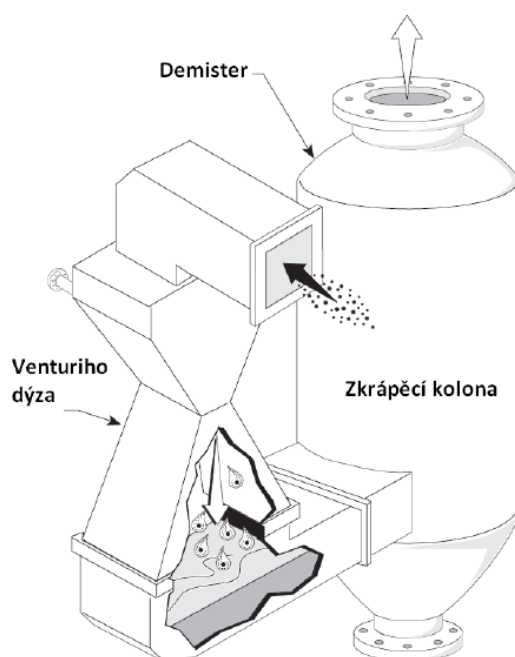
2.4.4 Mokr  vypírka

Mokr  vypírka absorbní odstr nuje ze spalin emise SO_x . Ve věži aparátu se rozpouští SO_2 kde reaguje s v penn m nebo sodn m činidlem a produkuje CO_2 , kter  vstupuje do proudu plynu a oxiduje [26]. Představitelem vápenného činidla je v penn  mléko $\text{Ca}(\text{OH})_2$,  ast m sodn m činidlem je NaOH . V penn  a sodn  sorbenty se liší vlastnostmi produktů absorpce. Při užití vápenného činidla vznikají nerozpustn  produkty, které zůstávají na dn  zařízení. NaOH produkuje rozpustn  soli do vody, kter  se musí dále zpracovat nebo se odpařuje za kotlem. Reakce s NaOH jsou popsány rovnicem (7) ař (9).



Mokr  vypírka také odprařuje spaliny pomocí velice jemných vodn ch kapek, kter  tvoří mlhu, v ní se tuhé částice zachycují. Znečištěn  kapky se na výstupu spalin z vypírky zachycují v tzv. demisteru, aby neunikly do okolí.

Před vstupem do vypírky jsou spaliny vlh eny (tzv. quench) a poté dochází v prvním stupni čištění k intenzivnímu kontaktu činidla a spalin, kter  slouží k dobrému zachytu HCl a HF . Obvykle probíhá s vysokou tlakovou ztrátou v prvním stupni vypírky, k čemuž slouží Venturiho d za, popřípadě O-element. Schéma s užit m Venturiho dýzy je znázorněno na Obr. 9. V dalř ch dvou stupních vypírky se vyskytuje zkrápěcí kolona s menř  tlakovou ztrátou. Slouží pro odlučování SO_2 . Pro zvyř n  činnosti čištění tuhých látek o velikosti menř  neř 1 μm se využívají aparáty o vysokoenergetick  náročnosti, např. Venturiho vypírky.

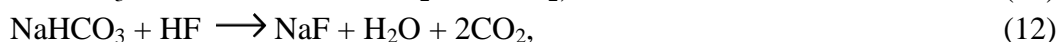
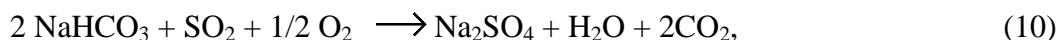


Obr. 9 Schéma mokr  vypírky [28]

2.4.5 Suché čištění kouřových plynů

Systémy mokrého čištění spalin jsou v současnosti nahrazovány levnějšími suchými systémy. Mokré čištění se využívá pouze v případě požadavků na vysokou účinnost.

Princip suchého čištění spalin spočívá ve vstřikování absorpčních látek do spalin, kde tyto látky reagují s kyselými sloučeninami SO₂, HCl, HF. Používaným absorpčním činidlem je např. NaHCO₃ (hydrogenuhličitan sodný, bikarbonát sodný). Aplikuje se při teplotách vyšších než 140°C a musí být v kontaktu s kouřovými plyny po určité minimální dobu [3]. Kromě sodných sorbentů se užívá i sorbentů vápenných, např. Ca(OH)₂. Následující reakce udávají měrné spotřeby a tvorby při reakcích kyselých plynů s NaHCO₃ (10), (11) a (12).



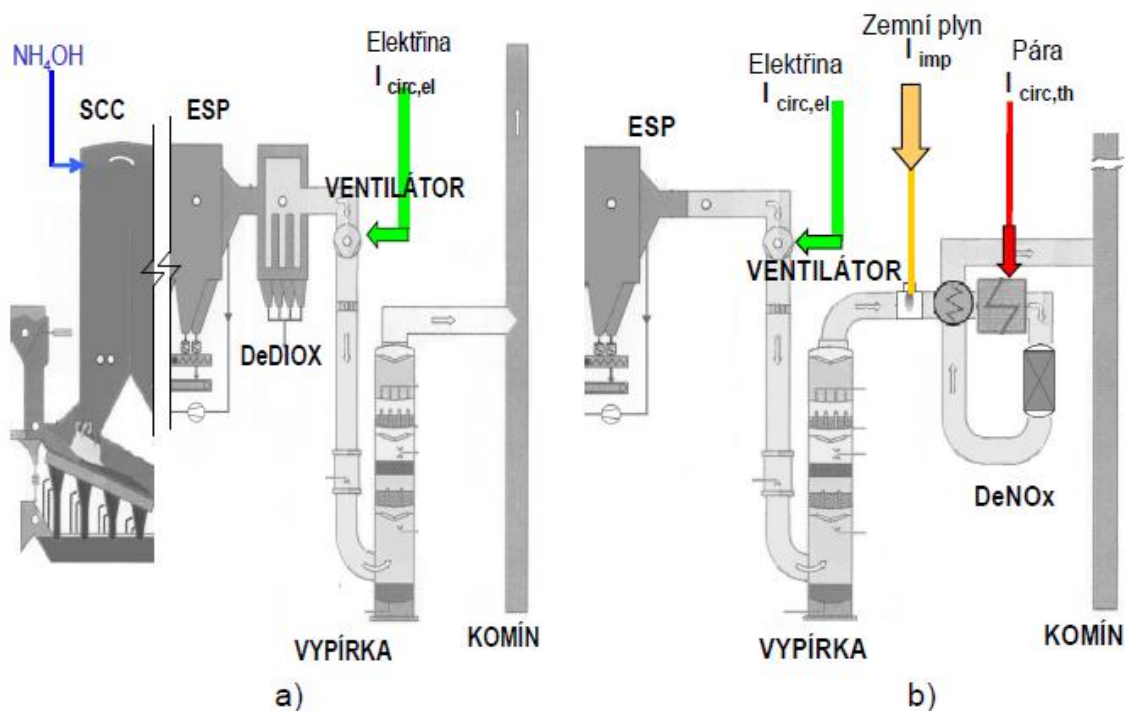
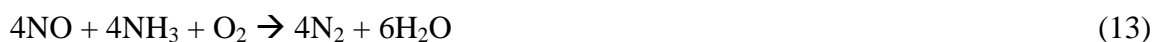
Zreagované absorpční látky jsou zachyceny pomocí technologií pro odstraňování tuhých znečišťujících látek, např. použitím látkových filtrů. Velikost produktů absorpce je dostatečná pro téměř 100% odloučení běžnými metodami odstraňování TZL [25].

2.4.6 Selektivní nekatalytická redukce

Pro aktivaci reakce rozkladu NO_x na N₂ a H₂O metoda SNCR (Selective Non-Catalytic Reduction) nevyžaduje katalyzátor, ale je provozována při vyšších teplotách oproti katalytické redukci. Amoniak nebo močovina (nebo jiné činidlo na bázi NH₃-X) se aplikuje do spalin obvykle při teplotě 850 - 950°C [26]. Účinnost pohybující se mezi 40-60%, lze ji zvýšit zajištěním zvýšení kontaktu spalin a činidla, čehož se dosahuje úpravou vstřikování činidla nebo větší turbulencí spalin. Proces vyžaduje přesné ovládání teploty k dosažení snížení emisí NO_x. Pokud je teplota příliš vysoká, amoniak oxiduje na NO a v případě, že je teplota příliš nízká, nereaguje amoniak vůbec a je emitován v komínových spalinách společně s oxidy dusíku jako tzv. čpavkový skluz. Vstřikování probíhá v poměru jednoho až dvou molů amoniaku na jeden mol NO_x.

2.4.7 Selektivní katalytická redukce NO_x

Metoda SCR (Selective Catalytic Reduction) rozkládá NO_x na N₂ a H₂O reakcí s amoniakem, močovinou nebo jiným činidlem na bázi NH₃-X. Optimální teploty pro reakci s amoniakem jsou v rozmezí 220 - 270°C a 400 - 450°C s použitím močoviny [26]. Reakce se oproti vysokoteplotní reakci SNCR usnadňuje použitím katalyzátoru, kterým může být např. titan, wolfram nebo vanad. Nevýhodou jsou velké investiční náklady. Účinnost této metody přesahuje 90%. Reakce při použití čpavku probíhá dle stechiometrické rovnice (13) a podle rovnice (14). Ve spalinách za kotlem je obsažen převážně NO, proto při čištění převažuje reakce (13). Tyto rovnice platí pro metody SCR i SNCR, které jsou znázorněny na Obr. 10.



Obr. 10 Blok čištění spalin s použitím a) SNCR b) SCR [16]

2.5 Kritéria hodnocení energetické účinnosti odpadů

Produkce energie je ovlivňována změnami teplot za kotlem a tlakovými ztrátami při čištění spalin. Kritéria posuzující atributy energetického využití jsou vztahy R1 faktor (Energy efficiency, energetická účinnost) a pes (Specific Primary Energy Savings, měrné úspory primární energie). Používají se při analýze využití energetického potenciálu paliva při produkci tepelné a elektrické energie.

R1 faktor (9) udává energetickou účinnost stanovující spalovna legislativní klasifikaci „Použití hlavně jako palivo nebo jiným způsobem k využití energie“ [29]. Využívá se pouze u MSW, v případě spalování IHW se již dle legislativy nejedná o energetické využití. Minimální hodnota η_e pro klasifikaci jednotky jako zařízení pro využití energie je 0,65.

Kritérium pes (10) udává měrné úspory primární energie dle 2004/8/EC vztažené vůči celkovému energetickému vstupu do procesu a zobrazuje kolik je uspořeno primární energie [31]. Kladná hodnota udává úspory primární energie, záporná hodnota znamená spotřebu energie na úkor jiných zdrojů. Hodnota 0,6 je minimum pro označení jako „vysoce účinné využití energie“.

Energetické proudy použité ve vztazích (15) a (16) jsou vyznačeny na Obr. 11

$$\eta_e = \frac{Q_{prod} - (E_f + I_{imp})}{0,97 \cdot E_w + E_f}, [-], \quad (15)$$

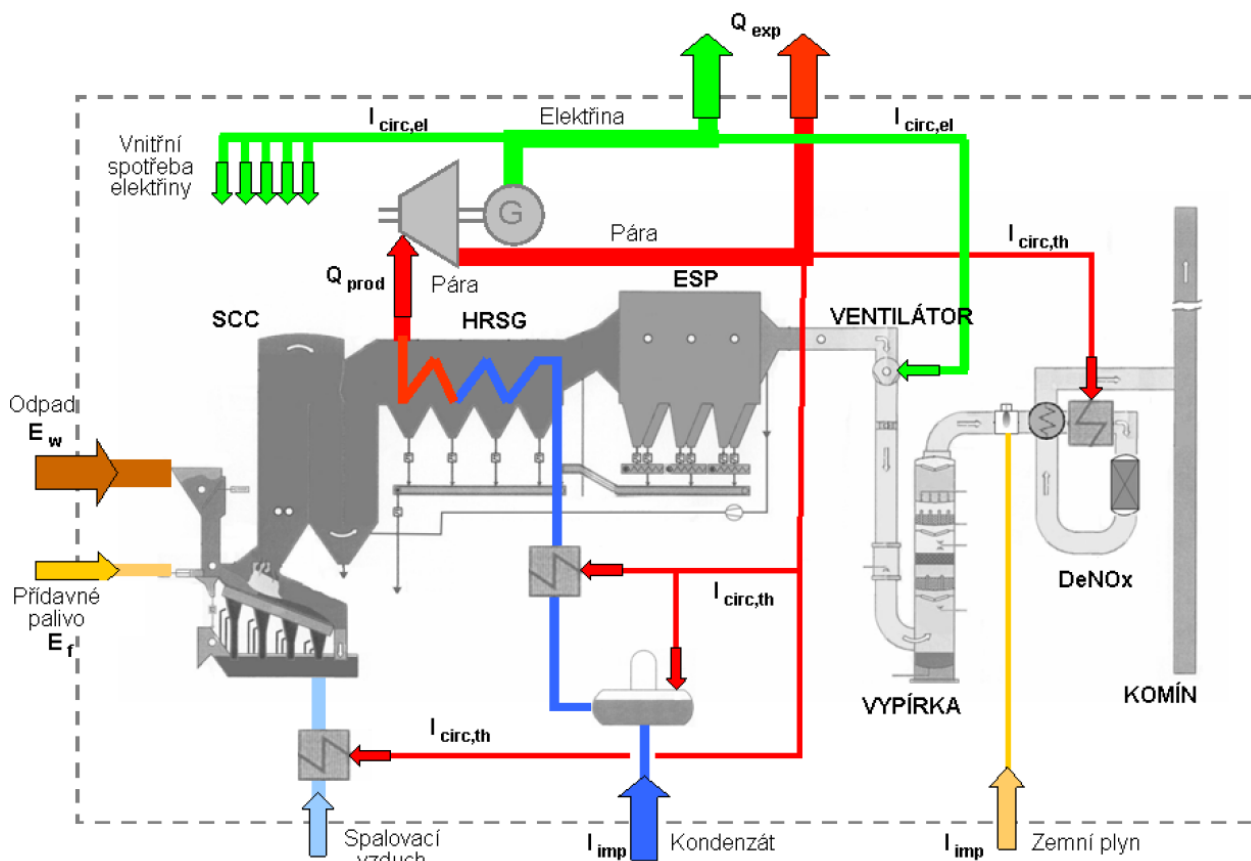
$$pes = \frac{(Q_{exp}) - (E_f + I_{imp})}{(E_w + E_f + E_{imp})}, [-], \quad (16)$$

kde Q_{prod} - produkovaná elektrická nebo tepelná energie [kWh/t],
 Q_{exp} - exportovaná elektrická nebo tepelná energie [kWh/t],
 E_f - importovaná energie (např. přídatným palivem) [kWh/t],
 E_w - energie dodaná spalováním odpadu [kWh/t],
 I_{imp} - importovaná energie pro potřebu čištění spalin [kWh/t].

R1 faktor a kritérium pes lze použít pro analýzu elektrické i tepelné energie včetně kogenerace. Rozdíly mezi účinnostmi výroby energií se zohledňují konverzními faktory (17) a (18), kterými se porovnává produkce a spotřeba různých forem energie na základě produkce v referenčních jednotkách.

$$\text{Konverzní faktor pro produkci elektřiny} - \eta_{el}^{Ref} = 2,6 = 38\% \quad (17)$$

$$\text{Konverzní faktor pro produkci tepla} - \eta_{th}^{Ref} = 1,1 = 91\% \quad (18)$$



Obr. 11 Popis hlavních energetických proudů pro vyhodnocení energetické účinnosti spaloven odpadu [36]

3 Výpočtové modely spalování odpadu

Pro výpočet byly vytvořeny simulační modely typické technologie spalování nebezpečného a komunálního odpadu. Byl použit software W2E [38], který je vhodný pro hodnocení využití energie, energetické náročnosti procesu a určení účinnosti výroby energie z termického zpracování odpadů.

Model představuje simulaci dvoustupňového spalování v termickém bloku a následné využití uvolněného tepla pomocí energetických a materiálových bilancí a v různých technologických uzlech. Uspořádání těchto částí technologie bylo popsáno v předchozích kapitolách. Uspořádání a nastavení modelů spaloven MSW a IHW jsou blíže představeny níže.

Spotřeba spalovacího vzduchu a produkce spalin se určí dle stechiometrických indexů spalovacích rovnic (19 – 25), produkce tepla ze spalování byla určena na základě výhřevnosti paliva (viz kap.2.1). Děje na trase spalin (směšování spalin a vzduchu, výměna tepla v HRSG, tepelné ztráty) byly modelovány na základě hmotnostních a energetických bilancí. Výpočet spalování, výpočet produkce elektřiny na turbíně i nástroje pro modelování dějů na trase spalin jsou součástí software W2E, ve kterém byly vytvořeny simulační modely spalování MSW a IHW znázorněné v příloze 1 a 2.

Tuhé palivo

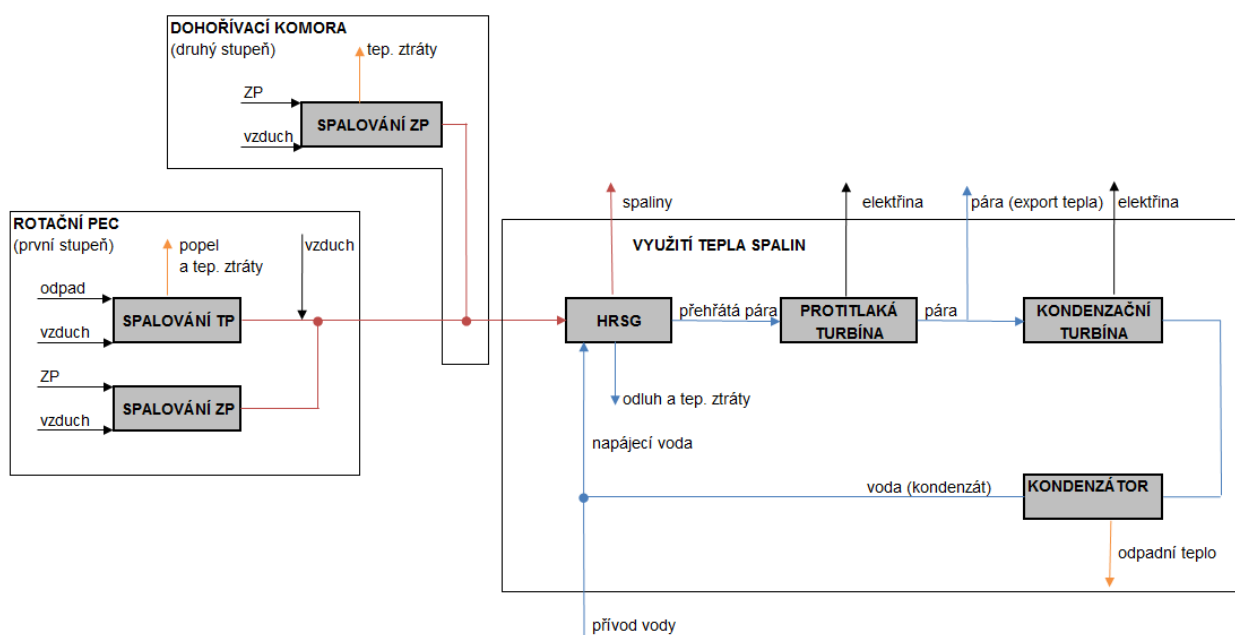


Zemní plyn – především spalování metanu



3.1 Nastavení parametrů simulačního modelu pro spalování IHW

V simulačním modelu spalování nebezpečného odpadu (schéma viz Obr. 12) byla posuzována tvorba spalin, spotřeba odpadu a přídavného paliva, kterým byl zvolen zemní plyn. Následně bylo sledováno množství získané tepelné a elektrické energie, získané z produkovaných spalin.



Obr. 12 Zjednodušené schéma simulačního modelu IHW

Proběhla simulace tří provozních režimů, ve kterých se měnila zpracovatelská kapacita spalovaného odpadu. Pro všechny tři režimy se měnily hodnoty teploty spalin v RP, které se v simulačním modelu postupně zvyšovaly ze 700 °C na 1150 °C pomocí nastavení odpovídajícího vstupu chladicího nadstechiometrického vzduchu. Teplota spalin za DK byla udržována na 1105 °C (Tab. 5) pomocí spalování přídavného paliva, tedy těsně nad legislativou stanovenou hodnotou 1100 °C (Tab. 2). Uvažují se také tepelné ztráty a přísávání vzduchu podtlakem na spalinové cestě a související nárůst koncentrace O₂ v suchých spalinách v různých částech technologie.

Model slouží nejen pro určení produkce energie a spotřeby přídavného paliva ale i pro určení parametrů spalin vstupujících do systému čištění spalin (odpovídá parametrům spalin na výstupu z HRSG). Údaje tedy slouží i jako vstupní hodnoty pro analýzu systému čištění spalin.

Vstupní hodnoty nastavené v modelu jsou předvedeny v Tab. 6, jejich volba je popsána níže.

Režim spalování	Množství spalovaného odpadu [kg/hod]	Množství spalovaného odpadu [kt/rok]	Teplota za RP [°C]	Teplota za DK [°C]
1	2000	15	700-1150	1105
2	666	5	700-1150	1105
3	200	1,5	700-1150	1105

Tab. 5 Režimy měření spalování odpadu

Rotační pec		
Odpad	Fond provozní doby	7500 hod/rok
	LHV	17021 kJ/kg
Zemní plyn	Průtok	10 m ³ /hod
	LHV	36178,2 kJ/kg
	Průtok vzduchu pro ZP	101,3 m ³ /hod
	Přebytek vzduchu	1,05 [-]
Vzduch pro odpad (stech + nadstech)	Teplota	10 °C
	Průtok	mění se dle zadání
Rotační pec	Teplota popele	600 °C
	Tepelné ztráty	2 %
	Nedopal	2 %
Dohořivací komora		
Zemní plyn	Průtok	mění se dle zadání m ³ /hod
	LHV	36178,2 kJ/kg
	Přebytek vzduchu	1,05 [-]
Vzduch pro ZP	Teplota	10 °C
	Průtok	mění se dle zadání m ³ /hod
Dohořivací komora	Tepelné ztráty	3 %
	Přísávání vzduchu	1,5 %
	Výstupní spaliny	1105 °C
HRSG		
Napájecí voda	Teplota	35 °C
	Tlak	5100 kPa
	Průtok	mění se dle zadání m ³ /hod
Přehřátá pára	Teplota	400 °C
	Tlak	4000 kPa
Spaliny za HRSG	Teplota	250 °C
	Průtok	mění se dle zadání m ³ /hod
HRSG	Odluh	2 %
	Koef. tep. ztrát	3 %
	Přísávání vzduchu	1,5 %
Protitlaká turbína		
Pára na vstupu	Teplota	400 °C
	Tlak	4000 kPa
Pára na výstupu	Tlak	1000 kPa
Turbína	Izoentropická účinnost	70 %
	Výkon	mění se dle zadání kW
Kondenzační turbína		
Pára na vstupu	Tlak	1000 kPa
Pára na výstupu	Tlak	20 kPa
Turbína	Izoentropická účinnost	70 %

Tab. 6 Vstupní hodnoty nastavené v simulačním modelu ve W2E

Hodnota výhřevnosti odpadu se mění podle složení odpadu, v modelu bylo uvažováno 17MJ/kg což odpovídá průměrné výhřevnosti IHW v ČR v letech 1994 až 2009. Bylo zvoleno složení uvedené v Tab. 7, které odpovídá této výhřevnosti. Různá složení paliva o stejné výhřevnosti neovlivní výsledky analýzy energetické účinnosti, jak bylo předvedeno v práci [25]. Výhřevnost zemního plynu byla nastavena na 36,1 MJ/kg [24], což odpovídá hodnotě jihomoravského zemního plynu.

Prvek	Složení hořlaviny [% hm.]	Složení paliva [% hm.]
C	71	41,18
H	8,3	4,81
N	0,7	0,4
O	19,75	11,45
S	0,25	0,14
Složení odpadu		
Hořlavina	100	58
Voda	-	20
Popeloviny	-	22

Tab. 7 Zvolené složení nebezpečného odpadu

3.1.1 Nastavení prvního stupně spalování

Výsledky výpočtu nejvíce ovlivňuje množství spalovaného odpadu vstupujícího do rotační pece a jeho výhřevnost. Uvažovanými hodnotami použitými při výpočtu se zabývá kapitola výše.

V modelu nebyl uvažován přehřev vzduchu do rotační pece, proto byla teplota primárního spalovacího vzduchu nastavena na 10°C. Vzduch zajišťuje dodávku potřebného množství kyslíku pro spalování hořlaviny a jeho nadstechiometrické množství snižuje teplotu v peci, aby nedocházelo k poškození stěn rotační pece. Ze zkoumaných teplot 700-1150°C vyplývá, že bude docházet k tavnému (více než 1000°C) i sypanému režimu (méně než 900°C). V modelu ve W2E je v rotační peci nadstechiometrické množství zavedeno do proudu spalin tak, aby byla snížena teplota spalin na požadovanou hodnotu. Složení vzduchu uvažované při výpočtu uvádí Tab. 8.

Teplota popela se v provozu neměří a v modelu byla pro tepelnou bilanci uvažována 600°C. Nedopal hořlaviny byl nastaven na 2 % (odpovídá legislativní podmínce z Tab. 2) a tepelné ztráty rotační pece na 2 %.

Proud spalin z hořáku na zemní plyn (zadané hodnoty v Tab. 6), sloužící jako přídavné palivo je v modelu sloučen ve směšovači s proudem spalin ze spalování odpadu do jednoho proudu a pokračuje dále do druhého stupně spalování – dohořivací komory. Průtok zemního plynu je nastaven na 10m_N³, což je provozní stav, který představuje minimální (pohotovostní) provoz hořáku.

Prvek	[% obj.]
N ₂	77,08
O ₂	20,85
CO ₂	0,04
Ar	0,93
H ₂ O	1,1

Tab. 8 Složení vzduchu použité při výpočtu

3.1.2 Nastavení druhého stupně spalování

V dohořivací komoře je spalováno přídavné palivo ve formě zemního plynu pro zajištění legislativou požadovaných teplot spalin nad hodnotu 1100°C (Tab. 2). Průtok zemního plynu a s ním související vstupující tepelný tok se měnil v závislosti na teplotě spalin vystupujících z rotační pece. Množství vzduchu vstupujícího do sekundární komory z důvodu přísunu kyslíku potřebného pro spalování přídavného paliva se v modelu dopočítalo podle průtoku zemního plynu. Přebytek vzduchu byl nastaven na hodnotu 1,05, tzn. 5 % nadstechiometrického vzduchu.

Tepelné ztráty dohořivací komory radiací do okolí byly uvažovány 3 % ze vstupního toku spalin.

3.1.3 Nastavení systému využití tepla

Proud spalin z druhého stupně spalování vstupuje do kotle pro využití odpadního tepla (HRSG), který produkuje páru o tlaku 4 MPa a teplotě 400°C. Napájecí voda je čerpadlem, jehož příkon se mění s množstvím napájecí vody do HRSG, přiváděna pod tlakem 5,1 MP a teplotě 35°C (pod výstupní teplotou vody z kondenzátoru). Průtok vody se mění v závislosti na množství spalin vstupujících do HRSG, respektive dle výkonu kotle. Teplota spalin vystupujících z HRSG byla nastavena na 250°C. V modelu je uvažováno přisávání vzduchu podtlakem na spalinové cestě a předpokládá se nárůst koncentrace O₂ v suchých spalinách o 1,5 % obj. v dohořivací komoře a 1,5 % obj. v HRSG.

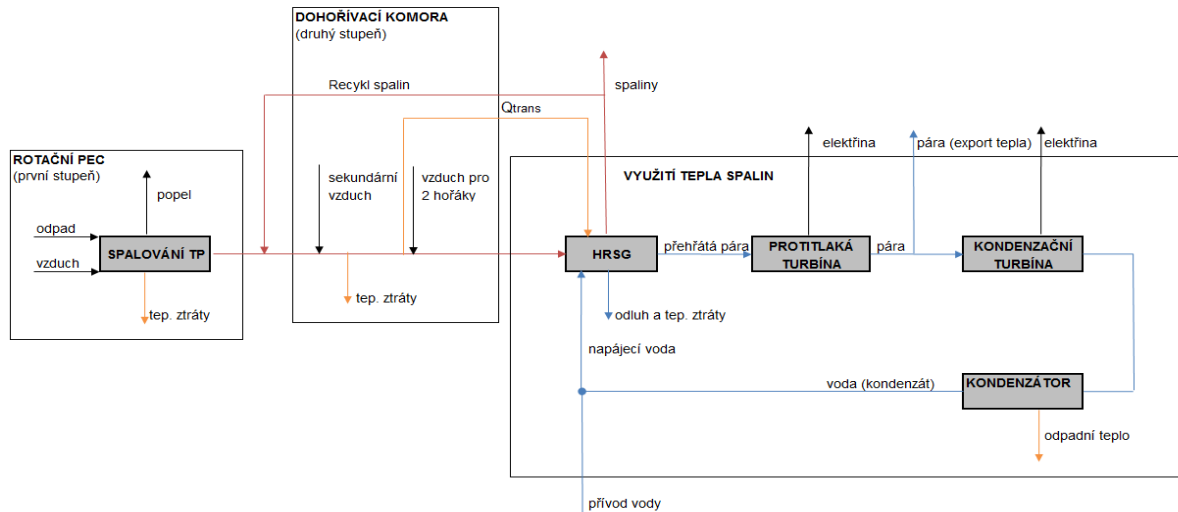
Produkováná přehřátá pára vstupuje do protitlaké turbíny o izoentropické účinnosti 70% a elektromechanické účinnosti 98 % [37]. Elektrický výkon turbíny se odvíjí od velikosti průtoku vstupující přehřáté páry, která má výstupní tlak uvažovaný 1MPa.

Pára vycházející v modelu z protitlaké turbíny je rozdělovačem rovnoměrně rozdělena na dva stejné proudy. První proud symbolizuje export tepla ze zařízení, druhý proud vstupuje do kondenzační turbíny. Pára na výstupu kondenzační turbíny byla nastavena na tlak 10 kPa a postupuje dále do kondenzátoru, kde kondenzuje na vodu o teplotě 40°C. Uspořádání turbín je možné více způsoby, v této práci bylo zvoleno uspořádání pro kogenerační výrobu tepla, která mívá vyšší hodnocení z hlediska využití energie paliva.

Za kondenzátorem je do proudu zkondenzované vody v modelu umístěný přívod napájecí vody o shodném průtoku s množstvím exportované páry, aby bylo zachováno konstantní množství vody obíhající v modelu. Smíšený proud je pak čerpadlem přiváděn zpět do HRSG.

3.2 Nastavení parametrů simulačního modelu pro MSW

V simulačním modelu spalování komunálního odpadu (schéma Obr. 13) byla posuzována tvorba spalin a spotřeba odpadu. Následně bylo sledováno množství získané tepelné a elektrické energie získané z tepla produkovaných spalin.



Obr. 13 Zjednodušené schéma simulačního modelu MSW

Proběhla simulace spalování komunálního odpadu v provozním režimu při 11,4 t/h. Model slouží pro určení produkce energie a parametrů spalin v systému čištění spalin. Návrh systémů čištění vychází z parametrů spalin na výstupu z HRSG. Údaje dále slouží pro analýzu několika uspořádání systému čištění spalin, vlivu čištění spalin na výrobu energie a možného exportu tepla celé jednotky.

Vstupní hodnoty simulačního modelu jsou v Tab. 9.

Rotační pec		
Odpad	FPD	7500 hod/rok
	LHV	10184 kJ/kg
Vzduch (stech + nadstech)	Teplota	10 °C
Roštová pec	Teplota popele	800 °C
	Tepelné ztráty	2 %
	Entalpie odpadu	zanedbána GJ/t
	Měrné teplo popelu c_p	0,9 kJ/kg*K
	Nedopal	2 %
Dohořivací komora		
Dohořivací komora	Tepelné ztráty	3 %
	Přísávání vzduchu	1,5 %
	Výstupní spaliny	930 °C
Sekundární vzduch	Teplota	10 °C
Vzduch pro 2 hořáky	Teplota	10 °C
	Průtok	4000 m ³ /hod
HRSG		
Napájecí voda	Teplota	40 °C
	Tlak	5100 kPa
Přehřátá pára	Teplota	400 °C
	Tlak	4000 kPa
Spaliny za HRSG	Teplota	250 °C
HRSG	Odluh	2 %
	Koef. Tep. Ztrát	6 %
	Přísávání vzduchu	1,5 %
Protitlaká turbína		
Pára na vstupu	Teplota	400 °C
	Tlak	4000 kPa
Pára na výstupu	Tlak	1000 kPa
Turbína	Izoentropická účinnost	70 %
Kondenzační turbína		
Pára na vstupu	Tlak	1000 kPa
Pára na výstupu	Tlak	20 kPa
Turbína	Izoentropická účinnost	55 %
Export tepla		
Pára na výstupu	Průtok	50% kg/hod
Recykl spalin		
Recykl spalin	Průtok	16% m ³ /hod

Tab. 9 Vstupní hodnoty nastavené v simulačním modelu ve W2E

Hodnota výhřevnosti odpadu byla v modelu uvažována 10,18MJ/kg což odpovídá složení, uvedenému v Tab. 10.

Prvek	Složení hořlaviny [% hm.]	Složení paliva [% hm.]
C	59,95	28,1
H	6,5	3,05
N	0,8	0,37
O	32,5	15,27
S	0,25	0,11
Složení odpadu		
Hořlavina	100	47
Voda	-	23
Popeloviny	-	30

Tab. 10 Složení komunálního odpadu

V simulačním modelu spalování MSW se oproti modelu IHW uvedeném v předchozí kapitole 3.1 vyskytuje několik odlišností. Hodnoty byly nastaveny dle údajů z provozního deníku ze spalovny Termizo a.s., Liberec 2004 až 2007 a dle údajů z výročních zpráv českých zařízení EVO [19]. V modelu MSW se nevyskytuje spalování přídavného paliva. Používá se pouze v ojedinělých případech, v malém množství (např. při spouštění kotle), proto nebylo v modelu uvažováno. Přiváděný vzduch v množství 4000 mN3 pro dva hořáky v dohořivací komoře je též odlišnost od předchozího modelu. Spaliny produkované za HRSG jsou recyklem přiváděny zpět do termické části, zbytek je odváděn na systém čištění spalin.

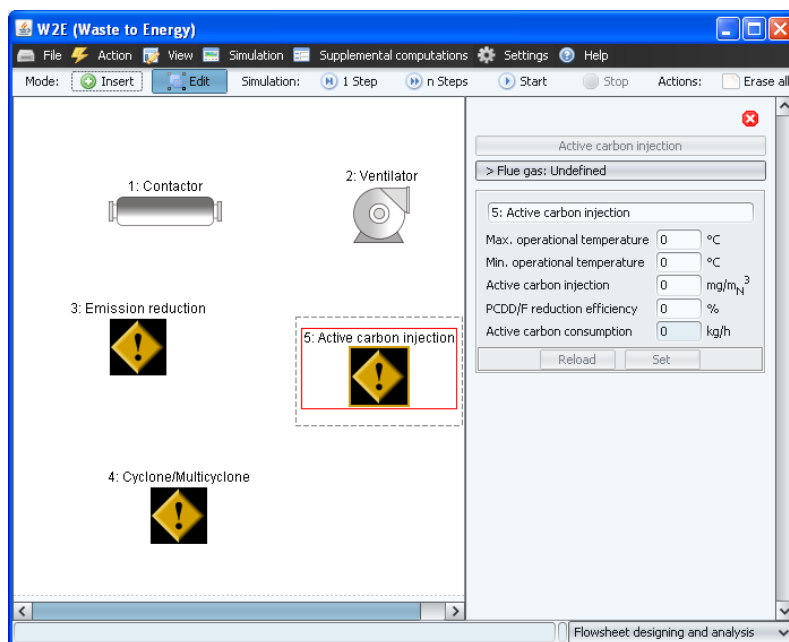
Roční provoz spalovny je uvažován 7500 hodin z důvodu porovnávání výsledných hodnot se spalovnou IHW. V reálném provozu pracují spalovny komunálního odpadu 8000 hod/rok a více.

Systém využití spalin byl uvažován shodný s předchozím modelem spalovny IHW.

3.3 Simulační softwarový systém W2E

Spalování odpadů v současných zařízeních v sobě spojuje řadu energetických, chemických a termodynamických dějů. Pro simulaci procesu jsou využitelné softwary např. ChemCad, Aspen plus, ty jsou ale vhodné pouze pro energeticky nebo chemicky založené modely.

Proto byl na školitelském pracovišti autora ve spolupráci s Fakultou informačních technologií VUT v Brně vyvinut specializovaný software W2E (Waste-to-Energy). Spojuje v sobě nástroje pro modelování toku energie a výpočet některých chemických reakcí. Byl vytvořen na platformě Java. Princip tvorby modelu je založen na tvorbě technologického schématu. Při tom se užívá různých výpočtových bloků a specializovaných aplikací, které jsou propojeny vstupními a výstupními proudy a umožňují tak simulaci komplexních technologických zařízení. V současné době se připravují nové bloky pro čištění spalin (Obr. 14).



Obr. 14 Připravované nové bloky v systému W2E představující metody čištění spalin

4 Odhad energetické náročnosti jednotky dle použitého řešení systému čištění spalin

Tato kapitola se zabývá systémem čištění spalin a jeho energetické náročnosti. Byly navrženy čtyři uspořádání různých metod pro čištění hlavních skupin polutantů a následně posouzeny hodnoty snížení emisí, spotřeba činidel a sorbentů a produkce odpadních materiálů. Pro sledované varianty byly dále odhadnuty jejich energetické nároky. Dále je uveden ilustrační odhad nákladů souvisejících s provozem systému čištění spalin. Nástroje pro modelování systému čištění spalin v softwaru W2E jsou v současnosti teprve vytvářeny, proto byl výpočet proveden pomocí MS Excel. Výpočty provedené v rámci této práce v softwaru MS Excel byly využity pro testování a kontrolu vytvářených nových bloků, které představují metody pro snižování škodlivin popsané v kap. 2.4. Autor práce také spolupracoval při vytváření podkladů nových součástí software W2E.

4.1 Posuzovaná uspořádání systému čištění spalin

První uspořádání bylo inspirováno mírně pozměněnou technologií používanou ve spalovně Termizo a.s, Liberec. Uspořádání technologií s tlakovou ztrátou jednotlivých zařízení a jejich využitím pro jednotlivé škodliviny je zobrazeno v Tab. 11. Nejprve dojde k redukci oxidů dusíku pomocí nekatalytické redukce. Redukce PCDD/F probíhá pomocí adsorpce aktivního uhlí. Následně se odlučuje aktivní uhlí a popílek obsažený ve spalinách elektrostatickým odlučovačem a na závěr procesu je umístěna mokrý pračka.

Technologie	Δp [kPa]	Výstupní teplota [°C]	Odlučovaná škodlivina
SNCR	2,5	900	NO _x
Aktivní uhlí	0,5	220	PCDD/F
ESP	1	200	TZL, produkty absorpce
Mokrý vypírka	2,5	60	HCl, HF, SO _x , částečně NO _x
Výměník	1	110	-
Ventilátor	7,5	110	-

Tab. 11 Technologie čištění spalin – uspořádání 1

Technologie druhého uspořádání je zobrazena v Tab. 12. Nejprve dochází k suché vypírce kyselých složek nástřikem NaHCO₃, která nahrazuje mokré praní z uspořádání 1. Následuje redukce PCDD/F adsorpce aktivním uhlím a odlučování popílku a aktivního uhlí elektrostatickým odlučovačem. Na konci dochází k odstraňování složek NO_x a ventilátor, který vhání spaliny do komína.

Technologie	Δp [kPa]	Výstupní teplota [°C]	Odlučovaná škodlivina
Suchá - NaHCO ₃	0,5	230	HCl, HF, SO _x
Aktivní uhlí	0,5	210	PCDD/F
Kontaktor	0,5	210	-
ESP	1	190	TZL, produkty absorpce
SCR DeNO _x	2,5	170	NO _x
Ventilátor	5	170	-

Tab. 12 Technologie čištění spalin – uspořádání 2

Ve třetím uspořádání (Tab. 13) je za nekatalytickou redukcí oxidů dusíku umístěna suchá adsorpce NaHCO₃ za účelem čištění kyselých složek. Následuje odstraňování popílku elektrostatickým odlučovačem a na závěr je odlučování dioxinů pomocí katalytického reaktoru.

Technologie	Δp [kPa]	Výstupní teplota [°C]	Odlučovaná škodlivina
SNCR	2,5	900	NO _x
Suchá - NaHCO ₃	0,5	220	HCl, HF, SO _x
ESP	1	200	TZL, produkty absorpce
SCR DeDiox	2,5	180	PCDD/F
Ventilátor	6,5	180	-

Tab. 13 Technologie čištění spalin – uspořádání 3

Ve čtvrtém navrženém technologickém uspořádání (Tab. 14) dojde nejprve k odloučení NO_x katalytickou redukcí. PCDD/F je redukováno adsorpcí aktivního uhlí a následně vylučováno

s popílkem v elektrostatickém odlučovači. Kyselé složky jsou odlučovány mokrou vypírkou s výměníkem na využití zbytkového tepla a následným ventilátorem.

Technologie	Δp [kPa]	Výstupní teplota [°C]	Odlučovaná škodlivina
SCR DeNO _x	2,5	230	NO _x
Aktivní uhlí	0,5	210	PCDD/F
ESP	1	190	TZL, produkty absorpce
Mokrá vypírka	2,5	60	HCl, HF, SO _x , částečně NO _x
Výměník	1	110	-
Ventilátor	6,5	110	-

Tab. 14 Uspořádání technologie čištění spalin – uspořádání 4

4.2 Snížení emisí u jednotlivých metod čištění spalin

U jednotlivých metod uspořádání technologií čištění spalin bylo nutné ověřit, zda splňují emisní limity. Množství odloučených škodlivin bylo zjištěno na základě zvolených účinností (Tab. 15) použitých technologií, jejichž hodnoty byly zvoleny podle dokumentu BREF pro zpracování odpadních vod a plynů [27], pro ověření dostatečné účinnosti byly uvažovány nižší hodnoty z uvedených rozmezí. Výjimkou je nekatalytická redukce SNCR, kdy byla použita vyšší hodnota účinnosti (60 % z rozmezí 40 až 60 %, viz kap. 2.4.6) pro ověření dostatečné účinnosti pro případné zpřísnění limitů. Pro všechna uspořádání se předpokládá dostatečná účinnost zachycení TZL rukávcovým, katalytickým nebo elektrostatickým filtrem [27]. Určit účinnost filtru je náročné z důvodu různé velikosti odlučovaných částic (frakční rozdělení TZL a frakční účinnosti dle charakteristického rozměru částic). Účinnost suché sorpce závisí na několika faktorech, např. dostatečném promíchání a rozemletí sorbentu se škodlivinami, uvedené hodnoty jsou běžné při spalování odpadu.

Množství škodlivin vstupujících do systému čištění spalin bylo zvoleno podle provozních zkušeností z českých spaloven odpadu. V analýze se monitorovaly látky dle průběžně sledovaných hodnot emisních limitů a pro dioxiny. Nesledovaly se emise CO, jelikož jejich produkce závisí na spalovacím procesu a snižuje se sekundárními opatřeními, dále TZL (viz výše), organické látky, těžké kovy a rtuť (snižovány současně s hlavními skupinami polutantů).

Technologie čištění	Účinnost [%]	Odstraňované nečistoty
SNCR	60	NO _x
SCR DeNO _x	90	NO _x
SCR DeDiox	99	PCDD/F
Mokrý pračka (NaOH)	98,5	HCl
	92	HF
	90	SO _x
	25	NO _x
Suchá sorpce (NaHCO ₃)	99	HCl
	94	HF
	87,5	SO _x
Aktivní uhlí	98	PCDD/F
Katalytická filtrace	25	NO _x
	98,5	PCDD/F

Tab. 15 Zvolené účinnosti jednotlivých technologií čištění spalin

Výsledky zobrazené v Tab. 16 prezentují dostatečnou účinnost u uspořádání č.1, 2 a 4. V uspořádání č.3 je patrné vysoké množství emisí NO_x na komíně nad 100 mg/m_N³, proto je toto uspořádání nevhodné pro případné zpřísnění emisních limitů. Podobného výsledku dosahuje i uspořádání 1, které také využívá SNCR. Ukazuje se, že nekatalytická redukce NO_x není dostatečná pro snížení emisí pod 100 mg/m_N³, což je limitní hodnota, která už nyní platí např. v Německu. U uspořádání č.2 je splnění limitů pro oxidy síry velice těsné, muselo by být použito opatření pro zvýšení účinnosti (jemnější mletí sorbentu, zaprášení filtru). Výsledky pro uspořádání č.1 a 4 vykazují nejlepší hodnoty pro snižování emisí.

Uspořádání 1					
Škodliviny	vstup	účinnost 1	účinnost 2	Výsledek	Limit
HCl	600	98,5	-	9	10
HF	10	92	-	0,8	1
SO _x	400	90	-	40	50
NO _x	300	60	25	90	200
PCDD/F	2,5	98	-	0,05	0,1
Uspořádání 2					
Škodliviny	vstup	účinnost 1	účinnost 2	Výsledek	Limit
HCl	600	99	-	6	10
HF	10	94	-	0,6	1
SO _x	400	87,5	-	50	50
NO _x	300	90	-	30	200
CDD/F	2,5	60	98	0,02	0,1
Uspořádání 3					
Škodliviny	vstup	účinnost 1	účinnost 2	Výsledek	Limit
HCl	600	99	-	6	10
HF	10	94	-	0,6	1
SO _x	400	87,5	-	50	50
NO _x	300	60	-	120	200
PCDD/F	2,5	99	-	0,025	0,1
Uspořádání 4					
Škodliviny	vstup	účinnost 1	účinnost 2	Výsledek	Limit
HCl	600	98,5	-	9	10
HF	10	92	-	0,8	1
SO _x	400	90	-	40	50
NO _x	300	90	25	22,5	200
PCDD/F	2,5	98	-	0,05	0,1

Tab. 16 Vypočtené hodnoty emisí na komíně a porovnání s průměrnými denními hodnotami emisních limitů

4.3 Náklady na provoz a spotřební materiál

Ceny nákladů na provoz (Tab. 17) byly voleny dle informací z provozu a dle dizertační práce [39]. Čištění suchou a mokrou sorpcí bylo vyhodnoceno z hlediska provozních nákladů. Ve výpočtu suché sorpce bylo do nákladů uvažována pořizovací cena sorbentu NaHCO₃ a náklady na zpracování odprašků. Spotřeba a produkce materiálů byla odhadnuta dle stechiometrických rovnic (10-12).

Při výpočtu mokré vypírky byla do nákladů zařazena cena spotřebované vody, NaOH a ušlý zisk za elektřinu, který odpovídá vlivu mokré vypírky na náklady na provoz ventilátoru. Náklady na elektřinu při poklesu výkonu kvůli vyšší teplotě za kotlem při nástřiku vody z mokré vypírky do spalin nebyly uvažovány z důvodu nízké spotřeby vody, která má vliv na pokles výkonu při

kondenzaci. Tím by se výsledné náklady zvýšily o nepatrné množství. Spotřeba a produkce materiálů byla odhadnuta dle stechiometrických rovnic (7-9).

Material pro čištění	Ceník [kč/kg]
40% roztok NH ₃	10
aktivní uhlí	50
NaHCO ₃	8
voda (mokrý vypírka)	0,013
NaOH (mokrý vypírka)	60

Tab. 17 Náklady na provoz čištění spalin

Následující část porovnává náklady všech 4 metod technologie čištění spalin z kap. 4.1 na spotřebu sorbetů a činidel (Tab. 18) a produkci tuhých materiálů zachycených na filtru (Tab. 19). Aktivní uhlí a nezreagované sorbenty jsou tuhé znečišťující částice, které jsou odloučeny. Stechiometrická spotřeba amoniaku byla uvažována v poměru 1,1 mol NH₃/mol NO při katalytické redukci a 0,8 mol NH₃/mol NO při nekatalytické redukci. Dávkování aktivního uhlí bylo uvažováno v poměru 1 kg/t odpadu.

Režim 1				
spotřeba činidel a sorbentů	Uspořádání 1	Uspořádání 2	Uspořádání 3	Uspořádání 4
SNCR - NH ₃ [kč/h]	50,0	-	50,0	-
SCR - NH ₃ [kč/h]	-	68,8	68,8	68,8
Aktivní uhlí [kč/h]	100,0	100,0	-	100,0
Suchá - NaHCO ₃ [kč/h]	-	476,4	476,4	-
Mokrý vyp. - voda [kč/h]	30,5	-	-	30,5
Mokrý vyp. - NaOH[kč/h]	2730,5	-	-	2730,5
Režim 2				
spotřeba činidel a sorbentů	Uspořádání 1	Uspořádání 2	Uspořádání 3	Uspořádání 4
SNCR - NH ₃ [kč/h]	17,0	-	17,0	-
SCR - NH ₃ [kč/h]	-	23,4	23,4	23,4
Aktivní uhlí [kč/h]	33,3	33,3	-	33,3
Suchá - NaHCO ₃ [kč/h]	-	162,2	162,2	-
Mokrý vyp. - voda [kč/h]	10,4	-	-	10,4
Mokrý vyp. - NaOH[kč/h]	927,7	-	-	927,7
Režim 3				
spotřeba činidel a sorbentů	Uspořádání 1	Uspořádání 2	Uspořádání 3	Uspořádání 4
SNCR - NH ₃ [kč/h]	5,4	-	5,4	-
SCR - NH ₃ [kč/h]	-	7,5	7,5	7,5
Aktivní uhlí [kč/h]	10,0	10,0	-	10,0
Suchá - NaHCO ₃ [kč/h]	-	51,8	51,8	-
Mokrý vyp. - voda [kč/h]	3,3	-	-	3,3
Mokrý vyp. - NaOH[kč/h]	296,8	-	-	296,8
MSW				
spotřeba činidel a sorbentů	Uspořádání 1	Uspořádání 2	Uspořádání 3	Uspořádání 4
SNCR - NH ₃ [kč/h]	82,3	-	82,3	-
SCR - NH ₃ [kč/h]	-	95,0	95,0	95,0
Aktivní uhlí [kč/h]	570,0	570,0	-	570,0
Suchá - NaHCO ₃ [kč/h]	-	783,6	783,6	-
Mokrý vyp. - voda [kč/h]	50,2	-	-	50,2
Mokrý vyp. - NaOH[kč/h]	4491,4	-	-	4491,4

Tab. 18 Náklady na spotřebu činidel a sorbetů za hodinu provozu při jednotlivých metodách

Režim 1				
solí, sorbenty a adsorbenty zachycené na filtru	Uspořádání 1	Uspořádání 2	Uspořádání 3	Uspořádání 4
aktivní uhlí [kč/h]	100,0	100,0	-	100,0
NaCl [kč/h]	35,3	35,3	35,3	35,3
Na ₂ SO ₄ [kč/h]	32,6	32,6	32,6	32,6
nezreagovaný sorbent [kč/h]	-	43,3	43,3	-
celkem na filtru [kč/h]	167,9	211,2	111,2	167,9
Režim 2				
solí, sorbenty a adsorbenty zachycené na filtru	Uspořádání 1	Uspořádání 2	Uspořádání 3	Uspořádání 4
aktivní uhlí [kč/h]	33,3	33,3	-	33,3
NaCl [kč/h]	12,0	12,0	12,0	12,0
Na ₂ SO ₄ [kč/h]	11,1	11,1	11,1	11,1
nezreagovaný sorbent [kč/h]	-	14,7	14,7	-
celkem na filtru [kč/h]	56,4	71,1	37,8	56,4
Režim 3				
solí, sorbenty a adsorbenty zachycené na filtru	Uspořádání 1	Uspořádání 2	Uspořádání 3	Uspořádání 4
aktivní uhlí [kč/h]	10,0	10,0	-	10,0
NaCl [kč/h]	3,8	3,8	3,8	3,8
Na ₂ SO ₄ [kč/h]	3,5	3,5	3,5	3,5
nezreagovaný sorbent [kč/h]	-	4,7	4,7	-
celkem na filtru [kč/h]	17,4	22,1	12,1	17,4
MSW				
solí, sorbenty a adsorbenty zachycené na filtru	Uspořádání 1	Uspořádání 2	Uspořádání 3	Uspořádání 4
aktivní uhlí [kč/h]	570,0	570,0	-	570,0
NaCl [kč/h]	58,1	58,1	58,1	58,1
Na ₂ SO ₄ [kč/h]	53,6	53,6	53,6	53,6
nezreagovaný sorbent [kč/h]	-	71,2	71,2	-
celkem na filtru [kč/h]	681,7	752,9	182,9	681,7

Tab. 19 Náklady za zachycené tuhé nečistoty za hodinu provozu

4.4 Spotřeba energie ventilátoru při spalování odpadu

Ve spalovnách odpadu se používají zařízení, která spotřebovávají elektrickou energii. Při čištění spalin se spotřebovává energie především na spalínovém ventilátoru. Hodnota spotřeby ventilátoru závisí na tlakových ztrátách použitých aparátů a na teplotě spalin, která udává skutečný průtok na ventilátoru. Výpočet spotřeby energie byl proveden podle vzorce (11), účinnost byla uvažována 0,8. Výsledná spotřeba vztažena na tunu odpadu je znázorněna v Tab. 20.

$$P_{vent} = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{\eta_{vent} \cdot 3600} \quad (11)$$

kde P_{vent} příkon ventilátoru [kW],
 \dot{V} skutečný průtok spalin [m³/h],
 Δp rozdíl mezi výtlakem a sáním [-],
 η_{vent} účinnost ventilátoru [-].

	Odpad	IHW			MSW
Uspořádání 1	Režim	1	2	3	-
	Δp ventilátoru [kPa]	7.5	7.5	7.5	7.5
	průtok spalin [m _N ³ /h]	36719.2	12476.3	3991.2	50736.6
	teplota na ventilátoru [°C]	110	110	110	110
	průtok spalin [m ³ /h]	51506.36	17500.62	5598.493	71168.69
	Ventilátor [kW/t]	67	68	73	16
Uspořádání 2	Δp ventilátoru [kPa]	5	5	5	5
	průtok spalin [m _N ³ /h]	36719.2	12476.3	3991.2	50736.6
	teplota na ventilátoru [°C]	170	170	170	170
	průtok spalin [m ³ /h]	59572.08	20241.16	6475.198	82313.47
	Ventilátor [kW/t]	52	53	56	13
Uspořádání 3	Δp ventilátoru [kPa]	6.5	6.5	6.5	6.5
	průtok spalin [m _N ³ /h]	36719.2	12476.3	3991.2	50736.6
	teplota na ventilátoru [°C]	180	180	180	180
	průtok spalin [m ³ /h]	60916.37	20697.91	6621.315	84170.93
	Ventilátor [kW/t]	69	70	75	17
Uspořádání 4	Δp ventilátoru [kPa]	6.5	6.5	6.5	6.5
	průtok spalin [m _N ³ /h]	36719.2	12476.3	3991.2	50736.6
	teplota na ventilátoru [°C]	110	110	110	110
	průtok spalin [m ³ /h]	51506.36	17500.62	5598.493	71168.69
	Ventilátor [kW/t]	58	59	63	14

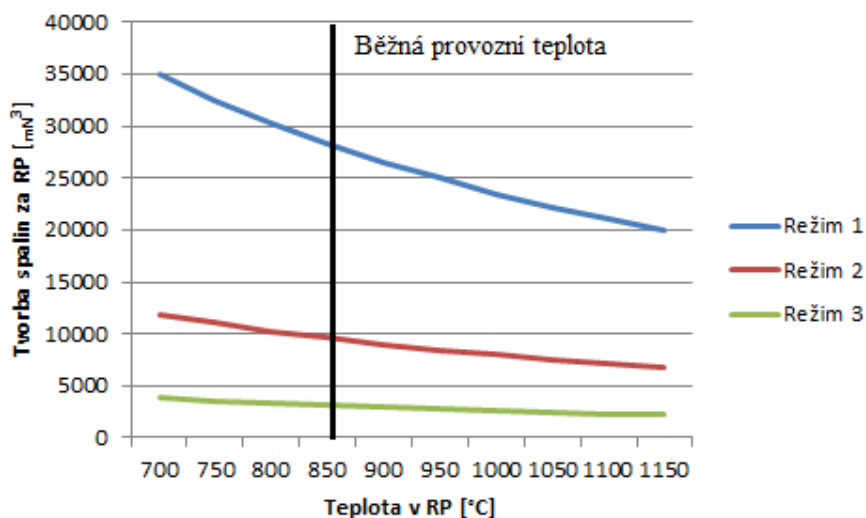
Tab. 20 Spotřeba energie ventilátoru vztažena na tunu odpadu

Další zařízení podílející se na spotřebě energie jsou např. čerpadlo mokré vypírky při čištění spalin, ventilátory vzduchu do rotační (roštové) pece, obslužná zařízení atd.

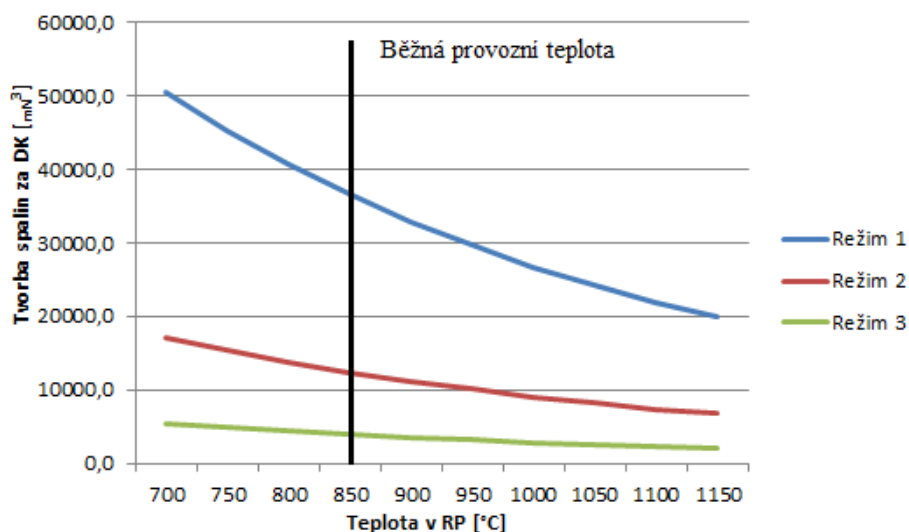
4.5 Posouzení výroby energie a spotřeby paliva z modelu spalovny IHW

U odpadu s vysokou výhřevností lze při dokonalém spalování přesahovat teploty stanovené legislativou (Tab. 2). Pro zachování výstupní teploty spalin z rotační pece je proto nutné přivádět dostatek nadstechiometrického vzduchu. Snižováním teploty v rotační peci dochází ke zvýšené tvorbě spalin na jejím výstupu. Na Graf 6 a Graf 7 je znázorněna závislost tvorby spalin za RP a DK

na teplotě v rotační peci. Grafy v této kapitole i v kapitole 4.6 zvýrazňují běžnou provozní teplotu 850°C a vychází ze zjištěných hodnot z modelu ve W2E. Jednotlivé provozní režimy spalování vychází z Tab. 5.

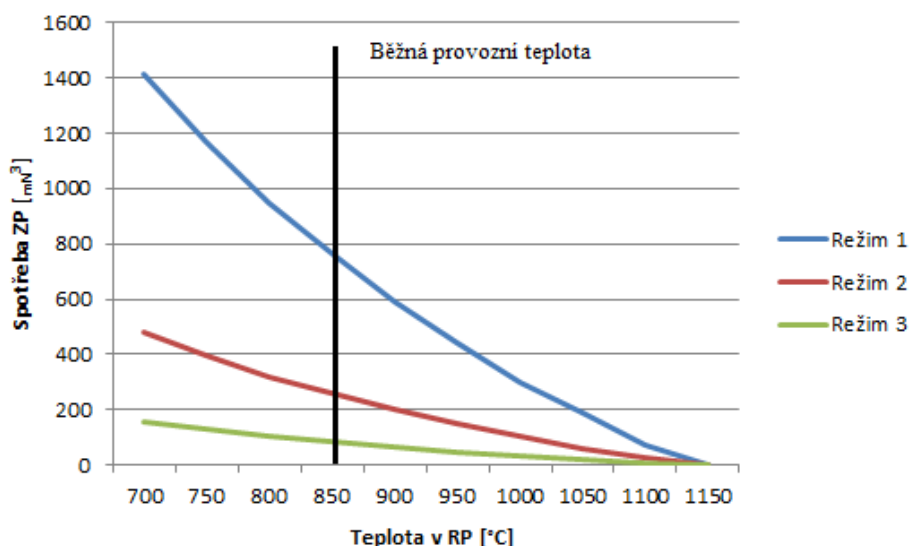


Graf 6: Tvorba spalin v závislosti na teplotě v RP



Graf 7 Tvorba spalin za DK v závislosti na teplotě v RP

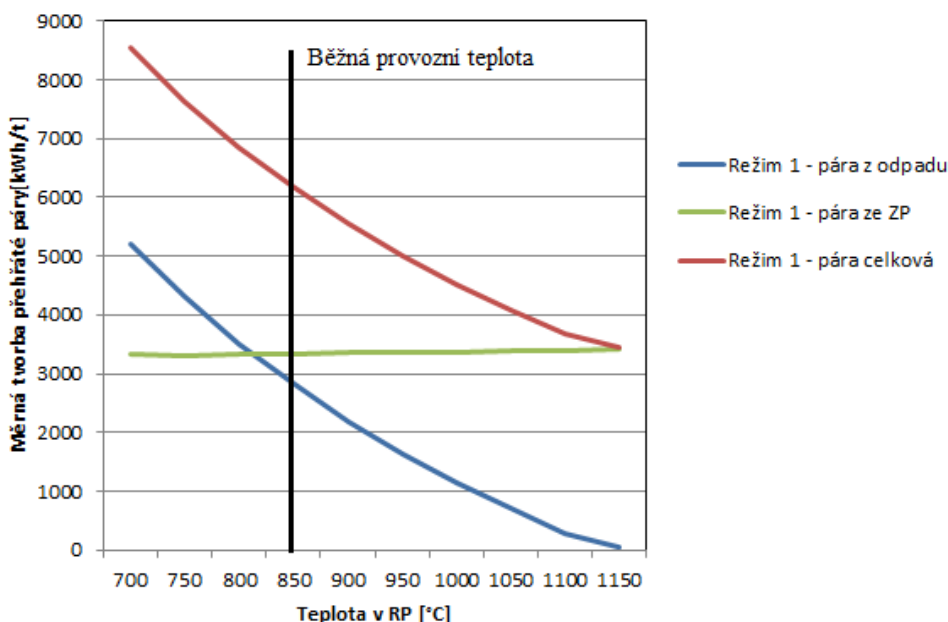
Při zvýšené tvorbě spalin vystupujících z rotační pece je nutná vyšší spotřeba přídavného paliva v dohořivací komoře pro udržení teplot na legislativních hodnotách. Zvýšená spotřeba ZP je znázorněna v Graf 8.



Graf 8: Závislost spotřeby ZP na teplotě v RP

Z grafů je viditelné, že např. v režimu 1 se množství produkovaných spalin při 700 a 1150 °C liší o 15000m_N³ za RP a téměř o 50000 m_N³ za DK. Při teplotě 850 °C je množství spalin 28330 m_N³ za RP a 36719 m_N³ za DK. Spotřeba ZP je v režimu 1 při 700 °C 1415 m_N³ a při 1150 °C je na minimální hodnotě. Při běžné provozní teplotě je 765 m_N³.

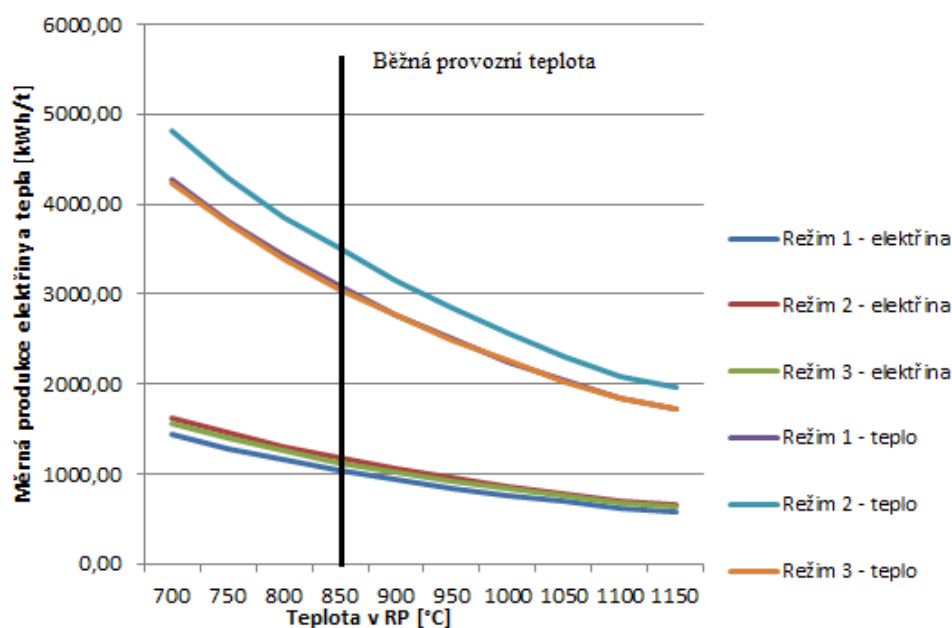
Produkce přehřáté páry je ovlivněna tvorbou spalin a spotřebou přídavného paliva. Výroba přehřáté páry odpovídá zvýšené spotřebě přídavného paliva. V běžném provozním režimu se výroba páry tepelným tokem ze spalování zemního plynu téměř vyrovná tepelnému toku ze spalování IHW. Závislost pro režim 1 je viditelná v Graf 9. Režimy 2 a 3 nebyly do grafu zahrnuty z důvodu lepší přehlednosti.



Graf 9 Závislost tvorby přehřáté páry na teplotách v RP

4.6 Měrná produkce tepla a elektřiny z produkované páry

Jak je vidět na Graf 9, produkce přehřáté páry se částečně odvíjí od vyšší spotřeby přídavného paliva. Využití přehřáté páry na měrnou produkci elektřiny a tepla je zobrazeno na Graf 10. Jak ovšem ukazuje Graf 9, velká část páry je generována nikoliv tepelným tokem z odpadu, ale energií ze spalování přídavného paliva, které by mohlo být využito v jiném procesu s vyšší účinností. Spoluspalování zemního plynu lze zdůvodnit primárním účelem spaloven IHW, kterým je bezpečná likvidace problematických materiálů.



Graf 10 Produkce elektřiny a tepla

4.7 Výsledné hodnoty bilančního modelu spaloven MSW a IHW

Pro určení množství vzniklých spalin pro produkci energie vstupujících dále do systému čištění spalin a posouzení celkové produkce tepelné a elektrické energie byl vytvořen model spalovny komunálního odpadu. Schéma modelu a vstupní hodnoty jsou zobrazeny výše v kapitole 3.2. Výsledné hodnoty pro porovnání modelů při provozním režimu spalovny IHW 850 °C jsou zobrazeny v Tab. 21. Uvedeny jsou výsledky pro tři sledované zpracovatelské kapacity. Hodnoty pro všechny zkoumané režimy IHW jsou zobrazeny v souboru příloženém na CD. Výsledné hodnoty spalovny MSW jsou uvedeny v Tab. 22.

Zpracovatelská kapacita	Vzduch (stech)	Vzduch (nadstech)	Celková produkce páry	Napájecí voda	Spaliny za HRSG = za DK	Turbína protitlaká
kt/r	mN3/h	mN3/h	kWh/t	kg/h	mN3/h	kW
15	9120,7	17850	6173	14967,8	36719,2	997,47
5	3051,8	6050	3285	5088,5	12476,3	339,10
1,5	916,4	1940	3348	1621,6	3991,2	108,07
Turbína kondenzační	Elektřina celkem	Export tepla				Čerpadlo napájecí vody
kW	kWh/t	kg/h	kJ/kg	GJ/h	kWh/t	[kW]
1083,34	1040,41	7486,8	2969,6	22,23	3088	27,47
368,29	1178,98	2545,2	2969,6	7,56	3499	9,31
117,39	1127,30	810,8	2696,6	2,19	3037	3,05

Tab. 21 Výsledné hodnoty produkovaných spalin a energie z modelu spalovny IHW při obvyklém provozním režimu 850 °C v rotační peci

Zpracovatelská kapacita	Vzduch (stech)	Sekundární vzduch (nadstech)	Celková produkce páry	Napájecí voda	Spaliny za HRSG = za DK	Turbína protitlaká
kt/r	mN3/h	mN3/h	kWh/t	kg/h	mN3/h	kW
85,5	31997	8250	2086	28833,4	60401,0	1921,48
Turbína kondenzační	Elektřina celkem	Export tepla				Čerpadlo napájecí vody
kW	kWh/t	kg/h	kJ/kg	GJ/h	kWh/t	[kW]
2087,69	351,68	14422,2	2969,6	42,83	1044	51,27

Tab. 22 Výsledné hodnoty produkovaných spalin a energie z modelu spalovny MSW

4.8 Vyhodnocení energetické účinnosti

Pro modely spaloven byly vyhodnoceny kritéria měrných úspor primární energie podle vztahů uvedených v kapitole 2.5. Energetický obsah v odpadu E_w byl vypočítán z výhřevnosti a množství zpracovaného odpadu. Energie přídavného paliva E_f byla u spalovny IHW zjištěna z výhřevnosti a průtoku zemního plynu v dohořovací komoře. U spalovny MSW byla hodnota odhadnuta na 15 kWh/t. Hodnota importované energie I_{imp} byla stanovena pro oba modely na 50 kWh/t. Produkce a export elektrické a tepelné energie Q_{prod} a Q_{exp} byl zjištěn pomocí měrné produkce tepla a elektřiny, viz. kap. 4.6. Z výsledných hodnot R1 faktoru a pes (Tab. 23) vyplývá, že ve všech režimech spalování nepřesáhne R1 faktor minimální hodnotu, proto jej lze kategorizovat pouze jako zařízení pro odstraňování odpadů s veškerými důsledky.

Hodnoty pes vyšly kladné pro všechny režimy, z toho vyplývá, že zařízení přispívá k úsporám primární energie.

Režim spalování	1	2	3	MSW
R1 [-]	0,27	0,35	0,24	0,72
pes [-]	0,21	0,29	0,19	0,61

Tab. 23 Výsledná kritéria pro hodnocení energetické účinnosti

5 Závěr

Energetické využití je nedílnou součástí hierarchie nakládání s odpady. Spalovny jsou podrobovány přísným legislativním podmínkám, nedochází proto ke znečišťování životního prostředí a patří k čistým zdrojům energie.

V úvodní části této práce jsou představeny legislativní požadavky a způsoby nakládání s odpady. Následují technologie používané ve spalovnách a popis termické části, systému využití tepla a systému využití spalin.

V softwaru W2E byly vytvořeny dva bilanční modely spalovny. První model představuje spalovnu nebezpečných odpadů a druhý spalovnu komunálního odpadu. Model spalovny nebezpečného odpadu byl posouzen ve třech režimech na produkci tepelné a elektrické energie v závislosti na teplotách v rotační peci. Model spalovny komunálního odpadu byl posouzen v jednom provozním režimu na produkci energie. Pro tyto modely byly navrženy čtyři možná uspořádání systému čištění spalin, posouzena jejich energetická a materiálová náročnost a vliv na energetickou účinnost celé spalovací jednotky. Simulační výpočet systému čištění spalin byl použit při vývoji nových součástí softwaru W2E.

Z výsledných hodnot vyplývá, že spalovny komunálního odpadu produkují více tepelné a elektrické energie a současně mají vyšší náklady na čištění spalin, než spalovny nebezpečného odpadu hlavně z důvodu vyšší kapacity spalovaného odpadu. V případě posouzení produkované energie vztahené na tunu odpadu je výkonnější spalovna nebezpečného odpadu, která produkuje 3000 – 3500 kWh/t tepelné energie a 1000 – 1200 kWh/t paliva elektrické energie oproti spalovně komunálního odpadu s 1000 kWh/t tepelné energie a 350 kWh/t elektrické energie. Vyšší hodnoty se u spaloven IHW vyskytují jednak z důvodu vyšší výhřevnosti odpadu, ale jsou způsobeny také přívodem přídavného paliva v podobě zemního plynu. Energie vnesená přídavným palivem v běžném provozním režimu spalovny IHW odpovídá toku energie ze spalování odpadu, což snižuje energetickou účinnost jednotky. Hlavním účelem termického zpracování nebezpečného odpadu proto je odstranění odpadu, produkce energie je pro tato zařízení vhodná, ale neodpovídá energetickému využití odpadu.

Použitá literatura

- [1] Kropáč J., Bébar L., Stehlík P. *Spalování průmyslových a nebezpečných odpadů a výroba energie*. CHISA 2011, Český svaz chemického inženýrství, Srní, 24. 10. 2011.
- [2] The Council of the European union: Directive 1999/31/EC on the landfilling of waste. Official Journal of the European Communities 1999; L182:1-19.
- [3] Dvořák R., Pařízek T., Bébar L., Stehlík P. *Incineration and gasification technologies completed with up-to-date off-gas cleaning system for meeting environmental limits*. Published 26 September 2008 [online] – [cit. 2012-12-02]. Dostupné na WWW: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10098-008-0170-7?LI=true>>
- [4] Malaťák J. *Termické zpracování odpadů SPALOVNY*. Praha 2006 [online] – [cit. 2012-11-25]. Dostupné na WWW: <<http://odpady.tf.czu.cz/p/Spalov.pdf>>
- [5] Nařízení vlády č.354 ze dne 3. července 2002, kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu. *Sbírka zákonů č. 354/2002*.
- [6] Pavlas M., Stehlík P., Oral J., Urban L.: *Výpočtové postupy pro efektivní využití energie v procesním průmyslu*. Chisa 2005, Český svaz chemického inženýrství, Srní, 17. 10. 2005.
- [7] Bébar, L. *Inovační prvky v oblasti termického zpracování odpadů*. Brno 2007. 80s.
Habitační práce na Vysokém učení technickém v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství.
- [8] Brunner, C. R., *Incineration Systems Handbook*, ICI, USA, 1996.
- [9] Calla - Sdružení pro záchranu prostředí [online] – [cit.2013-01-07]. Dostupné na WWW: <http://www.calla.cz/images/odpady/vystava/protisk/5.pdf>
- [10] European Commission. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives
- [11] PROCHÁZKA, J. *Energetické využití komunálního odpadu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 87 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.
- [12] Eurostat 2010, Recycling and Waste-to-Energy go hand in hand in order to divert waste from landfill. [online]. Dostupné z: www.cewep.eu/information/recycling/index.html

- [13] Ochodek T., Kolonicny J., Branc M., *Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy*, Ostrava 2007, 229s. ISBN 978-80-248-1426-1
- [14] V. Ucekaj, „Analýza hmotností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu“, Brno, 2011
- [15] Parlament ČR, „Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů“, 2002. [Online na WWW]:
<http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/8fc3e5c15334ab9dc125727b00339581?OpenDocument>. [cit.: 03-zář-2012].
- [16] PAVLAS M., BÉBAR L., URBAN L., STEHLÍK P.: Analysis of utilizing energy from thermal processing of waste. In *17th international congress of chemical and process engineering CHISA 2006, 9th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction*, Praha, 27 August – 31 August 2006, Proceedings on CD ROM, ISBN 80-86059-45-6.
- [17] Council Directive 2000/76/EC of the European parliament and of the council of 4 December 2000 on the incineration of waste. Official Journal of the European Communities
- [18] Spalovna a komunální odpady Brno, akciová společnost, Výroční zpráva 2011, [online]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/spolecnost/vyrocnizpravy/vyr2011.pdf> [cit.:2013-01-15]
- [19] Termizo a.s., Liberec, Zpráva o provozu spalovny – environmentální profil za rok 2011 [online]. Dostupné z:
http://www.termizo.mvv.cz/php/docs/rocnizprava_2011.pdf [cit.:2013-01-15]
- [20] Seznam spaloven odpadů ČR, [online]. Dostupné z:
<http://povodne.info/uoco/emise/spalovny/index.html> [cit.:2013-01-15]
- [21] Greenhouse gas emissions, [online]. Dostupné z:
<http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/ch4.html> [cit.:2013-02-11]
- [22] Útvar rozvoje hlavního města Prahy, ZEVO Malešice, [online]. Dostupné z:
<http://www.urm.cz/cs/mestske-investice/detail/1290/zevo-malesice-kogeneracni-jednotka-a-zarizeni-denox> [cit.:2013-02-07]
- [23] TERMIZO – spalovna Liberec [online].
 Dostupné z :< <http://www.termizo.mvv.cz/php/index.php?p=21> > [cit. 2012-09-08]

- [24] Technická zařízení budov, stavební úspory energií [online]. Dostupné z : <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/89-slozeni-zemnich-plynu> [cit. 2013-01-08]
- [25] KROPÁČ, J. *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh systému čištění spalin z procesu termického zpracování odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 158 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [26] S. van Loo a J. Koppejan, Ed., *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. Routledge, 2007
- [27] The European IPPC Bureau, „Reference Document on the Best Available Techniques for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector“, 2011. [Online]. Dostupné z: <http://eippcb.jrc.es/reference/cww.html> [cit.: 2013-03-31].
- [28] G. T. Joseph a D. S. Beachler, „Scrubber Systems Operation Review - APTI Course SI:412C Second PDF“. North Carolina State University, 1998.
- [29] The European Parliament and the Council of the European Union, „Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives“, 2008. [Online]: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008L0098:EN:NOT>. [cit.: 2013-04-28].
- [30] The European Parliament and the Council of the European Union, „Directive 2010/75/EU on industrial emissions“, 2010. [Online]: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32010L0075:EN:NOT>. [cit.: 2013-05-11].
- [31] 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.
- [32] Rédr, M., Příhoda, M.: *Základy tepelné techniky*. SNTL/ALFA, Praha, 1991, ISBN 80-00366-0
- [33] Spalovna Chotíkov - moderní Zařízení na Energetické Využití Odpadů [Online] Dostupné z: <http://www.spalovnachotikov.info> [cit.: 2013-05-14].
- [34] „W. L. Gore & Associates, Inc. - Remedia Filter System for Incineration“. [Online] Dostupné z: http://www.gore.com/en_xx/products/filtration/catalytic/incineration.html [cit.: 2013-02-11].

- [35] „Cerafil TopKat | ClearEdge“. [Online] Dostupné z: < http://www.clear-edge.com/cerafil_topkat > [cit.: 2013-02-11].
- [36] M. Pavlas, „Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů“, dizertační práce, VUT Brno, Fakulta strojní, Brno, 2008.
- [37] M. Touš, „Výpočtový systém pro výběr optimálního způsobu využití energie generované spalovacími procesy“, dizertační práce, VUT Brno, Fakulta strojní, Brno, 2012.
- [38] ÚPEI FSI VUT v Brně, „Waste to Energy (W2E) Software“, 2012. [Online] Dostupné z: < <http://www.upei.fme.vutbr.cz/w2e> > [cit.: 2013-04-17].
- [39] V. Ucekaj, „Analýza možnosti nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu“, dizertační práce, VUT Brno, Fakulta strojní, Brno, 2011.
- [40] M. Pavlas, M. Touš, L. Bébar, P. Stehlík – Waste to Energy – An evaluation of the environmental impact, Applied Thermal Engineering 30, 2326-2332, 2012.

Seznam příloh

Příloha 1 – Schéma modelu spalovny nebezpečných odpadů

Příloha 2 – Schéma modelu spalovny komunálních odpadů

CD-ROM, který obsahuje následující soubory:

Diplomová práce_Venhoda.pdf

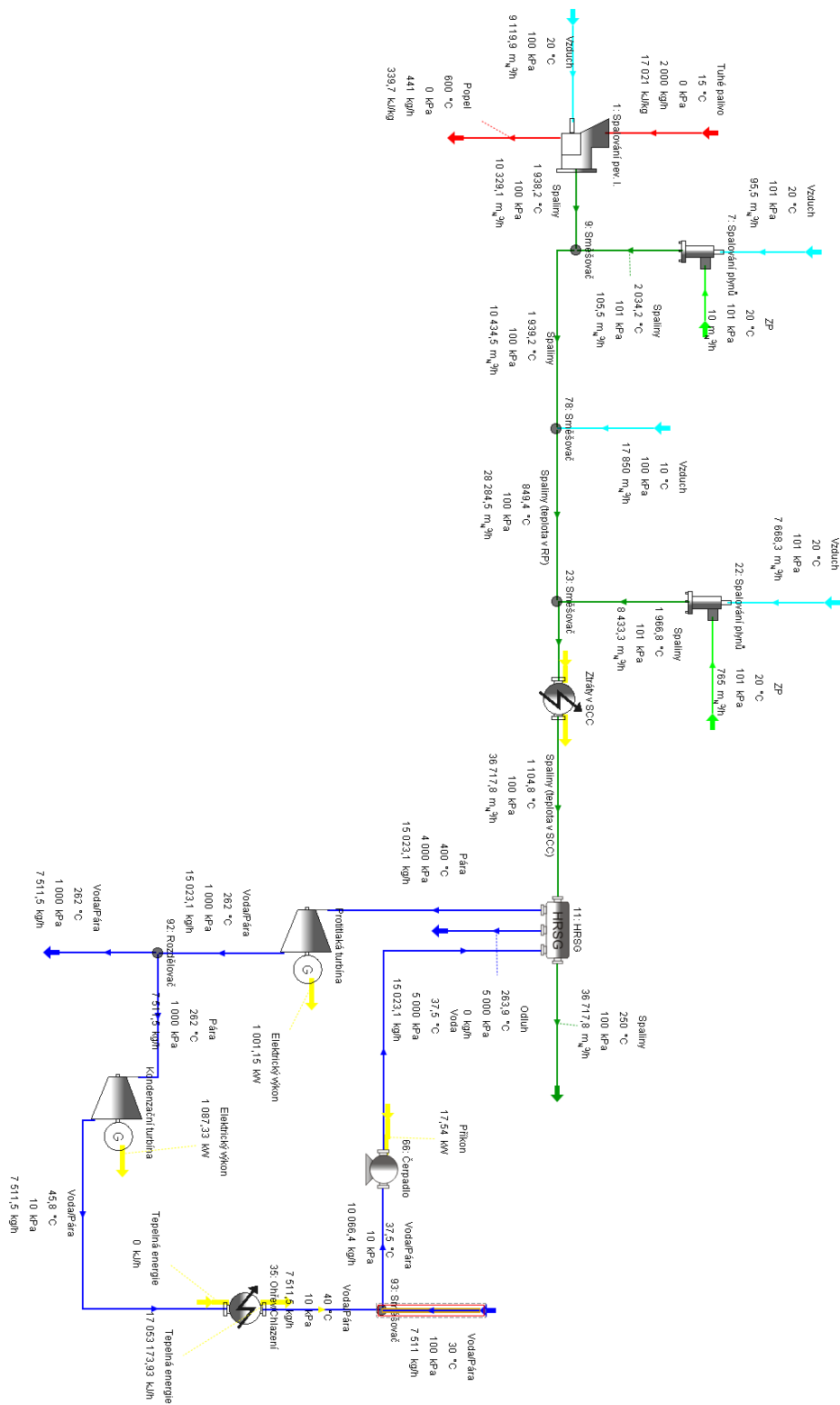
Výpočet_spalin.xls

Tabulka_výsledných_hodnot.xls

Schema_IHW.w2e

Schema_MSW.w2e

Příloha 1 – Schéma modelu spalovny nebezpečných odpadů



Příloha 2 – Schéma modelu spalovny komunálních odpadů

