



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ

ENERGY USE OF WASTE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Lachman

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

BRNO 2017



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Jakub Lachman**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Energetické využití odpadů

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Využívání odpadů pro energetické účely je jedním z hlavních témat současné české energetiky. Odpad jako druhotný zdroj energie se jeví jako optimální doplněk palivového mixu – šetří se primární palivo, snižuje se množství skládkovaného odpadu a tím i ekologická zátěž. Na druhou stranu se spalováním odpadů uvolňují velmi nebezpečné látky a snaha o maximální využití může vést k nižší motivaci separace využitelných složek odpadů.

Práce se bude zabývat i vznikem nežádoucích emisí a jejich eliminací.

### **Cíle bakalářské práce:**

Posuďte komunální odpad jako palivo.

Proveďte rešerši technologií energeticky zpracovávající odpad.

Proveďte rozbor eliminace rizik spojených s nakládáním s odpady.

### **Seznam doporučené literatury:**

TCHOBANOGLIOUS, George., Hilary. THEISEN a S. A. VIGIL. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues. New York: McGraw-Hill, c1993. ISBN 00-706-3237-5.

BALÁŠ, Marek. Kotle a výměníky tepla, Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá problematikou energetického využití odpadu. V první části je zhodnocen komunální odpad jako palivo, rozebrán vliv obsahu jednotlivých frakcí na jeho celkové vlastnosti, převážně výhřevnost, a porovnán s běžnými termicky využívanými tuhými palivy. Druhá část práce se zabývá rešerší technologií energeticky využívajících odpad. Je rozdělena podle termických metod na spalování, pyrolýzu a zplyňování. Každá ze tří částí obsahuje jak popis samotného procesu, tak i užitých technologií. Dále je také proveden rozbor eliminace rizik spojených s nakládáním s odpadem, jako je např. znečištění ovzduší nebo negativní dopad na recyklaci odpadu.

## **Klíčová slova**

Komunální odpad, energetické využití odpadu, spalování, ZEVO, čištění spalin

## **Abstract**

The bachelor's thesis deals with the Waste-to-Energy topic. The first part evaluates municipal solid waste (MSW) as fuel, analyzes the influence of its individual fractions on the overall properties, mainly the lower heating value, compares MSW with other conventional solid fuels which are thermally used. The second part of the thesis deals with Waste-to-Energy technologies. It is divided into three parts: combustion, pyrolysis and gasification. Each contains both the description of the process itself as well as the description of the applied technology. The last chapter contains some of the negative impacts of Waste-to-Energy technologies and a list of measures used to deal with them.

## **Key words**

Municipal Solid Waste, Waste-to-Energy, Combustion, WtE Plant, Flue Gas Treatment

## **Bibliografická citace**

LACHMAN, J. *Energetické využití odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 62 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Energetické využití odpadů* vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Marka Baláše, Ph.D. a s použitím podkladů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 25. 5. 2017

.....

Jakub Lachman

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce doc. Ing. Marku Balášovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky při tvorbě práce.



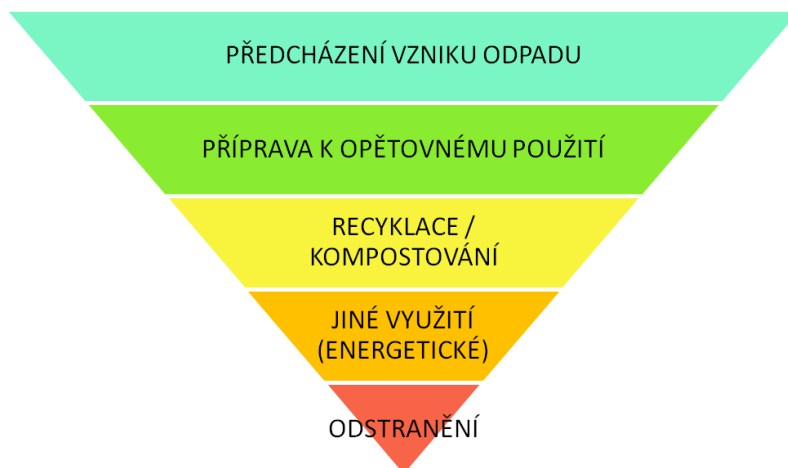
## OBSAH

ÚVOD .....	10
1 ODPADOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ.....	11
1.1 Pojem odpad .....	11
1.2 Produkce odpadů .....	11
1.3 Nakládání s opadem.....	12
1.3.1 Recyklace .....	13
1.3.2 Skládkování.....	14
2 KOMUNÁLNÍ ODPAD JAKO PALIVO .....	15
2.1 Rozbor.....	15
2.2 Vlastnosti.....	17
2.3 Využití.....	21
3 SPALOVÁNÍ ODPADU .....	23
3.1 Spalovací proces .....	23
3.1.1 Dokonalé a nedokonalé spalování .....	23
3.1.2 Spalovací zařízení.....	25
3.1.3 Produkty spalování odpadů .....	32
3.2 ZEVO .....	33
3.2.1 Schéma .....	34
3.3 Systém čištění spalin.....	36
3.3.1 Odstranění tuhých částic .....	37
3.3.2 Odstranění kyselé složky .....	38
3.3.3 Odstranění NOx.....	40
3.3.4 Odstranění PCDD/PCDF .....	42
4 DALŠÍ TERMICKÉ METODY .....	44
4.1 Pyrolýza.....	44
4.2 Zplyňování.....	46
5 ZEVO V ČR .....	49
5.1 SAKO Brno .....	49
5.2 ZEVO Malešice .....	49
5.3 TERMIZO Liberec .....	50
5.4 ZEVO Chotíkov.....	52
5.5 Porovnání .....	53
6 RIZIKA SPOJENÁ S EVO.....	54
ZÁVĚR .....	57
SEZNAM ZDROJŮ.....	58

## ÚVOD

V polovině roku 2008 přijal Evropský parlament směrnici o odpadech 75/442/ES, v které jsou zahrnuty základní principy nakládání s odpady v členských zemích EU-recyklace odpadů, snaha o co nejmenší produkci odpadů nebo princip, že každý stát se má o své dopady postarat sám. [6]

Směrnice také zavedla novou hierarchii nakládání s odpady. Všechny státy Evropské unie jsou podle ní povinny se postarat, aby byly odpady nějak využity – měly by se tedy recyklovat na jiné výrobky, nebo se využít k výrobě energie. Teprve pokud odpady není možné využít, mohou se bezpečným způsobem odstranit. [6]



Obr. 1 Hierarchie nakládání s odpady [47]

Jak jde ze schématu pro nakládání s odpady vidět, energetické využití je na předposledním místě hned před odstraňováním odpadů. Předcházení vzniku odpadu je samozřejmě nejdůležitější bod celé hierarchie, avšak toto řešení společně s opětovným použitím a recyklací dokáže eliminovat jen určité procento celkového množství odpadu, a i přes veškerou snahu množství vyprodukovaného odpadu na území ČR roste.

Plán odpadového hospodářství dále počítá s úplným zákazem skládkování do roku 2024. Při současném stavu, kdy se skládkuje zhruba 50 % vyprodukovaného komunálního odpadu, je tento cíl nerealizovatelný. Pokud k tomuto úplnému zákazu dojde, bude se muset značně navýšit míra recyklovaného odpadu a také nahradit způsob jeho odstranění. Jako ideální možnost se jeví jeho energetické využití. Spálením odpadu jsou jeho hmotnost a objem značně zredukovány. Současná zařízení jsou navíc stavěna tak, že energii vzniklou spalováním odpadu využívají k produkci tepla a elektrické energie.

## 1 ODPADOVÉ HOSPODÁŘSTVÍ

Odpadové hospodářství je dynamicky se rozvíjející oblastí národního hospodářství. Spadá pod něj činnosti jako např. předcházení vzniku odpadů, nakládání se vzniklými odpady, kontrola a péče o místo jejich trvalého uložení. Průmyslově a ekonomicky vyspělé země se začaly touto problematikou zabývat již v 80. letech minulého století. V České republice vznikl první zákon o odpadech v roce 1991. Nakládání s odpady v současnosti upravuje zákon č. 185/2001 Sb. Stanovuje práva a povinnosti osobám v oblasti odpadového hospodářství, klade důraz na předcházení vzniku odpadů a předepisuje hierarchii nakládání se vzniklými odpady. [1]

### 1.1 Pojem odpad

Z hlediska legislativy je odpad podle Zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech definován následovně:

- (1) Odpad je každá movitá věc, které se osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit. [2]

a komunální odpad potom:

- (2) Veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů, s výjimkou odpadů vznikajících u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání. [2]

Odpad podobný komunálnímu odpadu potom zahrnuje veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání a který je uveden jako komunální odpad v Katalogu odpadů. Katalog odpadů je součástí přílohy vyhlášky MŽP 381/2001 Sb., kde komunální odpad spadá do skupiny 20. [2, 3]

Zbytkovou směs komunálních odpadů, kterou již není možno dále třídít a využít nazýváme směsným komunálním odpadem (SKO). Ten bývá ukládán do běžných kontejnerů. V současné době končí bez dalšího využití na skládkách nebo je energeticky využit ve spalovnách. V Katalogu odpadů je směsný komunální odpad řazen mezi ostatní komunální odpady a tvoří podskupinu 20 03 01. [3, 4]

### 1.2 Produkce odpadů

Jedním z cílů odpadového hospodářství je snižovat nebo úplně zamezovat vzniku odpadů. S rostoucí životní úrovní se však množství vyprodukovaného odpadu (komunálního i průmyslového) zvyšuje.

Za rok 2015 bylo podle ČSÚ na území ČR vyprodukováno 26,9 mil. tun odpadu, což je o zhruba 10 % více než v předchozích několika letech. 86 % z celkového množství vyprodukovaných odpadů tvořily odpady z podniků, z toho největší zastoupení měly odpady ze stavebnictví (49 %), dále ze zpracovatelského průmyslu (19 %) a z činností souvisejícími s odpadními vodami (16%). [5]

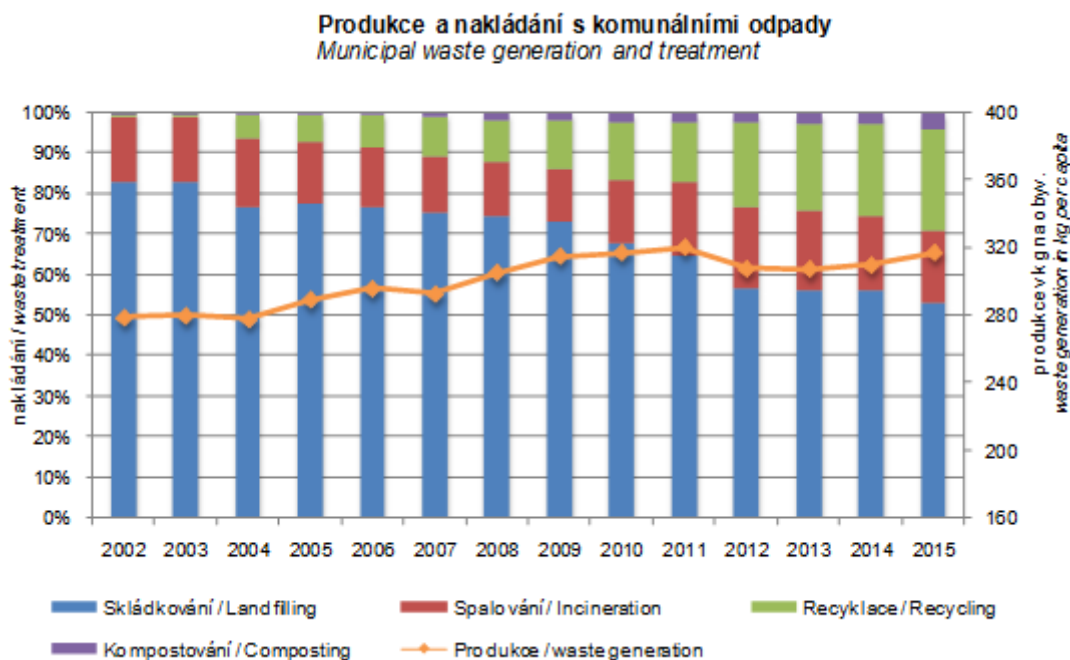
Tab. 1 Produkce odpadů v roce 2015 [5]

	Celkem	z toho:	
		nebezpečné	ostatní
Produkce odpadů celkem v tom:	<b>29 946 718</b>	<b>1 130 763</b>	<b>25 815 955</b>
<b>z podniků</b>	<b>23 247 371</b>	<b>1 115 892</b>	<b>22 131 479</b>
-odpad podobný komunálnímu odpadu	899 202	2 691	896 511
-zemědělství, lesnictví a rybářství	104 553	4 674	99 879
-těžba a dobývání	191 280	516 739	174 810
-zpracovatelský průmysl	4 562 791	516 739	4 046 052
-výroba a rozvod elektřiny, plynu, tepla a klimatizovaného vzduchu	1 166 186	10 850	1 155 335
-činnosti související s odpadními vodami, odpady a sanacemi	3 635 778	326 854	3 308 924
-stavebnictví	11 308 334	137 050	11 171 284
-doprava a skladování	227 851	22 262	205 589
<b>z obcí</b>	<b>3 699 347</b>	<b>14 871</b>	<b>3 684 476</b>
z toho			
<b>komunální odpad</b>	<b>3 337 336</b>	<b>6 756</b>	<b>3 330 580</b>

### 1.3 Nakládání s opadem

Za rok 2015 byla polovina všech vyprodukovaných komunálních odpadů uložena na skládky, čtvrtina recyklována a zhruba 18 % bylo zpracováno ve spalovacích zařízeních (z toho pouze necelé procento v zařízeních bez využití tepla). [5]

Následující graf zobrazuje vývoj produkce a nakládání s odpady za posledních 14 let. Jak lze vidět, recyklování a kompostování má stále rostoucí podíl na úkor skládkování. Značný vliv na to má politika MŽP, která se snaží zvýšit míru recyklace k roku 2020 až na 50 % a pomalu tak připravit ČR na zákaz skládkování od roku 2024, který je již zakotven ve stávajícím odpadovém zákoně a Plánu odpadového hospodářství ČR 2015-2024. Neznamená to však, že by se odpad dle navrhovaného znění nové normy měl přesunout ze skládek do spaloven. [7]



Graf 1 Produkce a nakládání s komunálními odpady v ČR [5]

### 1.3.1 Recyklace

Recyklace je způsob nakládání s odpadem, který směřuje k jeho dalšímu využití. Odpad je znovu zpracován na výrobky, materiály nebo látky, ať pro původní nebo pro jiné účely. Recyklace nezahrnuje energetické využití odpadu, ani přepracování na materiály, které mají být použity jako palivo nebo zásypový materiál. Při recyklaci jde o opakované (cyklické) uvedení materiálu zpět do výrobního cyklu. Mezi nejčastěji recyklované materiály patří různé typy plastů, sklo, papír, lepenka, železné a neželezné kovy, textil a pneumatiky.

Recyklaci lze rozdělit do dvou kategorií: na přímou a nepřímou. Při přímé recyklaci je odpad využíván opětovně bez jakýchkoliv úprav např. využití demontovaných součástí z autovraků ve vozidlech. Při nepřímé recyklaci je naopak nutné odpad upravit před jeho využitím jako druhotné suroviny pro další výrobu např. využití vytríděných kovů, skla a plastů. [8]

Hlavní výhodou recyklování je snížení množství produkovaného odpadu, který je využit na výrobu nových materiálů. To také šetří prvotní zdroje a energii a palivo, které by byly třeba k těžbě těchto zdrojů. Nevýhody recyklování spočívají ve fyzikálních a chemických vlastnostech recyklovaných materiálů. Kvalita recyklovaného materiálu bývá výrazně nižší než kvalita původního materiálu a každý materiál lze recyklovat pouze několikrát, např. papír se běžně recykluje 5 až 6krát. V některých případech je také využití prvotních surovin méně ekonomicky i časově náročné.

### 1.3.2 Skládkování

Skládkování je z historického hlediska nejstarší a také nejběžnější metoda nakládání s odpadem a ve většině zemí zůstává jako nejpoužívanější i nadále. Některé skládky jsou využívány jako překladiště odpadu, tedy pouze pro dočasné uložení odpadu, před jeho dalším využitím. Běžně však skládky slouží ke konečnému uložení odpadu. Každá skládka je určena pouze pro určitý druh odpadu, kvůli nutnému technickému zabezpečení. Dle tohoto kritéria se skládky dělí na tři typy:

- skládka na inertní odpady, tj. odpady nepodléhající biologickému rozkladu (stavební suť, zemina, kamení)
- skládka na ostatní odpady, jako je komunální odpad, dělená do podskupin podle obsahu biologicky rozložitelných látek
- skládka určená pouze pro nebezpečné odpady, jako jsou různé chemikálie, odpadní barvy apod. [9]

Skládkování má, podobně jako ostatní způsoby odstraňování odpadu, své postupy a technologie. Odpad se ukládá buď do otevřených prohlubní, nebo se vrší nad úroveň terénu. Oba způsoby lze kombinovat. Zvláštním případem jsou skládky podzemní, využívající přirozené nebo uměle vytvořené dutiny pod povrchem země (hlubinná injektáž). Každá skládka má několik ochranných vrstev. Základem je těsnicí vrstva, která brání úniku tzv. skládkových vod a výluhů do okolního prostředí a podzemních vod. Skládky jsou také vybaveny odvodňovací vrstvou, která prostřednictvím drenážního potrubí odvádí do speciálně zabezpečené jímky skládkovou vodu. Skládková voda je srážková voda, která naprší na plochu skládky a prosákne uloženým odpadem. [8]

ČR patří mezi „skládkovací velmoci“ EU. Dle dat za rok 2014 v ČR skončilo na skládkách 48,3 % komunálního odpadu, materiálově bylo využito pouze 34,8 % komunálního odpadu. Přitom závazné evropské cíle, které musí ČR k roku 2020 splnit, stanovují zvýšit podíl materiálového využití a recyklace na 50 % a snížit tak v případě ČR skládkování odpadu na minimálně 30 %. V roce 2030 pak pravděpodobně dojde i k celoevropskému omezení skládkování na pouhých 10 %. [7]

## 2 KOMUNÁLNÍ ODPAD JAKO PALIVO

Komunální odpad se řadí mezi paliva tuhá společně s černým a hnědým uhlím a biomasou. Hlavní rozdíl mezi odpadem a dalšími tuhými palivy je v jeho nestálém složení. Zatímco uhlí má specifické vlastnosti, které mívají minimální výchytky od svých stanovených průměrných hodnot, vlastnosti odpadu, jakožto heterogenní směsi látek o různém chemickém složení, jsou značně proměnlivé.

Složení odpadu závisí na několika faktorech. Největší vliv na něj však má lokalita, odkud je odpad svážen, a roční doba. U odpadu ze sídlištní zástavby bývá vyšší podíl spalitelného odpadu a menší podíl popelovin ve formě suti, popele nebo zeminy než u odpadu z venkovské zástavby. Složení odpadu se dále během roku mění. V létě se vlivem vyšší konzumace ovoce a zeleniny zvyšuje množství biologicky rozložitelného odpadu<sup>1</sup>, okolo Vánoc zase roste množství hořlavých látek. [10]

### 2.1 Rozbor

Palivo je látka organického původu, jejímž spalováním se uvolňuje energie (teplo), která se dále využívá např. k vytápění nebo k výrobě elektrické energie pomocí k tomu určených zařízení. Palivo se skládá z hořlaviny (h) a balastu. Hořlavina je část paliva nesoucí energetickou hodnotu. Balast je naopak ta část paliva, ze které nelze spalováním získat energii. Jedná se o vodu (W) a popelovinu (A). [11]

Voda je obsažena ve většině tuhých paliv. Její přítomnost je však nežádoucí, protože snižuje výhřevnost paliva. Voda odchází se spalinami ve formě vodní páry a zvětšuje tak jejich objem. Popelovina jsou minerální látky (křemičitany, uhličitany, sírany a další) obsažené v tuhém palivu. Spálením z popeloviny vzniká tuhý zbytek – popel, který ztěžuje přístup kyslíku k hořlavině. Částičky popela se také usazují na teplosměnných plochách, kde vytvářejí nánosy a zhoršují tak přenos tepla v kotli. [12]

Složení tuhých paliv se určuje hrubým rozbořem, při němž se stanoví poměrný obsah vody a popelovin a určí se výhřevnost paliva a prchavá a neprchavá hořlavina. [12]

Hrubý rozbor určuje poměr mezi hořlavinou (h), vodou (W) a popelovinou (A), proto platí:

$$h + A + W = 100\% \quad (2.1)$$

Z tohoto plyne, že čím nižší je obsah vody a popeloviny, tím vyšší bude obsah hořlaviny, a tedy i celková kvalita paliva. Palivo se bude snadněji spalovat a bude obsahovat více energie. Se snižujícím obsahem popeloviny se navíc zmenšuje emise škodlivých látek a náročnost údržby spalovacího zařízení. Obsah popeloviny lze ovlivnit jen minimálně, ale obsah vody lze snížit např. sušením. [11]

---

<sup>1</sup> Biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO) je takový odpad, který podléhá aerobnímu nebo anaerobnímu rozkladu. Při ukládání na skládky jsou tyto odpady významným zdrojem methanu.

Elementární obsah hořlaviny navíc určuje poměrné obsahy prvků hořlaviny (organické složky paliva). Ta se skládá z pěti základních prvků: uhlík – C, vodík – H, kyslík – O, dusík – N a síra – S. Uhlík, vodík a síra představují aktivní prvky hořlaviny a jsou nositeli chemicky vázané energie, která se jejich oxidací při spalovacím procesu uvolňuje. Kyslík a dusík naopak představují pasivní složku hořlaviny, neboť nepřinášejí žádnou energetickou hodnotu. Dusík a síra ovlivňují tvorbu znečišťujících látek (oxidu siřičitého SO<sub>2</sub> a oxidů dusíku NO<sub>x</sub>). [11]

Následující tabulka zobrazuje přibližné rozptyly chemického složení směsného komunálního odpadu dle BREF<sup>2</sup>. Odpad mimo hořlavých složek obsahuje i velké množství dalších prvků. Prvky jako síra, chlór, fluor, PCB<sup>3</sup>, těžké kovy a další těžko rozložitelné organické látky jsou složky nebezpečné. Všechny z nich, vyjma síry, se v běžných tuhých palivech vyskytují pouze ve stopovém množství. To klade vysoké nároky na proces čištění spalin a stabilizaci a neutralizaci produktů, které ze spalovny odcházejí.

Tab. 2 Prvkové složení komunálního odpadu dle BREF [10]

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

Je nutné podotknout, že dokument BREF je třeba brát jako pouze orientační. V mnoha případech mohou spalovny odpadu pouze v omezené míře kontrolovat přesný obsah odpadů, které přijímají. Na žádost společnosti KIC Odpady, a.s. byla v březnu 2010 zpracována rešeršní zpráva o skladbě SKO v ČR. Podkladem pro zprávu byly dílčí výsledky hodnocení komunálních odpadů z oblasti Ostravska a Brněnska. Na základě výsledků hodnocení lze konstatovat, že obecná charakteristika dle BREF je srovnatelná plně s běžně produkovaným komunálním odpadem na území ČR (viz tab. 5). [13]

<sup>2</sup> Referenční dokumenty BREF souhrnně uvádí informace o nejlepších dostupných technikách. Zpracovávají se pro jednotlivá průmyslová odvětví a podávají informace o úrovni techniky, které daná odvětví dosáhla.

<sup>3</sup> Polychlorované bifenylly jsou zdraví nebezpečné syntetické, organické sloučeniny vyráběné převážně od 30. let 20. století. V 70. letech bylo zjištěno, že se PCB v prostředí nerozkládají a hromadí se v potravních řetězcích. V současné době se již nevyrábějí, emise pocházejí z používání výrobků a z odpadů s obsahem PCB. [48]



## 2.2 Vlastnosti

Základním a zřejmě nejdůležitějším parametrem při posuzování paliva je teplo uvolněné spálením hmotnostní jednotky paliva (J/kg). V technické praxi se rozlišuje spalné teplo a výhřevnost.

**Spalné teplo**  $Q_s$  ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), anglicky HHV – Higher Heating Value, je teplo uvolněné dokonalým spálením jednotkového množství paliva při ochlazení paliva na původní teplotu, přičemž voda ve spalinách zkondenzuje, tj. je v kapalně fázi. Určuje se laboratorně v kalorimetrech podle normy ČSN ISO 1928<sup>4</sup>. [12]

**Výhřevnost**  $Q_i$  ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), anglicky LHV – Lower Heating Value, je teplo uvolněné dokonalým spálením jednotkového množství paliva při ochlazení paliva na původní teplotu, přičemž voda ve spalinách nekondenzuje, tj. zůstane v plynné fázi. Určuje se výpočtem ze změřeného spalného tepla. [12]

Z daných definic vyplývá, že spalné teplo je výhřevnost navýšená o teplo, které se získá kondenzací vody spalováním, proto je jeho energetická hodnota vyšší než u výhřevnosti. V našich podmínkách se však nepočítá se spalným teplem, ale s výhřevností, neboť z důvodů koroze mají spaliny většiny kotlů teplotu nad rosným bodem a vodu proto v plynné fázi.

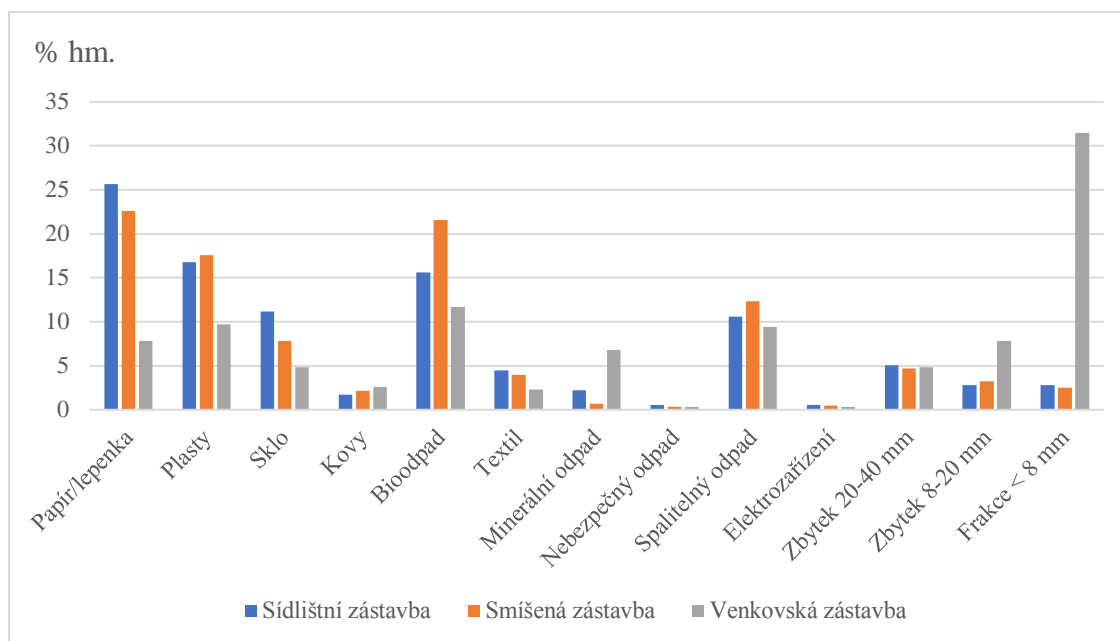
Jak již bylo zmíněno, komunální odpad je heterogenní směs více látek, které se navzájem výrazně liší svou výhřevností. Celková výhřevnost odpadu je tedy proměnlivá a závisí převážně na procentuálním zastoupení jednotlivých složek. V případě netříděného komunálního odpadu se výhřevnost obecně udává na úrovni 8 až 12 MJ/kg, někdy 9 až 11 MJ/kg. [14]

Následující tabulka a graf udávají přibližné výhřevnosti jednotlivých frakcí odpadu, respektive jejich přibližné procentuální zastoupení ve směsném komunálním odpadu.

Tab. 3 Výhřevnost jednotlivých složek odpadu [10]

<b>Druh odpadu</b>	<b>Výhřevnost [MJ/kg]</b>
Papír	15,7
Plasty	32,7
Polyetylen	43,4
Polystyren	38,0
PVC	22,5
Textil	18,3
Potraviny	3,2
Smetky	6,0
Štěpka, dřevo	12,4
Sklo	0,2

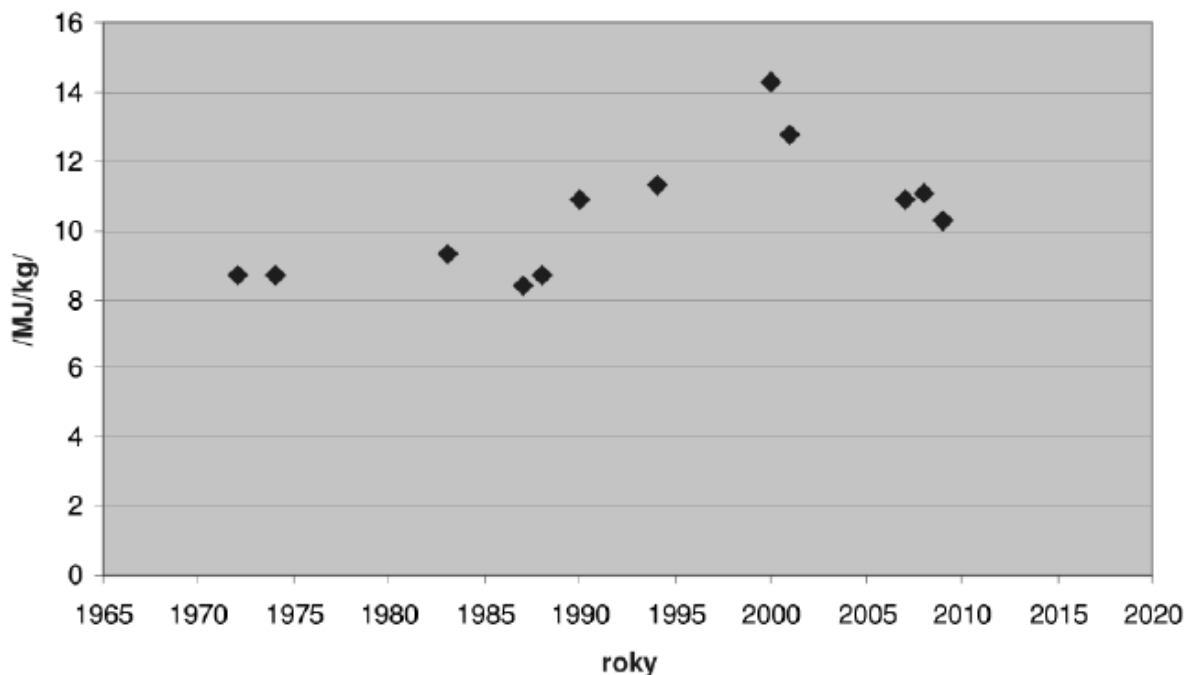
<sup>4</sup> Norma specifikuje metodu pro stanovení spalného tepla tuhých paliv při konstantním objemu a referenční teplotě 25 °C v kalorimetru s tlakovou nádobou, kalibrovanou spalněním certifikované kyseliny benzenové. [49]



Graf 2 Průměrný obsah složek látkových skupin v KO z domácností. Převzato a upraveno z [55]

Významný vliv na výhřevnost odpadů má ale také úroveň třídění vybraných komodit (papír, plast atd.), kdy s intenzifikací separace dochází ke značné změně výhřevnosti zbytkového komunálního odpadu. Odstraněním papíru, lepenky a plastů výhřevnost klesá, naopak odstraněním skla a kovů roste. Odseparováním organických odpadů, jako jsou zbytky potravin a zahradní odpady, dochází ke snížení vlhkosti vsádky, a tudíž i zvýšení výhřevnosti.

Během posledních deseti let se vlivem separace výhřevnost snížila o více jak 10 % a dá se počítat s tím, že tento trend bude dále pokračovat. [14]



Graf 3 Vývoj výhřevnosti domovních odpadů [15]

Graf 3 zachycuje historický vývoj výhřevnosti domovních odpadů v ČR. Od roku 1970 do roku 1990 se výhřevnost odpadu ze sídlištní zástavby držela mezi 8 až 10 MJ/kg. Prudký nárůst nastal v 90. letech. Důvodem bylo velké zvýšení obsahu plastů (PET obaly) a papíru.

V souvislosti s vývojem separace papíru a plastů došlo ke snížení obsahu těchto složek v domovních odpadech (papír: 2001 – 22,50 % hm., 2009 – 16,26 % hm.; plasty: 2001 – 15,30 % hm., 2009 – 14,20 % hm.) s výrazným dopadem na jejich celkovou výhřevnost. [15]

Nežádoucí z hlediska výhřevnosti je také vlhkost paliva. S rostoucím obsahem vody v palivu výrazně klesá jeho výhřevnost. Obsah vody v domovních odpadech se pohybuje mezi 23–32 % hm v závislosti na druhu domovního odpadu. V průměru nižší vlhkost mají domovní odpady z venkovské zástavby. [15] Následující tabulka zobrazuje rozsah a běžné hodnoty vlhkosti jednotlivých složek odpadu.

Tab. 4 Přibližné hodnoty vlhkosti složek odpadu [16]

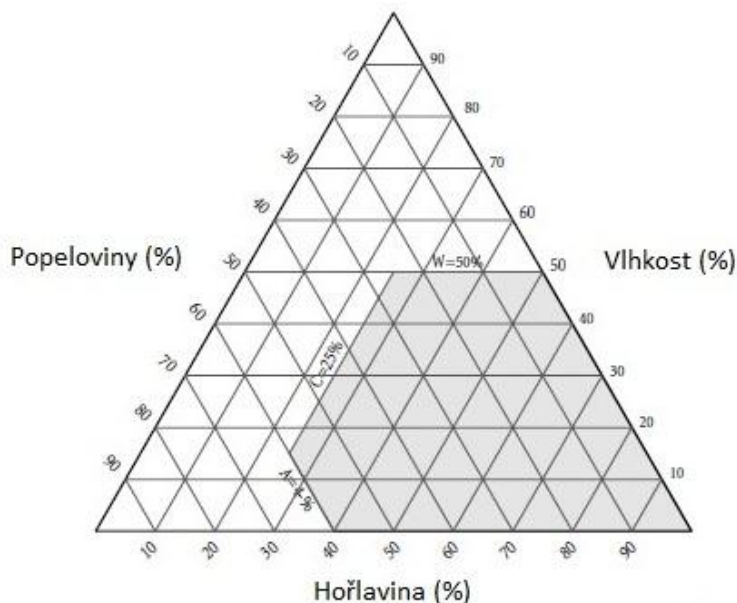
Složka	Vlhkost [%]	
	Rozsah	Běžná
Zbytky jídla	50–80	70
Papír	4–10	6
Lepenka	4–8	5
Plasty	1–4	2
Textil	6–15	10
Guma	1–4	2
Kůže	8–12	10
Zahradní odpad	30–80	60
Dřevo	15–40	20
Sklo	1–4	2
Plechovky	2–4	3
Neželezné kovy	2–4	2
Železné kovy	2–6	3
Suť	6–12	8
Komunální odpad	15–40	20

Pokud má spalování odpadů probíhat bez potřeby pomocného paliva (zemní plyn, lehký nebo těžký topný olej), musí spalovaný materiál obsahovat:

- pod 50 % vody (vlhkosti),
- pod 40 % popelovin a nespalitelných látek v sušině spalovaného materiálu,
- nad 25 % prchavé hořlaviny.

Ve všech ostatních případech je nezbytný trvalý provoz pomocného stabilizačního hořáku ve spalovací komoře, který v první řadě spalovaný materiál dosouší a pak zajišťuje jeho zapálení. Jsou používány stabilizační hořáky na zemní plyn nebo topné oleje (LTO, TTO). [4]

Grafickou formou jsou tyto podmínky znázorněny v Tannerově diagramu. Šedá oblast vyznačuje komunální odpad vhodný ke spalování.



Obr. 2 Tannerův diagram KO [17]

Tab. 5 Složení SKO z území Ostravska, Brněnska a dle BREF [13]

Parametr	BREF	Ostravsko	Brněnsko
Výhřevnost (MJ/kg)	7–15	11,7	10,6
Voda (%)	15–40	33,7	33,0
Popel	20–35	16,5	18,8
Uhlík (% sušiny)	18–40	40,8	41,8
Vodík (% sušiny)	1–5	13,1	5,5
Dusík (% sušiny)	0,2–1,5	0,6	1,2
Kyslík (% sušiny)	15–22	15,1	15,6
Síra (% sušiny)	0,1–0,5	0,2	0,2
Fluor (% sušiny)	0,01–0,035	-	-
Chlor (% sušiny)	0,1–1	0,7	0,2
Olovo (mg/kg sušiny)	100–2000	75,0	535
Kadmium (mg/kg sušiny)	1–15	5,9	6,2
Měď (mg/kg sušiny)	200–700	53,3	36,5
Zinek (mg/kg sušiny)	400–1400	136,1	903
Rtuť (mg/kg sušiny)	1–5	6,9	1,7
Thalium (mg/kg sušiny)	<0,1	-	0,08
Mangan (mg/kg sušiny)	250	140,0	166
Vanad (mg/kg sušiny)	4–11	-	6,84
Nikl (mg/kg sušiny)	30–50	45,0	21
Kobalt (mg/kg sušiny)	3–10	7,2	9,5
Arsen (mg/kg sušiny)	2–5	3,6	3
Chrom (mg/kg sušiny)	40–200	56,0	25
Selen (mg/kg sušiny)	0,21–15	-	-
PCB (mg/kg sušiny)	0,2–0,4	-	-
PCDD/F (ng I-TE/kg)	50–250	-	-

### 2.3 Využití

Dle výše uvedeného rozpětí výhřevnosti je komunální odpad jako vstupní materiál relativně dobře spalitelný. Jeho značnou nehomogenitu lze částečně odstranit promícháváním, ale i přesto jsou výkyvy výhřevnosti relativně velké. Energetická zařízení jsou vždy navrhována pro dané rozpětí vlastností paliva. Nelze tedy libovolně energeticky využívat odpad rozdílných parametrů, tzn. nelze využívat odpad, na který nejsou zařízení navržena. Pro zajištění stabilního procesu hoření a zároveň splnění legislativních požadavků je nezbytné dodržet jistou kvalitu paliva, a to z pohledu výhřevnosti, obsahu vody a popelovin. Jako hranice spalitelnosti odpadu byla stanovena mez výhřevnosti zhruba 7,6 MJ/kg. Této mezi spalitelnosti se částečně přibližují pouze odpady z venkovské zástavby, které se však pro provoz současných spaloven v ČR nepoužívají. Při spalování odpadu o nižší výhřevnosti by bylo nezbytné přivedení kvalitnějšího paliva. Možností je například stabilizace pomocí plynových hořáků, avšak takovéto opatření naráží na požadavek účinnosti energetického využití odpadu dle směrnice 2008/98/ES<sup>5</sup>. [14]

Běžný komunální odpad používaný ve spalovnách se svou výhřevností přibližuje hnědému uhlí, které se jako palivo v tepelných elektrárnách na území ČR používá nejčastěji. Spálením jedné tuny komunálního odpadu lze nahradit zhruba 600 až 850 kg hnědého uhlí nebo 400 kg černého uhlí. V ČR se ročně vyprodukuje zhruba 3,3 mil. tun komunálního odpadu. Jeho plné energetické využití by dokázalo ušetřit okolo 2 mil. tun hnědého uhlí nebo 1,4 mil. tun černého uhlí. Pro srovnání, se u nás ročně vytěží zhruba 45 mil. tun hnědého a 12 mil. tun černého uhlí. Ve skutečnosti se však energeticky využije jen 600 tisíc tun komunálního odpadu, tedy okolo 20 % jeho celkové produkce. [18] Odpad se jako palivo nebo doplněk primárního paliva používá kromě spaloven i v teplárnách nebo zařízeních pro výrobu stavebních hmot, jako jsou cementárny.

Díky svému energetickému potenciálu se odpad jeví jako doplněk či možná náhrada fosilních paliv v energetických zařízeních. Spálením odpadu také dochází k razantnímu snížení jeho objemu až na desetinu původní hodnoty a ke snížení jeho hmotnosti na čtvrtinu. To má za následek výrazné snížení množství odpadu ukládaného na skládky. Spálení odpadu navíc umožňuje snadnější separaci železného šrotu a jeho následné využití.

---

<sup>5</sup> Výpočet energetické účinnosti definuje příloha č. 12 k zákonu č. 185/2001 Sb. Pro zařízení provozovaná před 1. lednem 2009 musí dosáhnout minimálně hodnoty 0,6 a pro zařízení novější 0,65. Přivedení dodatečného paliva (i velmi malého množství) má značný dopad na výslednou účinnost a požadavek nelze plnit. [14]

Tab. 6 Množství spáleného odpadu podle zařízení. Převzato a upraveno z [19]

Provozovna	Provoz od roku	Kapacita (t/rok)	Množství spáleného odpadu (t/rok)		
			2013	2014	2015
<b>Zařízení pro tepelné zpracování komunálního odpadu</b>					
ZEVO Malešice	1998	330 000	304 166	311 900	313 994
ZEVO Chotíkov	2016	95 000	0	0	0
TERMIZO Liberec	1999	96 000	95 817	93 541	91 524
SAKO Brno	1989	248 000	237 643	237 368	226 387
<b>Zařízení pro tepelné zpracování průmyslového a zdravotnického odpadu</b>					
SUEZ Divize Ostrava	2000	21 200	18 226	21 054	20 404
SUEZ Divize Čechy	1993	16 000	14 190	15 961	13 018
Fakultní nemocnice v Motole	2005	2940	2030	1292	1188
AVE Kralupy s.r.o	1976	10 000	9 644	10 000	10 000
Purum s.r.o	1993	3500	241	2557	2925
SUEZ spalovna Plzeň	1993	2500	2380	2438	2120
CHS Epi, a.s.	2002	5000	2224	1865	2431
MEGWASTE-EKOTERM, s.r.o.	1993	4000	3279	3218	3305
SPL Jablonec nad Nisou	2000	2200	1755	1827	1893
DEZA, a.s.	2000	10 000	8025	7101	7010
Nemocnice Znojmo	1994	780	609	596	661
Fakultní nemocnice Hradec Králové	1996	1000	934	967	667
Nemocnice Pardubického kraje	1994	750	945	743	644
Další (celkově 10)	-	16 514	14 101	14 097	14 496

### 3 SPALOVÁNÍ ODPADU

Spalování odpadu spadá z technologického hlediska pod termické metody zpracování/odstranění odpadu společně s pyrolýzou a zplyňováním. Při termických metodách dochází k působení na odpadní látku teplotou přesahující meze její chemické stability, popřípadě ke spolupůsobení teploty a kyslíku v prostředí s regulovaným obsahem kyslíku. Těmito postupy lze původně nebezpečné látky v hořlavých odpadech přeměnit na poměrně neškodné produkty. Termické metody však nejsou konečným způsobem odstranění odpadů, vznikají při nich vedlejší produkty, jimiž je popel (struska) a znečištěné plynné a kapalné látky. [20]

#### 3.1 Spalovací proces

Spalování odpadů lze definovat jako řízené hoření odpadů za vysokých teplot a stechiometrickém nebo vyšším obsahu kyslíku v zařízení určeném pro účinné a dokonalé spalování. Dokonalé spalování zahrnuje konverzi veškerého uhlíku na oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), vodíku na vodu  $\text{H}_2\text{O}$  a síry na oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ). Z hlediska druhu chemické reakce je spalování exotermické, tzn. že se při něm teplo uvolňuje. [20]

Pracovními látkami spalovacího procesu jsou:

- Palivo, což je obecně jakákoliv hořlavá látka s dostatečnou výhřevností a aktivitou okysličovacích pochodů.
- Okysličovadlo, což je látka obsahující kyslík. V praxi bývá nejčastějším okysličovadlem vzduch. Palivo a okysličovadlo označujeme též jako vstupní látky spalovacího procesu.
- Produkty spalovacího procesu vznikají jako výsledek chemické reakce mezi palivem a okysličovadlem. Patří k nim plynné spaliny a tuhý nebo kapalný zbytek po spalování.

K tomu, aby spalování probíhalo požadovaným způsobem, je nutno zajistit určité základní podmínky:

- dostatečné množství spalovacího vzduchu, který by měl být přiváděn s přebytkem 1,5 až 2,0 vůči stechiometrii spalovacích reakcí,
- dostatečný vývin tepla k zahřátí odpadu na zápalnou teplotu,
- zajištění zdržení spalin v komoře dodatečného spalování, případně v prostoru dodatečného spalování při teplotě  $850\text{ }^\circ\text{C}$  respektive  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  pro odpady s obsahem halogenových sloučenin, po dobu minimálně 2 sekund, s obsahem kyslíku minimálně 6 %. [20]

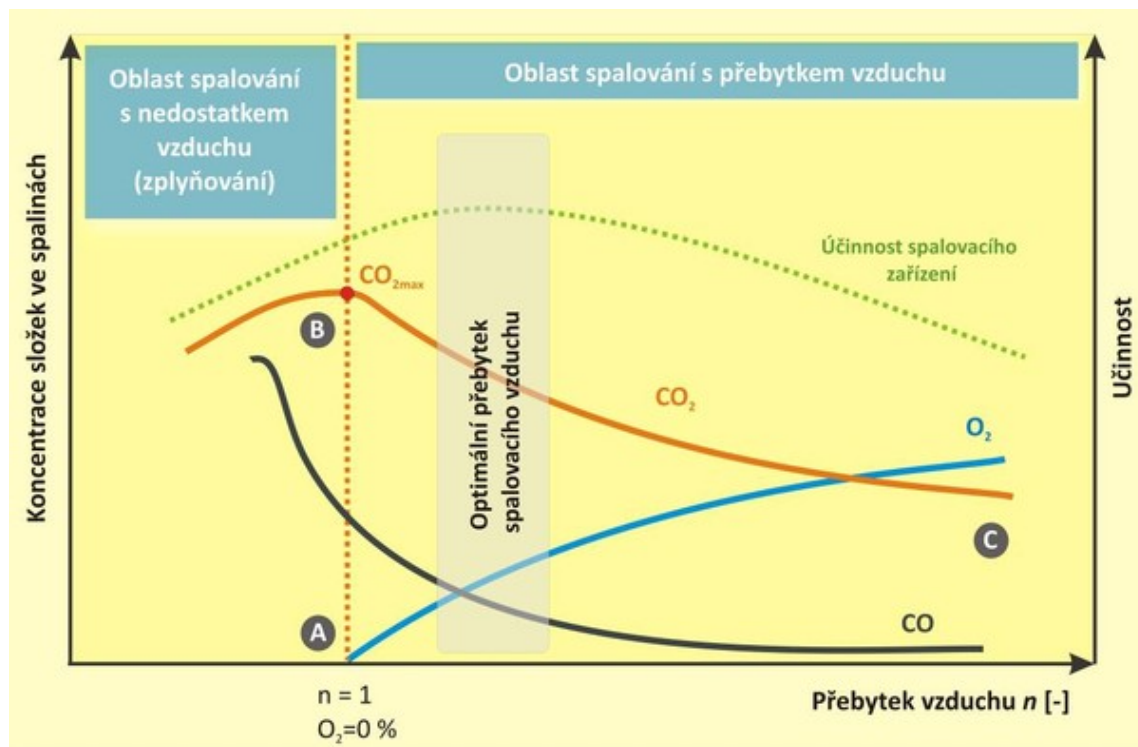
Odpadní spaliny sestávají především z dusíku  $\text{N}_2$ , oxidu uhličitého  $\text{CO}_2$ , vodní páry  $\text{H}_2\text{O}$  a přebytečného kyslíku  $\text{O}_2$ . Ostatní plynné látky ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2 + \text{SO}_3$  a  $\text{NO} + \text{NO}_2$ ), které vznikají spalováním dalších prvků obsažených v odpadech ( $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{S}$  a  $\text{N}$ ), lze při výpočtech pro stanovení spotřeby spalovacího vzduchu a množství vznikajících spalin zanedbat, neboť se vyskytují pouze ve stopovém množství. Na jejich obsahu však závisí požadavky na technické zabezpečení spalovny k čištění spalin. [20, 21]

##### 3.1.1 Dokonalé a nedokonalé spalování

Spalovací rovnice, které bilančně popisují reakci mezi hořlavinou a kyslíkem, zjednodušeně vyjadřují množství kyslíku (vzduchu), které je potřeba k průběhu reakce. Toto množství se nazývá stechiometrické (teoretické). V reálném případě je však toto teoretické množství nedostatečné, proto je třeba přivádět vzduch v nadstechiometrickém množství vůči obsahu jednotlivých

spalitelných prvků (C, H, S) v hořlavině, aby docházelo k dokonalému spalování, tedy k oxidaci uhlíku přítomného v hořlavině odpadu na neškodný  $\text{CO}_2$ . Toto množství spalovacího vzduchu přivedeného do spalovací pece je charakterizováno součinitelem přebytku vzduchu  $\lambda$ , tedy poměrem mezi množstvím vzduchu skutečně přivedeného a teoretickým množstvím vzduchu.

V případě nedokonalého spalování, tedy při nedostatečném okysličení hořlavých prvků odpadu, nedochází k úplné oxidaci paliva až na konečné produkty, ale spaliny odcházející z prostoru spalování obsahují hořlavé složky. Produktem nedokonalého spalování je toxický oxid uhelnatý CO, případně nedopal hořlavých složek prchavé hořlaviny či plyny vzniklé zplyněním paliva ( $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ). V praxi je nedokonalé spalování jev nežádáný. Hořlaviny při něm odchází se spalinami, tím se zvyšuje ztráta chemickým nedopalem a snižuje se tak účinnost kotle. [12, 20]



Obr. 3 Schéma závislosti jednotlivých složek ve spalinách na přebytku vzduchu [21]

S rostoucím množstvím přiváděného vzduchu rostou i nároky na spotřebu paliva, potřebného k ohřátí spalin na požadovanou teplotu. Obsah vzduchu ovlivňuje i tvorbu emisí  $\text{NO}_x$ . Doporučené množství spalovacího vzduchu vyjádřené pomocí součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  se běžně udává v rozmezí 1,5 – 2,0. Záleží však také na druhu paliva a konstrukci spalovací pece, tedy na mísení odpadu s přivedeným vzduchem. [12, 20, 21]

Pro zajištění optimální oxidace hořlavých složek odpadů je obvykle do spalovací roštové pece přiváděn spalovací vzduch ve dvou stupních [20]:

- Primární vzduch, který je nezbytný pro proces hoření odpadu a rovněž chladí konstrukci roštu, je přiváděn pod odpadové lože a prochází vrstvou odpadu ze spodní části roštu.
- Sekundární vzduch je přiváděn do reakční komory nad povrch odpadového lože za účelem lepšího vyhoření nespálených složek hořlavých plynů.



## Pochody probíhající při spalování

Při spalování odpadů postupně probíhají tyto pochody [22]:

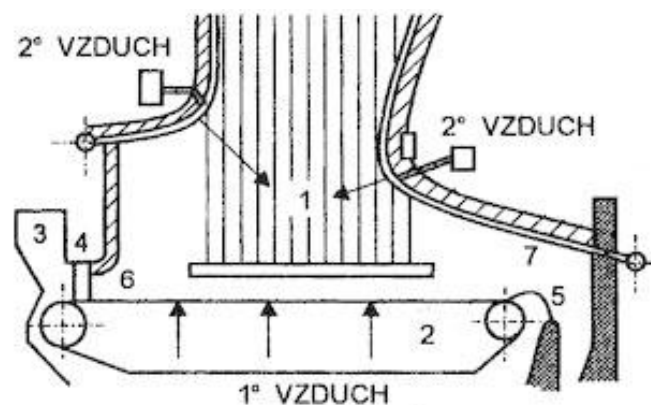
1. **předsoušení odpadů:** odpady se předsoušejí sáláním plamene z dalších pásem spalování a vzduchem, který se přivádí pod rošt (s teplotou kolem 100 °C),
2. **odplyňování odpadů:** sáláním plamene nebo klenby spalovacího prostoru se odpady ohřívají na teplotu 200–600 °C, přičemž již dochází k reakcím mezi kyslíkem a uhlíkatými látkami v odpadech, které se začínají odplyňovat a oxidovat. Vytvářejí se přitom hořlavé plyny,
3. **zapálení odpadů:** v této fázi, jež se prolíná s druhou fází, vznikají na povrchu odpadového lože místní ložiska hoření,
4. **spalování plynů:** lože odpadů povrchově prohořívá a dalším přiváděním spalovacího vzduchu vznikají nová ložiska hoření. Plyny se vyvíjejí ve větší hloubce, procházejí vyšší vrstvou odpadů a nad nimi vyhořívají. V samotném loži je teplota 500-800 °C, vzduch se přivádí v této fázi s přebytkem 10–30 %,
5. **hoření:** hoří plyny i vzniklý polokoks. Teplota se zvyšuje až na 1 000 – 1 100 °C, teplo vyvinuté v loži se odvádí spalinami, v loži vzniká popel a škvára. Přebytek vzduchu bývá okolo 40 %,
6. **vyhořívání a odvádění tepla:** plyny i polokoks dále vyhořívají a vzniká velké množství tepla, které je nutno odvádět. Spalovací vzduch se přivádí v přebytku 20 až 40 %, teplota je až 1200 °C, musí se udržovat pod bodem tavení popela vysokým přebytkem vzduchu. Z roštu odchází popel, škvára a nespalitelné zbytky odpadů.

### 3.1.2 Spalovací zařízení

Kotle určené ke spalování komunálního odpadu jsou nazývány spalovenské kotle. Odpady upravené drcením mohou být spalovány i ve fluidních ohništích. Ve většině dnes provozovaných zařízeních se však používají ohniště se šikmým roštem. [12]

#### Roštová ohniště

Základem je spalování na roštích. Ohniště jsou buďto vybavena pevnými rošty (pro malé výkony) nebo pohyblivými rošty (pro střední a velké výkony). Soustava roštnic různého tvaru je přizpůsobena vlastnostem spalovaného odpadu (zejména jeho zrnitosti) a podmínkám spalovacího procesu. Složením jednotlivých roštnic k sobě vzniká souvislá roštová plocha, na níž během spalování spočívá vrstva odpadu. Mezery, které v roštu vznikají při skládání jednotlivých roštnic k sobě, současně umožňují přívod spalovacího vzduchu k vrstvě odpadu. Uvedené konstrukční uspořádání roštu rovněž umožňuje odstraňování škváry, která na něm zbyla po spálení paliva. Na správné funkci roštu závisí kvalita spalovacího procesu i hospodárnost provozu. [22]



Obr. 4 Základní části roštového ohniště [52]

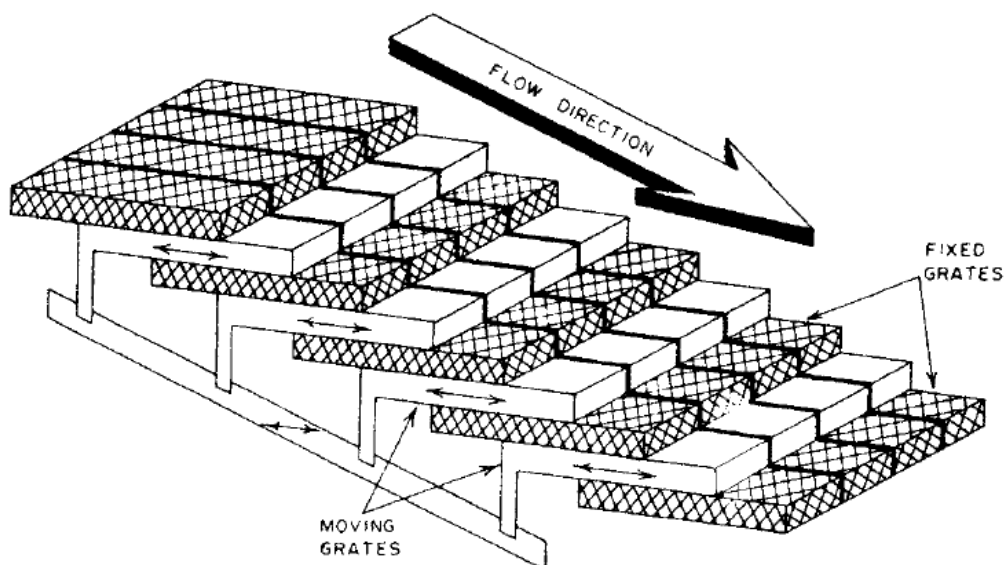
Ohniště (1) je ohraničeno roštem (2), přední a zadní klenbou (6) a (7) a stěnami ohniště. Palivo se na rošt dostává ze zásobníku (3) přes hradítko výšky paliva (4) na rošt. Pevný zbytek – škvára odchází přes škvárový jizek (5) do škvárové výsypky. Kotle se vyznačují poměrně velkým množstvím škváry, až 60–70 % všech tuhých zbytků. [52]

Pro spalování komunálních odpadů jsou nejčastěji používána právě roštová ohniště. Důvodem je provozní spolehlivost a dostatek zkušeností s jejich provozem a údržbou ze spalování tuhých fosilních paliv. Ohniště také nevyžaduje jemné mletí a homogenizaci paliva. Nevýhodou tohoto typu ohniště je nízká intenzita spalování, způsobující nižší teplotu hoření (800–900 °C), a nehomogenní prohořívání odpadu na roštu. Proto bývají roštová ohniště vylepšována přívodem sekundárního a terciálního spalovacího vzduchu na výstupu z ohniště a někdy také podpůrným hořákem. [4, 51]

Podle způsobu přemísťování paliva v roštovém ohništi rozeznáváme:

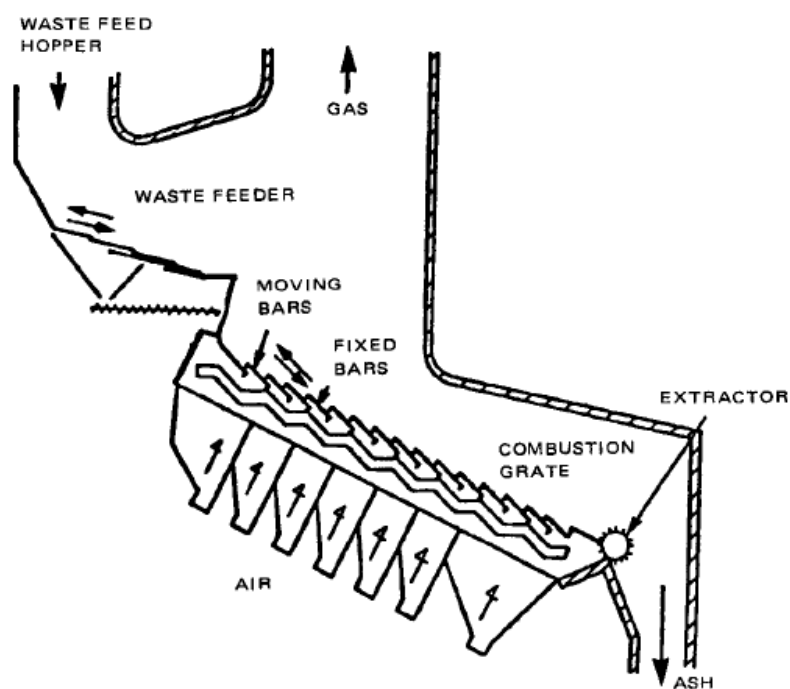
- rošty s nehybnou vrstvou paliva (pevné rošty),
- rošty s občasným přemísťováním paliva (rošty stupňové a přesuvné),
- rošty s trvalým přemísťováním paliva (rošty pásové a řetězové).

Z hlediska spalování odpadů mají největší význam právě rošty s občasným přemísťováním paliva. Rošty tohoto typu jsou tvořeny roštnicemi, kterými je možno různými mechanismy pohybovat. Patří sem rošty s výkyvnými roštnicemi, šikmé rošty s přímým posunem paliva, vrativné rošty a rošty s válcovými roštnicemi. Občasným pravidelným či nepravidelným pohybem roštnic dochází k rozrušování spečené škváry, promíchávání paliva a odvodu popele z ohniště. Posun roštu je prováděn elektromotorem s táhly nebo hydraulicky. [12]



Obr. 5 Přesuvný rošt [16]

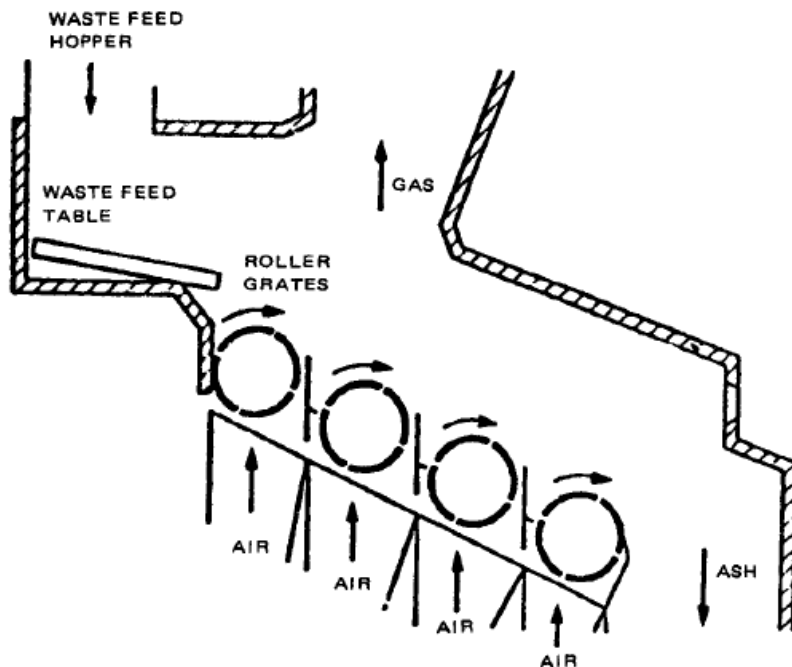
Přesuvný rošt je v podstatě rošt stupňovitý. Jeho plochu tvoří úzké roštnice, z nichž některé jsou pevné a některé jsou ovládané táhly, která umožňují horizontální posun. Povrch roštu bývá skloněn od 15 až 20°. Pohybem roštnic dochází k postupnému sesouvání paliva a rozduřování případné spečené vrstvy. [12]



Obr. 6 Vratisuvný rošt Martin [16]

Vratisuvné rošty jsou svou konstrukcí podobné roštům přesuvným, ale roštnice nejsou posazeny po směru pohybu paliva, nýbrž proti němu. Tím rošt dosahuje daleko pronikavějšího prolamování vrstvy a promíchávání paliva ve vrstvě. Podle uspořádání roštnic se dělí na kaskádové rošty a vratisuvné rošty typu Martin. Kaskádový rošt má vodorovný povrch, roštnice se pohybují napříč toku paliva se sklonem k výstupu roštu. Doba setrvání paliva na roštu je kratší, palivo se promíchává především v příčném směru.

Vrativý rošt typu Martin (Obr. 6) je silně skloněný ve směru od vstupu paliva k výsypce. Roštnice se pohybují proti toku paliva, spodní žíhaná vrstva postupuje zpět od konce roštu ke vstupu paliva, přes žhavou vrstvu přepadá čerstvé palivo z výsypky. U tohoto typu roštu se dosahuje dlouhých dob setrvání paliva na roštu, dobrého promísení a prohoření celé vrstvy. [12]

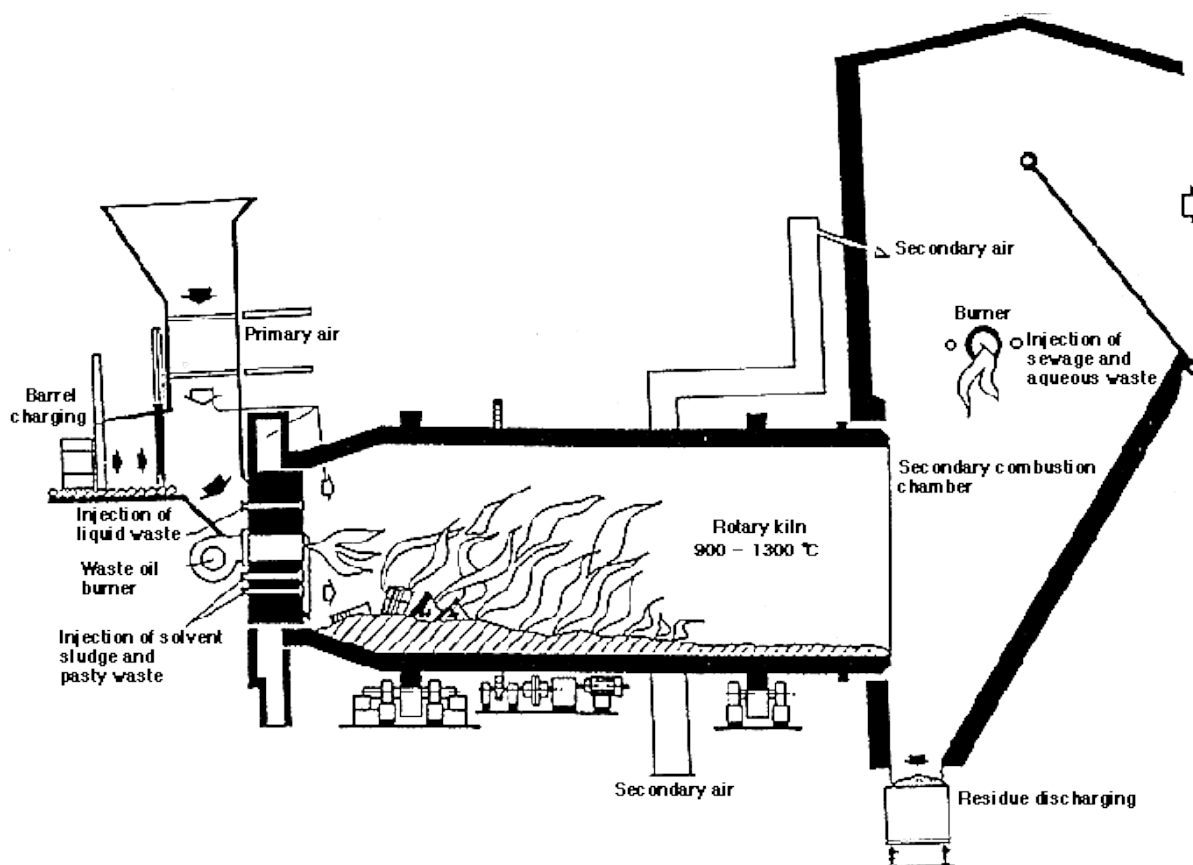


Obr. 7 Válcový rošt [16]

Válcový rošt se skládá z několika otáčejících se dutých válců. Palivo je přiváděno násypkou a rychlost pohybu po roštu je regulována rychlostí otáčení válců (rychlost každého válce je také možno regulovat). Primární vzduch je zaváděn do spalovací komory štěrbinami ve válcích. Rošty se používají výhradně pro kotle na spalování netříděného komunálního odpadu. [12]

### Rotační pece

Rotační pece představují univerzální spalovací zařízení a jsou užívány ke spalování tuhých odpadů, suspenzí, kalů a past. Tato zařízení operují v teplotním rozmezí od 800 °C do 1600 °C tak, že rezidua vznikají v rozmezí od suchých, volně tekoucích materiálů po spečenou strusku. Rotační pece jsou vyžděné válce s mírným sklonem, které se pomalu otáčejí a tím zajišťují mísení odpadů. Obvykle bývají užívány ve dvoustupňovém provedení. Jako první stupeň, ve kterém probíhá spalování, substechiomrické spalování nebo pyrolýza za teplot kolem 800–900 °C, se používá rotační pec, přičemž následný druhý stupeň je tvořen dohořivací komorou, v níž je teplota typicky nad 1200 °C. Při hoření odpadu v rotační peci je teplo předáváno oproti roštovým pecím navíc kondukcí žhavé vyždívky na odpadové lože na ní se nacházející. V důsledku neustálého pohybu odpadu v rotační peci dochází k dobrému styku hořlaviny s okysličovadlem. Spaliny jsou zpravidla vedeny v souprudu se směrem pohybu odpadu do prostoru dodatečného spalování, kde jsou spáleny dosud nespálené podíly procesu hoření. Tento typ pecí bývá často používán pro spalování průmyslových a nebezpečných odpadů. [4, 20, 22, 51]



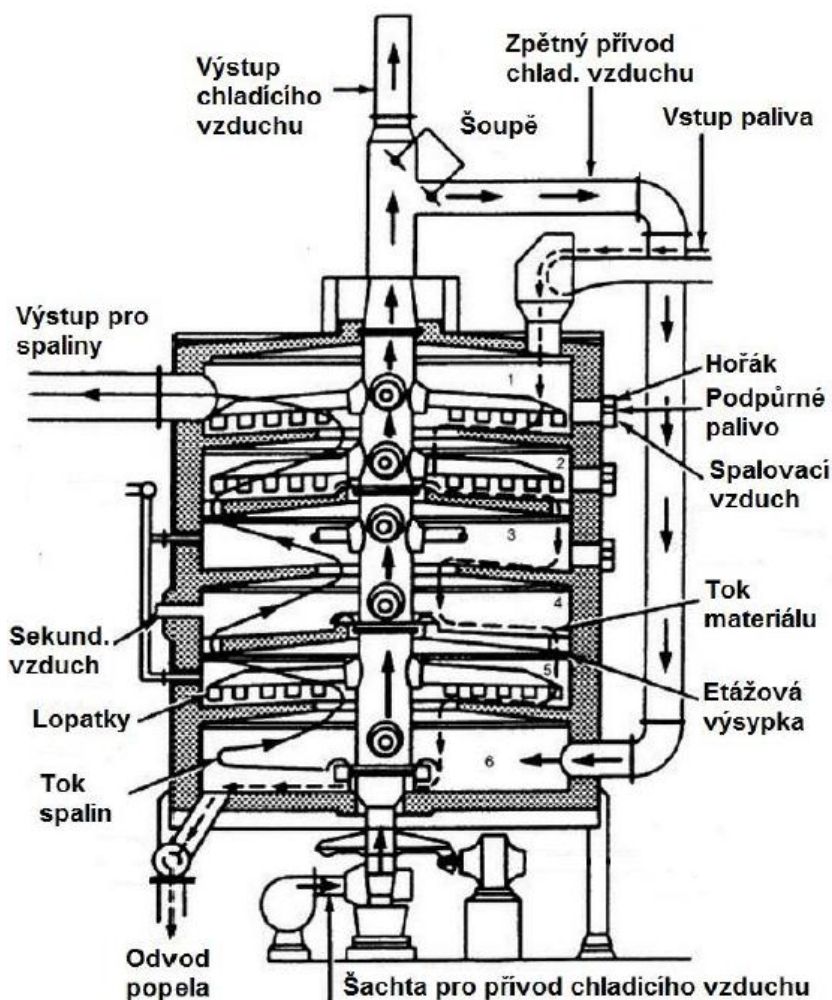
Obr. 8 Schéma rotační pece s dohořivací komorou [53]

### Muflové pece

Popřípadě spalovny s muflovým ohništěm, se používají zejména ke spalování zdravotnických odpadů, ropných produktů obsahujících kaly z čistíren, zbytků barev, laků a odpadů z plastů. Jedná se o bezroštové pece. Uvnitř zařízení je umístěna keramická podložka nebo vana, na niž se horním plnicím otvorem nebo boční šachtou přivede odpad. Provoz je periodický, to znamená, že do prázdné zchladlé pece se zavezou odpady, pak se topeniště uzavře a stabilizačním palivem zahřeje. Teprve pak se začínají spalovat odpady, a nakonec se vstříkují kapalné odpady. Spaliny jsou odváděny do dohořivací komory, kde jsou zbylé neshořelé částice spáleny. Do dohořivací komory je proto dodáván sekundární vzduch. Spalování probíhá při teplotách 800–1200 °C. [22]

### Etážové pece

Používají se zejména na spalování kalů a odpadů s vysokou vlhkostí. Jsou obdobou etážových pražicích pecí používaných v metalurgii na pražení rud. Pec má tvar stojatého válce, po výšce rozděleného na etáže. Osou válce probíhá masivní hřídel, v každé etáži opatřený rameny, na něž se nasazují lopatky ze žáruvzdorné slitiny. V etážích jsou střídavě otvory na obvodě a ve středu. Lopatky jsou nasměrovány tak, že při otáčení hřídele postupují odpady od obvodu ke středu, kde propadnou na níže ležící etáž, na níž jsou opět hrnuty od středu k obvodu. Postupují tak ve spirálách, takže doba průchodu pecí je velmi dlouhá. Proti směru postupu odpadu jde v protiproudu spalovací vzduch. Spalovací teploty jsou nad 800 °C. [22]



Obr. 9 Schéma etážové pece [54]

### Fluidní kotle

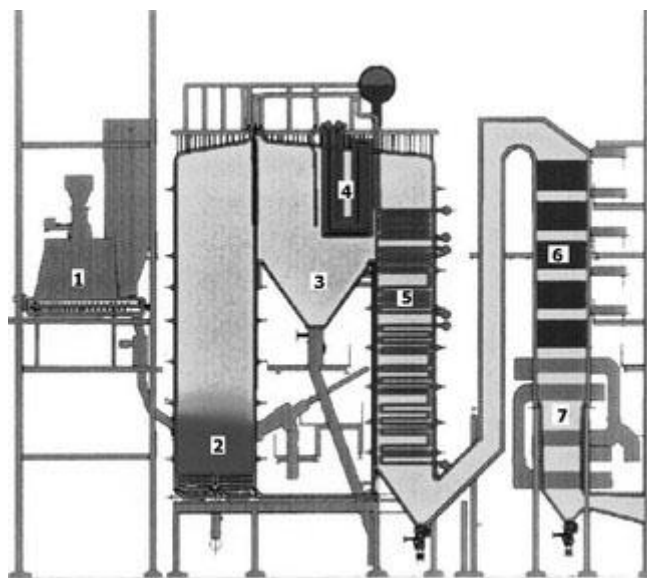
Fluidizace je obecně děj, v němž je soubor pevných látek udržován ve fluidní vrstvě ve vzneseném stavu proudem tekutiny. Fluidní vrstva tvoří disperzní systém, který se vytváří průtokem plynu vrstvou částic nasypných pod pórovité dno – tzv. fluidní rošt. Náplň fluidní vrstvy tvoří odpad jako palivo, odsiřovací aditivum (většinou vápenec) a aditivum pro stabilitu fluidní vrstvy – inertní materiál, např. písek. Při ustáleném toku tekutiny svislou nádobou, ve které jsou na vodorovné pórovité přepážce uloženy částice, jejichž měrná hmotnost je větší než měrná hmotnost tekutiny, směrem vzhůru je možno docílit několika stavů směsi. Tyto stavy jsou závislé na rychlosti toku tekutiny, složení částic pevné fáze, tvaru a měrné hmotnosti částic, tvaru a velikosti nádoby, velikosti a typu pórovité přepážky (fluidního roštu), fyzikálních vlastnostech tekutiny a dalších faktorech. Při zvětšování rychlosti tekutiny roste i tlaková ztráta tekutiny ve vrstvě a při určité rychlosti vyrovnává sílu, kterou působí na vrstvu zemská přitažlivost. Tento stav se nazývá práh fluidizace a příslušná rychlost tekutiny ve volném průřezu nádoby bez částic potom prahová rychlost fluidizace. Částice tuhé fáze se vznášejí v tekutině a navzájem se promíchávají. Fluidizovaný materiál teče, udržuje zřetelnou hladinu a má hydrostatický tlak. Objem fluidní vrstvy při prahu fluidizace je větší než objem nehybné vrstvy. [54]

Výhody fluidního spalování:

- Možnost dávkování vápence do kotle za účelem částečného odsíření spalin (účinnost odsíření se pohybuje mezi 40 a 95 % podle typu kotle, kvality promísení paliva s aditivem a množství dávkovaného vápence), fluidní kotle tedy nevyžadují odsiřovací zařízení.
- Nízké teploty ve fluidní vrstvě a odstupňovaný přívod vzduchu do ohniště mají příznivý dopad na redukcí  $\text{NO}_x$  ve spalinách.
- Ve fluidních kotlích lze spalovat i méněhodnotná paliva a odpady s velmi nízkou výhřevností, v jiných typech kotlů nespalitelné.
- Nižší komínová ztráta, neboť odsířené spaliny na konci kotle mohou mít v důsledku nižšího rosného bodu nižší teplotu. Účinnost kotlů bývá při jmenovitých parametrech 92–98 %.

Nevýhodou fluidního spalování je náročnost na granulometrii paliva. Z tohoto hlediska se tímto způsobem dají spalovat jen ty druhy odpadů, u kterých lze zajistit konstantní velikost pevných částic, což např. u komunálních odpadů může být obtížné. Z tohoto důvodu jsou tedy spíše preferovány odpady stejného složení např. z průmyslové oblasti. [52, 54]

Fluidní kotle se dělí na dva základní typy: atmosférické fluidní kotle se stacionární (bublinkující) vrstvou (AFB) a atmosférické fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou (ACFB).



Obr. 10 Schéma kotle s bublinkující fluidní vrstvou [52]

Palivo je přiváděno ze zásobníku paliva (1) do spalovací komory (2), kam je přiváděn i spalovací vzduch. Primární vzduch je veden skrze fluidní rošt a vytváří z paliva a aditiva fluidní vrstvu. Spaliny znečištěné popílkem pak odchází dohořivací komorou, do které bývá veden sekundární vzduch, do mezitahu (3), kde je odloučena velká část tuhého úletu. Dále spaliny prochází výhřevnými plochami parní části kotle: přehřívákem (5), ekonomizérem (6) a ohřívákem vzduchu (7). Popílek je odveden na úložiště, u některých systémů je zaváděn zpět do fluidní vrstvy (2). [52]

### 3.1.3 Produkty spalování odpadů

Spalování odpadů je velmi účinnou metodou jejich odstranění a energetického využití. V jednotlivých fázích spalovacího procesu však dochází ke tvorbě vedlejších (sekundárních) produktů s kterými je třeba dále nakládat v souladu s platnými právními předpisy. Tyto produkty se dělí podle svého skupenství na tuhé, kapalné a plynné.

#### Popel a škvára

Jedním z produktů spalování odpadů je hlavní tuhý zbytek neboli popel (vyhořelá škvára). Vzhledem k poměrně vysokému obsahu oxidů těžkých kovů v popelu je nutno dbát na důsledné provádění analýz vodných výluhů a na tomto podkladě na výběr vhodného typu skládky pro deponování. Většina spaloven je vybavena magnetickým separátorem pro získání nespálených železných kovových součástí z popela a škváry. Podstatná část škváry prochází přes další bubnový třidič, separátor železa i separátor neželezných kovů, založený na principu indukčních proudů. Vytříděné železo i hliník se jako druhotné suroviny odvázejí k dalšímu využití. Škvára je potom ukládána na skládkách k tomu určených nebo se dále využívá např. pro technické zabezpečení skládek. [23]

#### Popílek

Dalším tuhým zbytkem po spalování odpadů je popílek neboli prachové částice odstraněné ze spalin. Nebezpečnost popílku spočívá v tom, že je na jeho částech adsorbováno značné množství polychlorovaných dibenzodioxinů (PCDD) a dibenzofuranů (PCDF) a těžkých kovů, zejména rtuť. Hned za kotlem bývají zařazeny různé typy filtrů, které popílek zachycují. Jedná se nejčastěji o elektrostatické odlučovače a tkaninové filtry. [24]

Popílek z odprášení spalin je v Katalogu odpadů veden jako nebezpečný odpad a je nutno s ním takto dále nakládat. Je proto obvykle zneškodňován ukládáním na skládku nebezpečných odpadů. Před uložením na skládku bývá často zpracováván solidifikací, nejčastěji cementací, kdy pomocí vytvořené (ztuhlé) směsi popílku, cementu, vody a písku dojde k částečné imobilizaci škodlivých vyluhovatelných částic do prostředí. Tato směs se nejčastěji ukládá na příslušnou zabezpečenou skládku, podle třídy vyluhovatelnosti. [25]

#### Plynné produkty

Závažným problémem spaloven jsou škodlivé látky odcházející s plynnými produkty spalování. Plynné produkty v surovém stavu obsahují:  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$ , prach,  $Cl^-$ ,  $F^-$ ,  $SO_2 + SO_3$ ,  $NO + NO_2$ . Kromě uvedených složek obsahují surové spaliny i další závažné látky, především těžké kovy (Zn, Pb, Cd, Hg aj.), jejichž sloučeniny přítomné v odpadech ve stopových množstvích přecházejí v přítomnosti chlorovodíku za vyšších teplot do spalin ve formě těkavých chloridů. [22]

**Kyselé plynné produkty:** Spalováním odpadů vzniká kyselina chlorovodíková (HCl), oxid siřičitý ( $SO_2$ ) a v menším množství také kyselina fluorovodíková (HF), kyselina bromovodíková (HBr) a oxid sírový ( $SO_3$ ). Obsah HCl a  $SO_2$  ve spalinách přímo závisí na obsahu chloru a síry ve spalovaném odpadu. Mezi největší zdroje chloru v odpadu patří papír, zbytky jídla a plasty. Obsah PVC také výrazně zvyšuje množství HCl ve spalinách. Síra v odpadech může pocházet např. ze sádkartonu a pneumatik. Celkové emise  $SO_2$  a HCl částečně závisí i na chemické formě síry a chloru v odpadu, obsahu zásaditých složek v popílku, které slouží jako sorbenty, a na přidaných chemických činidlech. [16]



**Oxid uhelnatý (CO)** vzniká nedokonalým spalováním odpadu. Na začátku spalovacího procesu odpad uvolňuje CO, H<sub>2</sub> a nespálené uhlovodíky, které se potom dále vážou s kyslíkem na CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O. S klesajícím množstvím kyslíku roste množství CO odcházejícího ve spalinách. Emise oxidu uhelnatého jsou přímým ukazatelem účinnosti a efektivity spalovacího procesu.

**Oxidy dusíku (NO<sub>x</sub>)** vznikají při všech spalovacích procesech používajících vzduch jako zdroj kyslíku, jednak kvůli obsahu dusíku v palivu a také kvůli obsahu dusíku ve spalovacím vzduchu. Primární složkou NO<sub>x</sub> je oxid dusnatý NO. Oxid dusičitý NO<sub>2</sub> a oxid dusný N<sub>2</sub>O vznikají v menším množství. Během spalování vznikají NO<sub>x</sub> oxidací za relativně nízkých teplot (pod 1090 °C). K vázání atmosférického dusíku potom dochází při vyšších teplotách. Protože většina pecí spalujících odpad pracuje za teplot okolo 1100 °C, 70-80 % vzniklého NO<sub>x</sub> pochází právě z dusíku vázaného v odpadech. [16]

**Organické sloučeniny**, mezi které patří polychlorované dibenzodioxiny (PCDD) a dibenzofurany (PCDF), chlorbenzen, polychlorované bifenyly, chlorfenoly a polyaromatické uhlovodíky jsou přítomny v komunálním i zdravotnickém odpadu a vznikají také při jeho spalování. Tyto látky se ve spalinách vyskytují buď ve formě páry nebo jsou adsorbovány na částicích popílku. [16]

PCDD a PCDF jsou chemické sloučeniny obsahující ve svých molekulách atomy uhlíku, vodíku, kyslíku a chloru. Existují stovky různých struktur těchto látek. Některé z nich jsou vysoce toxické i při nízkých koncentracích. Jsou to látky ve vodě téměř nerozpustné a v životním prostředí mohou setrvávat po dlouhou dobu. Mezi hlavní rizika těchto látek patří extrémní zvýšení pravděpodobnosti onemocnění rakovinou a poškození zdravého vývoje plodu. U zvířat byla také pozorována celá řada dalších toxikologických jevů, např. poruchy růstu, poškození imunitního systému nebo reprodukčních funkcí. [63]

### **Odpadní voda**

Odpadní vody vznikají ve spalovnách odpadů jednak při chlazení hlavního tuhého zbytku a jednak při čištění kyselých složek spalin mokrou cestou. Odpadní voda z procesu čištění kyselých složek má obvykle vysoký obsah solí a těžkých kovů a dalších stopových prvků (Co, Pb, Hg, Ni). Z tohoto důvodu je nutno odpadní vodu čistit v čistírně odpadních vod příslušné spalovny odpadů. [20]

## **3.2 ZEVO**

Spalování bez energetického využití je považováno za metodu odstranění odpadu, a tudíž dle odpadové hierarchie za nejméně žádanou množnost nakládání s odpady. V ČR však není v provozu žádná spalovna komunálního odpadu, která by nevyužívala jeho energetický potenciál. Zařízení pro energetické využití odpadu (ZEVO) je zařízení využívající odpad jako palivo pro výrobu tepelné a elektrické energie. V ČR se momentálně nacházejí čtyři taková zařízení.

Za energetické využívání odpadů se spalování odpadů považuje pouze tehdy, jestliže

- 1) použitý odpad nepotřebuje pro vlastní zapálení podpurné palivo a vznikající teplo se použije pro potřebu vlastní nebo dalších osob, nebo
- 2) odpad se použije jako palivo nebo jako přídatné palivo v zařízeních na výrobu energie za podmínek stanovených právními předpisy o ochraně ovzduší.

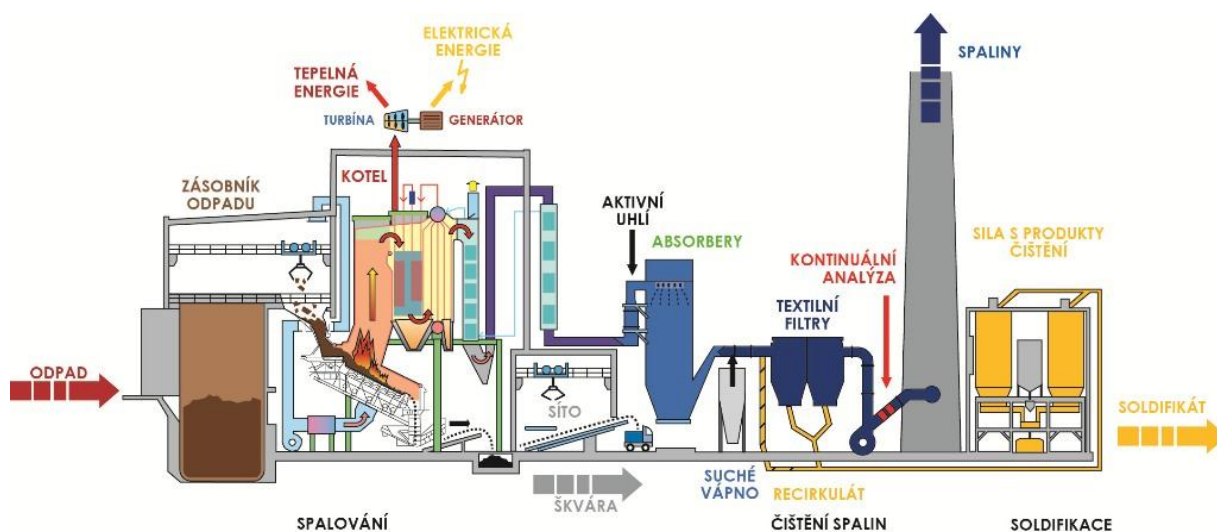
Pokud nejsou splněny výše uvedené podmínky, jedná se jen o odstraňování odpadů, a ne o jejich energetické využití. Spalovny odpadů jsou brány jako ZEVO pouze pokud je jejich koeficient energetické účinnosti roven nebo vyšší 0,65, tedy 65 %.

### 3.2.1 Schéma

Technologický řetězec ZEVO lze rozdělit do čtyř částí:

- dovoz a skladování odpadu
- spalovací proces
- několikastupňové čištění spalin
- odvoz škváry na skládku, recyklace těžkých kovů a odtok pracích vod

Jako referenční technické údaje byly v následujícím textu použity parametry Brněnské spalovny odpadů společnosti SAKO Brno a.s.



Obr. 11 Schéma spalovny společnosti SAKO Brno a.s. [26]

### Váha

Vstupním objektem spalovny je váhova. Vážení probíhá automaticky a data jsou zpracovávána speciálním softwarovým programem. Při vjezdu do areálu spalovny projíždí vozidla dovažující odpad detekčním systémem, který je schopen odhalit zdroje ionizujícího záření nebo radioaktivní látky při nelegálním a nežádoucím transportu těchto látek s přiváženým odpadem. Cílem je omezit následky nehod, které by mohly nastat únikem těchto zdrojů do životního prostředí. Na váhovně je vedena evidence vstupů a výstupů do zařízení. Zde se také cesta odpadů dělí na cestu odpadu určeného pro energetické využití a odpadu určeného k dotřídění na třídící lince. [23]

### Zásobník odpadu

Po zvážení pokračuje vozidlo s odpadem k bunkru SKO (nebo také zásobník odpadu), kde obsluha zkontroluje dovezený odpad a povolí jeho uložení do zásobníku. Zásobník odpadu je železobetonová stavba, ve které lze uložit až 5000 tun SKO, což vytváří při maximálním výkonu kotlů provozní zásobu na 7 dní. V zásobníku se udržuje trvale mírný podtlak z důvodu odsávání vzdušiny, která se využívá ve spalovacím procesu jako primární vzduch. Zároveň je tak zabráněno šíření zápachu a prašnosti do bezprostředního okolí spalovny. Odpady jsou zde míchány

jeřábem s polypropylovým drapákem k zajištění určité homogenizace, aby byly připraveny ke spálení. [23]

### **Kotel**

Odpady jsou následně přepraveny jeřábem do vstupní násypky roštového kotle, prochází spádovou šachtou a pomocí podávacího zařízení s hydraulickým pohonem se dávkuje na spalovací rošt kotle. Každý kotel je vybaven spalovacím vrativým (reverzním) roštem vyvinutým speciálně pro spalování tuhých komunálních odpadů. Plocha jednoho roštu činí 45,5 m<sup>2</sup>. Odpad na roštu setrvává průměrně 20 minut. Na roštu se odpad posunuje a obrací pohybem roštnic proti sklonu roštu a pohybu odpadu, čímž se zajistí dokonalé vyhoření spalitelných složek odpadu. Spalování odpadu probíhá při teplotách mezi 850 °C až 1100 °C. Pro najíždění ze studeného stavu je nutné spalovací komoru nejprve vyhřát na teplotu 850 °C pomocí hořáku na zemní plyn. Odpad přiložený do takto přehřáté spalovací komory okamžitě vzplane a pro další proces hoření už nepotřebuje přídavné palivo. [23, 26]

Škvára z vyhořelých odpadů padá do mokrého vynašeče. Zde je uhašena a zchlazena a přes vibrační třídič je pásovým dopravníkem dopravována do bunkru škváry. Do něj je rovněž přiváděn vypraný popílek zbavený solí a těžkých kovů. Následuje separace železných i neželezných kovů. Po jejich vytřídění se škvára odváží na skládku nebo k dalšímu využití např. při přípravě betonů a malt. [23, 26]

### **Turbína**

Spaliny v kotli předávají své teplo varnému systému kotle, jenž vyrábí páru o tlaku 4 MPa a teplotě 400 °C. Přehřátá pára potom prochází parní odběrovou kondenzační turbínou. V turbíně dochází k expanzi vysokotlaké přehřáté páry a ta vykonává mechanickou práci pohonem lopatkového rotoru. Rotor je spojen s převodovkou a generátorem elektrické energie, který mechanickou práci transformuje na elektrickou energii. Při průchodu turbínou pára snižuje svůj tlak i teplotu a je odváděna tzv. regulovaným odběrem do středotlakého rozdělovače a poté do soustavy centrálního zásobování teplem (CZT). Rovněž slouží k vytápění obslužných prostor spalovny, k udržování vakua v kondenzátoru, k ohřevu teplé užitkové vody a k přehřevu primárního spalovacího vzduchu. Pára z neregulovaného odběru se používá k ohřevu kondenzátu. Nevyužitá pára po výstupu z turbíny je vedena do vzduchem chlazeného kondenzátoru, kde se mění zpět na vodu a využívá k opětovné výrobě páry. [23, 26]

### **Chemická úprava vody**

Napájecí vodu pro kotle tvoří především vratný kondenzát ze sítě CZT, čistý kondenzát ze vzduchem chlazeného kondenzátoru a voda z chemické úpravy vody, kde se používá hlavně pitná voda z veřejné vodovodní sítě a dále voda z hydrogeologických vrtů umístěných v areálu spalovny. Na chemické úpravě vody je instalována demineralizační stanice se dvěma linkami o celkovém výkonu 40 t/hod. demineralizované vody. Demineralizace je založena na protiproudé ionexové technologii, která se vyznačuje menší měrnou spotřebou regeneračních činidel a vyšší kvalitou upravené vody. Upravená demineralizovaná voda je akumulována ve dvou nádržích. Odpadní vody z chemické úpravy vody po neutralizaci a další technologické úpravě vody se shromažďují v retenční nádrži. Vody z retenční nádrže se využívají v technologii chlazení škváry. [23]

### 3.3 Systém čištění spalin

Na rozdíl od ostatních běžných paliv odpad obsahuje celou řadu dalších chemických prvků, které se jeho spalováním uvolňují v různých chemických formách a sloučeninách. Proto jsou na ZEVO kladeny přísnější emisní limity než na jiná energetická zařízení.

Tab. 7 Porovnání emisních limitů pro různé energetické zdroje<sup>6</sup>

Specifické emisní limity [mg/m <sup>3</sup> ] <sup>7</sup>	Spalování odpadu	Biomasa	Tuhé palivo v ostatních topeništích	Tuhé palivo ve fluidním topeništi	Kapalné palivo	Plynné palivo
Tuhé emise	10	250	100	67	56	3
Organický uhlík	10	-	-	-	-	-
SO <sub>x</sub> jako SO <sub>2</sub>	50	2500	1667	1000	944	19
NO <sub>x</sub> jako NO <sub>2</sub>	200	650	433	333	250	111
NH <sub>3</sub>	50	-	-	-	-	-
CO	50	650	267	200	97	56
HCl	10	-	-	-	-	-
HF	1	-	-	-	-	-
PCDD/PCDF (ng/m <sup>3</sup> )	0,1	-	-	-	-	-
Hg	0,05	-	-	-	-	-
Cd, Tl	0,05	-	-	-	-	-
Ostatní těžké kovy	0,5	-	-	-	-	-

Technologická zařízení na termické zneškodňování odpadů (spalováním nebo pyrolýzou) jsou vždy vybavena vícestupňovým čištěním spalin. Tato zařízení zajišťují spolehlivé plnění zákonem stanovených emisních limitů. Vícestupňové čištění spalin zahrnuje:

- Zachycení maxima prachu** a tím i těžkých kovů a PCDD/PCDF. Prachové částice musí být zachycovány různými typy odlučovačů.
- Odstranění kyselých složek spalin** (SO<sub>x</sub>, HCl, HF). Tyto složky se vyznačují schopností sorpce na sorpčních činidlech. Proto se pro jejich odstranění používá metoda absorpce v alkalickém činidle.

V závislosti na obsahu škodlivin ve vstupujících odpadech mohou přicházet v úvahu další, doplňkové technologie, jejichž úlohou je:

- Odstranění NO<sub>x</sub>** pomocí denitrifikace spalin. Denitrifikace spalin je velmi nákladný proces, proto jsou vhodnější primární opatření. Ta spočívají v úpravách spalovacího procesu – omezení vzniku vysokoteplotních NO<sub>x</sub> snížením teploty hoření, snížením koncentrace kyslíku, případně omezením doby zdržení v pásmu vysokých teplot.
- Odstranění stopových příměsí** (PCDD/PCDF, Hg) dočišťovacím procesem adsorpce na aktivním uhlí nebo koksu. Průchodem spalin přes aktivní vrstvu dochází k zachycení zejména organokovových škodlivin a rtuti. [4, 22]

<sup>6</sup> Tabulka byla sestavena pro energetické zdroje s jmenovitým tepelným výkonem 5–50 MW dle směrnice 2010/75/EC a vyhlášky MŽP č. 415/2012 Sb. platné od 1.12.2012 do 31.12.2017.

<sup>7</sup> Pro přehlednější porovnání emisních limitů byly specifické emisní limity pro různé zdroje přepočteny na stejný referenční obsah kyslíku, tedy na 11 % O<sub>2</sub>.

### 3.3.1 Odstranění tuhých částic

Zařízení na odstranění tuhých znečišťujících látek lze dělit z hlediska jejich funkce na mechanické a elektrické odlučovače a filtry.

**Cyklonové odlučovače** pracují na principu odstředivých sil. Spaliny jsou vháněny tangenciálním ústím dovnitř válcovitého těla cyklonu, kde rotačním pohybem směřují směrem dolů. Pevné částice se působením odstředivé síly pohybují po stěnách a následně padají do kónické části cyklonu zakončené uklidňovací komorou, kde jsou dále podávány pomocí rotačního podavače k dalšímu zpracování. Vyčištěný plyn odchází výstupní trubkou umístěnou v ose válce. Cyklony se užívají jako samostatná zařízení nebo se seskupují do tzv. multicyklonů.

S výhodou se užívají pro zachycení částic o průměru větším než 10 mikrometrů, což ke splnění emisních limitů samo o sobě nestačí. Proto jsou cyklony používány pouze jako předstupeň dalších čistících zařízení jako jsou např. elektrostatické filtry. Mezi výhody cyklonů patří jejich nízké pořizovací a provozní náklady. [16, 17]

**Venturiho pračka** používá pro rozprášení vody do prachem znečištěných spalin venturiho trubice. Spaliny nejprve procházejí konvergentní částí trubice, do které je tryskami přiváděna voda, a následně divergentní částí, kde dochází k vyrovnání tlakového spádu. Zuzující se tvar trubice způsobuje zvýšení rychlosti spalin, v hrdle až na 100 m/s. Dynamickým účinkem proudu dochází k dalšímu tříštění kapaliny až na velikosti kapek v řádech desítek mikrometrů, které jsou schopny při vysoké relativní rychlosti proudu zachycovat s vysokou účinností i částice submikronových velikostí. Vodní kapky absorbují i některé kyselé složky spalin, jako jsou HCl a HF. Průchodem divergentní částí trubice (difuzorem) se rychlost spalin snižuje pod rychlost pohybu kapek kapaliny (kapky předbíhají plyn nesoucí prach), rychlostní poměry jsou tedy oproti původní fázi obrácené, ale částice prachu se s kapkami opět vzájemně srážejí. Po opuštění difuzoru jsou kapky vypírací kapaliny odděleny z proudu plynu. Odlučovač kapek pracuje na principu cyklonu s využitím odstředivé síly. Odlučivost přesahuje 99 % pro částice o velikosti kolem 1 mikrometru. [16, 17, 27]

**Elektrostatické odlučovače** (dále EO) také bývají označovány jako elektrické odlučovače nebo elektrofiltry. EO jsou nejrozšířenějšími odlučovači pro čištění plynů s vysokými objemovými průtoky. Prakticky dominantní je dnes jejich použití v energetice u velkých zdrojů při čištění plynů ze spalovacích procesů.

Do proudu spalin proudících odlučovačem jsou vloženy dva typy elektrod: tzv. sršící (nebo vybíjecí) elektrody, napojené na záporný pól vysokonapěťového zdroje stejnosměrného proudu a sběrné elektrody, napojené na kladný pól (uzemněný). Elektrický proud o vysokém napětí, zavedený na sršící elektrody, vytváří silné elektrostatické pole mezi sršícími a sběrnými elektrodami. Vzhledem ke tvaru sršících elektrod a jejich vysokému napětí se na povrchu elektrody vytváří korona (modrofialový výboj), produkující velké množství záporných iontů, pohybujících se ke kladně nabitým sběrným elektrodám. Vlivem korony, záporných iontů a silného elektrického pole jsou tuhé částice ve spalinách nabitý záporným nábojem a přitaženy ke sběrným elektrodám, na kterých se zachycují. Zachycené tuhé částice jsou z nich periodicky oklepávány a ukládány do zásobníků. [24]

Odlučivost EO je závislá především na době zdržení nabitých částic v elektrickém poli mezi elektrodami a na velikosti elektrostatické síly, která na částice působí. Průtočná rychlost plynu odlučovači je relativně malá, 1–2 ms<sup>-1</sup>, a proto jsou EO vždy zařízení velmi rozměrná. Aby ne-

docházelo ke kondenzaci par v prostoru EO, jsou jejich skříně tepelně izolovány. Jsou konstruovány pro průtoky čištěného plynu řádově ve statisících až milionech  $\text{Nm}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ . V tomto ohledu se jedná o vůbec nejvýkonnější odlučovače prachu. Teploty čištění plynů mohou dosahovat hodnoty až  $400\text{ }^\circ\text{C}$ , neboť všechny konstrukční díly EO jsou vyrobeny z oceli nebo keramiky. EO jsou napájeny stejnosměrným elektrickým proudem o napětí obvykle 40-80 kV. [27]

**Tkaninové filtry** jsou velmi často používány díky své vysoké odlučivosti. Odlučování prachu je založeno na oddělování tuhých částic na pevné porézní přepážce. V principu jsou z počátku odděleny pouze částice větší, než je průměr pórů v přepážce. Po vytvoření filtračního koláče z oddělovaného prachu jsou zachycovány i částice řádově menších rozměrů, než jsou rozměry pórů. Proto je filtrace nejúčinnějším odlučovacím procesem i pro částice submikronové velikosti. Účinnost filtrace, tj. odlučivost filtru, je určena jednak vlastnostmi filtrační přepážky, jako je porozita, její tloušťka, povrchové vlastnosti vláken a jednak vlastnostmi prachových částic, jako je velikost a tvar, hustota, náboj, povrchové vlastnosti a vlhkost.

Zachycení prachové částice je kombinací několika vzájemně se doplňujících mechanismů: přímé zachycení částic prachu větších než je průměr pórů filtrační přepážkou nebo filtračním koláčem, zachycení prachové částice v textilií po jejím nárazu do filtrační přepážky, usazení prachové částice submikronové velikosti na vláknech filtrační přepážky v důsledku Brownova pohybu, usazení částice prachu na povrchu textilních vláken působením elektrostatických sil a usazení prachu na filtrační látce účinkem gravitační síly.

Čištěný plyn proudí z vnější strany filtrační textilie a z odloučeného prachu se na ní tvoří prachový koláč. Z filtrační přepážky je odloučený prach odstraňován zpravidla zpětným proplachem tlakovým vzduchem, mechanickým oklepem nebo ofukováním stlačeným vzduchem z vnější strany (tj. ze strany filtračního koláče).

Odlučivost textilních filtrů přesahuje 99,9 %, filtry špičkové kvality dosahují odlučivosti až 99,99 %. Tím patří mezi nejúčinnější způsoby odstranění tuhých částic ze spalin. [27]

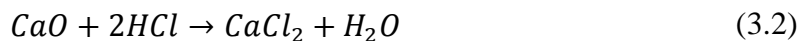
### 3.3.2 Odstranění kyselých složek

Mezi nejčastěji vznikající kyselými složkami při spalování odpadů patří  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{HCl}$  a  $\text{HF}$ , podle složení spalovaných odpadů. Tyto složky se vyznačují schopností sorpce na sorpčních činitelích. Proto se pro jejich odstranění ze spalin používá metoda absorpce v alkalickém činidlu v procesu, který probíhá v tzv. absorbérech, kdy dochází zároveň k neutralizaci těchto kyselých složek.

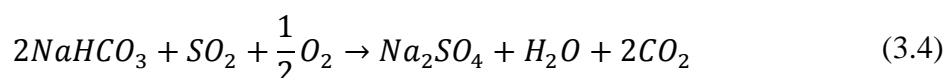
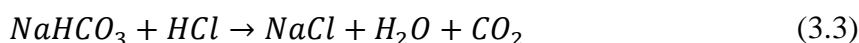
V závislosti na fyzikálním stavu sorpčního činidla a vzniklého produktu dělíme procesy odstraňování kyselých složek na suché, polosuché a mokré. [20]

Principem **suchého procesu** je dávkování alkalického sorbentu v práškovém stavu buď přímo do odpadu, nebo do horkých spalin, kdy dojde k reakci s kyselými složkami a ke vzniku neutrálních prachových částic, které se ze spalin odstraňují pomocí filtru nebo elektrofiltru a dále se zpracovávají např. solidifikací. Používají se sorbenty na bázi  $\text{Ca}^{2+}$  (pálené vápno  $\text{CaO}$ ) nebo  $\text{Na}^+$  (hydrogenuhličitan sodný  $\text{NaHCO}_3$ ). [20]

Oxid vápenatý se spalinami reaguje za vzniku síranu a siřičitanu vápenatého a chloridu vápenatého:



Pro hydrogenuhličitan sodný potom neutralizační rovnice vypadají následovně:

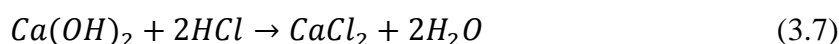
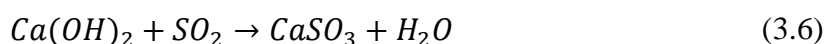


Při **polosuché metodě** odstraňování kyselých složek je kapalně alkalické aditivum (aerosol vápenného mléka  $Ca(OH)_2$  nebo  $NaOH$ ) dávkováno do spalin v takovém množství, aby vlastním teplem spalin mohlo dojít k odpaření vody a výsledný neutrální produkt byl v suchém stavu. Tento produkt je dále zpracováván obdobným způsobem jako produkt suché metody odstraňování kyselých složek.

Výchozím krokem je hašení páleného vápna  $CaO$  vodou podle rovnice:



V absorbéru dochází k promíchání hydroxidu vápenatého se spalinami. Hydroxid vápenatý, jakožto zásaditá chemická sloučenina, reaguje s kyselými složkami spalin za vzniku solí a vody podle následujících rovnic:



Výsledkem je velmi jemný prášek, který se ze spalin odlučuje na tkaninových filtrech.

**Mokré procesy** dosahují nejvyšší účinnosti a to až 98 %, avšak naopak zde nastává problém s dalším zpracováním neutrálního produktu. Spaliny jsou sprchovány oběhovou vodou, kdy dojde k neutralizaci přítomných  $HCl$  a  $HF$ , které jsou ve vodě rozpustné. Kyselé složky jako  $SO_2$  a  $SO_3$ , které ve vodě rozpustné nejsou, ale mají schopnost sorpce, se ze spalin vypírají oběhovou vodou alkalizovanou přísadkou vápenného mléka. Odvodněný produkt se často zpracovává solidifikací před jeho uložením na zabezpečenou skládku. Nevýhodou tohoto procesu je, že po odvodnění neutrálního produktu je nutno dále zpracovat zbylou odpadní vodu. [20]

### 3.3.3 Odstranění NO<sub>x</sub>

Metody snižování NO<sub>x</sub> se dělí na primární a sekundární. Cílem **primárních opatření** je snížit celkovou tvorbu NO<sub>x</sub> při spalování. Toho lze dosáhnout převážně snížením spalovací teploty, snížením lokální koncentrace kyslíku a zkrácením doby zdržení v pásmu vysoké teploty.

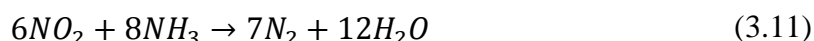
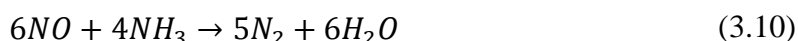
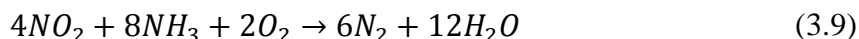
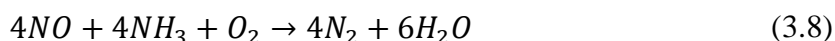
Snížení koncentrace kyslíku se provádí nestechiometrickým spalováním. Dávkování spalovacího vzduchu při něm probíhá ve dvou fázích. V první fázi probíhá spalování za nedostatku vzduchu, a tudíž při nižší teplotě. V druhé fázi se zplodiny a zbytek paliva spálí v relativním přebytku vzduchu.

Dalším způsobem modifikace spalovacího procesu je recirkulace spalin. Ta spočívá v odběru části spalin a jejich zpětným zavedením do topeniště. Tím se dosáhne jak snížení obsahu kyslíku, tak i snížení teploty. Jako nejúčinnější způsob se považuje míchání spalin do spalovacího vzduchu. Tento postup sice snižuje účinnost spalování, ale z hlediska omezení vzniku NO<sub>x</sub> je poměrně účinný a dosahuje až 50 % snížení. [28, 29]

**Sekundární opatření** odstraňují již vzniklý NO<sub>x</sub> ze spalin. Celkově bývají více ekonomicky náročné než opatření primární. Hlavními používanými metodami jsou selektivní katalytická redukce a selektivní nekatalytická redukce.

Selektivní katalytická redukce (SCR):

Do spalin je dávkován plynný čpavek, který reaguje s NO<sub>x</sub> za vzniku molekulárního dusíku podle následujících rovnic:



Reakce probíhají díky katalyzátoru při teplotách nižších než u SNCR, a to v rozmezí 300-400 °C. Čpavek je přidáván v malém přebytku proti stechiometrii, neboť se určité množství během redukce ztrácí oxidací:

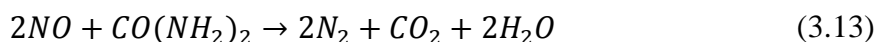


Vysoké nároky jsou kladeny jak na samotné katalyzátory, tak na jejich nosiče, které musí mechanicky obstát v extrémních podmínkách, tzn. v prostředí obsahujícím oxidy síry a popílek, který má nejen abrazivní účinky, ale také snižuje aktivitu katalyzátoru. Jako vlastní katalyzátor slouží oxid vanadičtý. Keramická kostra katalyzátorového tělesa se potahuje oxidem titaničitým. [28, 29]



Selektivní nekatalytická redukce (SNCR):

Podobně jako u selektivní katalytické redukce se oxidy dusíku redukují čpavkem nebo močovinou, tentokrát však bez přítomnosti katalyzátoru. Čpavek s NO reaguje obdobně jako u SCR, podle rovnice (3.18). Pro močovinu vypadá redukční rovnice následovně:



Obě tyto látky se obvykle dávkuje v teplotním rozmezí 800–1100 °C, přičemž teplota, při které probíhá reakce s optimálním výtěžkem se nazývá teplotní okénko. Pro čpavek leží v rozmezí 850–1000 °C a pro močovinu v rozmezí 950–1100 °C. Teplotní okénko lze rozšířit např. přidáním methanolu do močoviny nebo malým přídatkem H<sub>2</sub> či zemního plynu. Dodržení příznivé teploty je pro reakci důležité. Pokud teplota nástřiku leží pod teplotním okénkem, reakce probíhá pomalu, nezreagovaný čpavek uniká se spalinami do ovzduší a celková účinnost denitrifikace je nízká. Při vysoké teplotě pak může čpavek oxidovat na nežádoucí oxid dusnatý.

V případě zavádění činidla v kapalně fázi je důležitým faktorem i velikost kapek. Malé kapky se relativně rychle odpaří a reakce může proběhnout nad optimální teplotou. Velké kapky se naopak odpařují déle a po jejich odpaření reakce nastane při nižší teplotě, při které již uniká nezreagovaný čpavek se spalinami. [28, 29]

Redukce NO<sub>x</sub> na aktivním koksu:

Jedná se o kombinovaný proces čištění spalin, při kterém dochází k adsorpci SO<sub>2</sub> ze spalin na aktivním koksu a následně selektivní katalytické redukci amoniakem, kdy aktivní koks působí jako katalyzátor.

Aktivní koks je černouhelný polokoks připravený z kvalitního černého uhlí s minimálním obsahem popela (do 8 %). Uhlí nejprve projde nízkotepeelnou karbonizací při 600 °C, následně je rozemleto a formováno do požadovaného tvaru, a nakonec reaktivováno vodní párou při zhruba 900 °C. Těmito úpravami získá výsledný materiál příznivou strukturu pórů a značnou pevnost a odolnost proti otěru.

Celý proces začíná odsiřováním, při kterém na povrchu aktivních uhlíkových materiálů probíhá katalytická reakce. V pórech adsorbovaný SO<sub>2</sub> reaguje s O<sub>2</sub> a vodní parou ve spalinách za tvorby SO<sub>3</sub>, respektive H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:



Po odsiření se do spalin přidává NH<sub>3</sub>. Pro účinnou denitrifikaci je nutné úplné odsiření spalin aktivního koksu před vstupem do denitrifikace. Zbytkový obsah SO<sub>2</sub> by jinak mohl reagovat s NH<sub>3</sub> za vzniku síranu amonného. [28, 29]

### 3.3.4 Odstranění PCDD/PCDF

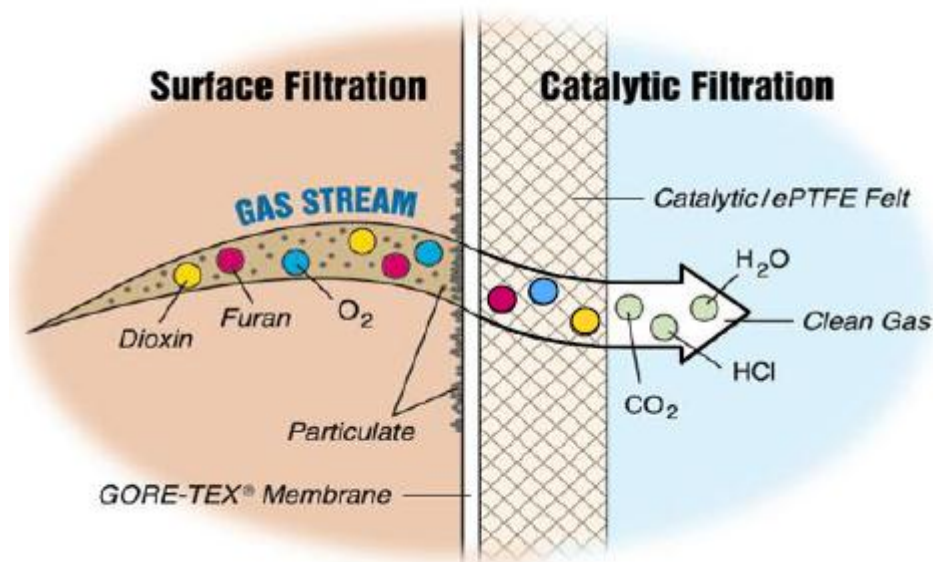
Při spalování odpadu za vysokých teplot (1100–1200 °C) dochází k úplnému rozkladu organických sloučenin chloru, avšak ochlazováním spalin dochází rekombinací volných radikálů k jejich opětovnému vzniku. Pro odstraňování polychlorovaných dibenzodioxinů a dibenzofuranů se používají převážně následující tři metody:

**Sorpční procesy:** jako sorbent lze používat jak nákladný černouhelný polokoks, tak i podstatně levnější polokoks z hnědého uhlí. Používá se i aktivní uhlí, lignitový koks nebo Sorbalit<sup>8</sup>. Samotná adsorpce se provádí injektáží aktivního uhlí před rukávové filtry do spalin, průchodem spalin pohyblivým ložem s aktivním uhlím nebo průchodem spalin pevným ložem.

Při injektáží aktivního uhlí přes rukávové filtry dojde k jeho únosu spalinami a následnému zachycení na povrchu filtrů, kde vytvoří vrstvu odstraňující POP<sup>9</sup> látky procházející ze spalin. Tato vrstva je v pravidelných intervalech mechanicky čištěna (nejčastěji oklepáváním). Okolo 90 % uhlí odděleného na rukávových filtrech se recirkuluje a opětovně dávkuje zpět do systému.

U čištění POP látek průchodem pohyblivým ložem spaliny prochází skrz lože s aktivním uhlím. Uhlí se zde pravidelně částečně mění tak, že část vyčerpaného uhlí je vysypána z dolní části adsorbéru a do jeho horní části je nasypána dávka nového aktivního uhlí. V adsorbéru s pevným ložem se mění celý obsah aktivního uhlí naráz. Pracovní teplota pro adsorpci POP látek by neměla překročit 200 °C. Uhlí s adsorbovanými POP látkami je nutné likvidovat. Obvykle bývá spalováno ve spalovnách nebezpečných odpadů. [29,30]

**Katalytická filtrace** je technologie založena na kombinaci povrchové filtrace a katalytického rozkladu. Spaliny procházejí přes filtr opatřený hadicemi s filtrační textilíí. Ta obsahuje katalytický substrát, který reaguje s molekulami PCDD a PCDF a rozkládá je na minimální množství CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O a HCl.



Obr. 12 Schéma katalytického filtru [68]

<sup>8</sup> Směsný sorbent vápenného hydrátu a aktivního uhlí.

<sup>9</sup> Perzistentní organické látky (z anglického Persistent Organic Pollutants) jsou zdraví nebezpečné látky se schopností zůstat v prostředí dlouhodobě beze změny. Patří mezi ně např. dioxiny, aldrin či polychlorované bifenylly.

Filtrační hadice jsou zhotoveny ze speciální filtrační tkaniny REMEDIA. Ta je tvořena membránou s katalytickým substrátem ve formě plsti a spojena dohromady expandovaným polytetrafluorethylenem (ePTEE). Provozní podmínky filtru jsou srovnatelné s běžně používanými látkovými filtry, tzn. teplota v rozmezí 180 °C až 230 °C, filtrační rychlost 1,3 – 2,3 cm/s. Tlaková ztráta se pohybuje v rozmezí 1 až 2 kPa. Očekávaná životnost tohoto filtru byla původně 5 let, z provozovaných jednotek však vyplývá, že ve skutečnosti je mnohem vyšší. [29, 31]

**Selektivní katalytická redukce** je metoda sloužící primárně k odstranění oxidů dusíku ze spalin. Nicméně je možné ji spojit s katalytickou oxidací, kterou lze současně odstranit i dioxiny a furany. Katalyzátor je tedy proto vhodné dimenzovat tak, aby mohly být spolu s emisemi látek PCDD/PCDF současně snižovány emise oxidů dusíku. Při spotřebování redukčního prostředku, dochází na katalytické vrstvě k reakci oxidační. Této vlastnosti je s výhodou využito ke katalyticko-oxidační destrukci látek PCDD/PCDF ve spalinách, které jsou rozloženy na své základní elementy, tedy C, H, F, Cl, O. Jednotlivá množství těchto složek ve spalinách jsou natolik malá, že na výslednou kvalitu spalin nemají prakticky vliv. [32]

## 4 DALŠÍ TERMICKÉ METODY

Procesy termického zpracování odpadu, při nichž je obsah kyslíku v reakčním prostoru podstechiometrický, až nulový, jsou nazývány redukčními procesy. Patří mezi ně pyrolýza a zplyňování odpadu.

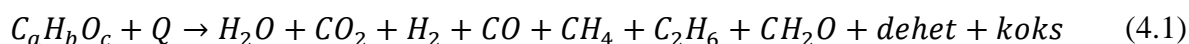
### 4.1 Pyrolýza

Pyrolýza je definována jako tepelný rozklad organických odpadních látek za nepřístupu oxidační atmosféry (vzduch, CO<sub>2</sub>, vodní pára) v reakčním prostoru, při němž se při teplotách v rozmezí 500 °C až 1000 °C výšemolekulární organické látky rozkládají na jednoduché těkavé produkty a koks. Podle rozmezí teplot se pyrolýza rozlišuje na:

- Nízkoteplotní, kdy reakční teploty procesu jsou do 500 °C
- Středněteplotní, kdy reakční teploty procesu se pohybují v rozmezí 500 °C až 800 °C
- Vysokoteplotní, kdy reakční teploty jsou nad 800 °C

Na rozdíl od spalování a zplyňování je tento proces endotermní, tzn. že musí být dodávána energie zvenčí. Ta se nejčastěji získává spalováním části některého ze získaných produktů. [42]

Pyrolýzní procesy mohou být charakterizovány rovnicí:



Podstatou pyrolýzy je, že při vyšších teplotách jsou organické sloučeniny méně stabilní, výšemolekulární látky se rozkládají na nízkomolekulární, což vede k jejich rozpadu na těkavé (plynné) produkty, viskózní kapalné zbytky (dehet) a na koks bohatý na uhlík. [20]

Celý proces probíhá obecně ve třech fázích:

- Sušení
- Karbonizace
- Tvorba plynu

Ve většině případů začíná proces pyrolýzy zhruba při 200 °C a probíhá až do teplot nad 1000 °C. Pyrolýze předchází proces sušení, který probíhá při teplotách okolo 100 °C při běžném atmosférickém tlaku. Při zahřátí materiálu se organická spojení stávají nestabilními a jsou uvolněny tzv. těkavé složky. Na konci procesu zůstává pouze koks. Během zvýšení teploty jsou nejprve krakovány organické složky odštěpené od větších částí molekul. Vzniká celá řada nejrůznějších dlouho-řetězcových spojení. Tato fáze není závislá na druhu rozkládaného materiálu. [20]

Tab. 8 Průběh chemických reakcí během pyrolýzy [20]

Teplota	Chemická reakce
100–200 °C	Termické sušení, fyzikální odštěpení vody
250 °C	Deoxidace, desulfurace, odštěpení vázané vody a CO <sub>2</sub> , depolymerace, začátek odštěpování H <sub>2</sub> S
340 °C	Štěpení alifatických uhlovodíků, vznik metanu a jiných alifatických uhlovodíků
380 °C	Karbonizační fáze
400 °C	Štěpení vazeb uhlík-kyslík, uhlík-dusík
400–600 °C	Přeměna bitumenových složek na pyrolýzní olej a dehet
600 °C	Krakování za vzniku plynných uhlovodíků s krátkým uhlíkovým řetězcem, vznik aromátů
nad 600 °C	Dimerizace etyleny na buten, dehydrogenace na butadien, dienová reakce s etylenem na cyklohexan, termická aromatizace na benzen a výševroucí aromáty

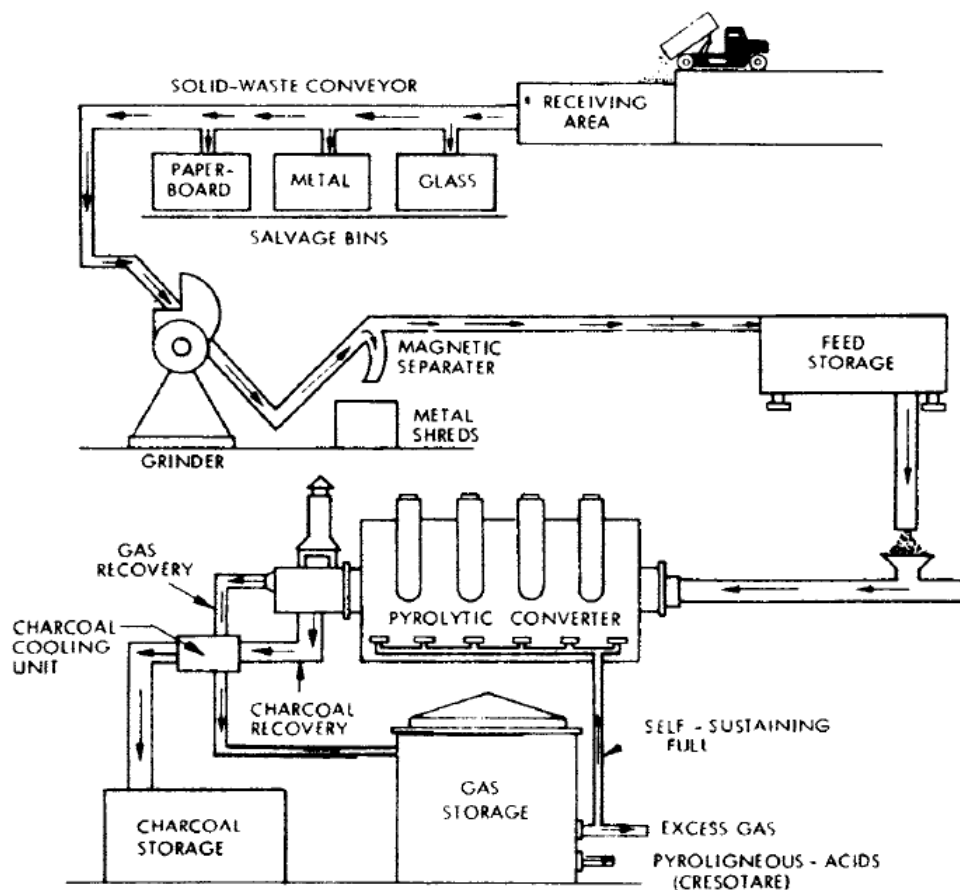
Složení a kvalita produktů pyrolýzy může být různá a je závislá na řízení provozních parametrů jako jsou tlak, teplota, čas, velikost vsázky, použití katalyzátorů a přídatného paliva.

Obecně lze konstatovat, že se stoupajícím tlakem probíhá štěpení uhlovodíkových molekul symetričtěji a místo štěpení v řetězci se stoupající teplotou se posouvá na konce molekul, takže dochází k tvorbě plynných uhlovodíků a v konečné fázi vodíku. Při vysokých teplotách přesahujících 760 °C dochází k vývinu plynných produktů jako jsou vodík, metan, oxid uhelnatý a oxid uhličitý. Při nižších teplotách od 450 do 730 °C dochází k produkci dehtu, dřevěného uhlí a kapalných zbytků jako jsou oleje, kyselina octová, aceton a metanol. S vyšším zastoupením vodíku v pyrolýzní komoře roste výhřevnost těchto vznikajících olejů a plynů, zatímco s vyšším obsahem vody mohou být produkovány oxid uhelnatý a vodík, které mohou být použity jako náhrada zemního plynu. [43]

Kvůli nepřítomnosti kyslíku a podstatně nižším teplotám, než u spalování se mohou elementární atomy vzniklé rozkladem rekombinovat jen ve velmi omezené míře, obvykle jako sloučeniny, které nejsou toxické nebo jinak nebezpečné. Problematické prvky jako chlor, síra, kyslíkaté a dusíkaté sloučeniny přecházejí na odpovídající sloučeniny s vodíkem. Ze stejných důvodů je podstatným způsobem redukována tvorba dioxinů a furanů. Objem pyrolýzního plynu je asi 6,5krát menší oproti spalinám, takže proud plynu neunáší prachové částice. To umožňuje užití menšího zařízení při čištění pyrolýzního plynu od HCl, H<sub>2</sub>S, HF, než je třeba u vypírky několikanásobně většího objemu spalin. Nevznikají oxidy kovů. Těžké kovy a některé jiné prvky jsou vázány na zkarbonovaný zbytek, a je-li ve vsázce přítomno vápno, vážou se na nerozpustné vápenaté sloučeniny. Pyrolýzní plyn je po vyčištění průmyslově využitelný. Čištěním vzniklé kaly jsou vápenatými sloučeninami a nejsou nebezpečné. [43, 44]

### Technologie

Pyrolýza je prováděna převážně v kontinuálních rotačních pecích, které představují optimální technologickou jednotku pro tento typ operace. Rotační pec je zevně vytápěna spalinami, které vznikají ze spalování pyrolýzních plynů v tzv. termoreaktoru. Odpad je v nepřímém otáčeném bubnu pyrolýzní pece otáčením neustále promícháván, posunován a poměrně stejnoměrně zahříván. [45, 51]



Obr. 13 Schéma pyrolýzního zařízení [16]

Pyrolýzní jednotky bývají vhodné pro šaržovitý provoz pro odpad, který nemá příliš vysoký obsah škodlivin a nemá tendenci ke spékání. Zbytek energie ze spálení plynů, která se nespoteřebuje na ohřev vsázky, se využívá v kotlích na odpadní teplo k výrobě páry nebo teplé užitkové vody. Jiný, modernější přístup, předpokládá využití pyrolýzního plynu jako chemické suroviny nebo jako topného plynu např. pro motory kogeneračních jednotek. [45]

## 4.2 Zplyňování

Podstatou zplyňovacího procesu je řízený tepelný rozklad odpadních látek, směřující k přeměně uhlíkatých materiálů na plynné hořlavé látky. Celý děj probíhá při teplotách nad 800 °C za podstechiometrického obsahu kyslíku, či jiného oksylichovadla, v reakčním prostoru. Probíhají při něm, jak oxidační děje uvolňující energii, tak redukční děje obvykle energii spotřebovávající. [20, 46]

Z chemického hlediska je zplyňování přeměna pevných látek obsahujících uhlík, kapalin, ale také plynů za částečné oxidace kyslíkem,  $H_2O$  nebo  $CO_2$ . V závislosti na podmínkách zplyňování vznikají plyny různého složení, které se odlišují různou výhřevností. Pro procesy tepelného zpracování odpadů může mít zplyňování velký význam, protože se při přeměně v odpadu obsažená chemická energie pouze zčásti přemění na nevyužitelné teplo.

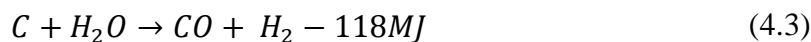
Větší část obsažené energie se převede na nové chemické sloučeniny, zejména na  $CO$  a vodík, které jsou poté použitelné v nejrůznějších odvětvích. Tímto je tedy významný podíl odpadu převeden na nové látky, v tomto případě plyny, které mají přesně definovaný obsah energie. [20]

Celý proces je silně endotermický a probíhá podle následujícího schématu:

- Uhlík v koksovém zbytku se zplyňuje pomocí oxidu uhličitého:



- Obdobně reaguje vodní pára:



- Uvolněný vodík reaguje za vzniku metanu:

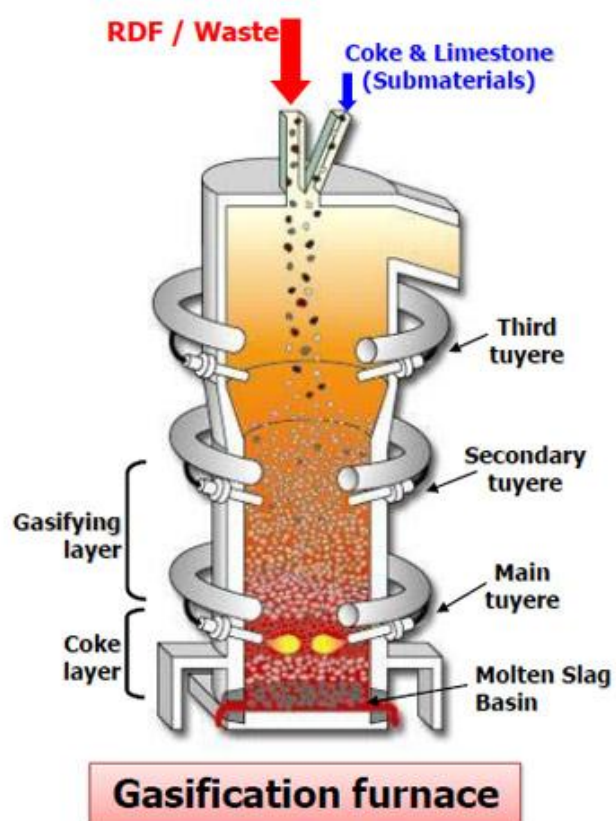


Výhodou tohoto procesu je, že díky vysokým teplotám odpadají problémy s tvorbou vysoce toxických dioxinů, furanů a polycyklických aromatických uhlovodíků. Redukční prostředí rovněž brání vzniku oxidů dusíku. Z procesního hlediska se zpracovávají menší objemy vzniklých plynů než při spalování. Klasickými technologiemi, používanými při zplyňování, jsou sesuvné nebo fluidní lože. Moderní zplyňovací jednotky v sobě většinou integrují výrobu plynu s tavením a granulací strusky. Tuhý zbytek tak odpadá ve formě ztaveného granulátu, který lze dále využít nebo uložit na skládku inertního odpadu. [20, 51]

### Technologie

Firma Voest – Alpine vyvinula integrovaný zplyňovací proces pro zpracování nejrůznějších druhů odpadů pracující na bázi sesuvného lože. Reaktor je tvořen zplyňovací komorou, opatřenou v dolní části vodní granulační lázní. V reakční komoře dosahuje teplota až 1600 °C, a tak je veškerý inertní materiál spolu s přítomnými kovy taven a stéká do granulační lázně. Plyné a dehtovité produkty termického rozkladu procházejí přes vrstvu rozžhaveného, sesouvajícího se koksu, který v dolních částech dosahuje teplot kolem 1300 °C. Tyto redukční podmínky spolehlivě rozloží veškeré organické látky. Poslední částí zařízení je čištění surového plynu a výroba páry.

Firma NKK Corporation vyvinula fluidní zplyňovací jednotku s integrovaným tavícím procesem. Kromě základního distributoru vzduchu je tato jednotka vybavena ještě dvěma přídatnými přírady vzduchu, umístěnými po výšce. Celý reaktor se tak rozděluje do tří mechanicky neoddělených částí. Ve spodní části probíhá vysokoteplotní spalování a tavení strusky, která je potom odváděna spodem z reaktoru. V této části se teplota pohybuje od 1600 do 2000 °C. CO<sub>2</sub> produkovaný spalováním se postupně redukuje na CO, který stoupá o teplotě cca 1000 °C do druhé zóny. V této zóně dochází k částečnému spalování vyprodukovaného plynu sekundárním vzduchem. Pevný odpad přicházející ze shora je termicky rozkládán. Tato část reaktoru je provozována ve fluidním stavu. Nakonec ve třetí zóně je produkovaný plyn spalován v redukční atmosféře při teplotách kolem 850 °C. V této části dochází k pyrolýze dehtu. Vzhledem k redukční atmosféře je potlačena produkce PCDD/PCDF. [51]



Obr. 14 Zplyňovací jednotka s fluidním ložem a tavícím procesem [58]



## 5 ZEVO V ČR

V České republice jsou k roku 2017 v provozu čtyři spalovny komunálního odpadu. Ve všech je odpad využíván k výrobě energie. První moderní zařízení na energetické využití odpadu bylo budováno od osmdesátých let minulého století v Brně. Zařízení v Praze bylo zprovozněno až v letech 1996-1998. Na podzim 1999 bylo uvedeno do provozu nové zařízení v Liberci a v srpnu roku 2016 bylo do testovacího provozu uvedeno zařízení v Chotíkově.

### 5.1 SAKO Brno

Spalovna odpadu v Brně byla do provozu spuštěna už v roce 1905 a byla to vůbec první spalovna na území Rakouska-Uherska. Spalovna byla v provozu až do roku 1941 a v posledních dnech druhé světové války byla vybombardována. Stavba nové spalovny začala až v roce 1984 a zkušební provoz v roce 1989. Stavba byla řešena jako uzavřený ucelený technologický komplex s prvním stupněm čištění spalin tedy s odloučením pevného úletu na elektrostatických odlučovačích.

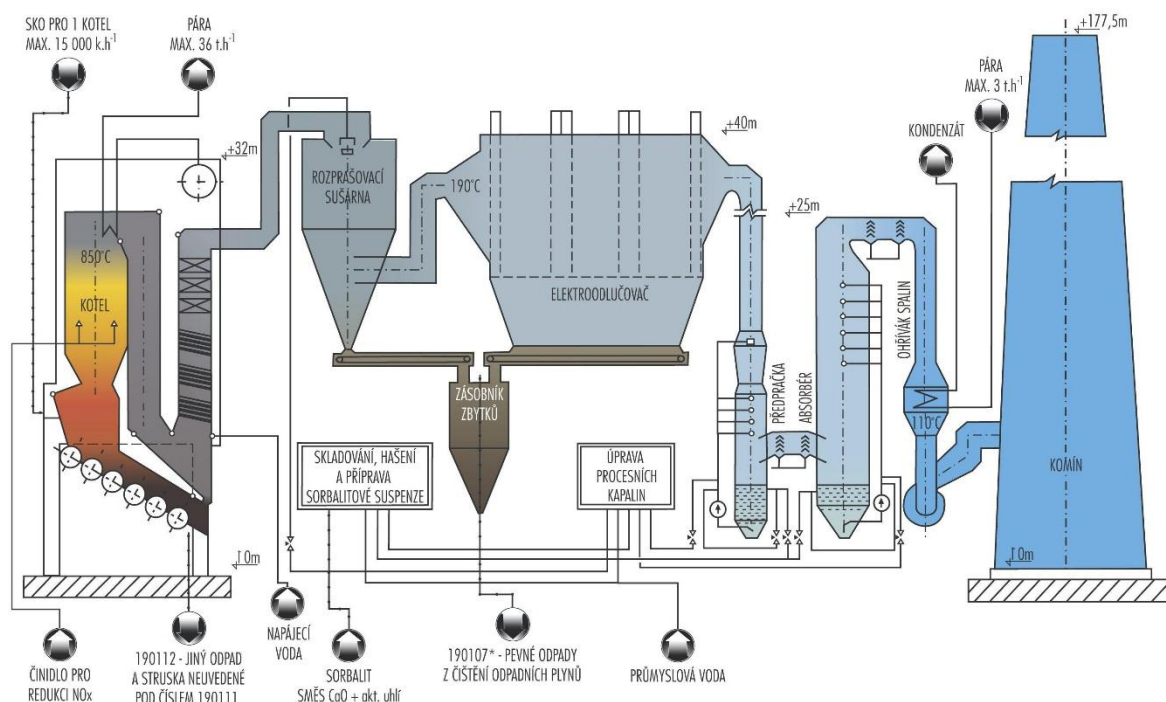
Novodobé zařízení získalo své parametry realizací projektu Odpadové hospodářství Brno, který byl spolufinancován EU. Cílem projektu bylo vybudovat s optimálním využitím stávajících budov spalovny, včetně dopravních (příjmových) kapacit, komplex třídění, recyklace a energetického využití komunálního odpadu s kogenerací, tj. kombinovanou výrobou tepelné a elektrické energie tak, aby zařízení splňovalo emisní limity a stanovené technické podmínky provozu. [23, 33, 34]

Použitá technologie a technologické schéma jsou zobrazeny a popsány v kapitole 3.2.1.

### 5.2 ZEVO Malešice

Spalovna v Malešicích byla uvedena do provozu v roce 1998 a v průběhu let se její stálou inovací zlepšily celkové emisní limity. Termicky využíváno je zde cca 80 % celkového množství směšného komunálního odpadu v rámci celopražského systému. Zařízení je napojeno na tepelnou Malešice a energie vzniká spalováním odpadů je využívána v pražské rozvodné síti. V roce 2007 byly do provozu uvedeny dioxinové filtry, odstraňující ze spalin oxidy dusíku a dioxiny. [35]

**Použitá technologie:** V Malešicích jsou použity čtyři válcové rošty – systém Düsseldorf. Každý rošt má šest sestupně uspořádaných válců pod úhlem 30°. Pro čištění spalin je použita technologie SNCR přímo na kotli, dále je užita rozprašovací sušárna, elektroodlučovač, DeDiox katalyzátor (keramický katalyzátor, jehož aktivními složkami jsou  $V_2O_5$  a  $WO_3$  na nosiči  $TiO_2$ ), SCR čpavkovou vodou, mokrá vápenná vypírka a aktivní uhlí pro záchyt těžkých kovů a POPs. [56]



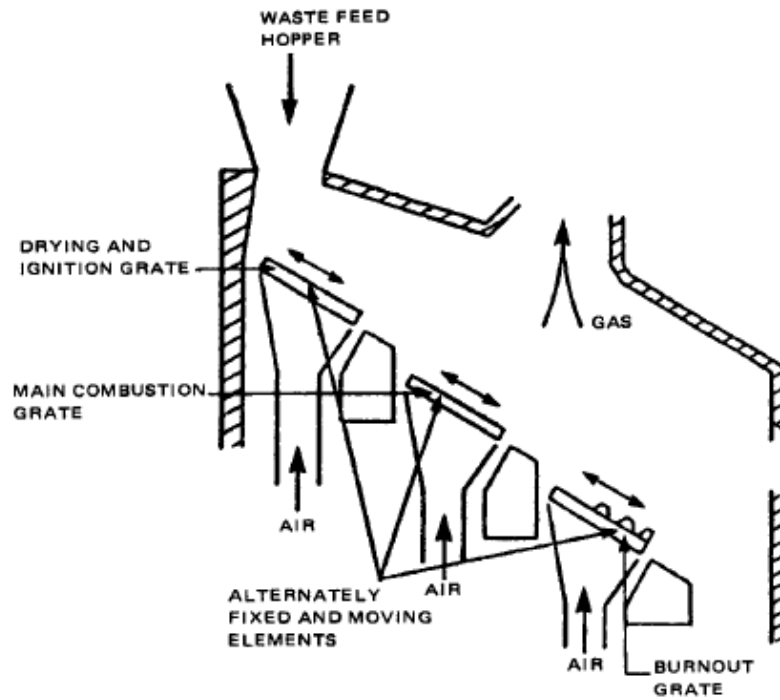
Obr. 15 Technologické schéma ZEVO Malešice [64]

### 5.3 TERMIZO Liberec

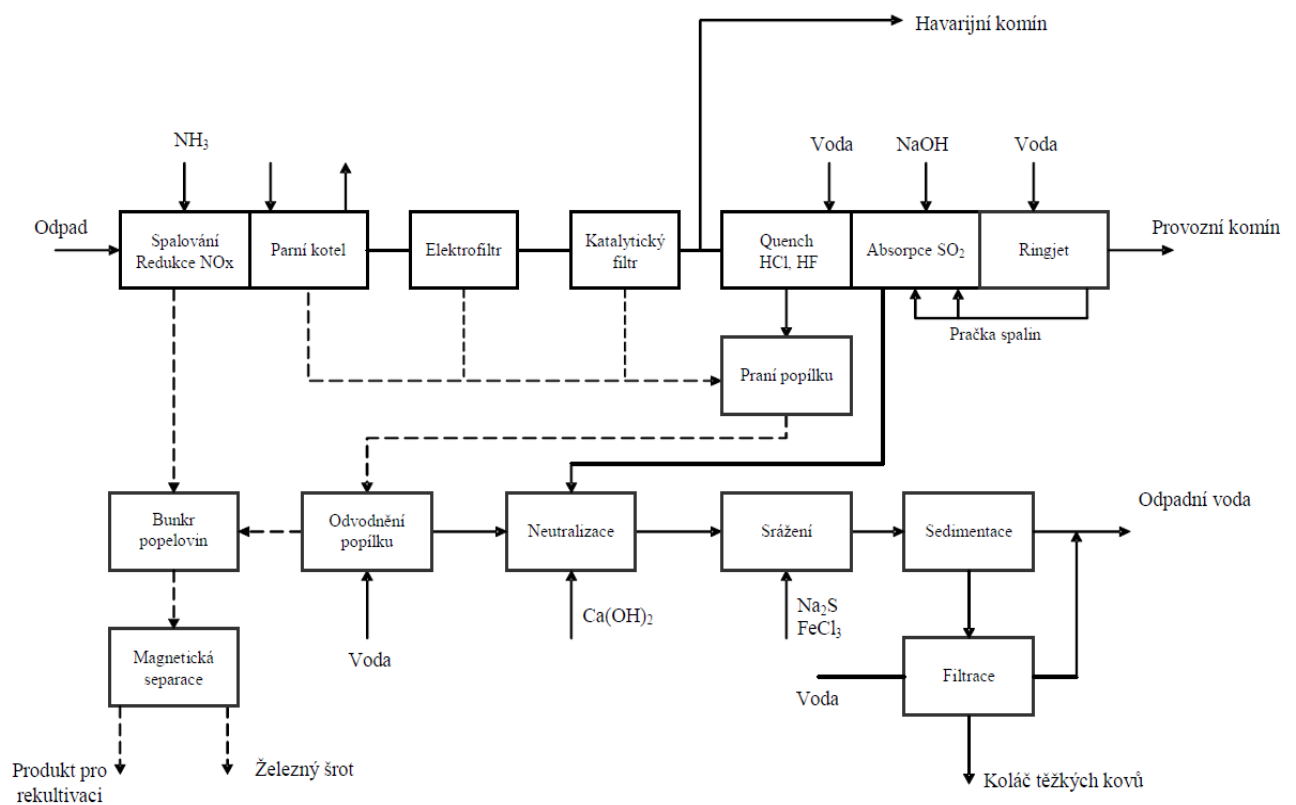
Výstavba spalovny komunálního odpadu v Liberci byla zahájena v roce 1996. Stavbu financovala společnost TERMIZO a.s. Zařízení na energetické využití odpadu je v provozu od roku 1999 a kapacita jeho provozu je v podstatě od počátku uvedení do provozu naplněna na 95–100 %.

Termizo je vysoce účinný kogenerační zdroj. Za rok energeticky využije průměrně 96 000 tun odpadů. Z těchto odpadů vyrobí teplo pro cca 17 000 domácností (tzn. cca 700 TJ tepla). Tím dokáže nahradit spalení zhruba 30 milionů  $\text{m}^3$  zemního plynu. Vlastní turbíny vyrobí elektrickou energii pro chod celé technologie spalovny, a ještě do veřejné sítě dodají 13 GWh elektřiny, což je roční spotřeba 3 000 domácností. Spalovna ročně z původního množství přijatého komunálního odpadu oddělí cca 100 tun toxických kovů. Tyto kovy jsou dále zpracovány a předány na zabezpečenou skládku nebezpečných odpadů. [36]

**Použitá technologie:** Spalovna ke svému provozu používá jeden kotel s přesuvným roštem – systém von Roll (Obr. 13). Rošt je tvořen trojicí pohyblivých roštnic sloužících k posunu odpadu. Na první z nich dochází k sušení a zapálení, na druhé ke spalování a na třetí k dohořívání odpadu. Pro čištění spalin je využita SNCR nástřikem čpavku, elektrofiltr, třístupňová pračka spalin založená na fyzikálně chemické absorpci a textilní katalytický dioxinový filtr. [16, 56]



Obr. 16 Přesuvný rošt (systém von Roll) [16]



Obr. 17 Blokové schéma TERMIZO Liberec [65]

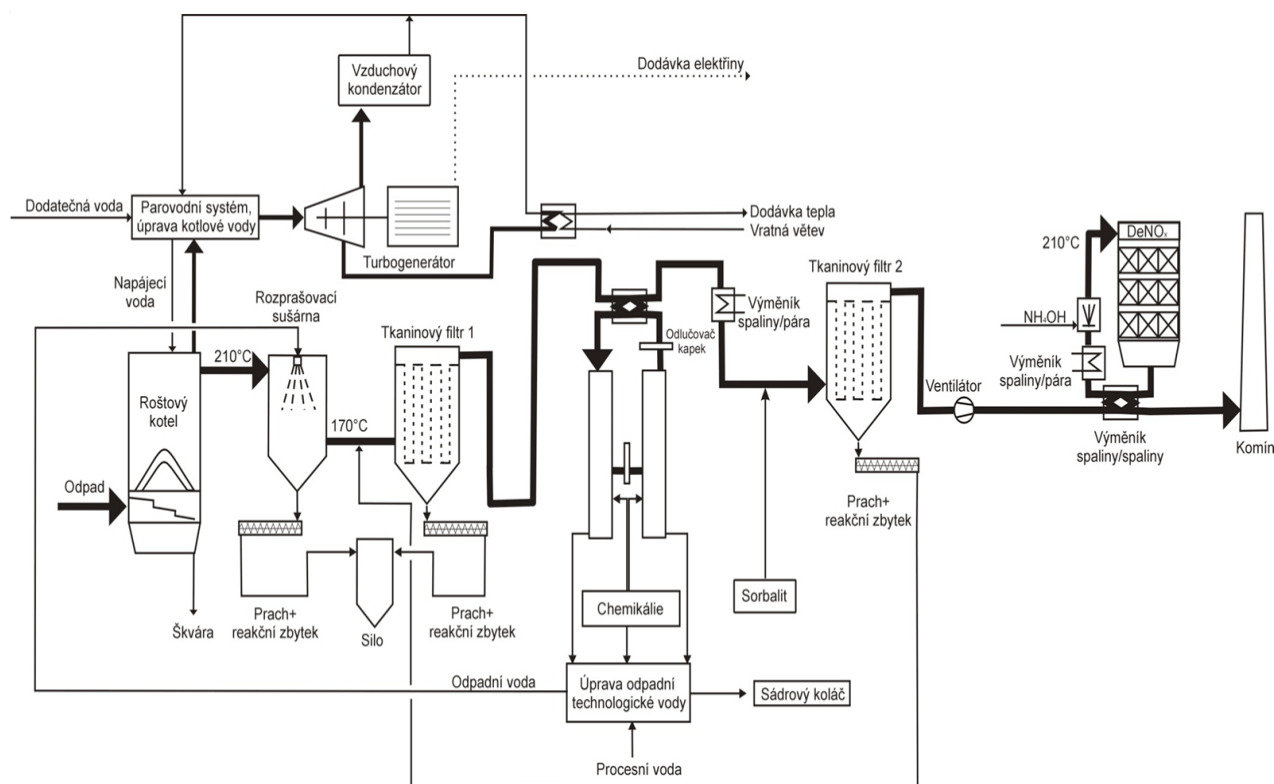
## 5.4 ZEVO Chotíkov

Roku 2002 poskytlo velvyslanectví USA grant Plzeňské teplárenské na vypracování studie o možnosti nakládání s komunálním odpadem v Plzeňském kraji. Závěrem studie bylo, že je možné spalovat a energeticky využívat až 100 000 tun odpadu ročně. [37]

Roku 2009 Plzeňská teplárenská rozhodla o záměru výstavby spalovny a zvolila ověřenou technologii, tedy klasický parní kotel s roštovým ohništěm. Až do zahájení zkušebního provozu ztratila stavba celkem třikrát stavební povolení. To způsobilo stavební zpoždění a navýšení rozpočtu o 200 milionů korun. Začátkem srpna 2016 bylo celé zařízení uvedeno do zkušebního provozu. [37, 38]

Spalovna je koncipovaná jako zdroj kombinované výroby elektřiny a tepla. Elektrická energie se primárně využívá pro vlastní spotřebu a zbytek generované el. energie je veden do distribuční sítě. Horká voda je dodávána do sítě CZT Plzeňské teplárenské. V zařízení je instalovaný maximální tepelný výkon 22 MWt a celková výroba se předpokládá v objemu 396 000 GJ/rok. [37]

**Použitá technologie:** Spalovna používá jeden kotel s vratisuvným roštem Martin (obdobná technologie jako v brněnské spalovně). K čištění spalin je použita rozprašovací sušárna s nástřikem odpadní vody umístěná přímo za kotlem, dále dva tkaninové filtry, dvoustupňová pračka spalin s odlučovačem kapek a aerosolů, pojistný filtr, do kterého je dávkován sorbalit, katalytický reaktor pro destrukci NO<sub>x</sub> a dioxinů (metoda SCR), spalinový ventilátor a úpravná technologických odpadních vod. [57]



Obr. 18 Technologické schéma ZEVO Chotíkov [57]

## 5.5 Porovnání

Na základě údajů udávaných jednotlivými společnostmi a jejich výročních zpráv byla pro porovnání sestavena následující tabulka udávající technické parametry jednotlivých zařízení, množství spáleného odpadu a produkci energie za rok 2015.

Tab. 9 Technické parametry ZEVO [23, 60, 61]

		<b>SAKO Brno</b>	<b>ZEVO Malešice</b>	<b>TERMIZO Liberec</b>	<b>ZEVO Chotíkov<sup>10</sup></b>
Kapacita spalovny (t odpadu/rok)		248 000	330 000	96 000	95 000
Počet kotlů		2	3+1 rezervní	1	1
Spalovací výkon (t odpadu/hod)		8-16	15	12	12
Jmenovitý parní výkon (t páry/hod)		45	30	43	42
Nominální výkon turbíny (MWe)		22,7	17,44	3,5 + 1	10,5
Parametry páry	teplota (°C)	400	235	400	400
	tlak (MPa)	4	1,37	4,3	4,1
Množství spáleného odpadu za rok 2015 (t)		226 387	313 994	91 524	0
Produkce energie za rok 2015 <sup>11</sup>	teplo (TJ)	1000	850	975	400
	elektrická energie (GWh)	62,5	65	24	45

<sup>10</sup> Zařízení v roce 2015 ještě nebylo v provozu, proto jsou u produkce energie udány předpokládané hodnoty.

<sup>11</sup> Jedná se o celkovou produkci energie. Část z ní je určena pro vlastní provoz zařízení, proto je do CZT a distribuční sítě dodávána menší hodnota, než je výše uvedena.

## 6 RIZIKA SPOJENÁ S EVO

Jedním z hlavních argumentů obyvatel proti výstavbě ZEVO je obava z vypouštěných škodlivin a zhoršení kvality ovzduší v jejich okolí. Spalovny totiž musí být umístěny ve vysoce obydlených oblastech s dostatečnou produkcí odpadu o určité výhřevnosti. Ve skutečnosti je však spalování odpadu hned po spalování zemního plynu nejčistším výrobcem tepelné energie (viz tab. 9). To je způsobeno sledováním velice široké škály škodlivin vypouštěných do ovzduší a velmi přísně nastavenými emisními limity. [50] Na grafu 4 lze potom vidět, že všechny tři ZEVO provozovaná v roce 2015 dodržovaly dané limity se značnou rezervou. Technologie používané k čištění spalin byly popsány v kapitole 3.3.

Dalším častým argumentem proti spalování odpadů je snížení motivace k jejich recyklaci. Snaha o zajištění určitých vlastností odpadu jako paliva (především výhřevnosti) může vést ke spalování recyklovatelných složek. Už v současnosti se spalováním stejně jako skládkováním množství využitelných druhotných surovin ničí. Energetické využití odpadu na rozdíl od skládkování celkové plýtvání snižuje, ale nesnižuje závislost ekonomiky na prvotních surovinách tak jako recyklování.

EU navíc není nakloněna financování výstavby dalších ZEVO. Ta jsou především kvůli vysokým nárokům na čištění spalin velmi nákladnými zařízeními. Navíc bez dotací od EU jsou ZEVO v podmínkách ČR výrazně dražší, než je současná cena skládkování či spoluspalování paliv vyrobených z odpadu. [39] Plán odpadového hospodářství počítá s úplným zákazem skládkování k roku 2024 a značným zvýšením podílu recyklování. V současnosti na skládkách skončí zhruba 50 % komunálního odpadu a při zákazu skládkování nebudou současné kapacity ZEVO ani zdaleka stačit. Recyklování tento problém také neřeší, ať už z hlediska ekonomického, tak i technického. Zvýšit třídění odpadů o desítky procent oproti současnému stavu, kdy už bylo do velké míry zavedeno a modernizováno by znamenalo vytvoření nových míst na kontejnery v již tak přeplněných sídlištích a zavést třídění až do rodinných domů. Přičemž náklady s tím spojené (investiční i provozní) by byly dokonce vyšší než při využití odpadů v ZEVO a bez financování ze strany výrobců obalů prostřednictvím společnosti EKO-KOM pro obce téměř neproveditelné. [39]

Z technologického hlediska také není možné dosáhnout stoprocentního opětovného využití. I skutečně vyspělé státy nedokáží recyklovat více než 70 % odpadu. Další problém pro opětovné využití představuje BRKO. Už při pětiprocentním podílu BRKO v komunálním odpadu odpadá možnost jeho biologicky-mechanického zpracování a odpad se tak musí spalovat nebo skládkovat. [40]

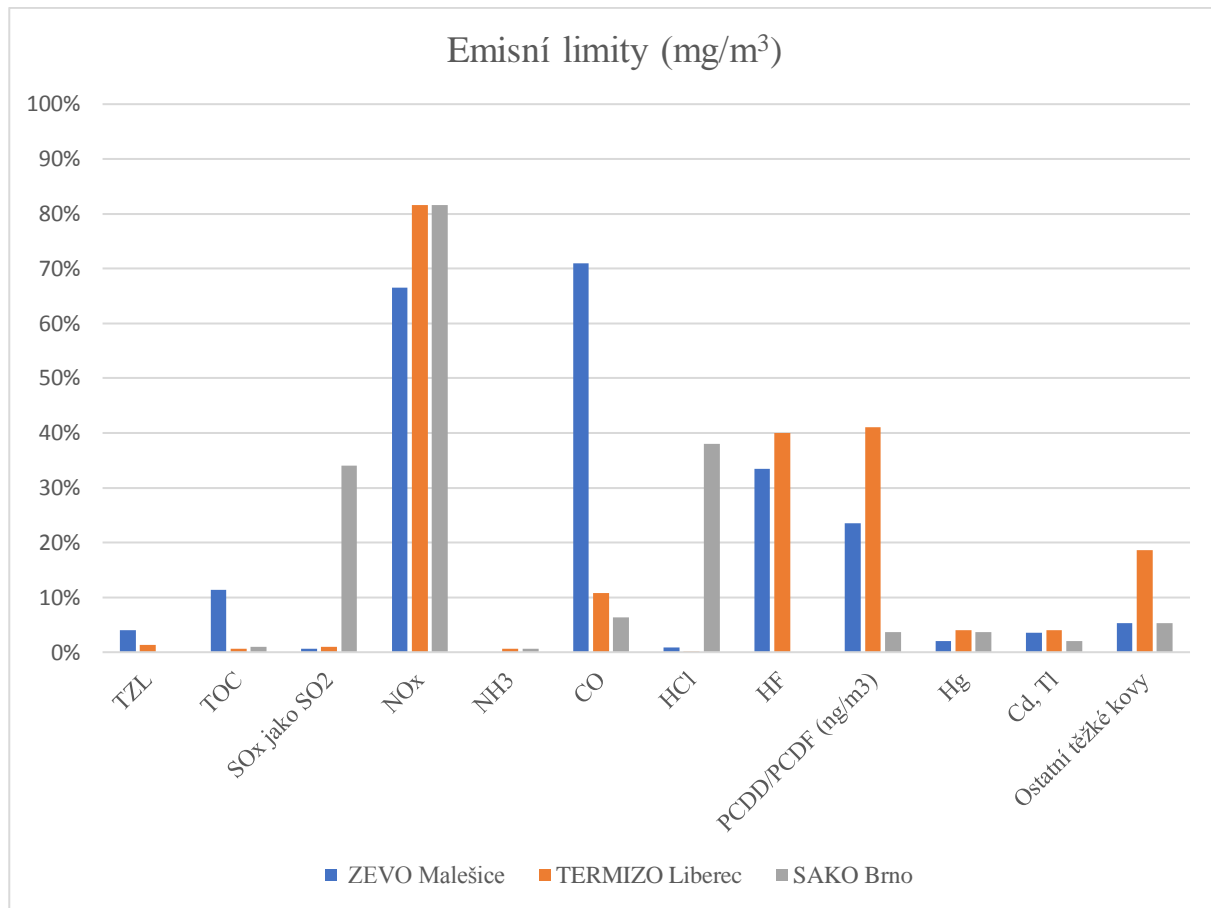
Evropská i česká legislativa ve své odpadové hierarchii jednoznačně preferují materiálové využití před energetickým. Při úplném zákazu skládkování však budou potřeba obě. Otázka, v jakém poměru by měla tato využití existovat je čistě ekonomická. Země s nejvyšším podílem energetického využití (Dánsko, Švédsko a Norsko) spalují více jak 50 % KO a současně mají i vysokou míru recyklace – zhruba 30 %. Toto má za následek relativně rozsáhlá výstavba ZEVO z dotací EU před zavedením odpadové hierarchie. Po změně plánů pro nakládání s odpadem už v těchto zemích nebyl dostatek prostoru pro rozvoj recyklace. Překročení současné hranice 30 % by mělo za následek nedostatek odpadu pro naplnění kapacit vystavěných ZEVO. Naopak v Německu, ve kterém v tomto období nedošlo k tak výraznému rozmachu energetického využití, je tento poměr opačný – 37 % spalování a 50–60 % recyklace. [41]

Tab. 10 Porovnání množství sledovaných látek vypuštěných do ovzduší při výrobě tepla v různých zařízeních vztaženo na 1 MWh vyrobeného tepla<sup>12</sup> [50]

Režim výroby tepla	Roštové spalování hnědého práškového uhlí	Zemní plyn	Zařízení na spalování biomasy s tepelným výkonem do 50 MW	EVO s převážnou výrobou tepla
Účinnost výroby energie (% na LHV)	85	92	85	66,5
Měrná spotřeba paliva (t/MWh)	0,28	109 (Nm <sup>3</sup> /MWh)	0,28	0,55
CO (g/MWh)	394	109	1475	133
SO <sub>2</sub> (g/MWh)	1339	38	5673	133
NO <sub>2</sub> (g/MWh)	630	163	1475	530
TZL <sup>13</sup> (g/MWh)	79	5	567	27
CO <sub>2</sub> (t/MWh)	0,42	0,22	0,33	0,46

<sup>12</sup> Vypočteno s využitím emisních limitů podle vyhlášky č. 352/2002 Sb. a vyhlášky č. 254/2002 Sb. a předpokládaných účinností výroby energie.

<sup>13</sup> TZL (tuhé znečišťující látky) jsou částice od 0,1 μm po 0,5 mm s různorodým složením vznikající např. při spalování paliv. Z hlediska lidského zdraví jsou nejnebezpečnější částice v rozmezí 0,25 až 5 μm, přičemž nejvíce jsou v plicích zadržovány částice o velikosti kolem 1 μm. [62]



Graf 4 Procentuální dodržování emisního limitu jednotlivých ZEVO za rok 2015<sup>14</sup> [57, 59, 60, 61]

<sup>14</sup> TOC (celkový organický uhlík – z anglického Total organic carbon) udává množství všech organických látek přítomných ve spalinách.



## ZÁVĚR

S rostoucí životní úrovní roste i množství produkováného odpadu. Podle legislativy EU by se však měl zvyšovat i podíl jeho opětovného využití. V ČR ale stále převažuje skládkování, dle odpadové hierarchie EU nejméně žádaný způsob nakládání s odpadem, nad opětovným či energetickým využitím. Plán odpadového hospodářství počítá s úplným zákazem skládkování do roku 2024. Pokud k plánovanému zakazu skutečně dojde, bude třeba výrazně navýšit recyklování odpadů, které přímo závisí na kvalitě třídění. Míra třídění odpadů v ČR už v současnosti dosahuje vysoké úrovně, s opětovným využitím je to však problematické. Kvůli špatné informovanosti obyvatelstva dochází při třídění k častým chybám, které mají za následek znehodnocení tříděných odpadů a znemožnění jejich opětovného využití. Nedostatek recyklačních linek, které by z druhotných surovin vyráběly další produkty, také způsobuje to, že velká část tříděných odpadů je nakonec ukládána na skládky. Další možnou alternativou je právě energetické využití odpadů.

Z energetického hlediska se komunální odpad jeví jako vhodné palivo. Svou výhřevností se blíží hnědému uhlí. K energetickému využití jsou však vhodné převážně odpady ze sídlištní zástavby, neboť často obsahují větší podíl plastů a papíru a na rozdíl od odpadů z venkovské zástavby neobsahují popeloviny, suť a další složky, které mají negativní vliv na celkovou výhřevnost. Spálením odpadu se výrazně redukuje jeho celkový objem a hmotnost a snižuje se tak celkové množství odpadu ukládaného na skládky a zjednodušuje se separace kovů k jejich opětovnému využití. Výroba tepla a elektrické energie ve spalovnách může mít také příznivý vliv na cenu energie v domácnostech. Odpad se na rozdíl od běžných tuhých paliv nemusí těžit a následně nakupovat od dodavatelů.

Drtivá většina energeticky využívaného odpadu je spalována v zařízeních na energetické využití odpadu. K tomu je užitá celá řada technologií. Pro spalování komunálních odpadů jsou nejčastěji používány roštové pece. Důvodem je provozní spolehlivost a dostatek zkušeností s jejich provozem a údržbou ze spalování tuhých fosilních paliv. Ohniště také nevyžaduje jemné mletí a homogenizaci paliva. Největší význam mají rošty s občasným přemísťováním paliva, tedy rošty přesuvné, vratisuvné a válcové. Pyrolýza odpadu, tedy jeho tepelný rozklad za nepřístupu oxidační atmosféry, slouží k výrobě pyrolýzního plynu a koksu. Nejčastěji se k tomu používají rotační pece s termoreaktorem. Podobně zplyňování, tedy tepelný rozklad odpadu za podstechiometrického obsahu kyslíku, slouží k výrobě plynu, který se dále využívá jako palivo.

Častým argumentem proti výstavbě spaloven odpadů je obava obyvatel z vypouštěných škodlivin a zhoršení kvality ovzduší v jejich okolí. Spalovny musí být stavěny v blízkosti velkých měst, aby bylo zajištěno naplnění jejich kapacit kvalitním odpadem. Ve skutečnosti jsou však na spalování odpadů kladeny nejpřísnější nároky z hlediska emisí škodlivých látek. Při spalování odpadů se totiž uvolňují látky, které spalováním běžných tuhých paliv nevznikají. Spalovny jsou proto vybaveny několikasupňovým čištěním spalin, které bývá také nejdražší část celé spalovny. Technologie čištění spalin v těchto zařízeních jsou na takové úrovni, že dokáží již tak přísné limity i s velkými rezervami splňovat.

V ČR existuje velký prostor pro rozvoj ZEVO a zvýšení podílu energetického využití odpadu na úkor skládkování. Při úpravě legislativy a zvýšení podpory pro výstavbu těchto zařízení by se ČR plánovanému zakazu skládkování do roku 2024 mohla z velké části přiblížit.

**SEZNAM ZDROJŮ**

- [1] Ministerstvo životního prostředí: *Odpadové hospodářství* [online]. [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/cz/odpadove\\_hospodarstvi](http://www.mzp.cz/cz/odpadove_hospodarstvi)
- [2] Zákon č. 185/2001 Sb. O odpadech a o změně některých dalších zákonů. In: *Sbírka zákonů České republiky*. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/8FC3E5C15334AB9DC125727B00339581/\\$file/Z%20185\\_2001.pdf](http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/8FC3E5C15334AB9DC125727B00339581/$file/Z%20185_2001.pdf)
- [3] EnviWeb: *Katalog odpadů* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/katalog>
- [4] RICHTER, Miroslav. *Technologie ochrany životního prostředí (Část III): Technologie zneškodňování odpadů* [online]. Ústí nad Labem, 2008 [cit. 2017-02-20]. Dostupné z: [http://www.fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/tezp/tezp3.pdf](http://www.fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/tezp/tezp3.pdf)
- [5] Český statistický úřad. *Produkce, využití a odstranění odpadů - 2015* [online]. [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2015>
- [6] Hierarchie nakládání s odpady. *Odpad je energie!* [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.odpadjeenergie.cz/ochrana-zp/vychodiska/hierarchie-nakladani-s-odpady>
- [7] ČR nechce být skládkovací velmocí. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/cz/news\\_160505\\_zakon\\_odpady](http://www.mzp.cz/cz/news_160505_zakon_odpady)
- [8] *Vítejte na Zemi...* [online]. [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.vitejenazemi.cz/cenia/>
- [9] Jak se rozdělují skládky? *Třetí ruka* [online]. [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.tretiruka.cz/news/jak-se-rozdeluji-skladky-/>
- [10] BALÁŠ, Marek, Zdeněk SKÁLA a Martin LISÝ. *Spalovny odpadu – odpad jako palivo* [online]. [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/energie-z-odpadu/11897-spalovny-odpadu-odpad-jako-palivo>
- [11] HORÁK, Jiří a Petr KUBESA. *Spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (1)* [online]. [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>
- [12] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4770-7.
- [13] *KIC Odpady* [online]. [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.kic-odpady.cz/ptejte-se-nas.html>
- [14] HRDLIČKA, František a Jan OPATŘIL. *Odborné posouzení možnosti spalování odpadu o velmi nízké výhřevnosti* [online]. 2016 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.caoh.cz/data/action/caoh-odborny-posudek-cvut.pdf>
- [15] ČERNÍK, Bohumil, Libuše BENEŠOVÁ a Markéta DOLEŽALOVÁ. Tepelné charakteristiky a obsah vybraných prvků v domovních odpadech v ČR. *Odpadové fórum*. 2010, (10), 10-11.

- [16] KREITH, Frank. a George. TCHOBANOGLOUS. *Handbook of solid waste management*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2002. ISBN 00-713-5623-1.
- [17] World Bank: *Municipal solid waste incineration: Technical guidance report* [online]. 1999 [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/urbanupgrading/urbanenvironment/resources/references/pdfs/MunicipalSWIncin.pdf>
- [18] Výhřevnosti paliv. *TZB-Info* [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [19] Seznam spaloven odpadů v ČR. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/ueo/oez/emise/spalovny/>
- [20] FIEDOR, Jiří. *Odpadové hospodářství I: učební text*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2573-1.
- [21] HORÁK, Jiří a Petr KUBESA. *Spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (2)* [online]. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/8644-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-2>
- [22] HLAVATÁ, Miluše. *Odpadové hospodářství*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0737-8.
- [23] Technologický proces - brožura. *SAKO Brno* [online]. [cit. 2017-02-27]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/materialy-ke-stazeni/cz/>
- [24] Snižování tuhých emisí. *Skupina ČEZ* [online]. [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: [https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovani\\_5.html](https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/snizovani_5.html)
- [25] Zachycení a zpracování popílku a škváry, čištění spalin. *Odpad je energie!* [online]. [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <http://www.odpadjeenergie.cz/vyroba-energie/proces/zachyceni-popilku-zpracovani-skvary-a-popilku-cisteni-spalin>
- [26] Schéma spalovny. *SAKO a.s.* [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/upload/1376039422.jpg>
- [27] RICHTER, Miroslav a Otakar SÖHNEL. *Průmyslové technologie III: Stroje a zařízení průmyslu* [online]. 2012 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: [http://fzp.ujep.cz/ktv/uc\\_texty/pt3/1PT3Skripta.pdf](http://fzp.ujep.cz/ktv/uc_texty/pt3/1PT3Skripta.pdf)
- [28] PALATÝ, Jiří. *Základy ochrany prostředí*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1993. ISBN 80-708-0173-5.
- [29] VEJVODA, Josef, Pavel MACHAČ a Petr BURYAN. *Technologie ochrany ovzduší a čištění odpadních plynů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2003. ISBN 80-708-0517-X.
- [30] ŠYC, Michal, Vladimír PEKÁREK, Michal PUNČOCHÁŘ a Eva FIŠEROVÁ. *Metody destrukce chlorovaných aromatických uhlovodíků ze spalin* [online]. Brno, 2005 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: [www.eu.fme.vutbr.cz/file/237\\_1\\_1/](http://www.eu.fme.vutbr.cz/file/237_1_1/)

- [31] EV ECO Brno, s.r.o.: *Technologie ke snižování emisí* [online]. [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: [http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/6\\_pcddf\\_fin\\_oplzz.pdf](http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/6_pcddf_fin_oplzz.pdf)
- [32] HYŽÍK, Jaroslav. *Technologie dediox k omezování emisí látek typu PCDD/F* [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/technologie-dediox-k-omezovani-emisi-latek-typu-pcddf/>
- [33] SAKO Brno: *Historie spalování* [online]. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/stranka/cz/142/historie-spalovani/>
- [34] CIESLAR, Stanislav. *Odpady se v Brně zpracovávají ekologicky a energeticky* [online]. 2011 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/odpady-se-v-brne-zpracovavaji-ekologicky-a-energeticky/>
- [35] Představení společnosti. *Pražské služby* [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.psas.cz/index.cfm/o-spolecnosti/predstaveni-spolecnosti/>
- [36] Základní informace. *TERMIZO* [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://tmz.mvv.cz/o-spolecnosti/zakladni-informace/>
- [37] MORAVEC, Jan. *ZEVO Chotíkov – trnitá cesta moderní spalovny odpadů* [online]. 2016 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/teplarenstvi/zevo-chotikov-trnita-cesta-moderni-spalovny-odpadu/>
- [38] MOHRMANN, Pavel. *ZEVO Chotíkov je už v plném provozu* [online]. 2016 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.prumyslovaekologie.cz/Dokument/100345/zevo-chotikov-je-uz-v-plnem-provozu.aspx>
- [39] BIELAN, Petr. Výroba paliv ze směsných komunálních odpadů. *Odpadové fórum*. 2015, (4), 12.
- [40] Komunální odpad. *Třídění odpadu* [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.trideniodpadu.cz/komunalni-odpad>
- [41] BŘEZOVÁ, Kateřina. *Brzdí spalovny recyklaci odpadů?* [online]. 2013 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://brezova.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=359133>
- [42] MOLEK, Tomáš. *Pyrolýza – princip, historie a současnost* [online]. 2017 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/pyrolyza-princip-historie-a-soucasnost/>
- [43] Ministerstvo životního prostředí ČR: *Studie zařízení na pyrolitický rozklad odpadů* [online]. 2017 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: [http://www.opzp2007-2013.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003\\_pyrolyza\\_i.pdf](http://www.opzp2007-2013.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003_pyrolyza_i.pdf)
- [44] SÝKORA, František. *Pyrolýza pro netříděný odpad*. *Odpady online* [online]. [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://odpady-online.cz/pyrolyza-pro-netrideny-odpad/>,
- [45] ŠEJVL, Radovan. *Energie z odpadů II*. *Biom.cz* [online]. 2013 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energie-z-odpadu-ii>
- [46] Energetické využití odpadů: *Odpad je nevyčerpatelný zdroj energie*. *Odpadové fórum* [online]. 2010 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: <http://www.kic-odpady.cz/dokumenty/energeticke-vyuziti-odpadu-2011.pdf>

- [47] Hierarchie odpadového hospodářství. *Odpadové hospodářství Horní Slavkov* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: <http://pvo.arnika.org/images/articles/hierarchie.png>
- [48] Polychlorované bifenoly. *Základní charakteristika PCB* [online]. [cit. 2017-03-05]. Dostupné z: [http://www.irz.cz/repository/latky/polychlorovane\\_bifenoly.pdf](http://www.irz.cz/repository/latky/polychlorovane_bifenoly.pdf)
- [49] Tuhá paliva - Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti. *ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA ČSN ISO 1928* [online]. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: [http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html\\_nahledy/44/42115/42115\\_nahled.htm](http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/44/42115/42115_nahled.htm)
- [50] PROCHÁZKA, Ondřej. Porovnání emisí škodlivin ze spaloven KO a klasických energetických zdrojů. *Odpadové fórum*. 2010, (10), 12-13.
- [51] Technologie a biotechnologie: Přehled technologií použitelných ke zneškodnování POPs. *Úvodní národní inventura POPs v ČR* [online]. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: [http://www.recetox.muni.cz/nc/res/file/2003/POPsINV\\_cast\\_VII\\_Kapitola\\_14\\_Technologie.pdf](http://www.recetox.muni.cz/nc/res/file/2003/POPsINV_cast_VII_Kapitola_14_Technologie.pdf)
- [52] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle - 2. část. *TZB-info* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [53] A SLAGGING TYPE ROTARY KILN INCINERATOR. *Waste Treatment Technology in JAPAN* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://infohouse.p2ric.org/ref/26/japan/TWFig-131-1.gif>
- [54] TRÁVNÍČEK, Petr. *Technika pro zpracování odpadů: Spalovny odpadů* [online]. 2015 [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/files/210/19558.pdf](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/210/19558.pdf)
- [55] BENEŠOVÁ, Libuše, Zdenka KOTOULOVÁ a Bohumil ČERNÍK. *Základní charakteristiky komunálních odpadů* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: [http://www.mni-sek.cz/e\\_download.php?file=data/editor/234cs\\_2.pdf&original=STANO-VEN%C3%8D+PRODUKCE+ODPAD%C5%AE-P%C5%98%C3%8DLOHA.pdf](http://www.mni-sek.cz/e_download.php?file=data/editor/234cs_2.pdf&original=STANO-VEN%C3%8D+PRODUKCE+ODPAD%C5%AE-P%C5%98%C3%8DLOHA.pdf)
- [56] Informace o spalovnách za rok 2015. *Český hydrometeorologický ústav* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web\\_generator/incinerators/index\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/incinerators/index_CZ.html)
- [57] Schéma ZEVO. *ZEVO Plzeň* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <https://www.zevoplzen.cz/schema>
- [58] Gasification Furnace. *WtE systems through gasification* [online]. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: [http://www.coeopro.com/index.php?page=sistemas\\_de\\_gasificacao\\_de\\_alta\\_temperatura](http://www.coeopro.com/index.php?page=sistemas_de_gasificacao_de_alta_temperatura)
- [59] Porovnání emisních limitů pro různé energetické zdroje. *SAKO Brno a.s.* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.sako.cz/upload/1485329930.png>
- [60] Výroční zpráva za rok 2015. *Pražské služby, a.s.* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.psas.cz/index.cfm/info-pro-akcionare/20161/vyrocnizprava-2015/>
- [61] Výroční zpráva za rok 2015. *Termizo a.s.* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: [http://tmz.mvv.cz/wp-content/uploads/2016/04/TMZ-AR\\_ROR\\_2015\\_final\\_formatted.pdf](http://tmz.mvv.cz/wp-content/uploads/2016/04/TMZ-AR_ROR_2015_final_formatted.pdf)

- [62] Tuhé znečišťující látky (TZL). *Čisté nebe* [online]. [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: <http://www.cistenebe.cz/stav-ovzdusi-na-ostravsku/slovnicek-pojmu/146-tuhe-znecistujici-latky-tzl>
- [63] PCDD+PCDF (dioxiny+furany) (jako TEQ). *Integrovaný registr znečišťování MŽP ČR* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <https://www.irz.cz/node/81>
- [64] Technologie a technické parametry ZEVO. *VŠCHT* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/1ZOZP/odpady/malesice.htm>
- [65] Příprava výzvy k předkládání žádostí na projekty spalování KO. *Bioprofit* [online]. [cit. 2017-04-23]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/el/1456/jaro2010/MPV\\_TMHV/12003184/Bioprofit.pdf](https://is.muni.cz/el/1456/jaro2010/MPV_TMHV/12003184/Bioprofit.pdf)