



**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

# **TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ S VYUŽITÍM TEPLA**

Thermal Treatment of Waste with Heat Recovery

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**TIBOR STRAPKO**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. MARTIN PAVLAS, Ph.D.**

BRNO 2011



## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce pojednává o jednom z možných způsobů nakládání s odpady v dnešní době, a to jejich termickým využitím, s detailnějším pohledem na zařízení využívající tyto druhotné suroviny coby plnohodnotný zdroj energie – tzv. Waste to Energy (WTE) zařízení (v minulosti spalovně).

Úvodem se práce zabývá odpady jako takovými, jejich historií, rozdělením, vlastnostmi či důsledkem jejich vzniku, resp. neustálého růstu produkce.

Vedle termického zpracování odpadů se práce pro komplexnost a zejména možnost srovnání okrajově dotkne i dalších 2 nejznámějších a nejčastějších způsobů nakládání s odpady: recyklace a skládkování.

Následuje část zabývající se termickým nakládáním s odpady s hlavní pozorností zaměřenou na WTE zařízení jako celek, jeho jednotlivé subsystémy a procesy v nich probíhající. Tyto je možno rozdělit na 3 základní části: termická část, systém utilizace tepla a systém čištění spalin.

Hlavní pozornost je věnována systému využití vzniklého tepla, který nezanedbatelně ovlivňuje celkovou účinnost a efektivitu těchto zařízení.

Závěr přináší vyčíslení hlavních energetických toků v procesu spalování odpadů ve formě jednoduchého blokového a výpočetního modelu.

## **KLÍČOVÉ SLOVÁ**

odpady, termické využití odpadů, spalování, WTE zařízení, pára, výpočetní model

## **ABSTRACT**

Following bachelor's thesis deals with one of the possible way of waste treatment nowadays, thermal treatment, focusing on the facilities using this secondary raw materials as a renewable source of energy, WTE plants (incinerations plants in history).

At the beginning this work focuses on waste and its history, diversification, characteristics, origin and reasons of their continual grow in production.

For complexity and possibility of comparison this work slightly deals with 2 other most popular ways of waste treatment, as well: recycling and waste disposal.

Next part concerns with thermal treatment of waste, specializing on WTE plants and its processes. These can be divided into 3 different parts: incineration part, energy utilization part and flue gas cleaning part.

Big attention is concentrating on energy utilization system, which inconsiderable affects general effectivity of this facilities.

Finally, there's a numerical evaluation of energy flows in process of waste incineration and its processing into simple block and computational model.

## **KEY WORDS**

waste, thermal treatment of waste, incineration, WTE plants, steam, computational model

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE PRÁCE**

STRAPKO, T. *Termické zpracování odpadů s využitím tepla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Pavlas, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a v přiloženém seznamu jsem správně uvedl všechny použité zdroje

V Brně, 27. 5. 2011

-----  
Tibor Strapko

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Pavlasovi, PhD za jeho cenné rady a připomínky při tvorbě této práce.



# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. ÚVOD .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>2. ODPADY .....</b>   | <b>11</b> |
| 2.1. VÝVOJ K MODERNÍMU ODPADOVÉMU HOSPODÁŘSTVÍ .....           | 11        |
| 2.2. ROZDĚLENÍ, SLOŽENÍ A VLASTNOSTI ODPADŮ .....              | 12        |
| <b>3. SKLÁDKOVÁNÍ.....</b>                                     | <b>14</b> |
| <b>4. SEPARACE ODPADŮ A RECYKLACE .....</b>                    | <b>16</b> |
| <b>5. SPALOVÁNÍ – TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ .....</b>         | <b>17</b> |
| 5.1. VÝHODY SPALOVÁNÍ ODPADŮ .....                             | 17        |
| 5.2. ÚSPORA PRIMÁRNÍCH ZDROJŮ ENERGIE .....                    | 18        |
| 5.3. ROZDĚLENÍ WTE ZAŘÍZENÍ .....                              | 19        |
| <b>6. ČÁSTI ZAŘÍZENÍ WTE.....</b>                              | <b>20</b> |
| <b>6.1. TERMICKÝ SYSTÉM .....</b>                              | <b>20</b> |
| 6.1.1. ROŠTOVÁ ČÁST.....                                       | 21        |
| 6.1.2. DOHOŘÍVACÍ ČÁST .....                                   | 22        |
| <b>6.2. SYSTÉM UTILIZACE VZNIKNUTÉHO TEPLA .....</b>           | <b>22</b> |
| 6.2.1. HRSG .....  | 22        |
| 6.2.2. ÚČINNOST KOTLE .....                                    | 23        |
| 6.2.3. PROBLÉM KOROZE.....                                     | 24        |
| 6.2.4. RANKINŮV CYKLUS .....                                   | 26        |
| 6.2.5. MOŽNÉ SYSTÉMY USPOŘÁDÁNÍ TURBIN.....                    | 29        |
| 6.2.6. STUPEŇ VYUŽITÍ ENERGIE .....                            | 31        |
| <b>6.3. SYSTÉM ČIŠTĚNÍ SPALIN.....</b>                         | <b>31</b> |
| 6.3.1. TUHÉ ZNEČIŠŤUJÍCÍ LÁTKY TZL .....                       | 32        |
| 6.3.2. OXIDY DUSÍKU NO <sub>x</sub> .....                      | 33        |
| 6.3.3. SO <sub>2</sub> A HALOGENY: HCL, HF (Kyselý PLYNY)..... | 33        |
| 6.3.4. PLYNNÉ ORGANICKÉ LÁTKY.....                             | 33        |
| <b>7. ENERGETICKÉ TOKY V ZAŘÍZENÍ WTE.....</b>                 | <b>34</b> |
| 7.1. POPIS ALTERNATIV OBSAŽENÝCH VE VÝPOČTOVÉM SYSTÉMU .....   | 34        |
| 7.2. VÝPOČETNÍ MODEL .....                                     | 35        |
| 7.3. BLOKOVÉ SCHÉMA .....                                      | 36        |
| <b>8. ZÁVĚR .....</b>  | <b>38</b> |
| <b>9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                      | <b>39</b> |
| <b>10. SEZNAM PŘÍLOH .....</b>                                 | <b>42</b> |

# 1. ÚVOD

Každodenní procesy lidí jsou spojeny se spotřebou energie a přímou nebo nepřímou produkcí odpadů. Odpad je teda přímým důsledkem ekonomické či jiné aktivity člověka.

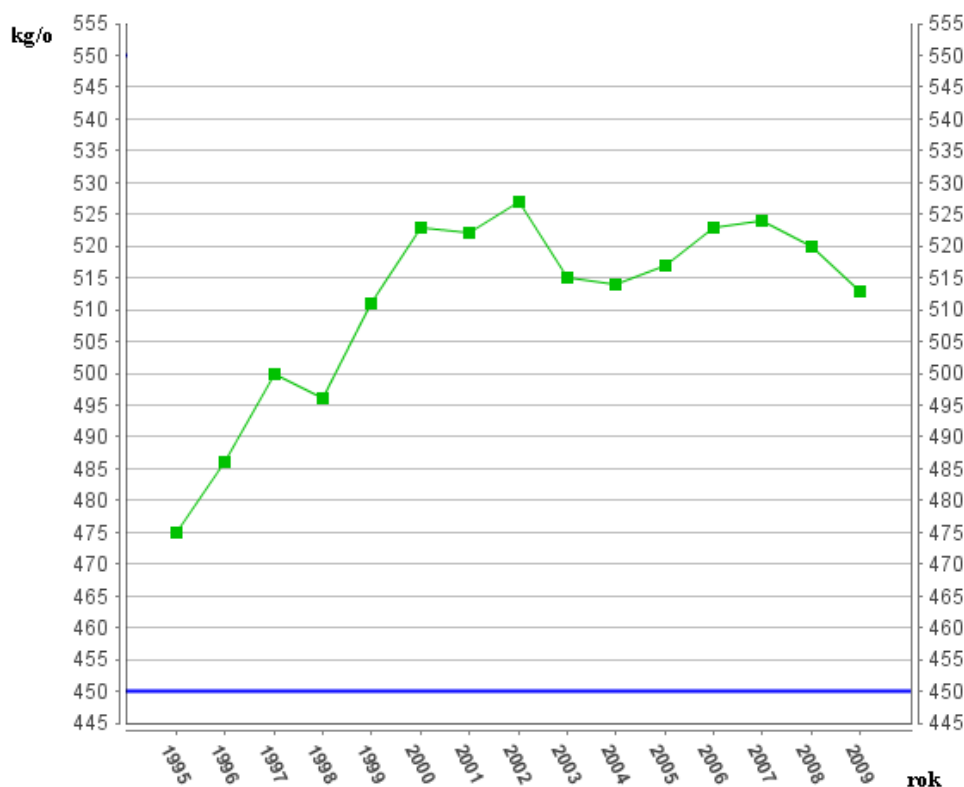
V minulosti byl a částečně stále je hospodářský růst doprovázen zvýšenou produkcí odpadů, což vyplývalo z orientace států a jejich ekonomik na primární a sekundární sektor (zemědělství, hornictví, hutnický či strojařský průmysl). V dnešní době je tato závislost v rozvinutých krajinách podstatně potlačena v důsledku dominance terciárního sektoru produkujícího minimální a zanedbatelné množství odpadu v porovnání se předchozíma dvěma sektory.

Existuje velké množství definic odpadu, přičemž jedna z nich definuje odpad coby jakoukoliv látku či objekt, který vlastník vyřadil nebo plánuje či žádá vyřadit [1].

Když se řekne odpad, spojují se s ním hlavně dva nejčastější problémy:

- přílišná produkce
- nesprávné nakládání a zneškodňování

Navzdory klesající tendenci počtu obyvatel v zemích Evropské Unie (EU), primárně v silně rozvinutých západních zemích, produkce odpadu si zachovává rostoucí tendenci. Tempo růstu je méně strmé, než tomu bylo v minulých letech, jak nasvědčuje graf 1:



Graf 1: Produkce komunálního odpadu v zemích EU za období r. 1995-2009 [2]

Nesprávné nakládání s odpady, charakteristické nedodržováním zákonů, směrnic a technických požadavků může vést k ekologickým katastrofám velkých rozměrů (zamoření země, znečištění zásob podzemní vody atd.), jejichž odstranění by trvalo desítky let.



Je proto víc než potřebné hledat, vyvíjet nové a zlepšovat známé technologie na likvidaci odpadů jako takových a klást důraz na prevenci před jejich tvorbou a efektivnější energetické využití tepla při jejich termickém nebo jiném zpracování.

Právě termický způsob zpracování odpadů s maximální možnou a pro současnost dostupnou formou využití tepla ze spalin uvolněných při spalování patří nepochybně k moderním trendům zvyšujícím efektivitu procesů nakládání s odpady. Nejenže se úspěšně zbavuje nepotřebných odpadů a redukuje významnou formou jejich hmotnost a objem při plnění přísných emisních limitů, ale navíc ještě produkuje energii v požadované formě, čímž nesporně přispívá k udržení „odpadové“ rovnováhy.

## 2. ODPADY

### *2.1. Vývoj k modernímu odpadovému hospodářství*

Historie vzniku odpadů sahá až k počátkům lidstva samotného. Lidé se od nepaměti seskupovali, vyvíjeli a svými činy produkovali odpady, vědomě nebo nevědomě. V prvopočátcích odpad produkovaný člověkem byl podobný odpadu, který se vyskytoval v přírodním ekosystému. Tento byl v rámci přirozeného koloběhu živin biologicky rozložitelný. [3]. V průběhu času s přibývajícím počtem lidí zdržujících se v různých společenstvích narůstala jak produkce, tak i diverzita odpadů. Města i vesnice bez potřebné infrastruktury (kanalizace nebo místa na shromažďování odpadu) nebyly na podobnou situaci připravené. Městské ulice byly pokryté odpadem, který byl tvořený zejména odpadem z domácností, lidských a zvířecích výkalů a stojatou vodou [3].

Tento fakt spolu s ubohou hygienou tehdejšího obyvatelstva vedl ve 14. století v Evropě k moru zvanému též „černá smrt“, který vyhubil více než čtvrtinu tehdejší populace.

Následně si lidé uvědomili důležitost a nutnost řešení otázky odpadů. Dosud nevídaný jev, úklid odpadů mimo prostor lidských obydlí a jeho shromažďování na odlehlá místa, se stával stále častějším. Koncem 18. století se objevili v ulicích Londýna první jednoduché nádoby na sběr odpadu. Jak nádoby, tak i systém přepravy a následného uskladňování odpadů se stávaly stále důmyslnějšími přesto finální forma řešení zůstávala neměnná: skládkování.

Začátkem 19. století, když už kapacity skládek nepostačovaly kladeným požadavkům, se objevuje poprvé alternativní forma nakládání s odpady – spalování.

První spalovna odpadů jako samostatná stavba byla postavená v Anglii roku 1870. Do začátku nového století bylo následně postaveno okolo 200 spaloven [4].

Nový trend nakládání s odpady se šířil z Anglie napříč celou Evropou, v čele s další tehdejší hospodářskou velmocí Německem.

První spalovna na území České Republiky fungovala od roku 1905 v Brně až do roku 1941 kdy byla zničena během 2. světové války.

S prvními spalovnami však přišly také první problémy. Nedostatečná hořlavost paliva, nálepy v kotli, tuhé zbytky z procesů nebo vypouštění spalin obsahující emise představující v první řadě riziko pro zdraví člověka a nepříjemný zápach v okolí bez předchozího čištění byly primárními důvody rostoucího negativního mínění tehdejšího obyvatelstva o spalovnách.

V dnešní době se od pojmenování spalování odpadů upouští a přechází se k vystižnějšímu termínu: energetické využití odpadů (EVO). Chod zařízení EVO je plynulý. EVO produkuje energii. EVO je bezpečné. EVO zahrnuje výkonný systém čištění spalin. EVO se řídí legislativou. Navzdory tomuto faktu u mnohých lidí přetrvávají předsudky vůči tomuto

způsobu nakládání s odpady, které se z uvedených důvodů táhnou z minulosti, avšak v dnešní době jsou neopodstatněné.

Až o století později, začátkem 20. století přichází na scénu nejdříve v Americe, o něco později i v Evropě pravděpodobně nejekologičtější způsob nakládání s odpady recyklace. Opětovné využívání vyseparovaného materiálu (odpadu), sloužícího k vytváření nových produktů vede k úspoře materiálu, šetření životního prostředí v důsledku nulových spalin nebo odpadních vod, úspoře energie a výrobních nákladů. To jsou hlavní výhody, které vedly k rychlému zpopularizování a masovému zavádění recyklace hlavně v náročnou dobu, jakou byla doba velké hospodářské krize od r. 1929 nepochybně byla.

Pro dnešní dobu, charakterizovanou snahou zefektivnit každý proces za účelem snížit náklady, cenu a míru ekologického zatížení, nakládání s odpady nevynímaje, je v EU zákonem stanovená hierarchie nakládání s odpady [1]:

- a) předcházení vzniku
- b) příprava k opětovnému použití
- c) recyklace
- d) jiné využití, například energetické využití a
- e) odstranění

Z hierarchie jasně vyplývá, že primární cíl odpadové politiky není zefektivnit způsob jejich využívání, ale předejít samotné tvorbě, jelikož platí známé: odpad, který není vytvořen, nemusí být zneškodňován.

## ***2.2. Rozdělení, složení a vlastnosti odpadů***

Odpad je velice různorodá, nehomogenní směs skládající se z mnoha druhů materiálů: kovů, plastů, skla, papíru atd.

Proto existuje vícero kritérií, dle kterých odpad rozdělujeme do jednotlivých skupin. V této práci jsou uvedena tři kritéria, které jsou relevantní z pohledu zaměření práce:

- ❖ dle základních fyzikálních vlastností [5]
  - pevné
  - plynné
  - kapalné
  - směsné
- ❖ dle základních oborů hospodářské činnosti [5]
  - výrobní – průmyslový, zemědělský, stavební...
  - spotřební – komunální odpad (KO)
- ❖ dle vlivu na člověka a okolní prostředí [5]
  - nebezpečný
  - ostatní.

Složení odpadů, jak již bylo zmíněno, je velmi různorodé a závisí na mnoha faktorech, z kterých nejdůležitější je umístění oblasti sběru odpadu. Ve velkých aglomeracích bude převládat odpad spotřební – KO, v průmyslových parcích zase výrobní – průmyslový.

Jelikož práce pojednává hlavně o EVO, které se pojí převážně se spalováním KO, bude uveden příklad základního složení odpadů vstupujících do spalovny. V tomto konkrétním případě se jedná o spalovnu Termizo Liberec a.s.:

| Katal. Číslo | Název                         | Množství (tuny) |
|--------------|-------------------------------|-----------------|
| 040209       | Kompozitní tkaniny            | 911             |
| 040222       | Odpady textilních vláken      | 274             |
| 070213       | Plastový odpad                | 4091            |
| 150101       | Papírové a lepenkové obaly    | 561             |
| 150106       | Směsné obaly                  | 2620            |
| 160119       | Plasty                        | 386             |
| 170201       | Dřevo                         | 328             |
| 191212       | Odpady z mechanické úpravy    | 1836            |
| 200108       | Biologicky rozložitelný odpad | 254             |
| 200301       | Směsný komunální odpad        | 78657           |
| 200307       | Objemný odpad                 | 5617            |

Tab. 1: Bilance dominantních druhů odpadů v roce 2010 [6]

Z tab. 1 jasně vyplývá, že dominantní postavení v spalovnách KO má logicky KO. Jiné druhy odpadů, např. nebezpečný odpad, se spalují v zařízeních speciálně upravených pro potřeby likvidace konkrétního druhu odpadu, protože takový odpad má specifické vlastnosti (výhřevnost, spaliny, emise atd.) a také platná legislativa se mění v závislosti na typu spalovaného odpadu. Konkrétním příkladem je vyžadována teplota spalin za posledním přívodem tepla u spaloven nebezpečného odpadu, která je přibližně o 300°C vyšší, než je tomu o odpadu běžného (konkrétní hodnoty budou uvedeny později).

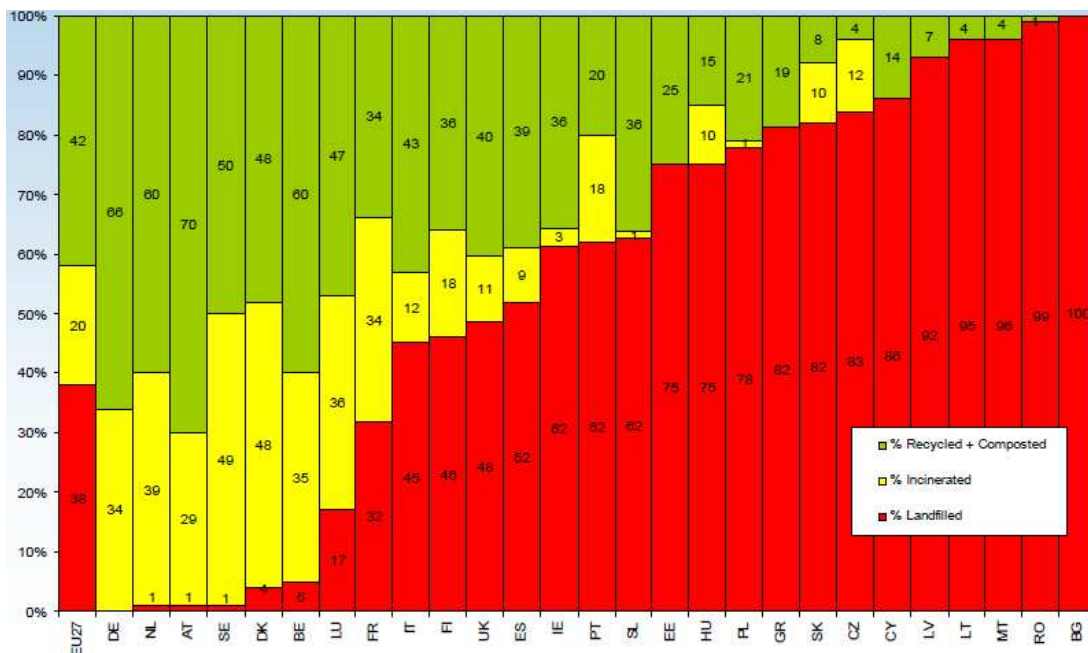
Odpad coby vysoce nehomogenní směs má také rozdílnou výhřevnost (LHV – low heating value) v závislosti na svém složení. LHV je jedním ze zásadních faktorů který je u odpadů sledován. Kvůli povaze odpadů se dá určit jenom zpětně výpočtem z výrobních ukazatelů v konkrétním zařízení. V tab. 2 jsou uvedené minimální, průměrné i maximální hodnoty LHV komunálních odpadů určené v EU ale také v ČR:

| Výhřevnost odpadů pro zařízení v ČR [GJ/t] |      |        |
|--|------|--------|
| Min.                                       | Max. | Průměr |
| 7,1  | 15   | 10,9   |
| Výhřevnost odpadů pro zařízení v EU [GJ/t] |      |        |
| Min.                                       | Max. | Průměr |
| 7,3  | 16,7 | 10,3   |

Tab. 2: Hodnoty LHV v EU a ČR [7]

### 3. SKLÁDKOVÁNÍ

Skládkování, jak již bylo uvedeno a naznačeno v kapitole 2.1, je nestarší, nejjednodušší a nejlevnější metoda nakládání s odpady. Dle grafu 2 je zřejmé, že navzdory snahám EU tento typ zneškodňování odpadů eliminovat v co nejvyšší možné míře a nahradit ho přijatelnějšími způsoby, jako je recyklace či EVO, patří i v 21. století skládkování stále k nejčastějšímu způsobu nakládání s odpady. Procento skládkování se v průměru blíží číslu 70%, které je výrazně vyšší hlavně u méně rozvinutých zemí.



Graf 2: Nakládání s odpady v EU v roce 2009 [8]

Pozn.: recycled + composted – zrecyklované + zkompostované  
 incinerated – spálené  
 landfilled - skládkované

#### Dělení skládkování:

Skládkování je možné rozdělit dle kritéria organizace místa skládkování:

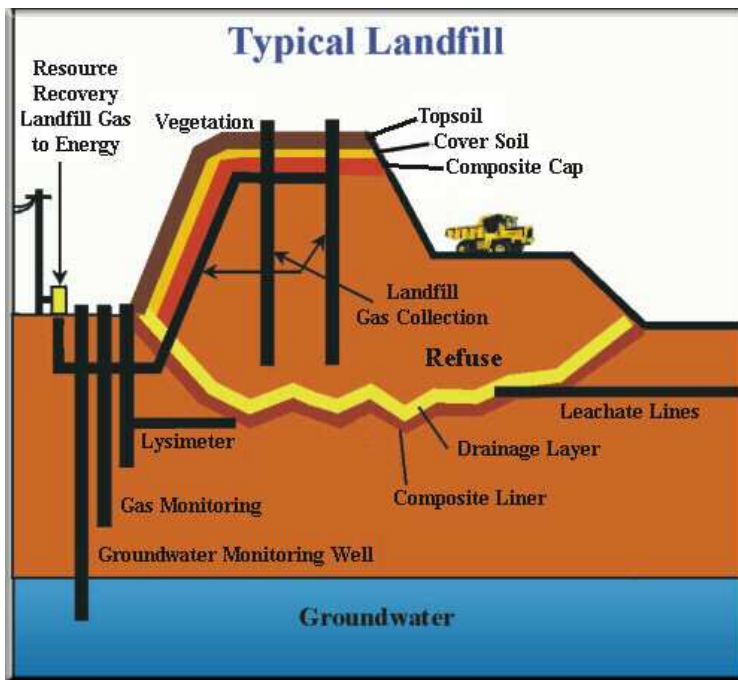
##### 1. neorganizované skládkování

Neorganizované skládkování znamená, že po umístění odpadu na konečné místo (většinou opuštěné lomy, doly, bažinaté prostranství atd.) se tento sype na hromadu bez překrývání. Častým jevem při neorganizovaném skládkování jsou tzv. černé skládky odpadu, které znamenají shromažďování odpadu na místě bez právního povolení. Hlavně výskyt černých skládek je nebezpečí pro okolní prostředí, kde bez jakékoliv formy regulace může nastat únik škodlivých látek do půdy nebo podzemních vod.

##### 2. řízené skládkování

Jedná se o klasický, známý způsob skládkování, přičemž schéma klasické skládky je uvedeno na obr 1. Odpad je koncentrován na předem určené a vhodně lokalizovaném místě (mimo lidské obydlí, mimo centrum města atd.), kde je ukládán po vrstvách, silných většinou 30 až 50cm. Vrstvy, odpad a izolační zemina, se postupně nanášejí a upravují, až do naplnění kapacity skládky. Pak je provozovatel povinen skládku pečlivě uzavřít, zabránit úniku škodlivých látek do půdy a vody. Finálním krokem je rekultivace skládky, která představuje její začlenění do okolní krajiny. Rekultivace se provádí dominantně výsadbou trávy pro

estetické účely. Výsadba dřevin je vyloučena, protože existuje velká pravděpodobnost porušení funkčnosti povrchové izolace skládky kořenovým systémem stromů. Aby skládka splňovala přísné hygienické limity, které jsou na ni kladeny, musí být na skládce přítomny různé monitorovací zařízení, které kontrolují dodržování těchto limitů. Jedná se především o monitoring podzemní vody, půdy a plynu, který se v skládce vytváří. Jedná se o tzv. skládkový plyn (LFG – landfill gas).



Pozn.:  
 typical landfill – typická skládka  
 resource recovery landfill gas to energy – zdroj získávání energie ze skládkového plynu  
 vegetation – vegetace  
 cover soil – krycí vrstva země  
 topsoil – ornice (vrchná vrstva)  
 composite cap – kompozitní víko  
 landfilling gas collection – sběrnice skládkového plynu  
 leachate lines – filtrační trubky  
 drainage layer – odvodňovací vrstva  
 composite liner – směšící obálka  
 groundwater – podzemní voda  
 groundwater monitoring well – pramen monitorující podzemní vodu  
 gas monitoring – monitoring plynu  
 lysimeter – lysimetr (zařízení na měření evapotranspirace\*)  
 refuse – odpad

Obr. 1: Schéma řízení skládky [9]

LFG se tvoří samovolně při anaerobním rozkladu odpadů a představuje potenciální zdroj energie. Jeho kvalita (koncentrace metanu) se mění na základě přítomného odpadu v skládce. V případě vhodné kvality, je plyn spalován a využíván ve formě tepla anebo elektřiny.

V současnosti musí být skládka vybavena odplyňovacím zařízením skládky z důvodu bezpečnosti, jelikož ponechání plynu ve skládce může vést opět k porušení funkčnosti izolační bariéry na povrchu skládky.

Existují dvě základní možnosti odstraňování LFG ze skládky:

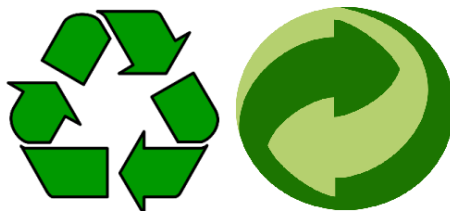
- pasivní: plyn se odstraňuje samovolně na základě jeho přetlaku vůči atmosféře
- aktivní: na odsávání se aktivně podílí zařízení, např. dmychadlo

Navzdory rychlosti a jednoduchosti procesu, by mělo skládkování v každé zemi stát až na posledním místě v řebříčku možností nakládání s odpady, protože samotný rozklad trvá velmi dlouhou dobu a představuje konstantní riziko pro životní prostředí.

\* evapotranspirace slouží k určení srážek spadlých na území a následných ztrát skrz půdu

## 4. SEPARACE ODPADŮ A RECYKLACE

Recyklace odpadů představuje nejprogresivnější cestu nakládání s odpady a v hierarchii nakládání s odpady je před termickým zpracováním a pochopitelně i před skládkováním. Jedná se vlastně o proces návratu druhotných surovin do oběhu neboli jeho opětovné použití, jak také naznačuje celosvětově užívaný a známý symbol recyklace, uvedený na obrázku č. 2, který je tvořený šipkami, naznačujícími koloběh procesu, který recyklace představuje.



Obr. 2: Symbol recyklace (dvě nejznámější alternativy) [10]

Samotné recyklaci musí předcházet důležitá činnost, která také určuje celkovou účinnost procesu recyklace: příprava k opětovnému použití neboli třídění odpadu. Aby mohly být některé vhodné složky KO zrecyklovány, musí být nejdříve odděleny od složek pro recyklaci nevhodných a nepoužitelných. Tento proces nejenže předchází samotné recyklaci, ale má i mnoho dalších výhod, pro které se uplatňuje nejen v procesech recyklace. Mezi hlavní výhody patří:

- zmenšení měrného objemu určeného ke skládkování či spalování
- zvýšení efektivity využití odpadů jak z hlediska ekonomického, tak i ekologického
- předúprava odpadů pro finální technologie

Při třídění se ze směsného KO extrahují hlavně složky, které je možno efektivně recyklovat a následně efektivně uplatnit na trhu. Jedná se především kovy, u kterých s následným odbytem nebývá problém, následují papír, sklo, plasty nebo textil. Otázka recyklace plastů je však diskutabilní záležitost, jelikož na rozdíl od kovů bývá u plastů problém co s vytríděným plastem. Naskytuje se možnost spalování, kde plasty mají vysokou výhřevnost, avšak při jejich spalování vzniká celá řada škodlivých plynů, které zvyšují požadavky na systém čištění spalin v zařízeních EVO. Je proto třeba hledat vždy rozumný kompromis a zvážit všechna pro a proti a až následně se rozhodnout pro danou alternativu.

Samotné třídící procesy je možno rozdělit dle technologie na suché a mokré, přičemž nejznámější představitelé jednotlivých technologií nám ukazuje tab. 3:

| Suché                      | Mokré*                     |
|----------------------------|----------------------------|
| drcení a předdrcení        | sedimentace a hydrocyklony |
| drcení na roštech a sítích | odstřeďování               |
| vzduchové třídění          | unášení                    |
| balistické třídění         | mokré síta                 |
| magnetické třídění         | fluidizace                 |

Tab. 3: Rozdělení technologií třídění odpadů [11]

\* ve většině případů se jedná o jednu částečnou technologii v jinak „suchém“ procesu

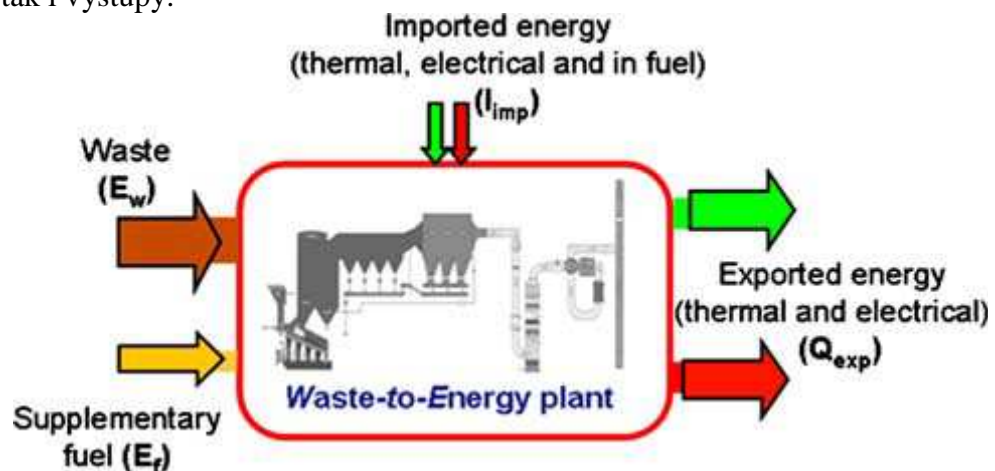
Teprve po důkladném roztrídění jednotlivých druhů je možno přistoupit k samotnému „znovupoužití“ odpadů. Na jaké účely a jakou formou bude odpad využit záleží jen na samotném druhu odpadu a použité technologii.

Již byly uvedeny nejdůležitější výhody aplikace třídění a následné recyklace odpadů, avšak negativem doposud zůstává pole působnosti této technologie, které je omezené. Ne všechny odpady se dají recyklovat (nebezpečné, nemocniční atd.), ne u všech se to ekonomicky vyplatí. V mnoha případech jsou zrecyklované výrobky dražší než nové.

Navzdory negativům, recyklace stále z mnoha hledisek zůstává nejvhodnějším a nejpříjemnějším způsobem nakládání s odpady.

## 5. SPALOVÁNÍ – TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ

Pojmem EVO se rozumí spalování odpadů v zařízeních k tomu určených, s tím, že energie uvolněná při procesu se transformuje v co největší možné míře do finálních produktů: tepla a elektřiny. Získání těchto výstupů předchází fáze vkládání vstupů do celého procesu spalování. Vedle odpadů coby elementárního vstupu jsou to ještě doplňkové palivo, většinou ve formě fosilních paliv, importovaná elektrická energie a teplo (moderní zařízení jsou schopná si většinu množství dvou posledně uvedených složek zajistit samy ze získané energie při spalování). Na obr. 3 je graficky znázorněn proces spalování odpadů, jak jeho vstupy, tak i výstupy.



Obr. 3: Grafické znázornění procesu EVO [13]

Od v minulosti užívaného termínu spalovny resp. spalování se upouští. Jak se v průběhu času měnilo strojní a technologické vybavení těchto zařízení začalo se používat nové, výstižnější pojmenování – WTE zařízení resp. energetické využití odpadů navzdory tomu, že primární cíl zůstal zachován: zpracování odpadů.

Plnění přísných emisních limitů s určitou rezervou podobně jako dosažení určitého zákonem stanoveného [1] stupně využití uvolněné energie je u těchto moderních zařízení samozřejmostí.

### 5.1. Výhody spalování odpadů

EVO má oproti předcházejícím dvou způsobům několik výhod, které ho řadí v řebříčku preferovaných způsobů nakládání s odpady takřka na vrchol:

- + rychlost zpracování (při skládkování trvá rozklad několik desítek let)
- + možnost zpracovávat extrémně nebezpečný odpad (nemocniční apod.)
- + možnost nastavování čistoty spalin či tuhých zbytků z procesu spalování

- + energie v podobě tepla spalin, kterou možno efektivně využít (el. energie, teplo)
- + úspora primárních energetických zdrojů (viz kapitola 5.3)

WTE zařízení mohou tedy být považovány za určitý „recyklátor“ energie z odpadů. Jedná se o energii, které byla vynaložená při výrobě konkrétního výrobku. Tento fakt znamená, že spalování nám nejen snižuje objem zpracovávaného odpadu, což je primární účel, ale rovněž nám při zachování přísných emisních limitů poskytuje i spolehlivý, čistý a poměrně levný zdroj energie bez vytvoření eventuelního rizika pro životní prostředí, čímž prospívá k úspoře primárních zdrojů.

Organizace CEWEP (Confederation of European Waste-to-Energy Plants) sdružující víc než 390 WTE zařízení a spaloven ze 17 zemí Evropy a 1 z USA uvádí, že za rok 2008 zůstalo po prevenci, opětovném použití a recyklaci cca 69 milionů tun odpadu (víc než 58 mil. tun bylo zpracováno právě v CEWEP zařízeních), co představuje 28 miliard kWh elektrické energie plus 69 miliard kWh tepla a úsporu 7-38 milionů tun fosilních paliv (zemní plyn, ropa, černé a hnědé uhlí), které představují 19-37 mil. tun CO<sub>2</sub>. Vyprodukovaná elektrická energie je ekvivalentní ročnímu pokrytí potřeb zemí Dánska, Finska a Slovinska a vyprodukované teplo ekvivalentní potřebám Estonska, Finska a Slovenska [13].

## 5.2. Úspora primárních zdrojů energie

Dominantní úlohou WTE zařízení je odstranění odpadů. Fakt, že přispívají nemalou mírou k úspoře primárních energetických zdrojů dělá postavení WTE zařízení ještě důležitějším. Hlavně v kontextu aktuální celosvětové situace s primárními zdroji, kterých zásoby se každým dnem ztenčují a ceny naopak rostou.

Pro systém kombinované (kogenerační) výroby elektřiny a tepla (více viz kapitola 5.4) patřící do seznamu kogeneračních technologií uvedených v [14] existuje vzorec přinášející výpočet měrných úspor primárních zdrojů:

$$PES = \left( 1 - \frac{1}{\frac{CHP.H\eta}{Ref.H\eta} + \frac{CHP.E\eta}{Ref.E\eta}} \right) \times 100\% \quad [14]$$

Kde:

PES jsou úspory primárních zdrojů energie

CHP.H $\eta$  je účinnost kogenerační výroby tepla, definována jako roční produkce užitečného tepla podělená množstvím paliva spotřebovaným pro výrobu celkového množství užitečného tepla a elektrické energie v procesu kogenerace

Ref.H $\eta$  je referenční účinnost pro oddělenou výrobu tepla

CHP.E $\eta$  je účinnost kogenerační výroby elektřiny definována jako roční elektrická energie z kogenerace podělená množstvím paliva spotřebovaným pro výrobu užitečného tepla a elektrické energie v procesu kogenerace

Ref.E $\eta$  je referenční účinnost pro oddělenou výrobu elektřiny

Graf poskytující reální představu o úsporách pro referenční hodnoty Ref.H $\eta$  = 90% a Ref.E $\eta$  = 33% je uveden v [15].

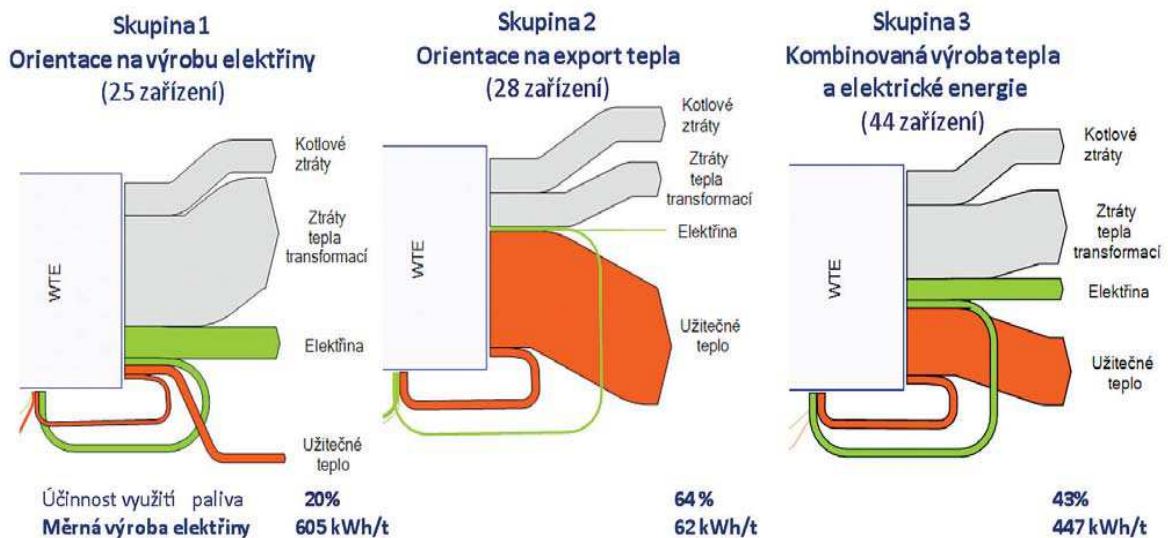


### 5.3. Rozdělení WTE zařízení

Zařízení WTE je možné rozdělit na základě způsobu využití uvolněné energie na 3 hlavní druhy:

1. orientované na výrobu tepla
2. orientované na výrobu elektrické energie
3. s kombinovanou výrobou

Hraniční podmínkou je, že výroba minoritní formy energie nepřesáhne 5 % celkové produkce energie (orientace na teplo – produkce el. energie nepřesáhne 5 % celkové produkce), ostatní zařízení spadají do kombinované výroby. Průměrná účinnost jednotlivých zařízení jako i grafické znázornění hlavních energetických toků je uvedeno v obr. 4.



Obr. 4: Účinnosti a energetické toky v jednotlivých WTE zařízeních [16]

Největší účinnost je logicky u zařízení orientovaných na výrobu tepla, což vyplývá z minimální potřeby transformace tepla oproti výrobě elektrické energie.

V současnosti je vyvíjeno velké úsilí o zvýšení účinnosti zařízení orientujících se na výrobu elektřiny coby hodnotnější formy energie jejíž odběr (na rozdíl od tepla) je v průběhu roku stabilnější a hlavně zaručen ve větší míře. Tyto by měly zvýšit svou účinnost ze současných v průměru 20 % na hodnotu kolem 30 %.

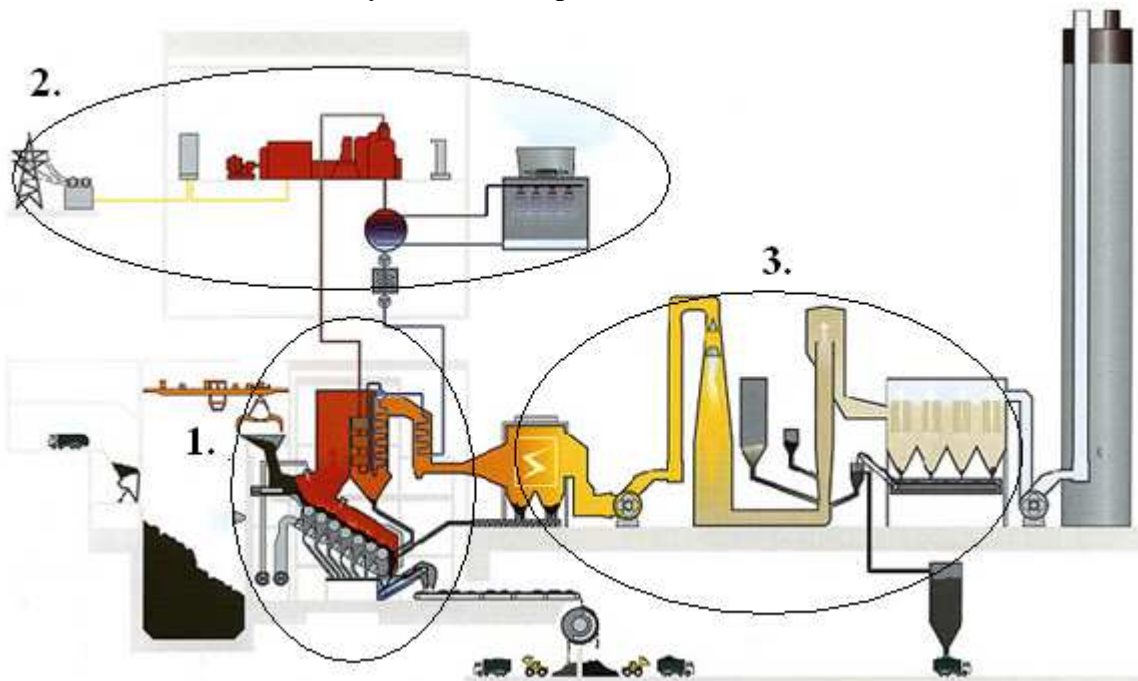
Pro zajímavost, v odborných kruzích se začíná debatovat o další vývojové fázi WTE zařízení s dominantní orientací na výrobu elektrické energie a to elektrárny s pohonem na odpad – Waste Fired Power Plants (WFPP).

Dokud se však nezvýší účinnost, což může trvat od několika až o desítky let, zůstává nadále preferovaným způsobem kombinovaná výroba tepla a elektrické energie (kogenerace). Kogenerace ve své podstatě znamená kombinovanou výrobu tepla a elektřiny v smyslu dalšího použití tepla ve formě páry na výstupu z turbíny k ohřevu dalšího média, vody např., nebo rovnou k distribuci k odběratelům. V případě, že část vyprodukované páry se odvádí na užití ve formě tepla a zbylá část putuje na turbínu za účelem produkce elektřiny, jedná se sice o současnou výrobu, nejedná se však o výrobu kogenerační a kogeneraci jako takou.

## 6. ČÁSTI ZAŘÍZENÍ WTE

V každém WTE zařízení nezávisle na zaměření či složitosti jednotlivých technologií je možné rozeznat tři základní, na sebe navazující a úzce propojené systémy (obr. 5):

1. termický systém
2. systém utilizace vzniknutého tepla
3. systém čištění spalin



Obr. 5: Členění WTE zařízení

Všechny procesy v jednotkách WTE jsou kontinuální a pracují bez přerušení. Odpad nejprve podstoupí tepelný rozklad v termické části. Následuje využití uvolněného tepla v subsystému 2 a čištění spalin v subsystému 3. Číselné označení není zcela přesné, protože z pohledu toku energie a hmotnosti mohou děje v 2 a 3 probíhat do jisté míry paralelně.

Porovnávat důležitost jednotlivých systémů je zcela zbytečné, jelikož každý má v procese termického zpracování odpadů svou nenahraditelnou roli. Navzdory tomuto faktu, největší debaty v odborných kruzích vytváří systém utilizace tepla, ve kterém jsou veliké rezervy, co se účinnosti týče. Pro laickou veřejnost je naopak asi nejvíce probíraným faktem systém čištění spalin. Spaliny neodmyslitelně patří ke spalovnám a vytvářejí často u neznalé veřejnosti neopodstatněné obavy o bezpečnost jejich zdraví či okolního životního prostředí. Faktem však je, že limity pro emise u WTE zařízení jsou jedny z nejpřísnějších a kvalita vypouštěných spalin resp. dodržování emisních limitů je přísně střeženo (více kapitola 6.3.).

### 6.1. Termický systém

Termickým systémem celý proces termického spalování odpadů začíná. Systém možno rozdělit na dvě hlavní části: roštová, kde probíhá základní spalování a dohořivací (secondary combustion chamber – SCC) část.

### 6.1.1. Roštová část

Odpady jsou dopravovány do spalovny a ukládány do zásobníku neboli bunkru. V něm dochází pomocí jeřábu resp. drtičů k promíchávání za účelem co největší homogenizace odpadu resp. drcení. Následně je odpad podáván pomocí speciálně vybavených podavačů nebo jeřábů do násypky odkud je následně dopravován na pohyblivý rošt, kde probíhá samotné spalování.

Pohyblivý rošt neboli roštové ohniště je nejpoužívanější zařízení na spalování zejména směsného komunálního odpadu. Jeho konstrukce je speciálně upravena tak, aby umožnila přístup vzduchu k hořícímu odpadu. Další zařízení jsou např. rotační pece nebo fluidní lože, které se však využívají zřídka a slouží většinou k spalování speciálních odpadů, jako např. čistírenské kaly, nebezpečný a nemocniční odpad a jiné. Jednotlivé druhy spolu s jejich kapacitou názorně ukazuje tab. 4:

| Technologie                                  | Typický rozsah uplatnění (t/den) |
|--|----------------------------------|
| Pohyblivý rošt                               | 120 - 720                        |
| Fluidní lože                                 | 36 - 200                         |
| Rotační pec                                  | 10 - 350                         |
| Modulární (s nedostatečným přívodem vzduchu) | 1 - 75                           |
| Pyrolýza                                     | 10 - 100                         |
| Zplyňování                                   | 250 - 500                        |

Tab. 4: Základní technologie spalování a jejich kapacita [17]

Hoření je vlastně oxidační proces, ve kterém dochází ke spalování organických látek v odpadu. Tyto budou hořet, pokud je dostatečná teplota vznícení a je v okolí výskyt kyslíku. Při dostatečné teplotě a přísunu vzduchu může dojít k řetězové reakci a autotermínu režimu, což znamená, že není zapotřebí pomocného paliva. Zapálení odpadu je prováděno většinou pomocí zemního plynu.

Samotný proces spalování se skládá s dílčích procesů, které možno rozdělit na 3 základní stupně:

- sušení a odplynění: změna těkavého obsahu (uhlovodíky, voda), v rozmezí teplot 100 až 300 °C
- pyrolýza a zplyňování: pyrolýza je rozklad organických látek za nepřítomnosti vzduchu v rozmezí teplot 250 až 700 °C, zplyňování se týká především uhlíkatých zbytků, které se mění své skupenství na plynné za teplot 500 až 1000 °C
- oxidace: oxidace plynů vzniklých v předcházejících dvou stupních za teplot 800 až 1450 °C

Jednotlivé stupně se obecně překrývají, což znamená, že prostorové a časové oddělení těchto stupňů během spalování odpadů je možné pouze v omezeném rozsahu.

Samozřejmě procesy částečně probíhají paralelně a navzájem se ovlivňují [17].

V roštové části obecně vznikají jak pevné, tak hlavně plynné produkty spalování.

U pevných produktů je vyžadováno, aby celkový uhlíkový nedopal byl menší jak 3 %, nebo ztráty žíháním byly menší než 5 % suché váhy materiálu [18]. Pevné produkty: škvára a popílek, se po opuštění roštu zpravidla chladí ve vodní lázni. Následně jsou z nich pomocí speciálních zařízení, většinou elektromagnetů, odděleny kovy, které jsou znovu využitelné v hutích. Zbylou škváru a po několika dalších úpravách také popílek je možno využít ke stavebním účelům, např. rekultivace krajiny nebo podsypy při budování cest.

Plynné produkty, spaliny, směřují k dohořívající části termického systému WTE zařízení, do SCC.

### 6.1.2. Dohořívací část

V SCC probíhá finální fáze procesu spalování a dochází zde k rozkladu i těch nejstabilnějších komponent odpadu. Ze zákona [18] je vyžadována minimální teplota spalin po dobu 2 vteřin po posledním přívodu vzduchu i za těch nejnevhodnějších podmínek. Jednotlivé teploty se liší druhem spalovaného odpadu, jak ukazuje tab. 5:

| Typ odpadu  | Požadovaná min. teplota [°C] |
|---|------------------------------|
| Nebezpečný odpad (obsah halogenových organických látek, jako např. chlor, vyšší než 1%) | 1100                         |
| Ostatní odpady  | 850                          |

Tab. 5: Hodnoty minimálních požadovaných teplot v závislosti na druhu odpadu

Není-li požadovaná hodnota dosažena samotným spalováním odpadu (méně častá situace), je potřeba pro dosažení potřebné teploty přidat sekundární palivo ve formě fosilních paliv. Dohořívací částí je termický systém ukončen a následuje systém využití tepla.

## 6.2. Systém utilizace vzniknutého tepla

Využití tepla ve formě spalin a případná proměna na stabilnější a žádanější formu energie – elektřinu, jsou témata, která vytvářejí nejvíce diskuzí a otázek v odborných kruzích.

Prvním krokem v systému využití tepla je kotel na odpadní teplo, kde se produkuje pára (Heat Recovery Steam Generator – HRSG).

### 6.2.1. HRSG

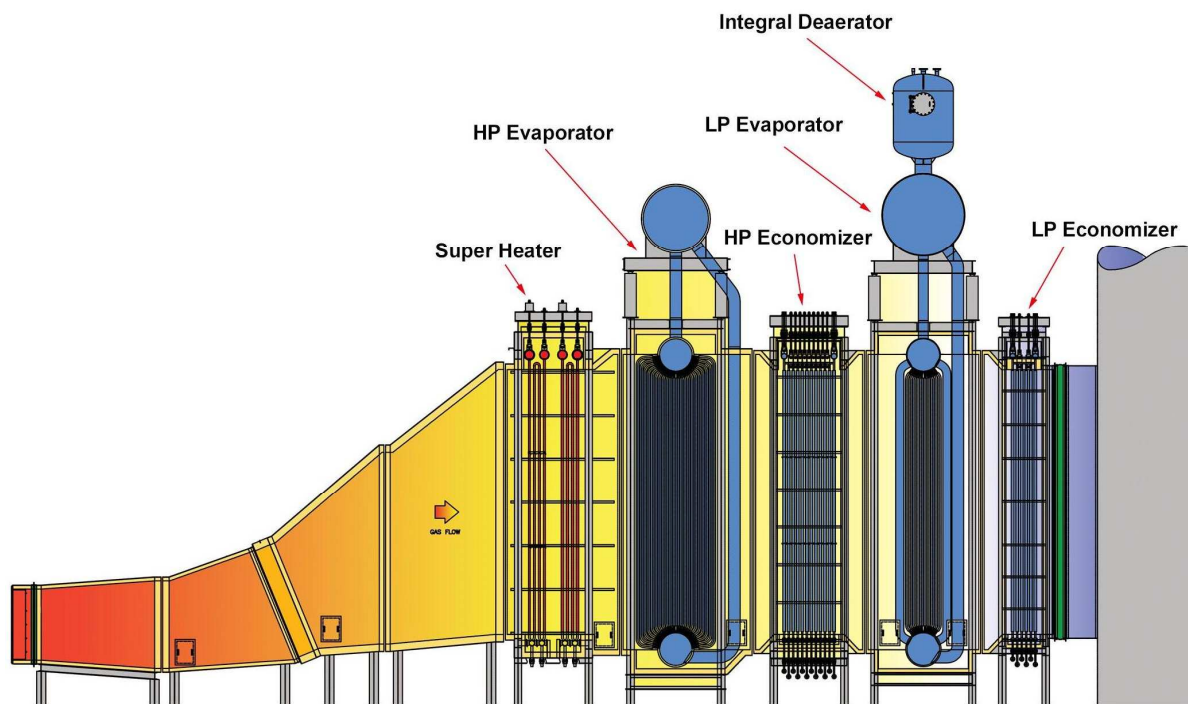
Spaliny po opuštění SCC jsou vedeny právě do výměníku tepla, HRSG, kde odevzdávají teplo předem předehřáté vodě a transformují jí v páru.

Možnost konstrukce HRSG je různá (obr. 6), každé zařízení však obsahuje 3 základní části:

- výparník (evaporator):  
V něm se přivedená předem předehřátá voda mění na sytou páru.
- přehřívák (superheater):  
Slouží k přehřívání syté páry na přehřátou.
- ekonomizér (economizer):  
Zajišťuje předehřev napájecí vody.

Požadované parametry páry, tlak a teplota, se finálně upravují přehřívákem. Nejběžnější parametry tlaku jsou 4 až 4,5 MPa a teplota kolem 380 až 420 °C.

Při použití parametrů 6 MPa a 620 °C se vyskytují problémy s vysokoteplotní korozí na svazcích přehříváku, co vyžaduje použití speciálních materiálů – austenitických superslitin (více v kapitole 6.2.3).



Obr. 6: Popis základních částí HRSR [19]

|        |                    |                            |
|--------|--------------------|----------------------------|
| Pozn.: | Super Heater       | - přehřívák                |
|        | HP Evaporator      | - nízkotlaký odpařovák     |
|        | Integral Deaerator | - integrovaný odvzdušňovač |
|        | LP Evaporator      | - nízkotlaký odpařovák     |
|        | HP Economizer      | - vysokotlaký ekonomizér   |
|        | LP Economizer      | - nízkotlaký ekonomizér    |
|        | Směr tlusté šipky  | - směr proudění spalin     |

Spaliny, které na vstupu měly teplotu 800 až 1000 °C na výstupu mají jenom kolem 200 až 300 °C, v závislosti na účinnosti kotle. Ochlazené spaliny pak postupují k dalšímu stupni WTE zařízení: systém čištění spalin, případně část z nich se recykluje zpátky do spalovací komory nebo slouží k ohřevu sekundárního vzduchu.

### 6.2.2. Účinnost kotle

Teoretická účinnost kotle vyjadřuje podíl tepla, které je na vstupu (množství a výhřevnost odpadu) a tepla, které bylo užito při produkci páry. Počítá se obdobně jako u výhřevnosti zpětně na základě hodnot faktorů, které ji ovlivňují. Rozdíl mezi teplem na vstupu a na výstupu jsou ztráty, které je snaha co nejvíc minimalizovat a tím zvýšit účinnost kotle. Průměrná hodnota účinností kotlů se v současnosti pohybuje kolem 75 až 80 %, přičemž se vyskytují také vyšší hodnoty dosahující kolem 85 %.

Tab. 6 nám ukazuje nejčastější příčiny ztrát spolu s procentuálním podílem, jakým se jednotlivé složky ztrát podílejí na ztrátě celkové.

| Druhy tepelných ztrát                | Velikost ztrát [%] |
|--------------------------------------|--------------------|
| Ztráta mechanickým nedopalem         | 2-3                |
| Ztráta citelným teplem tuhých zbytků | 1-2                |
| Ztráta chemickým nedopalem           | 0,0 - 0,03         |
| Ztráta sdílením tepla do okolí       | 0,8 - 1,5          |
| Ztráta citelným teplem spalin        | 7-25               |

Tab. 6: Procentuální podíl jednotlivých druhů tepelných ztrát [7]

Ztráta mechanickým nedopalem představuje neúplné vyhoření uhlíku C, ke kterému dochází kvůli nedostatečnému vyhoření odpadu na spalovacím roštu. Jak již bylo uvedeno, dle platné legislativy, koncentrace uhlíku po procesu spalování musí být menší než 3% anebo ztráty žháním menší než 5 %.

Pod citelným teplem tuhých zbytků se rozumí teplo tuhých produktů spalování, jako jsou škvára, popílek či struska. Toto teplo je nezužítkovatelné a také zanedbatelně malé.

Další dva druhy tepelných ztrát jsou v porovnání s předchozími ještě o řád menší a tedy velikostně bezvýznamné. Jedná se o chemický nedopal neboli nedokonalé hoření uhlíku, které produkuje jedovatý plyn CO. Právě koncentrace CO ve spalinách je omezena emisními limity. Vznik je připisován nedostatečnému přístupu vzduchu k odpadu. Při ideálním hoření se uhlík váže s dvěma molekulami vzduchu a vzniká známý plyn CO<sub>2</sub>. Ztráta sdílením tepla je způsobena nedokonalou izolací či už spalovací komory resp. kotle nebo vedení, čímž dochází k výměně tepla s okolím.

Nejdůležitější z hlediska energetické bilance a podstatně vyšší ztráty jsou způsobeny citelným teplem spalin, jinak nazývané také ztráty komínové. Jedná se o teplotu spalin za jejich posledním tepelným využitím, která se pohybuje se v rozmezí 200 až 300 °C, ve výjimečných případech až 380 °C (nutnost ohřevu spalin pro technologické využití v systému čištění spalin).

Účinnost kotle ovlivňují nejen tepelné ztráty, ale také podmínky, při jakých spalování odpadu probíhalo, např. výhřevnost odpadu nebo přebytek vzduchu, který je vyjádřen koncentrací kyslíku ve vlhkých spalinách na výstupu z kotle. Čím nižší koncentrace kyslíku je zjištěna, tím vyšší účinnost kotle možno očekávat. Nižší koncentrace kyslíku na spalinách také znamená dokonalejší hoření, nižší energetickou náročnost procesu a menší tvorbu spalin.

### 6.2.3. Problém koroze

Koroze je jev, se kterým se zařízení pro EVO běžně setkávají a je potřeba ji vzít do úvahy nejen při případném návrhu podobného zařízení, ale také při samotném provozu. Primární účel je předcházení vzniku, kterému se však ne vždy jde vyhnout, proto je potřeba zvolit vhodný a účinný typ ochrany.

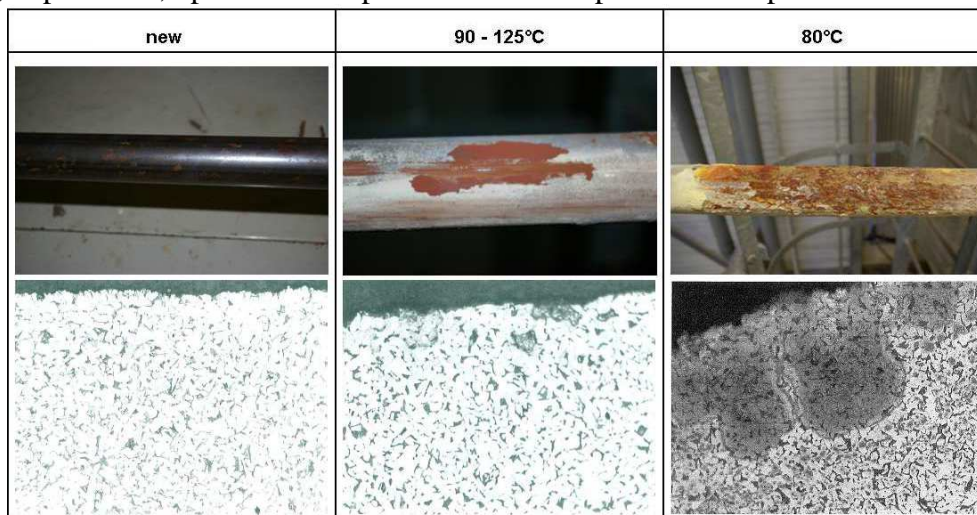
Na základě teplot výskytu dělíme korozi:

#### Nízkoteplotní koroze

Nízkoteplotní koroze je problém, který se vyskytuje u trubek ekonomizéru, které zajišťují přehřívání napájecí vody pro výrobu páry. Na základě několika studií a pokusů, uvedených v [20] se došlo k poněkud překvapivému závěru, že korozi nezpůsobují, jak se očekávalo na základě podobných jevů u konvenčních zařízení spalujících fosilní paliva, sulfidy, ale chloridy kovů. Toto je způsobeno zcela specifickým složením jak odpadů, tak následně

spalin vzniklých při jejich spalování. Chloridy se do styku s povrchem trubek ekonomizéru dostávají jako součást úsad (nálepů) na teplosměnné ploše.

Koroze se však vyskytuje jen při určitých teplotách povrchu trubek, neboli teploty napájecí vody, která daný povrch přímo ovlivňuje. Kritická teplota byla určena na 80 °C. U vyšších teplot je koroze poměrně malá a zanedbatelná naopak s klesající teplotou se kriticky zvyšuje. Názorný obrázek vlivu teploty na korozi je uveden na obr. 7. Úplně vlevo je trubka nová, neporušená, vpravo trubka poškozena korozí při kritické teplotě 80 °C.



Obr. 7: Vliv teploty povrchu trubky na korozi [20]

Právě hodnota kritické teploty způsobuje aktivaci hygrokopických vlastností chloridů, které následně přitahují molekuly vody z okolních plynů, což má za následek korozní aktivitu těchto solí chloridů na povrchu trubek.

Tento fakt také významně ovlivňuje účinnost výměníku. Při případném snížení výstupní teploty spalin je nutno úměrně snížit teplotu napájecí vody HRSG z důvodu údržby a provozu ekonomizéru.

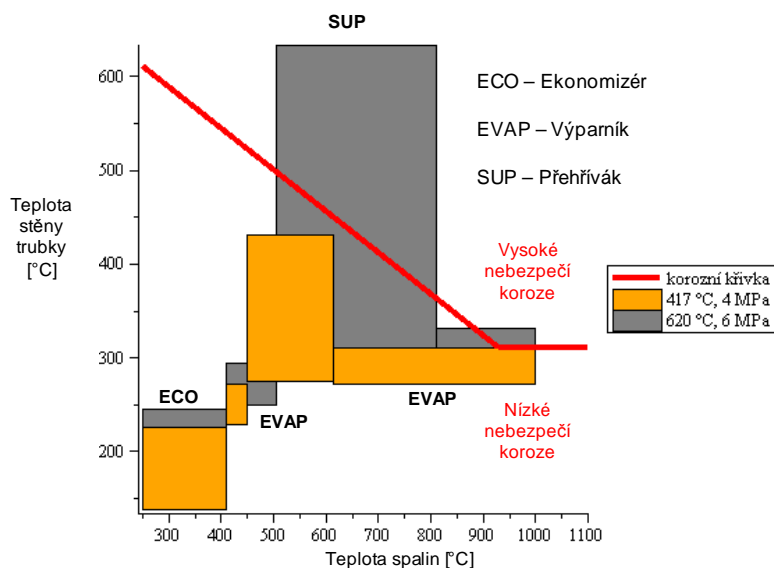
#### Vysokoteplotní koroze

Problém vysokoteplotní koroze se objevuje při volbě zvýšených parametrů páry, které představují tlak resp. teplotu kolem 6 MPa resp. 600 °C. Zvýšené parametry páry vedou ke zvýšení účinnosti parního cyklu a následně přispívají ke zvýšení výroby elektřiny při uspořádání s protitlakovou turbinou až o 100 kWh/t, přičemž celková účinnost výroby elektrické energie může přesáhnout až 20 % [16].

Riziko koroze je nejvýraznější u ploch, kde je vysoká teplota. Jedná se především o přehřívačky (svazky přehřívačků), ale může se objevit i u výparníků, jak ukazuje obr. 10, který nám podává přehlednější obraz o nebezpečí vysokoteplotní koroze.

Koroze za vysokých teplot je způsobena podobně jako u nízkoteplotní koroze jak přítomností kovových chloridů tak i vysokou koncentrací HCl ve spalinách, které vznikají v důsledku spalování plastů, např. PVC v odpadu.

Volba zvýšených parametrů páry vyžaduje použití kvalitnějších, odolnějších materiálů, které díky své vyšší odolnosti zajistí také vyšší životnost provozu. Jedná se o speciální korozivzdorné slitiny, např. slitina na základě niklu s vysokým přídavkem chromu a molybdenu, neboli ferroniklová slitina s chromem a křemíkem. Tyto materiály však svou cenou zvyšují investiční náklady a jejich použití záleží jen na nalezení kompromisu mezi ziskem (zvýšená produkce elektřiny – elektřina je hodnotnější a dražší druh energie) a náklady.



Obr. 8: Obrázek vlivu zvýšených parametrů páry na nebezpečí vysokoteplotní koroze [7]

Páru vzniklou v HRSG je možné využít více způsoby:

- spotřeba páry ve vlastní technologii
- prodej páry do spotřebitelské sítě
- výroba elektrické energie
- výroba elektřiny a tepla formou kogenerace

#### 6.2.4. Rankinův cyklus

Již bylo uvedeno, že nejvíc zařízení WTE se orientuje na kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie užitím kogenerace. Kogenerace přispívá k nejlepším výsledkům v oblasti celkové účinnosti.

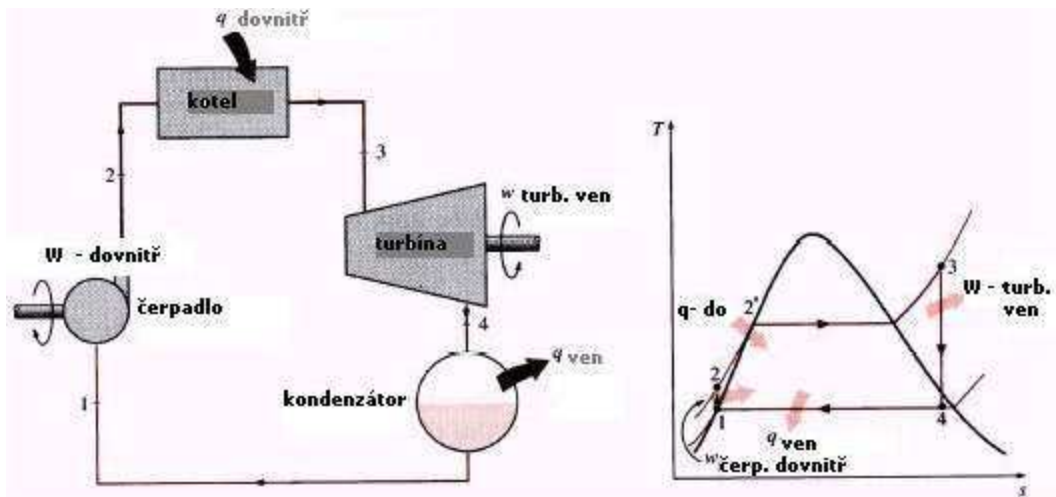
Při všech třech uvedených alternativách orientace WTE zařízení však dochází také k výrobě elektřiny na turbíně. Médium v podobě vodní přehřáté páry pracuje na základě Rankinova cyklu, kterým se řídí převážná většina parních turbin.

Rankinův cyklus popisuje proměnu tepla ve formě páry na práci turbíny, která pohání generátor produkující požadovanou elektrickou energii. Tepelná energie se u běžných zařízení produkuje spalováním paliva: u komerčních tepláren fosilní palivo, u WTE zařízení odpad, u jaderných elektráren štěpení jaderného paliva v reaktoru.

Pomocí tohoto cyklu se v současnosti produkuje okolo 80 % elektrické energie po celém světě, od jaderných elektráren až po solární.

Při parních turbínách se většinou využívá Rankinův cyklus s přehřevem páry, který sestává z dějů, názorně zobrazených v obr. 9.





Obr. 9: Ideální Rankinův cyklus parní turbíny s přehřevem páry [17]

- 3-4** izoentropický děj: entalpický spád přehřáté páry na turbině doprovázený poklesem, jak teploty, tak i tlaku páry na hodnotu syté páry (často se objevuje i mírná kondenzace páry – mokrá pára)
- 4-1** izotermický/izobarický děj: kondenzace syté (případně mokré) páry vyšle z turbíny na hodnotu syté kapaliny
- 1-2** dopravení kondenzátu čerpadlem do parního generátoru
- 2-2'** ohřívání kondenzátu na hodnotu syté kapaliny
- 2'-3** izotermický/izobarický děj: vypařování syté kapaliny až na hodnotu syté páry a následné přehřívání syté páry na páru přehřátou o požadovaných parametrech

Tepelná bilance cyklu\* vyjádřena pomocí entalpií:

Teplo spotřebované parním generátorem:  $q_{do} = i_3 - i_2$

Teplo odvedené kondenzátorem:  $q_{ven} = i_4 - i_1$

Práce turbíny:  $w_t = i_3 - i_4$

Práce čerpadla:  $w_{\check{c}} = i_2 - i_1$

Termická účinnost cyklu je definovaná jako poměr získané mechanické energie ve formě práce turbíny k dodanému teplu:

$$\eta_t = \frac{w_t}{q_{do}} = \frac{i_3 - i_4}{i_3 - i_2}$$

Uvedená účinnost tohoto cyklu je poměrně malá a je snaha ji zvýšit. V praxi se užívají hlavně 2 způsoby, jako toho dosáhnout:

- zvýšením parametrů přehřáté páry
- snížením tlaku v kondenzátoru

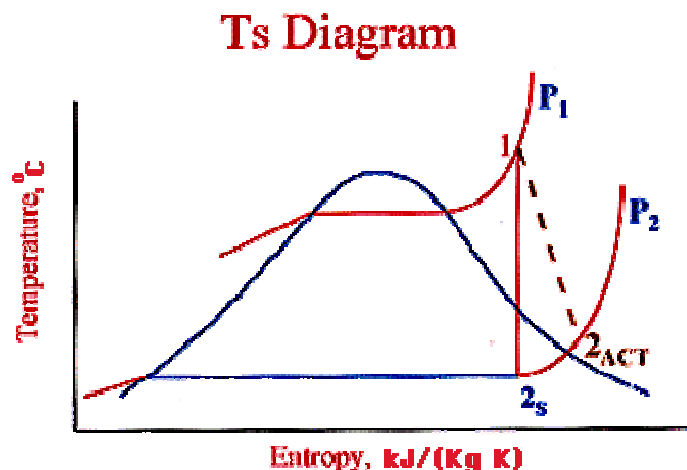
U zvýšených parametrů páry nastává problém při vysokých teplotách páry, kde nastává problém s korozí, jak již bylo vysvětleno v kapitole 6.2.3.

Snížení tlaku v kondenzátoru, resp. na výstupu z turbíny závisí především na chladícím médiu a jeho pracovních teplotách. Nejlepší médium je voda (mokřý typ chladicí soustavy), která při nízkých teplotách (10 až 25 °C) je schopna zredukovat tlak kondenzace

\* jedná se o měrnou tepelnou bilanci vztaženou na jednotkové množství páry 1kg

na cca. 40 až 60 mbar, při vzduchu (suchý typ chladicí soustavy) se tlak zvyšuje až na 80 mbar a více, v závislosti od teploty vzduchu. Pro kombinovaný způsob chlazení se tlak pohybuje kolem 70 mbar [21].

Z Rankinova cyklu se dá také lehce určit izoentropická účinnost turbíny, kterou získáme porovnáním ideálního a reálného Rankinova cyklu ve fázi entalpického spádu, jak ukazuje obr. 10.



Obr. 10: Reální entalpický spád na turbině [22]

Pozn.: Temperature – teplota  
Entropy – entropie

Reální entalpický spád nepřebíhá adiabaticky, tedy za konstantní entropie, jak naznačuje křivka 1-2s, ale v důsledku ztrát se jeho entropie zvětší o  $ds = s_{2ACT} - s_2$  a výslední entalpie klesne. Účinnost turbíny se pak určí jako podíl skutečného a ideálního entalpického spádu,

$$\text{neboli: } \eta_{IST} = \frac{i_1 - i_{2ACT}}{i_1 - i_2}$$

Průměrná hodnota se pohybuje v intervalu od 70 až 90 % pro ty nejlepší turbíny.

Mimo klasického Rankinova cyklu se v praxi užívá ještě tzv. organický Rankinův cyklus (ORK). Jedná se v podstatě o klasický Rankinův cyklus s tím rozdílem, že pracovní médium je namísto vody/páry organická látka. Nejčastěji jsou užívány silikonové oleje, hydrokarbonáty a fluorokarbonáty.

Během procesu zde také dochází k proměně skupenstva látky z kapalné na plynou a zpátky. Právě specifická vlastnost pracovních látek, nízká teplota vypařování, umožňuje využívání tepla z nízkoteplotních zdrojů, jako jsou např. spalování biomasy, využívání tepla z odpadů, solární nádrže.

ORK se užívá u menších (lokálních) jednotek, kde se naplno uplatňují jeho pozitivní vlastnosti :

- zvýšení účinnosti turbíny díky vyššímu toku masy
- nízké náklady na údržbu
- již uvedená možnost získávání tepla za nízkých teplot

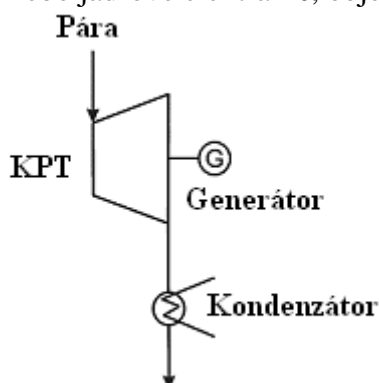
### 6.2.5. Možné systémy uspořádání turbin

Existuje mnoho způsobů, jak využít páru na vstupu na turbínu (systému turbin). Jedná se o to, zdali je hlavní hledisko efektivita procesu, snaha maximální výroby elektřiny, orientace na teplo nebo schopnost pružně reagovat na požadavky trhu, které se v průběhu celého roku mění v závislosti hlavně na ročním období a teplotě.

Kapitola se zaměří na 3 nejběžnější způsoby sestavení „turbínové jednotky“, přičemž každý z nich má jiné zaměření, použití a pochopitelně své klady i zápory.

#### a) model kondenzační parní turbíny KPT

Model KPT, uveden na obr. 11 se užívá primárně u systémů zaměřených na produkci elektřiny. Jedná se hlavně o parní nebo jadrové elektrárně, objevují se však i u WTE zařízení.



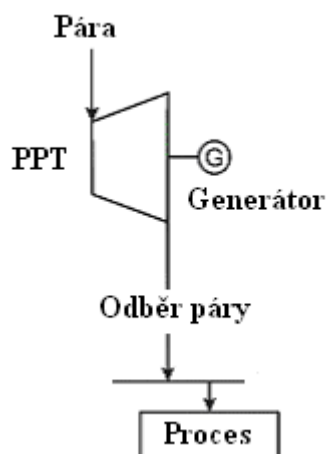
Obr. 11: Model KPT

V systému s KPT jde generovaná pára na kondenzační turbínu, odevzdá větší část energie turbíně, která se projeví v práci turbíny. Turbína pak pohání generátor produkující elektrickou energii. Entalpický spád je neregulovaný a pára, mající teď jen zlomek své původní hodnoty teploty a tlaku, se v kondenzátoru mění zpátky na kapalinu, odkud je čerpadlem vháněna do HRSG, kde se opět mění v přehřátou páru a systém se opakuje.

Výhodou tohoto systému je produkce hodnotnější formy energie, elektřiny, která má v průběhu roka stabilnější odběr a je také cenově výhodnější. Avšak z hlediska celkové účinnosti využití uvolněné energie při spalování odpadů je tento systém nejhorší. Dané účinnosti zřídka přesahují 30 %.

#### b) model protitlakové turbíny PPT

Model PPT, uveden na obr. 12, se významně liší od modelu KPT. Model PPT je modelem kogeneračním, který páru na výstupu z turbíny následně využívá k vytápění, případně vlastním potřebám. Protitlaková turbína „provede“ entalpický spád jen do určité míry. Tahle míra je určena tlakem páry na výstupu, kde je požadovaný odběrový tlak vytápěcích centrálních systémů, kam je pára následně dodávána.



Obr. 12: Model PPT

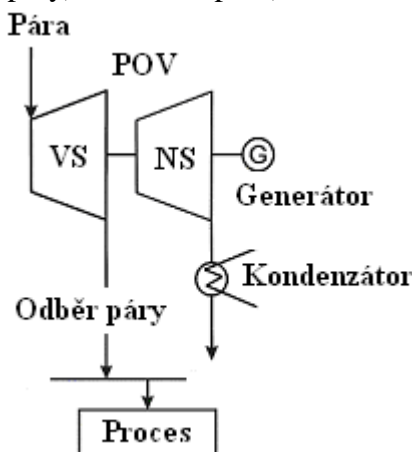
Model je uplatňován hlavně pro zařízení orientované na kombinovanou výrobu elektřiny a tepla, nebo jednotek, u kterých dominuje výroba tepelné energie. Výhodou oproti modelu KPT je neporovnatelně vyšší účinnost, která díky kogeneračnímu přístupu může dosáhnout někdy až 90 %. Negativem je složitější a dražší systém a menší produkce elektřiny.

**c) model odběrové kondenzační turbíny s jedním regulovaným odběrem POV**

Model POV, obr. 13, je jednoznačně nejmodernější a nejsložitější z hlediska konstrukce z prezentovaných systémů. Jedná se o kondenzační odběrovou turbínu, která se dělí na 2 stupně:
 

- vysokotlaký stupeň (VS)
- nízkotlaký stupeň (NS)

Vysoce přehřátá pára nejdřív vstupuje do VS POV, kde částečně expanduje, podobně jako u PPT systému, na tlak odběru. Na rozdíl od PPT systému, je však u tohoto uspořádání možnost řídit množství páry na odběru. Část je tedy dodávána do sítě, ostatek pak postupuje do NS POV, kde se opět produkuje elektřina. Navzdory možnosti řízení množství páry vstupující do NS POV, jakmile je NS v provozu (existuje možnost úplného vypnutí ze systému v případě potřeby, např. začátek topné sezony – pak dostáváme opět PPT systém), pro zachování bezpečnosti turbíny je nutno dodávat na turbínu cca 5 % ze jmenovitého průtoku páry. Jedná se tedy opět o kogenerační přístup, u kterého je navíc možnost orientace buď na elektřinu (minimální odběr páry) nebo na teplo (maximální odběr páry).



Obr. 13: Model POV

Největší výhodou tohoto systému je možnost pružně reagovat na požadavky odběratelů formou regulace odběru páry za VS odběrové turbíny. Tento fakt je velmi důležitý, protože požadavky na typ energie se v závislosti od ročního období nebo teploty podstatně mění a v případě neexistence možnosti adekvátně reagovat na požadavky se stává celý systém jednotky TVO méně účinným. Nevýhodou systému je logicky vyšší cena a složitost v porovnání s předešlými dvěma systémy.

Celková účinnost systému je proměnná v závislosti od orientace na elektřinu (nižší účinnost) anebo na teplo (vyšší účinnost).

### 6.2.6. Stupeň využití energie

Účinnost, s jakou je využita energie v zařízeních EVO je sledována a existuje více kritérií, které hodnotí stupeň využití energie. Jedno z nich, kritérium Energy efficiency (Energetická účinnost) definováno směrnicí 2009/98/ES, je uvedeno jako:

$$Energy\_efficiency = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad [1]$$

kde:

$E_p$  je roční množství vyprodukované energie (energie ve formě elektřiny se násobí hodnotou 2,6 a teplo vyprodukované pro komerční účely hodnotou 1,1 (GJ/r)

$E_f$  je roční energetický vstup do systému z paliv přispívajících k výrobě páry (GJ/r)

$E_w$  je roční energetický obsah spracovávaného odpadu počítaný z čisté výhrevnosti odpadu (GJ/r)

$E_i$  je roční množství přivedené energie mimo hodnoty  $E_f$  a  $E_w$  (GJ/r)

0,97 je koeficient zohledňující energetické ztráty v důsledku popela ze spalování a sálání

V tab. 7 je přehledně zpracován systém rozdělení zařízení určených k EVO na základě kritéria Energy efficiency. Důsledek nesplnění tohoto kritéria vede ke klasifikaci zařízení jako pouhé zařízení na likvidaci odpadu se všema z toho plynoucími důsledky.

| Účinnost zařízení | Typ zařízení                  |
|-------------------|-------------------------------|
| > 0,60 (0,65*)    | WTE zařízení                  |
| < 0,60 (0,65*)    | zařízení pro likvidaci odpadu |

Tab. 7: Klasifikace zařízení na základě Energy efficiency kritéria

### 6.3. Systém čištění spalin

Systém čištění spalin (SČS) je důležitou složkou WTE zařízení nejen z pohledu redukce nežádoucích látek ve spalinách před vypuštěním do atmosféry, ale také z energetického hlediska. Nevhodně sestavený systém, případně extrémní a předimenzované dodržování emisních limitů, uvedených v tab. 8, kde se hodnoty pohybují hluboce pod legislativně nastavenou hodnotou, vede ke zvýšení vnitřní spotřeby tepla i elektrické energie. To vede k nižšímu vývozu energie a poklesu zisků za prodej.

\* platí pro zařízení mající povolení po 31. 12. 2008

System je potřeba nastavit úměrně požadavkům jak provozovatele, tak legislativy. V ideálním nastavení by měli být emisní limity dodržovány s dostatečně velkou rezervou, jelikož z kontextu uplynulých let je možné očekávat v blízké budoucnosti další snižování hodnot emisních limitů.

| Název látky  | Emisní limit (mg/Nm <sup>3</sup> ) |
|--|------------------------------------|
| Tuhé znečišťující látky (TZL)  | 10                                 |
| Plynné organické látky, vyjádřeny jako celkový organický uhlík (TOC)   | 10                                 |
| chlorovodík HCl  | 10                                 |
| fluorovodík HF   | 1                                  |
| oxid siřičitý SO <sub>2</sub>  | 50                                 |
| oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO <sub>2</sub> vyjádřené jako NO <sub>2</sub> (kapacita přesahující 6t/h <sup>^</sup> ) | 200                                |

Tab. 8: Emisní limity vybraných látek [23]

Primární úkol SČS je odstranění nevhodných látek pod požadovanou hodnotu. Jedná se především TZL, organické látky, HCl, HF, SO<sub>2</sub>, oxidy dusíku NO<sub>x</sub>, těžké kovy, dioxiny a difurany.

SČS sestává z řady metod, přičemž každá má své opodstatnění a použití při odstraňování konkrétních škodlivých látek. Liší se svou energetickou náročností, náklady na provoz i místem v systému, který musí mít určité logické uspořádání.

### 6.3.1. Tuhé znečišťující látky TZL

V případě TZL, neboli prachů, se jedná hlavně o popílek zachycený v spalinách. Tyto částice, kterých velikost se pohybuje v rozmezí 0,1μm-0,5mm, představují v případě nadměrného obsahu ve vzduchu riziko pro dýchací soustavu člověka, zatěžujíc jeho plíce.

Pro odstraňování těchto látek se používají mnohá zařízení, z nich v praxi nejpoužívanější jsou:

- **elektrostatické odlučovače:** Pracují na principu vytvoření elektrického pole pomocí tzv. sršící elektrody. Po vytvoření pole dochází k odstraňování částic na základě hodnot měrného elektrického odporu jednotlivých složek. Účinnost závisí právě od hodnoty odporu, která je proměnná v závislosti od složení odpadu. Pracovní teploty v odlučovači jsou 160-260°, při vyšších teplotách dochází k riziku tvorby dioxidů a furanů.
- **multicyklony (cyklony):** Využívají na separaci odstředivé síly. Při vysoké obvodové rychlosti spalinových částic přes malé cyklony dochází k oddělování nežádoucích pevných částic. Multicyklony na rozdíl od cyklonů sestávají z velkého počtu cyklonových jednotek. Výhodou je široké spektrum použití a nízké požadavky na energii, nevýhodou však je, že cyklony samy o sobě nedokážou zajistit dodržení emisních limitů, a proto se vyskytují v systému s dalšími zařízeními.
- **látkové filtry:** Jsou velice používané pro svou vysokou účinnost a schopnost zachytit i ty nejmenší částice, díky které se dosahuje nízkých hodnot emisí prachů.
- **mokré pračky plynů (skrubry):** Pracují na základě kombinací více principů: elektrostatické nabíjení částic, působení gravitační síly a následné usazování látek ve vertikálním směru, absorpce nebezpečných, korozivních plynů. Výhodou skrubrů je vysoká účinnost usazování částic při minimálních požadavkách na energii.

<sup>^</sup> pro zařízení s kapacitou menší než 6t/h je limit 400 mg/Nm<sup>3</sup>

### 6.3.2. Oxidy dusíku NO<sub>x</sub>

Koncentraci oxidů dusíku v spalinách lze zabránit nejen ve finální fázi existence spalin a jejich čištění, ale také prevencí. Jedná se o zásahy do procesu spalování, které přispějí k nadměrné produkci oxidů. Mezi hlavní způsoby, jak toho docílit jsou: dobré dodávky vzduchu (primárního i sekundárního), recirkulace spalin, vstřikování kyslíku (popřípadě kyslíkem obohaceného vzduchu), postupné spalování nebo vstřikování zemního plynu (opětovné hoření) [21].

Jelikož uvedená opatření sice snižují koncentraci NO<sub>x</sub> v spalinách, ale nezajišťují dodržení limitu 200 mg/Nm<sup>3</sup>, je potřeba užít zařízení pro odebírání oxidů ve finální fázi ze spalin. Nejčastěji jsou užívány:

- selektivní nekatalytická redukce (SNCR): Redukce se provádí pomocí redukčního čidla, nejčastěji amoniaku nebo močoviny, které jsou vstřikovány do procesu již v SCC. Důvodem je potřeba vysoké teploty k reakci, kolem 850 až 1000 °C. Čidlo pak reaguje s oxidy dusíku. Výhodou je poměrně vysoká účinnost redukce, 60 až 70 %, nevýhodou vznik emisí amoniaku nebo močoviny, které je nutno následně redukovat.
- selektivní katalytická redukce (SCR): Jedná se o katalytický proces, v němž se opět užívá amoniaku. Ten, společně se vzduchem, coby redukčním činidlem, se přidává do spalin a při přechodu přes katalyzátor\* reaguje s oxidy dusíku za vzniku dusíku a vodní páry. Jedná se o velice účinnou metodu, která dosahuje až 90 % snížení NO<sub>x</sub>.

### 6.3.3. SO<sub>2</sub> a halogeny: HCl, HF (kyselé plyny)

Odstraňování těchto látek se děje na základě činidel (nejčastěji alkalických), kterých forma, v jaké se přidává do spalin, rozděluje tyto procesy na 3 skupiny [21]:

- suché procesy: Sorpční prostředek (např. vápno, uhličitán sodný) je ve formě suchého prášku. Následný produkt reakce je také suchý a tuhý, a musí se proto použít metoda pro odstraňování TZL, nejčastěji látkové filtry.
- polomokrý (polosuchý) procesy: Sorpční prostředek je přidáván do spalin ve formě roztoku (vápenné mléko) nebo suspenze (kal), teplota spalin však následně vodu odpaří a produkty reakce jsou podobně jako u suchých procesů tuhé a je potřeba užít látkových filtrů nebo jiných metod odstraňování TZL
- mokrý procesy: Činidlo je přidáváno do spalin spolu s vodou (např. vodní roztok hydroxidu sodného), přičemž produkt reakce je tentokrát kapalný. Tyto produkty, odpadní vody, je potřeba opět speciálním způsobem čistit (neutralizace, příp. odstranění rtuti, srážení těžkých kovů...)

### 6.3.4. Plynné organické látky

Plynné organické látky, především jedovatý oxid uhelnatý, coby produkt nedokonalého hoření (nedostatečný přístup vzduchu) není potřeba odstraňovat pomocí speciálních zařízení na to určených (výjimku tvoří odstraňování perzistentních organických látek - POP). Při dodržení legislativou určených podmínek spalování (především teplota, koncentrace vzduchu...) je garantován termický rozklad těchto látek spolu se splněním emisních limitů dostatečně hluboko pod jejich hranici.

Co se týče POP, jedná se o látky, které vykazují typické vlastnosti jako: toxická odolnost, persistence, pravděpodobnost významného škodlivého vlivu nejen na zdraví

---

\* jedná se obvykle o kovovou konstrukci s otvory (např. z platiny, rhodia, zeolitů) [21]

člověka ale také životní prostředí. Hlavní představitelé POP, jako dioxiny, aldriny, dichlordifenyltrichlormethylmethan (DDT), polychlorované bifenyly (PCB) již ve velice malých dávkách můžou způsobovat hormonální poruchy, některé dokonce rakovinu. Proto je potřeba chránit lidi před jejich účinky.

Odstraňování POP je dosahováno pomocí adsorpčního čištění pomocí aktivního uhlí, kdy jsou současně na povrchu sorbentu adsorbovány i další uhlovodíkové složky [7].

## 7. ENERGETICKÉ TOKY V ZAŘÍZENÍ WTE

Na závěr této práce je potřeba pro dokonalou představu o WTE zařízeních názorně ukázat a popsat hlavní energetické toky, které v nich probíhají. Protože energetická bilance, která obsahuje jak vstupy, tak produkty a jejich množství na výstupu, je základní z pohledu hodnocení dané jednotky EVO. Hodnocení slouží nejen masovým populacím ale taky případným investorům, kteří by měli zájem do výstavby nebo rozšíření takové jednotky investovat.

Na základě předlohy, dat uvedených v příloze č. 1: *data.xlsx*, byl sestaven jednoduchý výpočtový model v tabulkovém editoru Microsoft Excel (viz příloha č. 2: *výpočetní model.xlsx*). Výstupy z tohoto modelu byly graficky zpracovány do blokového schématu v programu e!Sankey (viz příloha č. 3: *blokové schéma.sankey*) Data obsahují tři možné alternativy uspořádání jednotky EVO, přičemž zůstává zachovaný pouze systém uspořádání turbin (kondenzační odběrová turbina, viz kapitola 6.2.5). Rozdíl je převážně v parametrech páry a systému čištění spalin.

### 7.1. Popis alternativ obsažených ve výpočtovém systému

- 1) První varianta, dále značena jako V1, označována charakteristická maximální výrobou energie, užívá standardní parametry páry (přibližně 400 °C, 4 MPa). Její systém čištění spalin je nastaven na minimální požadavky z hlediska spotřeby energie při dostatečném dodržení emisních limitů. Varianta vychází z předpokladu, že v SČS již nebude potřeba technologického dohřevu spalin. Varianta tedy předpokládá aplikaci suché metody čištění doplněné o další nezbytné procesy.
- 2) Druhá varianta, dále značena V2, nazývána také účinný (komplexní) systém spalin, se shoduje s V1 až na uspořádání SČS, kde se naopak užívá především mokrých metod, které vyžadují vyšší teplotu spalin za kotlem pro potřeby likvidaci vzniklých odpadních vod. Potřebná teplota musí být dosažena pomocí technologického dohřevu. Vlastní spotřeba je kryta vlastní výrobou což vede jak k nižšímu exportu páry, tak k růstu vnitřní spotřeby elektřiny (vyšší tlaková ztráta spalinové trasy). Z hlediska čištění spalin je však V2 nejefektivnější a emisní limity dokáže plnit hluboce pod požadovanou hodnotu. Díky vysoké teplotě spalin za kotlem a použití odpařovací sušárny neprodukuje žádné odpadové vody.
- 3) Poslední varianta značena V3, je totožná s V1 až na parametry páry. Místo klasických parametrů byly použity parametry zvýšené (přibližně 600 °C, 6 MPa), které zajišťují vyšší produkci elektřiny ale také riziko vysokoteplotní koroze popsané podrobněji v kapitole 6.2.3.



## 7.2. Výpočetní model

V modelu jsou uvedeny v předešlé kapitole popsané 3 alternativy nastavení POV systému, mezi kterými je možnost přepínat. Výhodou, a hlavní předností modelu je však možnost nastavení požadovaných parametrů. Od základního nastavení procentuálního množství odběru páry na výstupu z VS POV turbíny pro tepelné potřeby, přes volbu výhřevnosti a dávkování odpadu, až po volbu účinnosti kotle, jak ukazuje obr. 14.

Nastavení podílu odběru páry je limitováno shora hodnotou 100%, ačkoliv v praxi v případě, že NS turbíny není z určitých důvodů vyřazen, je nutno počítat s minimálním průtokem procházejícím NS z bezpečnostních důvodů. Dolní nastavení je místo očekávaných 0 % nastaveno na 11 %. Toto teplo představuje vlastní spotřebu zařízení (ohřev primárního a sekundárního vzduchu, ohřev napájecí vody atd.) a je nutno s ní počítat. Proto export tepla při tomto nastavení je logicky nulový.

Nastavení zbylých parametrů se provádí přepsáním dané hodnoty buňky v úvodním listu výpočetního modelu. Na základě propojenosti buněk se tyto hodnoty aplikují v následných výpočtech. Tyto buňky je možnost barevně rozpoznat dle legendy, také uvedené v obr. 14.

**Volba variant:**

Varianta V1  
 Varianta V2  
 Varianta V3

Podíl odběru páry (%): 44

|                            |      |          |
|----------------------------|------|----------|
| Dávkování odpadu:          | t/h  | 12,5     |
| Výhřevnost odpadu:         | GJ/t | 10,9     |
| Energie na vstupu:         | GJ/h | 136,26   |
| Účinnost kotle:            | %    | 73       |
| Ztráty na kotli:           | GJ/h | 36,7875  |
| Energie na turbínu:        | GJ/h | 99,4825  |
| Výroba EE na turbíně:      | GJ/h | 28,92729 |
| Vlastní spotřeba elektřiny | GJ/h | 3,6      |
| Export elektřiny:          | GJ/h | 23,32729 |
| Výroba TE na turbíně:      | GJ/h | 28,93389 |
| Straty na turbíně:         | GJ/h | 43,80132 |

| Procentuální podíl (%): |   |
|-------------------------|---|
| -                       | - |
| -                       | - |
| 100                     | - |
| -                       | - |
| 27                      | - |
| 73                      | - |
| 19,76315                | - |
| 2,842202                | - |
| 17,12095                | - |
| 21,23588                | - |
| 32,00097                | - |

**LEGENDA:**

- volitelné parametry
- spočtené parametry
- spočtené parametry na základě dat (příloha č. 1)
- aplikována lineární regrese

Obr. 14: Nastavování parametrů

Při sestavování modelu bylo užito lineární regrese. Zdrojová data poskytnutá pro řešení této práce obsahují diskrétní nastavení velikosti odběru za VS po 10%. Z těchto nastavení vypočtené účinnosti výroby elektřiny a tepla sloužili pro aplikaci regrese pro velikosti odběru

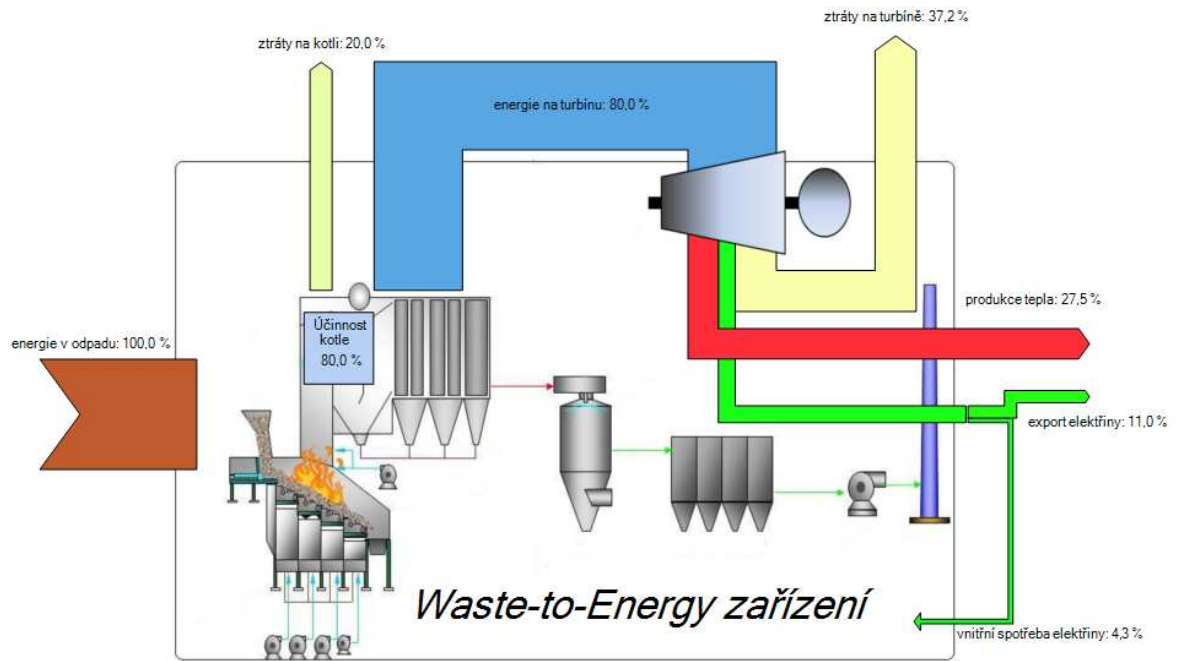
za VS neuvedených ve zdrojových datech. Jelikož se účinnost při různých provozních stavech nemění, byly z ní následně dopočítávány hodnoty jak tepelného a elektrického výkonu, tak hodnoty účinností výroby tepla a elektřiny ve zařízení EVO. Postup je zřejmý také z obr. 15, kde barevné vysvětlení jednotlivých buněk je uvedeno v obr. 14 (viz legenda).

|    | A | B | C                              | D     | E            | F            | G       | H       | I       |
|----|---|---|--------------------------------|-------|--------------|--------------|---------|---------|---------|
| 1  |   |   |                                |       |              |              |         |         |         |
| 2  |   |   |                                |       |              |              |         |         |         |
| 3  |   |   |                                |       | PPT turbína: | POV turbína: |         |         |         |
| 4  |   |   | Podíl páry odběrem:            | %     | 100          | 11           | 12      | 13      | 14      |
| 5  |   |   | Dávkování odpadu:              | t/h   | 12,5         | 12,5         | 12,5    | 12,5    | 12,5    |
| 6  |   |   | Výhřevnost odpadu:             | GJ/t  | 10,9         | 10,9         | 10,9    | 10,9    | 10,9    |
| 7  |   |   | Energie na vstupu:             | GJ/h  | 136,25       | 136,25       | 136,25  | 136,25  | 136,25  |
| 8  |   |   | Účinnost kotle:                | %     | 73           | 73           | 73      | 73      | 73      |
| 9  |   |   | Straty na kotli:               | GJ/h  | 36,7875      | 36,7875      | 36,7875 | 36,7875 | 36,7875 |
| 10 |   |   | Teplota na kotli:              | GJ/h  | 99,4625      | 99,4625      | 99,4625 | 99,4625 | 99,4625 |
| 11 |   |   | Energie na turbínu:            | GJ/h  | 99,4625      | 99,4625      | 99,4625 | 99,4625 | 99,4625 |
| 12 |   |   | Elektrický výkon:              | MW    | 3,68596059   | 7,46182      | 7,42187 | 7,38191 | 7,34195 |
| 13 |   |   | Výroba EE na turbíně:          | GJ/h  | 13,2694581   | 26,8626      | 26,7187 | 26,5749 | 26,431  |
| 14 |   |   | Účinnost výroby EE na turbíně: | %     | 13,3411689   | 27,0077      | 26,8631 | 26,7185 | 26,5739 |
| 15 |   |   | Tepelný výkon:                 | MW    | 23,8238916   | 0            | 0,23974 | 0,47947 | 0,71921 |
| 16 |   |   | Výroba TE na turbíně:          | GJ/h  | 85,7660099   | 0            | 0,86305 | 1,72611 | 2,58916 |
| 17 |   |   | Účinnost výroby TE na turbíně: | %     | 86,2294934   | 0            | 0,86772 | 1,72544 | 2,60315 |
| 18 |   |   | Straty na turbíně:             | GJ/h  | 0,42703202   | 72,5999      | 71,8807 | 71,1615 | 70,4423 |
| 19 |   |   | Čelková účinnost turbíny:      | %     | 99,5706603   | 27,0077      | 27,7308 | 28,4539 | 29,177  |
| 20 |   |   | Účinnost výroby EE spalovna:   | %     | 9,73905184   | 19,7156      | 19,6101 | 19,5045 | 19,3989 |
| 21 |   |   | Účinnost výroby TE spalovna:   | %     | 62,9475302   | 0            | 0,63343 | 1,26687 | 1,9003  |
| 22 |   |   | Čelková účinnost spalovna:     | %     | 72,686582    | 19,7156      | 20,2435 | 20,7714 | 21,2992 |
| 23 |   |   | Vlastní spotřeba elektřiny:    | MWh/t | 0,08         | 0,08         | 0,08    | 0,08    | 0,08    |
| 24 |   |   | Vlastní spotřeba elektřiny:    | MW    | 1            | 1            | 1       | 1       | 1       |
| 25 |   |   | Vlastní spotřeba elektřiny:    | GJ/h  | 3,6          | 3,6          | 3,6     | 3,6     | 3,6     |
| 26 |   |   | Export elektřiny:              | GJ/h  | 9,66945813   | 23,2626      | 23,1187 | 22,9749 | 22,831  |
| 27 |   |   |                                |       |              |              |         |         |         |

Obr. 15: Výpočetní model - ukázka

### 7.3. Blokové schéma

Hlavní účel blokového schématu je názorná prezentace základních energetických toků v závislosti na zvoleném procentuálním podílu odběru páry. Toto je dosaženo na základě propojení buněk výpočetního modelu s jednotlivými toky v blokovém schématu. Následující obr. 16 ukazuje formu schématu pro jednu variantu. Kompletní obrázková dokumentace jednotlivých nastavení odběru páry jednotlivých systémů V1, V2 a V3 je pak uvedena v příloze č. 4.



Obr. 16: Forma blokového schémata (varianta V2, odběr páry 50%)

## 8. ZÁVĚR

V úvodní části práce jsou popsány nejznámější způsoby nakládání s odpady: skládkování, energetické využití odpadů (EVO) a recyklace. EVO je velmi účinnou a preferovanou variantou nakládání s odpady. Nejdůležitější výhody této metody jsou rychlost zpracování, možnost zpracovat takřka všechny druhy odpadu, včetně nebezpečných a v neposlední řadě dodávka energie. EVO tvoří klíčový článek vyspělých systémů nakládání s odpady. Negativa, ke kterým patří nesporně emise a jiné produkty spalování, se v průběhu času podstatně zredukovali a nadále netvoří slabinu zařízení věnujících se EVO.

Dále bylo uvedeno rozdělení těchto zařízení, které závisí na konečné formě produkované energie. V případě orientace na teplo jsou sice dosaženy vyšší hodnoty účinnosti, ale pro plné využití kapacity zařízení je nutné zajistit odběr tepla, což může výt problematické zejména v letním období. V dnešní době je poptávka hlavně po elektřině, což je hodnotnější formě energie. Jelikož hodnota účinnosti při orientaci na elektrickou energii je nízká, je ve většině zařízení volena střední cesta v podobě kombinované výroby tepla a elektřiny. Ta představuje společnou výrobu tepla a elektřiny z páry, kdy se dosahuje vysokých hodnot účinností. Energetické toky odpovídající různým provozním stavům jsou efektně znázorněny v příloze č. 4.

V budoucnu lze očekávat zvýšenou snahu o zefektivnění procesu výroby elektřiny z odpadů, protože světová poptávka po elektřině roste.

## 9. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. *Official Journal of the European Union* [online]. 22.11.2008, L 312, [cit. 2011-03-19]. Dostupný z WWW: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:EN:PDF>
- [2] [Http://epp.eurostat.ec.europa.eu](http://epp.eurostat.ec.europa.eu) [online]. 1995, 18.03.2011 [cit. 2011-03-19]. Municipal waste generated. Dostupné z WWW: <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/graph.do?tab=graph&plugin=0&pcode=tsien120&language=en&toolbox=sort>>.
- [3] ČERMÁK, Oskár . *ODPADOVÉ HOSPODÁRSTVO : Spôsoby zberu a odstraňovania odpadov* [online]. prvé vydanie. Bratislava : Vydavateľstvo STU, 2007 [cit. 2011-03-02]. Dostupné z WWW: <[http://www.svf.stuba.sk/docs//dokumenty/skripta/cermak\\_odp\\_hospodarstvo.pdf](http://www.svf.stuba.sk/docs//dokumenty/skripta/cermak_odp_hospodarstvo.pdf)>. ISBN 978-80-227-2662-7
- [4] [Www.referaty-seminarky.sk](http://www.referaty-seminarky.sk) [online]. 2007-07-01 [cit. 2011-03-02]. Spaľovne odpadov - vynález skazy?. Dostupné z WWW: <http://referaty-seminarky.sk/spazovne-odpadov--vynalez-skazy/>
- [5] Kafka, Z.: Základy ochrany životného prostredia - časť odpady [online]. VŠCHT, 2002. Dostupné z [www.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/ZOZP/skriptaZOP.doc](http://www.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/ZOZP/skriptaZOP.doc)
- [6] [Http://termizo.cz](http://termizo.cz) [online]. 2010 [cit. 2011-03-19]. Zpráva o provozu spalovny – environmentální profil za rok 2010. Dostupné z WWW: <[http://termizo.cz/php/docs/rocní\\_zprava\\_2010.pdf](http://termizo.cz/php/docs/rocní_zprava_2010.pdf)>.
- [7] PAVLAS, Martin; MARTINEC, Jiří; DVOŘÁK, Radek; BÉBAR, Ladislav. Potenciál výroby energie v moderních provozech EVO: Výzkumná zpráva NPV2-V005-10-?? pro řešení Národního programu výzkumu II – 2B08048 – Odpady jako surovina a zdroje energie. Brno : VUT Fakulta strojního inženýrství Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2010. 78 s
- [8] [Www.cewep.eu](http://www.cewep.eu) [online]. 2009 [cit. 2011-03-20]. Municipal waste treatment in 2009 EU 27. Dostupné z WWW: <[http://cewep.eu/information/data/graphs/m\\_603](http://cewep.eu/information/data/graphs/m_603)>.
- [9] [Http://dnr.wi.gov](http://dnr.wi.gov) [online]. 2008 [cit. 2011-04-17]. PCB Cleanup - Landfilling. Dostupné z WWW: <<http://dnr.wi.gov/org/water/wm/foxriver/landfilling.html>>.
- [10] [Http://zimandl-j.wz.cz](http://zimandl-j.wz.cz) [online]. 2011 [cit. 2011-04-17]. Vektorová grafika. Dostupné z WWW: <<http://zimandl-j.wz.cz/vektory.html>>.
- [11] ŠTOFILA, Albín; CHRIAŠTEĽ, Ladislav. *Spracovanie a recyklácia tuhých odpadov*. Slovenská technická univerzita v Bratislave : Vydavateľstvo STU Bratislava, Vazovova 5, 2006. 183 s.

- [12] PAVLAS, Martin ; TOUŠ, Michal . Efficient waste-to-energy system as a contribution to clean technologies. *Clean Technologies and Environmental Policy* [online]. 2008, Volume 11, Number 1 , [cit. 2011-03-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.springerlink.com/content/10871541k7q81446/fulltext.pdf>>.
- [13] *Www.cewep.eu* [online]. 2008 [cit. 2011-03-20]. Heating and Lighting the Way to a Sustainable Future. Dostupné z WWW: <[http://cewep.eu/m\\_471](http://cewep.eu/m_471)>.
- [14] DIRECTIVE 2004/8/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC. *Official Journal of the European Union* [online]. 21.2.2004, L 52, [cit. 2011-03-21]. Dostupný z WWW: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:052:0050:0060:EN:PDF>>.
- [15] Pavlas, M. *Systém pro výpočet technologických parametrů procesů včetně energetických aspektů*. Brno, 2008. 109s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [16] Waste-to-Energy: Zdroj čisté a spolehlivé energie. *All for Power*. 2010, 02/2010, s. 64-69.
- [17] IPPC (2005) Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration, European IPPC Bureau Brussels, <http://eippcb.jrc.es>. Accessed 20 December 2010
- [18] DIRECTIVE 2000/76/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 December 2000 on the incineration of waste. *Official Journal of the European Communities* [online]. 28.12.2000, L 332, [cit. 2011-04-02]. Dostupný z WWW: [http://www.central2013.eu/fileadmin/user\\_upload/Downloads/Document\\_Centre/OP\\_Resources/Incineration\\_Directive\\_2000\\_76.pdf](http://www.central2013.eu/fileadmin/user_upload/Downloads/Document_Centre/OP_Resources/Incineration_Directive_2000_76.pdf)
- [19] [Http://www.ask.com](http://www.ask.com) [online]. March 2008 [cit. 2011-04-03]. Heat recovery steam generator. Dostupné z WWW: <[http://www.ask.com/wiki/Heat\\_recovery\\_steam\\_generator](http://www.ask.com/wiki/Heat_recovery_steam_generator)>.
- [20] Villani K, Greef JD (2010) Exploiting the low-temperature end of WTE-boilers. In: IWWG, 3rd International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy
- [21] IPPC (2001) Reference Document on the Best Available Techniques to Industrial Cooling Systems, European IPPC Bureau Brussels, <http://eippcb.jrc.es>. Accessed 20 December 2010
- [22] [Http://www.massengineers.com](http://www.massengineers.com) [online]. 2001 [cit. 2011-04-04]. Isentropic Efficiency of a Steam Condensing Turbine. Dostupné z WWW: <[http://www.massengineers.com/Documents/isentropic\\_efficiency.htm](http://www.massengineers.com/Documents/isentropic_efficiency.htm)>.

- [23] DIRECTIVE 2010/75/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). *Official Journal of the European Union*. 17.12.2010, L 334, s. 17-119.

## 10. SEZNAM PŘÍLOH

### **Příloha 1**

Předloha k vytvoření výpočetního modelu: *data.xlsx* (pouze elektronická verze)

### **Příloha 2**

Výpočetní model: *výpočetní model.xlsx* (pouze elektronická verze)

### **Příloha 3**

Blokové schéma: *blokové schéma.sankey* (pouze elektronická verze)

### **Příloha 4**

Obrázková prezentace energetických toků: *energetické toky.pptx* (pouze elektronická verze)