

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

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ KOMUNÁLNÍHO ODPADU

RECOVERY OF ENERGY FROM MUNICIPAL WASTE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc . KAMIL ŠÍMA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV JÍCHA, CSc.

BRNO 2010





ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá jedním z možných řešení spalovny komunálních odpadů se současnou výrobou (kogenerací) elektrické energie a tepla.

Základní specifikace projektu:

Spalování odpadu je prováděno ve dvou paralelních protiproudých rotačních pecích. Spaliny o teplotě 1 000°C opouští dohořivací komoru a přes multicyklon, kde se oddělí pevná frakce, vstupují do kotle na odpadní teplo. Čištění spalin je navrženo tzv. suchou cestou za použití bikarbonátu sodného. Zbytky po čištění spalin (zreagovaný bikarbonát sodný) a zbylý popílek jsou od spalin odděleny na rukávcoých filtrech. Napájecí voda do kotle je ohřívána ve výměníku tepla spalinami (za rukávcoými filtry) a následně vstupuje do kotlů na odpadní teplo, kde se vyrábí přehřátá pára. Ta vstupuje na odběrovou kondenzační turbínu, kde se vyrábí elektrická energie nebo odebírá topná pára.

Práce zahrnuje výpočet hlavních aparátů a základní ekonomickou rozvahu celého projektu.

Klíčová slova: Spalovna odpadů, komunální odpad, protiproudá rotační pec, čištění spalin, kogenerace.

ABSTRACT

The topic of the diplome thesis is draft of the waste-to-energy plant for municipal waste with cogeneration of heat.

Basic specification of project:

Waste-to-Energy plant is facilitated by two rotary kilns of type operating in parallel. Further flue gas leaving the post-combustor enters a multicyclone unit to separate substantial portion of fly-ash. Heat of flue gas at the temperature of 1000°C generates superheated steam in a Heat Recovery Steam Generator (HRSG). Dry sorption process is applied for flue gas treatment. Specifically sodium bi-carbonate is used for it. Products of reactions and remnants of dust are separated by a baghouse. Superheated steam, generated by two HRSG, presents the inlet stream of a condensing steam turbine with steam extraction.

The diploma thesis contains calculation of major devices and basic economical and financial statement of project.

Key words: Incineration plan, municipal waste, counter-current rotary kiln, waste-to-energy, flue gas cleaning, cogeneration.



Bibliografická citace:

ŠÍMA, K. Návrh energetického využití komunálního odpadu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 132 s. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci *Návrh energetického využití komunálního odpadu*, jsem vypracoval a napsal samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce Doc. Ing. Jaroslava Jíchy, CSc. a uvedl v seznamu všechny zdroje.

Kamil Šíma

V Brně dne 25. května 2010



PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Jaroslav Jícha, CSc. za poskytnuté rady a připomínky k této práci.

Dále bych chtěl velice poděkovat panu Ing. Josefu Luřchovi, CSc. za přínosné rady k tomuto projektu.



OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	15
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	16
ÚVOD	
1. ODPADY JAKO PROBLÉM.....	19
1.1. Klasifikace odpadů	19
1.2. Složení odpadů.....	21
1.3. Objem vyprodukovaných odpadů	22
1.4. Způsoby zpracování odpadu	25
1.5. Legislativa v ČR na úseku odpadového hospodářství	31
1.5.1. Vývoj legislativy na úseku odpadového hospodářství v ČR.....	31
1.5.2. Vybrané platné právní předpisy.....	32
1.5.3. Emisní limity	34
1.5.4. Možné dotace spojené se spalování SKO.....	35
2. SPALOVÁNÍ (ENERGETICKÉ VYUŽÍVÁNÍ) ODPADŮ	37
2.1. Základní fakta	37
2.1.1. Hlavní odvětví spalování odpadů	37
2.1.2. Hlavní technologické procesy	38
2.1.3. Odpad jako palivo.....	40
2.1.4. Environmentální problémy	41
2.2. Spalování komunálních odpadů v ČR a EU	43
2.3. Stávající technologie	45
2.3.1. Stupeň tepelného zpracování	46
2.3.2. Stupeň energetického využití	49
2.3.3. Stupeň čištění spalin	52
3. PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH APARÁTŮ SPALOVNY ODPADŮ	55
3.1. Hlavní předpoklady.....	57
3.2. Termická část	59
3.3. Utilizace tepla	63
3.4. Čištění spalin.....	66
3.5. Doplnkové aparáty	73
4. VÝPOČET HLAVNÍCH APARÁTŮ	77

4.1. Předběžné výpočty	78
4.2. Termická část	79
4.2.1. Základní rozměry rotační pece.....	79
4.2.2. Tepelná bilance	80
4.3. Kotel na odpadní teplo	87
4.3.1. Teplotní profil kotle	87
4.3.2. Návrh základních parametrů	91
4.3.3. Tlakové ztráty na straně spalin.....	96
4.4. Parní turbína	98
4.5. Kondenzační jednotka	100
4.6. Čištění spalin	102
4.6.1. Bikarbonát sodný	102
4.6.2. Rukávcové filtry.....	104
4.7. Přehřev vody do kotle.....	106
5. PROJEKČNÍ NÁVRH.....	109
5.1. Prostorová dispozice a technologické schéma	109
5.2. Vstupní a výstupní parametry.....	110
5.3. Hlavní parametry aparátů	111
6. EKONOMICKÉ ASPEKTY	117
ZÁVĚR.....	123
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	124
SEZNAM PŘÍLOH.....	128

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

2NaHCO₃	Bikarbonát sodný
BIC	Koncentrace nežádoucích látek ve spalinách naměřené ve Francii a Itálii
BRO	Biologicky rozložitelný odpad
C	Uhlík
CO	Oxid uhelnatý
DPH	Daň z přidané hodnoty
DK	Dohořivací komora
ČOV	Čistička odpadních vod
ČR	Česká republika
ČSÚ	Český statistický úřad
EU	Evropská unie
ES	Evropské společenství
H	Vodík
HCl	Kyselina chlorovodíková
HF	Kyselina fluorovodíková
Hg	Rtuť
HP	Vysokotlaká část turbíny
LP	Nízkotlaká část turbíny
MPO ČR	Ministerstvo průmyslu a obchodu České Republiky
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
N	Dusík
NO	Nebezpečný odpad
NO₂	Oxid dusičný
NO_x	Oxidy dusíku
O	Kyslík
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development
OKEČ	Odvětвовá klasifikace ekonomických činností
OPŽP	Operační program životního prostředí
PCDD/F	Polychlorované dibenzo- <i>p</i> -dioxiny a dibenzofurany
PET	Polyethylentereftalát
PO	Průmyslový odpad
POH	Plán odpadového hospodářství
RP	Rotační pec
RSLR	Město Roeselare v Belgii
S	Síra
SFŽP	Státní fond životního prostředí
SKO	Směsný komunální odpad
SO₂	Oxid siřičitý
STEO	Sdružení provozovatelů technologií pro ekologické využívání odpadů
TOC	Těkavé organické látky
TRMZ	Termizo a.s.
TZL	Tuhé znečišťující látky
VCHV	Výpočet vzduchem chlazených výměníků

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
$\%C$	Podíl C v odpadu	%
$\%H$	Podíl H v odpadu	%
$\%N_{air}$	Podíl N ve vzduchu	%
$\%O$	Podíl O v odpadu	%
$\%O_{air}$	Podíl O ve vzduchu	%
AC_m	Celková spotřebu spal. vzduchu	kg/s
AC_{stech}	Stechiometrické množství spal. vzduchu	kg/kg
AP_{stech}	Stechiometrické množství primárního vzduchu	kg/kg
AS_{stech}	Stechiometrické množství sekundárního vzduchu	kg/kg
B	Hmotnostní podíl hořlaviny v odpadu	%
HHV	High heat value	MJ/kg
HV	Výhřevnost zemního plynu	MJ/kg
K_1	Koeficient tlakové ztráty na čistém rukávci	kPa/(m/min)
K_2	Koeficient tlakové ztráty na koláči K_2	kPa/(m/min)
m_y	Množství spáleného odpadu	T/rok
s	Hmotnostní podíl popelovin v hořlavině	%
S	Sutherlandova konstanta pro vzduch	K
t_{ref}	Teplota okolí	°C
t_{reg}	Regenerační cyklus	h^{-1}
T_0	Teplota vzduchu za normálních podmínek	K
T_p	Adiabatická teplota plamene v RP	°C
T_s	Adiabatická teplota plamene v DK	°C
v	Hmotnostní podíl těkavých látek v odpadu	%
x	Hmotnostní podíl pevného uhlíku v hořlavině	%
y	Hmotnostní podíl těkavých látek v hořlavině	%
η_m	Mechanická účinnost turbíny	%
λ_p	Přebytek primárního spal. vzduchu	-
λ_s	Přebytek sekundárního spal. vzduchu	-
μ_0	Dynamická viskozita vzduchu za normálních podmínek	Pa·s
ρ_{BIC}	Hustota $2NaHCO_3$	kg/m ³
ρ_w	Hustota odpadu	kg/m ³

Ostatní, zde neuvedené symboly jsou systematicky vysvětlovány v textu DP.

ÚVOD

Odpady a produkce odpadů jsou odjakživa spojeny s vývojem lidstva. Důkazem jsou archeologické nálezy které ukazují, že odpady v různých formách vznikaly již v dávných dobách a kulturách. S každým vyšším stupněm vývoje přicházelo více odpadů se stále ničivějším dopadem na člověka a životní prostředí. [1,2]

Do konce 19. století nebyla vyspělost lidstva, růst světového průmyslu a ekonomiky na takové úrovni, aby produkce odpadů výrazněji zasahovala do života obyvatel a do životního prostředí. Na odpady jako takové se tedy do té doby nebral velký zřetel. [1,2]

S příchodem 20. století se začala situace měnit. Nebývalý rozsah světového průmyslu a ekonomiky, znamenal zvýšení životní úrovně obyvatel. S tímto nesporně kladným vývojem však logicky souvisí zvýšené tempo čerpání surovin a energií. To vedlo k několikanásobnému navýšení produkce komunálních i průmyslových odpadů. [1,2]

V současné době, která je stále charakterizována růstem světového průmyslu a ekonomiky, růstem počtu obyvatel a s tím spojené spotřeby těchto lidí, vzniká obrovské, pro lidskou společnost neúnosné množství různých druhů odpadu. Při stávajícím trendu v produkci odpadů a zachování postoje ke způsobům nakládání s nimi (převažující skládkování), budou odpady v blízké budoucnosti představovat jeden z největších problémů lidstva a jeho řešení enormní finanční zátěž jednotlivých států. [1,2]

„Vize Země v blízké budoucnosti...

Lidstvo se udusí ve vlastních výkalech.“

Josef Luřcha

Stávající politika EU v oblasti nakládání s odpady zaujímá sice silně negativní postoj ke skládkování, avšak jako alternativní způsob byla doposud protěžována zejména jejich recyklace. Spálení odpadu za účelem využití energie v něm uložené, bylo považováno za jeho odstranění, stejně jako skládkování. V roce 2008 přijal Evropský parlament Rámcovou směrnici o odpadech č. 75/442/ES, která mění postoj EU k energetickému využívání odpadu. Díky této směrnici se nově spalování odpadu za účelem výroby energie považuje za využití odpadu.

I když EU změnila postoj k energetickému využití odpadu a členské státy jsou povinny tento postoj, a s tím spojené změny v legislativě, implementovat do dvou let do vlastních zákonů, zůstává otázkou, zda-li tato změna bude natolik zásadní, aby se nejenom zastavil nárůst skládkovaných, či jiným způsobem odložených odpadů, ale aby se množství odpadů se kterými bude nakládáno tímto způsobem trvale snižovalo.

Úprava odpadu za účelem opětovného použití a recyklace odpadu zůstávají v hierarchii způsobů nakládání s odpady před energetickým využitím (které by zajistilo právě tolik potřebné snížení odpadů ukládaných na skládky) a mají tedy přednost. Recyklace odpadů je bezesporu doposud neoptimálnější způsob jak s odpadem naložit, ale ne vždy je toto řešení nejlepší. Případy situací, kdy by se mělo zvážit, zda-li je recyklace odpadů ideálním řešením jsou následující:

- O materiál či surovinu vzniklou recyklací odpadu není na trhu zájem. Odpad používaný k výrobě takové suroviny se přestane recyklovat, začne se skladovat a následně skončí na skládce odpadů, protože i kdyby se odbyt recyklátu podařilo opětovně zajistit, tak odpady, ze kterých je vyráběn, se produkují dále a ve větším objemu.

- Více energie je spotřebováno v celém recyklačním procesu, než je spotřeba energie při výrobě nového produktu.
- Odpad určený k recyklaci se hromadí a následně je prodán tak, že nikdo není schopen říci, co se těmito odpady stalo.

V těchto případech, a v mnohých dalších, je možné volit energetické využití odpadu (waste to energy), které, stane-li se spolu s recyklací dominantním způsobem v oblasti využívání odpadů, má potenciál zastavit a následně zvrátit zvyšující se množství odpadů ukládaných ať už na legální nebo také černé skládky. Je to možné, protože spalování odpadů je jeden z nejuniverzálnějších způsobů nakládání s odpady. Odpad, který lze energeticky využít (tedy spálit), musí splňovat pouze jediné kritérium – musí být hořlavý. Energeticky lze tedy využít odpady všech kategorií.

Dále je velice důležité si uvědomit, že účelem nakládání s odpadem způsobem energetického využití není odpad odstranit, čili ukončit jeho životnost, ale využít odpad (termicky zhodnotit) k výrobě tepelné či elektrické energie. To v neposlední řadě znamená nezanedbatelnou úsporu nerostných surovin, ze kterých jsou vyráběna paliva pro technologie produkující elektrickou resp. tepelnou energii. Zde je uveden příklad takovéto úspory (hodnoty převzaty od společnosti SAKO Brno a.s. z roku 2006, přepočty provedeny na základě podkladů MPO ČR) [4]:

Tepelná energie vyrobená termickým využitím 88 976 tun odpadu	711 844	GJ
Úspora černého koksového uhlí	31 221	tun
Úspora topného oleje	21 287	tun
Úspora zemního plynu	24 631 280	m ³

Výše zmíněný negativní postoj EU ke skládkování je reprezentován směrnicí evropského společenství 99/31/ES o skládkách odpadů z roku 1999, která nařizuje členským státům rapidně snížit procento odpadů ukládaných na skládky do roku 2020. Pro ČR to znamená nutnost odklonění asi 2 mil. tun odpadů od skládkování. V jiném případě hrozí ČR sankce. I kdyby si množství recyklovaných odpadů udrželo stoupající tendenci, ČR se stávající kapacitou spaloven KO (646 tis. t/rok) není schopna tomuto závazku dostát. Výstavbou nových spaloven komunálních odpadů lze tento problém výrazně eliminovat.

Studie některých vládních i nevládních organizací (např. STEO) zabývající touto problematikou naznačují, že ideálním řešením by bylo postavení spalovny komunálních odpadů s kapacitou 100kT – 150 kT v každém kraji.

Tato diplomová práce se tedy zabývá návrhem projektu spalovny komunálních odpadů s roční kapacitou 100kT a následnou výrobou elektrické a tepelné energie.

1. ODPADY JAKO PROBLÉM

V 19. století se v České republice na odpady, omezení jejich produkce a problematiku jejich zpracování nebral velký zřetel. Bylo to umožněno benevolentní právní úpravou na úseku odpadového hospodářství a laxním přístupem kontrolních orgánů. Změna přišla s prvním zákonem o odpadech vydaným po roce 1990 (zákon č. 283/1991 Sb.). I když tento zákon obsahoval hodně chyb, a po mnoha stránkách byl nedokonalý, měl za následek uvědomění veřejnosti a hlavně průmyslových podniků o problematice vyprodukovaných odpadů. Dále měl za následek proměnu do té doby skoro bezcenných odpadů v zajímavý obchodní artikl. [2]

V dnešní době, kdy je připravovaný v pořadí již čtvrtý zákon o odpadech, jsou odpady velice lukrativní obchodní surovina. Je to dáno zejména právními předpisy, které nařizují, jakým způsobem s daným druhem odpadu nakládat. U většiny podniků se ukázalo být nerentabilní zpracovávat jimi vyprodukovaný odpad dle platné legislativy. Pro tyto firmy je ekonomicky mnohem únosnější zaplatit jiným společnostem za zneškodnění vyprodukovaného odpadu. To umožnilo vznik nespočtu firem, které jsou zaměřeny na zpracování odpadů. [2]

Všeobecný směr EU i ČR je ve znamení šetrnosti k životnímu prostředí. Snaha o větší šetrnost k životnímu prostředí vede ke zpřísnování většiny limitů souvisejících nejen s odpadovým hospodářstvím. Uplatňování a prosazování moderních norem znamená navyšování nákladů zpracovatelských firem a logicky také růstu cen, kterou platí původci odpadů zpracovatelským společnostem. [2]

Otázka „co je a co není odpad“ je tedy v dnešní době velice diskutované téma.

1.1. Klasifikace odpadů

Oficiální rozdělení odpadů je pouze na skupiny uvedené v Katalogu odpadů, který byl zveřejněn v příloze č. 1 vyhlášky MŽP 381/2001 Sb., ve znění vyhlášky č. 503/2004 Sb. Odpady jsou v katalogu členěny podle šestimístního kódu. První dvojčíslí udává skupinu odpadů, druhé podskupinu a třetí druh odpadu. [2]

Odpad je velice různorodý a kritérií, podle kterých můžeme odpad dělit, je mnoho. Za základní rozdělení (jako u všech doposud známých látek) se dá považovat rozdělení odpadů podle základních fyzikálních vlastností, tedy podle skupenství - tuhé, kapalné, plynné a směsné. Toto rozdělení však není z pohledu odpadového hospodářství dobré, neboť nám neřekne, jaké má odpad vlastnosti. Bez těchto znalostí nemůžeme pak určit rizikovost odpadu ve vztahu k životnímu prostředí a zdraví člověka a jak bude nezbytné s odpadem dále nakládat. [2,3]

Odpady můžeme dělit do skupin podle mnoha kritérií, například podle hospodářské činnosti, jejich rizikovosti pro životní prostředí, složení, využitelnosti, způsobu odstraňování atd. Je zde uvedeno rozdělení podle nejdůležitějších kritérií: [2]

- **Podle vztahu k jejich rizikovosti na životní prostředí [2,3]:**
 - nebezpečné
 - ostatní

Některé odpady mají chemické složení nebo vlastnosti, které z nich dělají potenciální nebezpečí pro člověka, pro životní prostředí nebo pro obojí. Tyto odpady se nazývají nebezpečné. V jakém případě musí být odpad označen, jako nebezpečný je

formulováno v §4, písm. a, zákona č. 185/2001 sb. o odpadech ve znění pozdějších předpisů.

- **Podle základních oborů hospodářské činnosti [2,3]:**
 - výrobní (průmyslové, stavební, zemědělské, z těžby atd.)
 - spotřební (komunální atd.)

Každý druh činnosti, ať už se jedná o spotřební nebo výrobní činnost, je doprovázen produkcí odpadů. Je proto logické dělit odpady do kategorií podle činností, které jsou si podobné, nebo produkují podobný druh odpadu. Zde jsou již kromě teploty činiteli reakce voda, pára a kyslík. Ten se následně zpracovává stejným nebo podobným způsobem.

- **Podle využitelnosti [2,3]:**
 - využitelný
 - nevyužitelný

Odpady vznikají z výrobků, které nejsou dále potřebné. Výrobek a následný odpad, který vznikl z tohoto výrobku, obsahují materiály se stejnými nebo podobnými vlastnostmi. Těmito materiály je možné nahradit primární surovinu ve výrobě nových produktů. Odpadům takového druhu a dalším, které lze využít ať už ve výrobních, rekultivačních, nebo termických procesech se říká využitelné.

- **Podle OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development – (Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj) [2,4]:**
 - ze zemědělství a lesnictví
 - z dolování a těžby
 - průmyslové
 - z energetiky
 - stavební a demoliční odpady
 - odpady z čištění města
 - komunální
 - jiné

OECD zavedla rozdělení do těchto skupin z důvodu potřeby srovnání a vyhodnocení vývoje odpadové hospodářství členských států.

- **Podle OKEČ (Odvětvová klasifikace ekonomických činností) [2,5]:**
 - Podniková produkce odpadů:
 - ze zemědělství a lesnictví
 - z dolování a těžby
 - průmyslové
 - z energetiky (mimo radioaktivní)
 - ze stavebnictví
 - z dopravy
 - z odstraňování odpadních vod, pevného odpadu a čištění měst
 - Odpady z obcí:
 - komunální

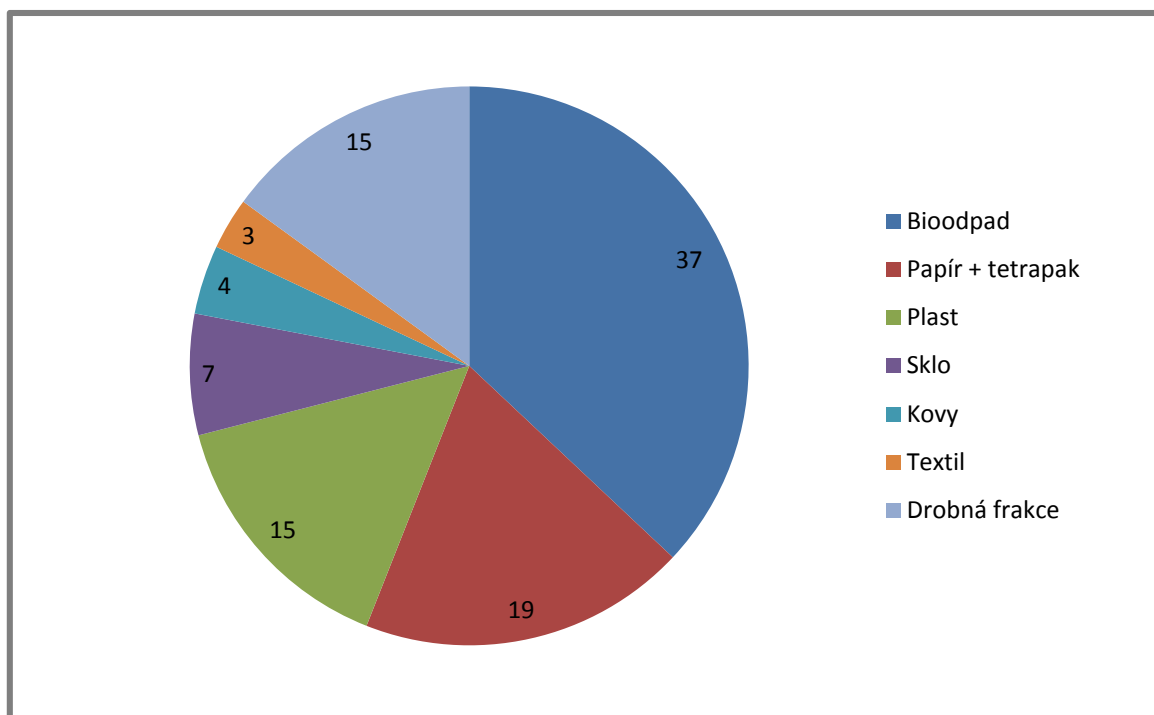
OKEČ spravuje ČSÚ (Český statistický úřad). Je to systém, který umožňuje výhodně zpracovat široký rozsah statistických dat, mj. také data o produkci a nakládání s odpady na území ČR. [2]

1.2. Složení odpadů

1.2

Chemických prvků a materiálů, ze kterých se dnes vyrábějí nejrůznější produkty je mnoho. Tyto materiály se stávají, spolu s ukončením životnosti daného produktu, odpadem. Složení odpadů je tedy velice různorodé a některé látky mohou mít velice nebezpečný dopad na člověka a životní prostředí. Stále se zvyšující nároky na ochranu životního prostředí mají za cíl maximální možnou neutralizaci nebezpečných látek uložených v odpadech resp. neutralizaci odpadů jako takových, a to za použití technologií, které budou šetrné k životnímu prostředí.

Právě výběr technologie a způsobu nakládání s odpadem přímo závisí na složení a vlastnostech odpadů. Je tedy velmi důležitá znalost jejich skutečných vlastností. V celém světě je věnována velká pozornost zkoumání a stanovování složení a skutečných vlastností odpadů s ohledem na přítomnost možných škodlivých látek, které ve svém důsledku mohou ohrožovat zdraví lidí a životní prostředí. [6]



Graf 1: Morfologické složení SKO

I přes veškerá vynaložená úsilí a prostředky je zjištění reprezentativního složení odpadů (v celosvětovém měřítku), zejména SKO, prakticky nemožné. Složení SKO není jednotné a mění se ve velmi širokém intervalu. Pro názornost je zde uveden alespoň příklad morfologického složení SKO – graf 1 (hodnoty jsou převzaty z materiálů společnosti SAKO Brno a.s. z roku 2006 a jsou již po separovaném sběru), elementární rozbor je uveden v tab. 1.

Parametr/ Prvek	Hodnota [% suché substance]	Prvek	Hodnota [mg/kg suché substance]	Prvek	Hodnota [mg/kg suché substance]
Uhlík	18-40	Olovo	100-2000	Arsen	2-5
Vodík	1-5	Zinek	400-1400	Selen	0,21-15
Dusík	0,2-1,5	Měď	200-700	Thalium	<0,1
Kyslík	15-22	Mangan	250	Kobalt	3-10
Síra	0,1-0,5	Nikl	30-50	Kadmium	1-15
Fluor	0,01-0,035	Chrom	40-200	Rtuť	1-15
Chlor	0,1-1	Vanad	4-11		

Tab. 1: Elementární rozbor SKO [7]

Z tabulky 7 je patrné, že obsah jednotlivých látek obsažených v odpadech je velmi proměnlivý. Při plánování technologie pro nakládání s odpady určené pro známou lokalitu, je tedy výhodné provést rozbor složení odpadů produkovaných přímo v dané lokalitě. Takovýmto způsobem je možné snížit náklady na technologii, a to redukcí nebo eliminací některých kroků či aparátů, které nejsou nezbytné pro zpracování odpadů o známém (naměřeném) složení. [8]

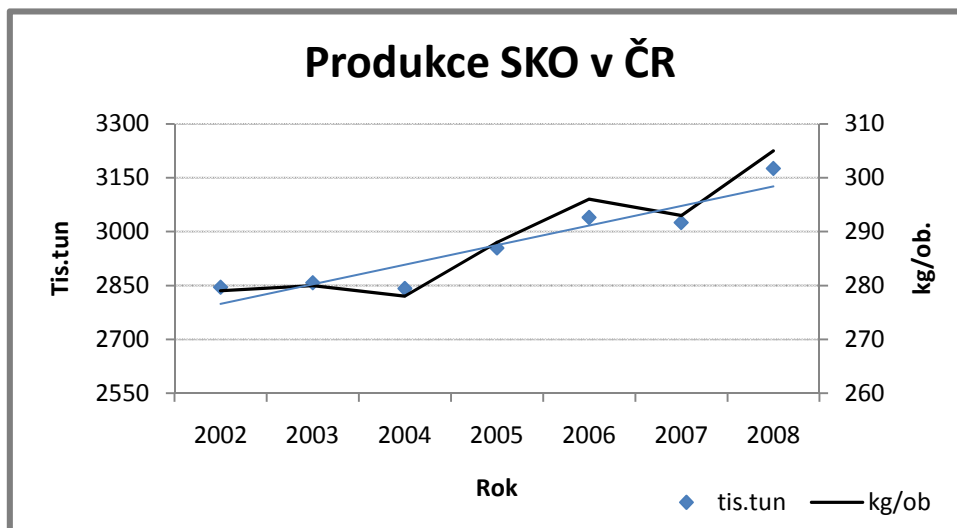
1.3. Objem vyprodukovaných odpadů

Z důvodů nutnosti kontroly, a tedy stanovení míry funkčnosti opatření týkajících se odpadového hospodářství resp. plnění cílů EU jakožto z důvodů potřeby zavedení účinnějších opatření na úseku odpadového hospodářství, je nutné produkci odpadů rozdělit do skupin reprezentujících původ jejich vzniku, složení atd. Za jedno ze základních lze považovat rozdělení vyprodukovaných odpadů na SKO a na PO (odpady pocházející z podniků). Produkce těchto dvou skupin odpadů za posledních 7 let je uvedena v grafech 2 a 4. [1]

Mezi další, důležité indikátory plnění cílů EU patří produkce nebezpečných odpadů a množství vyříděných složek z SKO - graf 5.

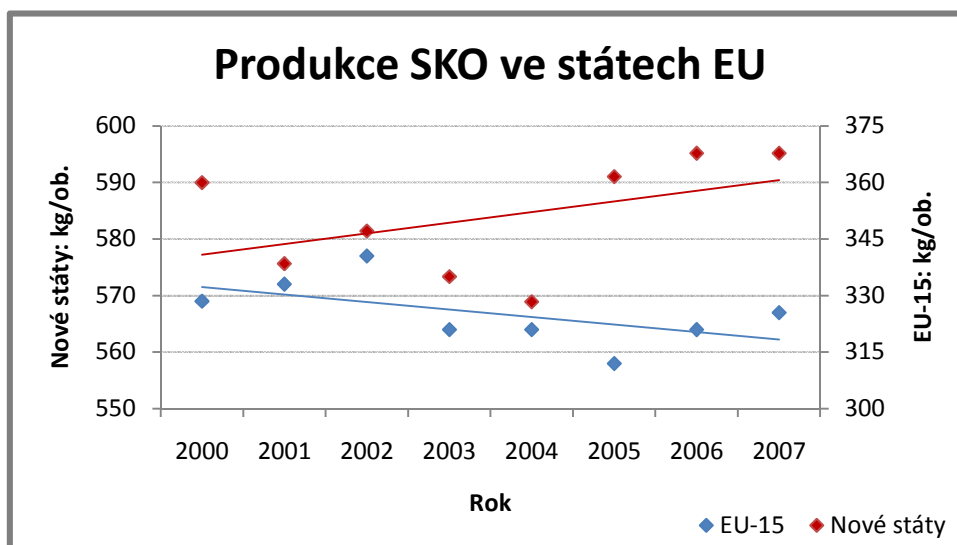
Produkce smíšeného komunálního odpadu

Produkce SKO v ČR má navzdory politice EU stoupající tendenci, a to jednak bereme-li v úvahu celkové vyprodukované množství za jeden rok, tak přesnější hodnotu (zejména z hlediska srovnání produkce s ostatními státy EU), tj. vyprodukované množství na osobu za a rok (viz graf 2). Tento trend je stejný u všech států (s výjimkou Slovinska), které vstoupily do EU po roce 2003 (nové státy). Oproti tomu u starších členských států má produkce komunálních odpadů od roku 2002 spíše klesající charakter (graf 3).



Graf 2: Produkce SKO v ČR (2002-2008) [9]

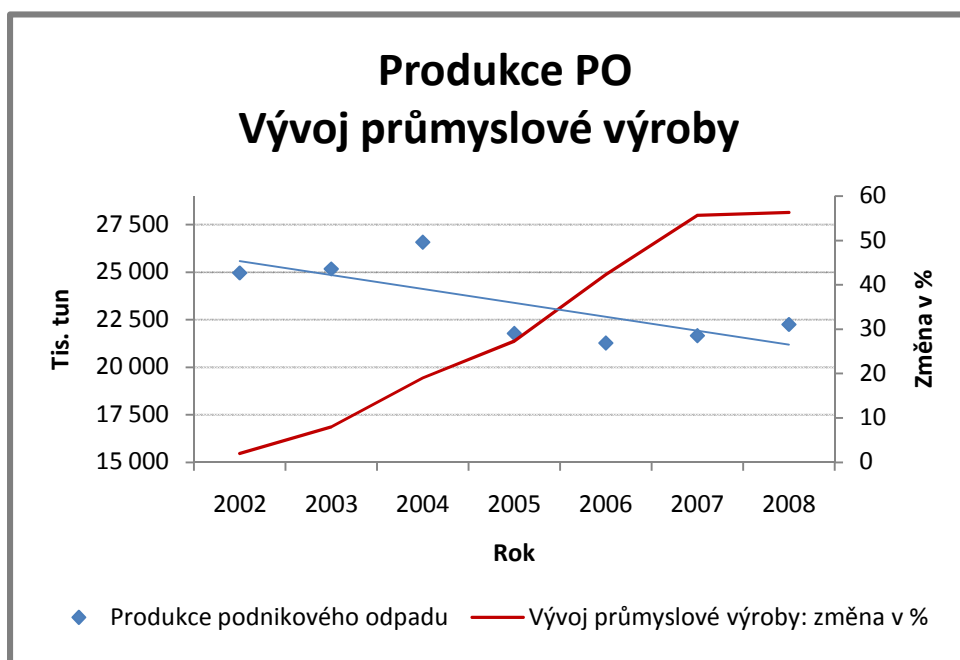
Podle některých studií je to způsobeno zejména zvýšením životní úrovně obyvatelstva a tedy navýšení spotřeby surovin v nových členských státech po jejich vstupu do EU. Ve “starých” státech společenství se růst životní úrovně již zpomalil. Jako další zásadní faktor mající za následek rozdílný vývoj produkce SKO se jeví poměrně přísná politika EU na úseku odpadového hospodářství, která se pro nové státy stala závaznou až s jejich vstupem do společenství, tedy v roce 2004. [10]



Graf 3: Produkce SKO v nových a starých státech EU (200-2007) [9]

Produkce podnikového odpadu

Produkce podnikových odpadů má za posledních 6-7 let spíše klesající charakter, a to i přes skutečnost, že za stejné období rostla průmyslová výroba průměrně meziročně zhruba o 8% (graf 4). Data znázorňující produkci PO v grafu 4 pocházejí z jednotlivých hlášení o produkci odpadů, které jsou společnostmi povinny každoročně odevzdávat. V případě že společnost nenahlásí (z jakéhokoli důvodu) objem vyprodukovaných odpadů, logicky není tento údaj zohledněn. Otázkou tak zůstává, zdali je křivka produkce PO (graf 4) reálná. [1]



Graf 4: Produkce PO a vývoj průmyslové výroby v ČR (2002-2008) [11]

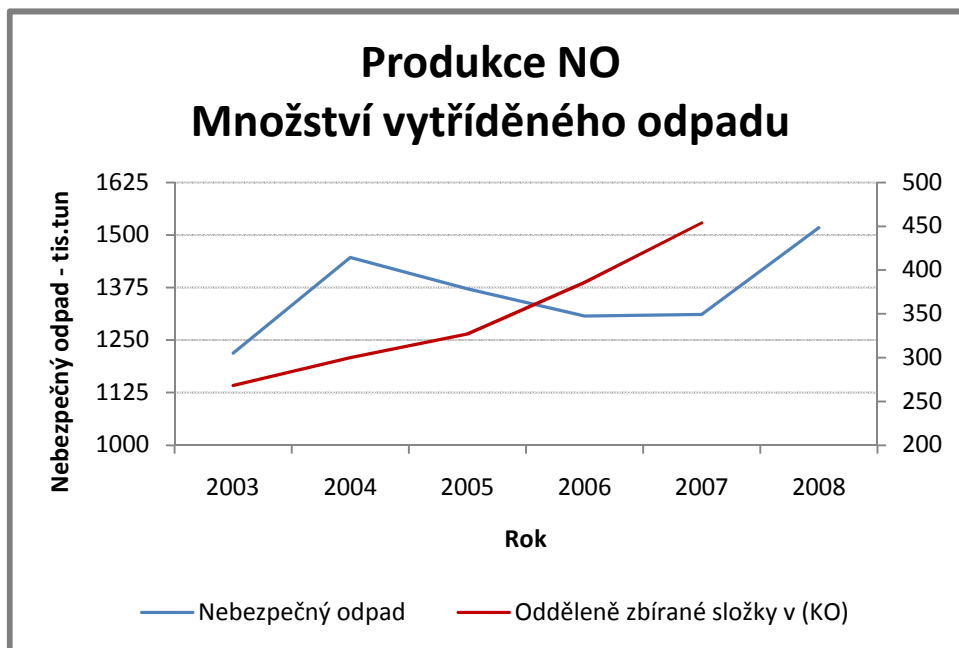
Díky několikanásobně převyšující produkci PO nad SKO, kopíruje křivka vývoje celkové produkce odpadů v ČR vývoj produkce PO. Dalo by se tedy s nadsázkou tvrdit, že ČR plní minimálně jeden ze strategických cílů EU, kterým je snižování měrné produkce odpadů nezávisle na ekonomickém růstu.

Produkce nebezpečného odpadu a množství vyříděných složek SKO

Zařazení snižování produkce NO jako jednu z hlavních priorit EU na úseku odpadového hospodářství je logické, a to zejména kvůli jejich nebezpečnosti a toxicitě, kterou ohrožují nejen životní prostředí, ale také člověka samotného.

Zvyšování objemu vyříděných složek SKO, což je další hlavní cíl EU, má jiný důvod. Vyříděné složky SKO (zejména papír, sklo a plasty) jsou dále zpracovávány recyklací. Jsou tedy využity při výrobě nového produktu a jako takový je spolu s energetickým využitím odpadu (od roku 2008) tento způsob zpracování odpadu upřednostňovaný před způsoby ostatními.

Další nespornou výhodou zvyšování objemu vyříděných složek v celkové produkci SKO je snižování celkového objemu SKO, tedy snižování objemu odpadu, se kterým je nutné následně naložit jednou ze zbývajících možností (energetické využití, uložení na skládku atd.).



Graf 5: Produkce NO a množství vyříděného odpadu v ČR (2003-2008) [11]

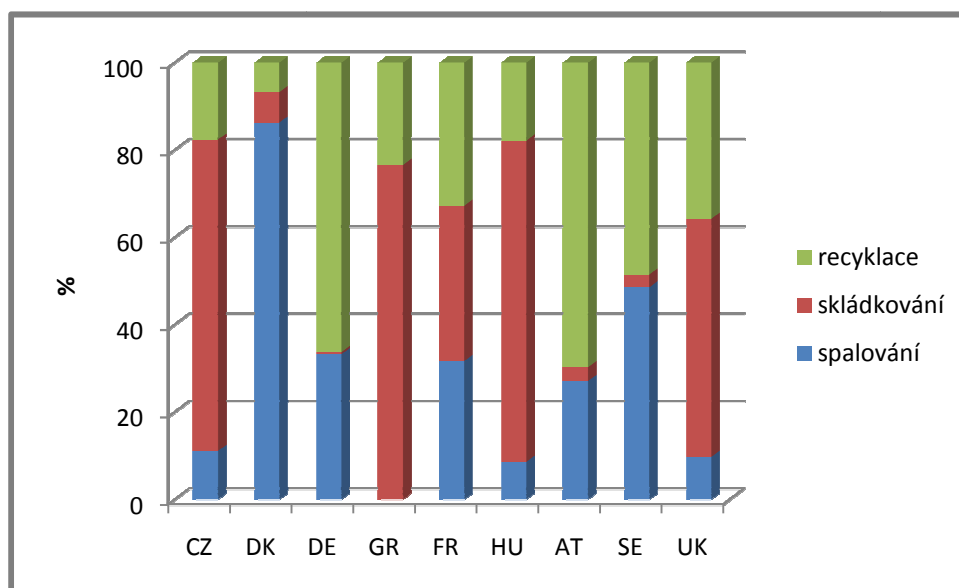
Jak je patrné z grafu, pozitivní je každoročně se zvyšující podíl vyříděných složek SKO, na druhou stranu objem produkce nebezpečných odpadů má také stoupající charakter.

1.4. Způsoby zpracování odpadu

1.4

Způsobů, kterými se odpady zpracovávají (likvidují) je několik a jsou velice odlišné. Cíl mají však většinou společný. Je to snížení objemu a nebezpečnosti odpadů a současně zabránění působení škodlivých látek obsažených v odpadech na životní prostředí. [1]

Stejně tak, jak se liší způsoby zpracování odpadů, jsou také názory odborné veřejnosti na tuto problematiku odlišné. Jaké je nejpříjemnější pořadí způsobů zpracování odpadů není jednoznačné ani v zemích EU (viz graf 6). Směrnice EU nenařizují státům, jaký způsob mají preferovat, je v nich zakomponováno pouze nařízení, v jakém pořadí by se měly dané způsoby upřednostňovat při rozhodování o nakládání s vyprodukovaným odpadem. [1]



Graf 6: Způsoby nakládání s KO odpadem ve vybraných zemích EU [12]

Nařízení EU z pohledu nakládání s odpady je následující

Na prvním místě je předcházení vzniku odpadů. Je to logické, když odpad nevznikne, nemusí se řešit, jakým způsobem s ním bude naloženo. Jestliže vzniku odpadu předejít nelze, je nařízeno využít vyprodukovaný odpad látkově nebo energeticky. V případě, že nelze s odpadem nakládat výše zmíněnými způsoby, je nařízeno zmenšit objem odpadu (spalování bez využití energie). Na posledním místě je zneškodnění odpadu uložením na skládku. [1,13]

Možné způsoby nakládání s odpady [1,14,15,16]

1. Třídění a recyklace
2. Termické procesy (spalování, pyrolýza)
3. Skládkování
4. Biotechnologie (kompostování, anaerobní digesce, ČOV)
5. Jiné metody (fyzikálně - chemické úpravy např.: vitrifikace, solidifikace)

➤ Třídění a recyklace:

Látkové využití, tedy recyklace je jeden ze způsobů, pomocí kterého se z odpadu využívají látky nebo energie v těchto látkách obsažené. V hospodářském systému však neexistuje úplný uzavřený koloběh, kdy využijeme veškerý materiál nebo energii. V současné době lze recyklovat pouze papír, sklo, plasty, kovy, popřípadě nápojové kartony.

Vlastní recyklaci předchází třídění odpadu. Je to nedílná součást materiálového využití odpadu. Třídění začíná už u původců odpadu, kteří mají ze zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech povinnost odpad třídít. Svážecí společnosti převezou odpad na tzv. dotříd'ovací linku. K dotřídění se používají různé technologie. Kromě ručního třídění se dále využívají různé mechanicko-biologicko-chemické postupy. Mezi nejznámější patří – prosívání, usazování, magnetická separace, odpařování, destilace.

Po dotřídění se s jednotlivými materiály zachází následovně:

Recyklace papíru – Slisovaný papír se přidává do směsi na výrobu papíru nového. Je možné ho recyklovat pětkrát až sedmkrát. Z recyklovaného papíru se vyrábí: nový papír, toaletní papír, lepenkové krabice, obaly na vajíčka atd.

Recyklace skla – Vytříděné sklo se rozdrtí a přidává do směsi na výrobu nového. Sklo se může recyklovat skoro donekonečna. Výrobky z recyklovaného skla: lahve na minerálky, na pivo a jiné skleněné výrobky.

Recyklace plastů - Plasty se vyrábí hodně způsoby a z odlišných materiálů. Proto také výrobků, u jejichž výroby se využívá recyklovaný plas, je mnoho. Z PET lahví se vyrábějí vlákna, která se používají jako výplň zimních bund nebo spacích pytlů. Ze sáčků a tašek se opět vyrábějí různé pytle a fólie. Pěnový polystyren slouží k výrobě speciálních cihel. Z plastových směsí se vyrábějí odpadkové koše, zahradní nářadí atd.

Recyklace kovů – Kovové odpady se odvázejí do hutí, kde se přetaví. Při teplotě 1700°C shoří nečistoty, které vytříděné kovy mohly obsahovat (zbytky barev, jídla atd.).

Výhody recyklace:

- úspora energie a surovin
- snížení devastace krajiny způsobené těžbou prvotních surovin
- menší spotřeba energie při výrobě druhotných surovin
- menší znečištění prostředí při výrobě druhotných surovin
- menší náklady na zpracování odpadu

Nevýhody recyklace:

- materiály nelze recyklovat donekonečna.
- většinu materiálů nelze vyrábět jen z recyklovaných surovin, musí být přidána i prvotní surovina
- některé výrobky neumíme dostatečně kvalitně recyklovat
- cena recyklovaného výrobku může být vyšší než cena výrobku z prvotní suroviny

➤ **Termické procesy – spalování, pyrolýza**

Pod výraz termické zneškodňování patří zejména spalování, zplyňování a zkapalňování. Termické procesy se mohou použít pro velmi široký okruh odpadů. Tímto způsobem lze využít energie nerostných či chemických látek obsažených v odpadu.

Spalování odpadu je v zásadě oxidace spalitelných látek v něm obsažených. Odpad je v podstatě vysoce heterogenní materiál, složený převážně z organických látek, minerálů, kovů a vody. Organické látky obsažené v odpadu budou hořet, pokud dosáhnou potřebné teploty vznícení a dostanou se do kontaktu s kyslíkem. Skutečný proces hoření proběhne v plynné fázi ve zlomku sekundy za současného uvolňování energie. Je-li výhřevnost odpadu dostačující a je dodáváno potřebné množství kyslíku, může dojít k tepelné řetězové reakci a tedy k samospalování. To znamená, že nenastane potřeba přídavku jiných paliv.

Pyrolýza je ekologicky vhodnější než spalování, protože méně znečišťuje ovzduší. Jde o tepelné zpracování vstupních látek v pyrolýzní peci při teplotě 250 °C – 1100 °C za nepřístupu či nedostatečného přístupu vzduchu.

Spalování lze rozdělit na následující pododvětví:

Spalování směsného komunálního odpadu – zpracování směsných a z velké části neupravených odpadů z domácností. Někdy může zahrnovat určité množství průmyslových odpadů. Ty pokud nejsou klasifikovány jako nebezpečné, jsou také spáleny.

Spalování předběžně upravených komunálních odpadů – zneškodnění odpadu o požadovaném, přibližně podobném složení. Požadované složení odpadu je zapotřebí ve spalovnách, kde se specificky upravený odpad používá jako palivo.

Spalování nebezpečných odpadů – zahrnuje spalování na průmyslových stanovištích. Jedná o spalování za velmi vysokých teplot, aby se co nejvíce eliminovalo množství vzniklých škodlivých látek, obsažených ve spalinách.

Spalování kalů z čistíren a odpadních vod – tento druh odpadu se může spalovat odděleně od ostatních druhů, nebo se může kombinovat s ostatními odpady určenými ke spálení (nejvíce s odpadem komunálním).

Spalovny klinických odpadů – v těchto spalovnách jsou zneškodňovány klinické odpady, pocházející z převážné části z nemocnic a jiných zdravotnických zařízení. Obvykle jsou umístěny přímo v nemocnicích, jako centrální zařízení, mohou být však přímo v místě vzniku odpadu. V některých případech mohou být určité druhy klinického odpadu upravovány spolu s odpadem komunálním.

Výhody termického zpracování:

- zmenšení objemu odpadu
- získaná energie
- relativně rychlé a efektivní

Nevýhody termického zpracování:

- vznikají škodlivé zplodiny, které unikají do ovzduší (dioxiny, furany aj.)
- ztráta odpadu, který by bylo možno recyklovat (ztráta surovin)

➤ **Skládkování**

Skládkování samo o sobě není likvidace odpadu. Je to pouze jeho uskladnění – čili odsunutí problému „jak s ním naložit“ na později. Legislativa přikazuje ukládat na skládky pouze zbytkový odpad. Tedy odpad, ze kterého se vytřídily materiály použitelné k látkovému nebo energetickému využití.

Podstatou skládky je oddělit odpad od okolního prostředí a eliminovat negativní vliv jeho toxických složek na okolní prostředí. Skládky jsou rozděleny do skupin, podle nebezpečnosti odpadu, který je na ně ukládán a dokonalosti oddělení těchto odpadů od okolního prostředí.

Největší hrozbou skládky je únik toxických látek do okolní půdy. Proto nejdůležitější zabezpečení skládky je těsnění dna. Těsnění je ve většině případů tvořeno minerální nepropustnou vrstvou a plastovým těsněním.

Skládka je dynamickým objektem, který podléhá po dlouhou dobu změnám. Dochází k mineralizaci odpadů, jejich vzájemným reakcím, chemickým, biologickým a fyzikálním pochodům. Výsledkem těchto činností je průsaková voda a skládkový plyn (bioplyn).

Skládkový plyn musí být z důvodu jeho hořlavosti odváděn z tělesa skládky a likvidován, popřípadě po úpravě energeticky využit. Způsob likvidace plynu, záleží na množství, ve kterém je produkován.

Těsnění skládky není nikdy stoprocentní, proto nedílnou součástí procesu skládkování, je odvod průsakových vod, které vznikají proplachováním tělesa skládky deštěm, nebo jako důsledek rozkladných procesů odpadů. Průsakové vody jsou odváděny vnitřním drenážním systémem do záchytné jímky, a po jejich rozboru musí být zneškodněny.

Technický život skládky po jejím naplnění končí rekultivací. Ta má zaručit, že i po ukončení provozu skládky se škodliviny uvnitř nedostanou do okolí, a je tu snaha o opětovné splynutí uzavřené skládky s okolím.

Podle kvality minerálního těsnění a plastové fólie se skládky dělí na:

Skládky určené pro nebezpečný odpad – nejlepší kvalita oddělení odpadu od okolního prostředí

Skládky určené pro ostatní odpad – mezi tento druh skládek patří skládky na komunální odpad

Skládky pro interní odpad

Výhody skládkování:

- jednoduchost odvozu a ukládání
- bioplyn je možné energeticky využít
- doposud jediná možnost jak zneškodnit některé typy odpadu
- nejdostupnější a relativně nejlevnější možnost zpracování komunálního odpadu (oproti vybudování nové recyklační nebo spalovací linky...)

Nevýhody skládkování:

- náročné na plochu i energii
- bioplyn je skleníkový plyn
- skládky zapáchají (s rostoucí teplotou), některé lehčí odpadky mohou odlétávat do okolí
- možná zdravotní rizika pro obyvatele v blízkosti skládek
- po uplynutí životnosti skládek je potřeba provést rekultivaci

➤ **Biotechnologie**

Tyto technologie jsou určeny pro biologicky rozložitelné odpady (některé z takovýchto odpadů se mohou využít jako biomasa).

Biotechnologie využívá biologické systémy, živé organismy nebo jejich části k určité výrobě, přeměně nebo jinému specifickému využití.

Kompostování - Je založeno na řízeném aerobním mikrobiálním rozkladu organické hmoty. Kompostováním se může zpracovávat např. kuchyňský odpad, papír, listí plevel atd. Vlastní proces kompostování probíhá na hromadě BRO, kde po určité době (v závislosti na velikosti hromady) vzroste teplota asi na 60°C. Při této teplotě dochází ke spolehlivé likvidaci nebezpečných organismů. Horké tlení v kompostu trvá několik dnů až týdnů a po té teplota plynule plesá. Materiál v kompostu zpracovávají nejružnější mikroorganismy zejména bakterie, houby, hmyz atd. Je jim tedy třeba zajistit optimální podmínky k životu (teplo, vlhkost vzduch, tma) pomocí promíchávání kompostu. Organická hmota je za pomoci mikroorganismů rozložena na složky vhodné k obohacení zeminy o živiny, používají se tedy jako hnojivo.

Anaerobní digesce – nebo-li fermentace (vyhňívání) je kontrolovaná mikrobiální přeměna organických látek bez přístupu vzduchu za vzniku bioplynu a digestátu. Proces fermentace je složitější než kompostování. Přítomné enzymy slouží jako katalyzátory. Před samotnou fermentací probíhá hydrolýza (hydrol. bakterie rozkládají organické polymery na vyšší organické kyseliny). Výsledkem fermentace je plyn, který se po dalších úpravách využívá jako energetická surovina.

Výhody biotechnologií:

- šetrné k přírodě
- ničí hnilobné a jedovaté látky
- objem odpadu klesá až o 50%
- tvoří humusové látky, které prospívají půdě, zvyšují odolnost proti chorobám rostlin, ničí semena plevelů

Nevýhody biotechnologií:

- bioplyn je skleníkový plyn
- v 1. fázi (termické) se z hromady kompostu uvolňuje zápachající plyn, který by měl být zachycen biofiltrem
- na kompostovacích linkách jsou: drtiče, překopávače (malé traktory), separační zařízení ... a jiné
- největší nároky jsou kladeny na dostatek vody

➤ **Další metody**

Do dalších metod likvidace odpadu patří zejména nakládání s nebezpečným odpadem, se kterým se nemůže nakládat žádnou z předchozích metod.

Jednou z takových metod je Vitrifikace - zalévání vysoce toxických a radioaktivních odpadů do sklovité hmoty. Tím se zabraňuje úniku účinné látky nebo záření. Konečné uložení takových odpadů se provádí na místech v bezpečné vzdálenosti od lidských sídel, vegetace, zdrojů povrchní i podzemní vody. Často se takový odpad ukládá do podzemních prostor. V podzemí pak čeká stovky a tisíce let, než dojde k rozpadu na neškodné látky.

Rozdělení způsobů nakládání s odpady dle platné legislativy

Výše uvedené způsoby nakládání s odpadem se podle platné legislativy rozdělují do tří skupin s označením R, D a N:

Skupina s označením R – Spadají sem způsoby zpracování, které se charakterizují *využitím* odpadu. Příklady podskupin, ve kterých množství zpracovaného odpadu přesáhlo 500 000 t/rok:

- R1: využití jako paliva nebo jiným způsobem k výrobě energie
- R4: recyklace kovů a kovových sloučenin
- R5: recyklace ostatních anorganických materiálů

Skupina s označením D – Spadají se způsoby, které vedou k *odstranění* odpadu. Příklady podskupin, ve kterých množství odstraněného odpadu přesáhlo 100 000 t/rok:

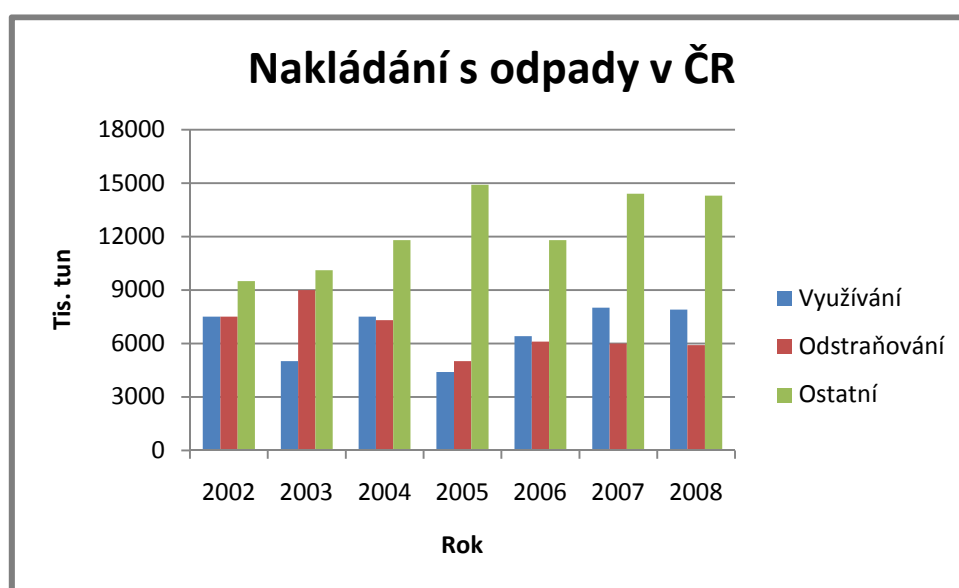
- D1: ukládání v úrovni nebo pod úrovní terénu
- D8: biologická úprava
- D9: fyzikálně chemická úprava

Skupina s označením N – Takto jsou označeny způsoby, které nespádají do dvou výše uvedených skupin, tedy způsoby *ostatní*. Příklady podskupin, ve kterých množství zpracovaného odpadu přesáhlo 1 000 000 t/rok:

- N1: využití odpadů na terénní úpravy
- N7: vývoz odpadu do členských zemí EU
- N10: prodej odpadu jako suroviny

Nakládání s odpady v ČR

V grafu 7 je znázorněný vývoj způsobů nakládání s odpady na území ČR rozděleným do skupin podle platné legislativy.



Graf 7: Přehled nakládání s odpady na území ČR v letech 2002-2008 [11]

1.5. Legislativa v ČR na úseku odpadového hospodářství

Legislativní předpisy platné na úseku odpadového hospodářství České republiky má v kompetenci převážně ministerstvo životního prostředí. Tyto legislativní předpisy, stejně jako všeobecně platná právní úprava v jiných oblastech, jsou z hlediska závažnosti a hierarchie platnosti členěny v podstatě do 2 skupin [1]:

- zákony
- prováděcí předpisy (nařízení vlády, vyhlášky), které blíže specifikují ustanovení zákona

1.5.1. Vývoj legislativy na úseku odpadového hospodářství v ČR

Vývoj legislativy před rokem 1989

Většina lidí se domnívá, že do roku 1989 se na problematiku odpadů nebral vůbec žádný zřetel. Je to velký omyl. Pomineme – li absenci ohledu na životní prostředí a nutné ideologické cíle, byly zákony vydané před rokem 1989 velmi moderní. V tehdejších

předpisech je možné nalézt řešení, které lze bez nadsázky pomocí dnešní terminologie implementovat jako předcházení vzniku odpadů, nebo jako čistší produkce atd. Překvapivé a nečekané řešení bylo také v otázce zpětného odběru nebo odděleného sběru některých výrobků a zařízení. [1,17]

Jeden z prvních právních předpisů zaměřující se na problematiku nakládání s odpady (vládní nařízení z roku 1940 o hospodaření s odpady) byl vydán v období protektorátní vlády z důvodů nedostatku surovin pro válečnou výrobu. Zákon se zaměřoval na odpady z domácností a podniků, zejména na jejich zpětný odběr a využití. [1,17]

V roce 1948 byl vyhlášen první pětiletý plán, který byl přijat zákonem č. 241/1948 o prvním pětiletém hospodářském plánu rozvoje československé republiky. Určoval směr hospodaření státu na období 1948 - 1953. Z pohledu dnešních priorit v odpadovém hospodářství lze v tomto zákoně najít moderní požadavky na stupňování hospodárnosti a snižování spotřeby surovin. Během platnosti tohoto zákona bylo vydáno ještě několik vládních nařízeních a vyhlášek, zaměřujících se na zpětný sběr, využívání odpadů a nakládání s ním. [1,17]

Dalšími zákony vydanými postupně v letech 1954, 1967, 1989 a 1990 a na ně navazujícími prováděcími předpisy se odpadové hospodářství dále formovalo ve smyslu materiálového využití surovin z odpadů, energetické hospodárnosti, atd. [1,17]

Z výše shrnutých dat je možné vyvodit závěr, a bližší prozkoumání právní úpravy před rokem 1989 tento závěr potvrdí, že „recyklační společnost“ není v žádném ohledu nový myšlenkový koncept. Na území České republiky byl uplatňován důsledně, pokud to bylo v zájmu potřeb hospodářství. [1,17]

Vývoj legislativy po roce 1989

Prvním právním předpisem po roce 1990, který dával hlubší řád problematice nakládání s odpady, byl zákon č. 238/1991 Sb., o odpadech. Později se ukázalo, že tento zákon vykazoval určité nedostatky. Tyto nedostatky, spolu s nutností harmonizovat právní předpisy ČR s předpisy EU (z důvodu podání žádosti ČR o členství v EU v lednu 1996), znamenaly schválení zákona č. 125/1997 Sb., o odpadech a jeho prováděcích předpisů, který nahrazoval zákon z roku 1991. Pozdější analýza vzájemného souladu tohoto zákona s předpisy EU ukázala ještě některé rozdíly a další nepřesnosti, které bylo nutné před vstupem do EU upravit. Na základě zjištěných nepřesností a na základě nových požadavků EU byl v roce 2001 schválen dodnes platný zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech ve znění pozdějších předpisů. Tento zákon byl v průběhu dalších sedmi let průběžně novelizován v závislosti na měnící se situaci v odpadovém hospodářství ČR a v závislosti na měnících se právních předpisech EU. [1]

V současnosti je v přípravné fázi nový zákon o odpadech, který MŽP předložilo k odborné diskusi.

1.5.2. Vybrané platné právní předpisy

V současné době jsou v platnosti dva zákony týkající se pouze odpadů a nakládání s nimi. Avšak zákonů, které se přímo nebo nepřímo dotýkají odpadového hospodářství, je více. Zejména pak zákony o ochraně ovzduší a vody. Podrobnější specifikace zákonů jsou stanoveny prováděcími předpisy vydávanými nařízením vlády nebo vyhláškou. [1]

Pro oblast nakládání s odpady a energetické využívání odpadů jsou v platnosti následující právní předpisy:

Zákony [18]

185/2001 Sb., Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů (úplné znění)

477/2001 Sb., Zákon o obalech a o změně některých zákonů (zákon o obalech)

76/2002 Sb., Zákon č. 76/2002 Sb., o integrované prevenci a omezení znečištění, o integrovaném registru znečišťování a o změně některých zákonů (zákon o integrované prevenci)

86/2002 Sb., Zákon o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší) ve znění pozdějších předpisů

Nařízení vlády [18]

184/2002 Sb., Nařízení vlády, kterým se zrušuje nařízení vlády č. 31/1999 Sb., kterým se stanoví seznam výrobků a obalů, na něž se vztahuje povinnost zpětného odběru, a podrobnosti nakládání s obaly, obalovými materiály a odpady z použitých výrobků a obalů

197/2003 Sb., Nařízení vlády o Plánu odpadového hospodářství České republiky

146/2007 Sb., Nařízení vlády o emisních limitech a dalších podmínkách provozování spalovacích stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší

206/2006 Sb., Nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 354/2002 Sb., kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu

351/2002 Sb., Nařízení vlády, kterým se stanoví závazné emisní stropy pro některé látky znečišťující ovzduší a způsob přípravy a provádění emisních inventur a emisních projekcí, ve znění nařízení vlády č. 417/2003 Sb.

354/2002 Sb., Nařízení vlády, kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu, ve znění nařízení vlády č. 206/2006 Sb.

372/2007 Sb., Nařízení vlády č. 372/2007 Sb., o národním programu snižování emisí ze stávajících zvláště velkých spalovacích zdrojů

417/2003 Sb., Návrh nařízení vlády, kterým se mění nařízení vlády č. 351/2002 Sb., kterým se stanoví závazné emisní stropy pro některé látky znečišťující ovzduší a způsob přípravy a provádění emisních inventur a emisních projekcí

597/2006 Sb., Nařízení vlády o sledování a vyhodnocování kvality ovzduší

615/2006 Sb., Nařízení vlády o stanovení emisních limitů a dalších podmínek provozování ostatních stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší

Vyhlášky [18]

294/2005 Sb., Vyhláška o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady

341/2008 Sb., Vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady)

351/2008 Sb., Vyhláška Ministerstva životního prostředí o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů

353/2005 Sb., Vyhláška, kterou se mění vyhláška č. 237/2002 Sb., o podrobnostech způsobu provedení zpětného odběru některých výrobků, ve znění vyhlášky č. 505/2004

Sb., a vyhláška č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů

374/2008 Sb., Vyhláška o přepravě odpadů a o změně vyhlášky č. 381/2001 Sb., kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů), ve znění pozdějších předpisů

376/2001 Sb., Vyhláška Ministerstva životního prostředí a Ministerstva zdravotnictví o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů

381/2001 Sb., Vyhláška Ministerstva životního prostředí, kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů)

383/2001 Sb., Vyhláška MŽP o podrobnostech nakládání s odpady

341/2008 Sb., Vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady

237/2002 Sb., Vyhláška Ministerstva životního prostředí o podrobnostech způsobu provedení zpětného odběru některých výrobků

13/2009 Sb., Vyhláška o stanovení požadavků na kvalitu paliv pro stacionární zdroje z hlediska ochrany ovzduší

205/2009 Sb., Vyhláška o zjišťování emisí ze stacionárních zdrojů a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší

362/2006 Sb., Vyhláška o způsobu stanovení koncentrace pachových látek, přípustné míry obtěžování zápachem a způsobu jejího zjišťování

Seznam prováděcích předpisů, který je zde uveden není úplný. Jsou zde uvedeny prováděcí předpisy, které mají určitou spojitost s řešeným tématem. Kompletní přehled platné legislativy týkající se odpadového hospodářství se nachází na stránkách MŽP: www.env.cz

1.5.3. Emisní limity

Dle §4 odst. 8 zákona č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů (zákon o ochraně ovzduší) ve znění pozdějších předpisů, patří spalovny odpadů do kategorie zvláště velkých nebo velkých stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší. Na základě tohoto zařazení pro ně platí emisní limity uvedené v tab. 2 a majitelé jsou povinni odvádět poplatky za množství vypouštěných nebezpečných látek do ovzduší dle tab. 3. [19]

Složka	Jednotky	Emisní limity
TZL	mg/Nm ³	10
CO	mg/Nm ³	50
TOC	mg/Nm ³	10
PCDD/F	ngTEQ/Nm ³	0,1
Hg	mg/Nm ³	0,05
Další těžké kovy	mg/Nm ³	0,55
HCl	mg/Nm ³	10
HF	mg/Nm ³	1
SO₂	mg/Nm ³	50
NO₂	mg/Nm ³	200

Tab. 2: Emisní limity [20]

Hodnoty uvedené v tab. 2 jsou stanoveny nařízením vlády č. 354/2002 Sb. a charakterizují maximální povolené průměrné denní hodnoty.

Znečišťující látka	Sazba (Kč/t)
TZL	3000
SO₂	1000
NO_x	800
Těkavé organické látky	2000
Těžké kovy a jejich sloučeniny	20 000
Amoniak	600
Methan	1000
CO	1000
Polycyklické aromatické uhlovodíky	20 000

Tab. 3: Výše poplatků za vybrané látky unikající do atmosféry [19]

1.5.4. Možné dotace spojené se spalování SKO

Dotace týkající se životního prostředí (a tedy odpadů a nakládání s nimi) jsou udělovány prostřednictvím Operační program Životní prostředí, který připravil Státní fond životního prostředí a Ministerstvo životního prostředí ve spolupráci s Evropskou komisí.

Operační program Životní prostředí nabízí v letech 2007 - 2013 z evropských fondů (konkrétně Fondu soudržnosti a Evropského fondu pro regionální rozvoj) přes 5 miliard euro na podporu konkrétních projektů v těchto sedmi oblastech [21]:

- Prioritní osa 1: Zlepšování vodohospodářské infrastruktury a snižování rizika povodní
- Prioritní osa 2: Zlepšování kvality ovzduší a snižování emisí
- Prioritní osa 3: Udržitelné využívání zdrojů energie
- Prioritní osa 4: Zkvalitnění nakládání s odpady a odstraňování starých ekologických zátěží
- Prioritní osa 5: Omezování průmyslového znečištění a environmentálních rizik
- Prioritní osa 6: Zlepšování stavu přírody a krajiny
- Prioritní osa 7: Rozvoj infrastruktury pro environmentální vzdělávání, poradenství a osvětu

Spalování odpadů (spadající do prioritní osy 4 příp. 6) však nebylo do konce roku 2009 podporováno dotacemi. Bylo to způsobeno nejasným postojem EU k tomuto způsobu nakládání odpadů. Ten se změnil v listopadu 2008, kdy byla schválena Rámcová směrnice EU o odpadech č. 75/442/ES, která musí být implementována do legislativních dokumentů ČR do konce tohoto roku. MŽP tedy připravuje novelu zákona o odpadech (tzv. euronovela). [22]

Nová Rámcová směrnice EU o odpadech přinesla novou filozofii v hierarchii nakládání s odpady a podpořila také energetické využití odpadu, což v konečném důsledku znamená, že se energetické využívání odpadu stalo, spolu s recyklací, kladným způsobem nakládání s odpady. To vedlo k přehodnocení pohledu státních orgánů (zejména MŽP) na spalování odpadu (za účelem výroby elektrické energie a tepla) a následnému umožnění čerpání dotací (státních i z fondů EU) na jejich výstavby. [21,22]

Dne 14.12.2009 vyhlásilo Ministerstvo životního prostředí a Státní fond životního prostředí České republiky již XV. výzvu pro podávání žádostí o poskytnutí podpory v rámci Operačního programu Životní prostředí. Tento dokument (poprvé v historii Operačního

programu Životní prostředí) umožňuje čerpání finanční podpory pro výstavbu zařízení na spalování SKO za účelem využití energie v rámci prioritní osy 4. [21]

XV. výzva pro podávání žádostí o poskytnutí podpory se vztahuje na individuální a tzv. velké projekty (celkové náklady na 25 mil. eur včetně DPH). Podmínky pro podávání žádostí jsou uvedeny ve Směrnici MŽP č. 12/2009. Všechny závazné dokumenty jsou k dispozici na internetových stránkách OPŽP www.opzp.cz. [21]

Projektové žádosti je třeba doručit na centrální pracoviště SFŽP ČR, Olbrachtova 2006/9, 140 00 Praha 4, nejpozději do 16.00 hodin posledního dne výzvy, tj. do 30. 6. 2011. [21]

Výše podpory se stanovuje na základě výběrových (hodnotících) kritérií, jejichž důležitost je stanovena bodovým hodnocením. Kritéria i bodové hodnocení, stejně jako návody k podání žádostí atd. jsou k dispozici na stránkách Operačního programu Životního prostředí: www.opzp.cz.

2. SPALOVÁNÍ (ENERGETICKÉ VYUŽÍVÁNÍ) ODPADŮ

Spalování odpadu, prvně zavedené v Anglii v 80. letech 19. stol., bylo dalším velice důležitým mezníkem v utváření efektivního systému nakládání s odpady. Do té doby byl zaveden jediný způsob nakládání s odpady – skládkování, které bylo zprvu dostačující. Stále se zvyšující objem produkovaných odpadů však znamenal, kolem roku 1870, první problémy s kapacitou skládek. Logické řešení tohoto problému bylo spalování odpadu, kterým se radikálně zmenšil jeho objem. [22]

Spalovny odpadů se začaly poměrně rychle rozmáhat a v roce 1892 bylo pouze v Anglii na 52 spaloven. Zbytek Evropy nezůstával pozadu. Spalovny byly zbudovány v Německu, Švýcarsku a v roce 1905 také v Čechách v Brně. Jednalo se o vůbec první spalovnu na území tehdejší Rakousko-Uherské monarchie, která již v té době využívala spalování odpadu k výrobě elektrické energie. [22]

Na počátku spalování odpadů nebyl hlavní důvod využití odpadu (jako palivo – k výrobě el. či tepelné energie), ale pouze zmenšení jeho objemu. V dnešní době se hovoří o odpadech jako o jednom z možných alternativních zdrojů sloužících k výrobě elektrické nebo tepelné energie. Že tento zdroj energie není zanedbatelný, dokazuje např. Brněnská spalovna, která je s kapacitou 220 000 t spáleného odpadu ročně, schopna produkovat asi 690 000 GJ tepla a 94 500 MWh elektřiny. Spalování odpadů je tedy považováno za velice důležitý a přínosný proces jak z pohledu výroby elektrické a tepelné energie, tak z pohledu odpadového hospodářství resp. zmenšování objemu odpadů ukládaných na skládky. Důkazem významnosti spalování odpadů (za účelem výroby elektrické a tepelné energie) je také fakt, že EU přiřadila spalování odpadů vedoucí k jejich energetickému využití stejnou důležitost, jakou má využití materiálové – recyklace. [22,23]

2.1. Základní fakta

Spalování odpadů se používá jako jedna z metod zpracování odpadů velmi rozmanitého složení.

2.1.1. Hlavní odvětví spalování odpadů

Účinnost neutralizace škodlivých látek uložených v odpadech je převážně závislá na teplotě, při které dochází ke spalování odpadů. Tzn., čím vyšší teplota spalování tím nebezpečnější odpad je možné zneškodňovat. Nejjednodušším řešením se tedy jeví spalovna odpadů s teplotou spalování zaručující zneškodnění všech nebezpečných látek (kolem 2200°C) a s kapacitou dovolující zneškodňování velkého množství všech možných odpadů (300 000 – 400 000 t/rok). Ovšem v minulosti nebyly technologie na takové úrovni, aby bylo možné zařízení daného typu vyprojektovat a následně projekt realizovat. Dnes jsou příslušné technologie k dispozici, avšak investice do takového projektu přesahují mez únosnosti.

Spalování odpadů se tedy rozčlenilo do pododvětví, které se dělí zejména podle účelu spaloven, resp. odpadů, které se v nich zneškodňují [8]:

- **Spalování směsného komunálního odpadu:** zpracování neupraveného odpadu pocházejícího z domácností a městského odpadu. Je zde možno spalovat také živnostenský a průmyslový odpad, který není klasifikován jako nebezpečný.

- **Spalování předběžně upravených odpadů:** zařízení, ve kterém se spalují vytríděné složky odpadu, odpad předběžně upravený a připravený takovým způsobem, že se jeho charakteristiky liší od KO.
- **Spalování nebezpečných odpadů:** spalování v obchodních podnicích a na průmyslových stanovištích. Slouží ke zpracování širokého okruhu odpadů.
- **Spalování kalů z čistíren a odpadních vod:** kaly z čistíren a odpadních vod jsou v některých lokalitách spalovány v určených zařízeních.
- **Spalování klinických odpadů:** zpracování odpadů obvykle pocházejících z nemocnic a jiných zdravotnických zařízení.

V kapitole 1.2. je vysvětlen přínos znalosti složení spalovaného odpadu. Této znalosti se využívá zejména u projektování spaloven sloužících ke zpracování předběžně upravených odpadů, kalů z čistíren a odpadních vod a klinických odpadů. U takovýchto typů spaloven je technologický návrh termické části a systému čištění spalin přizpůsoben danému složení odpadů a jsou tedy ušetřeny náklady spojené s aparáty, které nejsou v daném zařízení nezbytně nutné.

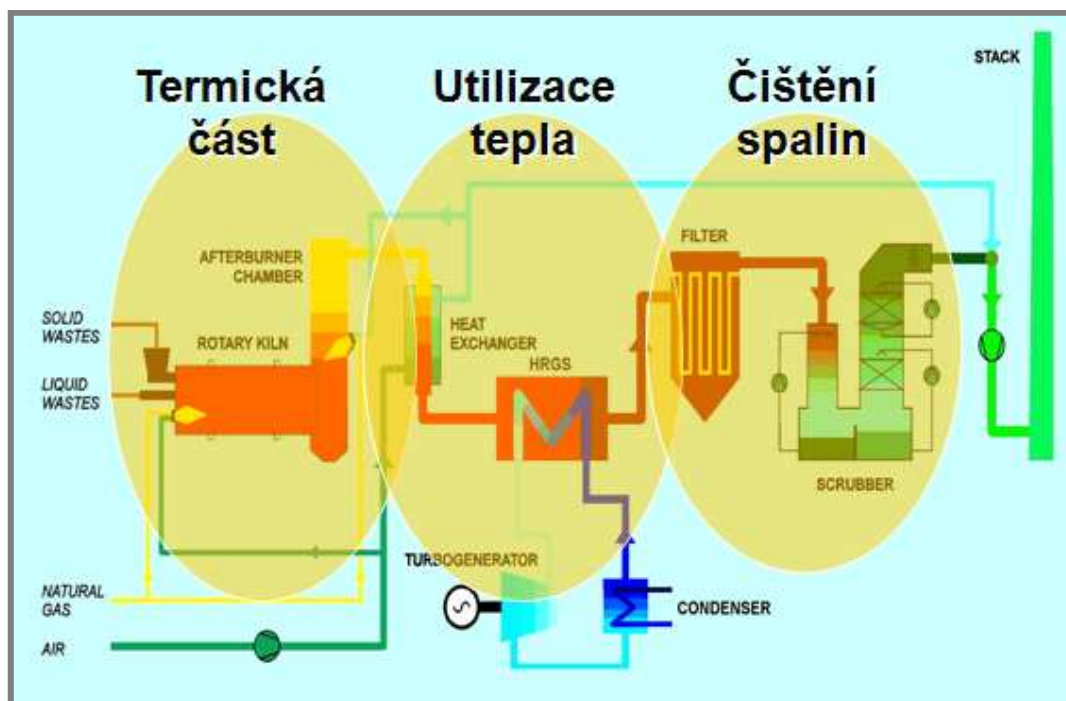
Oproti tomu, spalovny určené ke spalování KO a NO jsou univerzálnější. Složení KO je velice různorodé a proto systém čištění spalin musí být navržen tak, aby byl schopen zbavit spaliny nežádoucích látek, které vznikají spalováním většiny známých odpadů, s výjimkou NO.

Nejuniverzálnější jsou ovšem spalovny NO. Látky, které NO obsahují, jsou většinou zneškodněny až při vyšších spalovacích teplotách (1200°C – 1400°C) a tomu musí odpovídat návrh termické části spalovny.

2.1.2. Hlavní technologické procesy

Vlastní spalování (tepelný rozklad odpadu) probíhá pouze v termické části, která je jednou ze tří částí procesu sloužícího ke zpracování odpadů produkovaného společností. Vedle termické části jsou tu další, které mají odlišný hlavní účel, avšak jako technologický celek tvoří komplexní metodu zpracování velmi širokého okruhu odpadů s následnou možností využití energie vzniklé při vlastním spalování. Spalovnu jako takovou můžeme tedy rozdělit na dvě respektive tři základní části (obr. 1) [24]:

- **Termická část:** zabezpečuje vlastní spalování odpadů
- **Systém utilizace tepla:** přeměňuje tepelnou energii uloženou ve spalinách na energii elektrickou nebo tepelnou
- **Systém čištění spalin:** zabezpečuje odstranění škodlivých a nebezpečných látek ze spalin



Obr. 1: Hlavní technologické uzly spalovny odpadů [24]

Vlastní spalování

Spalování odpadů je z chemického hlediska termooxidační proces, při kterém dochází k oxidaci biogenních (organických) prvků (C, S, N) uložených v odpadu za uvolnění tepla (exotermická reakce). Energetické využití odpadů tedy představuje využití jejich energetického potenciálu. [25]

Organické látky v odpadu uložené budou hořet za předpokladu dosažení teploty vznícení a přísunu kyslíku. Proces hoření jako takový proběhne již v plynné fázi a trvá řádově několik milisekund, přičemž se uvolňuje energie. Za určitých předpokladů, zejména pak dobré výhřevnosti odpadů a nepřetržitého přísunu kyslíku, může dojít k tepelné řetězové reakci a tedy samospalování, což znamená, že do procesu není zapotřebí dodávat jiných paliv.

Vlastní spalování lze rozdělit na tři hlavní stupně [24]:

➤ **Proces sušení a odplynění:**

Při teplotách 100 - 300°C je změněn těkavý obsah organických látek (např. voda, uhlovodíky). Tento stupeň nevyžaduje žádná oxidační činidla, pouze dodávky tepla.

➤ **Proces pyrolýzy a zplyňování:**

Pyrolýzou se rozumí další rozklad organických látek za nepřítomnosti oxidačních činidel v rozmezí teplot 250 – 700°C. Zplyňování je proces, při kterém reaguje zbytkový odpad resp. uhlíkaté zbytky obsažené v odpadu s vodní parou a CO₂ při teplotě 200 – 1600°C (v závislosti na druhu spalovny a tedy spalovaném odpadu). Zde jsou již kromě teploty činiteli reakce voda, pára a kyslík. Tímto způsobem jsou tuhé organické materiály převedené do plynné fáze.

➤ **Proces oxidace:**

Hořlavé plyny, které vznikly v předchozích dvou stupních, oxidují v závislosti na vybrané metodě spalování. Teploty spalin se obecně pohybují v rozmezí 800 – 2000°C.

Využití energie

Spalování je exotermický (teplo produkující) proces. Převážná většina produkované tepelné energie přechází do spalin, ze kterých se, za pomoci vhodně zvolených technologií, tato energie může opět odebrat a následně využít. K tomuto účelu se v naprosté většině případů používá spalinový kotel, ve kterém dochází k předávání tepelné energie spalin jinému médium a tedy k jejich ochlazení. Jako médium se nejčastěji používá voda, která uvnitř kotle přechází v páru. Ta se v zásadě využívá na výrobu a dodávku tepla či teplé vody, elektrické energie, popřípadě je možná kombinace obou způsobů.

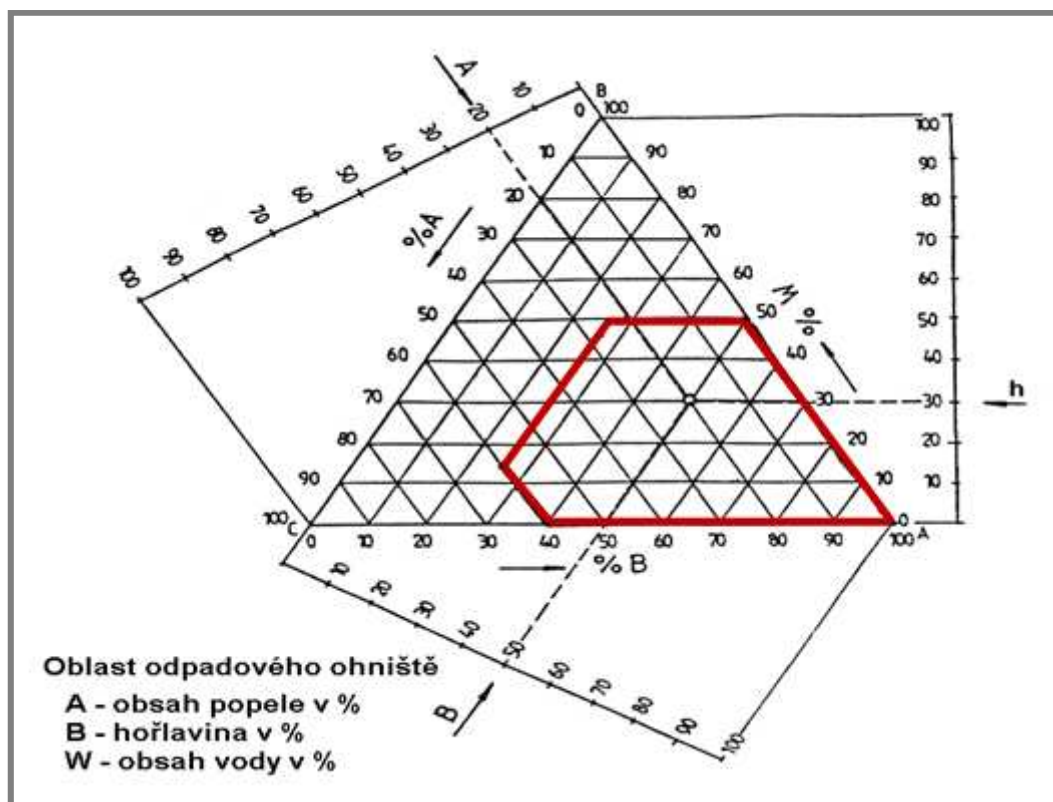
Čištění spalin

Při ideálním spalování dokonale shoří veškeré nežádoucí látky. Reálné spalovací procesy však neprobíhají za ideálních podmínek, a proto spaliny obsahují látky, které jsou produktem nedokonalého spalování. Spaliny vycházející z pece jsou silně znečištěny popílkem (drobné prachové částice), nebezpečnými organickými látkami (dioxiny) a jedovatými plynnými zplodinami jako jsou oxid siřičitý, zbylé oxidy dusíku, chlorovodík a jiné. Naprostou většinu těchto látek je nutné ze spalin odseparovat, a to do té míry, aby následná měření koncentrace nežádoucích látek ve spalinách na výstupu z komína nevykazovala překročení povolených emisních limitů. Hodnoty emisních limitů spolu se sankcemi za jejich nedodržení jsou uvedeny v kapitole 1.5.3. [24]

2.1.3. Odpad jako palivo

Odpady lze považovat za méněhodnotné palivo, které se vyznačuje značnou nehomogenitou. To platí zejména u odpadů komunálních, jejichž složení (z hlediska složek) je velice různorodé. Naštěstí u KO určených k termickému využití není nezbytně nutné znát jejich morfologické nebo elementární složení (příklad takového složení KO vybraného vzorku je uveden v kap. 1.2.).

Pro potřeby termického zpracování odpadu je důležitý spíše jeho energetický potenciál, a tedy znalost tzv. jakosti paliva – odpadu. Ta je charakterizována (stejně jako u každého jiného paliva) obsahem popeloviny, hořlaviny a vody (obr. 2). Při určitém poměru těchto tří složek (červeně vyznačená oblast na obr. 2) je odpad schopen samostatného hoření (za předpokladu dostatečného přísunu kyslíku a při dosažení zápalné teploty). Je-li obsah popelovin nebo vody větší než uvedené hodnoty, je nutné do procesu dodávat přídatné palivo. [26]



Obr. 2: Jakost paliva [26]

Z obr. 2 je dále patrné, že co se týká vlastního hoření, jsou nejdůležitější zejména obsah hořlaviny v odpadu a jeho vlhkost. Tyto dvě složky se zároveň nejvíce promítnou do výpočtu celkové výhřevnosti spalovaného odpadu, a to tak, že hořlavina pozitivně (exotermické reakce) a vlhkost negativně (endotermické reakce).

Tepelný potenciál hořlaviny závisí především na hmotnostním obsahu C, H, O, N a S v hořlavině (pro KO – tab. 4). Protože u jednotlivých materiálů je obsah těchto složek skoro neměnný, můžeme konstatovat, že pro jednotlivá paliva nabývá tepelný potenciál konstantních hodnot. Výjimkou nejsou ani KO u kterých byl tepelný potenciál hořlaviny stanoven přibližně na 20 MJ/kg. Celková výhřevnost KO lze tedy vyjádřit pouze v závislosti na jeho vlhkosti. Graf znázorňující závislost výhřevnosti vybraných druhů paliv (včetně KO) na jejich vlhkosti je uveden v příloze 1. [24,26]

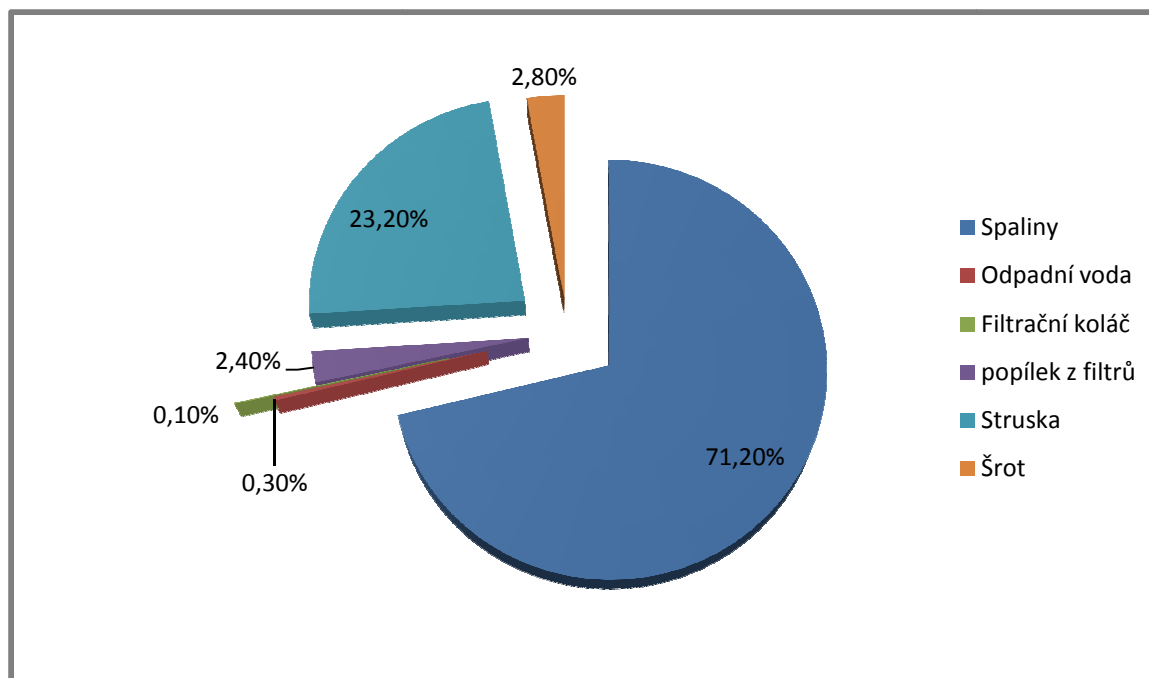
Prvek	(% hm.)
C	45-70
H	5-10
N	1-3
O	10-30
S	0,1-3

Tab. 4: Typické složení hořlaviny KO [24]

2.1.4. Environmentální problémy

Spalování odpadů (stejně jako jakékoli jiné spalování) je proces, při kterém se termicky zneškodňovaný odpad přeměňuje na produkty spalování za uvolnění energie. Jaké množství a jak nebezpečné budou produkty spalování, závisí na složení spalovaného odpadu a

provozních podmínkách spalovny (technologie, teploty spalování atd.). Rozdělení produktů spalování při termickém zneškodňování KO je znázorněno v grafu 8.



Graf 8: Produkty spalování [7]

Nejnebezpečnější pro životní prostředí jsou (jak z pohledu množství tak obsahem nebezpečných látek) spaliny. Při plně oxidačním spalování jsou výslednými složkami spalin vodní pára, oxid uhličitý a kyslík. Reálné spalovací procesy však neprobíhají za ideálních podmínek a dochází k tvorbě nežádoucích složek (tab. 5). Právě tyto složky mají nežádoucí vliv na životní prostředí a člověka samotného. Prostředky udržující množství nežádoucích látek ve spalinách na přijatelné úrovni jsou zejména legislativního charakteru. Např. nařízení vlády č. 354/2002 kterým se stanovují emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu (kap. 1.5.3.). K dodržení těchto limitů je zapotřebí instalovat technologie čištění spalin (kap. 2.3.2.). Příklad množství nebezpečných látek obsažených ve spalinách po vyčištění je uveden v tab. 5. [7]

Složka	Jednotky	Před vyčištěním	Po vyčištění
TZL	mg/Nm ³	1000-5000	1,6
CO	mg/Nm ³	5-50	5,2
TOC	mg/Nm ³	1-10	0,8
PCDD/F	ngTEQ/Nm ³	0,5-10	0,076
Hg	mg/Nm ³	0,05-0,5	0,0325
Další těžké kovy	mg/Nm ³	<50	0,0418
HCl	mg/Nm ³	500-2000	1,02
HF	mg/Nm ³	5-20	0,28
SO₂	mg/Nm ³	200-1000	2,1
NO₂	mg/Nm ³	250-500	212

Tab. 5: Nebezpečné složky obsažené ve spalinách před vyčištěním a po vyčištění [8,27]

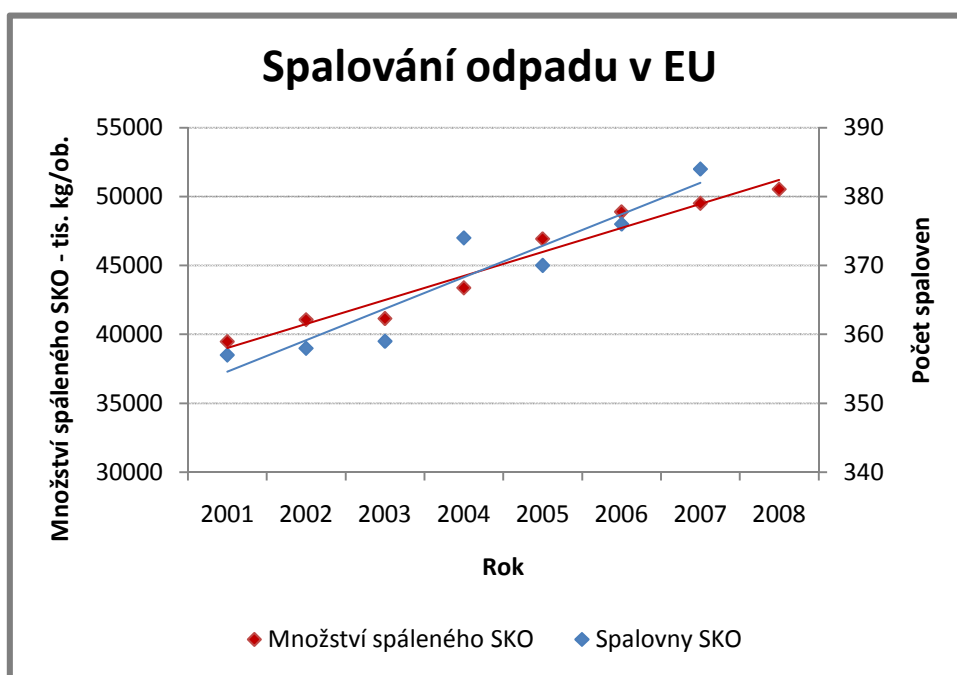
Hodnoty znázorňující koncentraci složek ve spalinách po vyčištění byly naměřeny 5.6.2006 v Liberecké spalovně KO.

2.2. Spalování komunálních odpadů v ČR a EU

Za posledních 15 let se zvýšilo množství KO zpracovaných termickou cestou za účelem výroby elektrické nebo tepelné energie ze 160 mil. na 200 mil. tun za rok ve více než 800 spalovnách po celém světě. Během příštích 5-ti let se předpokládá další navýšení na 240 mil. tun spáleného odpadu ročně. Spalování odpadů se tímto stalo jedním z nejrychleji celosvětově expandujících odvětví. [28]

Spalování odpadů v EU

V současné době je v EU v provozu na 390 spaloven odpadů s celkovou kapacitou přes 50 mil. tun spáleného odpadu za rok. Jejich počet (a tedy také kapacita) každým rokem stoupá (graf 9) a to zejména z důvodu postoje EU k upřednostňovaným způsobům nakládání s odpadem. Svoje stanovisko v této otázce dala EU jasně najevo v roce 1999, kdy Rada Evropského společenství vydala směrnici 99/31/ES o skládkách odpadů, jenž nařizuje členskými státy postupně snižovat procento odpadů ukládaných na skládky a následně tento způsob vůbec nepraktikovat. [28,29]



Graf 9: Množství spáleného odpadu a počet spaloven v EU (2001-2008) [29]

Skutečnost, že EU počítá se spalováním odpadů jako s jedním z hlavních způsobů nakládání s odpady, potvrdil v červnu 2008 také Evropský parlament, který nově definoval spalování odpadů za účelem využití energie jako „využití“ a ne jako „odstranění“ odpadů.

Spalování odpadů v ČR

Rozhodnutí Evropského parlamentu se odrazilo také v právní úpravě odpadového hospodářství ČR, kdy změna Plánu odpadového hospodářství ze dne 31.12.2009 umožňuje podporu výstavby spaloven KO za pomoci státních prostředků.

SPALOVÁNÍ (ENERGETICKÉ VYUŽÍVÁNÍ) ODPADŮ

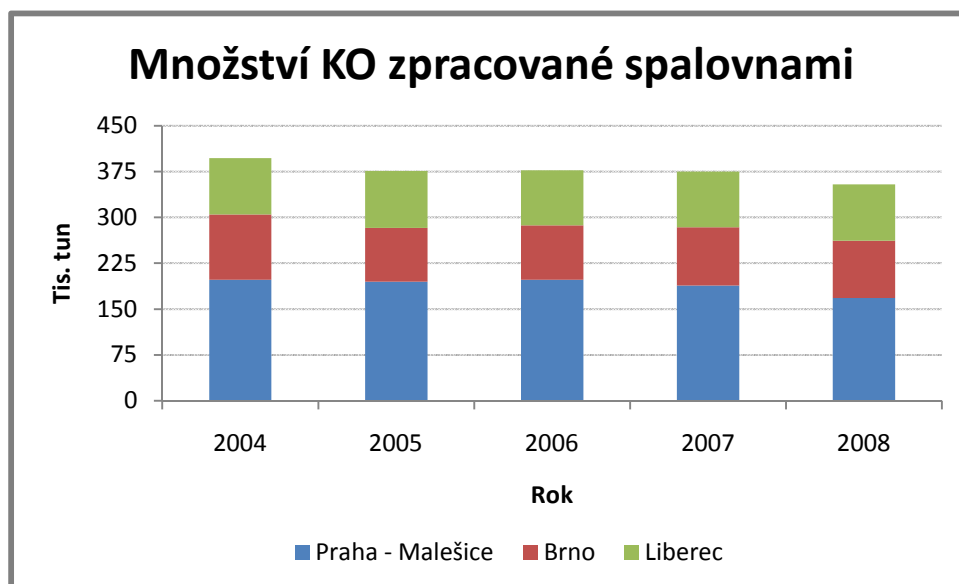
Na území ČR jsou v provozu tři spalovny KO s celkovou kapacitou 646 000 t/rok. Ve všech třech se využívá teplo odvedené spalinami k výrobě elektrické, popřípadě tepelné energie. Základní parametry spaloven jsou uvedeny v následující tabulce. [23]

	BRNO	PRAHA - Malešice	LIBEREC
Společnost	SAKO a.s.	Pražské služby a.s.	TERMIZO a.s.
Od roku	1989	1998	1999
Kapacita	45 t/h 220 000 t/rok	60 t/h 310 000 t/rok	12 t/hod 96 t/rok
Max. tepelný výkon	27,4 MW	35 MW	24 MW
Produkce tepelné energie	690 000 GJ/rok	900 000 GJ/rok	610 000 GJ/rok
Max. elektrický výkon	20 MW	17,44 MW	2,5 MW
Produkce el. energie	94 500 MWh/rok	90 000 MWh/rok	20 000 MWh/rok

Tab. 6: Přehled spaloven KO v ČR. [25,27,30]

Kromě tří výše uvedených spaloven KO je na území ČR dále v provozu 38 spaloven NO.

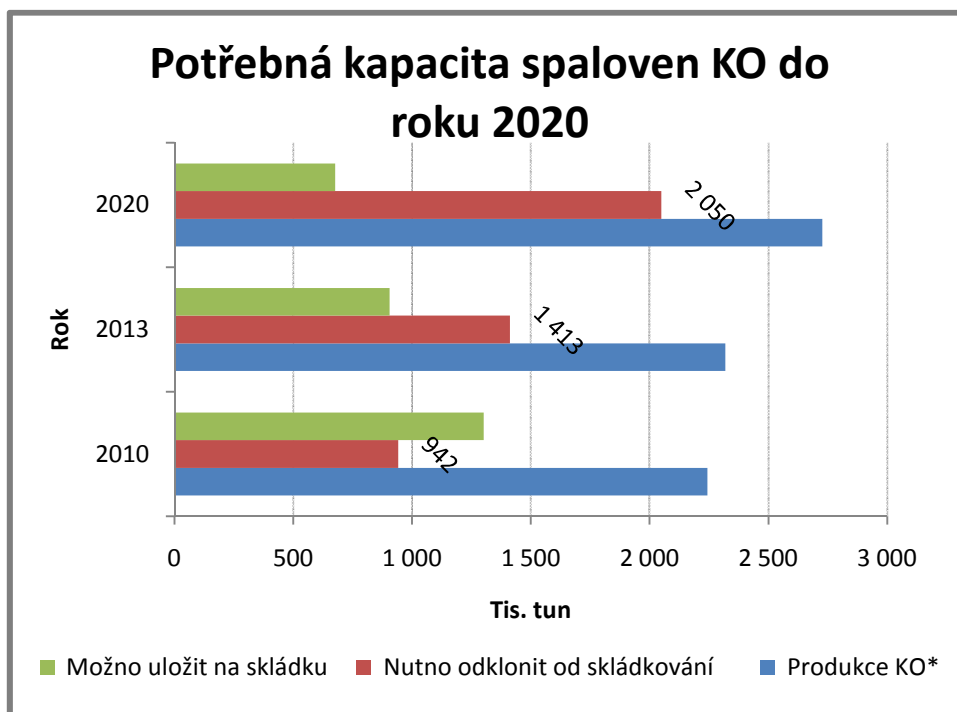
V roce 2008 činil objem komunálních odpadů upravených spalováním 354 tis. tun, tj. pouze 55% využití kapacity spaloven KO. Objem odpadů zpracovaných touto cestou navíc každoročně klesá (graf 10). Tato skutečnost je způsobena především dosavadním vývojem cenové politiky ČR na úseku odpadového hospodářství, respekt. nastavením nízkých poplatků za ukládání odpadů na skládku. Celkové náklady na zbudování a následný provoz skládky jsou mnohem menší, než náklady spojené s výstavbou a provozem spalovny KO. Je tedy logické, že bez zásahu státních orgánů, a tedy regulací cen v oblasti odpadů ukládaných na skládky, nebudou spalovny KO konkurence schopné.



Graf 10: Objem KO zpracovaného termickou cestou v ČR [11]

Tento trend se s největší pravděpodobností v následujících letech otočí, a to zejména díky již zmíněné změně postoje jak EU, tak vlády ČR k termickému způsobu zpracování odpadů za účelem využití energie v odpadech uložené.

Avšak aby ČR byla schopna splnit požadavky EU týkající se omezení skládkování KO na minimum (směrnice 99/31/ES o skládkách odpadů), nestačí nynější trend spalování KO pouze obrátit a naplno využívat kapacit stávajících spaloven KO. Bude nutné (jak ukazuje graf. 11) maximální kapacitu spaloven navýšit, a to zhruba 3 krát tedy na 2 mil. t/rok. [22]



Graf 11: Množství KO, které je potřeba odvrátit od skládkování do roku 2020 (hodnoty jsou uvedeny po vyřídění materiálově využitelných složek a BRKO) [22]

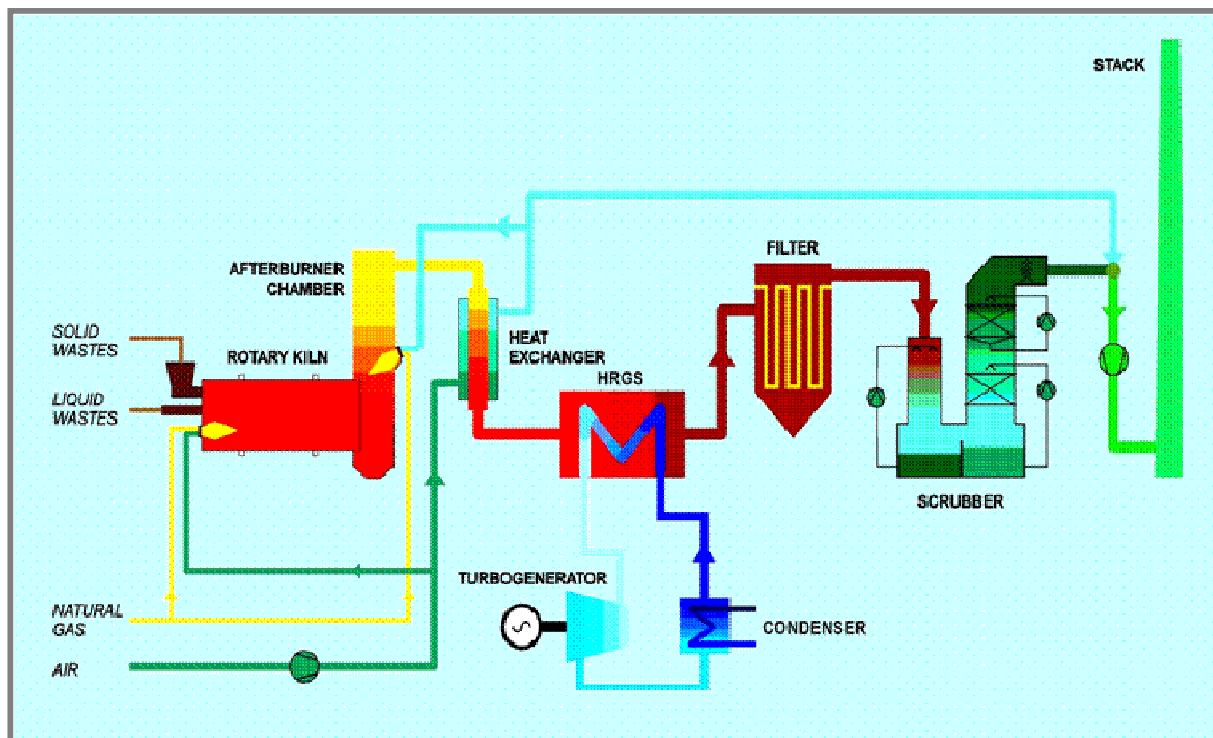
Z grafu 11 je dále zřejmé, že ČR s celkovou kapacitou spaloven KO 646 tis. t/rok, není schopna dodržet povinnost vyplývající ze směrnice 99/31/ES o skládkách odpadů již v roce 2010.

2.3. Stávající technologie

Tato kapitola je sestavena převážně z podkladů [8].

Tepelné zpracování odpadů zaznamenává největší rozvoj (z pohledu používaných technologií) v posledních dvaceti letech. Je to dáno zejména změnou postoje k environmentálním problémům, resp. stále se zvyšujícím úsilím o celkovou ochranu životního prostředí, což se promítá do legislativních předpisů jednotlivých států. Aby bylo možné plnit stále se zpřísňující legislativní požadavky, bylo a je nezbytně nutné zavádět nové technologie zaručující jejich dodržení.

Trvale se zvyšující nároky na odstranění škodlivých látek ze spalin, tlak různých organizací poukazující na fakt, že pouhé spálení odpadu, bez výroby tepelné nebo elektrické energie, je ve skutečnosti pouze ukončení životnosti materiálů atd. Tyto a další faktory měly výrazný vliv na vývoj technologie spaloven odpadů do dnešní podoby. Na obr. 3 je příklad spalovny komunálních odpadů, která disponuje již dvěma stupni čištění spalin a parní turbínou, jež zajišťuje výrobu elektrické energie.



Obr. 3: Schéma spalovny odpadů [24]

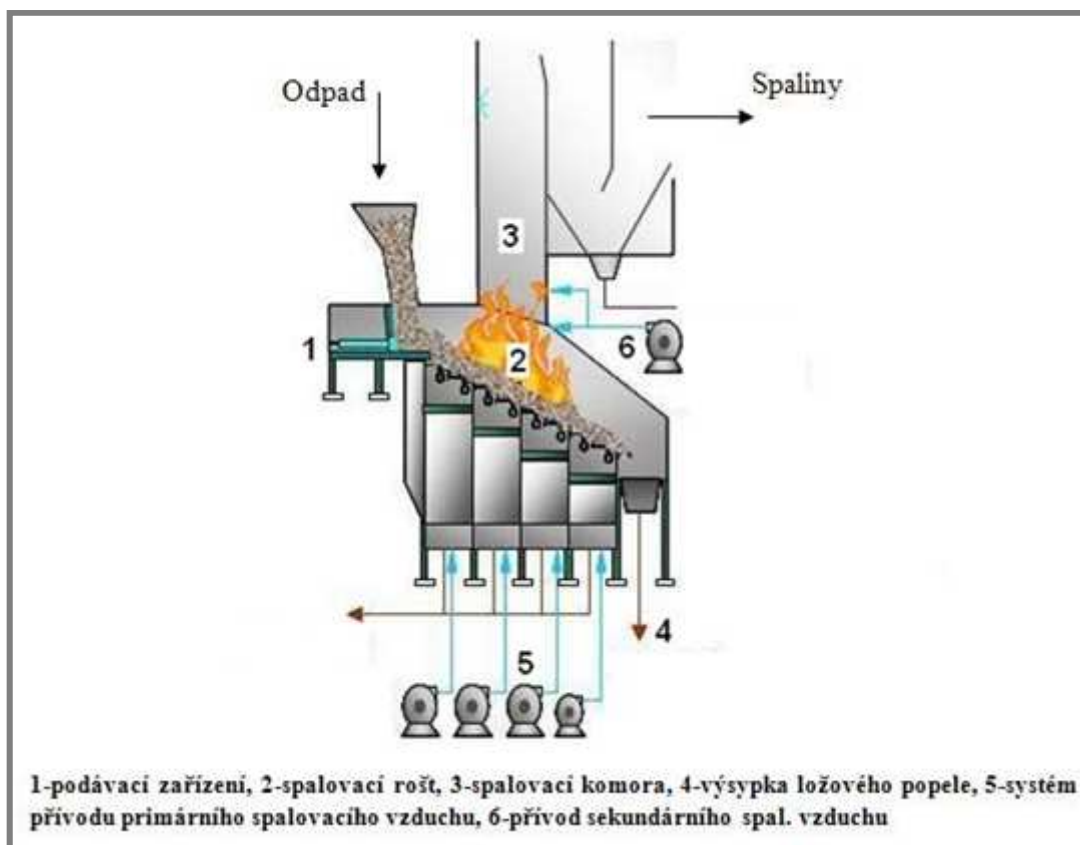
Následný přehled používaných technologií je rozdělen do tří podskupin, dle hlavního účelu daných technologií (kap. 2.1.2.).

2.3.1. Stupeň tepelného zpracování

K tepelné úpravě KO se v EU používají zejména dva typy pecí, přičemž převážná část konstrukcí spalovacích komor určených ke spalování KO je řešena roštovým topeništěm (cca 90%). Druhá nejčastěji se vyskytující technologie používaná k tepelné úpravě KO jsou rotační pece. Ostatní typy pecí, jako je pec s fluidním ložem či systémy zplyňování a pyrolýzy se používají převážně ke zpracování jiných typů odpadů.

➤ *Roštové spalovny*

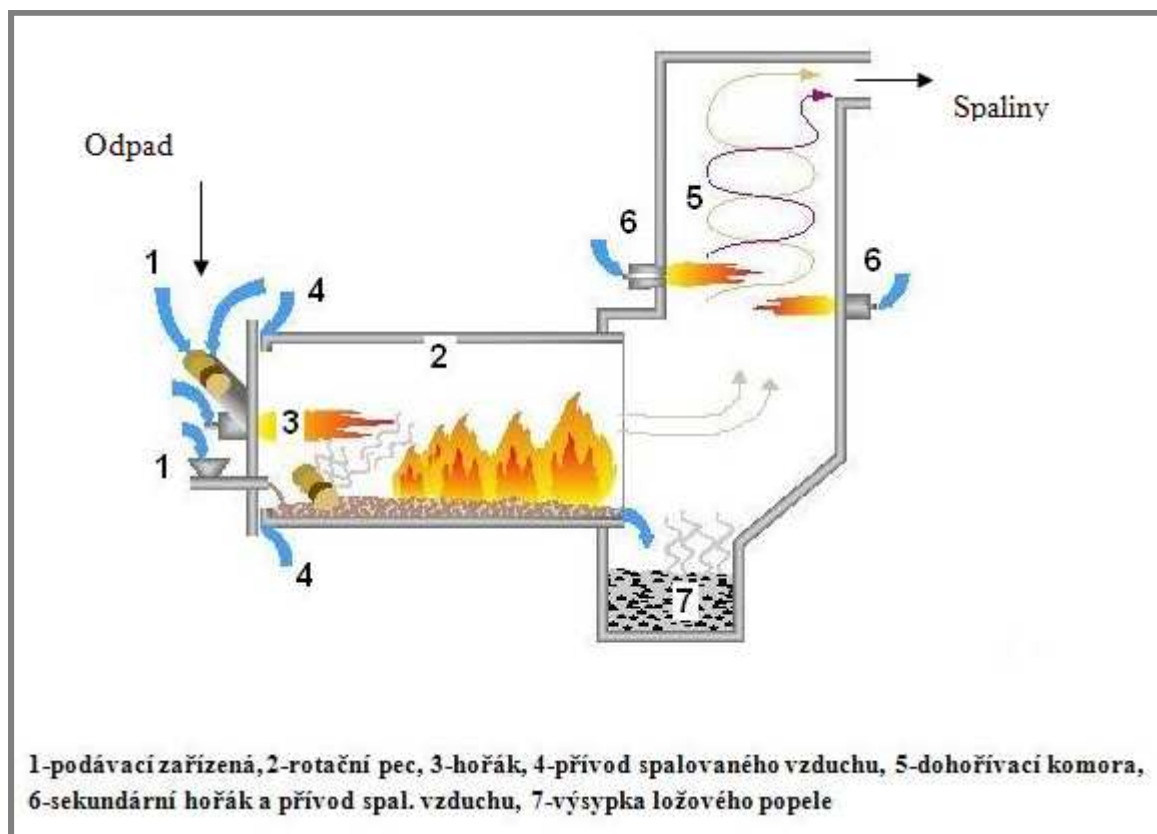
- Tento typ spaloven se nejčastěji používá ke spalování KO nebo ostatních odpadů jiného typu, které nejsou ovšem klasifikovány jako nebezpečné, spolu s KO.
- Spalovací teploty se pohybují od 850°C do 1100°C.
- Odpad lze spalovat kontinuálně nebo přerušovaně v závislosti na typu roštu (pohyblivý, pevný), přičemž kontinuální spalování je rozšířenější.
- Princip: Podavač přivede zpracovávaný odpad na pohyblivý rošt, který vykonává pohyb za účelem promíchávání a přemisťování odpadu přes spal. komoru směrem k výsypce ložového popele, přičemž během této cesty musí být odpad zneškodněn (spálen). Spalovací vzduch nezbytný k hoření odpadu je do spalovací komory dodáván skrz rošt a sekundární (podpurný) vzduch je přiváděn do spalovací komory.



Obr. 4: Roštová pec

➤ *Rotační pece*

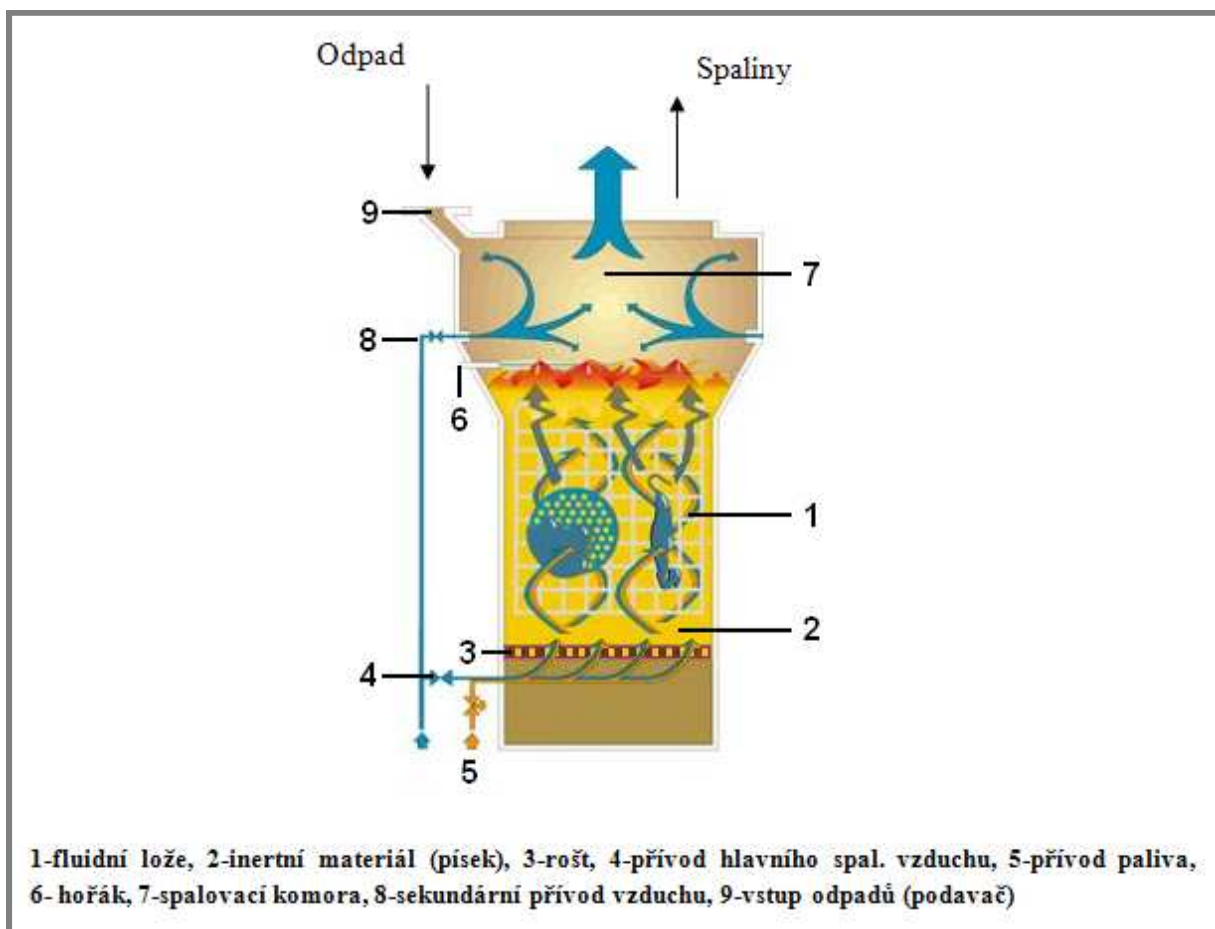
- Rotační pece jsou velmi univerzální. Mohou se používat pro zneškodňování tuhých, kapalných i plyných odpadů. Mají velmi široké uplatnění zejména při termickém upravování nebezpečných odpadů.
- Spalovací teploty se pohybují v rozmezích 850°C až 1450°C.
- Princip: Zpracovávaný odpad je přiveden do spalovací komory (rotační pece) jenž je tvořena válcovou nádobou nakloněnou oproti vodorovné ose. Rotační pec je umístěna na válečcích, které umožňují její otáčení nebo oscilaci. Tento pohyb umožňuje, spolu s gravitačním působením, posun zneškodňovaného odpadu směrem k výsypce ložového popela. Během této doby je odpad za neustálého přísunu spalovacího vzduchu zneškodněn a vzniklé spaliny pokračují dále do dohořivací komory, kde je vyšší teplota než v rotační peci a jsou zde tedy zneškodněny zbylé nebezpečné látky.



Obr. 5: Rotační pec

➤ **Fluidní lože**

- Systémy s fluidním ložem jsou široce používány při spalování homogenních rozptýlených odpadů, např. odpadních paliv, čistírenských kalů, biomasy atd. Lze v nich spalovat odpady tuhé, kapalné a pastovité. Tento typ technologie vyžaduje ve většině případů předběžnou úpravu spalovaného odpadu – třídění, drcení, šředrování atd.
- Spalovací teploty se pohybují v rozmezích 850°C – 950°C.
- Princip: Spalovna s fluidním ložem je ve většině případů vertikální válcová komora. Ve spodní sekci je na roštu přehřátým vzduchem fluidizované pískové lože. Odpad ke spalování je nepřetržitě přiváděn na toto pískové lože, kde dochází k jeho vznícení a hoření za neustálého promíchávání ve fluidním loži (z tohoto důvodu musí být zpracováváný odpad předupraven, a to ve většině případů na max. velikost 50 mm). V této technologii odchází většina popele spolu se spaliny horní částí spalovací komory.



Obr. 6: Fluidní lože

➤ *Pyrolýza a zplyňovací systémy*

- Obě tyto metody se používají pro oddělené proudy odpadů a v menším měřítku než spalování. Pomocí těchto metod lze zpracovávat také komunální odpad, avšak před samotným procesem je nutná jeho úprava zejména v podobě separace na jednotlivé druhy.
- Vedle běžných cílů spalování (redukce a zneškodnění odpadu) umožňuje zplyňování či pyrolýza konverzi určitých frakcí odpadu na plyn (syntézní plyn). Dále se tyto způsoby zpracování odpadu používají k obnově jeho chemické hodnoty (spíše než energetické) a výsledné chemické produkty mohou být využity jako surovina pro jiné chemické procesy.
- Zplyňování je částečné spalování organických látek při vysokých tlacích a teplotách za vzniku plynů, které lze použít jako palivo. Pyrolýza, na rozdíl od zplyňování, probíhá za nepřítomnosti kyslíku. Jde o zplyňování odpadů za vzniku pyrolýzního plynu a koksu.

2.3.2. Stupeň energetického využití

Tepelné zpracování resp. spalování odpadů je exotermický proces, při kterém naprostá většina produkované energie přechází do spalin. Následné ochlazování spalin umožňuje užití této energie k výrobě tepla či teplé vody a k výrobě elektrické energie, popřípadě kombinace obojího. Vyrobenu elektrickou, tepelnou energii je možné využít v místě jejího vzniku (on-site) nebo jí dodávat do veřejných rozvodných sítí.

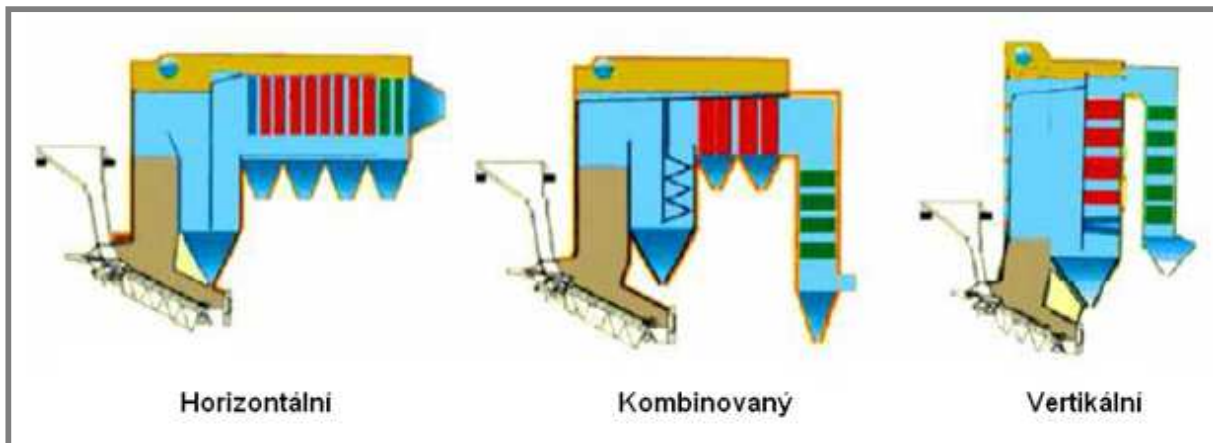
Faktorů ovlivňující energetickou účinnost spaloven odpadů je mnoho. V zásadě je lze rozdělit do dvou skupit:

➤ **Externí faktory**

- Druh a povaha spalovaného odpadu: tzn. jeho výhřevnost (kap. 2.1.3). Možnost ovlivnit charakter spalovaného odpadu je v některých případech minimální (zejména u TKO), zatímco v jiných případech značná.
- Umístění spalovny: zejména záleží na off-site možnostech využití produkované energie. Není-li možnost využití tepelné energie k vytápění okolní zástavby či její užití v blízkých průmyslových podnicích, je většina páry použita k výrobě el. energie. Avšak energetická účinnost spalovny, která produkuje pouze el. energii je o poznání menší, než účinnost spalovny produkující pouze teplo nebo také kombinaci produkce tepla a el. energie.

➤ **Požívané technologie za účelem využití energie**

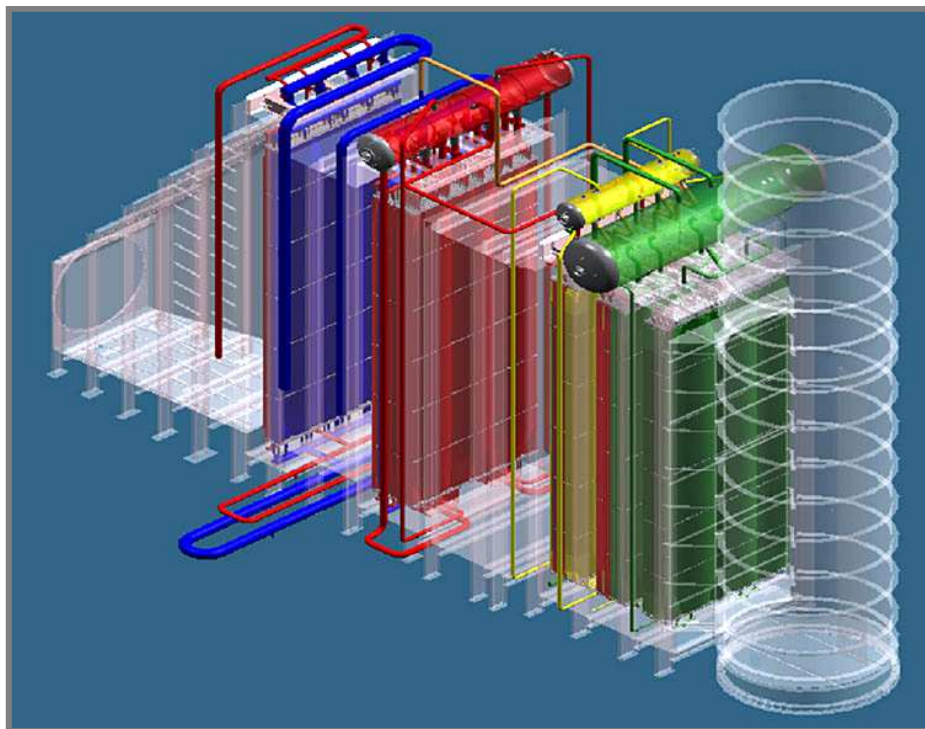
- Předběžné zpracování spalovaného odpadu: jedná se zejména o technologie používané k harmonizaci a extrakci odpadu. Těmito postupy je možné docílit poměrně konstantního složení termicky upravovaného odpadu a lze tedy navrhnout spalovací proces na základě specifického vstupu a tím zvýšit účinnost jednotlivých aparátů resp. celkovou energetickou účinnost spalovny. Zavedení specifických technologií má ovšem za následek snížení flexibility spalovny.
- Kotle na odpadní teplo: slouží ke generování páry nebo výrobě horké vody z energie přivedené spalinami. Konstrukce kotlů může být v zásadě trojího typu (obr. 7): horizontální, vertikální a kombinovaná.



Obr. 7: Možné konstrukce kotlů na odpadní teplo

Samotná výroba páry v kotli na odpadní teplo je realizována ve třech konstrukčních celcích (obr. 8):

- ekonomizér (slouží k ohřátí média (vody) na teplotu blízkou bodu varu),
- výparník (v tomto úseku se voda proudící z ekonomizéru dále ohřívá až na teplotu sytých par),
- přehřívák (zde je nasycená pára přehřátá až na požadovanou výstupní teplotu).



Obr. 8: Znázornění částí kotle

- Předehřátí spalovacího vzduchu: zavedení technologií na předehřívání spal vzduchu je prospěšné zejména při spalování odpadů s větším procentem vlhkosti. Teplý vzduch vysušuje odpad ještě před vlastní termickou reakcí, a tak usnadní vznícení odpadu. Předehřátý vzduch se dále používá jako primární či sekundární spalovací vzduch, který je do procesu nepřetržitě dodáván (s výjimkou pyrolýzy).
- Vodou chlazené rošty: voda se používá k ochraně roštu (prodloužení životnosti roštů) a zároveň přejímá teplo odpadů spalovaných v lóži. Takto ohřátou vodu lze pak využít kdekoli v procesu, např. jako médium přiváděné do kotlů na odpadní teplo.
- Tepelná čerpadla: obecně se používají k přesunu energie z jedné teplotní úrovně na vyšší úroveň. Ve spalovnách slouží k přesunu tepelné energie do užitkové vody následně užívané k vytápění. Používají tři typy tepelných čerpadel: kompresorové, absorpční a otevřená, přičemž nejpoužívanější je kompresorové.
 Kompresorové čerpadlo se skládá ze 4 hlavních částí (kondenzátoru, expandéru, odpařovače, kompresoru) a pracovní látky (média) cirkulující v uzavřeném okruhu. Médium (v plynné fázi) vstupuje do kompresoru, kde je stlačeno, a tím se zvýší jeho teplota. Poté přichází do kondenzátoru, kde se za konstantního tlaku ochladí (předá teplo užitkové vodě), což vede k jeho zkapalnění. Následně je v expandéru snížen tlak a médium pokračuje v kapalně fázi do odpařovače, kde přebírá teplo od spalin. Tím se za daných podmínek překročí bod varu, médium se odpařuje a pokračuje v plynné fázi ke kompresoru. Pohon kompresoru je možné zajistit parní turbínou.
- Recirkulace spalin: jedná se o nahrazení části spalovacího vzduchu určitým podílem spalin (10 – 20 obj.%), po odstranění prachu.
- Turbína: v běžných spalovnách se používají 4 hlavní typy turbín:
 - protitlaková (Používá se v případě značných a pokud možno konstantních dodávek tepla k dalšímu využití.),

- kondenzační (V případě že teplo dodávané k dalšímu užití je malé či žádné a většina energie páry má být přeměněna na energii elektrickou.),
- extrakční – kondenzační turbína (Tento druh turbín se používá, je-li v okolí spalovny možnost využití značného množství páry, avšak poptávka po množství není konstantní. Lze tedy efektivně vyrábět elektrickou energii, nebo odvádět větší množství páry k dalšímu využití, a to v závislosti na poptávce.),
- dvoufázové kondenzační turbíny (V mezistupni používají část vstupní přehřáté páry k dohřátí páry vstupující do druhého stupně turbíny. Dosáhne se tak vyšší energetické produkce při nižších teplotách kondenzace bez poškození turbíny).

2.3.3. Stupeň čištění spalin

Systémy čištění spalin jsou sestaveny z jednotlivých procesních jednotek, které vedou k celkovému snížení nežádoucích látek uložených ve spalinách tak, aby následná měření koncentrací vyhovovala legislativním požadavkům. Jednotlivé systémy lze rozčlenit do 5 hlavních skupin podle jejich účelu.

➤ *Technologie ke snižování tuhých znečišťujících látek*

- Tyto technologie slouží zejména k zachycení popílku, který odejde z termické části spolu se spalinami.
- *Elektrostatické odlučovače*: jejich účinnost závisí především na měrném elektrickém odporu popílku, který je ovlivněn složením odpadu. Provozní teploty se pohybují od 160 – 260°C, při vyšších teplotách je vyšší riziko tvorby PCDD/F.
- *Ionizační mokré pračky plynů*: systém je kombinací elektrostatického filtru a náplňového skrubru. Používá se k zachycování různých znečišťujících látek (prach, aerosol, částice menší než 1 µm).
- *Tkaninové filtry*: tkaninové (rukávcové) filtry jsou pro jejich vysokou účinnost velmi využívány. Jejich účinnost klesá až u částic menších než 0,1 mikronu, avšak podíl těchto částic není ve spalinách ze spalování odpadů příliš zastoupen.
- *Cyklony a multicyklony*: v této technologii je k odstranění pevných částic ze spalin využita odstředivá síla. Samy o sobě nemohou dosáhnout emisních povolených hodnot. Mají však velmi malou energetickou náročnost a pracují i při velmi vysokých teplotách. Mohou tedy být použity k odstranění prachu ze spalin před dalším čištěním a tím prodloužit životnost následujících procesních jednotek.

➤ *Technologie používané ke snížení obsahu kyselých plynů*

- Hlavním účelem těchto technologií je snížení emisí HCl, HF a SO_x a to především za pomoci chemických nebo sorpčních činidel, které jsou na sebe schopná oxid siřičitý a plynné halogeny navázat. Tyto technologie je možno rozdělit do tří skupin: suché procesy, polomokré procesy a mokré procesy, přičemž záleží, v jakém skupenství se alkalická činidla přidávají do procesu.
- *Suché procesy*: do proudu spalin se přidá absorpční činidlo (vápno, uhličitán sodný nebo 2NaHCO₃) v podobě suchého prášku. Následné reakční produkty jsou tuhé a od spalin se oddělují nejčastěji na tkaninových filtrech.
- *Polomokré procesy*: absorpční činidlo se vstříkuje do proudu spalin v podobě suspenze, nebo jako roztok v rozprašovací reaktor. Teplo spalin odpaří rozpouštědlo (vodu). Výsledný reakční produkt je tedy opět suchý a lze jej zachytit na tkaninových filtrech.

- Mokré systémy: v tomto procesu se používá několik typů skrubrů (tryskové skrubry, otáčivé skrubry, venturi skrubry atd.). U všech typů se však využívá dvou stupňů čištění spalin. V prvním stupni se vstřikuje silně kyselé médium (voda) které odstraní HCl a HF. V druhém stupni se odstraňuje oxid siřičitý vstřikováním hydroxidu sodného nebo vápenného mléka.
- **Technologie používané ke snížení oxidů dusíku**
 - Technologie používané ke snižování oxidů dusíku lze rozdělit na primární a sekundární, přičemž primární opatření mají ve své podstatě zamezit vzniku NO_x a sekundární jsou určeny k odstranění již vzniklých NO_x. V praxi se často setkáme s kombinací těchto způsobů.
 - Primární techniky: tvorbě NO_x lze předejít zejména snížením dodávek nadbytečného dusíku, tedy přebytku spalovacího vzduchu a omezením vysokých teplot v peci včetně vysokoteplotních lokálních míst. Přebytku dusíku lze předejít obohacením spal. vzduchu o kyslík (sníží se obsah dusíku). Regulace teplot se provádí zejména pomocí optimálního rozdělení dodávek primárního a sekundárního spal. vzduchu, kdy je zabráněno nerovnoměrnému gradientu teplot, a tedy vzniku lokálních horkých míst. Dalším nástrojem je opětovné hoření (sekundární spalovací komory). Obecně je velice důležité zajištění efektivního promíchávání spalin.
 - Sekundární techniky: v těchto technologiích se používá amoniak a jeho deriváty (např. močovina), které reagují s NO a NO₂ a vytvářejí N₂ a vodní páry. Využívají se k tomu dvě metody: Selektivní nekatalytická redukce (SNCR) a selektivní katalytická redukce (SCR).

Selektivní nekatalytická redukce zajišťuje odstranění 60 – 80% NO a NO₂ ze spalin. Reakce probíhá v rozmezí teplot 850 – 1 000°C. Z důvodů větší účinnosti a omezení vzniku emisí čpavku, které jsou způsobeny větším množstvím amoniaku, se amoniak vstřikuje v několika vrstvách.

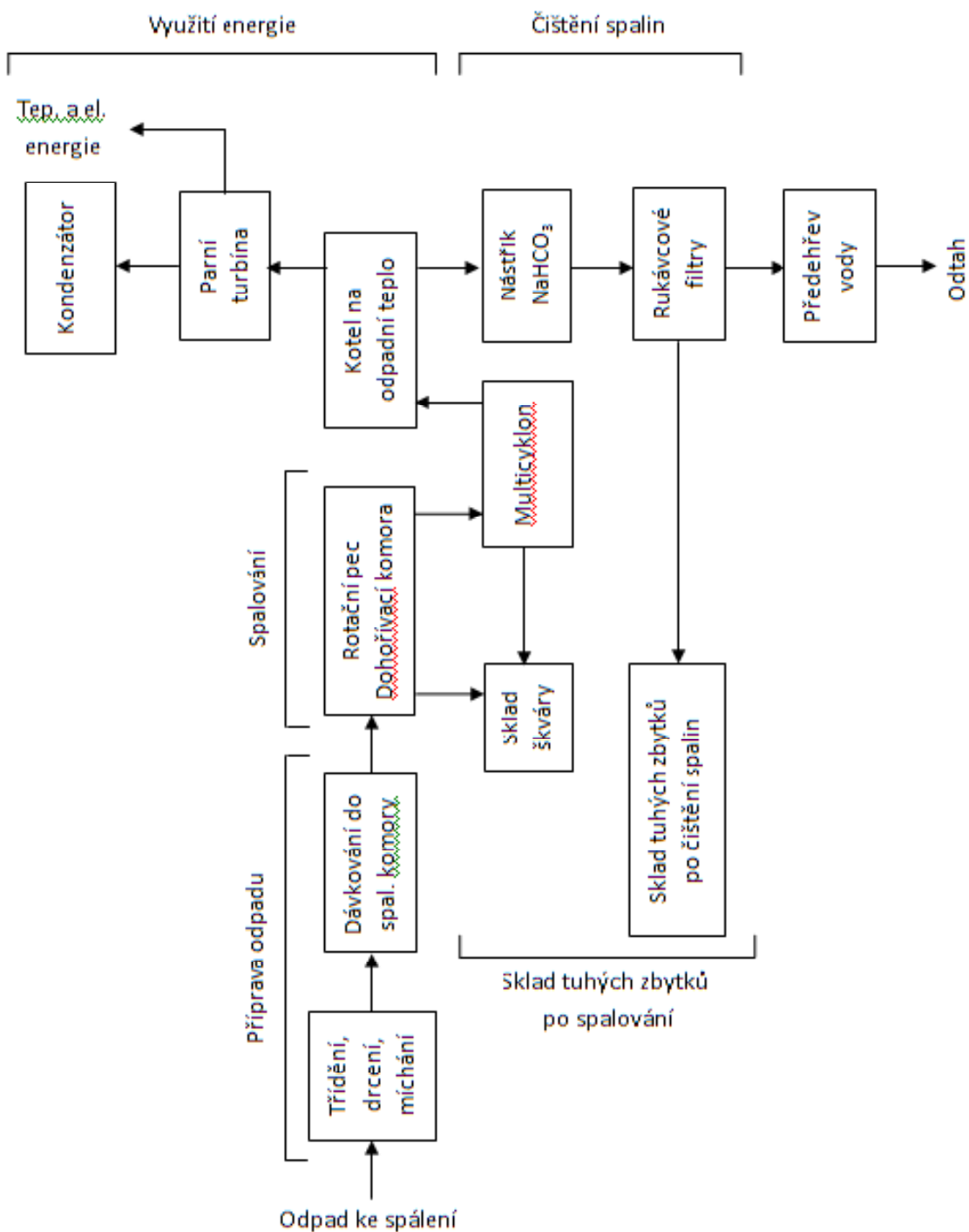
Selektivní katalytická redukce obvykle probíhá při teplotách 230 – 300°C. Amoniak se dává do spalin ve směsi se vzduchem a při průchodu katalyzátorem reaguje s oxidy dusíku za vzniku dusíku a vodních par. Proces zaručuje snížení NO_x až o 90% a zařazuje se v prostoru již vyčištěných spalin.
- **Technologie používané ke snížení obsahu rtuti**
 - Rtuť se ve spalinách vyskytuje jen zřídka díky její těkavosti.
 - Primární technologie: zajišťují dodržení emisních limitů jsou založeny na prevenci a kontrole, co se týče vniknutí rtuti do odpadu.
 - Sekundární technologie: v případě výskytu rtuti ve spalinách se používá např. NaHCO₃ k jejímu odstranění.
- **Technologie ke snižování ostatních těžkých kovů**
 - Tyto kovy (As, Sb, Pb, Cr, atd.) konvertují převážně na některé oxidy a odstraňují se spolu s popílkem.
- **Technologie k odstraňování sloučenin organického uhlíku**
 - Efektivní spalování je velmi důležitý nástroj ke snižování rizika možného vzniku organických uhlíků. Avšak některé organické látky mohou vznikat až za pecí, především pak dibenzo-*p*-dioxiny (PCDD) a dibenzofurany (PCDF).

- Katalytické (dioxinové) rukávcové filtry: rukáv filtru je buď impregnován katalyzátorem, nebo je katalyzátor smísen přímo s materiálem při jejich výrobě. Při dodržení min. teploty spalin (190°C) procházejících katalytickým filtrem lze efektivně snížit podíl PCDD/F ve spalinách.

3. PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH APARÁTŮ SPALOVNY ODPADŮ

3

Celý proces, zneškodňování odpadu termickou cestou, čištění spalin a výroba energií má několik fází, které jsou znázorněny na následujícím schématu.



Odpad dovezený do areálu bude skladován v bunkru odpovídající kapacity. Zde je odpad podroben třídění (za účelem vyseparování skla, kovu a dalších využitelných druhotných surovin), úpravě (převážně drcení velkoobjemového odpadu) a promíchávání, za účelem získání co možná nejvyšší výhřevnosti odpadu. Manipulaci s odpadem je možné zajistit pomocí mostových jeřábů.

Připravený odpad je jeřábem přepravován do podávacího zařízení a následně dávkován do spalovací komory – rotační pece, kde probíhá vlastní spalování odpadu (~1000°C). Po průchodu rotační pece má za sebou odpad všechny stupně tepelného zpracování a zbytek (většina pevné fáze) je odveden přes výsypku popele. Popel bude následně dopravován pásovým dopravníkem na skládku škváry a popílku. Nad pásový dopravník je možné umístit magnetický separátor za účelem oddělení železného šrotu od zbytku škváry.

Spaliny vzniklé při spálení odpadu v rotační pece postupují dále do druhého stupně spalování – do dohořivací komory. Do prostoru komory se bude dodávat sekundární spal. vzduch, který je zapotřebí k dohoření těkavých látek unášených spalinami. Množství těkavých látek ve spalinách je tak velké, že se nemusí do dohořivací komory dodávat zemní plyn. Je to způsobeno konstrukcí rotační pece (kap. 3.2.).

Za dohořivací komorou bude instalován multicyklon k separaci naprosté většiny pevných částic od zbytku spalin.

Spaliny očištěné od tuhé frakce jsou následně přiváděny do kotle na odpadní teplo. Ten bude napájen přehřátou vodou, která se zde (za využití tepelné energie spalin) transformuje na přehřátou páru (2,5 MPa a 540°C), čímž se zároveň ochladí spaliny na cca 200°C (možnost použití 2NaHCO₃ (bikarbonát sodný) a případně dioxinových filtrů při následném čištění spalin).

Čištění spalin proudících z kotle na odpadní teplo bude realizováno tzv. suchou cestou, pomocí 2NaHCO₃ (bikarbonát sodný), který bude rozprašován do potrubí v podobě tuhé fáze (prášku). Bikarbonát sodný reaguje s HCl, HF, SO_x, Hg a NO_x a při reakci tyto látky neutralizuje. Zreagované tuhé frakce jsou od spalin odděleny pomocí textilních (rukávčových) filtrů, na kterých se utvoří koláč, kde složky doreagovávají a zvyšuje se tak účinnost čištění. Vyčištěné spaliny jsou následně přes výměník tepla, ve kterém dochází k ohřevu vody přiváděné do kotle, vypouštěny odtahem do atmosféry.

Energie vysokotlaké páry vystupující z kotle na odpadní teplo bude využívána na výrobu tepla a elektrické energie pomocí extrakční-kondenzační parní turbína. Ta umožňuje zvyšovat či snižovat odběr tepla (v podobě páry) dle aktuální potřeby. Vysokotlaká pára při průchodu parní turbínou expanduje na mokrou páru, která bude odváděna do vzduchem chlazených kondenzátorů, kde se přemění zpět na kapalnou fázi.

Teplo (v podobě páry) odvedené z parní turbíny bude využíváno pro vlastní potřebu spalovny (zejména k přehřevu vody před vstupem do kotle) a dále pro komerční účely. V podobě teplé vody se bude přidávat do městské rozvodné sítě. Vyrobená el. energie bude využita obdobným způsobem, k pokrytí vlastních potřeb spalovny a zbytek bude dodáván do rozvodné sítě.

K termickému zneškodnění odpadu je zvolena **soustava dvou rotačních** pecí (každá o jmenovitém výkonu 50 kT/rok), dohořivacích komor a dvou kotlů na odpadní teplo.

Přehřátá pára jdoucí z kotlů je svedena do jednoho potrubí a odváděna na turbínu. Spaliny vystupující z kotle jsou taktéž svedeny do jednoho potrubí a odváděny přes nástřík 2NaHCO₃ a reakční komoru na rukávčové filtry.

V případě potřeby je možné ponechat v provozu pouze jednu soustavu (rotační pec, dohořivací komoru, kotel na odpadní teplo a přídatná zařízení). Důvody mohou být následující:

- ušetřit náklady spojené s provozem druhé soustavy v případě malého objemu spalovaných odpadů,
- v případě poruchy je možné odstavit pouze jednu soustavu a druhou ponechat v provozu.

Uvažovaná zařízení pro termické zpracování odpadů s využitím energie jsou koncipována tak, aby odpovídala nejnovějším legislativním požadavkům (zejména z hlediska ochrany životního prostředí).

3.1. Hlavní předpoklady

3.1

Spalovna odpadů plní dva hlavní úkoly:

- termické zneškodňování převážně SKO a to o předpokládaném objemu 200 kT/rok
- využití energie uvolněné při spalování odpadů k výrobě tepla a elektrické energie

Realizace těchto cílů je samozřejmě podmíněna dodržáním veškeré legislativy týkající se provozu spaloven KO (kap. 1.5.).

Zneškodňovaný odpad

Spalovna odpadů uvažovaná v této práci má charakter návrhu, tzn., že není předmětem zakázky týkající se následné realizace. Není tedy známa žádná lokalita, ve které by se udělal rozbor odpadů za účelem přesnějšího návrhu aparátů na základě zjištěné výhřevnosti odpadů. K výpočtu výhřevnosti použijeme obecné charakteristiky SKO, kde hodnoty týkající se složení odpadu jsou převzaty od společnosti SAKO Brno a.s. (rok 2006)

➤ *Vlastnosti spalovaného odpadu*

- Morfologické složení a obsah prvků důležitých k výpočtu energetického potenciálu odpadu:

složka odpadu	% hm. 100	prvek - % hm.						Celkem
		C	H	O	N	S	Popel	
Bioodpad	0,37	48,0	6,0	38,0	2,5	0,5	5,0	100
Papír+ tetrapak	0,19	43,5	60	44,0	0,3	0,2	6,0	100
Plast	0,15	60,0	7,0	23,0	-	-	10,0	100
Sklo	0,07	0,5	0,1	0,4	0,1	-	98,9	100
Kovy	0,04	5,0	0,6	4,3	0,1	-	90,0	100
Textil	0,03	55,0	7,0	29,8	5,0	0,2	3,0	100
Drobná frakce	0,16	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0	100
Celkem	1	40,63	5,07	26,98	1,23	0,25	25,83	100

Tab. 7: Morfologické složení uvažovaného KO a zastoupení jednotlivých prvků. [25,31]

Hmotnostní obsah jednotlivých složek odpadu uvedený v tab. 7 je již po tříděném sběru. V tomto návrhu je dále uvažováno mechanické předtřídění a úprava odpadu v areálu spalovny před vlastním spalováním. Tímto krokem je možné získat z odpadu palivo o následujícím hmotnostním složení:

C	H	O	N	S	Popel	Celkem
48,7	6,1	42,3	0,8	0,1	2,0	100

Tab. 8: Složení odpadu po jeho úpravě před vlastním spalováním [31]

Možný návrh předtřídění a úpravy odpadu za účelem dosažení výše uvedených hodnot jsou znázorněny v příloze 2 [32].

- Hustota odpadu [31]:

$$\rho_w = 600 \text{ kg/m}^3$$

- Hmotnostní složení odpadu z hlediska paliva [31]:

w	– vlhkost:	15-40 % hm.	20	% hm.
fc	– pevný uhlík:	05-15 % hm.	53	% hm.
v	– těžké látky:	30-60 % hm.	7	% hm.
a	– popeloviny:	09-30 % hm.	20	% hm.

- Hmotnostní složení odpadu z hlediska suchého paliva (bez vlhkosti):

x	– pevný uhlík:	$x = fc/(fc + v + a)$	= 8,8 %
y	– těžké látky:	$y = v/(fc + v + a)$	= 66,2 %
s	– popeloviny:	$s = a/(fc + v + a)$	= 25 %

- Energetický potenciál odpadu [32]:

$$HHV_1 = 337C + 1419(H_2 - 0,125O_2) + 23N = 18,54 \text{ [MJ/kg]}$$

$$HHV_2 = 337C + 1419(H_2 - 0,125O_2) + 23N = 19,05 \text{ [MJ/kg]}$$

přičemž hodnoty pro výpočet HHV_1 jsou uvedené v tab. 7 a hodnoty pro HHV_2 jsou v tab. 8. Obsah síry je v obou případech zanedbatelný, a proto je z výpočtů vypuštěn.

$$LHV_1 = HHV_1 \times B - 2,445 \times W = 11,12 \text{ [MJ/kg]}$$

$$LHV_2 = HHV_2 \times B - 2,445 \times W = 11,43 \text{ [MJ/kg]}$$

kde B ...hořlavina
 W ...vlhkost

přičemž $B = (fc+v)$.

K dalším výpočtům bude použita výhřevnost LHV_2 . Je však nutné předpokládat výkyvy výhřevnosti SKO přibližně v rozmezí 10 – 12 MJ/kg v závislosti na měnící se vlhkosti odpadu a zvoleném způsobu předtřídění.

➤ **Množství zneškodňovaného odpadu**

- Původní předpoklad 200 kT/rok se mění na 100 kT/rok a to z následujících důvodů:

- Spalovny SKO na území ČR, které mají kapacitu 200 kT/rok spáleného odpadu nebo vyšší, nejsou využívány na 100% (graf 10) a to v dlouhodobém horizontu. Aby bylo využito co nejvíce z možné max.

kapacity, dovážejí se odpady do spaloven z velkých vzdáleností (přesahujících 100 km), tzn. zvýšení celkových nákladů na 1 kg spáleného odpadu.

- II. Podle odhadů STEO (Sdružení provozovatelů technologií pro ekologické využívání odpadů) je zapotřebí vybudovat na území ČR 10 nových spaloven KO (jedna spalovna v každém kraji) o kapacitě přibližně 100 kT/rok.

Redukce kapacity navrhované spalovny odpadů povede v neposlední řadě ke snížení celkových nákladů spojených s případnou realizací, což spolu s vysoce pravděpodobným 100 % využitím kapacity spalovny (bez nutnosti svozu odpadů z velkých vzdáleností) znamená zvýšení lukrativnosti návrhu.

Využití energie

Jak je zmíněno výše, není známa lokalita výstavby navrhované spalovny a není tedy známa možná poptávka po teple nebo elektrické energii. Tento koncept vychází proto z následujícího předpokladu:

- Vyrobené teplo se bude dodávat do centrální městské sítě rozvodu tepla. Tzn. největší odběr tepla lze předpokládat v zimních měsících. Elektrický výkon v tomto období bude tedy minimální. Oproti tomu v letních měsících, kdy je poptávka po tepelné energii minimální, lze předpokládat maximální produkci elektrické energie.
- Přesný tlak odebírané páry bude určen odběratelem. Pro výpočet je zvolen reprezentativní tlak požadovaný společností Teplárny Brno a.s. – 1,1 MPa. Tento tlak je požadován při dodávkách páry z brněnské spalovny resp. společnosti SAKO Brno a.s.

Přídavné palivo

Zvolená technologie pro termické zneškodnění odpadu – protiproudá rotační pec má obrovskou výhodu: do spalovacího procesu se nemusí kontinuálně přivádět přídavné palivo (zemní plyn). Ten se bude používat pouze při nájždění RP do provozu nebo v případě, že na výstupu dohořivací komory nebude požadovaná teplota, lze použít nouzový hořák.

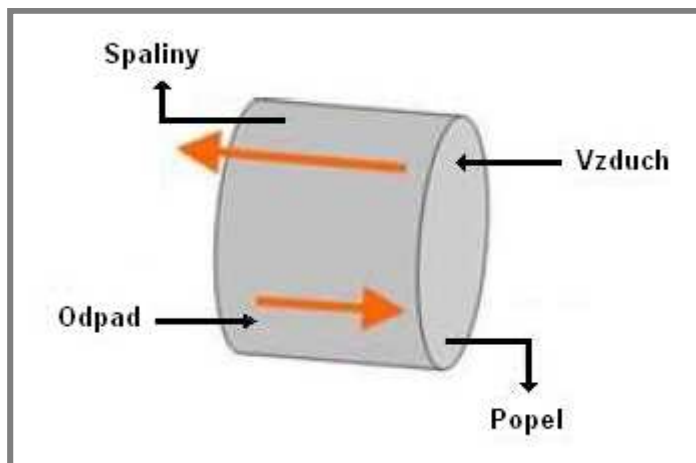
3.2. Termická část

Spalování bude probíhat v následujících aparátech:

- protiproudá rotační pec
- dohořivací komora

Rotační pec

Je zvolena rotační pec s protiproudým tokem. Tzn., že odvod spalin z pece je situován na téže straně, na které je do pece dávkován odpad. Přívod spalovacího vzduchu je pak na straně opačné, tedy na straně odvodu popela (obr. 9).



Obr. 9: Vstupní a výstupní proudy rotační pece s protiproudým uspořádáním [33]

Výhody oproti dodnes hojně využívané konvenční souprouté rotační peci jsou značné viz následující tabulka:

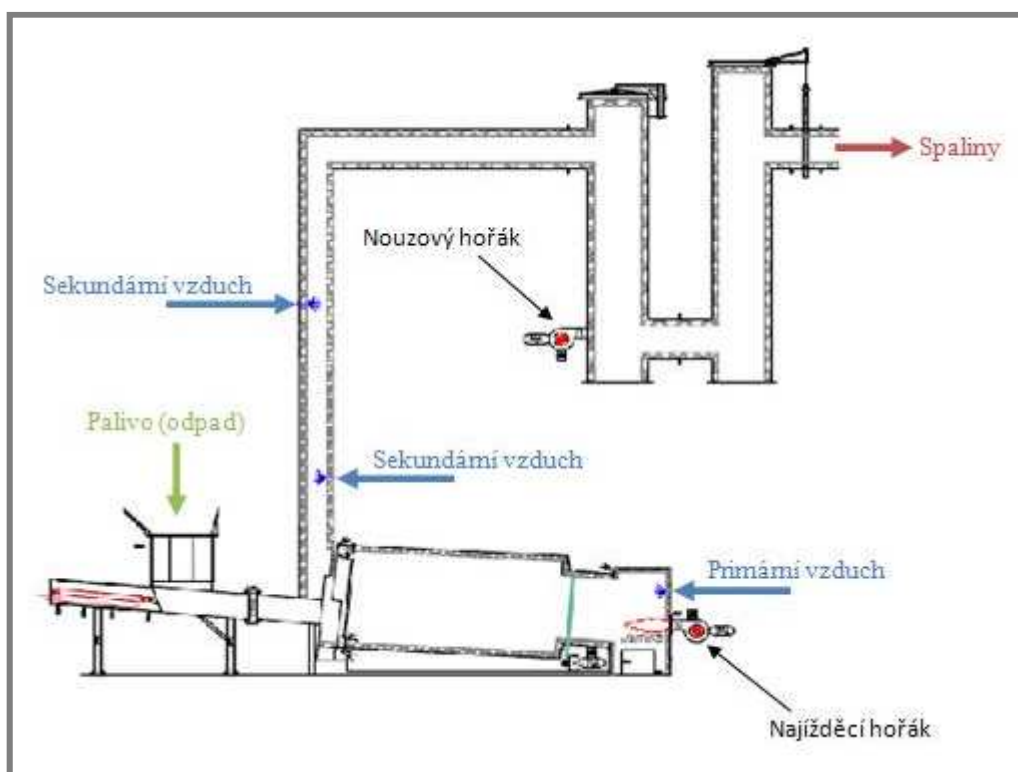
	Protiproudé uspořádání	Souprouté uspořádání
Teplota popela na výstupu	~200 °C	~1000 °C
– popel je ochlazován přiváděným spalovacím vzduchem, který je zároveň ohříván.		
Obsah nespáleného uhlíku v popelu	< 0,5%	> 2%
– maximální obsah kyslíku na vstupu spal. vzduchu do pece zaručuje dokonalé dohoření popela (obr. 10).		
Redukce objemu spal. odpadu	> 85%	> 75%
Úlet pevných částic (popílku)	750 mg/Nm ³	1500 mg/Nm ³
– spaliny opouští rotační pec na opačné straně, než je odvod popela		
Riziko spékání popela a nálepu	NE	ANO
– teplota spalin na výstupu je ~ 200°C		
Spotřeba přídatného paliva v dohořivčí komoře	0 kg/hod	> 100 kg/hod
– těkavé látky se vypařují v průběhu pyrolýzy při ~500 °C (pyrolýza a další hlavní stupně spalování jsou popsány v kapitole 2.1.2.), tedy dříve než nastane vlastní hoření odpadu. Tyto těkavé látky jsou následně unášeny spalinami do dohořivací komory (opačným směrem, než postupuje odpad v rotační peci a tedy na druhou stranu od vlastního hoření). Spaliny, které proudí proti toku odpadu, mají sice dostatečnou teplotu potřebnou ke vznícení těkavých látek, avšak nemají potřebné množství kyslíku. Ten byl spotřebován při hoření tuhého odpadu v rotační peci. Spaliny o dostatečné teplotě spolu s těkavými látkami vstoupí do dohořivací komory, kam je přiveden sekundární spalovací vzduch, díky čemuž shoří těkavé látky a zvýší se teplota spalin bez nutnosti přívodu paliva.		

Tab. 9: Rozdíly mezi souproutou a protiproudou rotační pecí (při 1 000 kg/hod) [33]



Obr.10 a): Popel z protiproudé RP [33] Obr.10 b): Popel ze souprroudé RP [33]

Pro názornost je na následujícím obr. schéma protiproudé rotační pece s dohořivací komorou a jejich reálné provedení na dalším obr.



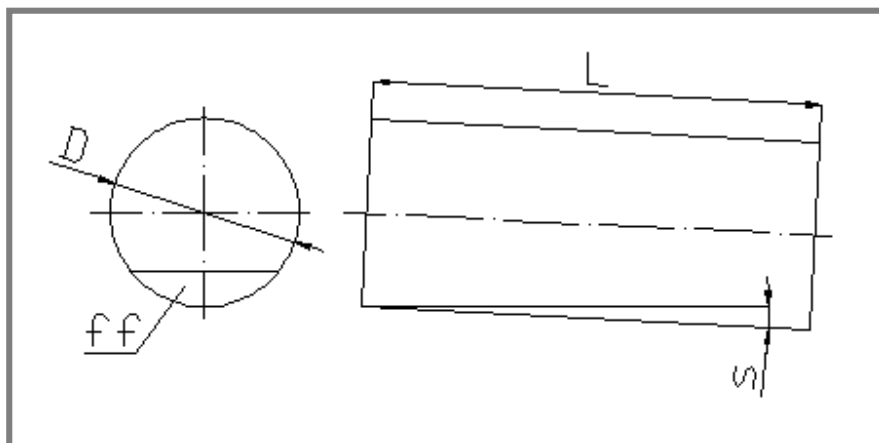
Obr. 11: Schéma RP s protiproudým uspořádáním [33]



Obr. 12: Reálné provedení RP s protiproudým uspořádáním [33]

Rotační pec byla zvolena zejména pro její univerzálnost:

- mohou být spalovány odpady pevné, kapalné, plynné, kašovitě atd.
- minimální požadavky na třídění zneškodňovaného odpadu
- široké spektrum odpadů, které mohou být spalovány současně
- skutečně kontinuální spalování
- snadno kontrolovatelná doba držení odpadu ve spalovací komoře
- dobré promíchání a tedy prohoření spalovaného odpadu



Obr. 13: Základní parametry spalovací komory RP

Parametry potřebné k výpočtu:

úhel sklonu s [-]:	1 - 6 %	3 %
stupeň naplnění ff [-]:	5 - 15 %	zvoleno: 10 %
poměr mezi délkou a průměrem rLD [-]:	3,5 - 5,2	3,5
doba zdržení τ [min]:	40 - 120	120
tloušťka stěny Rf [m]:		0,45
teplota spalin na výstupu t_{fg} [°C]:		1000
teplota odpadu na vstupu do pece t_{ref} [°C]:		15

Dohořivací komora

Vertikální dohořivací komora instalovaná za rotační peci slouží k dohoření těkavých látek unášených spalinami. V rotační komoře je instalován nouzový hořák pro případ, že by teplota na výstupu z dohořivací komory nedosahovala požadovaných teplot.

Parametry potřebné k výpočtu:

teplota na výstupu t_{ex} [°C]:	1000
pravděpodobná spotřeba zemního plynu m_2 [kg/s]:	0

Soustavy rotačních pecí s protiproudým tokem a dohořivacími komorami vyrábí Belgická společnost BIC GROUP.

3.3. Utilizace tepla

Navržené aparáty pro tento technologický blok:

- kotel na odpadní teplo
- parní turbína
- kondenzační jednotka

Kotel na odpadní teplo

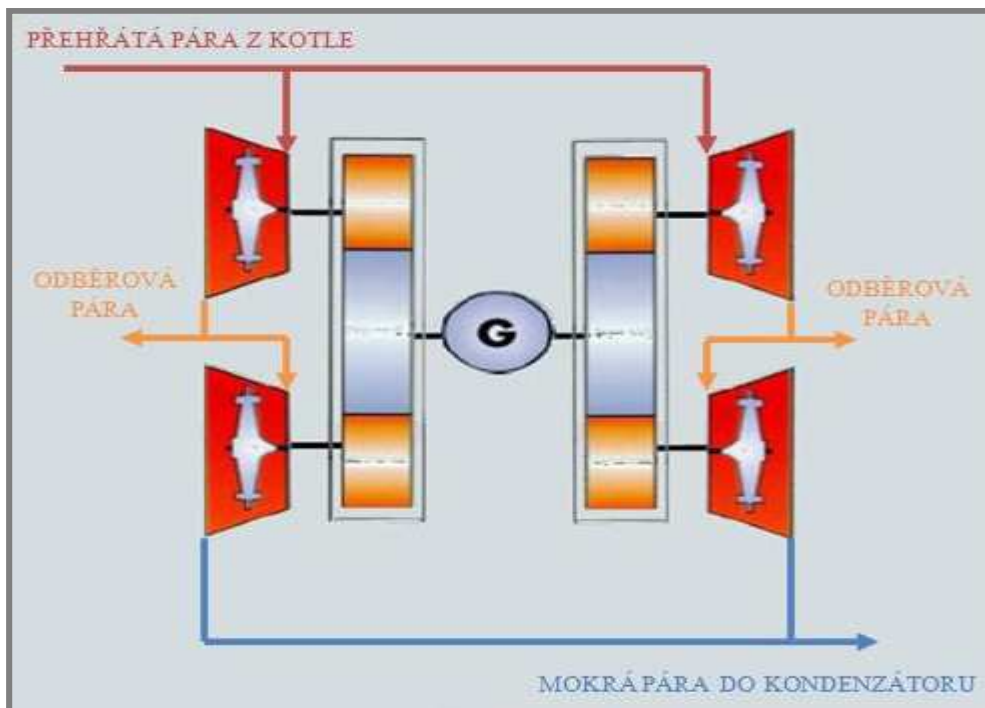
Předpokládá se horizontální kotel sestávající se z ekonomizéru, výparníku a přehříváku. Do kotle budou přiváděny spaliny z dohořivací komory a předeřtává voda k výrobě přehřáté vysokotlaké páry.

Parametry k výpočtu:

teplota spalin na vstupu t_4 [°C]:	1000
potřebná teplota spalin na výstupu t_5 [°C]:	~200
teplota přehřáté páry na výstupu t_p [°C]:	530
tlak přehřáté páry na výstupu p [MPa]:	2,5

Parní turbína

Z důvodu předpokládané měnící se poptávky po teple (kap. 3.1.) se uvažuje extrakční-kondenzační turbína, kde se teplo (ve formě páry) odvádí mezi vysokotlakou a nízkotlakou částí turbíny (obr. 12). Množství odváděného tepla lze libovolně a snadno regulovat.

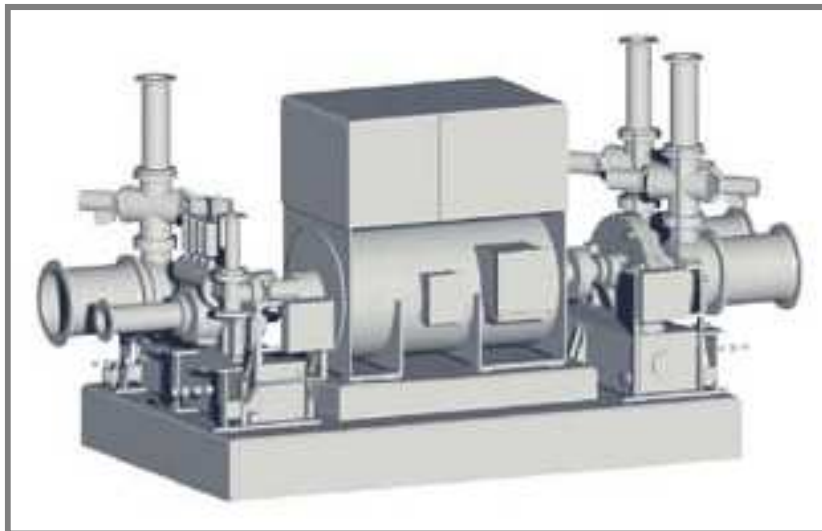


Obr. 14: Znárodnění vstupních a výstupních proudů na turbíně

S kapacitou spalovny 100kT/rok spáleného odpadu lze předpokládat dosažení elektrického výkonu parní turbíny až 10 MW. Těmto požadavkům vyhovuje turbína SST-120 (obr. 13) od společnosti Siemens.

Parametry k výpočtu:

teplota přehřáté páry na vstupu t_{in} [°C]:	530
tlak přehřáté páry na vstupu p_{in} [Mpa]:	2,5
tlak odebírané přehřáté páry p_{ex} [Mpa]:	1,1
předpokládaný max. výkon P_{ult} [MW]:	10
účinnost vysokotlaké části μ_{HP} [%]:	85
účinnost nízkotlaké části μ_{LP} [%]:	84
potřebná teplota mokré páry t_{exh} [°C]:	~60



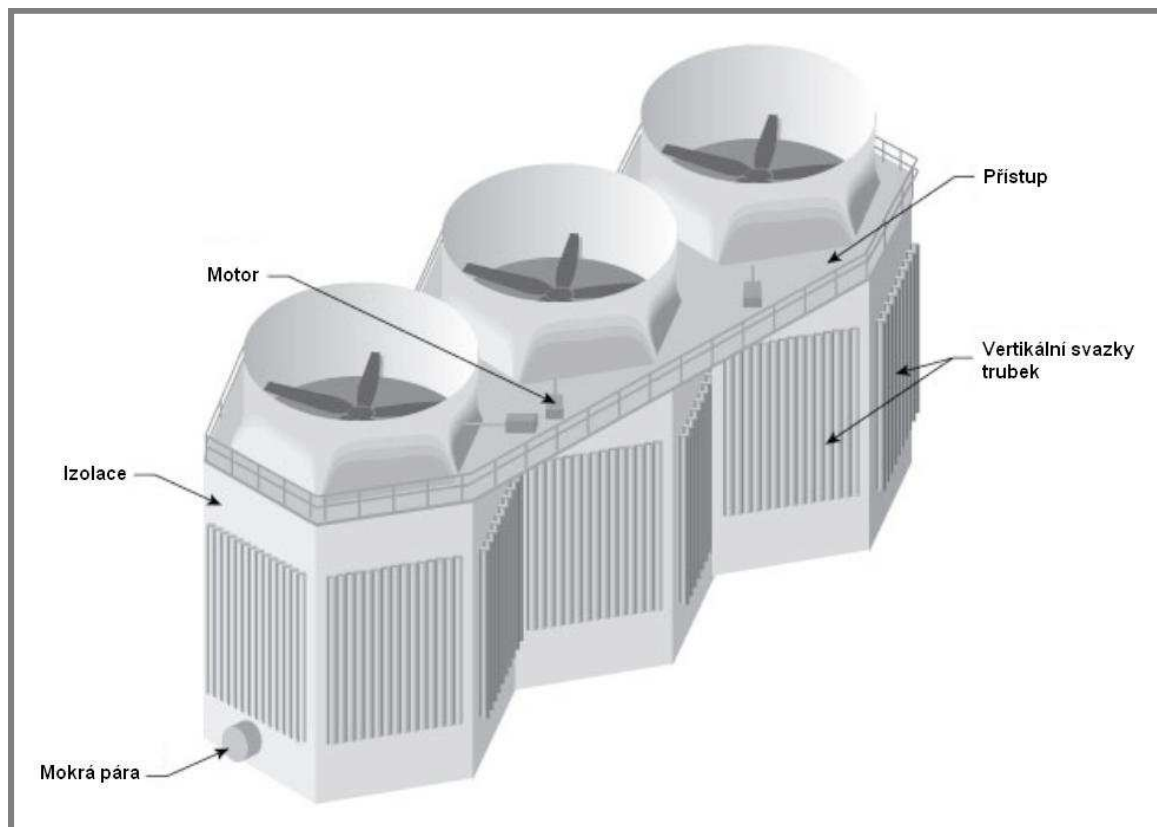
Obr. 15: Turbína SST-120 od společnosti Siemens

Kondenzační jednotka

K přeměně mokré páry na kapalinu (kondenzát) bude požit vzduchem chlazený kondenzátor Hexacool Air Cooled Condenser od firmy SPX Cooling Technologies, Inc. (obr. 14).

Výhody oproti běžným kondenzátorům:

- mnohem menší hlučnost
- zabere méně plochy
- kondenzační trubky jsou ve svislé poloze, tzn. nejsou namáhány na ohyb a odvod inertních plynů je mnohem jednodušší



Obr. 16: Vzduchem chlazený kondenzátor

K dosažení co největší možné účinnosti je zapotřebí zajistit aby teplota mokré páry na vstupu do kondenzátoru měla okolo 60°C.

Parametry k výpočtu:

teplota vzduchu na vstupu (okolí) t_{ref} [°C]:	15
---	----

3.4. Čištění spalin

Je zvolena tzv. suchá cesta čištění spalin a to hlavně z důvodu jednoduchosti celého procesu oproti čištění mokrou cestou (odpadá řada složitých aparátů a následné nakládání s produktem mokrého čištění).

Aparáty zabezpečující dodržení emisních limitů:

- multicyklon
- 2NaHCO_3 (bikarbonát sodný)
- rukávcové filtry

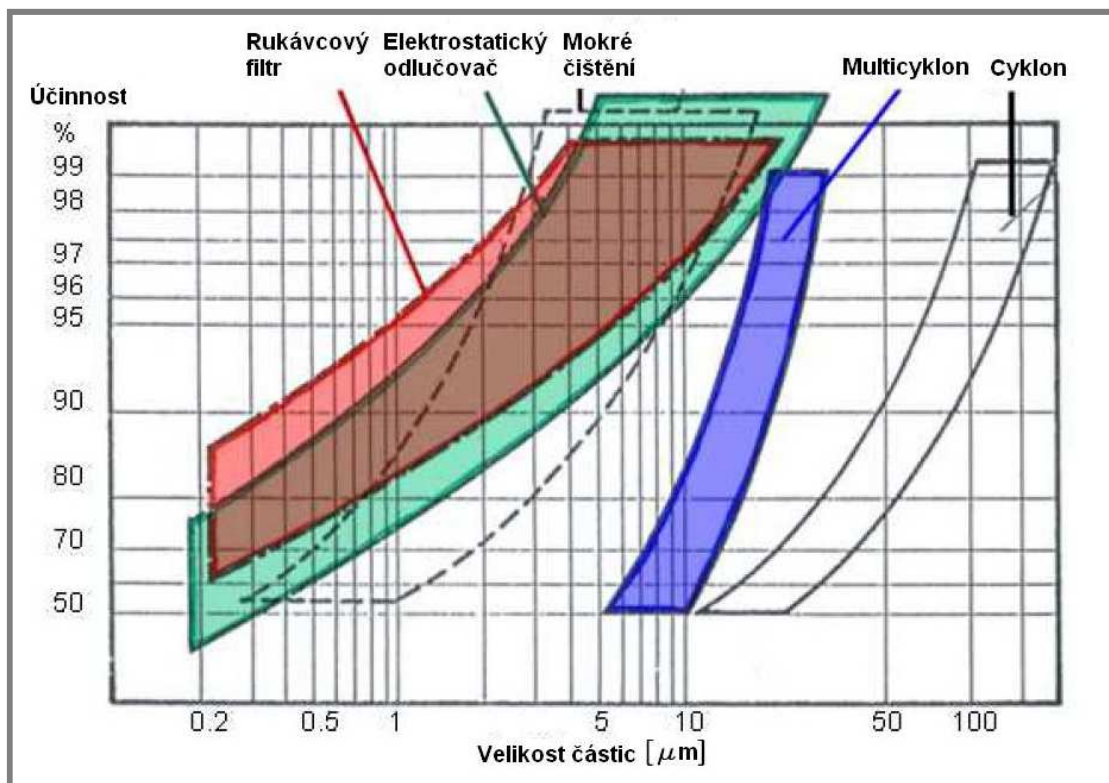
Multicyklon

Odlučování tuhých částic ze spalin za pomoci multicyklonu je zvoleno pro minimální energetickou náročnost a pro poměrně vysokou účinnost – zachycení 95% částic o velikosti 20 μm (obr. 15).

Multicyklon je umístěn bezprostředně za dohořivací komoru a je zde tedy nebezpečí nálepů popílku. Z tohoto důvodu je zvolen aparát Multiclone[®] (obr. 16) od společnosti The

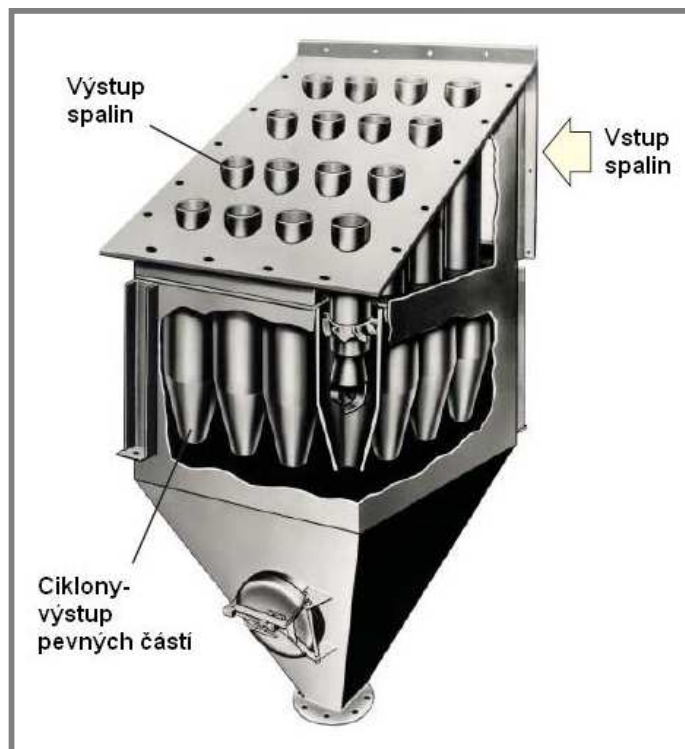
Babco and Wilcox Company, u kterého lze relativně snadno vyměnit nefunkční části a který dobře odolává vysokým teplotám.

Umístěním multicyklon za dohořivací komoru se eliminuje problém se zanášením kotle na odpadní teplo, který je umístěn za bezprostředně multicyklonem.



Obr. 17: Znázornění účinnosti jednotlivých aparátů při čištění spalin [34]

Pro srovnání je na obr. 15 uvedeno několik způsobů odlučování tuhých částic ze spalin a jak je patrné, multicyklon nedosahuje účinností ostatních aparátů. Jeho energetická náročnost je však několikanásobně nižší. K separaci částic, které nezachytí multicyklon jsou použity rukávcové filtry (které jsou popsány níže) instalované před konečným vypuštěním spalin do ovzduší.



Obr. 18: Mutlicyklon

2NaHCO₃ (bikarbonát sodný)

Tato tzv. suchá cesta čištění spalin byla vybrána zejména z následujících dvou z důvodů:

- relativní jednoduchost aparátů potřebných k celému technologickému procesu čištění spalin pomocí 2NaHCO₃ oproti mokrým nebo polomokrým způsobům
- v porovnání s ostatními suchými způsoby čištění spalin se spotřebuje méně 2NaHCO₃ a je tedy méně zbytků po čištění (tab. 10)

		2NaHCO ₃	Vápn
Spotřebované množství sorbentu při průtoku spalin 65 Nm ³ /h	HCl 1000 mg/ Nm ³ SO ₂ 200 mg/ Nm ³	217 kg/h	231 kg/h
Odpad po vyčištění spalin o průtoku 65 Nm ³ /h		168 kg/h	272 kg/h
Odpad po využití 1 tuny sorbentu	HCl	0,7 t	1,5 t
	SO ₂	0,8 t	1,8 t

Tab. 10: Srovnání spotřeby vápna a 2NaHCO₃ při čištění spalin [35]

Bikarbonát sodný se bude přidávat do spalin po jejich výstupu z kotle na odpadní teplo, přičemž vlastní nástřik bude obstarávat 8 samostatných trysek umístěných na počátek reakční komory. Konstrukce reakční komory je navržena tak, aby zajišťovala dobu nezbytnou k neutralizaci škodlivin ve spalinách – 3s od nástřiku 2NaHCO₃. Po této době je naprostá většina škodlivin ze spalin odstraněna, avšak neutralizace pokračuje na koláčích rukávcových filtrů, které odlučují poslední pevné části a zreagovaný bikarbonát sodný od spalin.

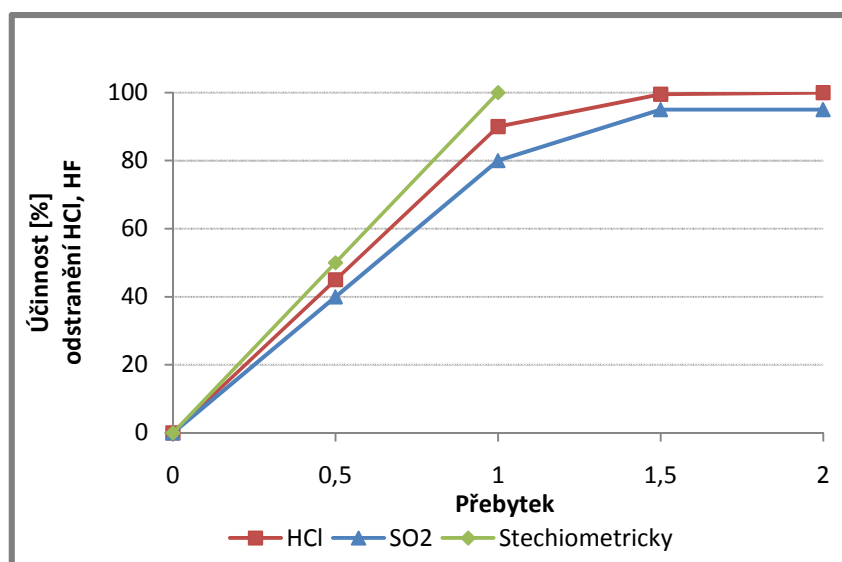
Ideální podmínky pro reakci 2NaHCO_3 se spalinami jsou následující [35,36]:

- teplota spalin: $180^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ (při této teplotě dochází k potřebné přeměně 2NaHCO_3 na NaHCO_3)
- zdržná doba: $2,5\text{s} - 3$
- velikost částic 2NaHCO_3 : $18\mu\text{m} - 25\mu\text{m}$

Pořadí, ve kterém probíhají reakce 2NaHCO_3 se škodlivinami obsaženými ve spalinách je následující [35]:

- | | | | |
|------|--|--------|--|
| I. | $\text{NaHCO}_3 + \text{HF}$ | —————→ | $\text{NaF} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ |
| II. | $\text{NaHCO}_3 + \text{HCl}$ | —————→ | $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ |
| III. | $2\text{NaHCO}_3 + \text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2$ | —————→ | $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$ |
| IV. | neutralizace asi 10% NO_x | | |

Spaliny ze spalování komunálních odpadů obsahují pouze nepatrné množství HF a těžkých kovů (tab. 5) a jejich neutralizaci lze proto dále ve výpočtech zanedbat, resp. jejich neutralizaci zajišťuje množství 2NaHCO_3 potřebné k neutralizaci HCl a SO_2 . Účinnost zbývajících dvou reakcí je znázorněna na následujícím grafu:



Graf 12: Znázornění účinností čištění v závislosti na přebytku 2NaHCO_3 [35]

Z výše uvedených reakčních rovnic lze vyjádřit spotřebu 2NaHCO_3 na 1 kg HCl a SO_2 :

- 2,3 kg 2NaHCO_3 neutralizuje 1 kg HCl
- 2,6 kg 2NaHCO_3 neutralizuje 1 kg SO_2

Hodnoty jsou stanoveny za předpokladu ideálního stechiometrického poměru, tedy přebytku 1. Z grafu 12 je však patrné, že při přebytku 1 se nedosahuje nejvyšších účinností a proto se běžně volí přebytek 1,25 – 1,5.

Pro úplnost jsou v následující tabulce uvedeny výsledky použití 2NaHCO_3 k čištění spalin ve dvou spalovnách komunálních odpadů situovaných v Itálii a Francii.

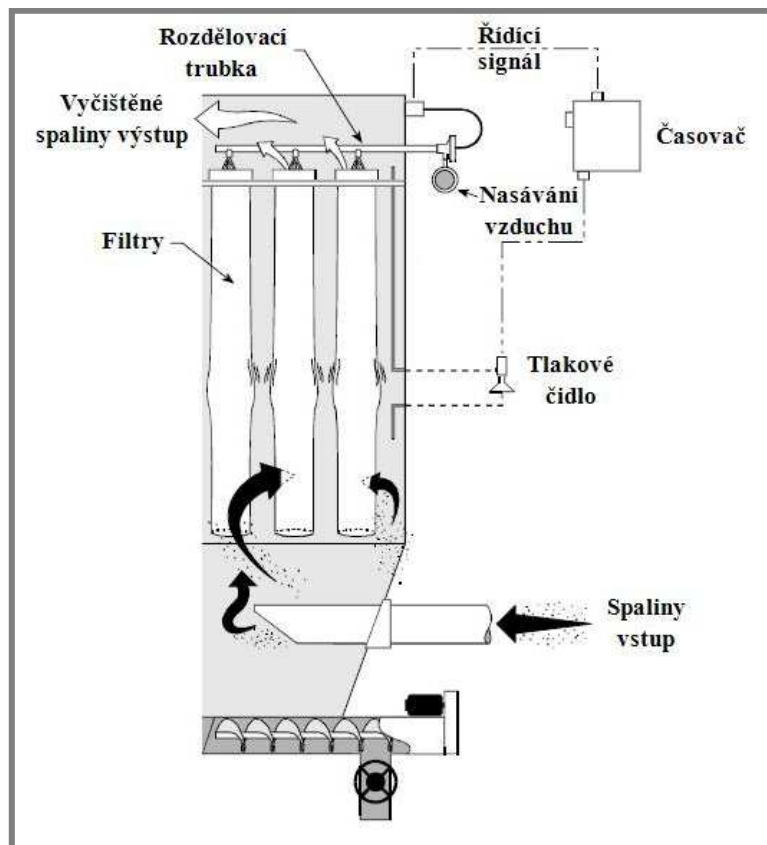
	Jednotky	Spaliny před čištěním		Spaliny po čištění	
		Francie	Itálie	Francie	Itálie
Teplota	°C	180 - 200	200		
Množství	Nm ³ /h	25000 - 28000	18000		
HCl	Mg/m ³	500 – 800 - 2000 (min.-prům.-max.)	1000 (prům.)	5	5
SO₂	Mg/m ³	20 – 100 – 500 (min.-prům.-max.)	150 (prům.)	2	2
HF + HBr	Mg/m ³	10	---	---	---
Těžké kovy					
• Sb+Pb+Cr+Cu+Mn+Ni+As+Co+V+Sn	Mg/m ³	±50	±10	<0,05	<0,05
• Cd+Ti		±1	±0,5	0,15	<0,05
• Hg		±10	±0,5	<0,01	<0,05

Tab. 11: Znázornění koncentrací škodlivyn ve spalínách po jejich vyčištění pomocí 2NaHCO₃ (při přebytku 1,3) [35]

Rukávcové filtry

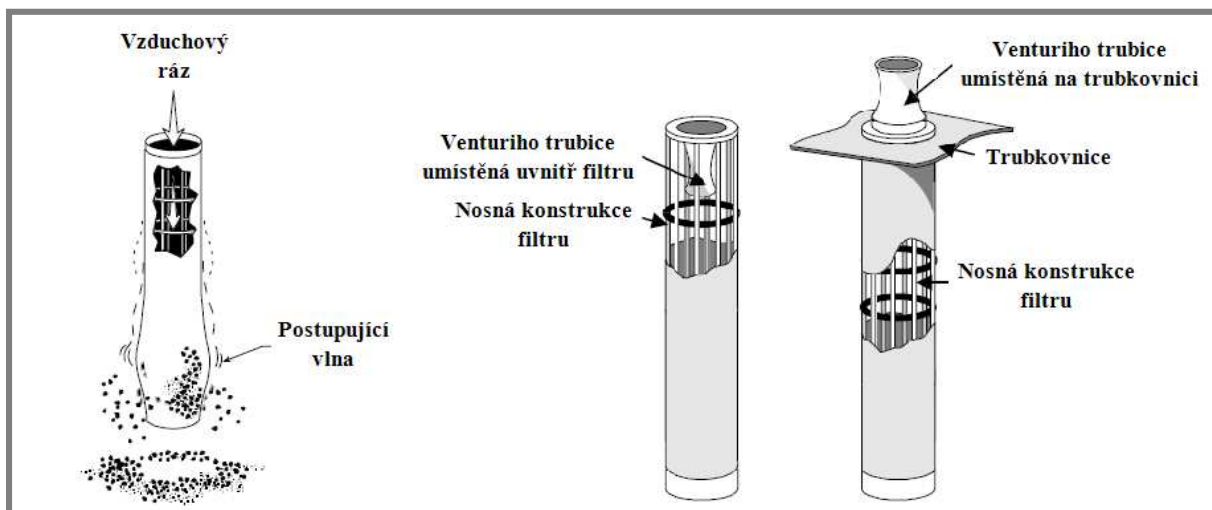
Do technologie jsou zařazeny ze dvou důvodů:

- odstranění pevných částic, které nezachytil multicyklon (účinnost multicyklonu i rukávcových filtrů je uvedena na obr. 15).
- k separaci zreagovaného 2NaHCO₃, přičemž ve vrstvě na filtrech probíhá doreagování zbylého bikarbonátu sodného.



Obr. 19: Pulzní technologie čištění [37]

Rukávcové filtry se liší dle technologie jejich čištění a použitého materiálu. Pro tento návrh spalovny je zvolena pulzní technologie čištění filtrů (obr. 17), která spočívá ve vyvolání vzduchové tlakové vlny (za pomoci venturiho trubice – obr. 18) opačným směrem, než je tok spalin (obr. 18).



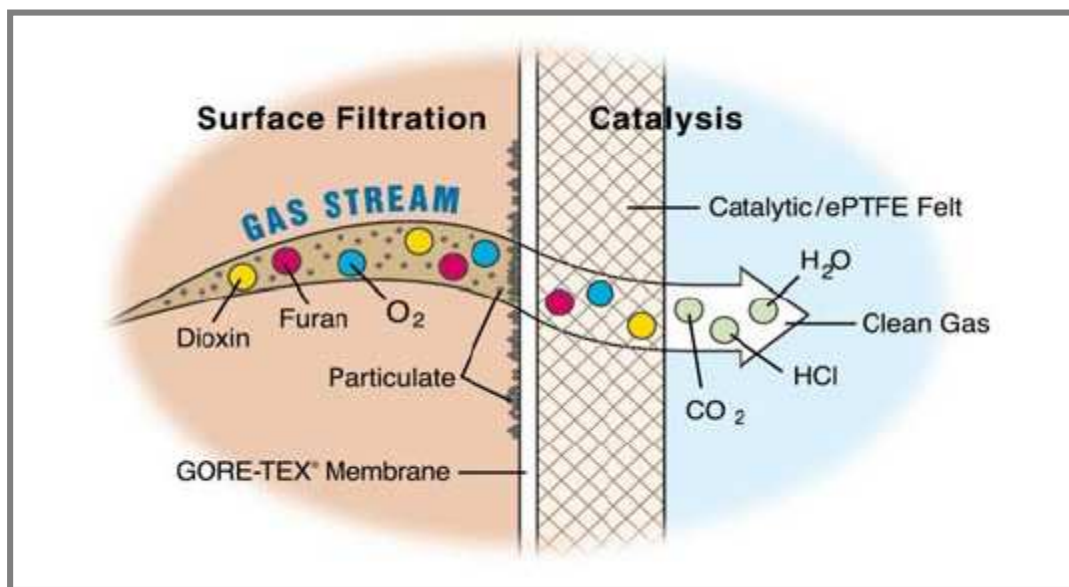
Obr. 20: Čištění pulzním rázem a konstrukce filtrů [37]

Základní parametry pulzní technologie jsou uvedeny v následující tabulce:

Frekvence	Záleží na nastavení systému. Čištění obvykle probíhá řadu po řadě, přičemž časování může být nastaveno libovolně (po větších časových intervalech, kontinuálně atd.)
Provozní režim	Čištění může probíhat jak při plném nebo částečném provozu, tak při odstavení aparátu.
Charakteristika tlakové vlny	Tlak vyvolané vzduchové vlny je obvykle v rozmezí 0,4 – 0,69 MPa za plného provozu filtru a 0,28 – 0,69 MPa při odstavení filtru. Doba 1 pulzu je obvykle 0,1 s.
Rozměry rukávcových filtrů	Průměry od 127 do 152,4 mm; délky od 2,4 do 6 metrů

Tab. 12: Základní parametry pulzní technologie čištění filtrů [37]

Jako materiál filtrů je zvolen Aramid s membránou Gore-tex. Materiál je zvolen tak, aby odolal navržené teplotě spalin na výstupu z kotle na odpadní teplo ~ 200°C. Díky charakteru spalovny se nepředpokládá zvýšená tvorba dioxinů a tedy překročení limitních hodnot. V případě potřeby (překročení limitů pro PCDD/F) je však možné na místo zvolených rukávcových filtrů nainstalovat filtry s katalyzátorem, které velice dobře pracují při teplotách spalin kolem 200°C. Princip je znázorněn na následujícím obr. [38]



Obr. 21: Znázornění čištění spalin pomocí rukávcových filtrů s katalyzátorem [38]

Parametry potřebné k výpočtu:

průměr rukávce D_b [m]:	0,12 - 0,15	0,15
délka rukávce L_b [m]:	2,4 - 6	zvoleno: 4
koeficient prostupu filtrem AC [(m ³ /s)/m ²]:	0,76 - 1,22	0,0203
koeficient tlakové ztráty na čistém rukávci K_1 [kPa/(m/min)]		0,483871
koeficient tlakové ztráty na koláči K_2 [kPa/(m/min)/(g/m ²)]		0,001216
regenerační cyklus t_{reg} [h ⁻¹]		0,75

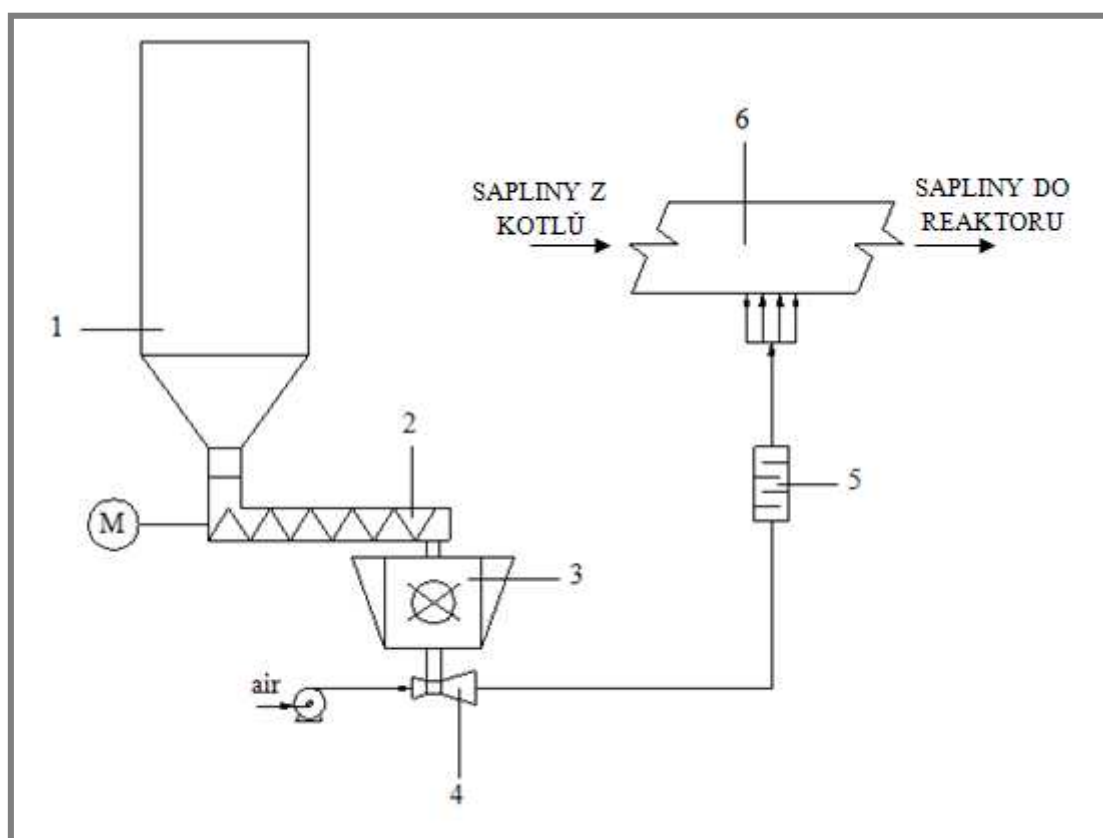
3.5. Doplnkové aparáty

Mezi doplňkové aparáty lze zařadit celou škálu zařízení, které se podílejí na chodu spalovny. Mezi nejdůležitější, a níže popsané, lze považovat zařízení k dávkování 2NaHCO_3 , reaktor zajišťující dostatečnou dobu styku spalin s 2NaHCO_3 (3s) a tepelný výměník na předehřev napájecí vody pro kotel na odpadní teplo. Z těchto aparátů je početně řešen pouze tepelný výměník.

Dávkování 2NaHCO_3

Z ekonomických důvodů se bikarbonát sodný dodává o větší zrnitosti, než jsou ideální rozměry pro reakci ($18\mu\text{m} - 25\mu\text{m}$). Na tyto rozměry se upravuje již v prostorách spalovny a to mletím.

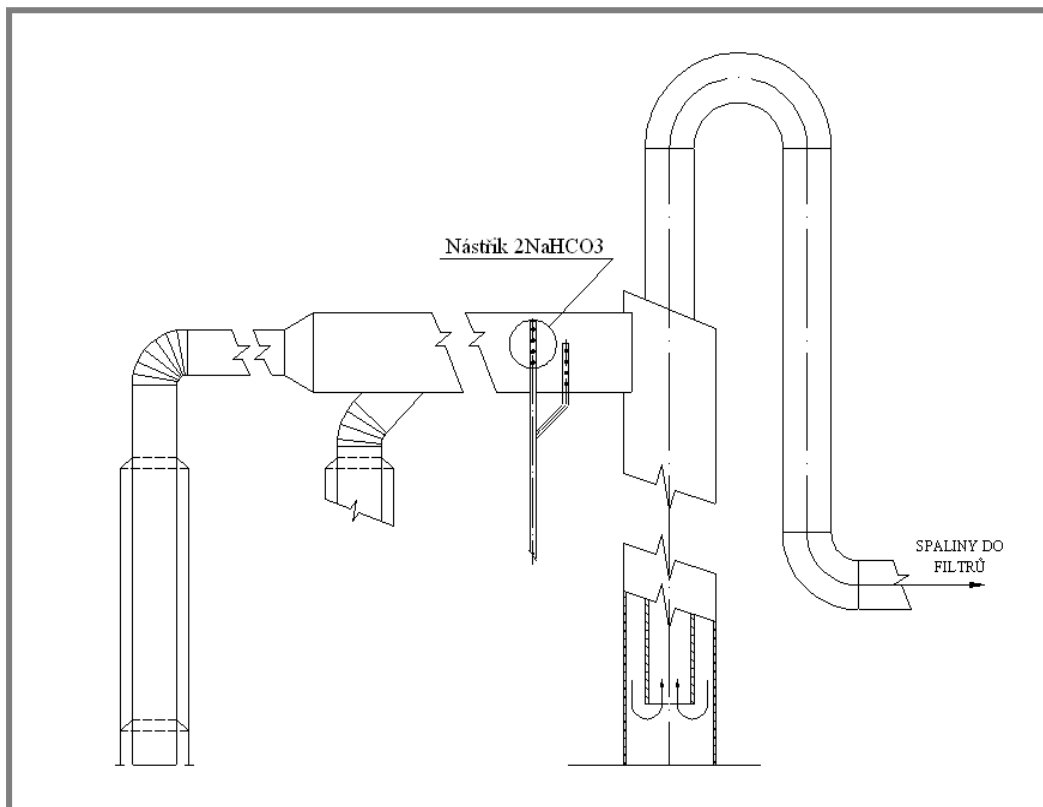
Dovážený 2NaHCO_3 se bude skladovat v silech (1). Z těchto sil bude pomocí šnekového dopravníku (2), jehož otáčky budou korigovány v závislosti na naměřených emisích spalin na vstupu do atmosféry, přiváděn na mlýn (3). Za mlýnem bude instalována ejektor (Veturiho trubice) (4), kterou proudí vzduch vháněný kompresorem. Proudící vzduch bude přisávat upravený 2NaHCO_3 . Ve statickém směšovači (5) dojde k promíchání obou médií a následnému dávkování do reaktoru (6).



Obr. 22: Dávkování 2NaHCO_3

Reakční komora

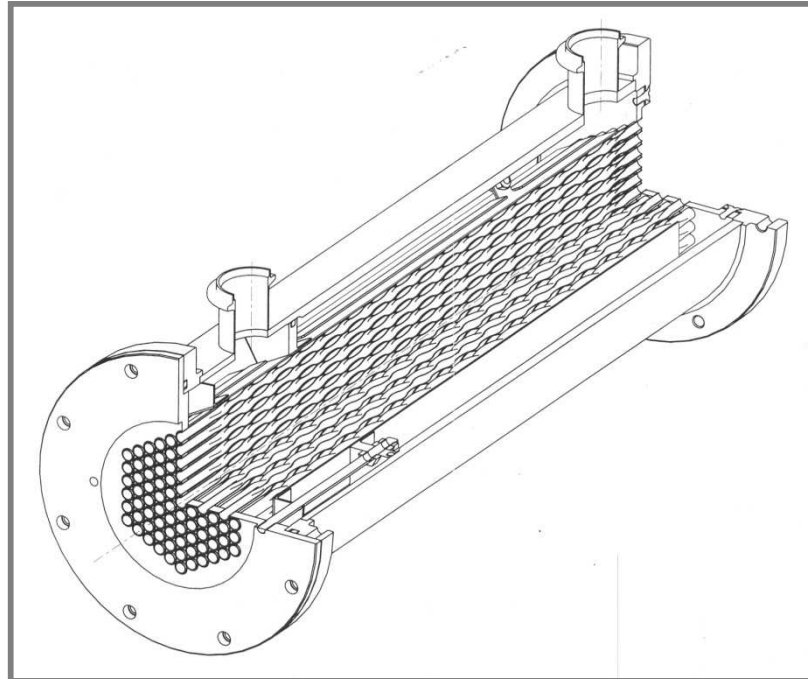
Reakční komora musí být navržena tak, aby zdržná doba spalin byla 3s. Možných konstrukcí reakčních komor je mnoho, jedna z nich je na následujícím obr. spolu se znázorněným odvodem spalin z kotlů na odpadní teplo.



Obr. 23: Odvod spalin z kotlů do reakční komory

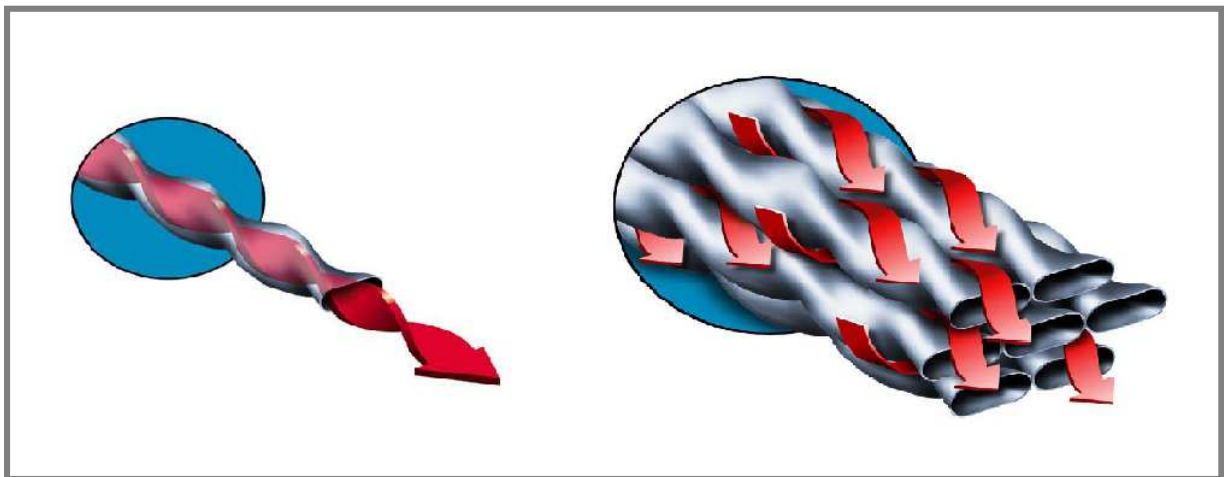
Tepelný výměník

Tepelný výměník je instalován za rukávcové filtry (znázornění zapojení je uvedeno v příloze 3). Bude v něm probíhat výměna tepla mezi spalinami a napájecí vodou pro kotel na odpadní teplo. Vybraný typ výměníku je tzv. výměník se zkroucenými trubkami: twisty-tube heat exchanger (následující obr.).



Obr. 24: Twisty-tube heat exchanger [39]

Hlavní přednost tohoto typu výměníku oproti běžným výměníkům s hladkými trubkami je docílení turbulentního proudění obou médií již při nízkých rychlostech. Je to způsobeno právě zkroucenými trubkami (obr. 23). Turbulentní proudění má za následek vyšší součinitele přestupu tepla (až o 40%) při nižších tlakových ztrátách [39].



Obr. 25: Twisted – tube [39]

Parametry k výpočtu:

teplota vody na vstupu (z odplynováku) tw_{in} [°C]:	105
průměr trubek d_t [m]	0,008
tloušťka stěny th_w [m]	0,0004
šířka zplacatění w [m]	0,003

4. VÝPOČET HLAVNÍCH APARÁTŮ

K výpočtu byl použit program MathCad v.14. K zjištění některých nezbytných hodnot byly použity již naprogramované parní tabulky, taktéž v prostředí MathCad.

Výstup z programu MathCad je uveden v příloze 5, která je (z důvodů rozsáhlosti práce) pouze v elektronické podobě.

V následující kapitole a v některých přílohách se může formální zápis odlišovat. Je to způsobeno použitím textového editoru Word v kombinaci s programem MathCad.

Výpočet je založen na předběžném návrhu uvedeném v kap. 3. za předpokladu celoročního kontinuálního provozu se 14-denní odstávkou dvakrát ročně pro potřebu údržby zařízení.

Ve výpočtu je uvažována pouze jedna soustava (rotační pec, dohořivací komora, kotel na odpadní teplo), a je tedy počítáno s polovičním objemem spálených odpadů. Při návrhu parní turbíny a systému na čištění spalin je tedy nutné vypočtené hodnoty vycházející z návrhu kotle na odpadní teplo (množství přehřáté páry a množství spalin) dvakrát zvětšit.

Předpokládaná kapacita spalovny je přibližně $m_y = 100\,000$ T ročně. Tato hodnota je již zredukována o mechanicky vytríděné složky, např. nespalitelný odpad, recyklovatelné složky odpadu atd.

Tabulka hodnot vstupujících do výpočtu:

$\%O$	Podíl O v odpadu (kap. 3.1.)	42,3 %	[-]
$\%H$	Podíl H v odpadu (kap. 3.1.)	6,1 %	[-]
$\%C$	Podíl C v odpadu (kap. 3.1.)	48,7 %	[-]
AC	Koeficient prostupu filtrem (kap. 3.4.)	0,0203	$[(m^3/s)/m^2]$
D_b	Průměr rukávce (kap. 3.4.)	0,15	[m]
ff	Stupeň naplnění spal komory (kap. 3.2.)	10 %	[-]
K_1	Konstanty tlakové ztráty na čistém (kap. 3.4.)	0,483871	[kPa/(m/min)]
K_2	Konstanty tlakové ztráty na tvořícím se koláči (kap. 3.4.)	0,001216	$\left[\frac{kPa/(m/min)}{g/m^2}\right]$
L_b	Délka rukávce (kap. 3.4.)	4	[m]
LHV	Tepelná kapacita odpadu (kap. XX) (kap. 3.1.)	11,43	[kJ/kg]
m_{vz}	Molární hmotnost vzduchu	28,96	[g/mol]
m_y	Množství spáleného odpadu (kap. 3.1.)	50 000	[T/rok]
p	Tlak páry na výstupu z kotle (kap. 3.3.)	2,5	[MPa]
p_{ex}	Tlak páry na odběru z turbíny (kap. 3.3.)	1,1	[MPa]
p_{fg}	Tlak spalin	105	[kPa]
rLD	Poměr mezi délkou a průměrem rotační pece (kap. 3.2.)	3,5	[-]
Rf	Tloušťka stěny rotační pece (kap. 3.2.)	0,45	[m]
R	Molární plynová konstanta	8,315	[J/mol·K]
s	Úhel sklonu rotační komory (kap. 3.2.)	3 %	[-]
S	Sutherlandova konstanta pro vzduch	110,56	[K]
t_{ex}	Teplota spalin na výstupu z dohořivací komory (kap. 3.2.)	1000	[°C]
t_{ref}	Teplota okolí	15	[°C]
t_{reg}	Regenerační cyklus (perioda čištění) (kap. 3.4.)	0,75	[h ⁻¹]

t_p	Teplota páry na výstupu z kotle (kap. 3.3.)	530	[°C]
$t_{w_{in}}$	Teplota na výstupu z odplynováku	105	[°C]
T_0	Teplota vzduchu za normálních podmínek	273,15	[K]
VZD_{BIC}	Minimální poměr mezi vzduchem a přepravovaným médiem	1,73	[(m ³ /s)/(kg/s)]
x	Hmotnostní podíl pevného uhlíku v hořlavině (kap. 3.1.)	8,8 %	[-]
w	Hmotnostní podíl vlhkosti v odpadu (kap. 3.1.)	20%	[-]
η_m	Mechanická účinnost turbíny	0,95	[-]
μ_0	Dynamická viskozita vzduchu za normálních podmínek	$1,7894 \cdot 10^{-5}$	[Pa·s]
ρ_{BIC}	Hustota 2NaHCO ₃	2173	[kg/m ³]
ρ_w	Hustota odpadu (kap. 3.1.)	600	[kg/m ³]
τ	Doba zdržení odpadu ve spalovací komoře (kap. 3.2.)	120	[min]

Tab. 13: Hodnoty vstupující do výpočtu

4.1. Předběžné výpočty

Zde jsou uvedeny vztahy a vypočteny hodnoty, které jsou používány v průběhu celého výpočtu.

Množství spalovaného odpadu

Množství spáleného odpadu na jednu soustavu při provozu 8000 hod. ročně:

$$m_h = \frac{m_y}{2 \cdot 8000} = 6,25 \left[\frac{T}{hod} \right] \Rightarrow m = 1,736 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (1.1)$$

kde m_h ... množství spáleného odpadu [t/hod]
 m ... množství spáleného odpadu [kg/s]

Určení střední tepelné kapacity

Tepelné chování spalin při ohřevu nebo chladnutí je velmi podobné chování vzduchu. Pro zjednodušení výpočtu je tedy uvažována tepelná kapacita spalin shodná s tepelnou kapacitou vzduchu cp_{air} . Tepelná kapacita vzduchu je počítána dle vztahu (1.2) a vychází z předpokladu znalosti intervalu teplot na základě čehož lze v daném výpočtu využít tzv. střední teploty.

$$cp_{air} = A + B \cdot t_m + C \cdot t_m^2 + D \cdot t_m^3 \quad (1.2)$$

kde cp_{air} ... střední tepelná kapacita pro interval teplot <T1;T2> [J/kgK]
 t_m ... střední teplota na intervalu <T1;T2> [°C]

Střední teplota [°C]:

$$t_m = \frac{T1 + T2}{2} \quad (1.3.)$$

Konstanty pro výpočet střední tepelné kapacity [-] [50]:

$$A=1004,336 \quad B=2,488 \cdot 10^{-3} \quad C=5,953 \cdot 10^{-4} \quad D=-4,537 \cdot 10^{-7}$$

4.2. Termická část

Tato kapitola je rozdělena na dvě části. První část se věnuje návrhu základních rozměrů rotační pece a část druhá výpočtům tepelných a hmotnostních bilancí.

Druhá část v sobě zahrnuje výpočty reprezentující tepelné toky v rotační peci a dohořivací komoře, přičemž jsou oba aparáty brány jako jeden uzel. Umožňuje to fakt, že do dohořivací komory není potřeba přidávat palivo (zemní plyn) ke zvýšení teploty (viz kap. 3.2.).

4.2.1. Základní rozměry rotační pece

Výpočet je založen na postupu uvedeném v [40]

Vztahy potřebné k výpočtům základních rozměrů pece:

Průřez rotační pece A [m²]:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.1)$$

kde D ... vnitřní průměr rotační pece [m]

Objem spáleného odpadu m [kg/s]:

$$m = \frac{ff \cdot A \cdot L \cdot \rho_w}{\tau} \quad (2.2)$$

kde ff ... stupeň naplnění spal komory [%]
 L ... délka rotační pece [m]
 ρ_w ... hustota odpadu [kg/m³]
 τ ... doba zdržení odpadu ve spal. komoře [min]

Poměr mezi délkou a průměrem rotační pece rLD [-]:

$$rLD = \frac{L}{D} \quad (2.3)$$

Rychlost otáčení n [1/min]:

$$n = \frac{rLD \cdot 0,19}{s \cdot \tau} \quad (2.4)$$

kde s ... úhel sklonu rotační komory [%]

Vnější průměr rotační pece D_{OUT} [m]:

$$D_{OUT} = D + 2 \cdot Rf \quad (2.5)$$

kde Rf ... tloušťka stěny rotační pece [m]

Hodnoty ff , τ , rLD , Rf , s a ρ_w jsou uvedeny v tab. 13.

Upravením vztahů (2.1 – 2.5) a následným dosazením příslušných hodnot vypočteme vnitřní průměr rotační pece D :

$$D = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \tau \cdot m}{\pi \cdot rLD \cdot ff \cdot \rho}} = 3,776 \text{ [m]} \quad (2.6)$$

volím $D = 3,5 \text{ m}$.

Dosazením do 2.7, 2.8, a 2.9 vypočteme vnější délku L , vnější průměr D_{OUT} resp. otáčky n rotační pece:

$$D_{OUT} = D + 2 \cdot Rf = 4,4 \text{ [m]} \quad (2.7)$$

$$L = rLD \cdot D = 10,5 \text{ [m]} \quad (2.8)$$

$$n = \frac{rLD \cdot 0,19}{s \cdot \tau} = 0,158 \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (2.9)$$

4.2.2. Tepelná bilance

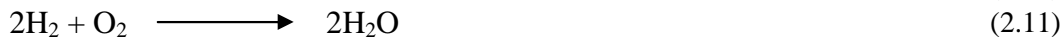
Výpočet je založen na postupech uvedených v [41,42]

Kritérium pro tento výpočet je teplota 1000°C na výstupu z dohořivací komory. Princip navrženého výpočtu v programu MathCad je takový, že uživatel nastavuje přebytek primárního a přebytek sekundárního spal. vzduchu, které na základě níže uvedených vztahů vedou ke stanovení požadované výstupní teploty spalin z dohořivací komory.

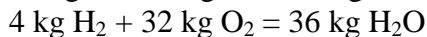
Na základě reakcí (2.10, 2.11 a 2.12) zvolených přebytků vzduchu se určí množství primárního, sekundárního a celkového množství spal. vzduchu. Podle přebytků vzduchu se za pomoci grafu 14 určí adiabatické teploty plamene a z reakcí reprezentujících spalování (2.10) a (2.11) se určí množství vzniklých spalin za předpokladu ideálního spalování. Celková teplota spalin je pak dána promícháním spalin z primárního (rotační pec) a sekundárního (dohořivací komora) hoření.

Potřebné množství primárního a sekundárního spal. vzduchu

Výpočet množství spalovacího vzduchu je založen na následujících reakcích:



Obsah síry v palivu (odpad) je zanedbatelný (kap. 3.1.), a proto se v následujících výpočtech reakce (2.12) neuvažuje. Dosazením molárních hmotností do zbývajících dvou reakcí se získají následující stechiometrické rovnice:



Úpravou rovnic se dostane množství kyslíku potřebné ke spálení 1 kg paliva - odpadu. Od výsledné hodnoty se dále odečte množství kyslíku obsaženého v samotném palivu. Celkové stechiometrické množství spal. vzduchu AC_{stech} [kg/kg (paliva)] (2.13) se dostane následným rozšířením vztahu o hmotnostní podíl kyslíku obsaženého ve vzduchu.

$$AC_{stech} = \left(\%C \times \frac{32}{12} + \%H \times \frac{32}{4} - \%O \right) \times \frac{1}{\%O_{air}} \quad (2.13)$$

kde $\%C$... podíl C v odpadu [-] (tab. 13)
 $\%H$... podíl H v odpadu [-] (tab. 13)
 $\%O$... podíl O v odpadu [-] (tab. 13)
 $\%O_{air}$... podíl O ve vzduchu [-]

přičemž hmotnostní složení vzduchu je uvažováno ve zjednodušeném tvaru:

$$O_{air} = 23,3\% \text{ a } N_{air} = 76,7\%$$

V takto vypočtené hodnotě AC_{stech} je zahrnut jak primární, tak sekundární vzduch. Primární vzduch slouží k podpoře hoření pevné části odpadu v rotační peci, tedy té části hořlaviny, která zbyla po odpaření těkavých látek (pyrolýze). Protože po odpaření těkavých látek zbyl z hořlaviny pouze pevný uhlík, je výpočet množství primárního vzduchu založen pouze na reakci (2.10). Stechiometrické množství primárního vzduchu AP_{stech} je tedy následující:

$$AP_{stech} = x \times \frac{32}{12} \times \frac{1}{\%O_{air}} = 1,001 \text{ [kg/kg]} \quad (2.14)$$

kde x ... hmotnostní podíl pevného uhlíku v hořlavině [-] (tab. 13)

Těkavé látky jsou unášeny spalinami do dohořivací komory, kde následně po přidání sekundárního vzduchu shoří. Potřebné množství sekundárního vzduchu tedy závisí na množství odpařených těkavých látek ze spal. odpadu, mezi které patří jak zbývající část uhlíku C, tak všechny vodík H a kyslík O. K výpočtu stechiometrického množství sekundárního vzduchu AS_{stech} je tedy nutné použít obě reakce – (2.10 a 2.11).

$$AS_{stech} = \left((\%C - x) \times \frac{32}{12} + \%H \times \frac{32}{4} - \%O \right) \times \frac{1}{\%O_{air}} \quad (2.15)$$

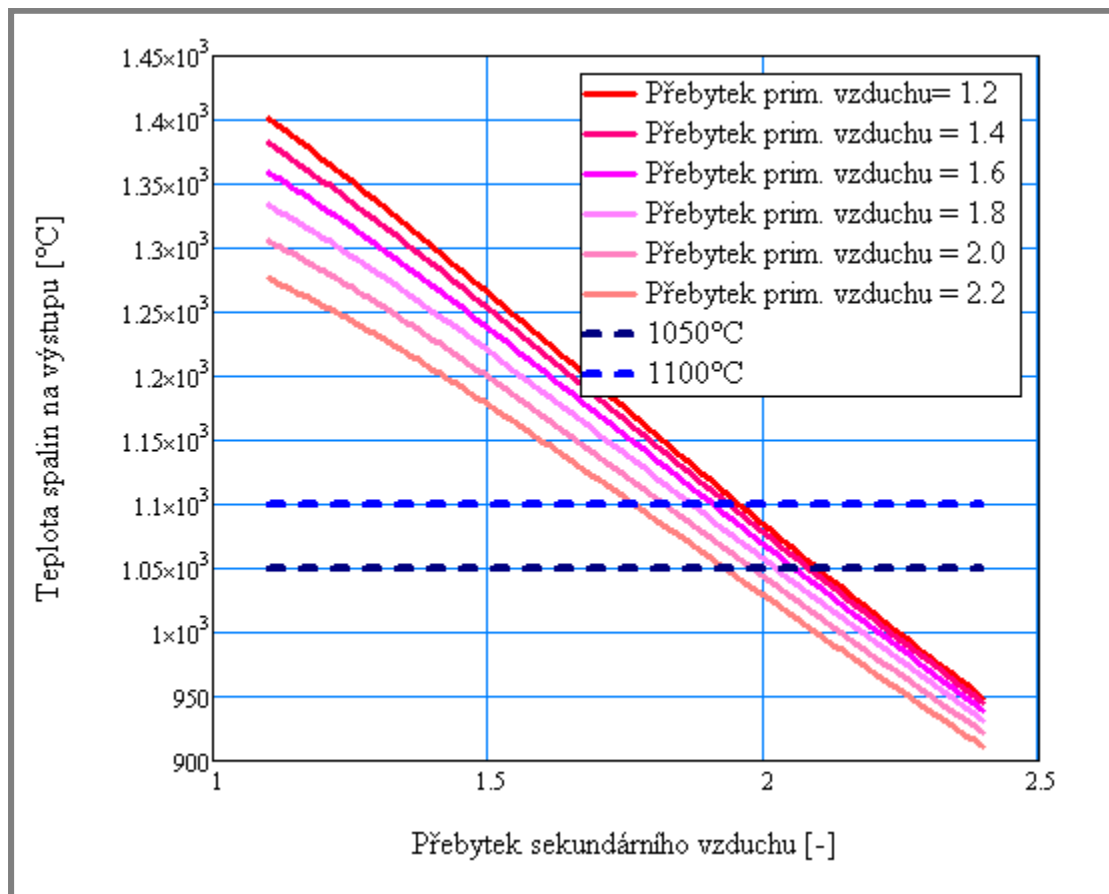
$$AS_{stech} = 4,425 \text{ [kg/kg]}$$

Stechiometrické množství je ideální množství určené na základě rovnic pro ideální spalování. U reálného spalování je však potřeba určit přebytek vzduchu (λ_p – pro primární vzduch, λ_s – pro sekundární vzduch). Vložení vztahů (2.14 a 2.15) do rovnice (2.16) a následným rozšířením o λ_p a λ_s získáme skutečnou potřebu spal. vzduchu AC (2.17). Celková spotřeba spal. vzduchu AC_m se stanoví z množství spalovaného odpadu m (1.1).

$$AC = \lambda_p \times AP_{stech} + \lambda_s \times AS_{stech} = 10,253 \text{ [kg/kg]} \quad (2.16)$$

$$AC_m = AC \times m = 17,8 \text{ [kg/s]} \quad (2.17)$$

přičemž přebytky vzduchu jsou stanoveny na základě grafu 13 na $\lambda_p = 2,2$ a $\lambda_s = 1,8$. Přebytky jsou stanoveny tak, aby předběžná teplota spalin t_{com} (2.18) byla 1050°C – 1100°C a aby vyšší teplota byla v dohořivací komoře.



Graf 13: Teplota spalin v závislosti na přebytku primárního a sekundárního vzduchu

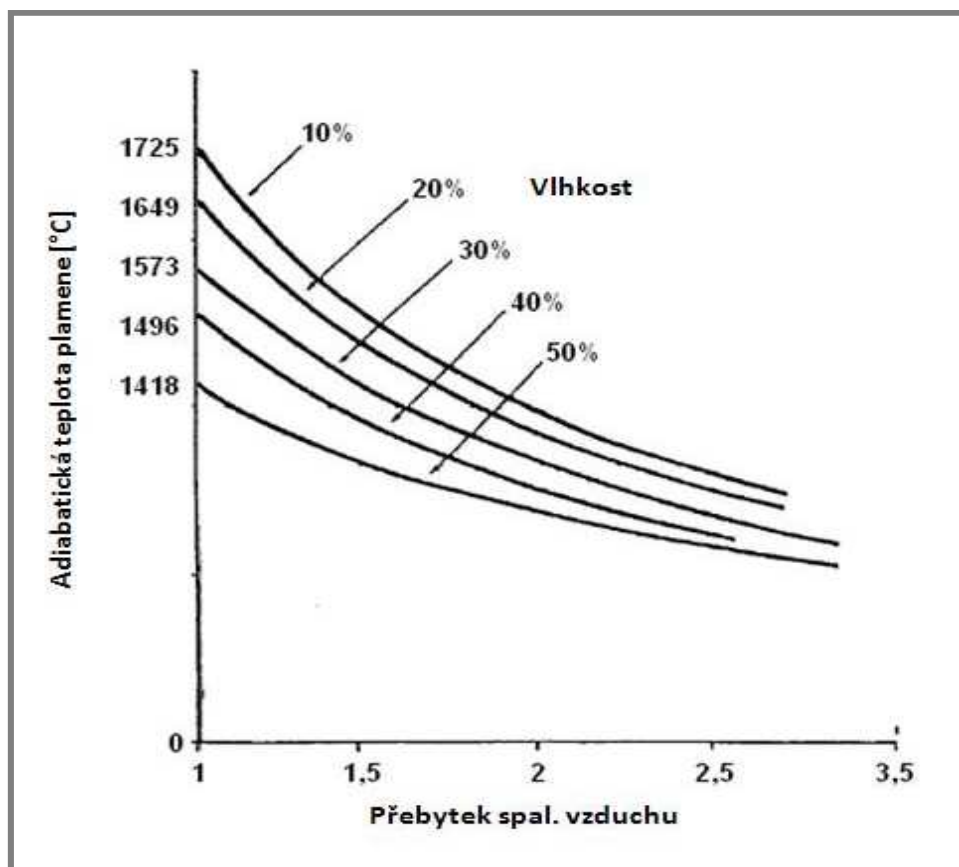
Graf 13 je specifický pro zde uvažované složení paliva. Použití grafu pro palivo o jiném složení je možné až po změně vstupních dat v programu MathCad.

Adiabatická teplota plamene

Na základě přebytků spal. vzduchu (λ_p a λ_s) a vlhkosti odpadu $w = 20\%$ (tab. 13) jsou dle níže uvedeného diagramu stanoveny adiabatické teploty plamene (diagram je také převeden do programu MathCad):

$$T_p = 1031 \text{ [°C]}$$

$$T_s = 1210 \text{ [°C]}$$



Graf 14: Adiabatická teplota plamene v závislosti na vlhkosti a přebytku vzduchu [51]

Množství vzniklých spalin vztahované na kg odpadu (bez vlhkosti)

Výpočet je založen na reakcích (2.10 a 2.11) přičemž je předpokládán ideální průběh spálení paliva. Tzn., že produkty spalování jsou pouze CO₂ a H₂O dle reakčních rovnic, dále pak N₂, který přechází ze vzduchu do spalin v nezměněné formě a zbytkový nevyužitý kyslík O₂.

Množství spalin po primárním hoření v rotační peci [kg/kg] (dle reakce 2.10):

$$\begin{aligned} CO_2 & : x \times \left(1 + \frac{32}{12}\right) \\ N_2 & : \lambda_p \times AP_{stech} \times \%N_{air} \\ O_2 & : (\lambda_p - 1) \times AP_{stech} \times \%O_{air} \end{aligned}$$

Množství spalin po sekundárním hoření v dohořivací komoře [kg/kg] (dle reakce 2.11):

$$\begin{aligned} H_2O & : \%H \times \left(1 + \frac{32}{4}\right) \\ N_2 & : \lambda_s \times \left(\%H \times \frac{32}{4} - \%O\right) \times \frac{\%N_{air}}{\%O_{air}} \\ O_2 & : (\lambda_s - 1) \times \left(\%H \times \frac{32}{4} - \%O\right) \end{aligned}$$

Množství spalin po sekundárním hoření v dohořivací komoře [kg/kg] (dle reakce 2.10):

$$\begin{aligned}
 CO_2 & : (\%C - x) \times \frac{44}{12} \\
 N_2 & : \lambda_s \times (\%C - x) \times \frac{32}{12} \times \frac{\%N_{air}}{\%O_{air}} \\
 O_2 & : (\lambda_s - 1) \times (\%C - x) \times \frac{32}{12}
 \end{aligned}$$

Po dosazení do výše uvedených vztahů pro množství spalín a následném sečtení výsledných hodnot se dostane celkové množství kouřových plynů F_g z ideálního spálení hořlavé části odpadu (bez započítání vlhkosti). Výše uvedené vztahy pro výpočet množství spalín lze vyjádřit jedinou rovnicí:

$$\begin{aligned}
 F_g = \%C \times \frac{44}{12} + \lambda_p \times AP_{stech} \times \%N_{air} + \lambda_s \times \frac{\%N_{air}}{\%O_{air}} \\
 \times \left[\left(\%H \times \frac{32}{12} - \%O \right) + (\%C - x) \times \frac{32}{12} \right]
 \end{aligned}$$

$$F_g = 10,931 [kg/kg] \rightarrow F_g \cdot m \cdot (1 - w) = 15,18 [kg/s]$$

Teplota spalín

Předběžná výsledná teplota spalín t_{com} na základě které se v programu MathCad stanovují přebytky spal. vzduchu (λ_p a λ_s) je vyjádřena pomocí tepelné bilance takto:

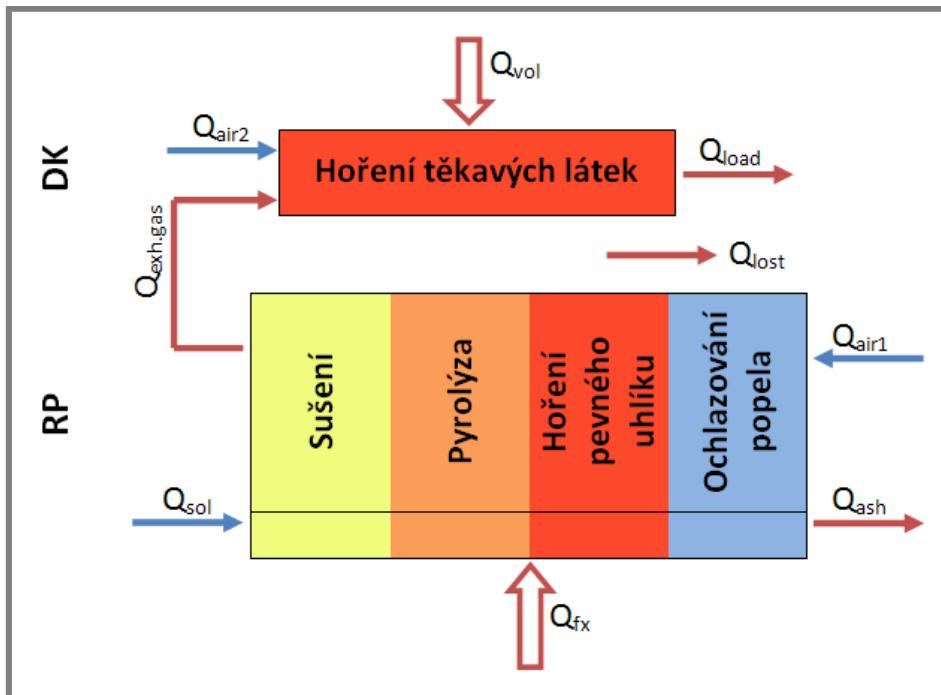
$$t_{com} = \frac{T_p \times (\lambda_p \times AP_{stech}) + T_s \times (\lambda_s \times AS_{stech})}{F_g} = 1090 [^\circ C] \quad (2.18)$$

Požadovaná teplota spalín je $1000^\circ C$. Protože nejsou uvažovány ztráty a výpočet t_{com} je pouze orientační, lze výsledek $t_{com} = 1090^\circ C$ považovat za uspokojující, přičemž v dalších výpočtech se bude uvažovat výstupní teplota spalín z dohořivací komory $t_{fg} = 1000^\circ C$. Rozdíl teplot ($t_{com} - t_{fg}$) vytváří postačující rezervu pokrývající jak tepelné ztráty (bývá uvažováno 0,02%) tak odchylku F_g od skutečné hodnoty m_{fg} (2.25), vyjádřené tepelnou bilancí, která již zahrnuje vlhkost odpadu w .

V případě, že skutečná výstupní teplota spalín nebude odpovídat požadovaným $1000^\circ C$ (při měření za provozu), lze teplotu snížit resp. zvýšit upravením (zvýšením resp. snížením) množství přiváděného spalovacího vzduchu. Bude-li to nezbytné, lze teplotu spalín zvýšit užitím záložního hořáku na zemní plyn, který bude instalován v dohořivací komoře.

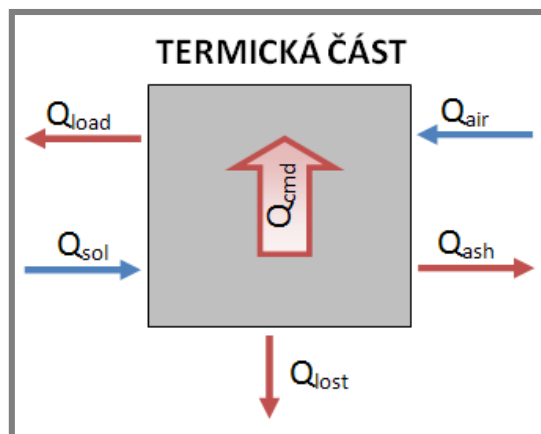
Skutečné množství spalín

Skutečné množství spalín m_{fg} vychází z tepelné bilance (2.19) zahrnující tepelné toky, které mají vliv na dění v termické části spalovny. Tyto tepelné toky jsou znázorněny na obr. 24.



Obr. 26: Tepelné toky v RP a DK

Rotační pec a dohořívací komora budou pro potřeby bilančního výpočtu vnímány jako jeden uzel (odpadne tepelný tok znázorňující proud spalin z RP do DK - $Q_{exh,gas}$ a lze sloučit tepelné toky reprezentující spal. vzduch: $Q_{air1}, Q_{air2} \rightarrow Q_{air}$). Skutečnost, že jediné palivo dodávané do termické části je samotný odpad umožňuje sloučení tepelných energií uvolněných palivem ($Q_{vol}, Q_{fx} \rightarrow Q_{cmd}$). Zjednodušení je znázorněné na obr. 25.



Obr. 27: Zjednodušení tepelných toků termické části

Rovnice tepelné bilance pro takto znázorněný uzel tedy vypadá:

$$Q_{cmd} + Q_{air} = Q_{loss} + Q_{load} + Q_{ash} \quad (2.19)$$

- kde
- Q_{cmd} ... teplo uvolněné spalováním odpadu [kJ/kg]
 - Q_{air} ... teplo přivedené spal. vzduchem [kJ/kg]
 - Q_{loss} ... tepelné ztráty do okolí [kJ/kg]
 - Q_{load} ... teplo odvedené spalinami [kJ/kg]
 - Q_{ash} ... teplo odvedené popelem [kJ/kg]

Následující výpočet tepelné bilance je založen na předpokladu, že teplota spalin na výstupu z termické části t_{fg} je 1000 °C, teplota popela t_{ash} je stanovena přibližně na 200°C (kap. 3.2.). Předpokládaná teplota odpadu vstupující do spalovacího procesu je 15°C, jeho tepelný přínos Q_{cmd} je tedy zanedbán. Stejně tak teplo vnesené spalovacím vzduchem Q_{air} , který není přehříván a má stejnou teplotu jako okolí: 15°C. Potřeba započítat tepelné ztráty do okolí Q_{lost} v následujícím bilančním výpočtu je eliminována dostatečně velkým rozdílem t_{com} a t_{fg} . Rovnice (2.20) bude tedy vypadat takto:

$$Q_{cmd} = Q_{load} + Q_{ash} \quad (2.20)$$

Pro tepelné toky z rovnice (2.20) lze psát následující vztahy [kJ/s]:

$$Q_{cmd} = m \cdot LHV \quad (2.21)$$

$$Q_{load} = m_{fg} \cdot cp_{air} \cdot (t_{fg} - t_{ref}) \quad (2.22)$$

$$Q_{ash} = m_{ash} \cdot cp_{ash} \cdot (t_{ash} - t_{ref}) \quad (2.23)$$

kde	m	... množství spáleného odpadu [kg/s]
	LHV	... tepelná kapacita odpadu [kJ/kg] (tab. 13)
	m_{fg}	... množství spalin na výstupu [kg/s]
	m_{ash}	... množství popela na výstupu [kg/s]
	cp_{air}	... střední tepelná kapacita spalin [kJ/kgK] (tab. 13)
	cp_{ash}	... tepelná kapacita popela [kJ/kgK]
	t_{fg}	... teplota spalin na výstupu [°C]
	t_{ash}	... teplota popela na výstupu [°C]
	t_{ref}	... vstupní teplota (okolí) [°C] (tab. 13)

Z rovnic pro tepelné toky je možné přímo vypočítat teplo uvolněné spalováním odpadu:

$$Q_{cmd} = m \cdot LHV = 1,992 \cdot 10^4 [kJ/s]$$

Dále je možné stanovit množství tepla odvedené popelem a to za pomoci množství popelovin ve spalovaném odpadu A [%] (kap. 3.1.) a celkového množství spalovaného odpadu m :

$$Q_{ash} = \frac{A}{100} \cdot m \cdot cp_{ash} \cdot (t_{ash} - t_{ref}) = 96,35 [kJ/s] \quad (2.24)$$

přičemž tepelná kapacita popela je $cp_{ash} = 1,5$ [kJ/kg·K] [52].

Jedinou neznámou z rovnic (2.21 – 2.23) je tedy teplo odvedené spalinami Q_{load} resp. množství spalin m_{fg} na výstupu z rotační pece, které stanovíme dosazením do rovnice (2.25) a její následnou úpravou:

$$m_{fg} = \frac{Q_{cmd} - Q_{ash}}{cp_{air} \cdot (t_{fg} - t_{ref})} = 18,292 [kg/s] \quad (2.25)$$

4.3. Kotel na odpadní teplo

Výpočet je založen na postupech uvedených v [39,43,44]

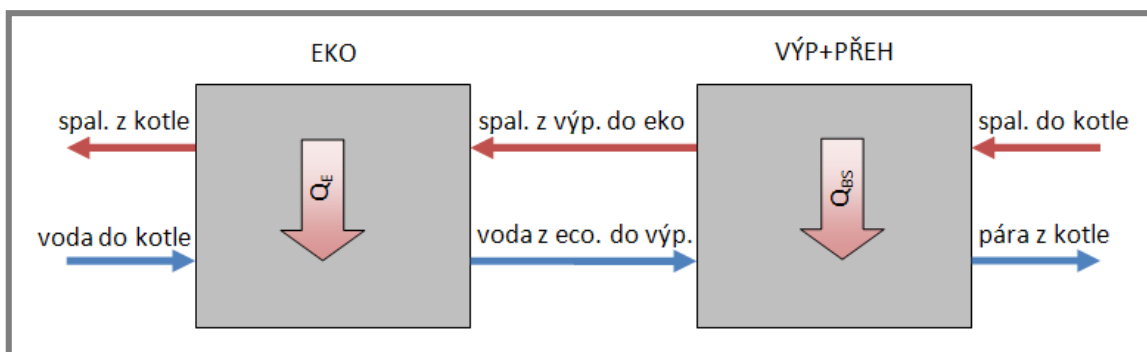
V této kapitole je znázorněn výpočet teplotního profilu kotle a následně je proveden návrh základních rozměrů kotle na odpadní teplo. Kotel musí být navržen tak aby vyrobená pára měla požadované parametry: teplotu $t_p = 530$ [°C] a tlak $p = 2,5$ [MPa]. Dále je požadována výstupní teplota spalin z kotle ~ 200 °C z důvodu následného čištění pomocí 2NaHCO_3 . Na tuto teplotu mají největší vliv minimální teplota přiblížení, rozdíl mezi teplotou na vstupu do výparníku a saturační teplotou a teplota vody na vstupu do kotle (vysvětlení těchto veličin je dále v kapitole).

4.3.1. Teplotní profil kotle

Kotel na odpadní teplo má tři části: ekonomizér, výparník a přehřívák, přičemž vlastní bilanční výpočet je rozdělen pouze do dvou kroků:

- tepelná bilance přehříváku a výparníku (kde se vypočítá množství vyrobené páry)
- tepelná bilance ekonomizéru (kde se stanoví teplota spalin na výstupu z kotle)

Obě bilance jsou založeny na předpokladu, že teplo odevzdané spalinami je teplo, pomocí kterého se vyrobí pára o požadovaných parametrech (obr. 26):

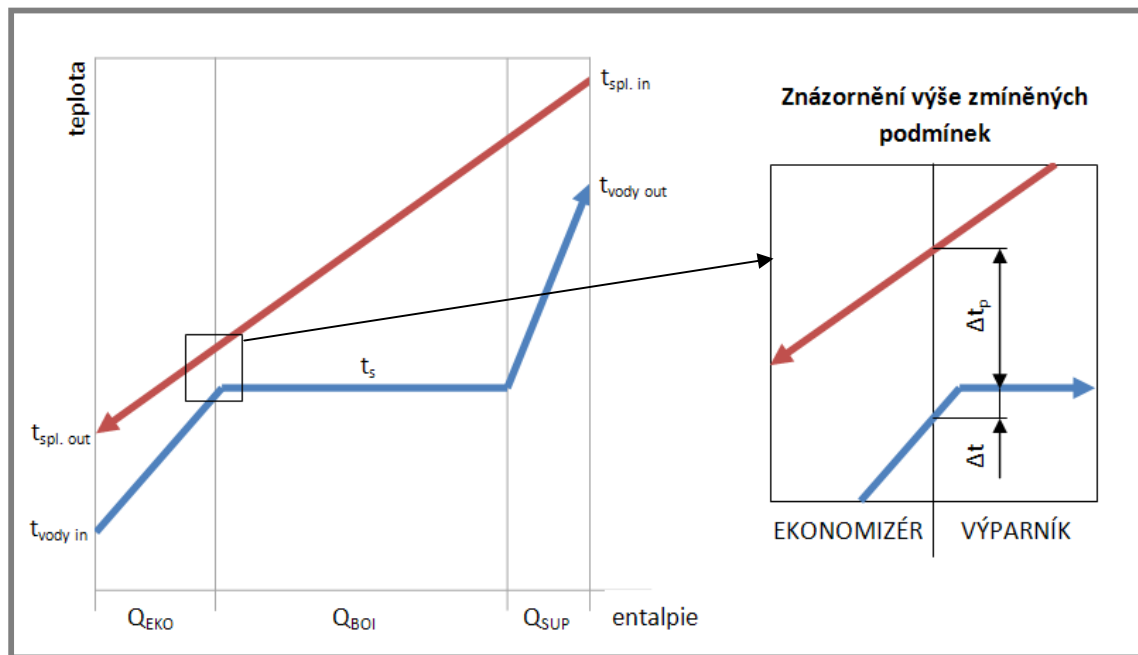


Obr. 28: Tepelné toky v kotli tak, jak se budou uvažovat při výpočtu

Základní podmínkou výpočtu je fakt, že nesmí dojít k překřížení teplotních profilů (spaliny, médium) a musí existovat dostatečný teplotní rozdíl (hnací síla přestupu tepla). To je zaručeno zvolením minimální teploty přiblížení obou profilů Δt_p .

Dále musí být zajištěno, aby proces přeměny skupenství (kapalina-pára) začal až ve výparníku. Toho je docíleno tak, že voda při přechodu do výparné části kotle ještě nemá saturační teplotu t_s (teplotu vypařování). Rozdíl mezi teplotou na vstupu do výparníku a saturační teplotou je označen Δt .

Teplotní profil kotle se znázorněním obou výše uvedených podmínek je na následujícím obr.



Obr. 29: Teplotní profil kotle na odpadní teplo

Z obr. 27 je patrné, že:

Teplotu spalin $t_{spl.EKOin}$ jdoucích z výparníku do ekonomizéru lze vyjádřit:

$$t_{spl.EKOin} = t_s + \Delta t_p = 263,956 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.1)$$

kde t_s ... saturační teplota vody o požadovaném tlaku [°C]
 Δt_p ... minimální teplota přiblížení proudů [°C]

Teplotu vody $t_{vodyBOIin}$ [°C] z ekonomizéru do výparníku lze vyjádřit:

$$t_{vodyBOIin} = t_s - \Delta t = 203,956 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (3.2)$$

kde Δt ... rozdíl teplot napájecí vody na mezi sytosti a vstupem do výparníku [°C]

přičemž:

t_s je určena pomocí parních tabulek pro tlak 2,5 MPa: 223,956 °C
 Δt_p a Δt jsou zvoleny dle následující tabulky a to tak, aby výsledná teplota spalin byla ~ 200 °C

Teplota spalin na vstupu t_{ex} [°C]	Δt_p [°C]		Δt [°C]
	Hladké tr.	Žebrované tr.	
650 – 1000	70 – 85	15 – 45	20 - 40
370 – 650	45 - 70	5 – 15	5 - 20
Zvoleno	X	40	20

Tab. 14: Minimální teplotní přiblížení. Rozdíl mezi saturační teplotou a teplotou vody na vstupu do výparníku. [52]

Přehřívák a výparník

Pro teplo odevzdané spaliny a teplo přijaté vodou resp. vodní párou Q_{BS} [kJ/s] lze psát následující vztahy:

$$Q_{BS} = m_{fg} \cdot cp_{air} \cdot (t_{fg} - t_{spl.EKOin}) \quad (3.3)$$

$$Q_{BS} = m_p \cdot (i_p - i_{ss}) \quad (3.4)$$

kde m_p ... množství vyrobené přehřáté páry [kg/s]
 i_p ... entalpie přehřáté páry na výstupu z kotle [kJ/kg]
 i_{ss} ... entalpie vody na mezi sytosti [kJ/kg]

přičemž hodnoty entalpií jsou určeny pomocí parních tabulek:

$$i_p = 3,53 \cdot 10^3 \text{ [kJ/kg]} \text{ (pro páru na výstupu z kotle – 530°C a 2,5 MPa)}$$

$$i_{ss} = 961,94 \text{ [kJ/kg]} \text{ (pro vodu o tlaku 2,5 MPa na mezi sytosti)}$$

Dosazením (3.1) a (3.4) do (3.3) a následnou úpravou získáme množství páry m_p na výstupu z kotle:

$$m_p \cdot (i_p - i_{ss}) = m_{fg} \cdot cp_{air} \cdot (t_{fg} - t_s - \Delta t_p) \quad (3.5)$$

$$m_p = \frac{m_{fg} \cdot cp_{air} \cdot (t_{fg} - t_s - \Delta t_p)}{(i_p - i_{ss})} = 5,89 \text{ [kg/s]} = 21,193 \text{ [t/hod]}$$

Ekonomizér

Pro teplo předané v ekonomizéru Q_E [kJ/s] lze psát podobné vztahy jako u přehříváku a výparníku:

$$Q_E = m_{fg} \cdot cp_{air} \cdot (t_{spl.EKOin} - t_5) \quad (3.6)$$

$$Q_E = m_p \cdot (i_{sv} - i_{nv}) \quad (3.7)$$

kde t_5 ... teplota spalin na výstupu z kotle [°C]
 i_{sv} ... entalpie vody na výstupu z ekonomizéru [kJ/kg]
 i_{nv} ... entalpie vody na vstupu do kotle [kJ/kg]

přičemž hodnoty entalpií jsou určeny pomocí parních tabulek:

$$i_{sv} = 870,461 \text{ [kJ/kg]} \text{ (pro vodu na výstupu z ekonom. – 204°C a 2,5 MPa)}$$

$$i_{nv} = 633,430 \text{ [kJ/kg]} \text{ (pro vodu na vstupu do kotle – 150°C a 2,5 MPa)}$$

Teplota vody na vstupu do kotle 150 °C je zvolena tak, aby se výstupní teplota spalin blížila 200 °C.

Dosazením (3.1) a (3.7) do (3.6) a následnou úpravou získáme teplotu spalin t_5 vystupujících z kotle:

$$m_p \cdot (i_{sv} - i_{nv}) = m_{fg} \cdot cp_{air} \cdot (t_s + \Delta t_p - t_5) \quad (3.9)$$

$$t_5 = t_s + \Delta t_p - \frac{m_p \cdot (i_{sv} - i_{nv})}{m_{fg} \cdot cp_{air}} = 196,01 \text{ [°C]}$$

Úplný teplotní profil kotle

K úplnému teplotnímu profilu kotle zbývá určit teplotu spalin vstupujících do výparníku t_{boil} [°C]. Ta lze vyjádřit následujícího vztahu:

$$t_{boil} - t_5 = (t_{fg} - t_5) * \left(1 - \frac{Q_P}{Q_K}\right) \tag{3.10}$$

kde Q_P ... výkon přehříváku [MW]
 Q_K ... celkový výkon kotle [MW]

Výkon přehříváku Q_P se stanoví pomocí rozdílů entalpií vodní páry na vstupu a výstupu ze sekce:

$$Q_P = m_p \cdot (i_p - i_{ss}) 4,284 \cdot 10^3 [kW] \rightarrow 4,284 [MW] \tag{3.11}$$

Celkový výkon kotle Q_K je:

$$Q_K = Q_E + Q_{BS} = m_p \cdot (i_p - i_{ss}) + m_p \cdot (i_{sv} - i_{nv}) = 16429 [kW] \tag{3.12}$$

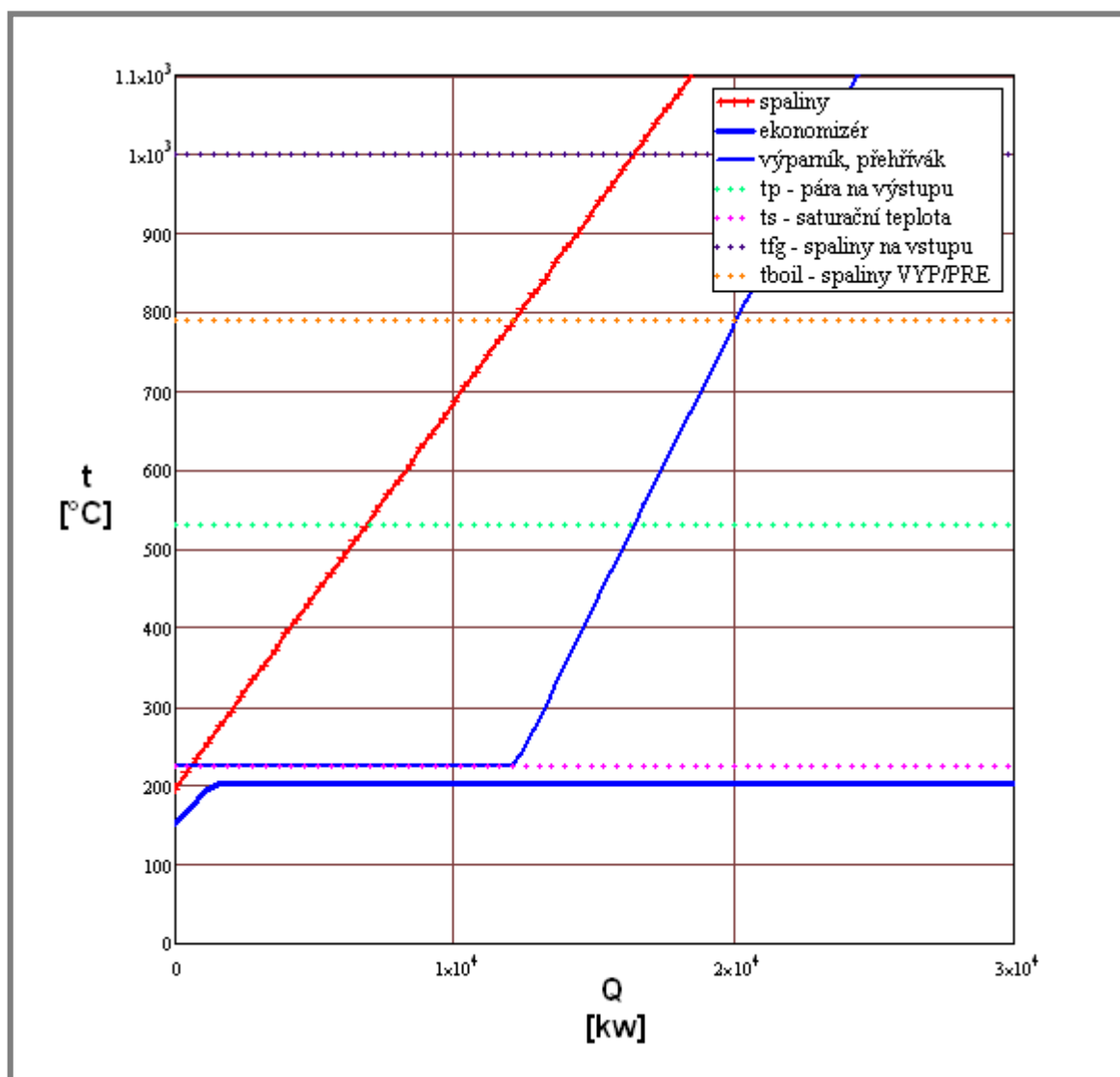
Dosazením do (3.10) a její úpravou se vypočte teplota spalin na vstupu do výparníku:

$$t_{boil} = 790,37 [°C]$$

Souhrnný přehled teplot na vstupech a výstupech z jednotlivých sekcí:

Spaliny [°C]	Médium [°C]
na vstupu do kotle: $t_{fg} = 1000$	na vstupu do kotle: $t_{nv} = 150$
PRE/VYP: $t_{boil} = 790$	EKO/VYP: $t_{vodyBOin} = 204$
VYP/EKO: $t_{spl.EKOin} = 264$	VYP/PRE: $t_s = 224$
na výstupu z kotle: $t_5 = 196$	na výstupu z kotle: $t_p = 530$

Charakteristický teplotní profil kotle:



Obr. 30: Teplotní profil uvažovaného kotle

4.3.2. Návrh základních parametrů

Aby bylo možné navrhnout základní rozměry kotle na odpadní teplo, které závisí především na počtu a rozměrech trubek použitých v jednotlivých sekcích (ekonomizér, výparník, přehřívák), je nezbytné nejprve určit plochu (teplosměnnou plochu), resp. její velikost, jenž je potřeba k výměně požadovaného množství tepla v jednotlivých částech kotle.

V dalším kroku se zvolí rozměry trubek a vypočte se jejich plocha na 1 metr jejich délky. Tím se získá celková potřebná délka trubek k výměně požadovaného množství tepla.

Následně se předběžně zvolí průtočná rychlost proudění spalin a vypočte se průtočný průřez každé sekce. Z průřezu se určí šířka a výška sekcí. Dopočítá se počet trubek v řadě, počet řad a stanoví se délka jednotlivých sekcí.

Na závěr se vypočítá skutečná rychlost proudění spalin kotlem.

Teplosměnná plocha

Teplosměnná plocha A [m²] se určí z následujícího vztahu:

$$A = \frac{Q}{k \cdot \Delta} \quad (3.13)$$

kde Q ... množství tepla přenesené v jednotlivých sekcích [kJ/s]
 k ... součinitel prostupu tepla [W²/m²·K]
 Δ ... střední logaritmický teplotní spád [K]

Množství tepla přenesené v jednotlivých sekcích Q [kJ/s] lze vyjádřit jako rozdíl entalpií média (voda, pára) na vstupu a výstupu pro každou část kotle:

$$Q = m_p \cdot (i_1 - i_2) \quad (3.14)$$

kde i_1 ... entalpie média na výstupu z dané části [kJ/kg] (i_{sv}, i_s, i_p)
 i_2 ... entalpie média na vstupu do dané části [kJ/kg] (i_{nv}, i_{ss}, i_s)

přičemž jediná doposud neznámá hodnota je entalpie pro sytou páru o tlaku 2,5 MPa, která je stanovena pomocí parních tabulek na hodnotu $i_s = 2,802 \cdot 10^3$.

Přenesené teplo Q v jednotlivých sekcích na základě vztahu (3.14) je:

$$Q_{ECO} = 1395 \text{ [kJ/s]} \quad Q_{BOI} = 10832 \text{ [kJ/s]} \quad Q_{SUP} = 4284 \text{ [kJ/s]}$$

Hodnoty součinitelů prostupu tepla k pro jednotlivé části kotle jsou stanoveny na základě mnohaletých zkušeností (konzultace) následovně:

$$k_{ECO} = 50 \text{ [W}^2\text{/m}^2\text{·K]} \quad K_{BOI} = 60 \text{ [W}^2\text{/m}^2\text{·K]} \quad K_{SUP} = 65 \text{ [W}^2\text{/m}^2\text{·K]}$$

K výpočtu středního logaritmického teplotního spádu Δ [K] se použije vztah (3.15) založený na aritmetických a logaritmických průměrech výstupních teplot t' a výstupních teplot t'' v jednotlivých částech kotle. Tento způsob výpočtu je zvolen pro jeho sníženou citlivost na skutečnost je-li větší t' nebo t'' .

$$\Delta = \psi \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{(t' + t'')}{2} + \frac{2}{3} \cdot \sqrt{t' \cdot t''} \quad (3.15)$$

kde t' ... rozdíl teplot na mezi médiem a spalinami na vstupu do dané sekce [K]
 t'' ... rozdíl teplot na mezi médiem a spalinami na výstupu z dané sekce [K]
 ψ ... součinitel korekce Δ pro křížový a souprůdý tok [-]

přičemž ψ se uvažuje stejné jako pro protiproudý tok, tedy 1. Tok spalin a média v kotli na odpadní teplo je ve skutečnosti křížový, avšak výměna tepla je uskutečňována pomocí velkého množství trubek a Δ není tedy třeba korigovat.

Střední logaritmický teplotní spád Δ v jednotlivých sekcích na základě vztahu (3.15):

$$\Delta_{ECO} = 52,696 \text{ [K]} \quad \Delta_{BOI} = 201,416 \text{ [K]} \quad \Delta_{SUP} = 516,708 \text{ [K]}$$

VÝPOČTY HLAVNÍCH APARÁTŮ

Dosažením Q , k a Δ do vztahu (3.13) dostaneme teplosměnnou plochu A pro jednotlivé sekce kotle:

$$A_{ECO} = 529,588 \text{ [m}^2\text{]} \quad A_{BOI} = 896,313 \text{ [m}^2\text{]} \quad A_{SUP} = 127,544 \text{ [m}^2\text{]}$$

Rozměry trubek

V příloženém programu je možnost si vybrat z několika variant. Pro další výpočet jsou uvažovány hodnoty, které jsou společné pro všechny sekce kotle:

D_t – vnější průměr trubky [mm]:	32; 38; 44,5	zvoleno:	44,5
R_z – vzdálenost mezi žebry [mm]:	6; 8; 10; 12		8
H_z – výška žeber [mm]:			13
S_z – tloušťka žeber [mm]:			1,3
t – tloušťka stěny trubky [mm]:			3

Z výše uvedených rozměrů trubek a s použitím vztahu (3.16) lze spočítat celkovou délku trubek L [m]:

$$L = \frac{A}{A_{sp}} \quad (3.16)$$

kde A_{sp} ... teplosměnná plocha trubky na 1 metru její délky [m²/m]

Teplosměnná plocha trubek na 1 metr jejich délky A_{sp} [m²] je potom dána následujícím vztahem:

$$A_{sp} = \frac{A_{part}}{SR_z} \quad (3.17)$$

kde A_{part} ... plocha části trubky dle obr. 29 [m²]
 SR_z ... podélná vzdálenost části trubky obr. 29 [m]

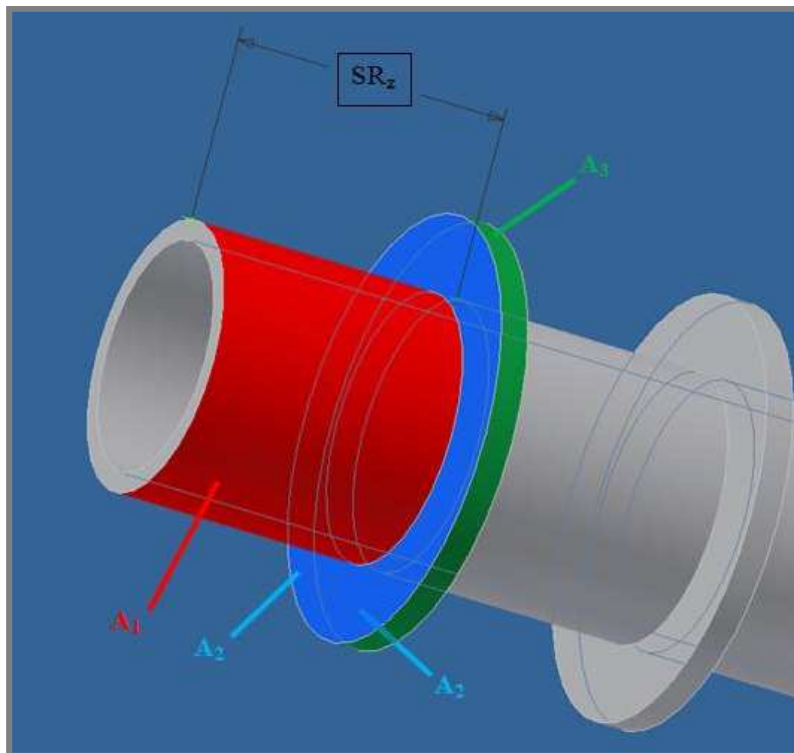
přičemž plochu A_{part} vypočteme jako součet dílčích ploch (3.18) a SR_z je rozteč žeber (3.19):

$$A_{part} = A_1 + 2 \cdot A_2 + A_3 \quad (3.18)$$

$$SR_z = S_z + R_z \quad (3.19)$$

Po dosažení do (3.16) lze spočítat celkovou potřebnou délka trubek L pro jednotlivé sekce:

$$L_{ECO} = 715,66 \text{ [m]} \quad L_{BOI} = 1211 \text{ [m]} \quad L_{SUP} = 172,357 \text{ [m]}$$



Obr. 31: Teplosměnná plocha trubky mazy žebry

K dalším výpočtům je zapotřebí určit ještě rozteč trubek t_l . Ta je stanovena na základě průměru žebra D_z :

$$D_z = D_t + 2 \cdot H_z = 0,0705 \text{ [m]} \rightarrow 70,5 \text{ [mm]} \quad (3.20)$$

Rozteč trubek t_l volím: 0,09 [m]

Výše zvolené rozměry trubek jsou společné pro všechny sekce, tzn. t_l a D_z taktéž.

Stanovení rozměrů jednotlivých sekcí:

Ke stanovení výšky VD a šířky BD (vnitřní rozměry) jednotlivých sekcí je nejprve nutné určit jejich průřez AD [m²]. Ten se stanoví za pomoci množství spalin m_{fg} , které proudí kotlem a plochy, kterou v průřezu zabírají žebrované trubky:

$$AD = \frac{m_{fg}}{W_t} \cdot \left(1 - \frac{D_t + \frac{2 \cdot H_z \cdot S_z}{R_z}}{t_l} \right)^{-1} \quad (3.21)$$

kde W_t ... předpokládaná průtočná rychlost proudění spalin [kg/m²·s]

přičemž předpokládaná průtočná rychlost proudění spalin je zvolena následovně:

$$W_{tECO} = 10 \text{ [kg/m}^2\cdot\text{s]} \quad W_{tBOI} = 8 \text{ [kg/m}^2\cdot\text{s]} \quad W_{tSUP} = 7 \text{ [kg/m}^2\cdot\text{s]}$$

Dosazením do (3.21) pak získáme vnitřní průřez jednotlivých sekcí AD :

$$AD_{ECO} = 3,99 \text{ [m}^2\text{]} \quad AD_{BOI} = 4,99 \text{ [m}^2\text{]} \quad AD_{SUP} = 5,69 \text{ [m}^2\text{]}$$

Následně se určí vnitřní výška a šířka kotle a to tak že se nejprve zvolí šířka kotle BD a podle (3.22) se dopočte výška VD [m].

$$VD = \frac{AD}{BD} \quad (3.22)$$

Přičemž vnitřní šířka kotle je zvolena: $BD = 1,2$ [m]

Výšky jednotlivých sekcí VD jsou potom:

$$VD_{ECO} = 3,32 \text{ [m]} \quad VD_{BOI} = 4,16 \text{ [m]} \quad VD_{SUP} = 4,75 \text{ [m]}$$

Z důvodů co nejjednodušší konstrukce kotle je potřeba navrhnout vnitřní šířku a výšku stejnou pro všechny tři sekce. Šířka BD byla zvolena (1,2 m) a výška VD se stanovuje na základě výše vypočtených hodnot na $VD = 4,8$ [m].

Z vnitřních rozměrů kotle zbývá spočítat délku jednotlivých sekcí L_s [m]. Určí se vztahem:

$$L_s = N_r \cdot t_2 \quad (3.23)$$

kde N_r ... počet řad trubek [-]
 t_2 ... rozteč řad [m]

přičemž rozteč řad se volí pro každou sekci stejná: $t_2 = 0,11$ [m]

Počet řad trubek N_r se určí na základě počtu trubek v jedné řadě N_t :

$$N_t = \frac{BD}{t_1} = 13,333 \quad (3.24)$$

Hodnota se zaokrouhlí na celé sudé číslo a je stejná pro všechny sekce: $N_t = 14$

Počet řad trubek v jednotlivých sekcích N_r se bude lišit a lze jej vyjádřit takto:

$$N_r = \frac{L}{VD \cdot N_t} \quad (3.25)$$

$$N_{rECO} = 10 \quad N_{rBOI} = 18 \quad N_{rSUP} = 2$$

Dosazením do (3.23) se určí délka jednotlivých sekcí:

$$L_{sECO} = 1,1 \text{ [m]} \quad L_{sSUP} = 1,98 \text{ [m]} \quad L_{sBOI} = 0,22 \text{ [m]}$$

Skutečná průtočná rychlost prodění spalín

Skutečná průtočná rychlost proudění spalín W [kg/m²·s] se vypočte z upraveného vztahu (3.21), přičemž průřezy jednotlivých sekcí AD se vyjádří pomocí výše stanovené šířky BD a výšky VD .

$$W = \frac{m_{fg}}{BD \cdot VD} \cdot \left(1 - \frac{D_t + \frac{2 \cdot H_z \cdot S_z}{R_z}}{t_1} \right)^{-1} \quad (3.26)$$

Průtočná rychlost proudění v jednotlivých sekcích je tedy:

$$W_{ECO} = 6,92 \text{ [kg/m}^2\cdot\text{s]} \quad W_{BOI} = 6,92 \text{ [kg/m}^2\cdot\text{s]} \quad W_{SUP} = 6,92 \text{ [kg/m}^2\cdot\text{s]}$$

4.3.3. Tlakové ztráty na straně spalín

Do této fáze neprocházely spaliny žádným “složitějším“ zařízením a bylo tedy možné uvažovat jejich přirozené prodění. V kotli na odpadní teplo procházejí spaliny skrz pole žebrovaných trubek, a proto se zde předpokládají větší tlakové ztráty. Výpočet těchto ztrát je nezbytný k případnému stanovení parametrů ventilátoru, který bude zajišťovat konstantní rychlost proudění spalín.

Výpočet tlakových ztrát Δp [pa] je proveden dle vztahu (informace o tlakových ztrátách v kotli na odpadní teplo byly poskytnuty z VOCHZ):

$$\Delta p = 18,93 \cdot N_r \cdot \left(\frac{v}{D_t} \right)^{0,316} \cdot \left(\frac{D_t}{t_1} \right)^{0,927} \cdot \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^{0,515} \cdot \frac{W^{1,684}}{\rho_{fg}^{0,684}} \quad (3.27)$$

kde ρ_{fg} ... hustota spalín [kg/m³]
 v ... kinematičká viskozita spalín [m²/s]

Jak hustota spalín ρ_{fg} tak jejich kinematičká viskozita v závisí především na teplotě.

Na začátku této kapitoly je řečeno, že spaliny mají velmi podobné vlastnosti jako vzduch. Z toho důvodu je ve výpočtech týkajících se fyzikálních vlastností spalín uvažován vzduch na místo spalín (zjednodušení výpočtu, které lze kdykoliv zpřesnit dosazením optimálních hodnot do programu MathCad).

Hustota spalín

Hustota spalín ρ_{fg} [kg/m³] se vypočte za pomoci jejich objemu V [m³], který lze vyjádřit pomoci stavové rovnice ideálního plynu:

$$p_{fg} \cdot V = R \cdot T \quad (3.28)$$

kde p_{fg} ... tlak spalín [kg/m³] (tab. 13)
 V ... objem spalín [m³]
 R ... molární plynová konstanta [J/mol·K] (tab. 13)
 T ... teplota spalín [K]

po úpravě:

$$\rho_{fg} = \frac{p_{fg}}{t_{eq}} \cdot \frac{m_{vz}}{R} \quad (3.29)$$

kde t_{eq} ... střední teplota spalin v jednotlivých sekcích [K]
 m_{vz} ... molární hmotnost vzduchu [g/mol] (tab. 13)

přičemž: $R = 8,315$ [J/mol·K], $m_{vz} = 28,96$ [g/mol] a $p_{fg} = 105$ kPa

Střední teplota spalin t_{eq} [K] v jednotlivých sekcích se stanoví následovně:

$$t_{eq} = \frac{t' + t''}{2} + 273,15 \quad (3.30)$$

kde t' ... teplota spalin na vstupu do sekce [K]
 t'' ... teplota spalin na výstupu ze sekce [K]

$$t_{eqECO} = 503,13 \text{ [K]} \quad t_{eqBOI} = 800,31 \text{ [K]} \quad t_{eqSUP} = 1168 \text{ [K]}$$

Hustota spalin ρ_{fg} v jednotlivých sekcích dle (3.29) je tedy:

$$\rho_{fgECO} = 0,727 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \rho_{fgBOI} = 0,457 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \rho_{fgSUP} = 0,313 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Kinematická viskozita spalin

Kinematická viskozita ν se vyjádří jako podíl dynamické viskozity spalin μ a jejich hustoty ρ_{fg} (3.32). K výpočtu dynamické viskozity μ [Pa·s] se využije Sutherlandův vzorec:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{t_{eq}}{T_0} \right)^{3/2} \cdot \frac{T_0 + S}{t_{eq} + S} \quad (3.31)$$

kde μ_0 ... dynamická viskozita vzduchu za normálních podmínek [Pa·s] (tab. 13)
 T_0 ... teplota za normálních podmínek [K] (tab. 13)
 S ... Sutherlandova konstanta pro vzduch [K] (tab. 13)

přičemž: $\mu_0 = 1,7894 \cdot 10^{-5}$ [Pa·s], $T_0 = 273,15$ [K] a $S = 110,56$ [K]

Dynamická viskozita spalin v jednotlivých sekcích je tedy:

$$\mu_{ECO} = 0,027 \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad \mu_{BOI} = 0,036 \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad \mu_{SUP} = 0,046 \text{ [Pa} \cdot \text{s]}$$

Kinematická viskozita ν [m²/s] je pak:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho_{fg}} \quad (3.32)$$

po dosazení:

$$\nu_{ECO} = 3,691 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad \nu_{BOI} = 7,938 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad \nu_{SUP} = 1,456 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

Tlaková ztráta

Dosažením příslušných hodnot do vztahu (3.27) získáme tlakové ztráty pro jednotlivé sekce:

$$\Delta p_{EKO} = 307 \text{ [Pa]} \quad \Delta p_{BOI} = 967 \text{ [Pa]} \quad \Delta p_{SUP} = 169 \text{ [Pa]}$$

Celková tlaková ztráta kotle Δp_{tot} je následně vyjádřena součtem výše vypočtených dílčích tlakových ztrát rozšířených o $\Delta p_z = 200 \text{ [Pa]}$, což je korekce zahrnující ostatní části kotle.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{EKO} + \Delta p_{BOI} + \Delta p_{SUP} + \Delta p_z = 1643 \text{ [Pa]} \rightarrow 1,635 \text{ [kPa]} \quad (3.33)$$

4.4. Parní turbína

Výpočet je založen na postupu uvedeném v [49]

Cílem počtů v této části je stanovit, jaké maximální množství elektrické a tepelné energie lze vyrobit z množství přehřáté páry vstupující do turbíny. Na závěr kapitoly je pak uveden přehled výstupů z parní turbíny (poměr mezi tepelnou a el. energií) v závislosti na množství přehřáté páry.

Je zvolena radiální dvoustupňová odběrová parní turbína s vysokotlakou (HP) a nízkotlakou (LP) částí (obr. 12). Přehřátá pára o teplotě $t_p = 530 \text{ [}^\circ\text{C]}$ a tlaku $p = 2,5 \text{ [MPa]}$ vstupuje do HP, kde expanduje na tlak $p_{ex} = 1,1 \text{ [MPa]}$ (požadovaný tlak odběrové páry). Za HP může být část páry odebrána k jinému využití a zbylá část vstupuje do LP. Potřebnými parametry páry na výstupu jsou její teplota t_{exh} a to přibližně $60 \text{ [}^\circ\text{C]}$ (z důvodu následné kondenzace) a suchost, která by měly být lehce pod hodnotou 1 (přesycená pára má za následek vyšší výkon kondenzátoru a na druhou stranu se zvyšující se mokrostí páry stoupá riziko poškození lopatek turbíny).

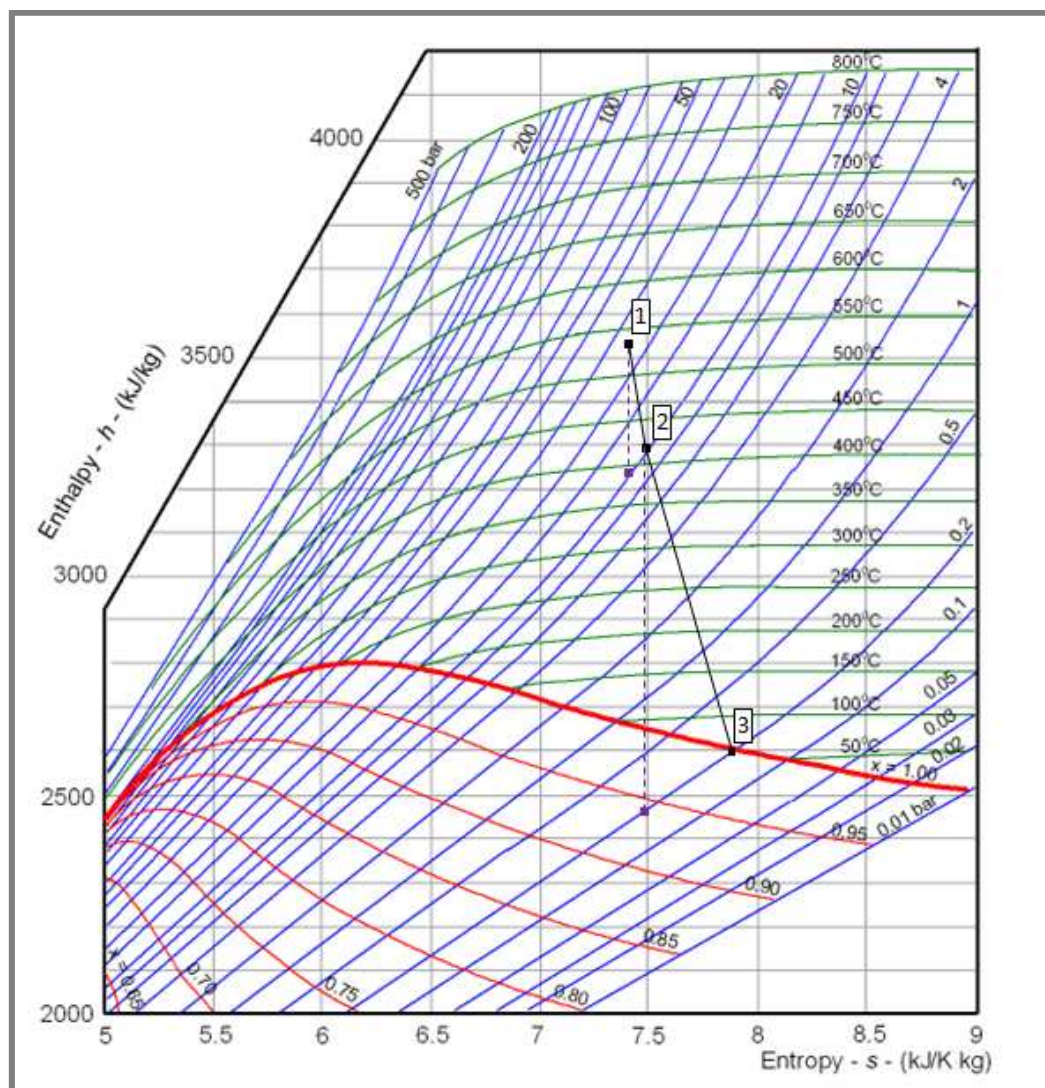
Pro výpočet max. množství tepelné a el. energie resp. jejich poměru je nezbytná znalost následujících parametrů vodní páry: tlak, teplotu a entalpii páry, a to na vstupu do HP, na výstupu z HP resp. vstupu do LP a na výstupu z LP.

Parametry páry

Doposud neznámé parametry páry se dopočítají, resp. zvolí na základě výše zmíněných kritérií a za předpokladu, že účinnost HP je 85% a účinnost LP je 84%. K jejich stanovení se využili parní tabulky a I-S diagram.

1	2	3
vstup HP	výstup HP, vstup LP, odběrová pára	výstup LP
$p = 2,5 \text{ [MPa]}$	$p_{ex} = 1,1 \text{ [MPa]}$	$p_{exh} = 20 \text{ [kPa]}$
$t_p = 530 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$t_{ex} = 415,8 \text{ [}^\circ\text{C]}$	$t_{exh} = 60,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$
$i_p = 3,53 \cdot 10^3 \text{ [kJ/kg]}$	$i_{ex} = 3,3 \cdot 10^3 \text{ [kJ/kg]}$	$i_{exh} = 2,60 \cdot 10^3 \text{ [kJ/kg]}$

Průběh expanzí je pro názornost zobrazen v I-S diagramu na následujícím obr. Číslování bodů reflektuje číslování ve výše uvedeném přehledu. Fialové přerušované přímky znázorňují ideální, izoentropický průběh expanze, černé křivky průběh skutečný.



Obr. 32: I-S diagram

Z obr. 30 je patrné, že požadavek na teplotu páry ~ 60 [°C] na výstupu z turbíny (bod č. 3) je dodržen. Hodnota suchosti páry v tomto bodě je $X_{exh} = 0,995$, tzn. že i tento požadavek byl splněn.

Přehřátá pára vstupující do turbíny je vyráběna ve dvou kotlích na odpadní teplo o stejných parametrech. Dosavadní výpočet uvažoval pouze jeden kotel, a proto je nutné množství páry m_p , které bylo stanoveno v předchozí kapitole, dvojnásobně zvětšit.

$$Stt = 2 \cdot m_p = 11,812 \text{ [kg/s]} \rightarrow 42,285 \text{ [t/hod]} \quad (4.1)$$

kde Stt ... množství páry na vstupu do turbíny [t/hod]

Výkon turbíny

Stanoví se součtem dílčích výkonů HP (4.2) a LP (4.3) na základě průtočného množství páry v jednotlivých částech při nulovém odběru a rozdílu entalpií.

$$P_{HP} = Stt \cdot \frac{(i_p - i_{ex})}{3,6} \cdot \eta_m = 2,743 \cdot 10^3 \text{ [kW]} \quad (4.2)$$

$$P_{LP} = Stt \cdot \frac{(i_{ex} - i_{exh})}{3,6} \cdot \eta_m = 8,096 \cdot 10^3 [kW] \quad (4.3)$$

kde η_m ... mechanická účinnost turbíny [-] (tab. 13)

přičemž volím $\eta_m = 0,95$.

Celkový výkon turbíny P_{ult} je potom:

$$P_{ult} = P_{HP} + P_{LP} = 1,03 \cdot 10^4 [kW] \rightarrow 10,3 [MW] \quad (4.4)$$

Zvolená turbína je konstruovaná na maximální výkon 10 MW. Vezme-li se do úvahy že:

- v některých částech výpočtu byly zanedbány tepelné ztráty,
- nejsou uvažovány tlakové ztráty v potrubí,
- množství spáleného odpadu vstupuje do výpočtu s maximální hodnotou (100 000 kT/rok) a poměrně nadprůměrnou výhřevností (kap. 3.1.),

lze vypočtenou hodnotu celkového výkonu $P_{ult} = 10,3 [MW]$ považovat za korektní.

Není možné nechat LP část turbíny tzv. „suchou“ a kondenzátor ke své činnosti potřebuje alespoň minimální množství páry. Toto množství je stanoveno na 10 t/hod. Následující tabulka ukazuje možné poměry mezi odebranou párou a vyrobenou el. energií s ohledem na výše zmíněná fakta.

	Množství odebírané páry [t/hod]				Množství páry na vstupu do turbíny [t/hod]
	0,0	10,7	21,4	32,1	
Vyrobená el. energie [MW]	4,97	2,96	---	---	21,5
	6,30	4,29	---	---	26,7
	7,62	5,61	3,60	---	31,9
	8,95	6,94	4,93	---	37,1
	10,28	8,26	6,25	4,24	42,3

Tab. 15: Poměr elektrické energie a páry v závislosti na množství přehřáté páry vstupující do turbíny

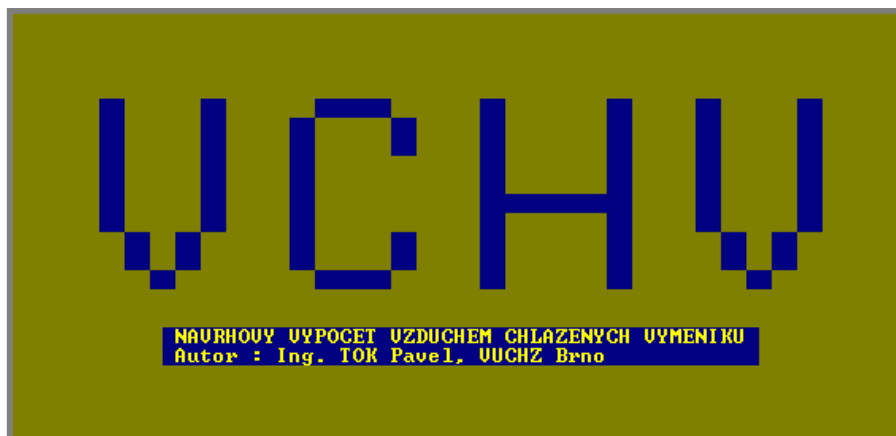
Z tabulky 15 lze vyčíst následující údaje, přičemž hodnoty jsou za plného výkonu spalovny:

- Max. možné množství páry k dalšímu využití: 32,1 [t/hod]
- Max. možné množství vyrobené energie: 10 [MW]
- Množství vyrobené elektrické energie při max. odběru páry: 4,24 [MW]

4.5. Kondenzační jednotka

Z důvodu výběru netradičního kondenzátoru (kap. 3.3.) jsou výsledky týkající se rozměrů a návrhových částí pouze orientační.

K výpočtu je použit program VCHV (obr. 31), který navrhl Ing. Pavel Ťok. Samotný program je navržen k výpočtu běžných vzduchem chlazených kondenzátorů, avšak ke stanovení příkonu ventilátorů a orientačních rozměrů je vhodným nástrojem. Vstupními údaji do programu je teplota médi na vstupu a výstupu, teplota okolí a chladící výkon.



Obr. 33: Ukázka programu na výpočet běžných kondenzátorů

Do kondenzátoru vstupuje mokrá pára z turbíny o tlaku $p_{exh} = 20$ [kPa] a teplotě $t_{exh} = 60,1$ [°C]. Předpokládané ochlazení při kondenzaci je na teplotu $t_{cn} = 55$ [°C]. Celkový chladicí výkon kondenzátoru P_{cn} [kW] lze pak vyjádřit jako celkové množství předaného tepla Q_{cn} :

$$P_{cn} = Q_{cn} = (i_{exh} - i_{cn}) \cdot Stt = 28,01 \cdot 10^3 \text{ [kJ/s]} \quad (5.1)$$

kde i_{cn} ... entalpie média na výstupu [-]

přičemž médium na výstupu je voda o tlaku 20 MPa a teplotě 55°C a její entalpie je tedy $i_{cn} = 230,26$ [kJ/kg] (hodnota zjištěna pomocí parních tabulek).

Z důvodu stavby programu je nutné zadat menší chladicí výkon, než P_{cn} , přičemž programem vypočtený příkon ventilátorů bude o úměrnou hodnotu opět navýšen. Z obr. 14 lze stanovit počet svazků trubek zvoleného kondenzátoru Hexacool, tj. 14. V programu VCHV jsou rozměry svazků a jejich počet předem nastaveny. Jsou zvoleny rozměry 12 x 3 metry, kterým jsou v programu přiřazeny 2 svazky. To umožní snížení chladicího výkonu sedmkrát (pro potřeby programu), přičemž výsledný výkon vypočtený programem P'_{dp} bude pro dva svazky trubek.

Vstupní údaje programu:

Teplota - vstup	Teplota – výstup	Teplota okolí	Chladicí výkon
60,1 °C	55 °C	15 °C	$\frac{P_{cn}}{7} = 4,556 \text{ MW}$

Zvolené parametry:

Trubky	Žebra	Počet řad trubek	Trubkový svazek
ϕ 25 – 2,5 mm	ϕ 56 – 4 mm	3	12 x 3 m, počet: 2

Programem vypočtená hodnota příkonu ventilátorů činí $P'_{dp} = 37,73$ [kW]. Skutečný příkon P_{dp} je tedy:

$$P_{dp} = 37,73 \times 7 = 264,1 \text{ [kW]}$$

4.6. Čištění spalin

V kapitole 3.4. je návrh procesu čištění spalin za pomoci multicyklonu (je v každé sestavě, celkově tedy 2 krát), bikarbonátu sodného a rukávových filtrů.

Multicyklony budou dodány na základě průtočného množství spalin m_{fg} a není tedy potřeba dalších výpočtů. Bikarbonát sodný bude dávkován na základě množství HCl a SO₂ ve spalinách podle reakčních rovnic uvedených v kapitole 3.4. Je zapotřebí vypočítat jeho spotřebu za plného provozu, aby bylo později možné stanovit přibližné náklady na roční provoz spalovny. U rukávových filtrů je v této kapitole vypočtena potřebná filtrační plocha a tlaková ztráta.

4.6.1. Bikarbonát sodný

Výpočet je založen na postupech uvedených v [35,36,45]

V kapitole 3.4. je uvedené potřebné množství 2NaHCO₃ k neutralizaci 1 kg HCl a 1 kg SO₂:

2,3 kg 2NaHCO₃ neutralizuje 1 kg HCl
2,6 kg 2NaHCO₃ neutralizuje 1 kg SO₂

Protože tato práce neobsahuje výpočet udávající množství produktů spalování v případě nedokonalého spalování, není znám obsah HCl ani SO₂ specifický pro zde navrhovanou spalovnu a předpokládané složení odpadu. Výpočet potřebného množství 2NaHCO₃ je tedy založen na údajích uvedených v tab. 5, které představují reprezentativní hodnoty pro spalování komunálního odpadu. Pro HCl je to 500 – 2000 mg/Nm³ a pro SO₂ 200 – 1000 mg/Nm³, přičemž k následujícímu výpočtu bude uvažována nejvyšší koncentrace obou složek.

Koncentrace HCl je tedy 2 g/Nm³ spalin a koncentrace SO₂ je 1 g/Nm³ spalin.

Spotřeba 2NaHCO₃

Z předcházejících výpočtů je znám pouze hmotnostní průtok spalin $m_{fg} = 18,292$ [kg/s] (z jednoho kotle), avšak pro výpočet potřebného množství 2NaHCO₃ je nutné znát průtok objemový V_{fg} :

$$V_{fg} = \frac{2 \cdot m_{fg}}{\rho_{fg}} = 46,908 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (6.1)$$

kde ρ_{fg} ... hustota spalin [kg/m³]

přičemž hustota spalin se vypočte pomocí upravené stavové rovnice (3.28), kde se střední teplotu spalin t_{eq} nahradí teplotou spalin na výstupu z kotle na odpadní teplo $t_5 = 196$ [°C]:

$$\rho_{fg} = \frac{p}{t_5} \cdot \frac{m_{vz}}{R} = 0,78 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (6.2)$$

Množství HCl a SO₂ ve spalinách je tedy následující:

$$m_{\text{HCl}} = 93,817 \text{ [g/s]}$$

$$m_{\text{SO}_2} = 46,908 \text{ [g/s]}$$

Spotřeba 2NaHCO_3 k neutralizaci výše spočítaného množství HCl a SO_2 s přebytkem 1,4 je tedy:

$$m_{2\text{NaHCO}_3}^{\text{HCl}} = \frac{m_{\text{HCl}}}{1000 (\text{HCl})} \cdot 2300 (2\text{NaHCO}_3) \cdot 1,4 = 302,089 \text{ [g/s]} \quad (6.3)$$

$$m_{2\text{NaHCO}_3}^{\text{SO}_2} = \frac{m_{\text{SO}_2}}{1000 (\text{SO}_2)} \cdot 2600 (2\text{NaHCO}_3) \cdot 1,4 = 170,746 \text{ [g/s]} \quad (6.4)$$

Celková maximální spotřeba 2NaHCO_3 je dána součtem (6.3) a (6.4):

$$m_{2\text{NaHCO}_3} = 472,835 \text{ [g/s]} = 1702 \text{ [kg/hod]}$$

Spotřeba vzduchu

Množství spotřebovaného vzduchu záleží na dvou faktorech. Na minimálním množství vzduchu potřebného k reakci 2NaHCO_3 s SO_2 (6.5) a na minimálním množství vzduchu potřebného k dopravě 2NaHCO_3 do spalínovodu (6.6), přičemž se bere v úvahu vyšší z obou hodnot.

Ze stechiometrických reakcí uvedených v kapitole 3.4. je patrné, že přítomnost kyslíku v reakcích je nutná pouze při neutralizaci SO_2 , přičemž jeho minimální množství lze z reakce pro SO_2 určit. Potřebné množství O_2 následující:

k neutralizaci 1 kg SO_2 se spotřebuje 0,25 kg O_2

Hmotnostní podíl kyslíku ve vzduchu je cca 0,23 kg/kg. Minimální spotřeba vzduchu je tedy:

$$m_{\text{vzduchu}}^{2\text{NaHCO}_3} = \frac{\frac{m_{\text{SO}_2}}{1000 (\text{SO}_2)} \cdot 0,25 (\text{O}_2)}{0,23} = 50,987 \text{ [g/s]} \quad (6.5)$$

Výsledná hodnota reprezentuje minimální množství vzduchu potřebné ke stechiometrickému průběhu reakce s SO_2 . Reálné množství vzduchu může být však závislé na přesném návrhu aparátů zajišťující dávkování, zejména pak na návrhu pneumatické dopravy bikarbonátu ke spalínovodu. Množství vzduchu potřebné k dopravě 2NaHCO_3 je následující:

$$m_{c_{\text{vzd}}} = VZD_{\text{BIC}} \cdot m_{2\text{NaHCO}_3} \cdot \rho_{fg} \cdot 1000 = 1464 \text{ [g/s]} \quad (6.6)$$

kde VZD_{BIC} ... minimální poměr mezi vzduchem a přepravovaným médiem [(m³/s)/(kg/s)] (tab. 13)
 ρ_{fg} ... hustota vzduchu [kg/m³]

přičemž $VZD_{\text{BIC}} = 1,73 \text{ [(m}^3\text{/s)/(kg/s)]}$ a je to minimální poměr potřebný k pneumatické dopravě uhličitanu vápenatého. Ten má hustotu 2710 [kg/m³], je tedy menší než hustota 2NaHCO_3 , která je $\rho_{\text{BIC}} = 2173 \text{ [kg/m}^3\text{]}$. Výslednou hodnotu $m_{c_{\text{vzd}}}$ lze tedy uvažovat včetně tlakových ztrát.

Z porovnání množství vzduchu potřebného k reakci $m_{\text{vzduchu}}^{2\text{NaHCO}_3}$ a množství vzduchu potřebného pro dopravu $m_{c_{\text{vzd}}}$ je patrné, že minimální množství spotřebovaného vzduchu bude:

$$m_{c_{\text{vzd}}} = 1464 \text{ [g/s]}$$

Dávkování 2NaHCO_3 bude přímo závislé na naměřených emisních hodnotách spalin. V obou rotačních pecích se předpokládá spalování odpadu o stejném složení, úprava dávkování 2NaHCO_3 při změně naměřených hodnot bude tedy provedena u obou dávkovacích zařízení.

4.6.2. Rukávcové filtry

Výpočet je založen na postupech uvedených v [31,46,47,48]

Následující výpočty vycházejí z průtočného množství spalin $V_{c_{fg}}$ [m^3/s]. To je vyjádřeno vztahem (6.7), jenž reprezentuje množství spalin z obou kotlů V_{fg} zvětšené o bikarbonát sodný $m_{2\text{NaHCO}_3}$ [g/s] a vzduch potřebný k dopravě bikarbonátu do spalinovodu mc_{vzd} [g/s].

$$V_{c_{fg}} = V_{fg} + \frac{m_{2\text{NaHCO}_3}}{\rho_{2\text{NaHCO}_3}} + \frac{mc_{vzd}}{\rho_{vzd}} = 48,78 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (6.7)$$

kde ρ_{vzd} ... hustota vzduchu po vstupu do spalinovodu [kg/m^3]

přičemž hustota vzduchu pro $196 \text{ }^\circ\text{C}$ a $0,1 \text{ MPa}$ (teplota a tlak ve spalinovodu) je $\rho_{vzd} = 779,9 \cdot 10^3 \text{ [g}/\text{m}^3]$

Filtrační plocha

Celková filtrační plocha A_c se stanoví na základě celkového množství spalin $V_{c_{fg}}$ [m^3/s] a předběžné filtrační rychlosti v_f [m/s] a to následovně:

$$A_c = \frac{V_{c_{fg}}}{v_f} = 2399 \text{ [m}^2] \quad (6.8)$$

přičemž předběžná filtrační rychlost v_f je stejná jako koeficient prostupu filtrem AC , který je zvolen $AC = 0,0203 \text{ [(m}^3/\text{s})/\text{m}^2]$.

Celkový potřebný počet rukávců N_b :

$$N_b = \frac{A_c}{A_b} = 1273,4 \rightarrow 1274 \quad (6.9)$$

kde A_b ... filtrační plocha na jednom rukávci [m^2]

Filtrační plocha na jednom rukávci A_b se vypočte z rozměrů rukávce:

$$A_b = \pi \cdot D_b \cdot L_b = 1,884 \text{ [m}^2] \quad (6.10)$$

kde D_b ... průměr rukávce [m] (tab. 13)

L_b ... délka rukávce [m] (tab. 13)

Výsledná hodnota ze vztahu (6.9) N_b se zaokrouhlí na sudé celé číslo nahoru a upraví se v závislosti na počtu sekcí. Počet sekcí je zvolen $N_s = 8$.

Počet rukávců na jednu sekci N_{bs} :

$$N_{bs} = \frac{N_b}{N_s} = 159,25 \rightarrow 160 \quad (6.11)$$

Celkový skutečný počet rukávců je tedy:

$$Nb = N_{bs} \cdot N_s = 1280 \quad (6.12)$$

Zpětnou korekcí, kdy se ve vztahu (6.9) použije celkový skutečný počet rukávců Nb a následně se vztah dosadí do upravené rovnice (6.8), se vypočte skučná filtrační rychlost:

$$v_f = \frac{V_{c_{fg}}}{Nb \cdot A_b} = 0,02 \text{ [m/s]} \quad (6.13)$$

Tlaková ztráta

Ve výpočtu tlakové ztráty se neuvažuje množství tuhých znečišťujících látek (TZL) obsažené ve spalinách před vstřikem 2NaHCO_3 (naprostý většina se oddělí na multicyklonu umístěném za rotační pecí). Jediné odfiltrovávané TZL jsou tedy zastoupeny zreagovaným bikarbonátem sodným.

Tlaková ztráta p_{fil} [kPa] lze vyjádřit vztahem (6.14). Tento vztah je určen pro výpočet tlakové ztráty u filtrů, které se čistí mechanickou cestou (v tomto návrhu je uvažováno čištění filtrů pulzním tlakovým vzduchem), avšak pro potřeby práce je vztah (6.14) dostačující.

$$p_{fil} = K_1 \cdot v_f + K_2 \cdot wp \cdot v_f \quad (6.14)$$

kde K_1, K_2 ... empiricky stanovené konstanty tlakové ztráty na čistém rukávci a na tvořícím se koláči [kPa/(m/min)],
[kPa/(m/min)/(g/m²)] (tab. 13)
 wp ... zatížení rukávce [g/m²]

přičemž $K_1 = 0,483871$ a $K_2 = 0,001216$

Zatížení rukávce wp [g/m²] lze stanovit následovně:

$$wp = \frac{TZL \cdot V_{c_{fg}} \cdot 3,6 \cdot t_{reg}}{A_c} \quad (6.15)$$

kde TZL ... Obsah tuhých znečišťujících látek ve spalinách [kg/m³]
 t_{reg} ... regenerování rukávců (perioda čištění) [h⁻¹] (tab. 13)

přičemž tuhé znečišťující látky TZL jsou uvažovány pouze z 2NaHCO_3 a jejich koncentrace se stanoví na základě procentuálního vyjádření zastoupení 2NaHCO_3 ve spalinách (6.16). Perioda čištění rukávců je zvolena $t_{reg} = 0,75 \text{ [h}^{-1}\text{]}$

$$TZL = \frac{m_{2\text{NaHCO}_3}}{V_{c_{fg}} \cdot 60^{-1}} \cdot \rho_{BIC} \cdot 1000 = 9692 \text{ [mg/m}^3\text{]} \quad (6.16)$$

kde ρ_{BIC} ... hustota 2NaHCO_3 [g/m³] (tab. 13)

Dosazením vztahu (6.16) do rovnice (6.15) a oba vztahy následně do rovnice pro tlakovou ztrátu (6.14), se vypočte tlaková ztráta na rukávcových filtrech p_{fil} :

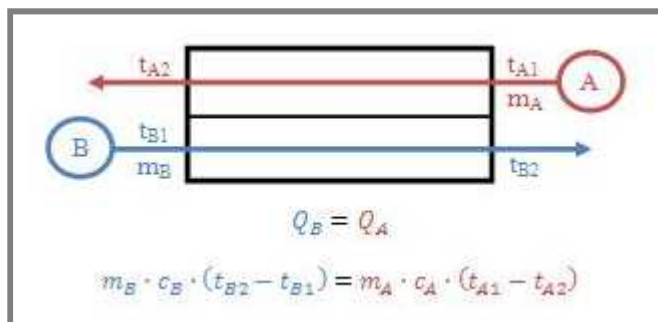
$$p_{fil} = 1,373 \text{ [kPa]}$$

4.7. Předehřev vody do kotle

Napájecí voda pro kotel na odpadní teplo je předehřívána pomocí spalín ve výměníku tepla, který je situována za rukávcovými filtry. Cílem je využít energii uloženou ve spalínách o teplotě $t_5 = 196,01 \text{ }^\circ\text{C}$. Tuto teplotu mají spaliny na výstupu z kotle z důvodu následného čištění spalín pomocí 2NaHCO_3 . Chemické reakce, které při čištění probíhají, jsou exotermického charakteru a není tedy zapotřebí uvažovat tepelné ztráty mezi kotlem a výměníkem tepla.

Voda proudící do výměníku má teplotu $tw_{in} = 105 \text{ }^\circ\text{C}$ (po výstupu z odplynováku) a tlak stejný jako na vstupu do kotle na odpadní teplo: $p = 2,5 \text{ [MPa]}$.

V následujícím výpočtu znázorněn pouze postup stanovení teploty spalín na výstupu z výměníku tepla resp. na vstupu do atmosféry. Výpočet je založen na rovnosti odevzdaného a přijatého tepla (obr. 32).



Obr. 34: Znázorněné tepelná bilance výměníku

Pro teplo odevzdané spalínami Q_f [kW] a pro teplo přijaté vodou Q_w [kW] lze tedy psát následující vztahy:

$$Q_f = m_f \cdot cp_{air} \cdot (t_5 - t_{gout}) \quad (7.1)$$

$$Q_w = m_w \cdot cp_w \cdot (tw_{in} - t_{nv}) \quad (7.2)$$

kde m_f ... množství spalín [kg/s]
 m_w ... množství vody [kg/s]
 t_{gout} ... teplota spalín na výstupu z výměníku tepla [$^\circ\text{C}$]
 tw_{in} ... teplota vody na vstupu do výměníku [$^\circ\text{C}$]

přičemž $cp_w \cdot (tw_{in} - t_{nv})$ lze vyjádřit jako rozdíl entalpií:

$$cp_w \cdot (tw_{in} - t_{nv}) = (i_{in} - i_{nv}) \quad (7.3)$$

kde jediná neznámá hodnota je entalpie vody na vstupu do výměníku i_{nv} , jejíž hodnota je určena pomocí parních tabulek:

$$i_{nv} = 442,034 \text{ [kJ/kg]} \text{ (pro vodu na vstupu do výměníku – } 105 \text{ }^\circ\text{C a } 2,5 \text{ MPa)}$$

Voda, která vystupuje z výměníku, napájí oba kotle na odpadní teplo. Spaliny procházející výměníkem pocházejí také z obou kotlů. Jejich množství je tedy nutné pro další výpočet dvakrát zvětšit (oproti hodnotám z předcházejících výpočtů, které uvažují pouze jeden kotel).

$$m_f = 2 \cdot m_{fg} = 36,583 \text{ [kg/s]} \quad (7.4)$$

$$m_w = 2 \cdot m_p = 11,774 \text{ [kg/s]} \quad (7.5)$$

Dosazením (7.1) – (7.5) do následující rovnice a její úpravou se získá teplota spalin na výstupu z výměníku tepla t_{out} :

$$Q_f = Q_w \quad (7.6)$$
$$t_{g_{out}} = t_5 - \frac{m_w \cdot (i_{in} - i_{nv})}{m_f \cdot c_{p_{air}}} = 135,57 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Stanovení základních rozměrů a vlastností výměníku tepla

Je zvolený výměník s tzv. zkroucenými trubkami (twisty – tube) – kap. 3.5.. Ke stanovení základních charakteristik výměníku je použit postup výpočtu převzatý z diplomové práce Ing. Jakuba Kříže [39] s vlastními vstupními daty. Výpočet je taktéž v prostředí programu MathCad a je součástí hlavního souboru.

Zde jsou uvedeny základní vypočtené spočtené údaje:

– teplosměnná plocha:	575,64	[m ²]
– počet trubek:	8551	[-]
– délka pláště (od trubkovnice k trubkovnici):	3	[m]
– průměr svazku:	1,068	[m]
– průměr pláště kolem svazku:	1,1	[m]
– tlaková ztráta v potrubí:	158,1	[Pa]
– tlaková ztráta mezi trubkami:	33410	[Pa]

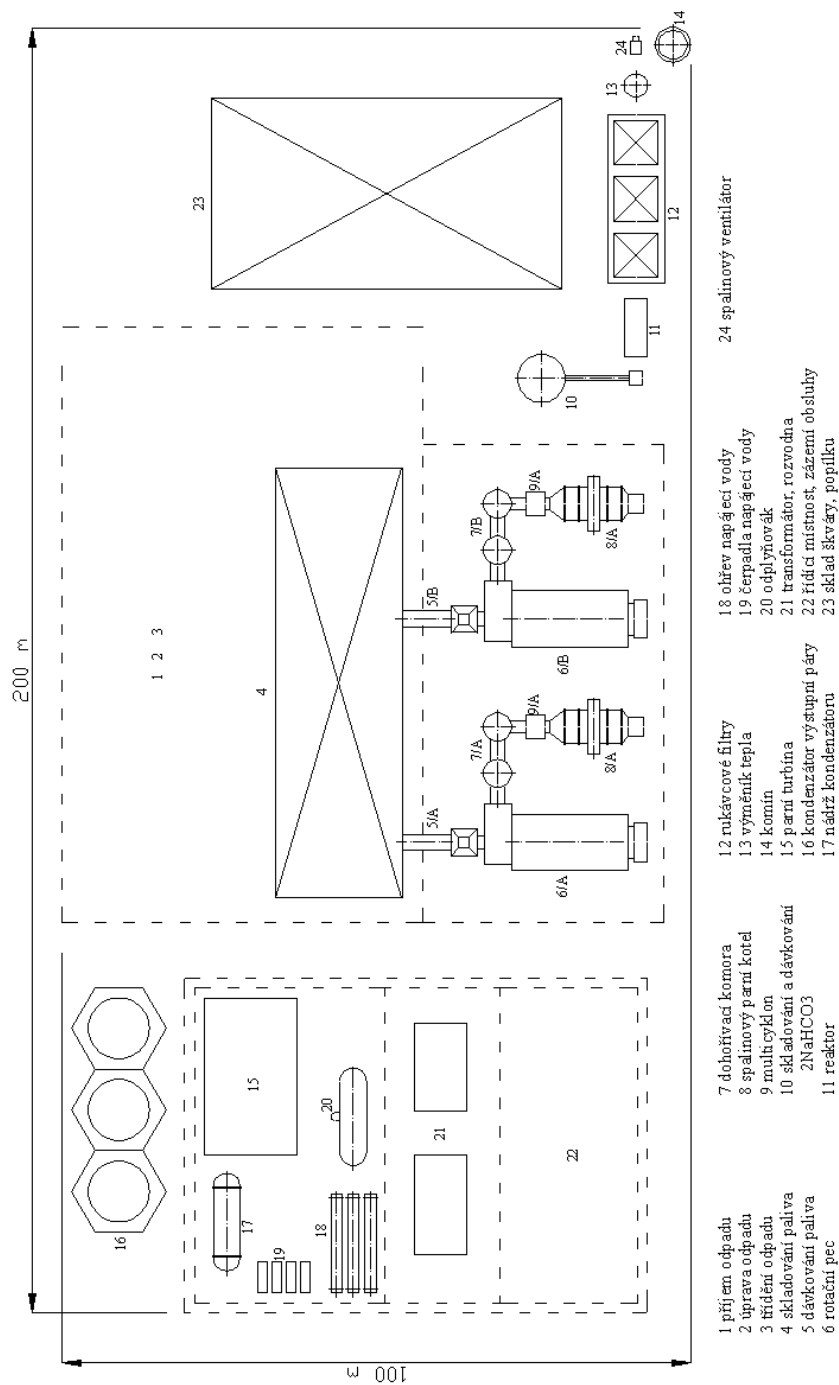
5. PROJEKČNÍ NÁVRH

V následujícím textu jsou přehledně interpretovány závěry vycházející z předchozích dvou kapitol. Dále je zde uvedeno technologické schéma a prostorová dispozice návrhu spalovny odpadů.

U některých aparátů je zde uveden možný dodavatel spolu s kontakty a recenzemi.

5.1. Prostorová dispozice a technologické schéma

Prostorová dispozice



Prostorová dispozice zobrazuje základní aparáty a technologie mající vliv na celkovou zastavěnou plochu. Nákres je bez armatur a dalších zařízení znázorňujících jednotlivé toky médií po areálu, ty jsou uvedeny v technologickém schématu v příloze 4.

5.2. Vstupní a výstupní parametry

PROVOZNÍ HODINY

Doba provozu	8000 h/rok
Plánované odstávky	760 h/rok (dvě plánované 14-ti denní odstávky ročně)

SPALOVÁNÍ ODPADU

Množství spáleného odpadu	100 000 t/rok
Zbytky po spalování	škvára: 20 000 t/rok (předpokládá se splnění vlastností škváry pro další využití ve stavebním průmyslu) spaliny:
Množství spalovaného vzduchu	518 400 t/rok
Množství zemního plynu	0 t/rok (zemní plyn bude použit pouze při uvádění RP do provozního stavu)

ČIŠTĚNÍ SPALIN

Množství spotřebovaného 2NaHCO_3	13 616 t/rok
Zbytky po čištění spalin	10 024 t/rok

VÝROBA TEPLA

Tepelný výkon	29 MW
Množství vyrobeného tepla	738 000 GJ/rok (toto množství odpovídá roční spotřebě cca 19 400 domácností)
Parametry vyráběné páry	1,1 MPa a 416 °C

VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE

Elektrický výkon instalované turbíny	10 MW
Předpokládaná vlastní spotřeba spalovny	1,5 MW (hodnota je převzatá od společnosti Termizo a.s., která provozuje spalovnu komunálních odpadů u Liberce se stejným množstvím zneškodněného odpadu ročně)
Elektrický výkon dodávaný do sítě	8,5 MW
Množství elektřiny dodávané do sítě	cca 66 000 MWh/rok

PŘEDPOKLÁDANÁ KONCENTRACE SLOŽEK VE SPALINÁCH PO VYČIŠTĚNÍ

TZL	0,4 mg/m ³	RSLR
CO	5,2 mg/m ³	TRMZ
TOC	0,8 mg/m ³	TRMZ
PCDD/F	0,012 ngTEQ/Nm ³	RSLR
Těžké kovy	< 0,15 mg/m ³	BIC
HCl	5 mg/m ³	BIC
HF	---	BIC
SO₂	2 mg/m ³	BIC

RSLR - tyto koncentrace byly naměřeny ve spalovně komunálních odpadů v Belgii u města Roeselare, kde používají stejný typ rukávových filtrů (membrána GORE-TEX s katalyzátorem) [38]

TRMZ - hodnoty převzaté od společnosti TERMIZO a.s., provozující spalovnu odpadů (o stejné kapacitě) v Liberci (tab. 5)

BIC - tyto koncentrace byly naměřeny ve spalovnách komunálních odpadů ve Francii a Itálii (tab. 11), kde používají stejný typ čištění spalin (2NaHCO₃)

5.3. Hlavní parametry aparátů**5.3****ROTAČNÍ PEC, DOHOŘIVACÍ KOMORA**

Výrobce	BIC Group, Belgie web adresa: www.bic.be recenze: www.bic.be/english/downloads.php
Typ	Rotační pec s protiproudým tokem a dohořivací komorou
Průměrné tepelné zatížení	197 kW/m ³
Orientační rozměry pece	Vnitřní průměr: 3,5 m Délka: 10,5 m
Zdržná doba	120 min
Množství spáleného odpadu	6,25 T/hod
Teplota plamene v RP	1031 °C
Teplota plamene v DK	1210 °C
Výstupní teplota spalin	1000 °C
Rozměry (šxvxd) [m]	Rotační pec: Ø5 - 12 Dohořivací komora: 3 x 13,5 x 10

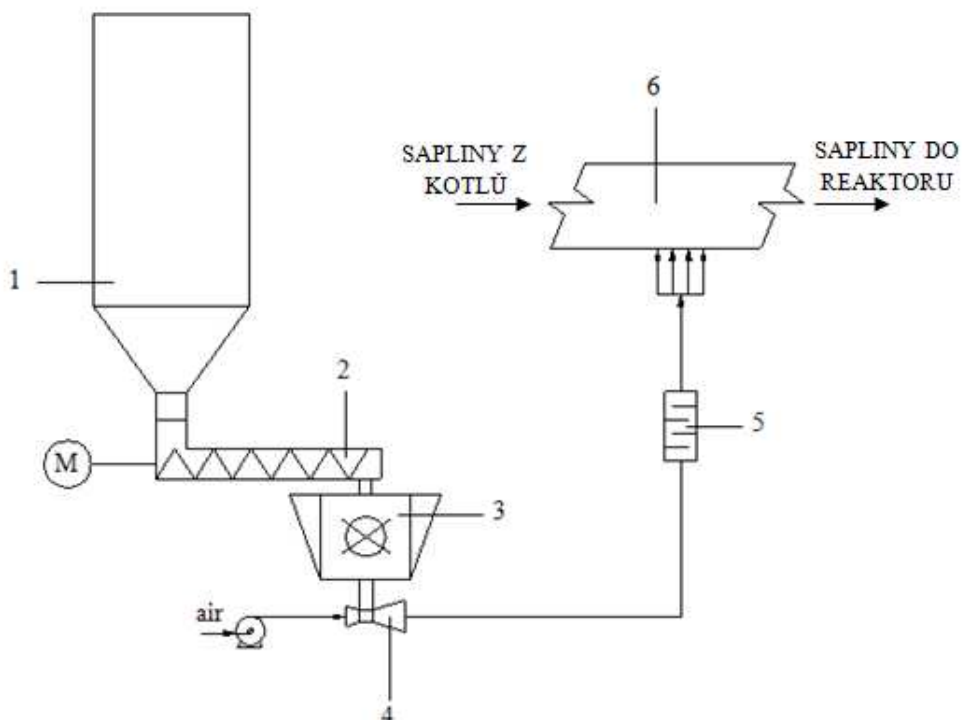
MULTICYKLON

Výrobce	The Babco and Wilcox Company web adresa: www.babcock.com recenze: www.babcock.com/products/environmental_equipment/multiclone.html
Typ	Multiclone®

KOTEL NA ODPADNÍ TEPLLO

Výrobce	SES BOHEMIA ENGINEERING a.s. web adresa: www.sesbohemia.cz recenze: www.sesbohemia.cz/Reference.aspx
Typ	Horizontální kotel
Výkon	16,4 MW
Vnitřní rozměry kotle	Šířka: 1,2 m Výška: 4,8 m Délka: 3,3 m
Rozměry žebrovaných trubek	Vnější průměr: 44,5 mm Tloušťka stěny: 3 mm Délka: 1,2 m Vzdálenost mezi žebry: 8 mm Výška žeber: 13 mm Tloušťka žeber: 1,3 mm
Minimální teplotní příblížení	40 °C
Teplota spalin na výstupu	196 °C
Parametry přehřáté páry na výstupu	2,5 MPa a 530 °C
Tlaková ztráta	1,635 kPa
Rozměry (šxvxd) [m]	2,5 x 5,5 x 7

DÁVKOVÁNÍ 2NaHCO₃



1 – SILO

Výrobce	ZK ING s.r.o. web adresa: www.zking.cz recenze: www.zking.cz/realizace-technologice-celky.htm
Typ	Montované ze segmentů
Potřebná zásoba 2NaHCO₃	290 m ³ (maximální spotřeba 2NaHCO ₃ je 285 m ³ /14 dní, doplňování zásob uvažováno 1 za dva týdny)

2 – ŠNEKOVÝ DOPRAVNÍK

Výrobce	ZK ING s.r.o. web adresa: www.zking.cz recenze: www.zking.cz/realizace-technologicka-zarizeni.htm
Typ	Mikrodávkovač
Výkon	10 - 1000 l/hod (potřebný max. výkon: 783 l/hod)

3 – MLÝN

Výrobce	FAM web adresa: www.fam.de recenze: www.fam.de/enflish/references/index.htm
Typ	Kladivový mlýn se separátorem (SHM1616M)
Požadovaný výkon	1702 kg/hod
Vstupní rozměr částic	cca 30 mm
Výstupní rozměr částic	17-25 μm

4 – EJEKTOR

Výrobce	Northvale Korting, Ltd web adresa: www.northvalekorting.co.uk recenze: www.northvalekorting.co.uk/downloads.asp
Typ	Gas jet ejector
Výkon	Výroba na klíč

5 – STATICKÝ MIXER

Výrobce	ROLIOL spol. s r.o. web adresa: www.roliol.com recenze: www.roliol.com/catalog.php?page=reference.common&PHPSESSID=5e4e6eb698616f0abf49c5c68407b60a
----------------	--

Typ	Statický mixer
Výkon	500-30000 l/hod (požadovaný výkon 783 l/hod)

rukávcové filtry

Výrobce	Neundorfer Inc. web adresa: www.neundorfer.com recenze: www.neundorfer.com/about-neundorfer/client-list-estimonials.aspx
Typ	Pulzní technologie čištění filtrů
Výkon	50 m ³ spalin za s
Počet sekcí	8
Celková filtrační plocha	2310 m ²
Počet rukávcových filtrů	1232
Rozměry rukávcových filtrů	Průměr rukávce: 0,15 m Délka rukávce: 4 m
Materiál rukávcových filtrů	Aramid s membránou GORE-TEX
Tlaková ztráta	1,373 kPa
Rozměry (šxvxd) [m]	7 x 12 x 17

VÝMĚNÍK TEPLA

Výrobce	Precision Tubes, s.r.o. web adresa: www.precisiontubes.sk recenze: www.precisiontubes.sk/produkty.htm
Typ	Twisty tube s protiproudým tokem
Výkon	2,25 MW
Teplosměnná plocha	575,6 m ²
Počet trubek	8551
Délka	3 m (od trubkovnice k trubkovnici)
Rozměry trubek	průměr: 8 mm tloušťka stěny: 0,4 mm šířka zplacatění: 3 mm
Průměr pláště	1,1 m
Tlaková ztráta v trubkách	158 Pa
Tlaková ztráta mezi trubkami	3341 Pa
Rozměry (šxvxd) [m]	Ø 1,5 – 4,5

PARNÍ TURBÍNA

Výrobce	Siemens AG web adresa: www.siemens.com recenze: ww.energy.siemens.com/hq/en/power-generation/steam-turbines/sst-20.htm
Typ	SST-120
Elektrický výkon	10 MW

Kritické dovolené vlastnosti páry na vstupu	13,1 MPa a 530 °C
Minimální průtok LP	10 t/hod
Vlastnosti páry na výstupu z LP	20 kPa a 60,1 °C
Rozměry (šxvxd) [m]	2,8 x 3,2 x 9

KONDENZÁTOR

Výrobce	SPX Cooling Technologies, Inc. web adresa: www.spxcooling.com recenze: www.spxcooling.com/en/products/detail/hexacool-air-cooled-condenser/
Typ	Hexacool®
Kondenzační výkon	28 MW
Příkon ventilátorů	264 kW
Rozměry žebrovaných trubek	Průměr: 25 mm Tloušťka stěny: 2,5 mm Průměr žebra: 56 mm Tloušťka žebra: 4 mm
Teplota kondenzátu (vody) na výstupu	55 °C
Rozměry (šxvxd) [m]	13 x 17 x 32

SPALINOVÝ VENTILÁTOR

Výrobce	General Eletric company web adresa: www.ge.com recenze: www.gepower.com/businesses/ge_oilandgas/en/prod_serv/prod/compressors/en/overhung_comp.htm
Typ	D-series (D48JR)
Objemový výkon	210 750 m ³ /hod (průtočné množství spalin je 168 870 m ³ /hod)
Max. pokrytá tlaková ztráta	165 kPa (tlaková ztráta na hlavních aparátech je 36,57 kPa)

6. EKONOMICKÉ ASPEKTY

Aby bylo možné s určitostí konstatovat, zdali je návrh spalovny odpadů realizovatelný či nikoli, je nutná komplexní ekonomická analýza. Ta zahrnuje posouzení celkových nákladů (investice spojené s výstavbou a ročním provozem spalovny) a předpokládaných možných zisků (prodej vyráběných energií, poplatky za zneškodňovaný odpad, dotace).

Veškeré následné výpočty mají informační charakter a nelze je uvažovat jako obecně platné.

Investiční náklady

Návrh spalovny odpadů je obecně velice složitý proces a ekonomická analýza investičních nákladů taktéž. Zjišťování cen jednotlivých zařízení a aparátů by bylo časově velmi náročné a přesahovalo by rámec diplomové práce.

Celkové investiční náklady jsou tedy stanoveny na základě odhadu dotázaných odborníků a činí 2 mld. Kč. Vezmeme-li v úvahu, že náklady na výstavbu spalovny odpadů v Liberci o stejné kapacitě (100 Kt/rok) činily 1,5 mld. Kč, lze odhadnutou sumu dvou miliard považovat za reálnou, a to včetně rezervy.

Dotace [21]

Jak je uvedeno v kapitole 1.5.4., od roku 2010 je možné čerpat dotace na výstavbu spaloven SKO a to v rámci Operačního programu životního prostředí, osy 4.1. – zkvalitnění nakládání s odpady.

Základní omezení pro podání žádostí o podporu zařízení pro energetické využití SKO dle XV. výzvy pro podávání žádostí o poskytnutí podpory v rámci Operačního programu Životní prostředí jsou následující:

- Minimální požadovaná kapacita zařízení je zpracování 60 000 tun KO ročně.
- Zařízení energetického využití KO musí zpracovat minimálně 80% SKO z celkového množství odpadů vstupujících do zařízení.
- Zařízení energetického využívání KO musí splňovat podmínku energetické účinnosti $\geq 0,65$ dle směrnice Evropského parlamentu a rady (ES) č. 98/2008.
- Minimální úroveň využití tepla z celkové produkce zařízení pro energetické využití KO činí 4 GJ/rok KO na vstupu.
- Do katastrálního území obcí, z nichž bude dané zařízení odebírat KO, nelze zahrnout katastrální území obcí, které již dodávají nebo budou dodávat KO do jiného existujícího zařízení na spalování SKO.
- Žadatelé musí předložit potvrzení budoucího odběratele o záměru zajištění odběru minimálně 25% vyrobené energie do odběrových sítí.

První 4 body uvažovaný návrh spalovny odpadů splňuje. Splnění dalších dvou záleží na následné realizaci návrhu.

Na realizaci a na charakteru subjektu, který bude o dotace žádat (fyzická osoba, veřejný subjekt, soukromý subjekt atd.), je závislá možná výše podpory, která může dosáhnout až 90% celkových nákladů.

Celková výše dotací pak obecně závisí na celé řadě jak technických, tak ostatních parametrů (mezi ostatní parametry se řadí např. místo, kde se bude návrh realizovat). V tomto bodě není tedy možné předpovědět, v jaké výši lze možné dotace očekávat.

V kapitole 1.5.4. je dále uvedeno, že výše finanční podpory se stanoví na základě výběrových kritérií, jejichž důležitost je stanovena bodovým hodnocením. V příloze XV. výzvy pro podávání žádostí o poskytnutí podpory v rámci OPZP je seznam základních kritérií a jejich bodové ohodnocení. V následujících tabulkách je uveden přehled těchto základních kritérií a je stanoven příslušný počet bodů odpovídající uvažovanému návrhu (je-li to možné).

1. Indikátor – Plnění cílů nařízení vlády č. 197/2003 Sb. o Plánu odpadového hospodářství	Počet bodů
Projekt se podílí na plnění některého z cílů POH ČR, POH kraje nebo POH obce významně	15
Projekt se podílí na plnění některého z cílů POH ČR, POH kraje nebo POH obce částečně	5

Předpokládá se spalování nemalého množství SKO a výroba elektrické a tepelné energie. Spalovna odpadů bude tedy přispívat ke snižování SKO ukládaných na skládky a zároveň využívat odpad k výrobě energií. Lze tedy konstatovat významné ovlivnění POH.

2. Indikátor – Smluvní zajištění odběru vyrobené energie	Počet bodů
Smluvní zajištění odběru nad 75 %	20
Smluvní zajištění odběru z 51–75 %	15
Smluvní zajištění odběru z 25–50 %	5
Smluvní zajištění odběru pod 25 %	Nepodporováno

V této fázi nelze indikátor vyhodnotit.

3. Indikátor - Využití energie, vztaženo k 1 t komunálního odpadu na vstupu	Počet bodů
Nad 6 GJ/t KO	15
4–6 GJ/t KO	8
Pod 4 GJ/t KO	Nepodporováno

Množství vyrobeného tepla je stanoveno na 780 TJ/rok. Kapacita spalovny je 100 Kt/rok. Využití energie je tedy 7,8 GJ/tKO.

4. Indikátor – technická úroveň projektu	Počet bodů
Popis technických specifikací zařízení a postup realizace projektu je detailně a srozumitelně popsán, projekt je přehledný, obsahuje mapy, schémata a jsou uvedeny všechny požadované skutečnosti.	15
Popis technických specifikací zařízení a postup realizace projektu je detailně popsán, obsahuje však drobné nedostatky.	12
Předložený projekt je stručný, bez podrobných informací, neobsahuje přehledný popis navrhovaných prací.	8
Předložený projekt je stručný, bez podrobných informací a bez většího množství věcných chyb.	4
Předložený projekt je stručný, bez podrobných informací, obsahuje věcné chyby.	0

V této fázi nelze indikátor vyhodnotit.

5. Indikátor – měrná podpora na zařízení (v Kč/t KO za rok)	Počet bodů
Do 5.600 Kč/t KO za rok	20
Do 5.601–7.200 Kč/t KO za rok	15
Do 7.201–8.800 Kč/t KO za rok	8
Do 8.801–10.500 Kč/t KO za rok	0
Nad 10.500 Kč/t KO za rok	Nepodporováno

Měrná podpora je závislá na výši schválené dotace a kapacitě spalovny a to následovně:

$$\frac{\text{výše schválené dotace} [\% \text{ celkových nákladů}] \cdot \text{celkové náklady} [\text{mil.}]}{\text{kapacita spalovny} [\text{t}]}$$

Na základě tohoto indikátoru lze orientačně stanovit v jaké výši (% z celkových nákladů) je možné o dotaci žádat tak, aby byl splněn výše uvedený indikátor (vyšší bodová ohodnocení mají kladný dopad na schvalování dotací ze strany OPZP):

$$\text{K získání 15 bodů: } \frac{7200[\text{kč/t KO}](15 \text{ bodů}) \cdot 100000[\text{t}](\text{kapacita spalovny})}{2000 \text{ mil.}(\text{náklady})} = 0,36 \rightarrow 36\%$$

K získání 15 bodu u indikátoru 5 je tedy nutné žádat o max. dotaci ve výši 36% celkových nákladů.

6. Indikátor – měrné finanční náklady na stavbu zařízení.	Počet bodů
Do 14.000 Kč/t KO za rok	10
Od 14.001–18.000 Kč/t KO za rok	8
Od 18.001–22.000 Kč/t KO za rok	5
Od 22.001 – 26.000 Kč/t KO za rok	3
Nad 26.000 Kč/t KO za rok	0

Jedná se o způsobilé náklady bez DPH na pořízení zařízení vzhledem ke kapacitě zařízení (v Kč/t KO za rok).

Celkové investiční náklady ve výši 2 mld. jsou uvažovány včetně stavebních prací, rezervy, stavebního materiálu atd. Hodnota samotných aparátů je uvažována na 1,5 mld. Měrné finanční náklady na stavbu zařízení jsou tedy 15 000 Kč/t KO.

7. Indikátor – podíl SKO ve zpracovaných odpadech ve spalovně	Počet bodů
Nad 90 %	5
80–90 %	0
Pod 80 %	Nepodporováno

Je uvažována spalovna komunálních odpadů.

Jak je zde již poznamenáno, hodnotu možné dotace nelze s určitostí vyjádřit. Výše zmíněná kritéria mají v této práci spíše informační charakter. Je však možné konstatovat, že u kritérií, které lze zhodnotit, dosáhl uvažovaný návrh spalovny na vyšší bodová ohodnocení.

Palivo (odpad) dovážené do spalovny nemusí být nutně bezprostředně svážený komunální odpad. Lze použít též komunální odpad dříve uložený na skládky, jednalo by se tedy o vytěžování skládek. Tento proces je možné charakterizovat jako zlepšování stavu krajiny, což spadá (v rámci OPZP) pod prioritní osu č. 6 a bylo by tedy možné získání dotací i touto cestou.

Náklady na roční provoz

2NaHCO₃

Spotřeba	13 616 t/rok
Cena	7 500,- Kč/t
Roční náklady	102,2 mil. Kč

Emisní povolenky

TZL	1 630,- Kč/rok
CO	7 100,- Kč/rok
Těžké kovy	4 100,- Kč/rok
TOC	2 200,- Kč/rok
SO ₂	2 700,- Kč/rok
Celkem	17 730,- Kč/rok

Mzdy

Počet zaměstnanců	40
Průměrný plat	25 000,- Kč/měs.
Celkové náklady na mzdy	12 mil. Kč

Opravy a udržování

Průměrné náklady v prvních 5-ti letech provozu	10 mil. Kč
--	------------

Mezi další roční náklady bude nutné započítat odpisy a úroky spojené s případným úvěrem poskytnutým na stavbu spalovny. Tato položka obecně tvoří značnou část ročních nákladů provozu spalovny.

Dále je nutné brát v úvahu poplatek za uložení škváry a popílku (pevné zbytky po spalování) na skládku (v případě, že se nepodaří naplnit prvotní záměr – využít škváru pro stavební účely). Zákonné poplatky za 1 tunu škváry (kat. č. 100101) uložené na skládce činí 535,- Kč. Poplatky vlastníkovu skládky jsou individuální. V případě, že bude nutné uložit na skládku veškerou produkci škváry, bude roční poplatek (při provozovatelem účtované ceně za uložení 700,- Kč) 24,7 mil. Kč

Spotřebu elektrické a tepelné energie je možné pokrýt z vlastní produkce, tudíž se tyto hodnoty v nákladech nepromítnou.

Roční výnos

Průměrné množství odebrané páry za rok: 57 600 GJ (2 MW)

Množství vyrobené elektrické energie je potom: 52 000 MWh (6,5 MW)

Prodej vyrobené elektrické energie

Cena	4,35,- Kč/kWh
Výnos	226,2 mil. Kč

Cena 4,35 Kč za kWh je převzata od společnost ČEZ a.s. v roce 2010.

Prodej vyrobené páry

Cena	300,- Kč/GJ
Výnos	17,28 mil. Kč

Cenu 30 Kč za 1 GJ tepla je převzata od společnosti Teplárny Brno a.s.

Zneškodňování odpadu

Cena	900,- Kč/t
Výnos	90 mil. Kč

Cenu 900 Kč za tunu je převzata od společnosti SAKO Brno a.s..

Do ročních výnosů je možné dále zařadit prodej škváry (zbytků po spalování) na stavební účely a prodej železného šrotu, který je do spalovny dovezen spolu s komunálním odpadem.

Možnosti financování

Možných kombinací způsobů financování takového projektu je mnoho. Pro ilustraci se zde uvažuje nejhorší možný případ – celá částka bude zapůjčena investičními společnostmi či jednotlivými investory (Project finance). Uvedení nejpříznivější varianty (pro srovnání) nelze s určitostí naznačit, neboť v tuto chvíli není možné stanovit možný objem státních dotací.

Základní specifikace úvěru

Výše úvěru	2 000 mil. Kč
Úroky	6 – 7 %
Přeplatek úvěru	130 mil. Kč (je uvažován úrok 6,5%)
Max. možná roční splátka v návaznosti na níže vyčíslený zisk	200 mil. Kč
Doba splatnosti	10,65 let

Hospodaření společnosti za kalendářní rok (uvažovaná spalovna odpadů)

Náklady	124,2 mil. Kč/rok
Výnosy	333,48 mil. Kč/rok
Celkem	+ 209,28 mil. Kč/rok

V hospodaření není zahrnuto nakládání se škvárou (prodej na stavební účely a poplatky za uložení na skládku).

Srovnáním roční splátky úvěru a celkového hospodaření společnosti (spalovny) je patrné, že společnost by byla schopna plnit závazky vůči investorům po dobu splatnosti úvěru, a to navíc s ročním ziskem 8,6 mil.

Po doplacení úvěru bude roční čistý zisk zařízení činit 363,6 mil Kč.

Životnost spalovny je odhadnuta na 20 let.

ZÁVĚR

V předložené práci je proveden návrh hlavních a nejdůležitějších aparátů spalovny odpadů s roční kapacitou 100 kT komunálního odpadu. Ten je ve spalovně využit k výrobě elektrické energie a tepla odpovídající roční spotřebě asi 19 400 domácností.

Výpočty v kap. 3 a 4 jsou zpracovány v programu MathCad a jsou součástí této práce v elektronické formě. Použití programu MathCad zaručuje možnost libovolné změny kteréhokoli ze vstupních parametrů dle aktuální potřeby s následným okamžitým výsledkem.

Aparáty použité v návrhu se řadí mezi nejmodernější zařízení v dané oblasti, což mimo jiné zaručuje plnění nejpřísnějších legislativních předpisů, úsporu energie a provozních nákladů. Každý navržený aparát je nezbytný pro bezproblémový chod spalovny. Zde jsou vyzdvíženy výhody dvou klíčových uzlů navržené technologie pro spalování odpadu (rotační pec a čištění spalin).

Uvažovaná rotační pec zaručuje možnost použití odpadu libovolného skupenství a její protiproudé uspořádání znamená zejména navýšení teploty v dohořivací komoře bez nutnosti přívodu zemního plynu (kap. 3.2).

Čištění spalin je navrženo tzv. suchou cestou za pomoci 2NaHCO_3 . Oproti použití tzv. mokré cesty to znamená úsporu investičních nákladů, snížení rizik výskytu problémů spojených s vodním hospodářstvím spalovny a eliminaci nakládání se vzniklým produktem (kap. 3.4.).

V závěru práce je provedeno ekonomické posouzení celého návrhu, jehož hlavní účelem bylo zjištění ekonomické relevantnosti projektu. Hodnoty použité pro posouzení jsou pouze informačního charakteru, avšak pro získání určité představy jsou postačující.

Z ekonomického rozboru vychází návratnosti investice do 6 – 7 let od zahájení provozu spalovny, a to za předpokladu investičních nákladů dosahujících 2 mld. Kč. Ve výpočtu návratnosti investic je již zahrnut úrok 6,5%, přičemž je uvažováno čerpání úvěru v plné výši investičních nákladů.

V ekonomickém posouzení je také naznačena možnost využití státních dotací prostřednictvím Operačního programu životního prostředí (nově od prosince 2009).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Šíma, K.: *Návrh způsobů využívání / zneškodňování odpadů ze zvoleného strojírenského provozu*. Brno 2009. 72 s. Diplomová práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Novotný, CSc.
- [2] Becková, P.: *Odpadové technologie* [online]. Pardubice: UP, 1999. Dostupné z <<http://envi.upce.cz/pisprace/starsi/beckova.htm>>
- [3] Kafka, Z.: *Základy ochrany životního prostředí - část odpady* [online]. VŠCHT, 2002. Dostupné z <www.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/ZOZP/skriptaZOP.doc>
- [4] Šíma, K.: *Využití informačních systémů v oblasti odpadového hospodářství města*. Brno 2008. 30 s., 6 s. příloh. Bakalářská práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Novotný, CSc.
- [5] Český statistický úřad: *Odvětvová klasifikace ekonomických činností* [online]. ČSÚ. Dostupné z <[http://www.czso.cz/csu/klasifik.nsf/i/odvetvova_klasifikace_ekonomickyh_cinnosti_\(o_kec\)](http://www.czso.cz/csu/klasifik.nsf/i/odvetvova_klasifikace_ekonomickyh_cinnosti_(o_kec))>
- [6] Pravdová, M.: *Podmínky a organizace přepravy nebezpečného odpadu z České republiky na území Velké Británie v rámci společnosti DHL Express s.r.o.* Pardubice 2009. 69 s. Diplomová práce na DFJP JPCE. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Václav Cempírek Ph.D.
- [7] Karásek, R.: *Transfer těžkých kovů při spalování odpadů*. Brno 2006. 4 s. Energie z Biomasy V – odborný seminář. Dostupné z <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_v/papers/10-Karasek.pdf>
- [8] Sdružení autorů: *Integrovaná prevence a omezování znečištění - Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů*. Španělsko 2005. 753 s. Dostupné z <[http://www.cenia.cz/_C12571B20041E945.nsf/\\$pid/CENMSFLZ7EX4](http://www.cenia.cz/_C12571B20041E945.nsf/$pid/CENMSFLZ7EX4)>
- [9] EUROSTAT: *Municipal waste generated*. EU 2010. Dostupné z <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/documents/Municipal_%20waste_%20generated_1000t_%20update_%20website180112.mht>
- [10] Europe environmental agency: *Podkladový dokument pro EEA Briefing 2008/01*. Kodaň 2008. Dostupné z <http://reports.eea.europa.eu/index_table?themeid=climate.>
- [11] Český statistický úřad: *Produkce, využití a odstraňování odpadů v ČR*. ČSÚ 2008 Dostupné z <<http://www.czso.cz/csu/2009edicniplan.nsf/p/2001-09>>
- [12] EUROSTAT: *Municipal waste treatment*. EU 2010. Dostupné z <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/data/wastemanagement/waste_treatment>
- [13] Legislativní usnesení Evropského parlamentu ze dne 17. června 2008 ke společnému postoji Rady ohledně přijetí směrnice Evropského parlamentu a Rady o odpadech a o

- zrušení některých směrnic (11406/4/2007 – C6-0056/2008 – 2005/0281(COD))
- [14] Plassová, M.: *Možnosti zpracování odpadu a jejich nároky (na energii...)* [online]. Dostupné z <<http://www.gymik.cz/projekt/projekty/moznosti.pdf>>
- [15] Kuroš, M. a kol.: *Odpady, jejich využívání a zneškodňování*. Praha: VŠCHT, 1994. 241 s. ISBN 80-85087-32-4.
- [16] Provoz skládky komunálních odpadů [online]. Dostupné z <http://envi.upce.cz/psko_is.pdf>
- [17] Černík B., *Právní úprava využití odpadů v ČR v historických souvislostech*. Odpadové fórum, 1/2009, s. 24-30. ISSN 1212-7779
- [18] MŽP: Platná legislativa. Dostupné z <http://www.mzp.cz/_C1256E7000424AC6.nsf/Categories?OpenView>
- [19] Zákon č. 86/2002 Sb. ze dne 1. června 2002 o ochraně ovzduší a o změně některých dalších zákonů.
- [20] Nařízením vlády č. 354/2002 Sb. ze dne 3. července 2002 o kterém se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu ve znění pozdějších předpisů.
- [21] SFŽP ČR: Operační program životního prostředí. Dostupné z <<http://www.opzp.cz>>
- [22] STEO: *Odpad je energie*. Dostupné z <<http://www.odpadjeenergie.cz>>
- [23] Poncarová, J.: *Spalování odpadu: kolik vyrobíme tepla a elektřiny?* Nalezeno.cz 2009. Dostupné z <<http://www.nazeleno.cz/energie/energetika/spalovani-odpadu-kolik-vyrobime-tepla-a-elektřiny.aspx>>
- [24] ÚPI při FSI VUT v Brně: *Jednotky pro termické zpracování odpadu (spalovny)*
- [25] SAKO Brno: Informace převzaté od společnosti SAKO Brno a.s. Dostupné z www.sako.cz
- [26] UCHOP při VŠCHT: *Způsoby využívání a odstraňování odpadů*. Studijní podklady. Dostupné z <<http://www.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/1ZOZP/odpady/odpady3.htm>>
- [27] Termizo: Informace převzaté od společnosti Termizo a.s. Dostupné z <<http://www.termizo.cz>>
- [28] ECOPROG: *The Worldwide Market for Waste Incineration Plants*. Cologne / Oberhausen 2008. 13 s. Dostupné z <http://www.ecoprogram.com/en/studie_waste_incineration.php>
- [29] CEWEP: Maps of European WtE Plants. Dostupné z <<http://www.cewep.eu/data/studies/index.html>>
- [30] Pražské služby: Informace převzaté od společnosti Pražské Služby a.s. Dostupné z <<http://www.psas.cz>>

- [31] Robert H. Perry, Don W. Green: *Perry's chemical engineers' handbook*. Seventh edition. USA: The McGraw-Hill, 1997. 2200 s. ISBN 0-07-049841-5
- [32] Gerard, K.: *Environmental engineering*. UK: The McGraw-Hill, 1997. 978 s. ISBN 0-07-116424-3
- [33] BIC Group: *Types of rotary kilns for medical waste combustion*. Belgie. Dostupné z <<http://www.bic.be/english/index.php>>
- [34] WtERT: *Flue gas clearing*. Dostupné z <http://www.wtERT.eu/default.asp?Menu=12&ShowDok=23>
- [35] Brunner Mond: *Solidum bicarbonate for flue gas treatment*. Dostupné z http://www.brunnermond.com/apps_fluegastreatment.aspx
- [36] ARM & HAMMER: *Sodium bicarbonate dry injection technology*
- [37] Neundorfer: *Bag house tutorial – Lesson 2 (bag clearing)*. Dostupné z <<http://www.neundorfer.com/FileUploads/CMSFiles/Fabric%20Filter%20Bag%20Cleaning%5B0%5D.pdf>>
- [38] Remedia: *Destruction of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Dibenzofurans in Fabric Filters*. Belgium: W. L. Gore & Associates, 2001. 9 s. Dostupné z <http://www.jgoretex.co.jp/remedia/literature/pdf/us/tec03_us.pdf>
- [39] Kříž, J.: *Sanace půdy po těžbě uranu*. Brno 2010. Diplomová práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí DP prof. Ing. Jaroslav Jícha, Csc.
- [40] Sponar M. and Stehlik P.: *Simple computational tool for calculation of rotary kilns for waste treatment*. Praha: Congress CHISA 2006
- [41] Quaak P., Knoef H., Stassen H.: *Energy from biomass – A review of combustion and gasification technologies*. USA: The International Bank for Reconstruction, 1999. 100 s. ISBN: 0253-7494
- [42] Luřcha, J. (project overview): *Recuperators & heaters in microturbine based combined heat & power units*. Eurerka program 2009. Project Id. No.:1P050E191-2005-2008
- [43] ÚPI při FSI VUT v Brně: *HRS*
- [44] Fluent Incorporated: *7.3.2 Viscosity as a Function of Temperature*. Fluent Inc. 2001. Dostupné z <http://combust.hit.edu.cn:8080/fluent/Fluent60_help/html/ug/node282.htm>
- [45] Stanley M. Walas: *Chemical process equipment: selection and design, 2nd edition*. UK: Elsevier 2009. 832 s. ISBN 13: 978-0-12372-506-6
- [46] Neundorfer: *Bag house tutorial – Lesson 5 (Fabric Filter Design Review)*. Dostupné z <<http://www.neundorfer.com/FileUploads/CMSFiles/Fabric%20Filter%20Bag%20Cleaning%5B0%5D.pdf>>

- [47] James H. Turner: *Fabric Filtres – Chapter 5*. USA: Research Triangle Institute 1998.
<<http://www.p2pays.org/ref/10/09848.pdf>>
- [48] Hanák, L.: *Zneškodňování spalin znečištěných NOx*. Brno 2010. Diplomová práce na FSI VUT v Brně. Vedoucí DP Ing. Radek Dvořák, Ph.D.
- [49] Kolařík: *Parní a plynové turbíny v redukčních stanicích*. Praha: Česká energetická agentura. Dostupné z <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/98_893.pdf>
- [50] Šesták, J. a kol.: *Transportní a termodynamická data pro výpočet aparátů a strojního zařízení*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1981. 245 s.
- [51] Cheung, K.: *Technical instruction – Solid waste incineration*. USA: U.S Army corp of engine, Engineering division, 1998, 99 s. UFC 3-240-05A
- [52] ÚPEI při FSI VUT v Brně: *Energie a emise – zadání semestrální práce*. 2008/2009

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Závislost výhřevnosti různých druhů paliv na vlhkosti.

Příloha č. 2: Ukázka možného návrhu předtřídění a úpravy odpadu před vlastním spalováním.

Příloha č. 3: Návrh uspořádání rukávcových filtrů, výměníku tepla (twisty-tube), spalínového ventilátoru a odtahu.

Příloha č. 4: Schéma toků

Příloha č. 5: Výpočet v programu MathCad (pouze elektronická verze).

