



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**SYSTÉMOVÉ ŘEŠENÍ PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ  
ZDRAVOTNICKÝCH ODPADŮ**

SYSTEMATIC APPROACH FOR MEDICAL WASTE-TO-ENERGY PROCESSING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jan Hanus**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Martin Krňávek**

**BRNO 2019**

## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Bc. Jan Hanus**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Procesní inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Krňávek**  
Akademický rok: 2018/19

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 diplomové práce:

### **Systémové řešení pro energetické využití zdravotnických odpadů**

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

Problematika nakládání s nebezpečným zdravotnickým odpadem je v České republice a také v ostatních zemích světa aktuálním tématem, které je třeba řešit. Energetické využívání odpadů (EVO) představuje nezanedbatelný potenciál pro krytí potřeb komunální i podnikové sféry z hlediska zpracování odpadů a dodávek tepla, eventuálně elektrické energie. Při návrhu moderních zařízení EVO je třeba klást důraz na bezpečnost a vysokou účinnost celé technologie a systému tak, aby byla zajištěna ochrana zdraví osob a životního prostředí a v maximální možné míře byla využita energie obsažená v odpadech. Práce se zabývá technologickou jednotkou pro energetické využití zdravotnických odpadů s cílem jejího efektivního začlenění do systému nakládání s odpady a systému zásobování energií.

#### **Cíle diplomové práce:**

Seznámit se s problematikou zpracování a energetického využití zdravotnických odpadů a zhodnotit aktuální situaci v ČR.

Navrhnout integraci moderní technologické jednotky pro energetické využití zdravotnických odpadů do systému nakládání s odpady a systému zásobování energií.

Vyhodnotit navrhované řešení energetického využití zdravotnických odpadů z hlediska technických, ekologických a ekonomických aspektů.

#### **Seznam doporučené literatury:**

STEHLÍK, Petr. Up-to-date waste-to-energy approach: From idea to industrial application. Cham: Springer International Publishing, 2016. Briefs in applied sciences and technology (Springer). ISBN 978-3-319-15466-4.

SANTOLERI, Joseph J., Louis THEODORE a Joseph REYNOLDS. Introduction to Hazardous Waste Incineration. Second edition. New York: John Wiley, 2000. ISBN 0-471-011790-6.

LOMBARDI, Lidia, Ennio CARNEVALE a Andrea CORTI. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. Waste Management. 2015, 37, 26-44. ISSN 0956053x. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X14005273>

ZIMOVÁ, Magdalena, Zdeňka PODOLSKÁ, Petra CWIKOVÁ a Luboš RAJDL. Acta hygienica, epidemiologica et microbiologica: Metodické doporučení Státního zdravotního ústavu pro přepravu nebezpečných odpadů ze zdravotní a veterinární péče z hlediska požadavků Evropské dohody o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí - ADR [online]. Státní zdravotní ústav v Praze, 2017, 2017(1) [cit. 2018-10-23]. ISSN 1804-9613. Dostupné z: [http://www.szu.cz/uploads/documents/knihovna\\_SVI/pdf/2017/AHEM\\_1\\_2017.pdf](http://www.szu.cz/uploads/documents/knihovna_SVI/pdf/2017/AHEM_1_2017.pdf)

Metodika pro nakládání s odpady ze zdravotnických, veterinárních a jim podobných zařízení. Praha: Státní zdravotní ústav, 2016. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/nakladani\\_s\\_odpady\\_zdravotnictvi/\\$FILE/OODP-metodika\\_zdravotnicke\\_odpady-20170424.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/nakladani_s_odpady_zdravotnictvi/$FILE/OODP-metodika_zdravotnicke_odpady-20170424.pdf)

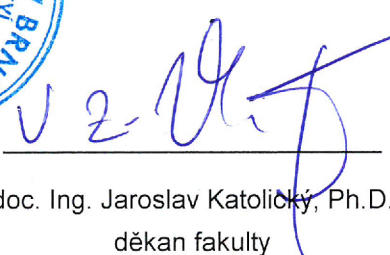
Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic. In: Úřední věstník EU. Lucemburk: Úřad pro publikace Evropské unie, 2008, ročník 2008, číslo 98. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=CS>

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 23. 10. 2018

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu



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

---

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá současnou situací nakládání se zdravotnickými odpady v České republice a dostupnými technologiemi pro zpracování těchto odpadů. V první části je věnována pozornost platné legislativě v dané oblasti, analýze současné situace na území České republiky a porovnání se situací v Evropské Unii. Druhá část práce popisuje technologie určené pro nakládání s nebezpečnými odpady produkovanými zdravotnickými zařízeními, spolu s navazujícími možnostmi využití energie vznikající při termickém zpracování těchto odpadů.

V hlavní části práce je na základě zvolených vstupních parametrů navrženo komplexní systémové řešení pro energetické využití zdravotnických odpadů v modelovém regionu. V rámci této práce je navržen a popsán svozový systém odpadů, vhodná kapacita zařízení a skladba technologických aparátů pro termické zpracování odpadů a využití tepla. Pro navržené zařízení je vytvořen bilanční model, na základě kterého je dále posuzována efektivita využití energie. V závěru práce je navržené zařízení posouzeno z environmentálního, technického a ekonomického hlediska na základě odhadu investičních a provozních nákladů.

## **Klíčová slova**

Zdravotnické odpady, nakládání s odpady, dekontaminace odpadů, energetické využití odpadů, zařízení EVO, systém zásobování teplem, využití energie.

## **Abstract**

This master thesis deals with the current situation of medical waste management in the Czech Republic and available medical waste treatment methods. The first part summarises the legislation of waste treatment and contains an analysis of the current situation of medical waste management in the Czech Republic and comparison to the situation in the European Union. The second part describes medical waste treatment methods and following technologies for energy utilization when thermal treatment method is applied.

In the main part of this thesis, a complex medical waste-to-energy system in a model region is designed according to the input data. The design includes description of the collecting and transportation system of the waste, capacity of the unit and suitable thermal treatment and heat utilization technology choice. A calculation model is created for the proposed unit and based on this model, an analysis on energy utilization effectivity is made. As a result of the thesis, environmental, technical and economical assessment is created based on the estimation of the investment and operating costs.

## **Keywords**

Health care waste, waste management, waste decontamination, thermal treatment of waste, Waste-to-Energy, heating system, energy utilization.

---

## **Bibliografická citace**

HANUS, Jan. *Systémové řešení pro energetické využití zdravotnických odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. Diplomová práce. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Krňávek. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116738>

---

## **Prohlášení o původnosti**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Systemové řešení pro energetické využití zdravotnických odpadů“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Krňávka a s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 24.05.2019

.....  
Bc. Jan Hanus

---

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Martinu Krňávkovi za vstřícnost, ochotu, obětovaný čas a veškeré rady v průběhu zpracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Ladislavu Bébarovi, CSc. za cenné rady během celého studia a prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc. dr. h. c. za podporu, vstřícnost a pomoc během studia.

Rovněž bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům společnosti EVECŮ Brno, s.r.o. za velké množství cenných rad a zkušeností nabytých během dosavadní spolupráce a za odbornou pomoc poskytnutou při tvorbě diplomové práce.

V neposlední řadě patří upřímné poděkování mým rodičům a všem blízkým za všestrannou pomoc a trpělivost po celou dobu mého studia.

**OBSAH**

1	MOTIVACE PRÁCE.....	10
1.1	Řešená problematika.....	11
1.2	Specifika zdravotnických odpadů .....	11
2	LEGISLATIVA ZPRACOVÁNÍ ZDRAVOTNICKÝCH ODPADŮ.....	14
2.1	Evropská legislativa .....	14
2.1.1	Směrnice o skládkách odpadů.....	14
2.1.2	Směrnice o odpadech.....	14
2.1.3	Směrnice o průmyslových emisích .....	16
2.1.4	Dokumenty BREF/BAT .....	16
2.2	Legislativa ČR.....	17
2.2.1	Plán odpadového hospodářství .....	17
2.2.2	Zákon o odpadech.....	17
2.2.3	Vyhláška o podmínkách předcházení vzniku a šíření infekčních onemocnění 18	
2.2.4	Zákon o ochraně ovzduší .....	19
2.2.5	Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování.....	19
2.2.6	Zákon o posuzování vlivů na životní prostředí.....	20
3	ANALÝZA SOUČASNÉ SITUACE .....	21
3.1	Produkce zdravotnických odpadů v ČR a nakládání s nimi .....	21
3.2	Produkce zdravotnických odpadů v EU a nakládání s nimi .....	26
4	PŘEHLED TECHNOLOGIÍ PRO ZPRACOVÁNÍ ZDRAVOTNICKÝCH ODPADŮ.....	27
4.1	Technologie založené na termickém rozkladu.....	27
4.1.1	Spalování na roštu.....	27
4.1.2	Spalování v rotační peci.....	30
4.1.3	Pyrolýza.....	32
4.2	Technologie pro dekontaminaci odpadu.....	33
4.2.1	Nízkoteplotní sterilizace (vlhkým teplem) .....	34
4.2.2	Vysokoteplotní sterilizace (suchým teplem) .....	35
4.2.3	Chemická desinfekce .....	35
4.2.4	Další metody dekontaminace .....	36
4.3	Analýza reálných alternativ.....	36
4.4	Využití energie.....	37
4.4.1	Výroba tepla .....	38
4.4.2	Akumulace tepla.....	39



4.4.3	Výroba elektrické energie.....	39
4.4.4	Výroba chladu.....	40
4.5	Čištění spalin.....	41
5	MODELOVÝ REGION A VOLBA VHODNÉ TECHNOLOGIE .....	45
5.1	Rozmístění nemocnic v rámci modelového regionu .....	45
5.2	Produkce odpadů .....	46
5.3	Svoz a skladování odpadu .....	48
5.4	Požadavky provozovatele zařízení.....	50
5.5	Výběr vhodné technologie .....	51
6	STROJNĚ-TECHNOLOGICKÝ POPIS MODERNÍ JEDNOTKY .....	54
6.1	Termický systém a dávkování odpadu.....	54
6.2	Systém využití energie.....	56
6.3	Systém čištění spalin .....	58
6.4	Ostatní zařízení.....	59
7	MATERIÁLOVÁ A ENERGETICKÁ BILANCE JEDNOTKY .....	61
7.1	Parametry, vstupní proudy.....	61
7.2	Bilanční výpočty s využitím „in-house“ softwarového systému W2E.....	65
8	NAVRHOVANÉ ZPŮSOBY VYUŽITÍ PRODUKOVANÉ ENERGIE .....	68
8.1	Spotřeby tepelné energie v areálu provozovatele .....	68
8.2	Napojení na stávající systém zásobování teplem.....	71
8.3	Potenciální možnosti akumulace tepla.....	72
9	VYHODNOCENÍ NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ.....	74
9.1	Charakteristika zvolené alternativy.....	74
9.2	Ekonomické vyhodnocení.....	75
9.3	Účinnost zařízení.....	79
	ZÁVĚR A BUDOUCÍ PRÁCE .....	80
	POUŽITÁ LITERATURA.....	82
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	88
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	89
	SEZNAM TABULEK .....	90
	SEZNAM PŘÍLOH .....	91

# 1 MOTIVACE PRÁCE

Odpadové hospodářství je v současnosti velmi diskutované téma v rámci legislativy i mezi širokou veřejností. Produkce odpadů, jakožto nežádoucích produktů moderní civilizace, vykazuje neustále rostoucí charakter i přes zaváděná opatření pro snížení této produkce. Vzhledem k tomuto trendu jsou prováděny kroky vedoucí ke zlepšení celkového přístupu nakládání s odpady, jako je například zvýšení efektivity recyklace odpadů a celkového množství materiálově využitých odpadů nebo preference energetického využití odpadů před jejich skládkováním. Podobné hierarchické uspořádání lze ovšem uvažovat pouze u odpadů, které nevykazují nebezpečné vlastnosti, zejména komunálních.

U odpadů, které vykazují jednu nebo více nebezpečných vlastností, je primárním požadavkem odstranění těchto nebezpečných vlastností. Tyto odpady vznikají především v průmyslové sféře, avšak nedílnou součástí této skupiny představují zdravotnické odpady. Produkce zdravotnických odpadů je přímo úměrná vyspělosti civilizace a s rostoucí mírou a kvalitou poskytované zdravotní péče roste i produkce těchto odpadů. Důvodem k zařazení zdravotnických odpadů do kategorie nebezpečných je fakt, že část těchto odpadů vykazuje nebo může vykazovat infekčnost, případně jiné nebezpečné vlastnosti. Celkovou produkci nebezpečných zdravotnických odpadů je tedy možné do určité míry omezit, zejména kvalitou třídění v místě vzniku, avšak nelze ji zcela potlačit. Vzhledem k nebezpečným vlastnostem zdravotnických odpadů vznikají zvýšené nároky na manipulaci, časovou prodlevu před zpracováním a samotný způsob zpracování. Zejména maximální doba, která může dle legislativních požadavků uplynout mezi produkcí a zpracováním těchto odpadů, je z hlediska způsobu zpracování limitující. Často tak dochází pouze k jejich zneškodnění, výsledkem kterého není žádný způsob využití, ať už materiálové nebo energetické, naopak zneškodnění je často energeticky náročné.

Proto je vhodnějším řešením energetické využití zdravotnických odpadů. Díky svému složení (například poměrně vysokému podílu plastů) je jejich výhřevnost zpravidla vyšší než výhřevnost komunálních odpadů, obsahují tak značné množství energie. Termickým rozkladem za vysokých teplot je tato energie uvolněna ve formě tepla a je ji možné dále využít. Tímto způsobem zpracování je tedy potenciálně možné dosáhnout úspory fosilních paliv, které by byly jinak pro pokrytí energetických požadavků použity. Působením vysokých teplot rovněž dochází k odstranění nebezpečných vlastností odpadů. Výstavba a provoz zařízení na energetické využití odpadů se však v České republice potýká s poměrně negativními reakcemi ze strany veřejnosti, způsobené zejména nedostatečnou informovaností obyvatelstva o principu fungování těchto zařízení a technologické vyspělosti nejen procesu termického rozkladu, ale i následného systému čištění spalin.

## 1.1 Řešená problematika

Jedním z omezujících faktorů v celkovém přístupu k nakládání se zdravotnickými odpady je maximální doba, která může uplynout mezi shromážděním a konečným odstraněním infekčních zdravotnických odpadů. Tato doba určitou mírou komplikuje dopravu odpadu ze vzdálených zdravotnických zařízení do zařízení na zpracování odpadů s vyšší zpracovatelskou kapacitou. Doprava odpadu na dlouhé vzdálenosti navíc přispívá k vyššímu zatížení infrastruktury a vyšší produkci znečišťujících plynů. V případě menších jednotek na zpracování odpadů jsou dopravní vzdálenosti redukovány a odpad je možné zpracovávat v kratší době.

Nebezpečné zdravotnické odpady rovněž není možné zpracovávat v zařízeních, která jsou navržena pro zpracování komunálních odpadů, zejména kvůli vyšším nárokům na úplné odstranění nebezpečných vlastností a odlišnému složení těchto odpadů. Vytvořením dostatečně husté sítě zařízení pro energetické využití odpadů (EVO) ze zdravotnických zařízení, například na úrovni jednotlivých krajů, je možné dostatečným způsobem redukovat dopravní vzdálenosti těchto odpadů. Při umístění zařízení EVO kupříkladu v rámci areálu některé z větších nemocnic rovněž vzniká potenciál na využití značného množství z energie produkované v tomto zařízení.

Z tohoto důvodu je cílem této práce navrhnout komplexní řešení nakládání se zdravotnickými odpady v zařízení o menší kapacitě pokrývající produkci odpadů v modelovém regionu a posouzení možností využití produkované energie.

## 1.2 Specifika zdravotnických odpadů

**Zdravotnické odpady** (eng. Health-care waste, někdy také označované jako nemocniční odpady) jsou souborem odpadů vznikajících ve zdravotnických zařízeních nebo odpadů vznikajících mimo zdravotnická zařízení, které vykazují podobné vlastnosti. V odpadech jsou přítomny fyzikální, chemické a biologické materiály v tekutém nebo tuhém stavu a vzhledem ke svým vlastnostem a potenciálním rizikům vyžadují zvláštní nakládání [1].

V kategorii zdravotnických odpadů jsou zahrnuty odpady vznikající při poskytování zdravotní péče v lůžkových, ambulantních a dalších zdravotnických zařízeních, odpad vyžadující zvláštní nakládání, který vzniká v zařízeních sociální péče, tetovacích salonech, protidrogových centrech, odpad vznikající při porodnické péči, léčení nebo prevenci nemocí lidí a dalších činnostech [1], odpad z laboratoří a odpad vznikající při domácí zdravotní péči [2].

Charakteristickou nebezpečnou vlastností zdravotnických odpadů je jeho infekčnost, kvůli které hrozí riziko nákazy nejrůznějšími chorobami osobám, které přijdou do přímému styku s tímto odpadem, avšak riziko nákazy hrozí i při nepřímém kontaktu. Infekčnost je dále znásobena obsahem ostrých předmětů v odpadu, které zvyšují riziko přenosu infekcí. Je však nutno poznamenat, že jehly a podobné ostré předměty jsou od ostatních odpadů separovány a je s nimi nakládáno zvlášť. Seznam všech nebezpečných vlastností, které může odpad vykazovat, je uveden v Nařízení komise (EU) č. 1357/2014 [3].

Nebezpečné vlastnosti však nenesou celý objem produkovaného zdravotnického odpadu. V závislosti na konkrétním místě produkce odpadu přibližně 75–90 % objemu zdravotnického

odpadu nevykazuje nebezpečné vlastnosti [4] a je tedy srovnatelný s komunálním odpadem. Pouze zbylý objem odpadu patří do kategorie nebezpečných a dále je možno jej dle charakteru a vlastností rozdělit do několika skupin [1], [4]:

### **Infekční odpad**

Odpad, u kterého je podezření na obsah patogenů (bakterií, virů) v takovém množství, které by mohlo ohrozit další osoby nebo životní prostředí. Například laboratorní odpad, materiály použité při operaci, odpad pacientů v karanténách, látky a oblečení vysoce znečištěné tělními tekutinami a krví, infikovaná laboratorní pokusná zvířata a odpad, který byl v kontaktu s infikovanými osobami nebo zvířaty.

### **Patologický odpad**

Souhrn organických odpadů jako jsou tkáně, orgány, části lidských nebo zvířecích těl, krev a ostatní tělní tekutiny. Navzdory tomu, že část patologického odpadu nemusí vykazovat infekčnost, je na tuto kategorii nahlíženo jako na podskupinu infekčního odpadu a tomu je přizpůsobena manipulace a zpracování.

### **Ostré předměty**

Předměty, které by mohly při manipulaci způsobit řezné nebo bodné rány, jako jsou například jehly, nože, skalpely, lékařské pilky, infuzní sety a skleněné střepy. Dle zahraniční literatury je tento odpad považován za vysoce nebezpečný nezávisle na tom, zda vykazuje infekčnost [4], zatímco česká legislativa jej umožňuje označit kategorií „N“ - nebezpečný i „O“ - ostatní.

### **Farmaceutický odpad**

Nejčastěji expirovaná, narušená nebo nevyužitá léčiva a další farmaceutické produkty. Rovněž zahrnuje přípravky určené pro manipulaci s léčivými, jako jsou obaly a ochranné pomůcky a oděvy.

### **Chemický odpad**

Odpad obsahující pevné, kapalné nebo plynné chemikálie, používané například při analýzách nebo výzkumné práci. Tento odpad může vykazovat nebezpečné vlastnosti, v některých případech se však jedná o neškodné chemikálie (solné a sacharidové roztoky, některé organické roztoky). Obecně je tento odpad považován za nebezpečný, vykazuje-li některou z následujících vlastností:

- Toxicita
- Žíravost
- Hořlavost
- Výbušnost
- Genotoxicita

### **Genotoxický odpad**

Vysoce nebezpečný odpad, u kterého je podezření na výskyt mutagenních, teratogenních a karcinogenních vlastností. Typicky do této kategorie spadají některá cytostatická léčiva, chemikálie, radioaktivní léčebné látky, tělní tekutiny a exkrementy pacientů léčených těmito látkami.

### **Odpad s vysokým obsahem těžkých kovů**

Tuto kategorii je možné považovat za podkategorii chemického odpadu. Nejčastěji se jedná o odpad s vysokým obsahem rtuti nebo jejích sloučenin produkovaný převážně v dentálních oborech a při poškození lékařského náčiní.

### **Tlakové obaly**

Největším rizikem těchto odpadů je tlak uvnitř nádob a možná exploze při nesprávné manipulaci a zneškodnění. V některých případech vykazuje obsah láhve další nebezpečné vlastnosti.

### **Radioaktivní odpad**

Použité látky obsahující radionuklidy, používané při léčení určitých chorob. Nakládání s těmito odpady se řídí zvláštními předpisy atomového zákona [5].

### **Kontaminované obaly**

Obalové materiály sloužící k ochraně nebezpečných produktů a léčiv při přepravě. Po použití je s nimi nakládáno stejným způsobem jako s nebezpečným odpadem v nich přepravovaným.

### **Ostatní odpady ze zdravotnictví**

Odpad vykazující podobné vlastnosti jako komunální odpad a pocházející výhradně z neinfekčních oddělení nebo obslužných provozů v rámci zdravotnického zařízení, které nesouvisí se zdravotnickou péčí. Na zpracování tohoto odpadu nejsou kladeny zvláštní nároky.

## 2 LEGISLATIVA ZPRACOVÁNÍ ZDRAVOTNICKÝCH ODPADŮ

Problematika nakládání se zdravotnickými odpady se opírá o řadu legislativních dokumentů, které popisují způsoby třídění, skladování a zneškodňování těchto odpadů a popisují vhodné technologie, jejich požadované vlastnosti a schvalovací procesy pro provoz daných zařízení. V následujících kapitolách jsou uvedeny dokumenty evropské a české legislativy s tématy, které tyto dokumenty popisují.

### 2.1 Evropská legislativa

#### 2.1.1 Směrnice o skládkách odpadů

Směrnice Rady 1999/31/ES o skládkách odpadů [6] je zaměřena na problematiku skládkování odpadů v obecném měřítku. Hlavním cílem směrnice je omezení skládkování biologicky rozložitelného komunálního odpadu (BRKO) a minimalizace dopadů skládkování odpadů na životní prostředí. Toho je dosaženo snížením nebezpečných vlastností odpadů ukládaných na skládky, případně použitím jiných možných způsobů nakládání s odpady a zákaz skládkování neupravených zdravotnických odpadů a dalších infekčních odpadů.

#### 2.1.2 Směrnice o odpadech

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 98/2008/ES o odpadech [7] upravuje způsoby třídění, zpracování a zneškodňování všech odpadů. Nebezpečným odpadem je označen takový odpad, který vykazuje jednu nebo více nebezpečných vlastností uvedených v Nařízení Komise EU č. 1357/2014 [3], kterým se nahrazuje příloha III této směrnice.

Tato směrnice rovněž definuje hierarchii nakládání s odpady. Její grafická podoba je uvedena na obr. 1.



Obr. 1 Hierarchie nakládání s odpady

Definice jednotlivých způsobů nakládání s odpady:

**Předcházení vzniku odpadů** – opatření přijatá před samotným vznikem odpadů, která omezují množství odpadů, nepříznivé dopady odpadů na životní prostředí a lidské zdraví a obsah škodlivých látek v odpadech.

**Příprava k opětovnému použití** – kontrola, čištění, oprava nebo úprava celků nebo částí výrobků, které se staly odpadem tak, aby bylo možné je opětovně využít ke stejnému nebo podobnému účelu, k jakému byly původně vyrobeny.

**Recyklace** – jakýkoliv způsob opětovného využití ke stejnému nebo jinému účelu, než pro jaký byl výrobek původně vyroben. Zahrnuje předzpracování organických materiálů, avšak nezahrnuje energetické využití nebo přeměnu na palivo nebo zásypový materiál.

**Jiné využití** – jakékoliv využití odpadu k účelům, ke kterým by byly v jiném případě použity jiné materiály. Způsoby využití jsou uvedeny v příloze II této směrnice a označeny písmenem R („Recovery“) a číselným kódem. Mimo jiné do této kategorie patří i energetické využití, označené jako R 1.

**Odstranění** – jakákoliv činnost, která není využitím. Do této kategorie spadá i způsob zpracování, který má jako vedlejší důsledek znovuzískání látek nebo energie. Způsoby odstranění jsou uvedeny v příloze I této směrnice a označeny písmenem D („Disposal“) a číselným kódem. Mimo jiné do této kategorie patří i ukládání na povrch nebo pod úroveň povrchu země (D 1) a spalování na pevnině (D 10).

Zařízení pro nakládání s odpady spadající do kategorie R 1 a D 10 mohou mít podobnou technologii, avšak směrnice zavádí kritérium energetické účinnosti, které je blíže popsáno v dokumentu Guidelines on the interpretation of the R 1 [8], na který se tato směrnice odkazuje. Pro vyhodnocení energetické účinnosti R 1 je zaveden následující vztah:

$$\eta_e = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (2.1)$$

kde:  $E_p$  - roční produkce tepla a elektřiny, přičemž energie ve formě elektřiny je vynásobena faktorem 2,6 a energie ve formě tepla faktorem 1,1 [GJ]/rok]

$E_f$  - roční energetický vstup do zařízení ve formě přídavného paliva [GJ]/rok]

$E_w$  - roční energetický vstup do zařízení ve formě zpracovaného odpadu, vypočítaný na základě výhřevnosti odpadu [GJ]/rok]

$E_i$  - roční energetický vstup do zařízení v jiné formě než  $E_f$  a  $E_w$  [GJ]/rok]

0,97 - faktor zohledňující energetické ztráty odvodem popela a radiací

Navzdory názvu „účinnost“ může vzhledem ke své definici kritérium energetické účinnosti R 1 dosáhnout hodnoty vyšší než 1, přičemž hodnoty existujících zařízení přeměňujících odpad na energii se pohybují v rozmezí 0,2 - 1,4 s průměrnou hodnotou 0,69 [9]. Zařízení pro zpracování odpadu se řadí do kategorie R 1 v případě, že dosahuje hodnoty nejméně 0,60 při uvedení do provozu před 1.1.2009 a hodnoty nejméně 0,65 pro zařízení uvedená do provozu po 31.12.2008.

Kritérium energetické účinnosti R1 se však z legislativního hlediska vztahuje pouze k zařízením zpracovávajícím komunální odpad, zatímco energetickou účinnost zpracování nebezpečného odpadu, kde je primárním záměrem odstranění tohoto odpadu, legislativa žádným způsobem nedefinuje.

### 2.1.3 Směrnice o průmyslových emisích

Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění) [10] se ve IV. kapitole zaměřuje na spalování a spoluspalování odpadu a všechna zařízení s těmito procesy spojená, a to ve smyslu omezení, opatření a limitů pro tato zařízení. Emisní limity pro zařízení na spalování a spoluspalování odpadu jsou uvedena v částech 3 a 4 přílohy VI této směrnice. Dále jsou ve směrnici stanoveny provozní podmínky jednotlivých zařízení. Pro účely zařízení spalující zdravotnické odpady je níže uveden výběr několika relevantních provozních podmínek:

- Zařízení na spalování odpadu musí být provozována tak, aby se dosáhlo úrovně spalování, při které je obsah celkového organického uhlíku (TOC) ve strusce a zbytkovém popelu nižší než 3 % nebo jejich ztráty po spálení jsou nižší než 5 % hmotnosti suchého materiálu.
- Zařízení na spalování odpadu musí být navržena, vybavena, postavena a provozována tak, aby byl plyn vznikající při spalování odpadu po posledním vstřiku spalovacího vzduchu ohřát řízeným a stejnoměrným způsobem i za nejméně příznivých podmínek na dobu alespoň dvou sekund na teplotu alespoň 850 °C.
- Při spalování nebo spoluspalování nebezpečného odpadu s obsahem halogenových organických látek (vyjádřených jako chlor) vyšším než 1 %, musí být teplota při ostatních podmínkách shodných s předchozí podmínkou nejméně 1 100 °C.
- Každá spalovací komora na spalování odpadu musí být vybavena nejméně jedním pomocným hořákem. Tento hořák se automaticky zapne při poklesu teploty pod požadovanou úroveň dle spalovaného odpadu a rovněž je používán při uvádění zařízení do provozu a odstavování pro zajištění požadované teploty po dobu, kdy se v komoře nachází jakékoliv množství nespáleného odpadu.
- Veškeré teplo vznikající v zařízení na spalování a spoluspalování odpadu musí být v co nejvyšší míře využito.
- Infekční odpad je umisťován přímo do spalovací komory bez předchozího mísení s odpadem jiných kategorií a bez přímé manipulace.
- Před přijetím odpadu do zařízení na spalování nebo spoluspalování odpadu musí být tento odpad řádně označen. Informace musí obsahovat údaje o procesu vzniku odpadu, fyzikální (a případně chemické) složení odpadu a nebezpečné vlastnosti odpadu tak, aby s ním mohlo být řádně nakládáno.

### 2.1.4 Dokumenty BREF/BAT

Dokumenty BREF/BAT (z eng. Reference Documents on Best Available Techniques) [11] jsou dokumenty navazující na směrnici 2010/75/EU, jejichž cílem je určení nejlepších dostupných technik (BAT) pro různé průmyslové oblasti pro omezení nerovnováhy úrovně vypouštění emisí v rámci Evropské Unie. V dokumentu, který se zabývá nakládáním s odpady, jsou mimo jiné popsány technologie spalování odpadu a čištění spalin, statistiky emisí v jednotlivých



zemích a návrhy emisních limitů, které jsou dále závazně implementovány do legislativy. Dokumenty BREF/BAT jsou aktualizovány nejpozději 8 let po zveřejnění předchozí verze [12].

## 2.2 Legislativa ČR

### 2.2.1 Plán odpadového hospodářství

Nařízení vlády č. 352/2014 Sb. o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015-2024 [13] stanovuje zásady a opatření pro nakládání s odpady na území ČR, a to v souladu se směrnicí Evropského parlamentu a rady 2008/98/ES. Je zároveň podkladem pro rozhodovací a jiné činnosti příslušných správních orgánů v oblasti odpadového hospodářství. Hlavní motivací plánu je úprava odpadového hospodářství ve smyslu posunu k vyšším příčkám odpadové hierarchie, která je obsažena ve zmíněné směrnici 2008/98/ES.

Nařízení vlády dále definuje podmínky přeshraniční přepravy odpadů, a to následovně:

- Přeshraniční přeprava odpadu do České republiky za účelem odstranění je zakázána.
- Přeshraniční přeprava odpadu do České republiky za účelem energetického využití ve spalovně komunálních odpadů je zakázána v případě, že by v důsledku přeshraniční přepravy došlo ke zpracování odpadu vznikajícího v České republice způsobem, který není v souladu s plánem odpadového hospodářství.

### 2.2.2 Zákon o odpadech

Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů [14] implementuje směrnici Evropského parlamentu a rady 2008/98/ES do právního řádu České republiky. Zákon stanovuje pravidla pro předcházení vzniku odpadů a pro nakládání s nimi, odkazem na Nařízení Komise EU č. 1357/2014 definuje nebezpečný odpad, stanovuje povinnosti v oblasti evidence a přepravy odpadu a povinnosti osob oprávněných k manipulaci s odpadem.

Doplňkem tohoto zákona je vyhláška č. 93/2016 Sb. o katalogu odpadů [15]. Ta rozděluje odpady do celkem 20 kategorií, přičemž zdravotnické odpady jsou zařazeny do samostatné kategorie č. 18 – Odpady ze zdravotní nebo veterinární péče a/nebo z výzkumu s nimi souvisejícího (s výjimkou kuchyňských odpadů a odpadů ze stravovacích zařízení, které bezprostředně nesouvisí se zdravotní péčí). V tab. 2.1 je uvedeno rozdělení podkategorií zdravotnických odpadů. Odpady, u nichž je vedle čísla kategorie uveden symbol \* jsou klasifikovány jako nebezpečné. K odpadům katalogového čísla 18 01 01 a 18 02 01 (Ostré předměty) je doplněna kategorie nebezpečný především s ohledem na šíření infekce.

Tab. 2.1 Kategorie zdravotnického odpadu

<i>Kategorie odpadu</i>	<b>Název kategorie</b>
<b>18 01</b>	<b>Odpady z porodnické péče, z diagnostiky, z léčení nebo prevence nemocí lidí</b>
18 01 01	Ostré předměty (kromě čísla 18 01 03)
18 01 02	Části těla a orgány včetně krevních vaků a krevních konzerv (kromě čísla 18 01 03)
18 01 03*	Odpady, na jejichž sběr a odstraňování jsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce
18 01 04	Odpady, na jejichž sběr a odstraňování nejsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce
18 01 06*	Chemikálie, které jsou nebo obsahují nebezpečné látky
18 01 07	Chemikálie neuvedené pod číslem 18 01 06
18 01 08*	Nepoužitelná cytostatika
18 01 09*	Jiná nepoužitelná léčiva neuvedená pod číslem 18 01 08
18 01 10*	Odpadní amalgám ze stomatologické péče
<b>18 02</b>	<b>Odpady z výzkumu, diagnostiky, léčení nebo prevence nemocí zvířat</b>
18 02 01	Ostré předměty (kromě čísla 18 02 02)
18 02 02*	Odpady, na jejichž sběr a odstraňování jsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce
18 02 03	Odpady, na jejichž sběr a odstraňování nejsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce
18 02 05*	Chemikálie sestávající z nebezpečných látek nebo tyto látky obsahující
18 02 06	Jiné chemikálie neuvedené pod číslem 18 02 05
18 02 07*	Nepoužitelná cytostatika
18 02 08*	Jiná nepoužitelná léčiva neuvedená pod číslem 18 02 07

### 2.2.3 Vyhláška o podmínkách předcházení vzniku a šíření infekčních onemocnění

Vyhláška č. 306/2012 Sb. o podmínkách předcházení vzniku a šíření infekčních onemocnění a o hygienických požadavcích na provoz zdravotnických zařízení a ústavů sociální péče [16] stanovuje podmínky skladování nebezpečného odpadu.

Nebezpečný odpad se ukládá do označených, oddělených, krytých, uzavíratelných, nepropustných, mechanicky odolných a podle možnosti spalitelných obalů, bez nutnosti další manipulace s odpadem. Ostrý odpad se ukládá do označených, spalitelných, pevnostěnných, nepropichnutelných a nepropustných obalů.

Z místa vzniku infekčního odpadu je tento odpad odstraňován nejméně jednou za 24 hodin. Tento úkon je souhrnně nazýván shromážděním odpadu a provádí se podle provozního řádu (dle vyhlášky č. 383/2001 o podrobnostech nakládání s odpady [17]). Maximální doba mezi

shromážděním odpadu a jeho konečným odstraněním je maximálně 3 dny. V případě delšího skladování musí být odpad umístěn do uzavřeného mrazícího nebo chladícího boxu při maximální teplotě 8 °C. Při těchto podmínkách může být odpad skladován nejdéle po dobu 1 měsíce. Vysoce infekční odpad musí být bezprostředně v přímé návaznosti na jeho vznik upraven dekontaminací certifikovaným technologickým zařízením.

### 2.2.4 Zákon o ochraně ovzduší

Zákon č. 201/2012 Sb. o ochraně ovzduší [18] implementuje především směrnici Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU do právního řádu České republiky a upravuje:

- Přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší
- Způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení
- Nástroje ke snižování znečištění a znečišťování ovzduší
- Práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy při ochraně ovzduší

K částečné novelizaci tohoto zákona došlo přijetím zákona č. 369/2016 Sb. [19]. Prováděcím předpisem tohoto zákona je vyhláška č. 415/2012 Sb., kterou popisuje následující podkapitola.

### 2.2.5 Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování

Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší [20] stanovuje emisní limity pro vyjmenované a ostatní stacionární zdroje v souladu se zákonem č. 201/2012 Sb., směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2010/75/EU a dalšími směrnicemi Evropské Unie, které s problematikou zpracování odpadu nejsou spojeny.

V příloze IV této vyhlášky jsou uvedeny emisní limity jednotlivých zařízení a stanoveny referenční podmínky. V tab. 2.2 jsou uvedeny emisní limity pro „Zdroj stacionárního znečišťování tepelně zpracovávající odpad“. Pro porovnání jsou v tabulce rovněž uvedeny hodnoty z návrhu BREF/BAT z roku 2018 [11]. Referenčními podmínkami pro tento zdroj znečištění jsou:

- normální teplota  $T = 273,15 \text{ K}$ ,
- normální tlak  $p = 101\,325 \text{ Pa}$ ,
- obsah  $\text{O}_2 = 11 \text{ \%}_{\text{obj}}$ ,
- suchý plyn

Tab. 2.2 Emisní limity pro spalovny odpadů [20], [11]

<i>Znečišťující látka</i>	<b>Jednotka</b>	<b>Emisní limit dle vyhlášky 415/2012 Sb.</b>	<b>BREF/BAT stávající zařízení</b>	<b>BREF/BAT nová zařízení</b>
TZL	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	10	< 2-5	< 2-5
TOC	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	10	3-10	3-10
SO <sub>x</sub>	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	50	5-40	5-30
NO <sub>x</sub>	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	200	50-150	50-120
CO	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	50	10-50	10-50
HCl	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	10	< 2-8	< 2-6
HF	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	1	< 1	< 1
PCDD/F	ng TEQ/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	0,1	< 0,01-0,06	< 0,01-0,04
Hg a její sloučeniny	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	0,05	0,005-0,02	0,005-0,02
Cd+Tl a jejich sloučeniny	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	0,05	0,005-0,02	0,005-0,02
Ostatní těžké kovy	mg/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	0,5	0,01-0,3	0,01-0,3

### 2.2.6 Zákon o posuzování vlivů na životní prostředí

Zákon č. 100/2001 Sb. o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů [21] určuje záměry podléhající zvláštnímu posuzovacímu řízení, někdy nazývané jako „EIA studie“ (z eng. Environmental Impact Assessment). V rámci této studie dochází k odbornému posouzení vlivů na obyvatelstvo, živočichy a rostliny, ekosystémy, půdu, vodu, ovzduší, horninové prostředí, klima a krajinu, přírodní zdroje, hmotný majetek, kulturní památky a další. Cílem studie je získání odborného objektivního podkladu sloužícího pro vydání dalších rozhodnutí a opatření za účasti široké veřejnosti. Získání kladného rozhodnutí je podmínkou nutnou k získání dalších rozhodnutí týkající se záměru, nikoliv však postačující. Dle tohoto zákona zařízení na odstraňování nebo využívání nebezpečných odpadů spalováním, fyzikálně-chemickou úpravou nebo skládkováním podléhá posuzovacímu řízení „EIA“ vždy.

Dalším nástrojem k ochraně životního prostředí je povolení integrované prevence (IPPC), vycházející ze směrnice 2010/75/EU. Integrovaná prevence je soubor opatření zaměřených na prevenci znečišťování, snižování emisí do ovzduší, vody a půdy a omezování vzniku odpadů s cílem dosáhnout vysokou celkovou úroveň ochrany životního prostředí. Úroveň zařízení se porovnává s nejlepšími dostupnými technikami (BAT), blíže popsány v podkapitole 2.1.4. Integrované povolení tak nahrazuje vícero povolení, souhlasů a stanovisek dotčených orgánů, které by jinak bylo nutné vydávat jednotlivě. Povolení IPPC je nutné pro zařízení na tepelné zpracování nebezpečného odpadu s kapacitou vyšší než 10 t/den.

### 3 ANALÝZA SOUČASNÉ SITUACE

V následujících podkapitolách je popsána produkce a zpracování zdravotnických odpadů v České republice a Evropské Unii.

#### 3.1 Produkce zdravotnických odpadů v ČR a nakládání s nimi

Shromažďování záznamů o produkci zdravotnických odpadů v České republice zajišťuje Český statistický úřad a Ministerstvo životního prostředí. Dlouhodobě nejvíce zastoupená kategorie v celkovém množství produkováných odpadů je kategorie 18 01 03 - Odpady, na jejichž sběr a odstraňování jsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce. Ze studií sledujících produkci zdravotnických odpadů však často vyplývá, že do této kategorie jsou při shromažďování zařazovány i odpady jiných podkategorií kategorie 18. Důvodem je především jeho klasifikace jako nebezpečný odpad a díky tomu zvýšené nároky na jeho zpracování, kterými je předcházeno šíření infekcí a omezení dopadů možných nebezpečných vlastností obecně. Celková roční produkce zdravotnických odpadů a roční produkce odpadů kategorie 18 01 03 v posledních letech je uvedena v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Produkce zdravotnických odpadů v ČR v letech 2013-2017 [t/rok] (data z [22])

<i>Kategorie odpadu</i>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>
18 01 03	28 866	29 035	29 527	30 821	31 513
18 01	36 057	36 967	38 572	40 414	41 804
<i>Celková produkce kategorie 18</i>	36 739	37 457	39 140	41 008	42 414

Z tab. 3.1 je zřejmý nárůst množství zdravotnických odpadů, který lze při současném systému klasifikace a shromažďování očekávat i v dalších letech.

Nakládání se zdravotnickými odpady je možné dvěma základními způsoby – termickým rozkladem a dekontaminačními metodami. Bližšímu popisu těchto technologií je věnována pozornost v kapitole 4. Dekontaminace odpadu slouží především pro snížení rizika infekčního odpadu pro potřeby transportu ze zdravotnického zařízení do místa konečného odstranění [23]. Konečným odstraněním je ve většině případů termický rozklad, ve výjimečných případech skládkování. Zbavením odpadu infekčnosti je možné jej, při splnění podmínek a pravidelných kontrolách zařízení pro dekontaminaci, odstraňovat v zařízeních pro spalování, případně energetické využití komunálních odpadů. Množství odpadů zpracovaných jednotlivými způsoby je uveden v tab. 3.2. Data vycházejí z veřejné aplikace Ministerstva životního prostředí ISOH (Informační systém odpadového hospodářství) [22] a byla shromážděna pro roky 2013-2017. Drobné odchylky mezi celkovou roční produkcí uvedenou v tab. 3.1 a součtem zpracovaného odpadu jsou způsobeny nemožností zvolit data pouze pro kategorii odpadů 18 pro určité způsoby nakládání s odpady a zanedbáním vývozu a dovozu odpadů (řádově stovky kg, převážně kategorie 18 01 10). Níže jsou definovány jednotlivé kategorie.

- D 1 – Ukládání na povrch nebo pod úroveň povrchu země (např. skládkování apod.)
- D 9 – Fyzikálně-chemická úprava jinde nespécifikovaná, jejímž konečným produktem jsou sloučeniny nebo směsi, které se odstraňují některým ze způsobů uvedených pod označením D 1 až D 12 (např. odpařování, sušení, kalcinace apod.)
- D 10 – Spalování na pevnině
- D 13 – Míšení nebo směšování před odstraněním některým ze způsobů uvedených pod označením D 1 až D 12
- D 14 – Přebalení před odstraněním některým ze způsobů uvedených pod označením D 1 až D 13
- D 15 – Skladování před odstraněním některým ze způsobů uvedených pod označením D 1 až D 14 (s výjimkou dočasného skladování na místě vzniku před sběrem)
- R 1 – Použití především jako paliva nebo jiným způsobem k výrobě energie
- R 12 – Úprava odpadů před využitím některým ze způsobů uvedených pod označením R 1 až R 11

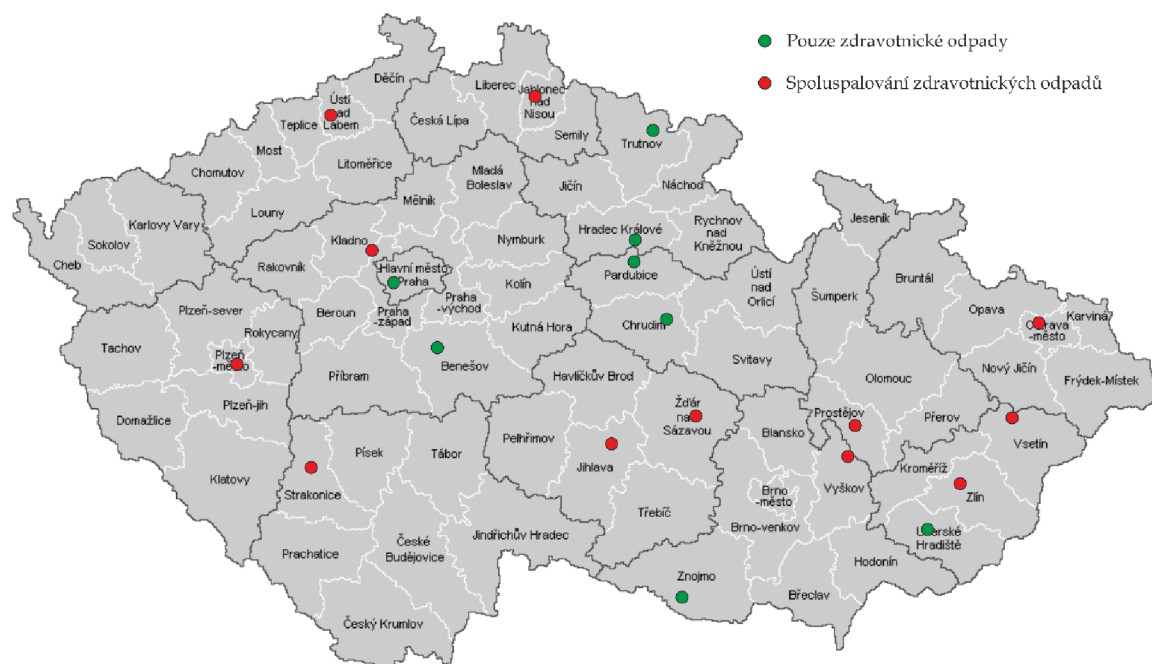
Tab. 3.2 Způsoby nakládání se zdravotnickým odpadem a jejich poměrové zastoupení v letech 2013-2017 [t/rok] (data z [22])

<i>Způsob nakládání</i>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<i>Poměrové zastoupení</i>
D 1	3 506	3 925	4 980	5 347	6 119	12,30 %
D 9	120	89	629	643	737	1,14 %
D 10	24 555	25 461	27 028	28 115	28 966	69,11 %
D 13	13	20	20	17	0	0,04 %
D 14	3 027	2 373	2 436	3 082	2 990	7,17 %
D 15	2	1	1	2	15	0,01 %
R 1	4 480	4 787	2 920	2 721	2 333	8,88 %
R 12	70	229	578	561	1 182	1,35 %
<b>Celkem</b>	<b>35 774</b>	<b>36 886</b>	<b>38 592</b>	<b>40 489</b>	<b>42 341</b>	<b>100,00 %</b>

Z tab. 3.2 je zřejmé, že konečným odstraněním většiny zdravotnického odpadu v ČR je některý ze způsobů spalování. Pouze část odpadu, který není klasifikován jako nebezpečný, je ukládán na skládky, případně jinak využit (< 15 %). Odpad zpracovaný v kategorii R 1 je pravděpodobně kategorie „O“ (např. 18 01 04), případně by se mohlo jednat o část odpadu kategorie „N“ upraveného dekontaminací a poté zpracovaného v zařízení EVO pro komunální odpady splňující energetickou účinnost pro zařazení do kategorie R 1. V následující tab. 3.3 jsou uvedeny zařízení na území ČR spalující nebo spoluspalující zdravotnický odpad a na obr. 2 poté mapa ČR s vyznačeným umístěním těchto zařízení.

Tab. 3.3 Zařízení spalující a spoluspalující zdravotnický odpad v ČR (data z [24])

<i>Kraj</i>	<b>Provozovatel zařízení</b>	<b>Zpracovávané odpady</b>	<b>Uvedení do provozu</b>	<b>Kapacita [t/rok]</b>	<b>Množství odpadu (2017) [t]</b>
<i>Hlavní město Praha</i>	FN Motol	Zdravotnické	2005	2 940	1 259
<i>Středočeský</i>	AVE Kralupy	Průmyslové, zdravotnické	1976	15 000	13 983
<i>Středočeský</i>	Nemocnice Rudolfa a Stefenie Benešov	Zdravotnické	2001	1 000	844
<i>Jihočeský</i>	RUMPOLD Strakonice	Zdravotnické, průmyslové	1990	1 500	1 466
<i>Plzeňský</i>	SUEZ Plzeň	Převážně zdravotnické	1993	2 500	2 165
<i>Ústecký</i>	SUEZ Trmice	Průmyslové, zdravotnické	1993	16 000	15 472
<i>Liberecký</i>	SPL Jablonec nad Nisou	Průmyslové, zdravotnické	2000	2 200	1 946
<i>Královéhradecký</i>	FN Hradec Králové	Zdravotnické	2017	1 900	980
<i>Královéhradecký</i>	Oblastní nemocnice Trutnov	Zdravotnické	1996	1 000	139
<i>Pardubický</i>	Hamzova odborná léčebna Luže	Zdravotnické	1993	750	605
<i>Pardubický</i>	Nemocnice Pardubického kraje	Zdravotnické	1994	750	687
<i>Vysočina</i>	RUMPOLD Jihlava	Zdravotnické, průmyslové	2005	1 900	1 656
<i>Vysočina</i>	SPORTEN Nové Město na Moravě	Zdravotnické, průmyslové	1997	864	580
<i>Jihomoravský</i>	EKOTERMEX Pustiměř	Průmyslové, zdravotnické	2004	3 240	2 835
<i>Jihomoravský</i>	Nemocnice Znojmo	Zdravotnické	1994	780	618
<i>Olomoucký</i>	MEGAWASTE Prostějov	Průmyslové, zdravotnické	1993	4 000	3 659
<i>Zlínský</i>	DEZA Valašské Meziříčí	Průmyslové, zdravotnické	2000	10 000	8 600
<i>Zlínský</i>	SUEZ Zlín	Průmyslové, zdravotnické	1993	4 730	4 653
<i>Zlínský</i>	Uherskohradištská nemocnice	Zdravotnické odpady	1996	350	325
<i>Moravskoslezský</i>	SUEZ Ostrava	Průmyslové, zdravotnické	2000	25 000	24 763



Obr. 2 Mapa zařízení spalující a spoluspalující zdravotnický odpad v ČR

Celkem se jedná o 20 zařízení, z nichž 8 zařízení je umístěno přímo na území nemocnic a jiných zdravotnických zařízení a jsou určeny pro spalování pouze zdravotnických odpadů vlastní produkce, případně externích producentů zdravotnických odpadů. Zbýlých 12 zařízení je určeno pro spoluspalování zdravotnických odpadů spolu s průmyslovými odpady, kaly a dalšími převážně nebezpečnými odpady.

Vzhledem k faktu, že zařízení spoluspalující zdravotnické odpady nevykazují poměrné množství zpracovaných zdravotnických a ostatních (nejčastěji průmyslových) odpadů, je dále v rámci této práce uvažováno srovnání zařízení zpracovávající pouze zdravotnické odpady. Seznam těchto zařízení spolu s použitou technologií termického zpracování je uveden v tab. 3.4.

Tab. 3.4 Seznam a technologie zařízení na termické zpracování zdravotnických odpadů v ČR (data z [24])

Kraj	Provozovatel zařízení	Kapacita [t/rok]	Technologie termického zpracování
Hlavní město Praha	FN Motol	2 940	2x pyrolýzní komora HOVAL GG24, dohořivací komora
Středočeský	Nemocnice Rudolfa a Stefenie Benešov	1 000	Pyrolýzní komora PL-10-200, dohořivací komora
Královéhradecký	FN Hradec Králové	1 900	Spalovací komora s přesuvným roštem, dohořivací komora
Královéhradecký	Oblastní nemocnice Trutnov	1 000	Pyrolýzní a dohořivací komora, DA-2
Pardubický	Hamzova odborná léčebna Luže	750	Pyrolýzní komora HOVAL GG7, dohořivací komora
Pardubický	Nemocnice Pardubického kraje	750	Pyrolýzní komora HOVAL GG14, dohořivací komora



Kraj	Provozovatel zařízení	Kapacita [t/rok]	Technologie termického zpracování
Jihomoravský	Nemocnice Znojmo	780	Pyrolýzní komora HOVAL GG14, dohořivací komora
Zlínský	Uherskohradištská nemocnice	350	Pyrolýzní komora HOVAL GG7, dohořivací komora

Zpracování odpadů je vždy doprovázeno poplatkem, který pokrývá činnosti spojené s přepravou, odstraněním nebo jinými činnostmi prováděnými při zpracování odpadů, včetně pokrytí nákladů na investiční a provozní náklady technologie s tím spojené. V případě zdravotnických odpadů je primárním účelem zpracování jejich odstranění, přičemž náklady a poplatky za zpracování jsou několikanásobně vyšší než u ostatních odpadů, zejména komunálních a ostatních odpadů kategorie „O“. Důvodem je nebezpečná vlastnost těchto odpadů (infekčnost) a z ní pramenící zvýšené nároky na manipulaci, přepravu a provoz zařízení na zpracování těchto odpadů. Tato zařízení poté pracují s poměrně malými kapacitami, tudíž měrné investiční i provozní náklady jsou vysoké a jsou jedním z hlavních důvodů vysokých poplatků za zpracování. Obecně lze říci, že čím více nebezpečných vlastností odpad vykazuje, tím vyšší jsou náklady na jeho zpracování.

Jak ukazuje tab. 3.2, poměrově největší množství zdravotnických odpadů je odstraňováno způsobem D 10 – Spalování na pevnině. Při tomto procesu vzniká značné množství tepelné energie, které je nejčastěji využíváno v areálu provozovatele zařízení, případně může být předáváno do sítě centrálního zásobování tepla („CZT“). V tab. 3.5 jsou uvedeny způsoby využití tepla v zařízeních pro termické zpracování zdravotnických odpadů. Pro některá zařízení nebyly informace o způsobu využití tepelné energie nalezeny.

Tab. 3.5 Způsoby využití tepla v zařízeních na termické zpracování zdravotnických odpadů v ČR

Provozovatel zařízení	Způsob využití tepla
FN Motol	Ohřev topné vody využité v areálu nemocnice [25]
Nemocnice Rudolfa a Stefenie Benešov	Ohřev topné vody využité v areálu nemocnice [26]
FN Hradec Králové	Výroba syté páry – využití v areálu nemocnice pro sterilizaci a prádelnu, vytápění a ohřev teplé vody [27]
Oblastní nemocnice Trutnov	N/A
Hamzova oborná léčebna Luže	N/A
Nemocnice Pardubického kraje	Výroba syté páry využité v areálu nemocnice, ohřev teplé vody [28]
Nemocnice Znojmo	Výroba syté páry využité v areálu nemocnice [29]
Uherskohradištská nemocnice	Ohřev topné vody využité v areálu nemocnice [30]

### 3.2 Produkce zdravotnických odpadů v EU a nakládání s nimi

Shromáždění záznamů o produkci zdravotnických odpadů v Evropě zajišťuje portál Eurostat [31]. Bohužel značná část dat ve veřejně poskytované databázi chybí nebo je nahrazena odhady. Rovněž informace o produkci odpadů jednotlivých kategorií nejsou dostupné, lze získat pouze celkovou produkci zdravotnických a biologických odpadů s možností rozlišení množství nebezpečných odpadů.

Z dostupných dat však vyplývá, že produkce zdravotnických odpadů ve státech Evropské Unie (k roku 2019 – 28 členských států) je přibližně 2 miliony tun ročně (z toho přibližně 1,1 milionu tun ročně je klasifikováno jako nebezpečný odpad). Celková produkce zdravotnických odpadů tedy při přepočtu na počet obyvatel přibližně odpovídá produkci v České republice, avšak poměr nebezpečných odpadů je v Evropské Unii výrazně nižší. To může být způsobeno lepší separací odpadů při jeho vzniku a shromažďování, případně zmiňovaným prohlášením většiny produkovaných odpadů za nebezpečné v České republice, které na druhou stranu omezuje možné šíření infekce při pochybení a nesprávné manipulaci s infekčním odpadem.

Vyšší podíl jiných, než nebezpečných odpadů v rámci Evropské Unie umožňuje tyto odpady zpracovávat ve spalovnách komunálních odpadů s vyšší kapacitou a odlišnými spalovacími podmínkami, které snáze splňují kritérium energetické účinnosti pro zařazení do kategorie R 1. V případě odpadů klasifikovaných jako nebezpečné poskytuje databáze informace k množství odpadů zpracovaných v kategorii R 1 a ostatním způsobem, tedy při uvážení legislativy a infekčnosti těchto odpadů nejpravděpodobněji formou D 10. Průměrný podíl zpracování zdravotnických odpadů v zařízeních kategorie R 1 je pro státy EU přibližně 12 %, přičemž většina států takto nezpracovává žádný z produkovaných odpadů. Některé ze zemí (jmenovitě Dánsko a Švédsko [32]) však tímto způsobem zpracovávají až 50 % produkovaného nebezpečného zdravotnického odpadu.

## 4 PŘEHLED TECHNOLOGIÍ PRO ZPRACOVÁNÍ ZDRAVOTNICKÝCH ODPADŮ

Vzhledem k nebezpečným vlastnostem zdravotnických odpadů a z nich plynoucích požadavků na maximální dobu mezi shromážděním a konečným odstraněním omezenou příslušnou legislativou, je kromě samotného zpracování odpadu nutné řešit i dopravu a skladování odpadu. Celý systém manipulace od momentu shromáždění až po odstranění nebezpečných vlastností je navržen s důrazem na minimální přímou manipulaci s odpadem. Z tohoto důvodu je pro bezpečnou manipulaci preferováno umístění odpadu do k tomu určených omyvatelných kontejnerů, pro které je navržena i technologie zpracování se snahou o dosažení automatického dávkování odpadu, čímž je omezena manipulace s odpadem a eliminováno riziko šíření infekce.

Technologie zpracování zdravotnických odpadů se dělí na dvě hlavní kategorie – technologie založené na termickém rozkladu odpadu a dekontaminační technologie. Termický rozklad je nejčastějším a vzhledem ke své účinnosti odstranění nebezpečných vlastností preferovaným způsobem odstranění zdravotnických odpadů. Dekontaminační technologie mohou sloužit pro předzpracování odpadu, díky kterému je možné odpad dále zpracovat spolu s komunálním odpadem. Technologie zpracování odpadu jsou popsány v následujících podkapitolách.

### 4.1 Technologie založené na termickém rozkladu

Tyto technologie lze zjednodušeně nazvat obecně rozšířeným pojmem spalovny odpadů. Jedná se o zařízení, ve kterých je odpad vystaven velmi vysokým teplotám a v jednom či více stupních hoří za vzniku spalin a pevných reziduí. Pro tyto technologie jsou nastaveny přísné emisní limity a provozní podmínky tak, aby nedocházelo k přílišnému znečištění životního prostředí. Z tohoto důvodu jsou tyto technologie vybaveny sofistikovanými systémy čištění spalin.

Při zpracování odpadu těmito technologiemi je uvolňováno značné množství tepelné energie, kterou je možné dále využít, čímž je zajištěn vyšší stupeň preference v hierarchii odpadů oproti prostému odstranění. Z tohoto důvodu jsou tyto technologie součástí BREF/BAT [11] jako preferované technologie pro zpracování zdravotnických odpadů.

Zdravotnický odpad vykazuje značně proměnné hodnoty výhřevnosti v závislosti na složení. Například plasty obsažené v odpadu výhřevnost zvyšují, naopak patogenní odpad a další odpad s vysokým obsahem vody výhřevnost snižuje. Výhřevnost zdravotnického odpadu je však v průměru vyšší než výhřevnost komunálního odpadu (14-16 MJ/kg [4], respektive 8-12 MJ/kg [33]). Technologie založené na termickém rozkladu odpadu jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

#### 4.1.1 Spalování na roštu

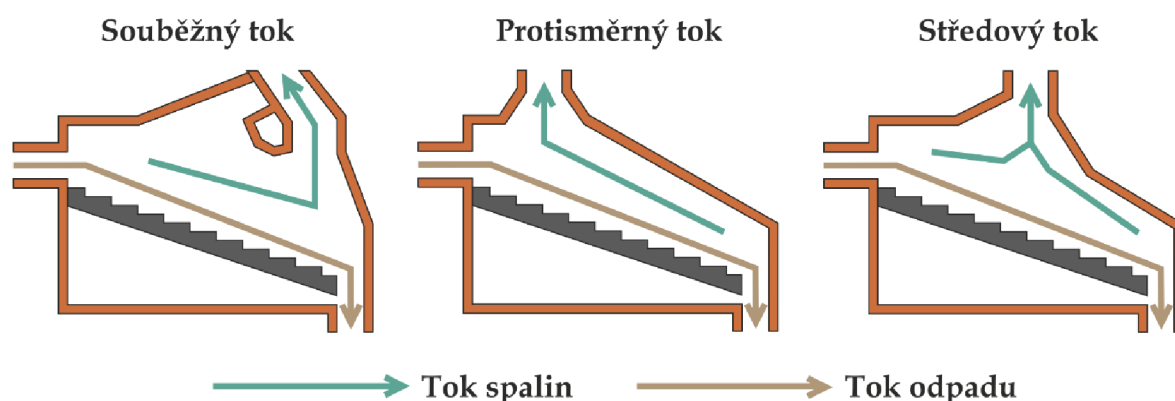
Spalování na roštu je nejčastěji používanou technologií zpracování komunálního odpadu v kombinaci s dohořivací komorou zajišťující potřebnou teplotu a zadržnou dobu produkovaných plynů a tato technologie je rovněž používána pro zpracování zdravotnického odpadu.

Spalování na roštu je plně oxidační proces probíhající za normálního tlaku při teplotách 800–900 °C za vzniku popela, škváry a spalin, obsahující převážně CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> spolu se znečišťujícími látkami. V případě spalování zdravotnického odpadu je však dle Směrnice 2010/75/EU nutné dodržet podmínku 850 °C po dobu 2 s, případně 1 100 °C po dobu 2 s při vysokém obsahu halogenových organických látek. Tyto podmínky jsou dosaženy v dohořivací komoře s objemem navrženým dle průtoku spalin. Technologie je doplněna o potřebné vybavení zajišťující správnou funkčnost. Díky možnosti použití žáruvzdorných vyzdívek o větší tloušťce je komora dobře izolována, díky čemuž vykazuje poměrně nízké tepelné ztráty a dosahuje tak dobré tepelné účinnosti, například ve srovnání s rotační pecí. Roštová spalovací komora rovněž pracuje s nižším přebytkem vzduchu v porovnání s rotační pecí, čímž dochází k tvorbě nižšího množství spalin a vyšší účinnosti způsobené nižší komínovou ztrátou. Hlavními částmi této technologie jsou:

- Zařízení pro dávkování odpadu
- Spalovací komora s roštem a žáruvzdornou vyzdívkou
- Zapalovací hořák/hořáky spalovací komory
- Systém přívodu primárního a sekundárního vzduchu, případně recirkulace spalin
- Zařízení pro odvod popela a škváry
- Dohořivací komora se žáruvzdornou vyzdívkou
- Hořák/hořáky dohořivací komory
- Polní instrumentace

### **Popis procesu**

Proces spalování na roštu je z hlediska dávkování odpadu zpravidla kontinuální. Odpad je dávkovacím zařízením podáván na pohyblivý rošt spalovací komory. Zde probíhá hoření za přívodu primárního vzduchu, který je ventilátory vháněn do prostoru pod rošt, případně za pomoci zapalovacího hořáku při nízké výhřevnosti odpadu. Při procesu hoření vznikají spaliny a nespalitelné zbytky ve formě popela a popílku. Pevné zbytky jsou na konci roštu odváděny do výpadu umístěného pod spalovací komorou. Spalovací komora může mít 3 základní uspořádání dle toku médií. Schématické znázornění jednotlivých typů komor je zobrazeno na obr. 3. Nad rošt nebo na vstupu spalin do dohořivací komory je zaveden sekundární spalovací vzduch, případně recirkulované spaliny pomocí ventilátorů. Spaliny dále proudí do dohořivací komory. Ta je navržena dle objemu spalin tak, aby byla zajištěna zádržná doba nejméně 2 s. Dle složení spalovaného odpadu je zde jedním nebo více hořáky regulována teplota v dohořivací komoře na min. 850 °C, respektive 1 100 °C. Horké spaliny poté proudí do sekce utilizace tepla, čištění spalin a emisního monitoringu.



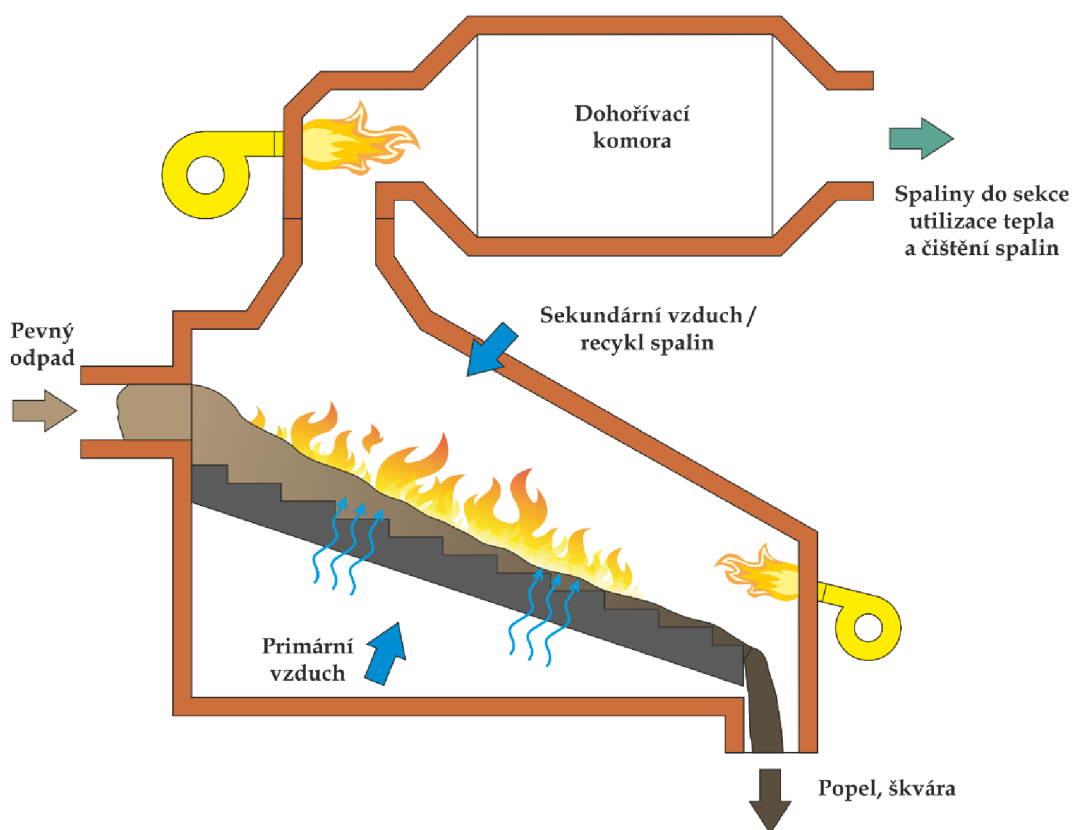
Obr. 3 Typy roštových spalovacích komor dle toku médií

Typy roštových spalovacích komor se liší kromě designu i vhodností použití pro různé typy odpadu a různé kapacity zařízení. Tyto charakteristiky shrnuje tab. 4.1.

Tab. 4.1 Charakteristika typů spalovacích komor dle toku médií [11]

<i>Typ spalovací komory (dle toku médií)</i>	<b>Charakteristika</b>	<b>Typická oblast použití</b>
<i>Souběžný tok</i>	Dlouhá zádržná doba spalin, všechny spaliny procházejí místem max. teploty	Odpady s vyšší výhřevností
<i>Protisměrný tok</i>	Vhodné pro vysoušení odpadu na vstupu do komory spalinami	Odpady s nižší výhřevností a s vyšší vlhkostí
<i>Středový tok</i>	Kompromis předchozích typů, může být s děličem středového toku – delší zádržná doba spalin, možnost přivádění sekundárního vzduchu na více místech	Velkokapacitní spalovny

Při návrhu spalovny zdravotnických odpadů je nutné z legislativního hlediska uvažovat umístění dohořivací komory zajišťující požadované parametry termického zpracování spalin produkovaných ve spalovací komoře. Rovněž riziko obsahu vyššího množství vlhkosti je u zdravotnických odpadů zvýšené (lidské tkáně, krev, tekutá léčiva apod.). Z těchto důvodů je dle tab. 4.1 vhodným uspořádáním protisměrné, případně se středovým tokem (délka roštu je při uvažovaných kapacitách poměrně malá a rozdíl v protisměrném a středovém toku tedy není zásadní). Schematický náčrt možného řešení spalovací komory s protisměrným tokem včetně umístění hořáků a vstupu spalovacího vzduchu je zobrazeno na obr. 4.



Obr. 4 Schéma roštové spalovací komory s dohořivací komorou, protiproudé uspořádání

#### 4.1.2 Spalování v rotační peci

Rotační pec je široce rozšířeným technologickým zařízením pro zpracování nebezpečných a ostatních odpadů. Toto zařízení umožňuje spalování velkého rozsahu pevných, kapalných i plyných odpadů při kapacitě až 140 000 t/rok [11]. Tato vlastnost je velkou výhodou rotační pece v porovnání například s roštovou spalovací komorou, pro kterou je zpracování většího množství kapalných a kašovitých odpadů limitující.

Spalování v rotační peci je z fyzikálně-chemického hlediska velice podobný proces jako spalování na roštu, tedy plně oxidační proces probíhající za normálního tlaku při teplotách 800–1 200 °C za vzniku nespalitelných zbytků a spalin, obsahující převážně  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  spolu se znečišťujícími látkami. Při použití pro spalování zdravotnických odpadů je pro bezpečné odstranění nebezpečných vlastností použita dohořivací komora, ve které jsou splněny podmínky dle Směrnice 2010/75/EU. Z důvodu vysokých teplot dosahovaných uvnitř rotačních pecí jsou na vnitřní straně vybaveny žáruvzdornou vyzdívkou, případně je kovový plášť navíc chlazen vzduchem či vodou. Kvůli konstrukci pece je však tloušťka těchto vyzdívek a přídavné izolace nižší než v případě komorových pecí, což znamená vyšší tepelné ztráty a nižší účinnost zařízení. Rotační pec rovněž pracuje s vyšším přebytkem vzduchu v porovnání s roštovou komorou, čímž dochází k tvorbě vyššího množství spalin a nižší účinnosti způsobené vyšší komínovou ztrátou. Také při návrhu dalších aparátů využití tepla a čištění spalin je poté nutné tyto aparáty dimenzovat na vyšší objem spalin, což má negativní vliv na investiční i provozní náklady.

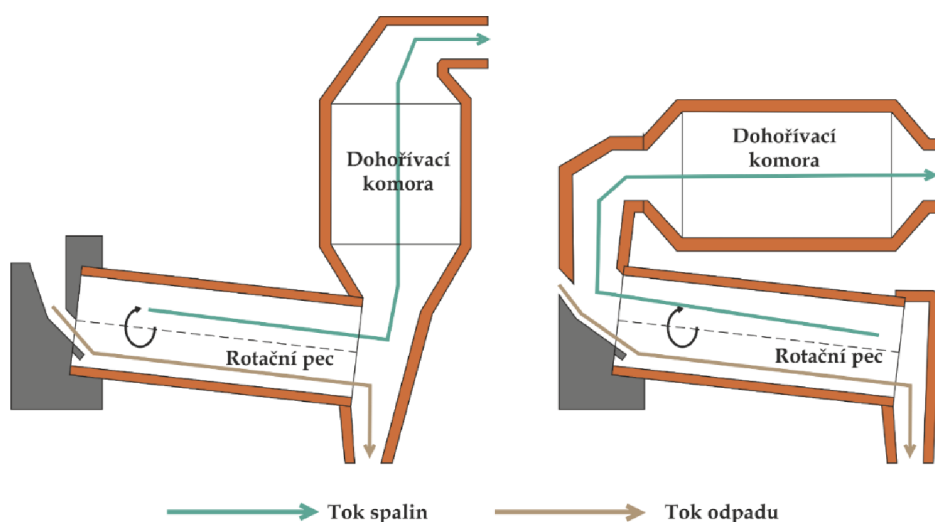
Hlavními částmi této technologie jsou:

- Zařízení pro dávkování odpadu
- Spalovací rotační komora se žáruvzdornou vyzdívkou
- Zapalovací hořák/hořáky spalovací komory
- Systém přívodu vzduchu, případně recirkulace spalin
- Zařízení pro odvod popela a škváry
- Dohořivací komora se žáruvzdornou vyzdívkou
- Hořák/hořáky dohořivací komory
- Polní instrumentace

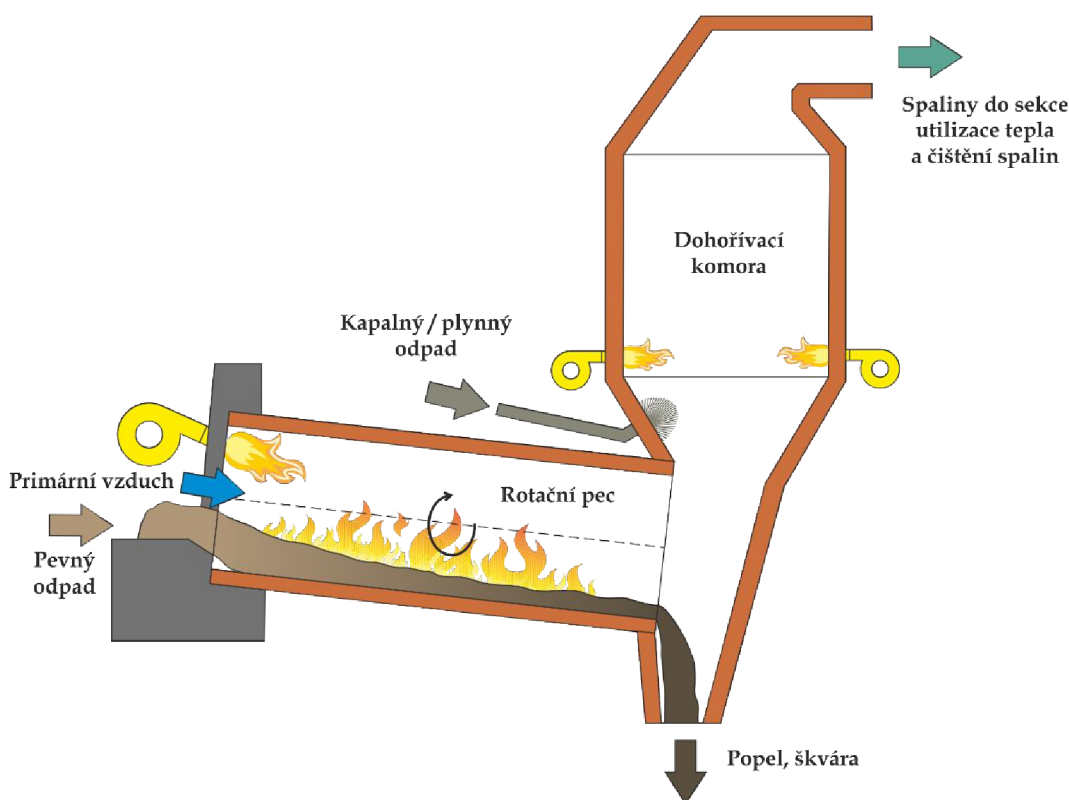
### Popis procesu

Hlavní částí technologie je válcová spalovací komora umožňující rotaci kolem své osy. Osa komory je přitom umístěna horizontálně s mírným náklonem. Pevný odpad je kontinuálně dávkován na vstupu rotační pece, kde za přívodu primárního vzduchu podstupuje proces spalování při teplotě přibližně 800–900 °C, v případě nízké výhřevnosti odpadu podporovaný hořáky na plynné nebo kapalné palivo. Pohyb odpadu je zajištěn rotací válcové pece kolem své osy s frekvencí  $n = 1,5\text{--}20 \text{ min}^{-1}$  a sklonem pece, díky kterému odpad sestupuje v gravitačním poli směrem k místu výpadu tuhých reziduí, které odchází do popelových zásobníků. Spaliny dále proudí do dohořivací komory, na jejímž vstupu může být dávkován plynný nebo kapalný odpad, který se vlivem vysoké teploty odpařuje. Soubor plynů proudí dohořivací komorou a podstupuje finální termické procesy za podpory hořáků. Horké spaliny poté proudí do sekce utilizace tepla, čištění spalin a emisního monitoringu.

Stejně jako v případě roštových spalovacích komor je možné rotační pec navrhnout se souběžným nebo protisměrným tokem, přičemž vhodnost pro různé odpady je rovněž obdobná. Schematické uspořádání možných uspořádání je zobrazeno na obr. 5, detailnější náčrtek rotační pece se souběžným tokem se znázorněním vstupů a výstupů poté na obr. 6.



Obr. 5 Typy rotačních pecí dle toku médií



Obr. 6 Schéma rotační pece s dohořivací komorou, souproudé uspořádání

### 4.1.3 Pyrolýza

Pyrolýza je označení pro proces termického rozkladu organických materiálů v inertní atmosféře za vzniku pyrolýzního plynu, pyrolýzního oleje, pyrolýzního koku a popela. Použití nachází zejména pro využití chemické hodnoty odpadu namísto energetické.

Vzhledem k požadavkům na zpracování zdravotnických odpadů je však nutné při aplikaci pyrolýzy doplnění o vysokoteplotní spalování, jednostupňové či dvoustupňové. V případě jednostupňového spalování je za pyrolýzní komoru umístěna dohořivací komora pyrolýzního plynu, v případě dvoustupňového spalování je ještě technologie doplněna o roštovou spalovací komoru či rotační pec a dochází tak i ke spalování kapalných a pevných reziduí z procesu pyrolýzy. Dle směrnice 2010/75/EU je však požadavek na obsah TOC v nespáleném zbytku menší než 3 %, což v některých případech může vyžadovat použití dvoustupňového spalování. V tomto případě je seznam částí technologie při použití pyrolýzy obdobný jako u předchozích technologií, doplněný navíc o pyrolýzní komoru.

Pyrolýzní komora je vybavena statickým nebo pohyblivým roštem a žáruvzdorným opláštěním. Odpad je vsázkově dávkován na rošt a po uzavření komory dochází k postupnému uvolňování pyrolýzního plynu. Uspořádání je zpravidla se souběžným tokem pyrolýzního plynu a reziduí. Do komory je přiváděno řízené množství kyslíku, který exotermickou reakcí s částí pyrolýzního plynu zajišťuje potřebnou teplotu 500–800 °C [34]. Výsledný pyrolýzní plyn je tak směsí uhlovodíků, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O a N<sub>2</sub> s typickou výhřevností mezi 5 a 15 MJ/m<sub>N</sub><sup>3</sup>.

Při procesu pyrolýzy musí být komora uzavřena pro možnost vytvoření inertní atmosféry. Není tak možné realizovat kontinuální dávkování odpadu ani kontinuální odvod pevných



reziduí. Tyto musí být z prostoru pyrolýzní komory v pravidelných intervalech odstraňovány při pozastaveném procesu zpracování odpadu.

Pyrolýza může být namísto prvního stupně spalování doplněna o zplyňování, které zajišťuje uvolnění uhlíku z pevných produktů pyrolýzy a jeho přetvoření na součást pyrolýzního plynu, který je dále spalován v dohořivací komoře. Jedná se o proces částečné oxidace, kdy při teplotách 800–1 100 °C a stechiometrickém poměru  $\lambda < 1$  reaguje uhlík v reziduích s přiváděným kyslíkem nebo vodní parou za vzniku primárně CO a H<sub>2</sub>. Proces zplyňování však vyžaduje přívod pevné složky ve formě velmi malých částic, aby byla zajištěna maximální plocha pro chemickou reakci. Z procesu zplyňování odcházejí pevné zbytky ve formě škváry a popela.

Na obr. 7 je zobrazena nejčastěji používaná pyrolýzní komora v zařízeních na zpracování zdravotnických odpadů od společnosti Hoval, spol. s r.o.



Obr. 7 Pyrolýzní komora Hoval GG 24 (Ekotermex a.s., Vyškov, ČR) [35]

### 4.2 Technologie pro dekontaminaci odpadu

Dekontaminací zdravotnických odpadů se rozumí snížení rizik vyplývajících z nebezpečné vlastnosti infekčnosti, v seznamu nebezpečných vlastností odpadů označené jako HP 9 [3]. Dekontaminace zdravotnických odpadů je zařazena do kategorie D 9 – „Fyzikálně–chemická úprava jinde v této příloze nespecifikovaná, jejímž konečným produktem jsou sloučeniny nebo směsi, které se odstraňují některým z postupů uvedených pod označením D 1 až D 12“.

Vzhledem k tomu, že dekontaminace odstraňuje pouze jednu nebezpečnou vlastnost odpadu (infekčnost), musí být vstupní proud odpadu tříděn. Výstupní proud odpadu je poté zařazen do kategorie „O“ pod katalogovým číslem 18 01 04 a může být poté energeticky využíván spolu s komunálními ostatními odpady nebo skládkován. Ze samotných technologií pro dekontaminaci odpadu není dále využívána energie.

Účinnost zařízení na dekontaminaci zdravotnických odpadů musí být taková, aby redukce počtu a aktivity patogenních organismů umožnila manipulaci a další zpracování odpadu bez

dalších opatření k ochraně pracovníků nebo obyvatel. Účinnost dekontaminačního zařízení je hodnocena jednotkou  $X \log 10$ . Pro zařízení na dekontaminaci zdravotnických odpadů je stanovena minimální účinnost  $6 \log 10$ , která odpovídá zneškodnění 99,9999 % patogenních organismů.

Z tohoto důvodu je dekontaminace používána především ve formě lokálních nízkokapacitních zařízení pro jednotlivé producenty zdravotnického odpadu, kteří tím snižují náklady na nakládání s nebezpečným odpadem. V některých případech je možné se rovněž setkat s pojmem sterilizace odpadu. V následujících podkapitolách jsou popsány technologie na dekontaminaci odpadu.

### 4.2.1 Nízkoteplotní sterilizace (vlhkým teplem)

Rezistence patogenních organismů vůči vlhkému teplu je obecně nižší než odolnost vůči suchému teplu, a proto je někdy dekontaminace vlhkým teplem označována jako nízkoteplotní nebo parní sterilizace.

Princip procesu spočívá v umístění odpadu do tlakové nádoby a vystavení působení syté páry při teplotě 121–140 °C po dobu 15–60 minut [36], přičemž podmínky musí zajistit prostup páry do celého objemu zpracovávaného odpadu a působení po požadovanou dobu tak, aby byla zajištěna redukce patogenních organismů minimálně  $6 \log 10$  [37]. Toto však může být u zdravotnického odpadu, který je přepravován v uzavřených voděodolných pytlích se zvýšenou mechanickou odolností, poměrně problematické. Proto je pro podporu distribuce páry do celého objemu odpadu možné proces dekontaminace kombinovat s mlecím zařízením. V tomto případě se však zpravidla jedná o větší zařízení, což je v kontrastu s typickým použitím v menších zařízeních, které dekontaminací upravují odpad vlastní produkce.

Zařízení pro parní sterilizaci odpadu s intervalovým plněním se nazývá autokláv. Jedná se o tlakové zařízení napojené na distribuci syté páry. Odpad umístěný v kontejnerech je umístěn do zařízení, které je následně hermeticky uzavřeno. Z prostoru autoklávu je odstraněn vzduch a poté je do prostoru přivedena sytá pára. Po uplynutí doby úpravy a po vyrovnání tlaku s okolím je odpad vyjmut z autoklávu, čímž je proces dekontaminace ukončen. Příklad tohoto zařízení je uveden na obr. 8.

Odpad dekontaminovaný parou je nutné před uložením na skládku dále upravit, nejčastěji spalováním s energetickým využitím [37]. Z hlediska odstranění nebezpečných vlastností odpadu dekontaminace parou pouze snižuje počet patogenních organismů, neodebírání odpadu další nebezpečné vlastnosti a bez přidání technologie mletí nemění jeho objem.

I přesto, že se parní dekontaminace jeví jako ekologicky šetrnější než metody termického rozkladu z hlediska emisí do ovzduší, dochází při tomto procesu rovněž k vypouštění emisí. Po vyjmutí odpadu ze sterilizátoru dochází k úniku páry a odpařených chemických látek z odpadu. Rovněž zkondenzovaná pára obsahuje rozpuštěné látky, čímž roste riziko kontaminace podzemních vod a půdy.



Obr. 8 Autokláv pro sterilizaci odpadu parou [38]

### 4.2.2 Vysokoteplotní sterilizace (suchým teplem)

Proces vysokoteplotní dekontaminace je obdobný procesu sterilizace párou. Médiem vháněným do sterilizátoru je však horký vzduch. Vzhledem k faktu, že odolnost patogenů vůči suchému teplu je vyšší než v případě mokrého tepla, probíhá tento proces při teplotách 160–170 °C po dobu 2–4 hodin [37].

Zejména kvůli časové náročnosti procesu ve srovnání s parní sterilizací není tato technologie zpracování zdravotnických odpadů příliš využívána.

### 4.2.3 Chemická desinfekce

Chemická dekontaminace není dle doporučení státního zdravotnického ústavu [37] plnohodnotnou metodou pro úpravu zdravotnických odpadů a používá se pouze v případech nevhodnosti použití tepelné sterilizace. Je to způsobeno omezeným množstvím patogenních organismů, které lze touto metodou zneškodnit. Například některé viry, houby a spóry nemusí být touto metodou zneškodněny v dostatečném množství.

Proces chemické desinfekce spočívá v rozdrcení odpadu z důvodu zvýšení množství ploch vystavených chemické desinfekci a samotný kontakt odpadu s chemikálií po danou dobu, v některých případech podpořený zvýšenou teplotou. Chemikálie musí být zvolena tak, aby její účinky na nebezpečné organismy v odpadu byly dostatečné a aby nedocházelo ke slučování chemikálie s některou ze složek odpadu za vzniku nebezpečné látky.

Nižší stupeň preference oproti tepelné sterilizaci podporuje také spotřeba chemické látky a z toho vyplývající zvýšená zátěž pro životní prostředí.

#### 4.2.4 Další metody dekontaminace

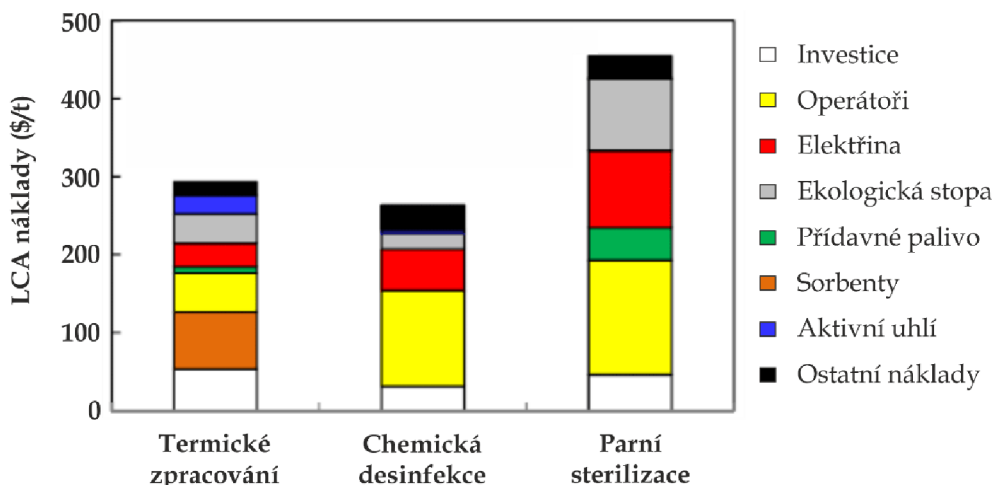
Metody uvedené v této podkapitole jsou málo rozšířené, především z ekonomických důvodů nebo z důvodu nízké účinnosti.

- **Mikrovlnná sterilizace** – sterilizační teploty je při této metodě dosahováno působením mikrovlnného záření, které působí na molekuly vody v odpadu. Metoda je vhodná především pro malá množství odpadu [37].
- **Reverzní polymerizace** – odpad je přeměněn na směs dále využitelných plynných, kapalných a pevných látek. Nevýhodou je nutnost uzavřeného prostoru s atmosférou bohatou na dusík, použití NaOH a produkce znečištěné vody a vysoké náklady na zpracování odpadu [39].
- **Ozařování** – dekontaminace odpadu probíhá působením řízeného množství gama záření. Výhodou technologie je vysoká účinnost sterilizace, nevýhodou nutnost vysoce účinného stínění záření pro ochranu pracovníků a vhodnost použití pouze pro malá množství odpadů [37].

### 4.3 Analýza reálných alternativ

Volbu vhodné metody zpracování zdravotnického odpadu není možné v současné době globalizovat. Posouzení a výběr optimální metody je závislý na konkrétní aplikaci, a to z hlediska ekonomického, environmentálního, legislativního a efektivity. Z hlediska ekonomického je důležité především množství produkovaných odpadů v okolí uvažované technologie a z toho pramenící kapacita zařízení, přičemž existují technologie vhodnější pro menší množství odpadů, reprezentované především metodami dekontaminace, stejně jako technologie ekonomicky výhodné při zpracování většího množství odpadu, téměř výhradně zastoupené zařízeními na termický rozklad odpadu a jeho energetické využití. Kritériem hodnocení technologie, kromě standardně používaných ekonomických měřítek (jako je např. počáteční investice, doba návratnosti nebo vnitřní výnosové procento atd.), je cena za množství zpracovaného odpadu.

Environmentální hodnocení technologií je možné pomocí výběru klíčových parametrů, jako jsou emise (znečištění ovzduší, vod a půdy), spotřeba chemikálií, pitné vody, paliv a dalších aspektů, případně pomocí komplexní metody LCA (Life Cycle Assessment). Tato metoda kombinuje všechny environmentální dopady technologie a převádí je na unifikovanou jednotku přiřazením váhy pro jednotlivé dopady. Na obr. 9 je zobrazeno hodnocení 3 metod zpracování zdravotnického odpadu pomocí metody LCA, a to chemické sterilizace, parní sterilizace a termického zpracování, přičemž hodnotícím kritériem je přepočtená cena za zpracování jedné tuny zdravotnického odpadu zahrnující kromě položek vyjádřitelných penězi i environmentální dopad převedený na hodnotu peněz. Kapacita porovnávaných zařízení je přitom uvažována v rozmezí 3–5 t/den. Z obrázku lze vyčíst, že nejvyšší počáteční investice jsou nutné v případě termického zpracování, avšak celkové náklady na zpracování měrného množství odpadu jsou druhé nejnižší. Parní sterilizace je náročná zejména svými provozními náklady a environmentálním dopadem, a proto jsou její celkové náklady na zpracování měrného množství odpadu nejvyšší i přes nižší investiční náklady. Nejnižšími celkovými náklady disponuje chemická sterilizace, avšak její účinnost a z ní pramenící nízká míra preference oproti ostatním metodám ji znevýhodňuje.



Obr. 9 Náklady na zpracování zdravotnického odpadu z LCA analýzy [40], upraveno

Efektivita technologií je jednou z hlavních veličin, ze kterých pramení doporučení a legislativní omezení použití těchto technologií. V tab. 4.2 jsou uvedeny hlavní parametry jednotlivých technologií.

Tab. 4.2 Srovnání hlavních parametrů technologií na zpracování odpadu [39]

Metoda zpracování	Zneškodnění patogenů	Redukce objemu	Teplota zpracování	Doba zpracování
Spalování na roštu/ v rotační peci	100 %	90–95 %	800–1200 °C	30–60 min
Pyrolýza	100 %	90–95 %	400–900 °C [41]	0,5–6 h
Parní desinfekce	6–8 log 10	40–85 % *	121–140 °C	15–60 min
Mikrovlnná desinfekce	7 log 10	80 % *	95–100 °C	≥30 min
Chemická desinfekce	6 log 10	-	95–155 °C	25 min
Reverzní polymerizace	6 log 10	80 %	180–370 °C	50–80 min

\* pouze v případě použití přídavného zařízení na rozmělnění odpadu

#### 4.4 Využití energie

Tato podkapitola je relevantní pouze pro procesy, které zpracovávají odpad termickým rozkladem s exotermickou reakcí a uvádí způsoby, jak uvolněnou energii dále využít. Při uvažování obvyklé kapacity jednotek na zpracování zdravotnických odpadů, které jsou nejčastěji umístěny v areálech nemocnic nebo průmyslové zástavby, je nejvíce přijatelným scénářem využití energie přímo v areálu, kde je jednotka umístěna. Eventuální možností je dodávka energie do externí sítě.

Při popisu jednotlivých technologií je uvažováno se zařízeními o roční zpracovatelské kapacitě do 3 000 t zdravotnického odpadu, což pokrývá všechna zařízení v České republice, která termicky zpracovávají převážně zdravotnický odpad.

### 4.4.1 Výroba tepla

Při umístění jednotky na zpracování zdravotnických odpadů v areálu nemocnice nebo jiného zdravotnického zařízení je výhodné využít energii obsaženou ve spalinách na výrobu syté páry využívané ve zdravotnictví především pro sterilizaci nástrojů a v prádelnách nebo na ohřev vody převážně pro vytápění nebo přípravu teplé vody.

Pro výrobu vodní páry z odpadního tepla obsaženého ve spalinách jsou využívány parní kotle. Jedná se o tlakové zařízení konstruované podobně jako trubkový výměník tepla. Pro vyšší výkony jsou primárně používány vodotrubné parní kotle (voda vstupuje do trubek a zde probíhá odpařování, spaliny proudí mezitrubkovým prostorem), pro nižší výkony je ve větším měřítku využíváno žárotrubných parních kotlů (spaliny proudí v trubkách, voda a pára jsou v mezitrubkovém prostoru). Parní kotle mohou být navrženy na výrobu syté nebo přehřáté páry. Pro výrobu přehřáté páry je vřazen další výměník tepla mezi dvěma plynnými médii (spaliny-pára).

Vzhledem ke kapacitám spaloven zdravotnických odpadů je pro výrobu páry použito nejčastěji žárotrubných kotlů s přídatným ekonomizérem, přičemž obě zařízení jsou zapojena s protisměrným tokem. Spaliny o teplotě přes 850 °C proudí z dohořivací komory do žárotrubného parního kotle, kde předávají energii vodě na bodu varu a tím ji mění na sytou páru. Tlak v kotli se pohybuje nejčastěji mezi 8 a 12 bar<sub>g</sub>, z důvodu dalšího využití páry, což odpovídá saturačním teplotám přibližně 175–195 °C. Spaliny jsou zde zchlazeny na teploty v rozsahu 200–350 °C a dále mohou proudit do ekonomizéru, je-li v technologii zařazen. Zde dochází k ohřevu napájecí vody kotle. Ochlazené spaliny na teplotu okolo 150–250 °C poté proudí do sekce čištění spalin.

Jak již bylo v úvodu naznačeno, použití vodní páry v prostoru zdravotnického zařízení je nejčastěji pro sterilizaci nástrojů. Pára vyrobená odpadním teplem v tomto případě nahrazuje elektrický ohřev prostoru sterilizátoru, čímž dochází k úspoře energie. Podobná situace nastává v případě využití páry v prádelně, kdy je energie v ní obsažená využita pro nepřímý ohřev prací vody, v případě kvality páry odpovídající prací vodě je možné páru přímo vstříknout do chladné prací vody a ohřívat ji tak na požadovanou teplotu. Páru lze však také využít v kuchyni pro ohřev jídla v k tomu uzpůsobených dvoustěnných nádobách.

Pokud není výroba páry pro provozovatele výhodná, například pro ni nemá dostatečné využití, je možné energii ve spalinách použít pro výrobu horké nebo teplé vody, přičemž běžná praxe označuje horkou vodu při teplotách nad 115 °C. Horkou nebo teplou vodu je možné dále využít pro vytápění budov nebo pro ohřev dalších médií.

Pro výrobu horké nebo teplé vody je možné využít horkovodních, respektive teplovodních kotlů. Jedná se o tlakové výměníky tepla mezi spalinami a vodou. Konstrukce výměníků mohou být podobně jako v případě parních kotlů žárotrubné či vodotrubné, orientace výměníku horizontální nebo vertikální. Tlak horké vody v kotli může dosahovat jednotek až desítek bar<sub>g</sub> dle požadavku na teplotu horké vody. Horkovodní kotel je zpravidla navržen s protisměrným tokem a z pohledu toku vody před něj může být vřazen výměník předehřevu vody, který dále ochlazuje spaliny v rámci sekce čištění spalin. Vzhledem k vyšším tlakům v horkovodním okruhu je žádoucí tlakově oddělit vnitřní horkovodní okruh zařízení EVO a teplovodní okruh v rámci nemocnice, průmyslového závodu atd. Horká voda produkovaná

v kotli v rámci uzavřeného horkovodního okruhu dále přes výměník tepla voda–voda ohřívá topnou vodu na požadovanou teplotu.

Při návrhu spalinových parních kotlů a výměníků spaliny–voda musí být uvažováno s teplotou rosného bodu (TRB) kyselých složek spalin a nejnižší teplota spalin a teplosměnných ploch dosažená v kotli musí být vyšší než TRB těchto složek, aby nedocházelo ke zvýšené chemické korozi a degradaci materiálu výměníku. Rizikovější z hlediska působení nízkoteplotní koroze jsou výměníky spaliny–voda pro předehřev napájecí vody parních kotlů, u kterých je zpravidla dosahováno nižších teplot teplosměnných ploch. Při návrhu je rovněž třeba zohlednit účinky vysokoteplotní koroze.

### 4.4.2 Akumulace tepla

Vzhledem k předpokladu, že většina vyrobené energie je spotřebována v areálu provozovatele zařízení, kde dochází k poměrně výrazným výkyvům ve spotřebách energie, je vhodné uvažovat nad možností využití akumulace tepla ve formě teplé nebo horké vody. K tomuto účelu se využívají beztlaké nebo tlakové akumulční nádrže.

Beztlaká akumulční nádrž nachází využití především pro vyrovnávání rozdílů odběrů teplé vody v systému zásobování teplem v provozech s velkou kapacitou. Teplá voda je uchovávána v beztlakých nádržích o objemu stovek až desetitisíců m<sup>3</sup>, přičemž nad hladinou vody je při změně množství vody vyrovnáván tlak parním polštářem, případně dusíkovou atmosférou, která je však výrazně nákladnější. Zařízení využívá rozdílné hustoty vody při různých teplotách, tudíž v horní části nádrže se nachází teplejší voda než ve spodní části. Promíchávání vody je redukováno vnitřními vestavbami nádrže. Vzhledem k akumulaci vody v podmínkách atmosférického tlaku je možné tuto vodu ohřívát na maximální teplotu přibližně 95 °C.

Tlaková akumulční nádrž může být v závislosti na tlaku použita pro akumulaci teplé nebo horké vody. Tlaková nádoba o velikosti řádově desítek až stovek m<sup>3</sup> je v celém objemu zaplněna vodou a využívá rozdílné hustoty vody, tudíž v horní části nádoby je voda teplejší než ve spodní části. Do spodní části akumulátoru je přiváděna vratka ochlazené vody ze spotřebičů tepla a chladnější voda je odtud odváděna do výměníku tepla na horkovodním okruhu. Ohřátá voda je vracena do horní části akumulátoru, odkud je rovněž teplejší voda odebírána ke spotřebičům, například pro potřeby vytápění.

Parní akumulace pracuje na principu změny skupenství vody při změně tlaku. Nevyužitelná ostrá pára je injektována do horizontální tlakové nádoby s horkou vodou, čímž dochází k ohřevu této vody až na saturační teplotu. Akumulátor je přitom naplněn vodou z cca 50–90 % [42], přičemž nad hladinou vody je parní polštář. Při potřebě odběru tepla je pára (o nižším tlaku než přiváděná ostrá pára) odváděna z horní části akumulátoru, čímž v nádobě klesá tlak a dochází k varu horké vody a tvorbě další páry. Kapacita těchto akumulátorů se pohybuje v řádu jednotek až desítek m<sup>3</sup>.

### 4.4.3 Výroba elektrické energie

Sytá pára produkovaná v kotlích může být rovněž využita pro výrobu elektrické energie přivedením na turbínu napojenou na elektrický generátor. Pro zvýšení účinnosti výroby elektrické energie je možné využít přehřátou páru vznikající v přiřazeném přehříváku, což

však vyžaduje další vstupní investice. Vzhledem k vyšším investičním nákladům a relativně nízké účinnosti výroby elektrické energie při malých výkonech je ale použití této technologie v kontextu této práce a předpokládaným parním výkonům limitováno. Vzhledem k ekonomickým aspektům se předpokládá, že výroba elektrické energie parní turbínou by byla ekonomicky výhodná až u několikanásobně větších zařízení, než jaká jsou uvažována v této práci.

Pro zařízení s nízkými tepelnými výkony nebo pracujícími s nižšími teplotami je proto vhodnější využití technologie ORC (Organic Rankine Cycle). Jedná se o proces podobný výrobě elektřiny na turbíně přivedením přehřáté páry (Rankinův cyklus), avšak teplem nosným médiem není vodní pára, nýbrž organická sloučenina, která má nižší bod varu a je tedy možné při jejím použití provozovat zařízení při nižších teplotách a vyšších tlacích. Optimální médium je poté zvoleno s ohledem na konkrétní aplikaci na základě výkonu, teplotního rozsahu, množství média apod. Technologie ORC je vhodná pro výrobu elektrické energie s výkonem  $100 \text{ kW}_e - 50 \text{ MW}_e$  [43].

V případě využití odpadního tepla na výrobu elektrické energie odchází z turbíny, případně z výměníku voda – organická sloučenina technologie ORC, médium s nižším tepelným potenciálem. I toto teplo však lze využít pro ohřev vody. Kombinace výroby elektrické energie a využití tepelné energie se nazývá kogenerace.

### 4.4.4 Výroba chladu

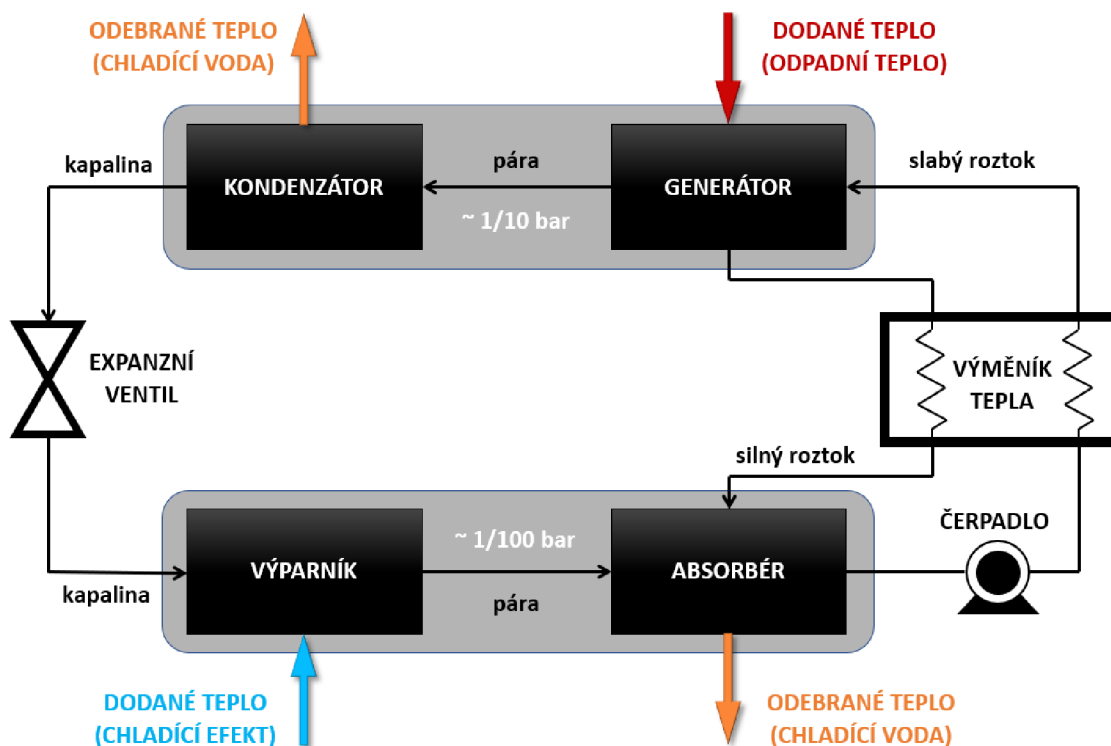
Pro výrobu chladu z odpadního tepla je využíváno absorpčního chlazení. Stejně jako v případě chladicího cyklu s kompresí par chladicího média využívá i absorpční cyklus latentního tepla chladiva. Vstupní energií cyklu však není elektrická energie pohánějící kompresor, nýbrž odpadní teplo v plynném či kapalném médiu. Dvěma základními typy chladících cyklů jsou amoniak–voda ( $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  – vyšší teplotní potenciál odpadního tepla, vyšší výkony) a bromid lithný–voda ( $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  – nižší teplotní potenciál odpadního tepla, nižší výkony).

Níže je popsán princip okruhu  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ , který je svojí oblastí použití vhodný pro jednotky zpracování zdravotnických odpadů. Na obr. 10 je rovněž schematické znázornění procesu.

Vodný roztok bromidu lithného o koncentraci přibližně 55 %<sub>hm</sub> je shromažďován v absorbéru, odkud je přes výměník tepla čerpán do generátoru, který je v okruhu s tlakem přibližně  $1/10 \text{ bar}_a$  [44]. Zde probíhá ohřev odpadním teplem z externího procesu, čímž dochází k odpaření vody z roztoku. Vodný roztok o větší koncentraci odchází z generátoru zpět do absorbéru přes výměník tepla. Vodní pára odchází do kondenzátoru, kde pomocí chladicí vody dochází ke kondenzaci par. Zkondenzovaná voda je skrze expanzní ventil dopravována do okruhu s tlakem přibližně  $1/100 \text{ bar}_a$  při velmi nízké teplotě. Zde v prvním stupni ochlazuje chlazený prostor nebo chlazenou vodu, čímž dochází k odpařování. Pára poté kondenzuje na potrubí přiváděné chladicí vody a je smíchána s roztokem  $\text{LiBr}$  v absorbéru.

Výrobu chladu je možné kombinovat s výše popsanými technologiemi – výrobou elektrické energie a využitím tepelné energie. Spojení těchto technologií se nazývá trigenerace. V zimních měsících při vyšší poptávce tepla je využívána tepelná energie pro vytápění či ohřev vody a v letních měsících, kdy teplo není využíváno pro vytápění, je naopak využito pro výrobu chladu.





Obr. 10 Schéma absorpčního chlazení

## 4.5 Čištění spalin

Při procesech termického rozkladu odpadů vznikají spaliny, které obsahují množství plynných či tuhých znečišťujících látek. Koncentrace těchto látek ve spalinách musí být monitorovány a před vypuštěním do okolní atmosféry musí vyhovovat stále se zpřísnujícím emisním limitům či hodnotám stanoveným příslušnými orgány při vydání povolení k provozu dané technologie.

Každé zařízení na termické zpracování odpadů, ať už zdravotnických či jiných, je proto vybaveno systémem čištění spalin. Jedná se o soustavu zařízení snižující koncentrace jedné nebo více znečišťujících látek obsažených ve spalinách na požadovanou úroveň. Množství technologií čištění spalin, jejich konstrukce, vlastnosti a vhodnost použití však tvoří poměrně rozsáhlé téma, a proto je paralelně zpracováváno v samostatné diplomové práci „Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů“ [45].

V následujících odstavcích je uveden stručný přehled zájmových oblastí technologií čištění spalin a jejich stručný popis.

### Tuhé znečišťující látky (TZL)

Tuhé znečišťující látky ve spalinách produkovaných při termickém rozkladu zdravotnických odpadů zahrnují především jemný popílek jako nespalitelnou složku odpadu. Dalšími tuhými částicemi jsou těžké kovy (např. Hg, Cd, Tn apod.).

Pro odstranění těchto částic ze spalin je využíváno povrchové filtrace (tkaninové filtry). Jedná se o izolované zařízení rozdělené na dvě sekce filtrační plochou tvořenou tkaninovými rukávci. Spaliny vstupují do spodní části filtru a díky tlakové diferencii prostupují přes filtrační tkaninové rukávce s podpurnými ocelovými koši a po odstranění tuhých znečišťujících látek

proudí ven z filtru. Tuhé znečišťující látky se přitom zachytávají na vnější straně rukávců vytváří filtrační koláč, který je třeba pravidelně odstraňovat tak, aby byla zachována přiměřená tlaková ztráta filtru. Z tohoto důvodu je nutná pravidelná regenerace filtru nárazovým přivedením tlakového vzduchu, který způsobí oklep rukávců. Popílek po oklepu padá do výsypky a je odváděn do k tomu určené sběrné nádoby.

TZL mohou být rovněž ze spalin odstraňovány elektrostatickými odlučovači. Tato zařízení využívají elektrického odporu tuhých částic. Zařízení obsahuje dvě rozdílně nabitě elektrody, z nichž jedna vytváří na tuhých částicích záporný náboj a tyto jsou poté přitahovány ke druhé elektrodě s kladným nábojem, tzv. sběrné elektrodě. Mechanickým působením, nejčastěji oklepem, dojde k uvolnění částic, které padají do výsypky.

### **Kyselé složky**

Spaliny obsahují rovněž množství kyselých látek, jmenovitě zejména HCl, HF a SO<sub>x</sub>. Odstranění těchto látek je možné chemickou reakcí s alkalickými látkami volenými s ohledem na konkrétní aplikaci. Technologie pro odstranění kyselých složek je možné rozdělit do 3 základních kategorií:

Suché procesy – dávkování suchého reakčního činidla do proudu spalin, reakce probíhá za vzniku suchého produktu, který je dále oddělen filtrací. Reakčním činidlem je nejčastěji hydroxid vápenatý nebo hydrogenuhličitan sodný.

Polomokrý (polosuchý) procesy – dávkování reakčního činidla do proudu spalin ve formě vodné suspenze (zpravidla vápenného mléka). Při kontaktu s horkými spalinami dochází k reakci a odpařování reakčního činidla, čímž vzniká suchý produkt, který je dále oddělen filtrací.

Mokrý procesy – spaliny jsou chlazeny a následně prochází přes proud prací vody s obsahem reakčního (neutralizačního) činidla, kde dochází k neutralizaci kyselých složek spalin za vzniku solí. Tyto soli jsou absorbovány do prací vody a ta je dále upravována, případně po úpravě vracena zpět do procesu. Při mokřím praní spalin dochází také k absorpci těžkých kovů.

### **Oxidy dusíku**

Nejčastěji se oxidy dusíku ve spalinách vyskytují ve formě oxidu dusnatého (NO) a oxidu dusičitého (NO<sub>2</sub>). Vznik těchto sloučenin je možné redukovat již při řízení procesu spalování, zejména udržováním vhodného přebytku kyslíku a optimální teploty. I při udržování optimálních podmínek však dochází k produkci určitého množství oxidů dusíku. Snížení koncentrace těchto látek ve spalinách je možné dvěma metodami.

SCR (Selektivní katalytická redukce) – vstříkávání reagentu (amoniak, močovina) do proudu spalin a následná reakce na katalyzátoru s oxidy dusíku. Produkty reakce jsou vodní pára a dusík. Dle teploty spalin je možné použít různé materiály katalyzátoru. Při vhodné volbě materiálu katalyzátoru a provozní teploty lze touto metodou katalyticky rozkládat i dioxiny a furany.

SNCR (Selektivní nekatalytická redukce) – vstřikování reagentu (amoniak, močovina) do proudu spalin, kdy rozklad oxidů dusíku na vodní páru a dusík probíhá bez katalyzátoru. Vzhledem k potřebě vysokých teplot pro reakci (850–1 100 °C) je reagent nejčastěji injektován do spalovací komory tak, aby reakce probíhala v dohořivací komoře.

### Dioxiny a furany

Dioxiny a furany (přesněji dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany, zkráceně označovány jako PCDD/F) jsou plynné látky s vysoce nebezpečnými vlastnostmi a jsou mimo jiné klasifikovány jako karcinogenní a reprotoxické. Tyto sloučeniny vznikají především při termickém rozkladu odpadů s obsahem chloru. Snížení množství těchto látek ve spalinách je možné následujícími metodami.

SCR (Selektivní katalytická redukce) – jak bylo uvedeno v části věnující se redukci oxidů dusíku, tuto metodu je možné využít rovněž pro rozklad dioxinů a furanů katalytickou oxidací. Slučováním těchto polutantů s kyslíkem vzniká CO<sub>2</sub>, vodní pára a kyselina chlorovodíková, kterou je možné dále ze spalin odstraňovat metodami uvedenými v části věnující se redukci kyselých složek.

Aktivní uhlí – dávkováním sorbentu (aktivní uhlí, zeolit, dolomit apod) do proudu spalin dochází k adsorpci PCDD/F a těžkých kovů na povrchu sorbentu. Po zachycení polutantů je sorbent oddělen z proudu spalin povrchovou filtrací. Alternativně je možné do technologie umístit adsorpční filtr, který obsahuje sypané lože z adsorbéru ve formě granulátu. Polutanty ze spalin procházejících ložem jsou adsorbovány a náplň adsorbéru je po určitých intervalech měněna.

Katalytické tkaninové filtry – jedná se o zařízení pracující na stejném principu, jako tkaninové filtry popsané v části věnující se odstranění TZL. Tkaninové rukávce použité v tomto filtru však obsahují katalytickou vrstvu, která zajišťuje rozklad dioxinů a furanů a zároveň redukci oxidů dusíku. Jedná se tak o multifunkční technologii nahrazující několik jednoúčelových aparátů [9].

### Těžké kovy

Těžké kovy jsou obsaženy ve spalinách ve formě mikročástic a jedná se v nejvyšší míře o rtuť (Hg), kadmium (Cd) a thalium (Th). Jednou z možností redukce těchto částic je kvalitní odprášení systémy použitými pro redukci množství tuhých částic. Další možností je adsorpce těchto částic. Tento proces může probíhat na povrchu práškového sorbentu, který je dávkován do proudu spalin, nebo v adsorpčním filtru, ve kterém je vytvořeno lože z adsorbéru ve formě granulátu. Redukce těchto částic je možná také mokřými procesy, kdy jsou tyto částice absorbovány do proudu zástřiku a jsou odváděny s kapalinou.

### 4D filtrace

Jak již název naznačuje, tato technologie kombinuje několik jednotkových operací pro redukci 4 skupin znečišťujících látek v jednom aparátu. Samotné zařízení je podobné látkovému filtru, avšak filtrační elementy jsou zhotoveny z mikroporézní keramiky s integrovaným katalyzátorem. Redukce množství TZL probíhá průchodem spalin přes filtrační elementy, na jejichž povrchu je vytvářen filtrační koláč. Dioxiny a furany jsou poté rozkládány v katalytické

vrstvě. Redukce kyselých složek je zajištěna dávkováním práškového sorbentu do proudu spalin před 4D filtr, rozklad NO<sub>x</sub> na plynný dusík a kyslík poté probíhá na katalytické vrstvě s redukčním činidlem (amoniak, močovina) vsťikovaným do spalin před 4D filtrem. Výhodou je kombinace operací v jednom aparátu a tím snížení investičních nákladů.

## 5 MODELOVÝ REGION A VOLBA VHODNÉ TECHNOLOGIE

V rámci diplomové práce byly zvoleny parametry modelového regionu, který je uvažován pro umístění moderní jednotky na energetické využití zdravotnických odpadů. Z důvodu možnosti aplikace postupů v této diplomové práci na reálné regiony byly tyto parametry, jako jsou velikosti a produkce odpadů v nemocnicích, rozmístění nemocnic a další vstupní hodnoty, zvoleny jako obvyklé a byly konzultovány s odborníky ze společnosti EVECO Brno, s.r.o. a korigovány na základě aktuálních hodnot v obdobném regionu.

Modelový region zahrnuje 5 nemocnic různé velikosti, vyjádřené počtem lůžek. Nemocnice A je krajskou nemocnicí s počtem lůžek 1 100. Další zdravotnická zařízení se nacházejí v okolních městech a mají nižší kapacitu, konkrétně pro nemocnici B – 247 lůžek, nemocnice C – 159 lůžek, nemocnice D – 136 lůžek, nemocnice E – 195 lůžek.

V době před návrhem nové technologie se v areálu nemocnice A nachází zařízení na energetické využití odpadů na hranici životnosti, které je navrženo na zpracování množství odpadu, které odpovídá produkci odpadu pouze v nemocnici A v době výstavby tohoto zařízení, tedy přibližně před 25 lety. Zbylé nemocnice B, C, D a E platí za odvoz a zpracování odpadu externím subjektům. Zařízení na energetické zpracování odpadů (EVO) v nemocnici A vyrábí sytou páru, která je dále využívána v areálu nemocnice pro potřeby prádelny, sterilizace, ohřevu teplé vody (TV), případně vytápění. Vstupní data spotřeb tepla jsou uvedena v podkapitole 8.1. Z důvodu nedostatečného tepelného výkonu zařízení EVO je však pára paralelně vyráběna rovněž v plynové kotelně.

Z těchto důvodů je pro nový koncept uvažována výstavba moderní jednotky na energetické využití zdravotních odpadů z celého regionu v nemocnici A. Dojde tak k nahrazení morálně i fyzicky zastaralého zařízení moderní jednotkou EVO, navýšení tepelného výkonu a množství produkované páry, čímž dojde k úspoře fosilních paliv a potenciálnímu snížení dovozné vzdálenosti odpadů z nemocnic B, C, D a E. Při zvolení vhodné koncepce a plánování dovozu odpadů vzniká při výstavbě této jednotky potenciál ke snížení nákladů na zpracování odpadů, kdy nemocnice B, C, D a E budou odvádět poplatky za zpracování odpadů nemocnici A. Naopak nemocnice A bude moci tyto poplatky využít na financování provozu zařízení EVO za současného zvýšení produkce tepla a tím úspory fosilního paliva.

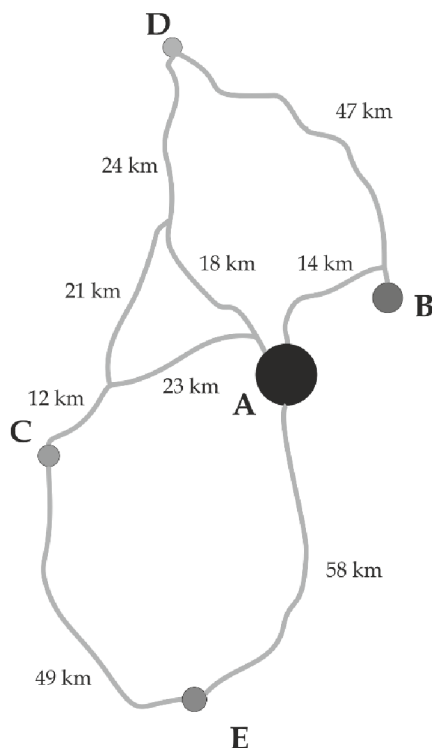
### 5.1 Rozmístění nemocnic v rámci modelového regionu

V rámci volby parametrů modelového regionu bylo zvoleno rozmístění nemocnic v rámci tohoto regionu. Toto rozmístění je zobrazeno na obr. 11. Svozoové vzdálenosti každé z nemocnic do nemocnice A jsou uvedeny v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Svozoové vzdálenosti z jednotlivých nemocnic

Nemocnice	B → A	C → A	D → A	E → A
Dovozová vzdálenost [km]	14	35	42	58

Na obr. 11 jsou rovněž zobrazeny trasy, které propojují nemocnice B, C, D a E s nemocnicí A a další pozemní komunikace, které dále propojují některé z nemocnic B, C, D a E.



Obr. 11 Rozmístění nemocnic v modelovém regionu

## 5.2 Produkce odpadů

Zdravotnická zařízení jsou povinna evidovat množství produkovaných odpadů jednotlivých kategorií a tyto výkazy jsou ve většině případů podkladem pro návrh kapacity zařízení na zpracování těchto odpadů. Pro jednotku EVO zpracovávající zdravotnické odpady je vhodné uvažovat pouze odpady kategorie N, a to z důvodu vysokých technologických nároků na zpracování nebezpečných odpadů v porovnání s ostatními odpady, nižší účinnosti zařízení oproti zařízením EVO zpracovávající komunální odpady z důvodu několikanásobně menší kapacity a s tím souvisejícími vyššími finančními nároky na zpracování odpadů v tomto zařízení. Množství produkovaných odpadů kategorie N v modelovém regionu je uvedeno v tab. 5.2. Volba optimální kapacity zařízení EVO je však klíčovým krokem zejména z ekonomického hlediska, proto je vhodné produkci odpadů ve zdravotnických zařízeních ověřit.

Tab. 5.2 Produkce odpadů kategorie N v nemocnicích modelového regionu [t/rok]

<i>Druh a kat. č. odpadu</i>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>CELKEM</b>
<i>150110 – Obaly obsahující zbytky nebezpečných látek nebo obaly těmito látkami znečištěné</i>	42,8	9,8	5,7	5,1	6,6	70
<i>180101 – Ostré předměty (kromě č. 180103)</i>	59,9	13,7	7,9	7,1	9,4	98

<i>Druh a kat. č. odpadu</i>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>CELKEM</b>
180102 – Části těla a orgány včetně krevních vaků a krevních konzerv (kromě č. 180103)	6,8	1,6	0,9	0,8	1,1	11,2
180103 – Odpady, na jejichž sběr a odstraňování jsou kladeny zvláštní požadavky s ohledem na prevenci infekce	741	169,6	97,7	87,4	116,1	1211,8
180106 – Chemikálie, které jsou nebo obsahují nebezpečné látky	4,3	1	0,6	0,5	0,6	7
180109 – Jiná nepoužitelná léčiva neuvedená pod č. 180108	1,2	0,3	0,2	0,1	0,2	2
<b>CELKEM</b>	<b>856</b>	<b>196</b>	<b>113</b>	<b>101</b>	<b>134</b>	<b>1 400</b>
<b>PRŮMĚRNÁ DENNÍ PRODUKCE [kg]</b>	<b>2 345</b>	<b>537</b>	<b>310</b>	<b>277</b>	<b>367</b>	<b>3 836</b>

Při určování produkce odpadů v nemocnicích je možné využít lůžkové kapacity nemocnice, která se v rámci studií jeví jako vhodný indikátor pro množství vyprodukovaného odpadu. Měrná denní produkce odpadu se poté dá vyjádřit v jednotkách kg/lůžko/den. Tato hodnota se zásadně liší zejména dle vyspělosti země, jejího HDP a poskytované kvality zdravotnické péče. V České republice je možné odhadnout produkci odpadů v nemocnicích v rozmezí 2,5-3,5 kg/lůžko/den, což odpovídá hodnotám v okolních zemích [46]. Tato hodnota zahrnuje veškerý odpad produkovaný v souvislosti s poskytováním zdravotní péče, tedy odpady kategorie N i kategorie O. Množství odpadů kategorie N je poté závislé na způsobu a vyspělosti separace odpadů v rámci zdravotnického zařízení. Vzhledem k nízké motivaci zaměstnanců a faktu, že obecně panují obavy nad zařazením většího množství produkovaného odpadu do kategorie O z důvodu možného pochybení a možným následným komplikacím při zařazení nebezpečného odpadu do kategorie O, se ve výsledcích studií (např. [47]) pohybuje poměr nebezpečných odpadů okolo 60-95 %, což výrazně převyšuje průměr států EU. Vzhledem k výstavbě nového zařízení EVO a předpokladu pozitivního trendu v kvalitě separace zdravotnických odpadů jsou v nemocnicích modelového regionu zavedena opatření pro dosažení poměru nebezpečných odpadů na úrovni 60 % a tato hodnota je použita pro ověření produkce odpadů. Měrná denní produkce odpadů je uvažována na úrovni 3 kg/lůžko/den, tedy střední hodnoty obvyklých hodnot.

Dále je nutné uvažovat se zpracováním zdravotnických odpadů i z dalších zařízení poskytujících zdravotní či veterinární péči, jako jsou polikliniky, soukromé ordinace, veterinární ordinace a kliniky, opatrovnická zařízení a další podobná zařízení. U těchto zařízení se předpokládá skladování produkovaného odpadu v místě vzniku v chladicím nebo mrazicím zařízení při teplotě nižší než 8 °C (dle [16]) a dovoz do areálu některé z nemocnic A, B, C, D a E při uhrazení příslušného poplatku. Množství těchto odpadů je závislé na počtu a velikosti zdravotnických zařízení v daném místě a může se pohybovat v jednotkách až desítkách procent.

Produkcí odpadů v nemocnici je možné určit dle vztahu:

$$M_o = \frac{n_l \cdot m_{l,N} \cdot 365 \cdot k_{ext}}{1000} \quad (5.1)$$

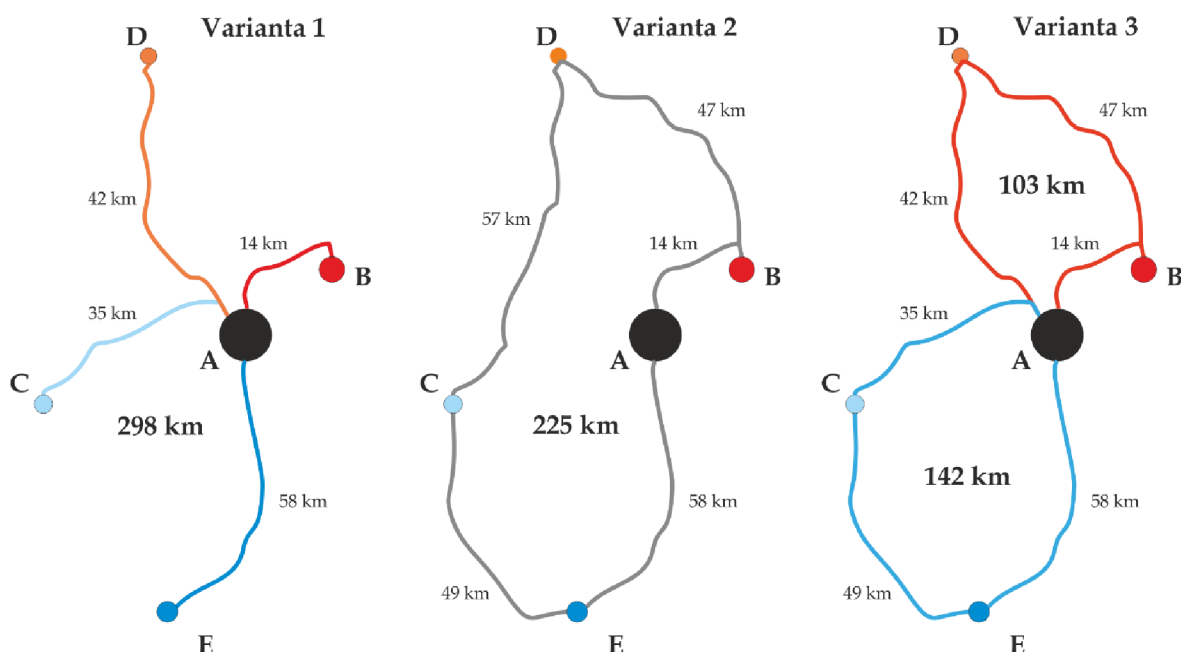
kde  $M_o$  je množství odpadu produkované v nemocnici [t/rok],  $n_l$  je počet lůžek [-],  $m_{l,N}$  je měrná denní produkce nebezpečných odpadu vztažená na lůžko [kg/lůžko/den] a  $k_{ext}$  je koeficient pro zahrnutí externích producentů odpadu [-].

Pro dané předpoklady měrné denní produkce odpadů 3 kg/lůžko/den a poměru odpadu kategorie N rovno 60 % je rozptýl koeficientu pro externí produkci odpadů 4,6 % (nemocnice E) až 20,8 % (nemocnice B). Tyto hodnoty lze považovat za reálné, a proto je možné kapacitu zařízení EVO navrhnout na základě poskytnutých dat o produkci odpadů.

### 5.3 Svoz a skladování odpadu

Odpady z jednotlivých nemocnic je nutné svážet do nemocnice A v takových intervalech, aby bylo možné dodržet maximální možnou dobu mezi shromážděním a konečným odstraněním odpadu. Z tohoto důvodu je nejvyšší realizovatelná prodleva mezi dvěma svozy odpadů z jedné nemocnice 2 dny. Při této prodlevě lze však dodržení prodlevy 3 dnů od shromáždění po konečné odstranění odpadů dosáhnout pouze velmi dobře organizovaným příjmem, skladováním a manipulací s odpadem v místě konečného odstranění odpadů.

Na základě rozmístění nemocnic a možných využitelných pozemních komunikací (obr. 11), byly vytvořeny 3 varianty svozových map, zobrazené na obr. 12. Důležitou vstupní hodnotou při návrhu svozu odpadů je sypaná hmotnost. Průměrně se sypaná hmotnost zdravotnického odpadu pohybuje okolo 100-110 kg/m<sup>3</sup> [4], avšak ve fázi návrhu svozových a skladovacích prostředků je vhodné uvažovat s určitou rezervou. Proto je v rámci této práce uvažována sypaná hmotnost zdravotnického odpadu 80 kg/m<sup>3</sup>.



Obr. 12 Svozové mapy



Varianta 1 uvažuje denní svoz odpadů z každé z nemocnic B, C, D a E zvlášť. Toto řešení je vhodné uvažovat v případě, že každá z těchto nemocnic zajišťuje odvoz vlastního vyprodukovaného odpadu nezávisle na dalších producentech, a to vlastními prostředky nebo prostřednictvím externího dopravce. Denní ujetá vzdálenost je v tomto případě 298 km při nejvyšší zátěži dopravního prostředku 537 kg odpadu, což odpovídá objemu přibližně 6,7 m<sup>3</sup>. Tento model lze uvažovat i pro případ svozu odpadu s frekvencí 1x za 2 dny. Pro minimalizaci odchylek množství přijatých odpadů v nemocnici A je vhodné uvažovat svoz z nemocnic s nejvyšší a nejnižší produkcí odpadů (B, D) ve stejný den. Rozdíl v dovezeném množství odpadu je pouhých 274 kg, což při průměrném příjmu odpadu v zařízení EVO rovném 3 836 kg činí přibližně 7 %. Při vytvoření vhodného systému značení dočasně skladovaného odpadu pro dodržení doby 3 dnů před konečným odstraněním se jedná o vhodný krok k úspoře nákladů na dopravu odpadu při redukci průměrné denní vzdálenosti na polovinu, konkrétně na 149 km. V této variantě je nejvyšší dopravované množství odpadu 1 627 kg, což odpovídá objemu přibližně 20,34 m<sup>3</sup>.

Varianta 2 uvažuje denní svoz odpadů jedním automobilem v rámci jednoho okruhu. Tato varianta je vhodná v případě zajištění svozu odpadů nemocnicí A, ideálně vlastním dopravním prostředkem pro snížení nákladů na dopravu. Ujetá vzdálenost činí 225 km/den. Průměrné množství odpadu je rovno součtu denních produkcí nemocnic B, C, D a E, tedy 1 490 kg s odpovídajícím objemem přibližně 18,63 m<sup>3</sup>.

Varianta 3 využívá 2 svozových okruhů – okruhu B+D a okruhu C+E. Je vhodná v případě, že je uvažováno s realizací svozu odpadů nemocnicí A vlastním dopravním prostředkem a svozem z každé z nemocnic s frekvencí 1x za 2 dny, podobně jako ve variantě 1. Denní ujetá vzdálenost je 142 km nebo 103 km, což v průměru činí 122,5 km/den. Nejvyšší dopravované množství odpadu je stejné jako ve variantě 1, tedy 1 627 kg, respektive 20,34 m<sup>3</sup>. Při zavedení opatření pro splnění lhůty 3 dnů pro konečné odstranění odpadu se tato varianta svozu jeví jako nejvhodnější a je uvažována pro navrhované zařízení EVO v modelovém regionu.

Pro svoz odpadů je neekonomičtější varianta přepravy ve volně loženém stavu v uzavřených nepropustných pytlích a nádobách. Bližší specifikace shromažďovacích prostředků jsou uvedeny v [1]. Přeprava nebezpečných odpadů se řídí předpisem ADR [48], přičemž pro volně ložené odpady musí obalové materiály plnit parametry skupiny II dle tohoto předpisu. Mimo jiné musí být na obalu uvedeno katalogové číslo odpadu, datum vzniku a požadované zpracování [1].

Příjem odpadů probíhá v areálu zařízení EVO a odpad je umístěn do speciálních kontejnerů o objemu 1 000 l, například od výrobce SULO [49]. Zařízení EVO je přizpůsobeno těmto kontejnerům a jejich vyprazdňování probíhá automaticky. Je tím redukována manipulace s nebezpečným odpadem na minimum. Avšak manipulace je při tomto řešení potřebná při příjmu odpadů. Nákladní automobil je přistaven ke skladovacím prostorům a obsluha zařízení EVO provádí ruční přemístění pytlů se zdravotnickým odpadem z nákladového prostoru automobilu do připravených kontejnerů. Ty jsou poté skladovány v zastřešeném prostoru. Pro případ náhlého výpadku technologie a nutnost skladovat určité množství odpadu po dobu delší než 3 dny je v prostoru zařízení vyhrazen chlazený prostor v podobě mobilní chlazené buňky. Tato buňka však pojme jen omezené množství odpadu a zbylé množství při větším výpadku je nutné odklonit k jinému zpracovateli.

Vzhledem k potenciálním rizikům při manipulaci se zdravotnickým odpadem je možné předpokládat vývoj legislativy i požadavků provozovatelů zařízení EVO na snížení přímé manipulace se zdravotnickými odpady. Možným řešením je vybudování násypky na vstupu do zařízení EVO plněné přímo z nákladního automobilu. Toto řešení však vyžaduje významné investice na vybudování násypky o velkém objemu a nájezdové rampy. Z těchto důvodů je řešení ekonomicky i prostorově náročné. Další možností je umístění zdravotnických odpadů do kontejnerů již při shromáždění a přeprava těchto kontejnerů. Příjem odpadu by poté probíhal vyložením kontejnerů v areálu zařízení EVO na vyvýšené rampě, případně v úrovni skladu při vybudování sníženého nájezdu ve výšce nákladové hrany automobilu. Nevýhodou tohoto řešení je větší hmotnost i objem přepravovaného odpadu a nižší efektivita využití nákladového prostoru automobilu, což může vést k potřebě vyššího počtu automobilů nebo navýšení frekvence přepravy odpadu. Toto řešení tedy znamená zejména zvýšení provozních nákladů spojených s odstraněním zdravotnických odpadů.

## 5.4 Požadavky provozovatele zařízení

Prvotním indikátorem návrhu moderní jednotky EVO v uvažovaném rozsahu je nahrazení stávajícího zařízení, které je na hranici životnosti s nevyhovující kapacitou. Navýšení kapacity nového zařízení EVO pro možnost zpracování odpadů i z nemocnic B, C, D a E je předmětem společných zájmů a předběžných dohod. Vzhledem k tomuto navýšení kapacity a faktu, že stávající zařízení je umístěno v budově rozměrově ani staticky nevyhovující pro výstavbu nové technologie s životností přibližně 20 let, je uvažováno s demolicí stávající technologie i stavby a výstavbě obou částí od základu, avšak na stejném místě jako stávající zařízení EVO. Konkrétně se jedná o pozemek v areálu nemocnice sousedící s plynovou kotelnou. Toto umístění zaručuje dostupnost rozvodů zemního plynu, který je používán jako podpůrné palivo v zařízení EVO, i rozvodů elektrické energie a pitné vody. Rovněž je zde možnost napojení na stávající rozvodnou síť produkovaného tepla.

Vzhledem k produkci syté páry v současném zařízení EVO je vyžadováno využití tepla pro výrobu syté páry i v novém zařízení EVO. Požadovaný tlak produkované syté páry je 13 bar<sub>g</sub>, čemuž odpovídá teplota 195 °C. Pára je využívána v areálu nemocnice pro potřeby prádelny, sterilizace, ohřevu TV, případně vytápění. Spotřeby páry v jednotlivých zařízeních jsou blíže specifikovány v kapitole 8. Vstupním proudem do zařízení EVO je napájecí voda o teplotě 105 °C.

Posledním požadavkem ze strany provozovatele je kapacitní rezerva nové technologie. Měla by být navržena tak, aby bylo možné při kontinuálním provozu zpracovávat všechny zdravotnický odpad produkovaný v modelovém regionu. Navíc má provozovatel zařízení v plánu uzavřít dohodu o výměně odpadu s dalším, případně dalšími zařízeními EVO. V případě odstávky jednoho ze zařízení bude odpad přepraven do jiného zařízení EVO ke konečnému odstranění a naopak. Případné rozdíly v předaném množství odpadu budou finančně vyrovnány na základě ročního vyhodnocení, a to za cenu blízkou nákladům za zpracování, bez úmyslu výrazného výdělků. Tato dohoda významnou měrou redukuje náklady na zpracování odpadu externími subjekty včetně dopravy na dlouhé vzdálenosti, které vznikají při pravidelných i nepravidelných odstávkách delších než 1-2 dny. Navrhované zařízení tedy musí disponovat takovou kapacitou, aby byla zajištěna možnost zpracování dalšího externího odpadu.

Zařízení EVO rovněž musí splňovat všechny legislativní požadavky, aby bylo možné pro něj získat povolení k provozu. Tyto požadavky shrnuje studie EIA, v rámci které dochází k posouzení vlivu uvažovaného zařízení na obyvatelstvo, přírodu a nejrůznější ekosystémy a na základě které je možné udělit povolení k provozu. V rámci studie EIA je například nutné vyhotovení rozptylové studie spalin, dle které je eventuálně korigována předem stanovená výška komína, nebo hlukové studie, sloužící jako podklad pro hlukovou izolaci budovy, ve které je umístěna technologie. Pro areál nemocnice, zejména pro lůžkové budovy totiž platí přísné hlukové limity, kdy hluk na vnějším plášti těchto budov nesmí v nočních hodinách překročit 35 dB [50].

## 5.5 Výběr vhodné technologie

Na základě vstupních parametrů, zejména množství zpracovávaného odpadu a požadavku na energetické využití s produkcí syté páry je třeba zvolit vhodnou metodu termického zpracování, tedy spalování na roštu, spalování v rotační peci nebo pyrolýzní rozklad. Z důvodu maximalizace účinnosti jednotky není vhodné uvažovat rotační pec z důvodu vyššího přívodu spalovacího vzduchu a z toho pramenící větší produkce spalin. To vyžaduje větší dimenzování všech navazujících aparátů a tím navýšení nákladů. Rovněž se zvyšujícím objemem spalin roste komínová ztráta a klesá celková termická účinnost zařízení EVO. Pro porovnání roštové spalovací komory a pyrolýzní komory lze uvažovat několik kritérií. Dle tab. 4.2 je zřejmé, že účinnost odstranění infekčnosti odpadu, stejně jako redukce objemu je srovnatelná. Obě zařízení rovněž vyžadují použití dohořivací komory a lze předpokládat i podobné množství a složení spalin. Roštová spalovací komora však vykazuje menší dobu zpracování, a tedy možnost vyšší zpracovatelské kapacity při stejných zástavbových rozměrech, respektive nižších zástavbových rozměrů při zachování požadované zpracovatelské kapacity. Rovněž v oblasti investičních a provozních nákladů je roštová spalovací komora příznivější. Pyrolýzní komora je technologicky složitější zařízení s požadavkem na inertní atmosféru a je tedy možné očekávat vyšší náklady.

Pro zařízení EVO v daném regionu tedy byla jako základ termického zpracování zvolena roštová spalovací komora s kontinuálním dávkováním odpadu. Uspořádání pece, respektive tok médií (viz obr. 3), je zvolen na základě výhřevnosti a předpokládaného složení odpadu. Výhřevnost zdravotnických odpadů se typicky pohybuje v rozmezí 14–16 MJ/kg. V porovnání s jinými tuhými palivy se jedná o hodnotu střední až nízkou (např. komunální odpad 8-12 MJ/kg, dřevní štěpka 10-16 MJ/kg, plastové výměty 23-30 MJ/kg) [51]. Je však nutné uvažovat možnost poměrně vysoké vlhkosti odpadu, způsobené přítomností vodných roztoků, biologických tekutin apod. Z těchto důvodů je pro navrhované zařízení zvolena roštová spalovací komora s protisměrným tokem médií.

Na spalovací komoru navazuje dohořivací komora, která zajišťuje splnění legislativních požadavků na teplotu a zádržnou dobu spalin – 850 °C (respektive 1 100 °C při obsahu chloru v odpadu přesahující 1 %<sub>hm</sub>) po dobu nejméně 2 s. Využití produkované energie, tedy výroba syté páry, probíhá v parním kotli umístěném za dohořivací komorou. Dále je v rámci aparátů systému čištění spalin umístěn ekonomizér, který predehřívá napájecí vodu parního kotle. Jednotka je doplněna o moderní systém čištění spalin zajišťující splnění plánovaných emisních limitů na základě návrhu BREF/BAT [11]. Pro snížení produkovaných emisí a zvýšení účinnosti jednotky je sekundární spalovací vzduch nahrazen recyklem spalin. Systém čištění

spalin pro tuto jednotku je navržen v paralelně zpracovávané diplomové práci „Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů“ [45].

Kapacita zařízení je navržena dle požadavku na zpracování produkovaných zdravotnických odpadů v modelovém regionu, který je vstupním parametrem návrhu. Dále je zohledněna rezerva umožňující dohodu o výměně odpadů. Vzhledem k produkci odpadů v modelovém regionu bude navrhované zařízení převyšovat průměr kapacit zařízení na zpracování zdravotnických odpadů v České republice, a tudíž může být procentuální rezerva kapacity nižší než u ostatních členů dohody. Pro navrhovanou jednotku proto byla zvolena kapacitní rezerva přibližně 8 %. V situaci, kdy nebude do navrhovaného zařízení dovážen odpad od externích producentů v rámci dohody o výměně odpadu, je možné kapacitní rezervu využít pro zpracování odpadů přijatých od cizích subjektů za příslušný poplatek. Této služby mohou například využívat malá zdravotnická zařízení, soukromé ordinace, veterinární ordinace nebo opatrovnické instituce, které produkují malé množství odpadů a nemají s provozovatelem zařízení EVO (nemocnicí A) uzavřenou dohodu o pravidelném odebírání odpadu.

Navzdory tomu, že zařízení EVO je provozováno kontinuálně, jsou pro zajištění správné funkce předpokládány pravidelné odstávky. Krátkodobé odstávky jsou odhadnuty na 1x24 h/týden a slouží zejména pro čištění teplosměnných ploch parního kotle a pro drobné opravy a servisní zásahy. Dlouhodobá odstávka, která je dle zkušeností odhadnuta na 10 dní s frekvencí 1x ročně slouží k větším opravám, výměnám částí zařízení na hranici životnosti, případně k úpravám technologie. Během těchto dlouhodobých odstávek je nutné odklánět produkovaný odpad k externím zpracovatelům v rámci dohody o výměně odpadů. Dále je vyhrazen prostor pro nepravidelné odstávky, které pokrývají zejména nenadálé události. Dle doby trvání těchto odstávek a celkového množství produkovaného odpadu je v některých případech rovněž nutný odvoz produkovaného odpadu k externím zpracovatelům. Celkový pracovní fond zařízení EVO byl stanoven jako obvyklý dle současného trendu u podobných zařízení na 7 000 h/rok, což poskytuje prostor 11 dní pro nepravidelné odstávky.

Kapacitu zařízení je tedy možné určit na základě produkce odpadů, pracovního fondu zařízení EVO a zvolené rezervy:

$$\dot{m}_{prod} = \frac{\dot{M}_{prod} \cdot 1000}{365 \cdot 24} = \frac{1400 \cdot 1000}{365 \cdot 24} = 159,8 \frac{kg}{h} \quad (5.2)$$

$$\dot{m}_{zprac} = \frac{\dot{m}_{prod}}{1 - \frac{t_{odst}}{t_{po}}} = \frac{159,8}{1 - \frac{24}{7 \cdot 24}} = 186,4 \frac{kg}{h} \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_{kap} = \dot{m}_{zprac} \cdot k_{rez} = 186,4 \cdot 1,08 = 201,3 \frac{kg}{h} \cong 200 \frac{kg}{h} \quad (5.4)$$

$$\dot{M}_{kap} = \dot{m}_{kap} \cdot PF = 200 \cdot 7000 = 1\,400\,000 \frac{kg}{rok} \cong 1,4 \frac{kt}{rok} \quad (5.5)$$

kde  $\dot{M}_{prod}$  je roční produkované množství odpadu v modelovém regionu [t/rok],  $\dot{m}_{prod}$  je hodinové produkované množství odpadu v modelovém regionu [kg/h],  $\dot{m}_{zprac}$  je návrhová

kapacita zařízení pro zpracování odpadů z modelového regionu při uvažování pravidelných odstávek [kg/h],  $t_{odst}$  je trvání pravidelné krátkodobé odstávky [h],  $t_{po}$  je perioda pravidelných krátkodobých odstávek [h],  $\dot{m}_{kap}$  je návrhová hodinová kapacita zařízení [kg/h],  $k_{rez}$  je koeficient kapacitní rezervy [-],  $M_{kap}$  je návrhová roční kapacita zařízení [kt/rok], PF je pracovní fond zařízení EVO [h/rok].

Zařízení EVO je tedy navrženo na kapacitu 200 kg/h, respektive 1,4 kt/rok. Pro ilustraci toku odpadů v zařízení byl vyhotoven zjednodušený model návozu odpadů s rozlišením 1 den a uvažováním všech odstávek. Pro ilustraci je v tab. 5.3 zobrazen týdenní tok odpadů pro případ kontinuálního provozu s pravidelnou odstávkou.

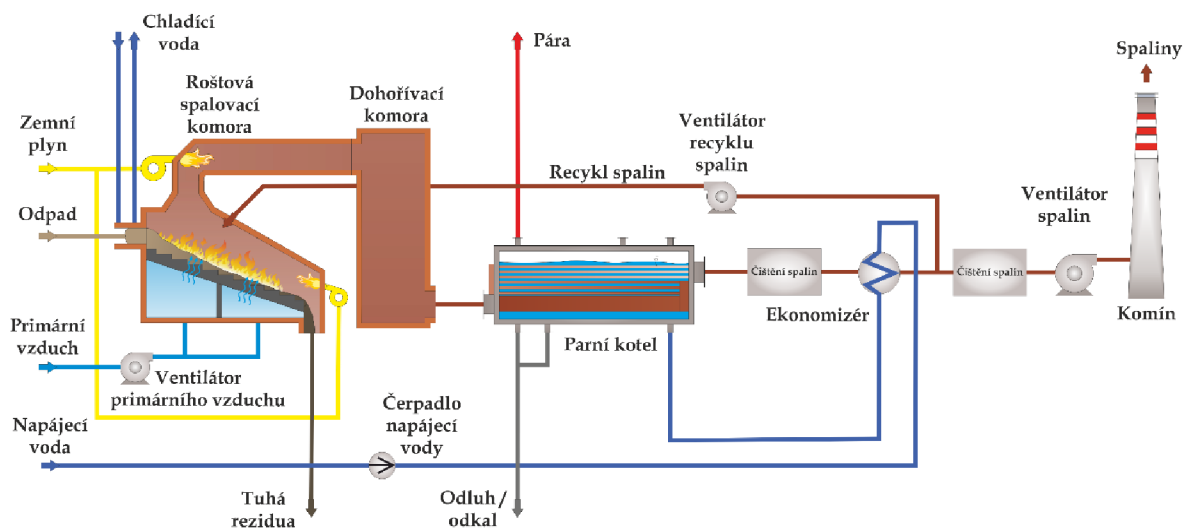
Tab. 5.3 Tok odpadů v zařízení EVO [t]

<i>Den</i>	<b>Návoz A</b>	<b>Návoz B</b>	<b>Návoz C</b>	<b>Návoz D</b>	<b>Návoz E</b>	<b>Návoz celkem</b>	<b>EVO zprac.</b>	<b>Kumulace odpadu</b>
<i>Pá</i>	2345	1074		553		3 973	3 973	0
<i>So</i>	2345		619		734	3 699	3 699	0
<i>Ne</i>	2345	1074		553		3 973	0	3 973
<i>Po</i>	2345		619		734	3 699	4 800	2 871
<i>Út</i>	2345	1074		553		3 973	4 800	2 044
<i>St</i>	2345		619		734	3 699	4 800	942
<i>Čt</i>	2345	1074		553		3 973	4 800	115

Nominální kapacita jednotky EVO 200 kg/h je uvažována pro nejčastěji provozovaný režim 850 °C. Tento režim je na základě již provozovaných zařízení na zpracování zdravotnických odpadů využíván v naprosté většině případů. V případě potřeby provozu v režimu 1 100 °C je z důvodu dimenzování zařízení nejen termické části a části využití tepla, ale rovněž všech zařízení systému čištění spalin, uvažována kapacita 160 kg/h. Při shodné kapacitě jako v režimu 850 °C by docházelo k výrazně vyšší produkci spalin a všechna zařízení by byla po většinu času provozována s velkou kapacitní rezervou, což je ekonomicky nevýhodné. Kapacita 160 kg/h byla zvolena s ohledem na průměrnou denní produkci odpadu v modelovém regionu tak, aby zařízení kapacitně vyhovělo této produkci. Při tomto provozu tedy není možné zpracovávat externí odpad v rámci dohody o výměně odpadu, avšak s provozem v režimu 1 100 °C je předběžně uvažováno v řádu několika hodin či dní v měsíci. Obsah s vyšším obsahem chlóru je možné před zpracováním skladovat v mobilní chlazené buňce.

## 6 STROJNĚ-TECHNOLOGICKÝ POPIS MODERNÍ JEDNOTKY

Moderní jednotka EVO je komplexní technologie sestávající z několika technologických celků. Celý proces je do značné míry automatizován, čímž je zajištěno dosažení optimálních podmínek pro termické zpracování zdravotnických odpadů. Blokové schéma částí technologie, kterými se zabývá tato diplomová práce, je zobrazeno na obr. 13 a tato zařízení jsou popsána v podkapitolách 6.1 a 6.2. V kapitole 6.3 je stručně popsána navazující technologie čištění spalin, kterou se zabývá paralelně zpracovávaná diplomová práce „Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů“ [45]. Schéma celé jednotky EVO je předmětem Přílohy 1.



Obr. 13 Blokové schéma termické části a části využití tepla

### 6.1 Termický systém a dávkování odpadu

#### Dávkování odpadu

Jak je zmíněno v podkapitole 5.3, zdravotnický odpad je po návozu umístěn do kontejnerů o objemu 1 000 l. Tyto kontejnery jsou před zpracováním umístěny na zastřešené ploše, případně v uzavřeném skladu. Pro vyprazdňování kontejnerů je na vstupu do technologie jednotky EVO umístěno automatizované zařízení. Obsluha umístí kontejner na určené místo. Zde dojde ke zvážení kontejneru s odpadem, překlopení kontejneru do dávkovacího kanálu pomocí hydraulického systému a opětovnému zvážení prázdného kontejneru. Rozdíl hmotností je zaznamenáván do databáze jako hmotnost zpracovaného odpadu.

Dávkovací kanál je ocelová vodou chlazená konstrukce s vrchním uzávěrem a hydraulickým beranem. Objem dávkovacího kanálu je přibližně o 10 % vyšší než objem kontejnerů na odpad, aby bylo zajištěno bezproblémové uzavření kanálu po volném násypu obsahu kontejneru. Po uzavření kanálu je odpad kontinuálně posouván hydraulickým beranem do spalovací komory. Dávkovací kanál je chlazen vodou z důvodu odvodu přebytečného tepla sálajícího ze spalovací komory. Při absenci chlazení by mohlo dojít ke vznícení odpadu již v dávkovacím kanálu nebo k poškození zařízení z důvodu působení vysoké teploty. Chladič vody může být

využita na ohřev teplé vody nebo v některé z částí zařízení EVO. Dávkovací zařízení je poháněno hydraulicky a je vybaveno vlastní hydraulickou stanicí.

### Spalovací komora

Zařízením, ve kterém probíhá termický rozklad zdravotnického odpadu, je roštová spalovací komora s protisměrným tokem médií. Jedná se o plášť z uhlíkové oceli s vnitřní žáruvzdornou vyzdívkou a vnější izolací. Vyzdívkou jsou ve většině případů vícevrstvé z materiálů o různé teplotní odolnosti a tepelné vodivosti. Vnitřní vrstva je v přímém kontaktu s vnitřním prostorem spalovací komory a je tepelně namáhána zejména radiací od plamene. Tato část vyzdívkou je nejčastěji zhotovena ze šamotových cihel nebo žáruvzdorného betonu o tloušťce přibližně 100–150 mm s teplotní odolností až 1 500 °C. Další vrstvy jsou již namáhány kondukcí a jejich teplotní odolnost může být nižší. Například může být použita vrstva izolačních cihel s nižší teplotní odolností a kalcium silikátové desky s nízkou tepelnou vodivostí. Celková tloušťka vnitřních vyzdívek se pohybuje okolo 350–400 mm. Žáruvzdorné vyzdívkou vyžadují dodržení maximální rychlosti změny teploty. Tuto hodnotu je nutné dodržet při najíždění a odstavení technologie. Vnější strana pláště komory může být poté doplněna o tepelnou izolaci s přídatným plechovým opláštěním, tak aby bylo dosaženo maximální povrchové teploty nejvýše o 25 °C vyšší než teplota okolí, případně musejí být části nesplňující tuto podmínku chráněny proti kontaktu dle [52].

Uvnitř komory se nachází hydraulicky ovládaný pohyblivý přesuvný rošt, na kterém probíhá hoření a který zajišťuje pohyb odpadu. Přesuvný rošt je sestaven z řad pohyblivých a nepohyblivých ocelolitinových roštnic. Pohyblivé roštnice jsou připojeny na hydraulické válce (jeden válec na několik roštnic), které cyklicky vykonávají jednoosý pohyb a tím hýbou pohyblivými roštnicemi ve vodorovném směru. Pohybem těchto roštnic vpřed dochází k odlačování odpadu před nimi, pohybem vzad poté vzniká mezera, kterou vyplňuje odpad z výše položené roštnice. Za současného termického rozkladu odpadu dochází k posunu odpadu ke konci roštu spalovací komory. Na konci roštu se nachází již jen nespalitelné zbytky s případným nedopalem. Za roštem je prostor pro výpad nespalitelných zbytků pod spalovací komoru. Pevná rezidua padají do odpopelňovacího zařízení (suchý výpad) zajišťující tlakové oddělení a bezprašné odpopelnění. Tuhá rezidua jsou dále shromažďována v malém popelovém kontejneru umístěném pod úrovní spalovací komory. Z malých popelových kontejnerů je popel následně přesypáván do velkoobjemového kontejneru, který je v pravidelných intervalech odvážen na skládku odpadů. Pro hydraulický pohon pohyblivého roštu je spalovací komora vybavena vlastní hydraulickou stanicí.

Na protilehlé straně spalovací komory vzhledem ke vstupu odpadu je umístěn zapalovací hořák na zemní plyn. Jeho primární funkcí je zahřátí a dodržení bezpečné rychlosti změny teploty spalovací komory při najíždění a odstavení s ohledem na technické parametry žáruvzdorných vyzdívek a zapálení odpadu při začátku dávkování odpadu. Při kontinuálním provozu a při běžném složení odpadu není tento hořák v činnosti. V případě nízké výhřevnosti odpadu, případně při potřebě zvýšení teploty ve spalovací komoře, je tento hořák použit pro stabilizaci spalovacího procesu.

Do spalovací komory jsou přivedeny dva proudy spalovacího vzduchu. Primární spalovací vzduch je nasáván z okolní atmosféry a je vháněn ventilátorem pod rošt do dvou oddělených komor. Rozdílem tlaků pod a nad roštem dochází k prostupu primárního spalovacího vzduchu skrz pohyblivý rošt a vrstvu odpadu, kde vstupuje do procesu hoření. Sekundární vzduch je pro navrhovanou technologii nahrazen recyklem spalin, což má za důsledek zvýšení

účinnosti zařízení a snížení produkce emisí. Přibližně 20 % spalin je odebíráno ze spalinovodu před ekonomizérem. Tyto spaliny jsou přiváděny po obvodu spalovací komory do prostoru nad rošt.

Spaliny vznikající při termickém rozkladu odpadu proudí proti směru pohybu roštu a odcházejí horní částí spalovací komory skrze propojovací potrubí do dohořivací komory. Pevná rezidua obsahující nespalitelné minerální látky, sklo, kovy a malé procento zbytkových hořavin jsou klasifikována jako nebezpečný odpad a jsou odvážena na skládku nebezpečných odpadů. Vzhledem k předchozímu termickému zpracování však tyto zbytky zpravidla nevykazují nebezpečné vlastnosti. Je proto možné na základě žádosti a rozboru odpadu obdržet od pověřené osoby Osvědčení o vyloučení nebezpečných vlastností odpadů [14]. S pevnými rezidui je po získání tohoto osvědčení možné nakládat jako s odpady kategorie „O“, což přináší finanční úsporu. Získání tohoto osvědčení je však doprovázeno finančními poplatky a je třeba vytvoření finanční analýzy pro konkrétní zařízení, zda je tento krok rentabilní.

### **Dohořivací komora**

Dohořivací komora zajišťuje konečnou termickou úpravu spalin, dopálení hořlavých složek ve spalinách, a tedy splnění legislativních požadavků na ošetření spalin požadovanou teplotou po dobu alespoň 2 s. Minimální požadovaná teplota se liší v závislosti na složení odpadu, respektive obsahu chlóru (Cl) v odpadu. Je-li obsah Cl vyšší než 1 %, je minimální teplota stanovena na 1 100 °C, v opačném případě je minimálně 850 °C. Dohořivací komora je válcový ocelový plášť s žáruvzdornou vyzdívkou uvnitř a izolací s přídatným plechovým opláštěním z vnější strany. Skladba vyzdívek je podobná vyzdívkám spalovací komory.

Dohořivací komora je umístěna pokud možno co nejbližší spalovací komoře pro eliminaci tepelných ztrát v žárovém potrubí. Před vstupem do dohořivací komory je umístěn podpurný hořák na zemní plyn. Ten zajišťuje dosažení požadované teploty spalování. Ohřáté spaliny vstupují tangenciálně do vrchní části vertikálně orientované válcové dohořivací komory a krouživým pohybem proudí k výstupu na spodní straně. Objem dohořivací komory je navržen na základě bilančních výpočtů pro dodržení zádržné doby spalin nejméně 2 s i při nejvyšší provozní hodnotě produkce spalin.

## **6.2 Systém využití energie**

### **Parní kotel**

Spalinový parní kotel je hlavním komponentem systému využití tepelné energie spalin. Pro uvažované zařízení EVO je vzhledem ke kapacitě a tepelným výkonům zvolen jednotlakový žárotrubný třítahový kotel v horizontálním uspořádání vyrábějící sytou páru o jmenovitém tlaku 13 bar<sub>g</sub>, tedy teplotě 195 °C. Jedná se o trubkový výměník tepla spaliny-voda se změnou fáze média v mezitrubkovém prostoru. Spaliny z dohořivací komory proudí do vstupní komory kotle s žáruvzdornou vyzdívkou na čele parního kotle a dále do ocelového plamence na spodní části kotle, který reprezentuje první tah kotle. Spaliny zde předají část tepla do vody okolo plamence. Následně vstupují do uzavřené a z vnějšku zavodněné obratové komory, kde jsou přivedeny do prvního trubkového svazku (druhý tah). Voda okolo obratové komory zajišťuje její chlazení a není tedy nutné, aby byla opatřena žáruvzdornou vyzdívkou. V prvním trubkovém svazku již spaliny předávají značné množství tepla okolní vodě. Následně jsou v druhé obratové komoře na čele parního kotle přivedeny do druhého trubkového svazku



(třetího tahu), kde dochází k dalšímu předání tepla okolní vodě. Ochlazené spaliny jsou poté odváděny do spalinovodu a proudí dále do první části čištění spalin. Vzhledem k této technologii je vhodná teplota spalin na vyústění z parního kotle přibližně 240 °C.

Druhá obratová komora na čele parního kotle není chlazená. Důvodem je kromě nižší teploty spalin v tomto místě možnost mechanického čištění teplosměnných ploch uvnitř trubek. Proud spalin obsahuje prachové částice a při provozu dochází k zanášení těchto ploch a snižování prostupu tepla. Proto je tato komora konstruována jako otevíratelná. Dle zkušeností z podobných aplikací se předpokládá interval čištění teplosměnných ploch parního kotle 1x týdně, avšak závisí i na konkrétních provozních podmínkách. Tomu jsou uzpůsobeny intervaly pravidelných odstávek zařízení EVO, jak je uvedeno v podkapitole 5.5.

Napájecí voda je do mezitrubkového prostoru kotle přiváděna napájecími čerpadly z ekonomizéru, kde je předeřhřata spalinami na teplotu nižší než saturační. Vstup vody do parního kotle probíhá skrze vstřikovací jehlu umístěnou pod horní hladinou vody v parním kotli. Uvnitř kotle dochází k ohřevu vody na saturační teplotu a přirozené konvekci. Dalším přenosem tepla dochází k odpařování vody na teplosměnných plochách trubkových svazků a proudění páry do vrchní části kotle. Z kotle je pára odváděna dále do parních rozvodů a je následně využita v areálu nemocnice A. Parní kotel je vybaven potřebnou výstrojí, jako jsou pojistné a vypouštěcí ventily, systém odluhu a odkalu nebo napájecí čerpadla.

Při návrhu parního kotle je nutné uvažovat vliv vysokoteplotní koroze teplosměnných ploch způsobené obsahem sloučenin chlóru v proudu horkých spalin procházejících parním kotlem. Při provozu zařízení dochází k usazování těchto sloučenin na povrchu teplosměnných ploch a k chemickým reakcím se železem za vzniku chloridu železnatého ( $\text{FeCl}_2$ ) a chloridu železitého ( $\text{FeCl}_3$ ) [53]. Následným působením vysokých teplot spalin dochází ke zplyňování chloridů železa a jejich rozkladu při reakci s kyslíkem a oxidy síry. Z důvodu omezení projevů vysokoteplotní koroze je v zařízeních na energetické využití nejen nebezpečných odpadů nutné provozovat parní kotle s nižšími teplotami produkované páry, například ve srovnání s elektrárnami a teplárnami spalující fosilní paliva.

### **Ekonomizér**

Ekonomizér je trubkový výměník tepla spaliny-voda využitý pro předeřhřev napájecí vody parního kotle. Pro uvažované zařízení EVO je zvolen vodotrubný výměník tepla ve vertikálním uspořádání s křížovým tokem médií a obdélníkovým průřezem. Spaliny z první části systému čištění spalin vstupují do horní části výměníku a jsou vedeny přes svazky trubek, kterým předávají teplo, do spodní části, odkud jsou odváděny do další části čištění spalin. Optimální teplota spalin na výstupu ekonomizéru je vzhledem k dalším procesům přibližně 140 °C. Termicky odplyněná napájecí voda o teplotě 105 °C je přiváděna čerpadly do spodní části ekonomizéru a je trubkovými svazky vedena do horní části výměníku, přičemž trubky jsou orientovány horizontálně, čímž je zajištěn křížový tok médií.

Při návrhu ekonomizéru je nutné zohlednit zejména účinky nízkoteplotní koroze způsobené kondenzací kyselých složek na teplosměnných plochách trubkových svazků. Dle [54] je první kondenzující kyselou složkou spalin oxid sírový ( $\text{SO}_3$ ). Tato látka však není běžně v rámci zařízení EVO monitorována, jelikož technologie vykazuje řádově vyšší produkci oxidu siřičitého ( $\text{SO}_2$ ). Tento zdroj uvádí přibližné množství tvorby  $\text{SO}_3$  v zařízeních EVO

zpracovávající komunální odpady, kdy koncentrace  $\text{SO}_3$  činí 18 vppm. Při této koncentraci a obsahu vody ve spalinách 12,5 % je kondenzační teplota  $\text{SO}_3$  rovna 146 °C. V navrhovaném zařízení EVO je však ekonomizér umístěn za první sekci čištění spalin, kdy je koncentrace kyselých složek redukována dle požadovaných emisních limitů, tudíž kondenzační teplotu je možné uvažovat nižší. Ostatní kyselé složky zpravidla ve spalinách kondenzují při teplotách nižších než 100 °C, a tedy při použití napájecí vody o teplotě 105 °C je možné nízkoteplotní korozi způsobenou těmito složkami zanedbat. I přesto je vhodné zvolit pro trubky výměníku materiál se zvýšenou odolností proti této korozi.

### 6.3 Systém čištění spalin

Pro dané zařízení EVO byla v paralelně zpracovávané diplomové práci „Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů“ [45] navržena optimální sestava zařízení z hlediska splnění návrhu emisních limitů BREF/BAT [11] i z hlediska ekonomického.

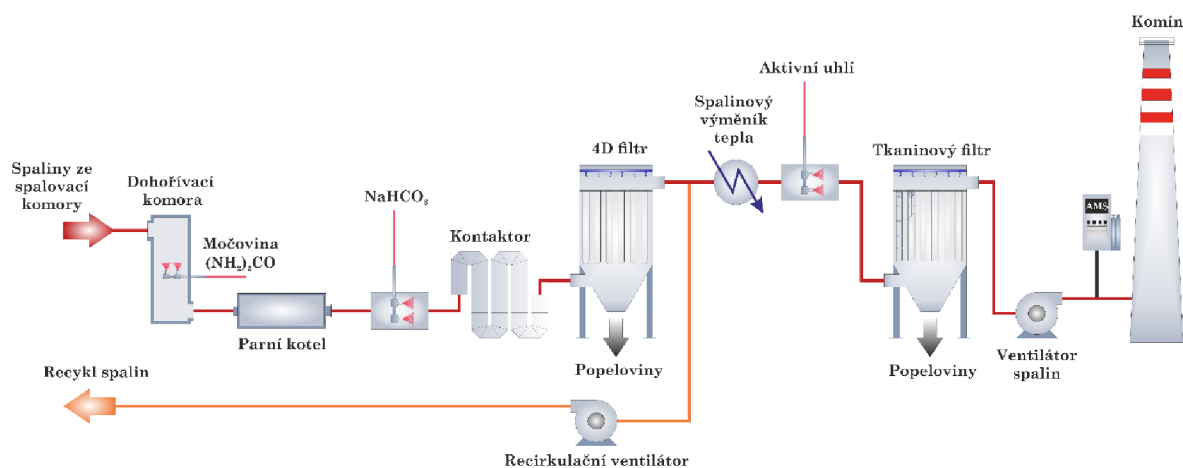
První část systému čištění spalin z hlediska toku spalin je umístěna již ve spalovací komoře. Zde je přiváděn 40% vodný roztok močoviny, který zajišťuje rozklad oxidů dusíku ( $\text{NO}_x$ ) na plynný dusík a kyslík metodou SNCR (Selektivní nekatalytická redukce). Vstřikování močoviny do spalovací komory je voleno na základě optimální teploty pro danou reakci v rozmezí 950 – 1 050 °C. Přibližně těchto teplot je přitom dosahováno v dohořivací komoře. Je tak zajištěna vysoká účinnost redukce  $\text{NO}_x$  i bez použití katalyzátoru.

Redukce kyselých složek je provedena dávkováním jemně namletého sorbentu hydrogenuhličitanu sodného ( $\text{NaHCO}_3$ ). Tento je dávkován do proudu spalin za parním kotlem a doba reakce je zajištěna potrubním kontaktem. Práškový sorbent zajišťuje neutralizaci kyselých složek ve spalinách za vzniku solí.

Spaliny po procesu redukce  $\text{NO}_x$  a kyselých složek dále vstupují do 4D filtru s keramickými filtračními elementy. Tento filtr zajišťuje separaci tuhých částic, kterými jsou částice zreagovaného sorbentu a popílku. Keramické elementy rovněž obsahují katalytickou vrstvu, na které probíhá rozklad dioxinů a furanů (PCDD/F) a zároveň částečné odsíření a katalytický rozklad  $\text{NO}_x$ .

Částečně vyčištěné spaliny procházejí ekonomizérem a po ochlazení je do jejich proudu dávkováno práškové aktivní uhlí. Na povrchu aktivního uhlí dochází k adsorpci těžkých kovů a zbylých dioxinů a furanů. Reakční doba pro adsorpci je opět zajištěna délkou spalinovodu. Práškové aktivní uhlí s adsorbovanými polutanty je následně ze spalin separováno na tkaninovém filtru a použité aktivní uhlí je možné dále recyklovat.

Pokrytí tlakových ztrát všech aparátů zajišťuje spalinový ventilátor umístěný za tkaninovým filtrem. Před vstupem do komínu spaliny procházejí systémem AMS (Automatic Monitoring System), kde je prováděno emisní měření. Schéma optimální varianty systému čištění spalin je zobrazena na obr. 14.



Obr. 14 Systém čištění spalin pro navrhované zařízení EVO [45]

## 6.4 Ostatní zařízení

Kromě hlavních technologických celků, uvedených a popsáných v podkapitolách 6.1, 6.2 a 6.3, je pro funkčnost zařízení EVO nutná instalace dalších zařízení a částí technologie.

### Potrubní rozvody

Pro přívod pomocných médií, přívod a odvod vody a páry a pro vedení spalin jsou v rámci zařízení EVO instalovány příslušné potrubní trasy. Zejména pak potrubí pro vedení spalin mezi jednotlivými aparáty (spalinovody) představují výraznou část celkových investičních nákladů, jelikož se jedná o potrubí velkých rozměrů, přičemž trasa mezi dohořivací komorou a parním kotlem je opatřena žáruvzdornou vyzdívku s podobnou skladbou jako v případě dohořivací komory.

### Nouzový komín

Nouzový komín je bezpečnostním prvem pro případ nestandardních provozních stavů, náhlých odstávek (např. vlivem výpadku el. energie) nebo závažné poruchy některé z částí technologie. Vyústění spalin do nouzového komínu je z vertikálně umístěné dohořivací komory. Před vstupem do nouzového komínu je vřazen chladič spalin – materiál s vysokou hodnotou přestupu tepla, který při průtoku spalin odebere jejich teplo, aby nebyly vypouštěny do okolí při teplotách blízkých se nebo přesahujících 1 000 °C. Otevírání vstupu do nouzového komínu je zajištěno pneumatickou klapkou na základě podnětu z řídicího systému.

### Měření, MaR a řídicí systém

Nedílnou součástí podobně komplexní technologie je část MaR a elektro. Tato část zajišťuje napájení všech součástí vyžadujících ke své funkci elektrickou energii, měření potřebných veličin a řízení procesu na základě těchto veličin. Veškerá data jsou poté shromažďována v řídicím systému s výstupem v podobě vizualizace na obrazovkách ve velínu. Pomocí této vizualizace dochází k monitorování procesu operátory zařízení EVO a k případným zásahům.

### **Další zařízení**

Výčet všech zařízení je pro parametry této práce rozsáhlý, proto je v následujících bodech zmíněno několik zařízení, které nemají přímý podíl na termickém zpracování odpadů, ale jejich přítomnost v zařízení EVO je pro její bezproblémový provoz nutná.

- Kontejnery na odpad – již zmíněny v kap. 5.3, ideálně splňující podmínky ADR pro převoz zdravotnických odpadů v případě změny způsobu dopravy
- Sklad kontejnerů na odpad – zastřešená plocha pro umístění kontejnerů, rozměry navrženy dle návozu a možnosti manipulace s kontejnery. Součástí je i chladicí jednotka pro nouzové uskladnění odpadu při teplotě nižší než 8 °C po dobu max. jednoho měsíce
- Myčka kontejnerů – pro vyčištění a dezinfekci kontejnerů
- Silniční váha – pro evidenci návozu odpadů
- Chladič pro maření tepla v případě nemožnosti jeho využití

## 7 MATERIÁLOVÁ A ENERGETICKÁ BILANCE JEDNOTKY

Pro výpočet materiálové a energetické bilance zařízení EVO byl využit „in-house“ softwarový systém W2E zaměřený na modelování a simulaci technologických procesů, zejména pak využitím energie z fosilních i alternativních paliv.

### 7.1 Parametry, vstupní proudy

Před realizací bilančních výpočtů je nutné definovat vstupní data a určit předpoklady a další potřebné podmínky.

#### Složení odpadu a stanovení výhřevnosti

Hlavním vstupním parametrem je elementární složení zdravotnických odpadů. Vzhledem k různorodosti složení těchto odpadů je však stanovení složení velmi orientační, z čehož rovněž pramení fakt, že elementární složení zdravotnických odpadů nebylo v příslušných databázích nalezeno. Zvolené složení proto bylo korigováno vzhledem ke složení odpadů produkovaných v jednotlivých odděleních zdravotnických zařízení [23], kde je uveden nejvyšší celkový podíl plastů, dále byla použita data z online databáze elementárních složení materiálů Phyllis 2 [51] v kombinaci s publikací zaměřenou na energetické využití komunálních odpadů [55] a výhřevností zdravotnického odpadu v rozmezí 14–16 MJ/kg [4]. Zvolené elementární složení odpadu, které je vstupem do bilančních výpočtů, je uvedeno v tab. 7.1.

Tab. 7.1 Odhad elementárního složení zdravotnických odpadů v modelovém regionu

<i>Složka odpadu</i>	<b>Elementární prvek</b>	<b>Hmotnostní podíl elementárních prvků ve složce [%]</b>	<b>Celkový podíl složky [%]</b>
<i>Hořlavina</i>	Uhlík (C)	63,2	60
	Vodík (H)	6,8	
	Dusík (N)	3,0	
	Kyslík (O)	25,4	
	Síra (S)	0,3	
	Chlor (Cl)	1,3	
<i>Vlhkost</i>	---	100	34
<i>Popeloviny (Ash)</i>	---	100	6

Na základě elementárního složení odpadu je možné stanovit výpočtovou výhřevnost odpadu. V této diplomové práci je uvažován výpočet výhřevnosti dle Institute of Gas and Technology (IGT) [56], jenž je považován za vhodný pro stanovení výhřevnosti odpadů.

Spalné teplo [HHV] hořlaviny v odpadu se stanoví pomocí vztahu (7.1):

$$HHV_{hoř} = 341 C + 1322 H + 68,5 S - 120 (O - N) \quad (7.1)$$

$$HHV_{hoř} = 341 \cdot 63,2 + 1322 \cdot 6,8 + 68,5 \cdot 0,3 - 120 \cdot (25,4 - 3) = 27\,873 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

kde  $HHV_{hoř}$  je spalné teplo hořlaviny v odpadu [kJ/kg],  $C, H, S, O, N$  jsou procentuální hmotnostní podíly elementárních prvků v hořlavině [%].

Spalné teplo hořlavin obsažených v odpadu je rovno 27 873 kJ/kg. Následně je proveden výpočet spalného tepla dle vztahu (7.2) pro odpad při daném složení, tedy ponížení spalného tepla o hmotnostní podíl vody, popelovin a nevýhřevných složek odpadu.

$$HHV = HHV_{hoř} \cdot (1 - x_W - x_A) \quad (7.2)$$

$$HHV = 27\,873 \cdot (1 - 0,34 - 0,06) = 16\,724 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

kde  $HHV$  je spalné teplo odpadu [kJ/kg],  $x_W$  je obsah vody v odpadu [kg/kg],  $x_A$  je hmotnostní podíl popelovin v odpadu [kg/kg].

Spalné teplo odpadu je rovno 16 724 kJ/kg. Pro výpočet výhřevnosti je třeba stanovit celkové množství vody odcházející se spalinami. Obsah vody přítomné v palivu je navýšen reakcí vodíku obsaženého v palivu s kyslíkem. Vodík však prioritně tvoří chemickou vazbu s chlorem (Cl) a fluorem (F) za vzniku kyseliny chlorovodíkové (HCl), respektive kyseliny fluorovodíkové (HF), proto je nutné vypočítat korigovaný obsah vodíku v palivu dle vztahu (7.3) a následně celkové množství vody odcházející spalinami dle vztahu (7.4). Vzhledem k molekulárnímu složení odpadu se zanedbaným množstvím fluoru zahrnuje vztah pouze reakci vodíku a chloru.

$$\bar{x}_{H,hoř} = x_{H,hoř} - \left( x_{Cl,hoř} \cdot \frac{MW_H}{MW_{Cl}} \right) \quad (7.3)$$

$$\bar{x}_{H,hoř} = 0,068 - \left( 0,013 \cdot \frac{1,00794}{35,453} \right) = 0,0673 \approx 6,73 \%$$

kde  $x_{i,hoř}$  je hmotnostní zlomek i-té složky v hořlavině [-],  $\bar{x}_{H,hoř}$  je korigovaný hmotnostní zlomek vodíku v hořlavině [-],  $MW_i$  je molární hmotnost i-té složky [kg/kmol]

$$x_{W,celk} = x_W + \frac{MW_{H_2O}}{MW_{H_2}} \cdot \bar{x}_{H,hoř} \cdot (1 - x_W - x_A) \quad (7.4)$$

$$x_{W,celk} = 0,34 + \frac{18,01528}{2,01588} \cdot 0,0673 \cdot (1 - 0,34 - 0,06) = 0,7026 \approx 70,26 \%$$

kde  $x_{W,celk}$  je celkový hmotnostní zlomek vody odcházející se spalinami [-].

Nyní je možné vypočítat výhřevnost odpadu dle vztahu (7.5). Jak je uvedeno v tab. 7.2, předpokládaná teplota paliva na vstupu je 20 °C, proto je při výpočtu výhřevnosti uvažováno výparné teplo vody při této teplotě, tedy  $r_{H_2O,20^\circ C} = 2\,454\text{ kJ/kg}$ .

$$LHV = HHV - r_{H_2O,20^\circ C} \cdot x_{W,celk} \quad (7.5)$$

$$LHV = 16\,724 - 2\,454 \cdot 0,7026 = 14\,999,82 \approx 15\,000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \approx 15 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Výhřevnost zdravotnického odpadu o zadaném molekulárním složení dle vztahů IGT činí 15 MJ/kg. Tato hodnota je v souladu se vstupními parametry v softwaru W2E použitého pro tvorbu bilančního modelu jednotky.

### Složení spalovacího vzduchu

Dalším vstupem bilančních výpočtů je složení vzduchu. V případě uvažované jednotky, kde je sekundární spalovací vzduch plně nahrazen recyklem spalin, vstupuje vzduch o parametrech uvedených v tab. 7.2 do procesu jako primární spalovací vzduch, jako spalovací vzduch plynových hořáků a na všech místech technologie, kde je uvažováno s přisáváním vzduchu z okolí netěsnostmi, případně jako nosné médium sorbentů některých částí systémů čištění spalin.

Tab. 7.2 Parametry spalovacího vzduchu

<i>Parametr</i>	<b>Jednotka</b>	<b>Hodnota</b>
<i>Teplota</i>	°C	25
<i>Tlak</i>	kPa	101
<i>Relativní vlhkost</i>	%	40
<b>Složení</b>		
$N_2$	%obj.	77,10
$O_2$	%obj.	20,69
$CO_2$	%obj.	0,04
$Ar$	%obj.	0,92
$H_2O$	%obj.	1,25

Množství primárního spalovacího vzduchu ve spalovací komoře musí být zvoleno tak, aby byl zajištěn dostatek kyslíku pro dokonalé hoření a zamezení nadměrné produkce oxidu uhelnatého (CO), který vzniká při nedokonalém hoření. Zároveň je však nežádoucí, aby bylo přiváděno nadměrné množství spalovacího vzduchu z důvodu zvýšení produkce spalin a nutnosti dimenzování všech navazujících technologií pro zvýšený průtok spalin. Rovněž s vyšší produkcí spalin roste komínová ztráta a klesá celková účinnost zařízení EVO.

**Vstupní předpoklady**

Další vstupní předpoklady bilančních výpočtů byly zvoleny po konzultaci s odborníky ze společnosti EVECO Brno, s.r.o. na základě zkušeností se zařízeními pracujícími s podobnými kapacitami. Tyto předpoklady jsou uvedeny v tab. 7.3.

Tab. 7.3 Vstupní předpoklady bilančních výpočtů

<i>Parametr</i>	<i>Jednotka</i>	<b>Režim 850 °C</b>	<b>Režim 1 100 °C</b>
<i>Nominální kapacita zařízení (tok zdravotnických odpadů)</i>	kg/h	200	160
<i>Přebytek vzduchu ve spalovací komoře</i>	-	2,00	
<i>Přebytek vzduchu v plynovém hořáku</i>	-	1,10	
<i>Teplota odpadu na vstupu do spalovací komory</i>	°C	20	
<i>Teplota zemního plynu na vstupu do hořáku</i>	°C	20	
<i>Teplota tuhých reziduí na výstupu ze spalovací komory</i>	°C	200	
<i>Výpočtová teplota za dohořivací komorou</i>	°C	900	1 150
<i>Požadovaná teplota spalin za parním kotlem</i>	°C	240	
<i>Požadovaná teplota spalin za ekonomizérem</i>	°C	140	
<i>Množství recyklu spalin (vztaženo k množství spalin v místě odběru), režim 850 °C</i>	%	20	14
<i>Množství přísávaného vzduchu mezi dohořivací komorou a parním kotlem</i>	m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	80	
<i>Množství přísávaného vzduchu mezi parním kotlem a ekonomizérem</i>	m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	65	
<i>Tepelné ztráty spalovací komory</i>	kW	35	
<i>Tepelné ztráty mezi spalovací a dohořivací komorou</i>	kW	10	
<i>Tepelné ztráty dohořivací komory</i>	kW	35	40
<i>Tepelné ztráty mezi dohořivací komorou a parním kotlem</i>	kW	10	11,5
<i>Koeficient tepelných ztrát parního kotle</i>	%	3	
<i>Tepelné ztráty mezi parním kotlem a ekonomizérem</i>	kW	19	
<i>Teplota napájecí vody na vstupu do ekonomizéru</i>	°C	105	
<i>Teplota syté páry na výstupu z parního kotle</i>	°C	195	
<i>Tlak syté páry na výstupu z parního kotle</i>	bar <sub>g</sub>	13	
<i>Množství odluhu a odkalu parního kotle</i>	%	2,5	



## 7.2 Bilanční výpočty s využitím „in-house“ softwarového systému W2E

V této podkapitole jsou shrnuty výsledky bilančních modelů zařízení EVO vytvořených v softwaru W2E (Waste-to-Energy) na základě vstupních parametrů a předpokladů popsaných v předchozí podkapitole. Vzhledem ke dvěma provozním režimům (850 °C, 1 100 °C) byly vytvořeny dva bilanční modely pro oba tyto režimy. V tab. 7.4 jsou uvedeny vstupní a výstupní proudy zvažovaného zařízení EVO v rozsahu termické části a systému využití tepla a pro oba režimy. Bilanční schéma je poté předmětem přílohy 2 pro režim 850 °C a přílohy 3 pro režim 1 100 °C.

Tab. 7.4 Parametry vstupních a výstupních proudů materiálové a energetické bilance

Typ proudu	Proud	Parametr	Jednotka	Režim 850 °C	Režim 1 100 °C
Vstupní	Zdravotnický odpad	Hmotnostní tok	kg/h	200	160
		Výhřevnost	kJ/kg	15 000	
	Primární vzduch	Průtok	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h	1 600	1 280
		Teplota	°C	25	
	Zemní plyn	Průtok	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h	13	67,5
		Teplota	°C	20	
	Spalovací vzduch pro zemní plyn	Průtok	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h	138	718
		Teplota	°C	25	
	Napájecí voda	Průtok	kg/h	1 147	1689
		Teplota	°C	105	
Výstupní	Pára	Průtok	kg/h	1 118	1647
		Teplota	°C	195	
		Tlak	bar <sub>g</sub>	13	
	Spaliny (za parním kotlem)	Průtok	m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /h	2 500	2 650
		Teplota	°C	140	
	Tuhá rezidua	Hmotnostní tok	kg/h	12,3	9,9
		Teplota	°C	200	
	Odluh/odkal	Průtok	kg/h	29	42
		Teplota	°C	195	
	Teplo předané vodě	Tepelný tok	MJ/h	2 625	3 867

Z bilančních výpočtů vyplývá, že celkové exportované teplo v páře je v případě režimu 850 °C přibližně 2,63 GJ/h při spotřebě zemního plynu 13 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h, respektive 3,87 GJ při spotřebě 67,5 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h pro režim 1 100 °C.

Na základě výsledků bilančních výpočtů je možné dimenzovat jednotlivá zařízení, ať už termické části, systému využití energie nebo systému čištění spalin. Pro všechna tato zařízení platí, že musejí být dimenzována pro vyhovění i nejnáročnějšímu stavu z hlediska teplot, průtoků a podobných klíčových veličin. Tímto stavem je pro uvažované zařízení EVO režim 1 100 °C při hmotnostním toku zdravotnického odpadu 160 kg/h.

Tento fakt platí například i pro objem dohořivací komory. Pro zajištění zádržné doby spalin nejméně 2 s při všech režimech je tedy uvažován režim 1 100 °C. V tomto režimu je průtok spalin dohořivací komorou dle bilančních výpočtů přibližně 2 650 m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h při teplotě 1 150 °C. Pro určení objemu dohořivací komory ( $V_{DK}$ ) je z důvodu garance zádržné doby 2 s vhodné při výpočtu uvažovat návrhovou zádržnou dobu 2,5 s. Objem dohořivací komory je poté možné stanovit dle vztahu (7.6). V tomto vztahu je zanedbána diference tlaku spalin vůči tlaku za normálních podmínek.

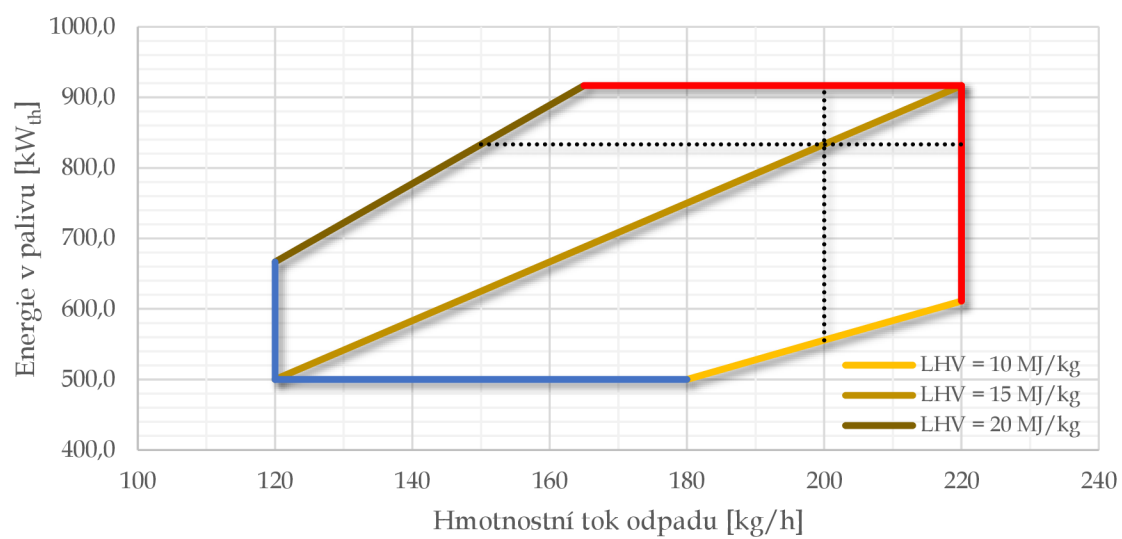
$$V_{DK} = ZD \cdot \frac{\dot{V}_{sp, norm}}{3\,600} \cdot \frac{T_{sp}}{T_{norm}} \quad (7.6)$$

$$V_{DK} = 2,5 \cdot \frac{2\,650}{3\,600} \cdot \frac{1\,150 + 273,15}{273,15} = 9,6 \text{ m}^3$$

kde  $ZD$  je zádržná doba spalin [s],  $\dot{V}_{sp, norm}$  je průtok spalin vztažený na normální podmínky [m<sub>N</sub><sup>3</sup>/h],  $T_{sp}$  je teplota spalin [K],  $T_{norm}$  je teplota za normálních podmínek [K].

V rámci bilančních výpočtů je z důvodu nejistoty výpočetní výhřevnosti odpadu vhodné vytvořit pro dané zařízení výkonový diagram roštu (obr. 15). Z tohoto diagramu jsou patrné limity roštové spalovací komory z hlediska zpracovávaného množství odpadu a množství energie v odpadu v závislosti na jeho výhřevnosti. Červená čára ohraničuje limit přetížení, tedy maximální hodnoty tepelného příkonu a zpracovávaného množství odpadu, při kterých může být zařízení provozováno. Maximální provozní přetížení je pro navrhované zařízení uvažováno na úrovni 10 % nominálního výkonu, což představuje obvyklou hodnotu u podobných zařízení. Modré čáry představují minimální hodnoty tepelného příkonu a zpracovávaného množství odpadu. V rámci uvedeného diagramu je tato hranice uvažována na úrovni 60 % z těchto charakteristických hodnot. Zařízení může být provozováno i s nižším výkonem, avšak při takovém stavu roste spotřeba podpůrného paliva pro udržení vhodné teploty ve spalovací a dohořivací komoře. Černé tečkované čáry představují nominální hodnoty výkonu, respektive množství zpracovávaného odpadu a jejich průsečík s výpočtovou výhřevností představuje nominální provoz, při kterém byly provedeny bilanční výpočty.

## Výkonový diagram roštu



Obr. 15 Výkonový diagram roštu spalovací komory

## 8 NAVRHOVANÉ ZPŮSOBY VYUŽITÍ PRODUKOVANÉ ENERGIE

Tato kapitola řeší možné způsoby využití energie produkované v zařízení EVO. Na základě požadavků od provozovatele je produkovaná tepelná energie využívána k výrobě syté páry o tlaku 13 bar<sub>g</sub>. Pro výpočty je uvažováno množství produkované energie v režimu 850 °C jakožto majoritním provozním režimem, přičemž množství vyrobené páry je při nominálním výkonu na základě bilančních výpočtů 1 118 kg/h při tlaku 13 bar<sub>g</sub>. Při proudění páry k místům spotřeby však dochází k tlakovým ztrátám a celkové redukci tlaku páry. Tato redukce byla odhadnuta na 1 bar.

### 8.1 Spotřeby tepelné energie v areálu provozovatele

Primárním upotřebením syté páry v areálu nemocnice A je pokrytí spotřeb sterilizace a prádelny. Při přebytku tepelné energie je možné ji rovněž využít pro ohřev teplé vody (TV) nebo pro vytápění. Spotřeby tepla v jednotlivých zařízeních byly zvoleny jako obvyklé a konzultovány s odborníky ze společnosti EVECO Brno, s.r.o. a korigovány z aktuálních hodnot v obdobném regionu. Zvolené hodnoty spotřeb tepla jsou uvedeny v tab. 8.1.

Tab. 8.1 Spotřeby tepla v areálu nemocnice A

Zařízení	Provoz během dne	Průměrná spotřeba tepla [GJ/h]
Prádelna	6-14 <sup>1</sup>	3,5
Sterilizace centrální	6-20	0,35
Sterilizace na sálech	24 h/den	0,05
Teplá voda	24 h/den	0,8
Celková spotřeba tepla na vytápění	Cca 40 000 GJ/rok	

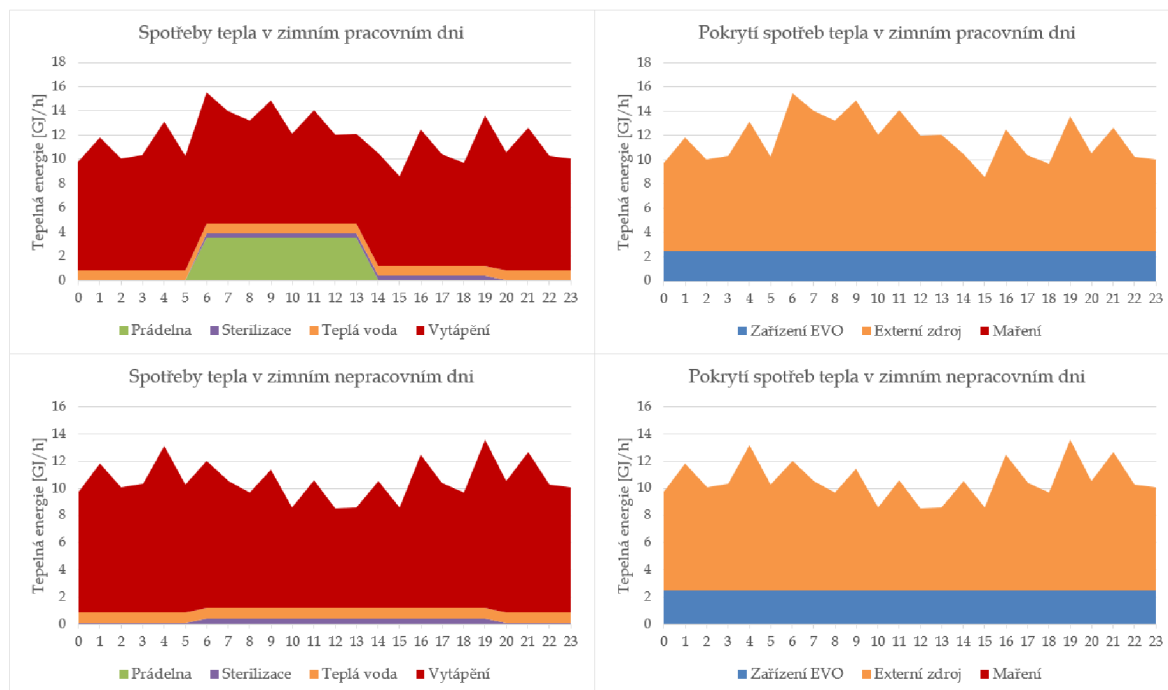
Ve výpočtech využití tepla v rámci areálu nemocnice A byl uvažován provoz v režimu 850 °C, jelikož v tomto režimu pracuje zařízení EVO nejčastěji. Dodávka tepla ve formě páry byla dále z důvodu ztrát ponížena o 5 %. Tato redukce zahrnuje tepelné ztráty a ztráty páry při odplynění napájecí vody. Celkové využitelné teplo ze zařízení EVO je tedy při nominálním provozu přibližně 2,5 GJ/h.

Pro určení spotřeb tepla v průběhu dne a pokrytí těchto spotřeb zařízením EVO byly vytvořeny 3 modelové případy – zimní den, přechodný den a letní den. Zimní den (1., 2., 3., 11. a 12. měsíc v roce) představuje situaci, kdy je teplo pro vytápění odebíráno 24 h/den. Přechodný den (5., 6., 9. a 10. měsíc v roce) reprezentuje stav, kdy je v určitou denní dobu odebíráno teplo pro vytápění, v některé hodiny však není vytápění v provozu. Při letním dni (6., 7. a 8. měsíc v roce) není odebíráno teplo pro vytápění. Při návrhu zařízení EVO pro reálný provoz je vhodné vytvoření modelu hodinových spotřeb a využití tepla na základě dat

<sup>1</sup> Prádelna je v provozu pouze ve všední dny

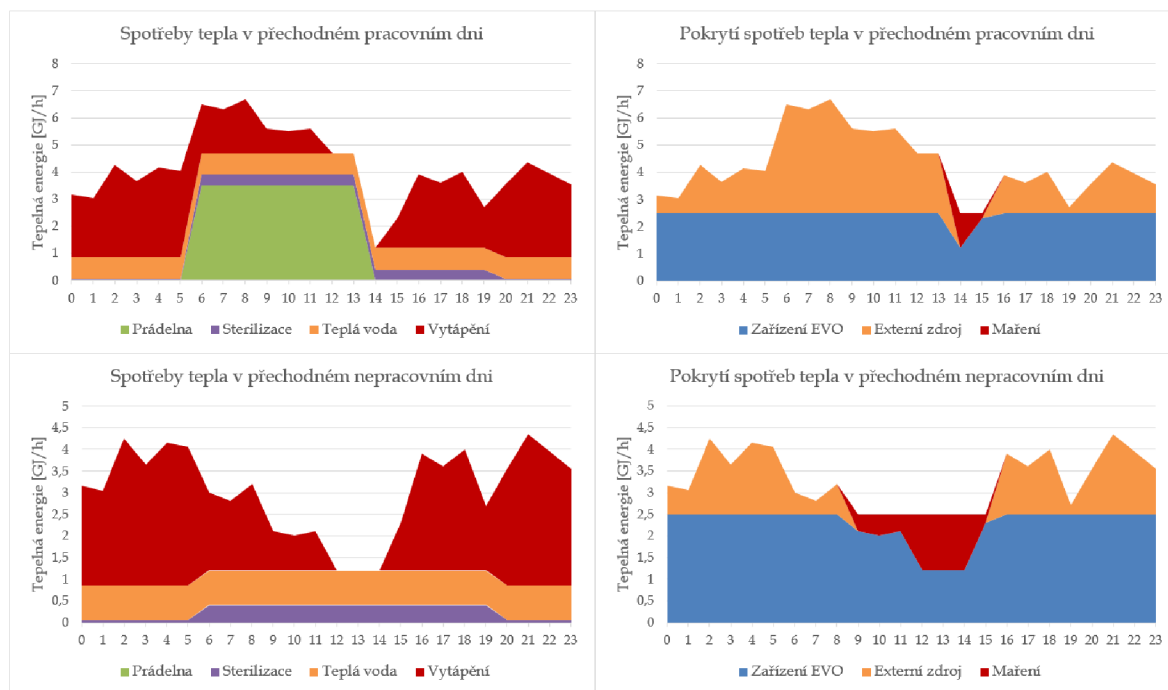
poskytnutých zákazníkem, pro účely této diplomové práce však bylo přijato toto zjednodušení.

Na základě zvolených hodnot byly pro dané modelové dny vytvořeny grafy spotřeb tepla a pokrytí těchto spotřeb v jednotlivých modelových dnech. Na obr. 16 je zobrazena situace v modelovém zimním dni. Rozdílem spotřeb v pracovním a nepracovním dni je provoz prádelny. Vytápění v tomto případě spotřebovává značné množství energie, celá produkce tepla zařízení EVO je tedy využita bez nutnosti maření tepla.



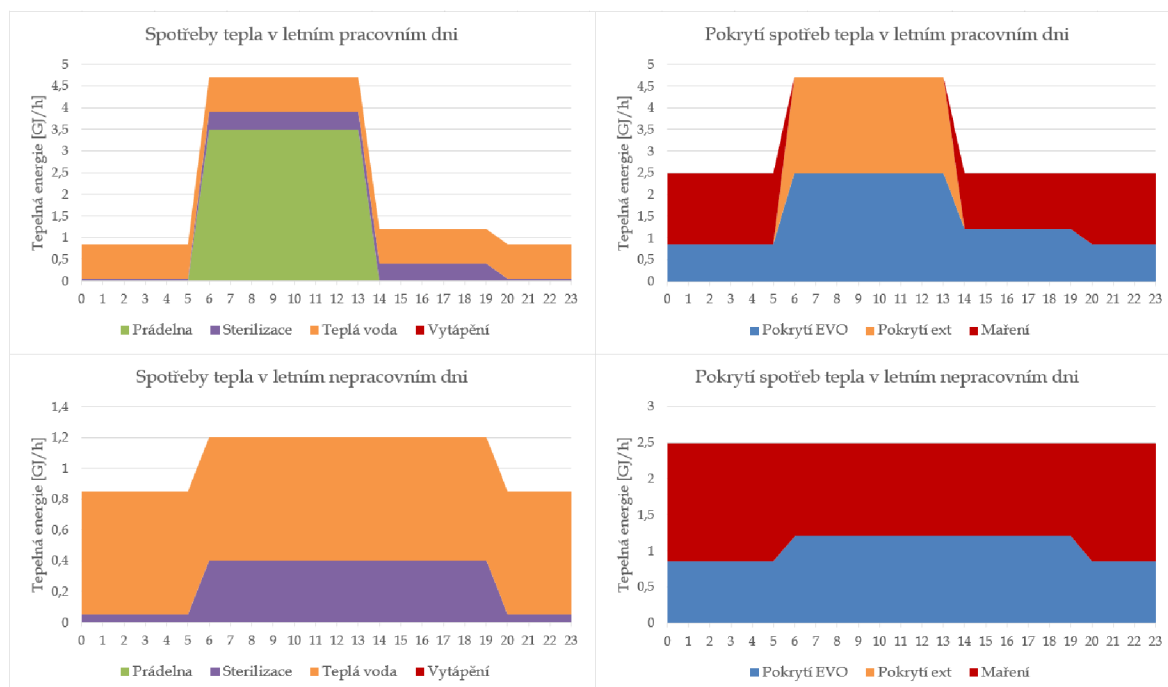
Obr. 16 Spotřeby a pokrytí spotřeb tepla v zimním dni

Na obr. 17 je zobrazena situace v přechodném dni. V tomto případě již není stabilní odběr tepla pro vytápění a v případě, že není teplo odebíráno pro vytápění ani pro prádelnu, je část produkovaného tepla přebytečná. Celkové přebytečné teplo v modelovém přechodném pracovním dni je přibližně 1,5 GJ/den, v případě nepracovního dne je množství přebytečného tepla 5,4 GJ/den.



Obr. 17 Spotřeby a pokrytí spotřeb tepla v přechodném dni

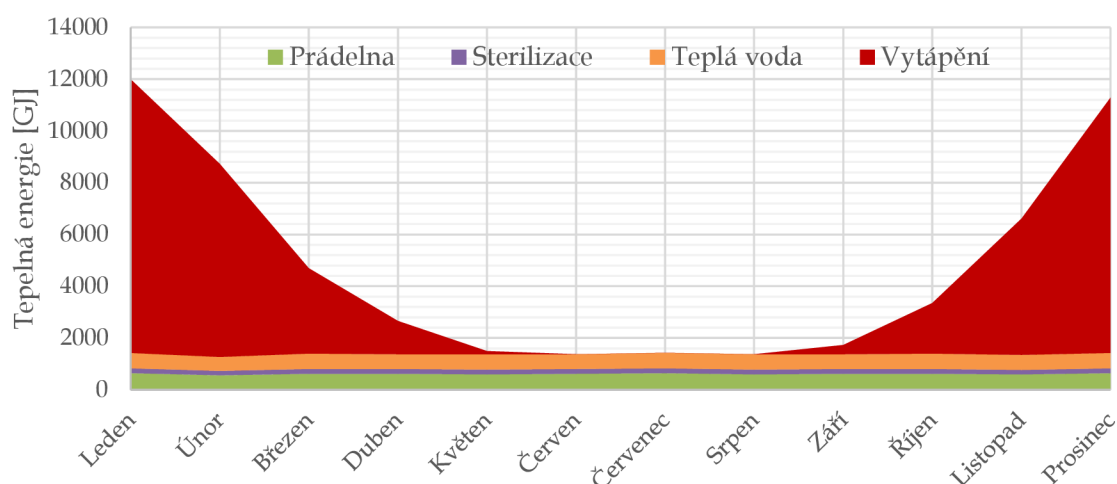
Obr. 18 znázorňuje situaci v letním dni. Zde již dochází k maření tepla z důvodu nulového odběru tepla pro vytápění. Vzhledem k nedostatečnému odběru tepla pro sterilizaci je veškeré produkované teplo využito pouze v době provozu prádelny. Celkové mařené teplo v modelovém letním pracovním dni je 24,2 GJ/den, v nepracovním dni je stabilně část tepla přebytečná a celkové přebytečné teplo je 34,6 GJ/den.



Obr. 18 Spotřeby a pokrytí spotřeb tepla v letním dni

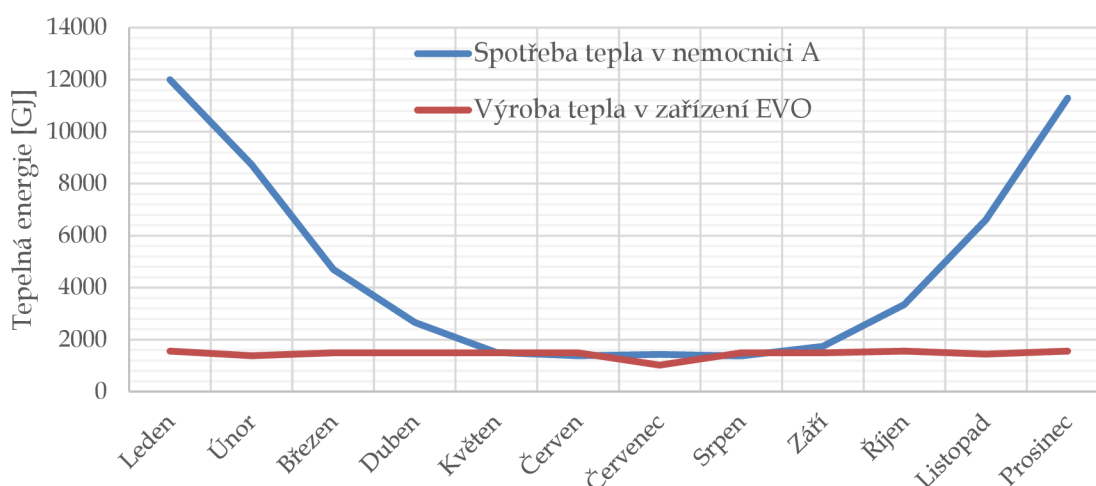
Pro navrhovanou jednotku EVO byly rovněž ze zvolených dat vytvořeny grafy měsíčních spotřeb tepla v jednotlivých zařízeních v rámci nemocnice A (obr. 19) a srovnání celkových měsíčních spotřeb tepla a produkce tepla v zařízení EVO (obr. 20).

## Spotřeby tepla v nemocnici A



Obr. 19 Graf měsíčních spotřeb tepla v nemocnici A

## Výroba tepla v zařízení EVO vs spotřeba v nemocnici A



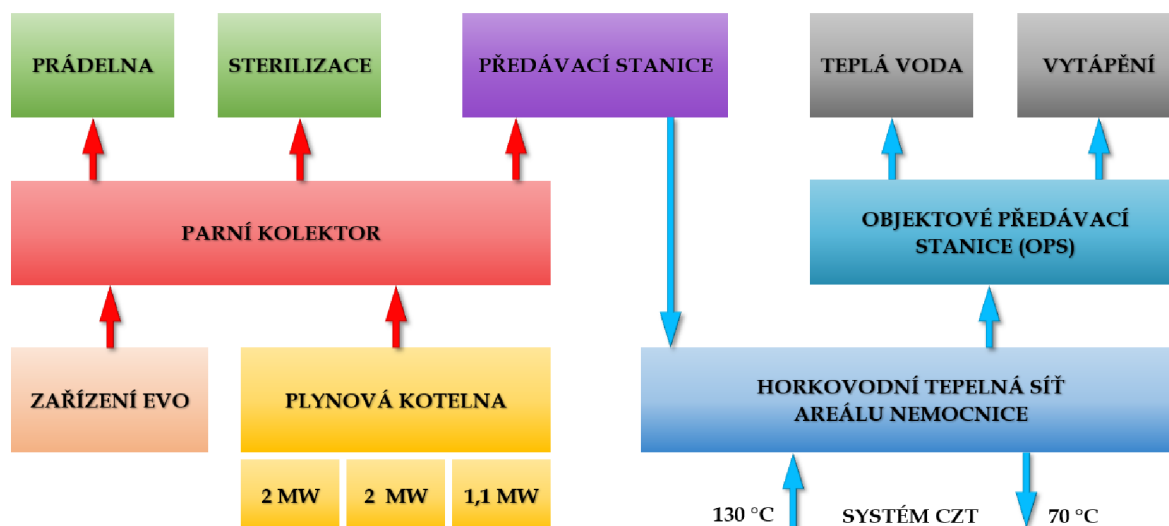
Obr. 20 Graf výroby a spotřeby tepla

Z vyhotovených grafů je patrný částečný přesah křivky množství vyrobeného tepla v zařízení EVO s křivkou spotřeb tepla v nemocnici A. Toto je hlavním důvodem přebytku vyrobeného tepla a jeho problematického využití. Při nízkém množství odebíraného tepla je toto teplo zpravidla mařeno, v určitých případech je však možné využít akumulace tepla. Této alternativě se blíže věnuje podkapitola 8.3. Celkové mařené teplo je na základě údajů z modelových dní 1 955 GJ/rok, což při celkové produkci využitelného tepla 17 476 GJ/rok činí přibližně 11 %.

## 8.2 Napojení na stávající systém zásobování teplem

Výstavba nového zařízení EVO je uvažována na místě stávající technologie, která je napojena na vybudovaný systém zásobování teplem v areálu nemocnice. Nově vybudované zařízení EVO je tedy navrženo na produkci syté páry o stejných parametrech jako u stávajícího zařízení a bude napojeno na stávající rozvody. Při vyšší poptávce energie je sytá pára produkována rovněž v paralelní kotelně se třemi samostatnými kotli na zemní plyn o výkonech 2x 2 MW

a 1,1 MW. Při přebytku vyrobené páry je tato pára odvedena do předávací stanice, kde dochází k ohřevu horké vody, která je odváděna do horkovodní tepelné sítě areálu. Odtud je horká voda vedena do objektových předávacích stanic (OPS) jednotlivých budov, kde je využita pro ohřev teplé vody a topné vody. Horkovodní tepelná síť areálu nemocnice je rovněž napojena na síť CZT, odkud je teplo odebíráno pro účel ohřevu teplé vody a vytápění. Schématické znázornění systému zásobování teplem nemocnice A je zobrazeno na obr. 21.



Obr. 21 Schéma napojení zařízení EVO na stávající systém zásobování teplem

### 8.3 Potenciální možnosti akumulace tepla

Dle vstupních parametrů bylo v rámci kapitoly 8.2 vypočteno odhadované množství tepla nevyužitelného v rámci areálu nemocnice A. Tato část nevyužitelného tepla představuje 1 955 GJ/rok, tedy přibližně 11 % produkce zařízení EVO. Pro posouzení vhodného řešení je nutné znát cenu tepla v daném regionu. Pro účely výpočtů pro modelový region byla tato cena odhadnuta na 400 Kč/GJ. Přebytečné teplo je možné ze zařízení EVO odebrat třemi způsoby.

Nejméně environmentálně vhodným řešením je maření tohoto tepla. K tomuto účelu musí být zařízení vybaveno mařičem tepla. Jedná se nejčastěji o vzduchový chladič umístěný vně budovy technologie zařízení EVO.

Další možností je dodávka přebytečného tepla do sítě CZT. Avšak přebytečné teplo je v zařízení EVO produkováno převážně v letních měsících s nízkou hodnotou odběru tepla z CZT, kdy nelze očekávat zisk z takto dodaného tepla. Pro provozovatele zařízení by však mohl být výhodný i stav, kdy by přebytečné teplo bylo dodáváno do sítě CZT bez zisku. Při takovém provozu by nebylo nutné investovat do mařiče tepla, čímž by mohlo dojít ke snížení investičních nákladů. Toto řešení však s sebou nese nutnost detailnější analýzy proveditelnosti.

Řešením, které umožňuje zvýšit podíl využití produkovaného tepla v rámci areálu nemocnice, je akumulace tepla. Z obr. 18 je patrné, že akumulované přebytečné teplo je následně možné využít pro provoz prádelny. Pro účely akumulace by proto bylo možné použití parního akumulátoru, ze kterého by byl možný odběr páry o tlaku stejném jako z parního kolektoru.



Množství mařeného tepla je v letních měsících až 34,6 GJ/den (letní nepracovní den), avšak nejvyšší denní spotřeba nad rámec produkce zařízení EVO je v případě letního pracovního dne 17,7 GJ/den pro provoz prádelny. Vhodná kapacita akumulátoru pro využití přebytečného tepla by tedy činila přibližně 18 GJ. Akumulované teplo by bylo využito pro provoz prádelny a v letních měsících by nebylo nutné uvádět do provozu plynové kotle pro výrobu páry. Tato kapacita by rovněž umožnila využít veškeré přebytečné teplo v přechodných dnech, které činí v modelovém přechodném nepracovním dni 5,4 GJ/den. Při této kapacitě by tedy bylo díky akumulaci potenciálně využitelné množství tepla rovno 1 386 GJ/rok.

Pro posouzení ekonomické výhodnosti akumulace je vhodné učinit jednoduchou rozvahu. Při situaci, kdy by bylo díky akumulaci využito teplo 1 386 GJ/rok, by úspora tepla při jednotkové ceně tepla 400 Kč/GJ byla 554 400 Kč/rok. V reálné aplikaci je však vhodné uvažovat s rezervou v množství využitého tepla díky akumulaci. Dle této základní rozvahy je při známé pořizovací hodnotě akumulátoru možné stanovit, zda je použití této technologie ekonomicky výhodné v horizontu životnosti technologie zařízení EVO.

Parní akumulátor pracuje na principu uchování energie v horké vodě o tlaku vyšším, než je tlak následně odebírané páry. Parní akumulátor je nejčastěji horizontální válcová tlaková nádoba zčásti naplněná vodou. Nabíjení probíhá injektáží přebytečné páry do horké vody o nižším tlaku, která se tímto dostává až na saturační teplotu za současné produkce syté páry, která tvoří parní polštář v horní části akumulátoru. Při odběru páry poté dochází k poklesu tlaku v akumulátoru, čímž dochází k intenzivnímu varu horké vody za produkce syté páry, která je při vybíjení odebírána.

Z principu fungování parní akumulace je patrné, že přebytečnou páru je nutné do akumulátoru dodávat při značně vyšším tlaku, než je tlak následně odebírané páry při vybíjení. Při uvažování požadavku na odběr páry při tlaku 12 bar<sub>g</sub> by tedy bylo nutné zvýšit provozní tlak parního kotle v zařízení EVO, což by mohlo způsobit zvýšení investičních i provozních nákladů. Navíc konstrukce parního akumulátoru o uvažované kapacitě 18 GJ by vykazovala značné zástavbové rozměry a vyžadovala by velké investiční náklady, tudíž by její provoz pravděpodobně nebyl rentabilní. Proto je další možností horkovodní akumulace. V tomto případě by při provozu nejnáročnějšího procesu na spotřebu páry (prádelny) byla veškerá produkovaná pára využita právě v tomto procesu. Při stavu, kdy je prádelna mimo provoz a zařízení EVO produkuje větší množství energie, než je využito na sterilizaci a ohřev teplé vody, je tato energie akumulována a využita pro ohřev teplé vody v době provozu prádelny, kdy je v tomto zařízení využita všechna produkovaná pára ze zařízení EVO.

Vzhledem k tomu, že akumulace a následné využití tepla v tomto uspořádání tvoří jednodenní cyklus, jsou pro určení potenciálně využitelného tepla uvažovány pouze pracovní dny, kdy je v provozu prádelna. Množství potenciálně využitelného tepla v letním pracovním dni je 6,4 GJ/den. V případě přechodného pracovního dne je možné akumulované teplo využít také pro vytápění, je tedy možné uvažovat potenciálně využitelné teplo v pracovních dnech (1,5 GJ/den) i v nepracovních dnech (5,4 GJ/den). Celkové množství potenciálně využitelného tepla je poté 650 GJ/rok. I v tomto případě je vhodné ekonomické posouzení na základě pořizovacích nákladů akumulátoru vhodné kapacity, přičemž roční úspora tepla na základě vstupních parametrů a ceně tepla 400 Kč/GJ je rovna 260 000 Kč/rok.

## 9 VYHODNOCENÍ NAVRHOVANÉHO ŘEŠENÍ

### 9.1 Charakteristika zvolené alternativy

Na základě vstupních parametrů bylo v předchozích kapitolách navrženo technologické řešení moderní jednotky pro energetické využití zdravotnických odpadů. Zařízení je navrženo na zpracování produkce zdravotnických odpadů v daném regionu a svými parametry splňuje všechny legislativní požadavky, zejména pak schopnost zpracovávat odpady do 3 dnů od jejich shromáždění, teplotu termického zpracování a zadržnou dobu. Zvolené řešení je rovněž v souladu s dokumenty nejlepších dostupných technik BREF/BAT. Zařízení je přitom navrženo na provoz ve dvou režimech. Pro danou jednotku je uvažováno s majoritním provozem v režimu 850 °C, který je využit pro odpady s obsahem chlóru nižším než 1 %. Pro tento režim je nominální kapacita zařízení 200 kg/h. Režim 1 100 °C je uvažován pro případ zpracování odpadu s obsahem chlóru vyšším než 1 % a provoz v tomto režimu je uvažován v řádu jednotek procent provozního fondu, přičemž kapacita zařízení je v tomto režimu upravena na 160 kg/h z důvodu zvýšené produkce spalin, respektive tepla.

Energie uvolněná při termickém zpracování zdravotnických odpadů je využívána pro výrobu syté páry, která je dále spotřebována v areálu největší nemocnice v modelovém regionu. Tím je částečně nahrazena produkce páry v kotelně na zemní plyn. Při uvažování využití této jednotky bez akumulace tepla je využitelné teplo produkované navrhovaným zařízením 15 521 GJ/rok. Při výrobě stejného množství tepla v plynové kotelně s účinností plynových kotlů 85 % by bylo spotřebováno 514 077 m<sup>3</sup> zemního plynu. Zařízení EVO přitom ke svému provozu využívá zemní plyn jako stabilizační palivo, avšak roční spotřeba činí 117 775 m<sup>3</sup>. Provozováním zařízení tedy dochází k potenciální úspoře 396 302 m<sup>3</sup> zemního plynu ročně.

Navrhované zařízení EVO je vybaveno moderním systémem čištění spalin. Tento systém byl navržen v paralelně zpracovávané diplomové práci „Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů“ [45] tak, aby byly splněny nejen současné legislativní požadavky, ale rovněž návrh budoucích emisních limitů na základě dokumentů BREF/BAT. V tab. 9.1 jsou uvedeny návrhové koncentrace znečišťujících látek ve spalinách pro systém čištění spalin a celkové roční emise navrženého zařízení.

Tab. 9.1 Emise a imise navrhovaného zařízení EVO

Znečišťující látka	Emisní koncentrace	Roční emise
TZL	2 mg/m <sup>3</sup>	35 kg
NO <sub>x</sub>	80 mg/m <sup>3</sup>	1 400 kg
SO <sub>x</sub>	25 mg/m <sup>3</sup>	438 kg
HCl	4 mg/m <sup>3</sup>	70 kg
HF	0,6 mg/m <sup>3</sup>	10,5 kg
PCCD/F	< 0,01 ng TEQ/m <sup>3</sup>	< 0,2 g TEQ

## 9.2 Ekonomické vyhodnocení

V této podkapitole je vypracováno přibližné ekonomické vyhodnocení navrhované jednotky EVO. Ekonomická rozvaha každého projektu vždy zahrnuje celou řadu odhadů a předpokladů vyplývajících ze zkušeností s realizací podobných zařízení. Některé z parametrů, jako například investiční náklady nebo některé z provozních nákladů byly odhadnuty po konzultaci s odborníky ze společnosti EVECO Brno, s.r.o. a všechny vstupní parametry, které nejsou výsledkem materiálové a energetické bilance, byly zvoleny jako obvyklé v době tvorby této práce.

Do ekonomických výpočtů přitom z bilančních výpočtů vstupují výsledné hodnoty pro režim 850 °C, který je majoritním provozním režimem zařízení EVO. Vzhledem k obtížně odhadnutelným ekonomickým parametrům potenciální akumulace tepla je v ekonomické rozvaze uvažován provoz jednotky bez této části technologie.

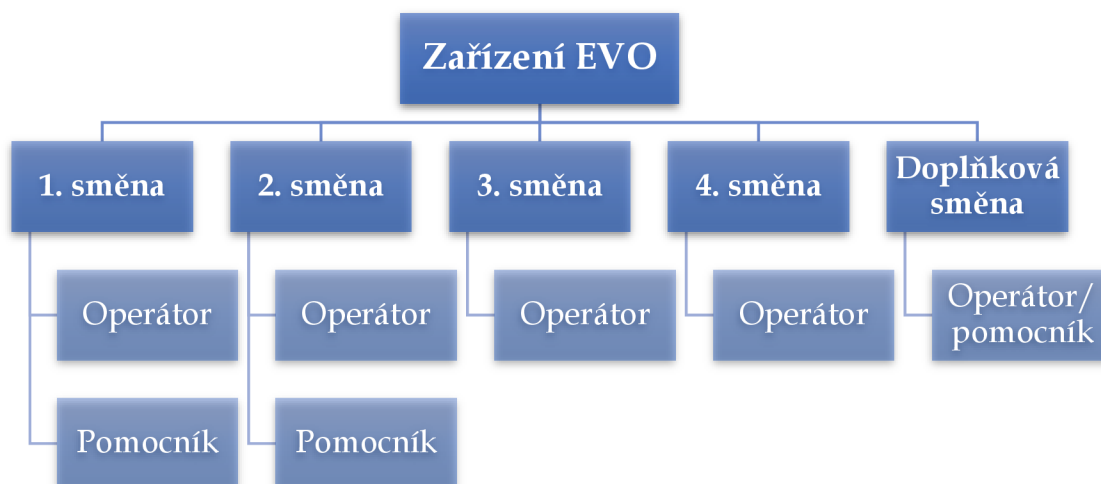
V tab. 9.2 je uveden přibližný odhad nákladů na výstavbu jednotky EVO o dané kapacitě. Tyto náklady byly zvoleny s ohledem na konzultaci odborných odhadů s odborníky ze společnosti EVECO Brno, s.r.o. a rovněž dle [28], přičemž v rámci ekonomické analýzy nebylo uvažováno s využitím investičních dotací.

Tab. 9.2 Odhad investičních nákladů zařízení EVO

<i>Investiční náklady</i>	<b>Kč</b>
<i>Technologie</i>	60 000 000 Kč
<i>Stavba</i>	20 000 000 Kč
<b><i>Celkem</i></b>	<b>80 000 000 Kč</b>

Při odhadu provozních nákladů byly hlavními vstupními parametry výsledky bilančních výpočtů (kap. 7.2) a bilanční výpočty dle diplomové práce zabývající se návrhem systému čištění spalin pro navrhované zařízení EVO [45]. Výrazný podíl provozních nákladů podobné technologie jsou osobní náklady zaměstnanců, je tedy vhodné stanovit počet operátorů pro navrhované zařízení. Obsluha podobných zařízení zpravidla vyžaduje přítomnost nejméně dvou operátorů na směně z důvodu zastupitelnosti a z bezpečnostních důvodů. Při dvousměnném nepřetržitém provozu, 20denní dovolené každého z operátorů a rezervě pro náhlou neschopnost některého z operátorů je pro pokrytí pracovního fondu zařízení EVO 7 000 h/rok třeba 5 směn. Přitom je vhodné uvažovat dva pomocné operátory pro ranní směny, kteří zajišťují manipulaci s odpadem od externích zpracovatelů, manipulaci s pomocnými médii, tuhými rezidui a další operace.

Vzhledem k umístění zařízení EVO v přímé blízkosti plynové kotelny je však uvažováno s propojeným velínem těchto dvou technologií. Je tedy možné pro ekonomické vyhodnocení uvažovat s pěti směny s jedním operátorem a dvěma pomocníky na ranních směnách. Diagram personálního obsazení zařízení EVO je zobrazen na obr. 22.



Obr. 22 Personální obsazení zařízení EVO

Seznam provozních nákladů navrhované technologie je uveden v tab. 9.3. Reinvestice a údržby technologie jsou přitom stanoveny vzhledem k obvyklé hodnotě 2 % investičních nákladů.

Tab. 9.3 Odhad provozních nákladů zařízení EVO

<i>Provozní náklady</i>	<b>Množstevní jednotka</b>	<b>Jednotkové náklady</b>	<b>Roční náklady</b>
<b><i>Materiál a energie</i></b>			
<i>Zemní plyn</i>	117 775 m <sub>N</sub> <sup>3</sup> /rok <sup>2</sup>	9 Kč/m <sub>N</sub> <sup>3</sup>	1 059 975 Kč
<i>Elektrina</i>	295 000 kWh/rok	2 Kč/kWh	590 000 Kč
<i>Aktivní uhlí</i>	1,96 t/rok	45 000 Kč/t	88 200 Kč
<i>Močovina</i>	35 t/rok	6 100 Kč/t	213 500 Kč
<i>NaHCO<sub>3</sub></i>	59,5 t/rok	14 200 Kč/t	844 900 Kč
<i>Uložení reziduí na skládce</i>	217,6 t/rok	8 000 Kč/t <sup>3</sup>	1 740 800 Kč
<i>Pitná voda</i>	400 m <sup>3</sup> /rok	70 Kč/m <sup>3</sup>	28 000 Kč
<i>Chemikálie pro úpravu napájecí vody</i>			30 000 Kč
<b><i>Reinvestice, údržba, servis</i></b>	2 % investic		1 600 000 Kč
<b><i>Osobní náklady</i></b>	7 operátorů	35 000 Kč/os/měs.	2 940 000 Kč
<b><i>Odpisy v prvním roce provozu<sup>4</sup></i></b>			4 666 667 Kč
<b><i>Celkem</i></b>			<b>13 802 042 Kč</b>

<sup>2</sup> Zahrnuje spotřebu plynu při nominálním provozu i odstávky a najíždění technologie

<sup>3</sup> Uvažováno uložení tuhých reziduí na skládku nebezpečných odpadů

<sup>4</sup> Odpisy technologie jsou stanoveny na 15 let, odpisy na stavbu jsou stanoveny na 30 let

Výnosy z provozu zařízení EVO jsou v zásadě dvojího charakteru. Nemocnice A jakožto provozovatel zařízení zpracovává produkovaný zdravotnický odpad ve vlastním zařízení, neplatí tedy poplatek za zpracování tohoto odpadu externímu zpracovateli. Ostatní nemocnice v modelovém regionu a další producenti odpadu odvádějí nemocnici A poplatky za zpracování jimi produkovaného odpadu. Proto je jako výnos uvažován poplatek za zpracování veškerého odpadu v zařízení EVO. Dalším výnosem je využití teplo produkované v tomto zařízení. Souhrn výnosů je uveden v tab. 9.4.

Tab. 9.4 Odhad výnosů provozem zařízení EVO

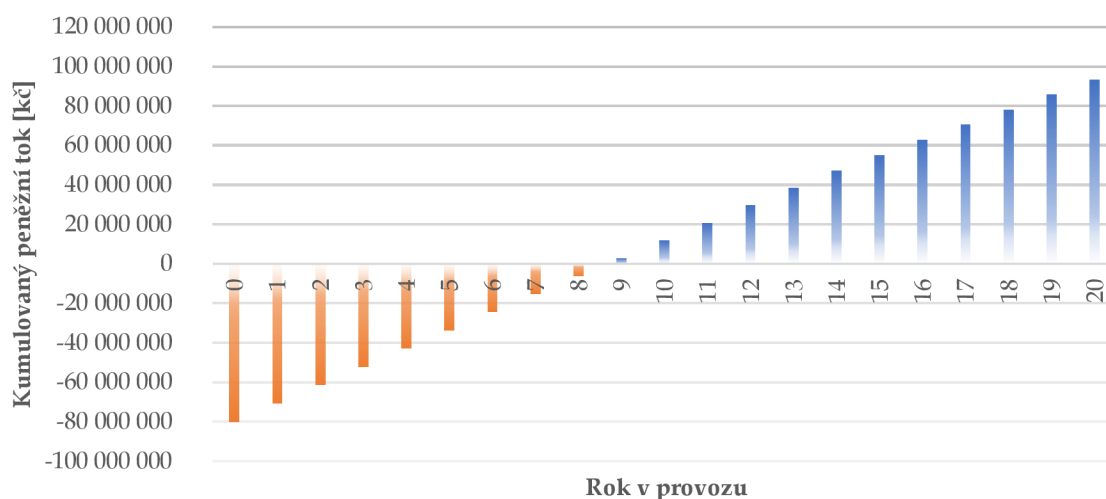
<i>Výnosy</i>	<b>Množstevní jednotka</b>	<b>Jednotkové příjmy</b>	<b>Roční příjmy</b>
<i>Zpracování odpadu</i> <sup>5</sup>	1 400 t/rok	10 000 Kč/t	14 000 000 Kč
	1 400 t/rok	9 000 Kč/t	12 600 000 Kč
	1 400 t/rok	8 000 Kč/t	11 200 000 Kč
<i>Teplo</i>	15 521 GJ/rok	400 Kč/GJ	6 208 400
<i>Celkem při ceně za zpracování odpadu 10 000 Kč/t</i>			<b>20 208 400 Kč</b>
<i>Celkem při ceně za zpracování odpadu 9 000 Kč/t</i>			<b>18 808 400 Kč</b>
<i>Celkem při ceně za zpracování odpadu 8 000 Kč/t</i>			<b>17 408 400 Kč</b>

V rámci ekonomické analýzy bylo při volbě jednotlivých parametrů uvažováno s konzervativnějším přístupem tak, aby byly výsledky v co nejvyšší míře reprezentativní a nedošlo k pozitivnímu zkreslení ekonomické výhodnosti. Z tohoto důvodu bylo uvažováno s inflací 0 %, jelikož při uvažování nenulové hodnoty inflace může dojít k umělému navýšení vnitřního výnosového procenta v případě ekonomicky výhodných projektů. Naopak je započten růst mzdových nákladů na operátory ve výši 2 % ročně. Návrhová životnost zařízení byla zvolena na 20 let.

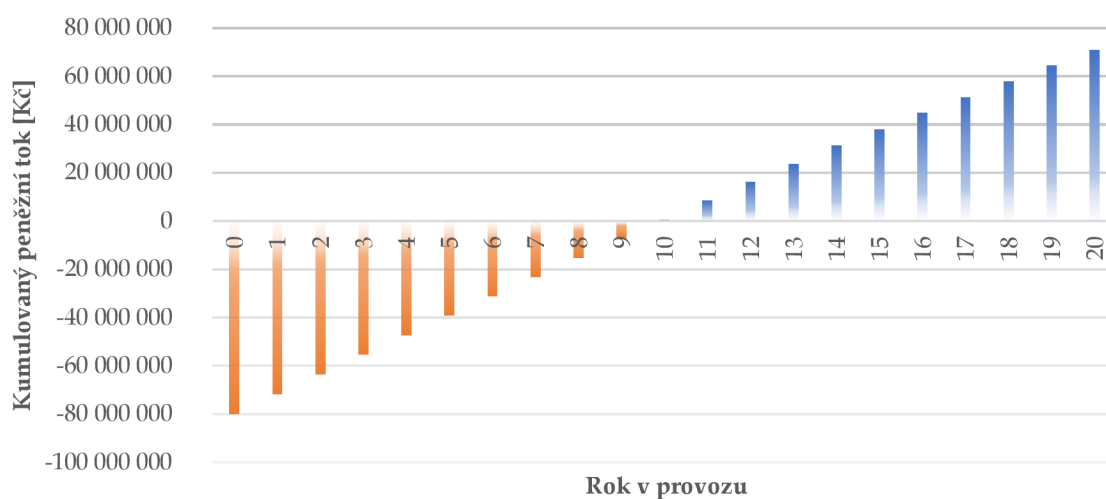
Důležitým parametrem a hlavní částí výnosů je poplatek za zpracování odpadu. Jedná se o hodnotu, která je do určité míry volbou provozovatele zařízení. Běžně se poplatek za zpracování zdravotnických odpadů pohybuje okolo 10 000 Kč/t, avšak v některých zařízeních může tento poplatek dosahovat vyšších částek. Pro ekonomickou analýzu daného zařízení tedy byly zvoleny 3 případy, s poplatkem na úrovni 10 000 Kč/t, 9 000 Kč/t a 8 000 Kč/t.

Dle zadaných parametrů je prostá časová návratnost projektu při poplatku 10 000 Kč/t na úrovni 9 let při vnitřním výnosovém procentu 9,3 %, pro případ poplatku 9 000 Kč/t je prostá časová návratnost 10 let při vnitřním výnosovém procentu 7,4 % a při snížení poplatku na 8 000 Kč/t je prostá časová návratnost 12 let při vnitřním výnosovém procentu 5,3 %. Na obr. 23, obr. 24 a obr. 25 je zobrazen kumulovaný peněžní tok po dobu životnosti zařízení pro zvolené případy.

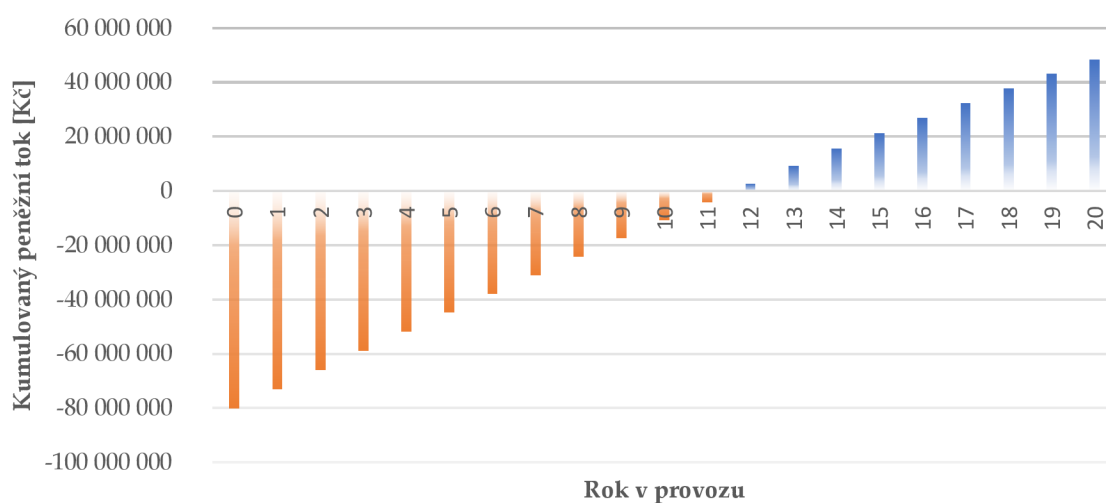
<sup>5</sup> Ekonomická analýza je zpracována pro tři varianty lišící se poplatkem za zpracování odpadu



Obr. 23 Kumulovaný peněžní tok projektu (CCF) při poplatku za zpracování odpadu 10 000 Kč/t



Obr. 24 Kumulovaný peněžní tok projektu (CCF) při poplatku za zpracování odpadu 9 000 Kč/t



Obr. 25 Kumulovaný peněžní tok projektu (CCF) při poplatku za zpracování odpadu 8 000 Kč/t

Do ekonomické analýzy v rámci této diplomové práce nevstupují náklady na přepravu odpadu. Problematice svozu odpadu je věnována podkapitola 5.3, ve které je navržen vhodný svozový systém, avšak volba finálního řešení je závislá na dostupných prostředcích jednotlivých nemocnic. Na základě volby mezi vlastním zajištěním svozu nemocnicemi B, C, D a E, komplexním svozem zajišťovaným nemocnicí A, případně svozem zajištěným externím subjektem je poté vhodné doplnit provozní a případně investiční náklady o náklady spojené s dopravou odpadu.

### 9.3 Účinnost zařízení

Účinnost zařízení EVO je možné subjektivně hodnotit dle množství zpracovávaného odpadu, množství produkované, případně využití energie, dle spotřeb stabilizačního paliva, spotřeb pomocných médií, případně dalších kritérií. Evropská legislativa, konkrétně Směrnice Evropského parlamentu a Rady 98/2008/ES o odpadech [7], definuje kritérium energetické účinnosti zařízení na energetické využití odpadů.

Toto kritérium se však vztahuje pouze na zařízení na zpracování komunálních odpadů, přičemž je rozhodujícím faktorem zařazení těchto zařízení do kategorie R 1 - energetické využití (při hodnotě energetické účinnosti alespoň 0,65), případně do kategorie D 10 - spalování na pevnině. Dané energetické účinnosti je zpravidla možné dosáhnout při vyšších zpracovatelských kapacitách, případně při kogeneraci v rámci systému využití tepla. Avšak pro ilustraci bylo dané kritérium vypočteno rovněž pro navrhované zařízení při daných vstupních parametrech, dle vztahu (2.1).

Při uvažování množství využití energie dle podkapitoly 8.1 bez zahrnutí akumulace, tedy 15 521 GJ/rok, je hodnota energetické účinnosti navrhovaného zařízení EVO  $\eta_e = 0,53$ . Pokud by bylo při výpočtu uvažováno využití veškerého produkovaného tepla 17 476 GJ/rok, například při dodávkách do sítě CZT při přebytku energie, byla by hodnota energetické účinnosti  $\eta_e = 0,62$ .

Vypočtené hodnoty energetické účinnosti poukazují na fakt, že splnění daného kritéria je možné uvažovat při vyšších zpracovatelských kapacitách a potenciálním využití energie kogenerací. Při zpracování nebezpečných odpadů je primárním účelem těchto zařízení zneškodnění nebezpečných vlastností odpadů a využití energie je v tomto případě sekundárním přínosem. Avšak zejména hodnota  $\eta_e = 0,62$  při uvažování využití veškerého produkovaného tepla poukazuje na vhodně zvolené technologické řešení zařízení EVO.

## ZÁVĚR A BUDOUCÍ PRÁCE

Tato diplomová práce se soustřeďuje na problematiku nakládání se zdravotnickými odpady se zaměřením na energetické využití jako preferovanou alternativu.

Úvodní část práce je věnována popisu vlastností zdravotnických odpadů a z nich pramenící požadavky na nakládání s těmito odpady. Česká legislativa přitom vychází z nařízení a dalších dokumentů platných na území Evropské unie, které popisují způsoby třídění, manipulace, zpracování a emisní limity zařízení na zpracování zdravotnických odpadů. Součástí legislativy jsou i dokumenty BREF/BAT, které určují preferované technologie a jejich parametry. V úvodní části práce je rovněž popsána současná situace nakládání se zdravotnickými odpady a porovnání se situací v Evropské Unii. Celková produkce zdravotnických odpadů v České republice při přepočtu na občana přibližně odpovídá produkci v Evropské Unii, avšak míra třídění nebezpečného a ostatního odpadu je v České republice na nižší úrovni, zejména při porovnání s nejnávýspějšími zeměmi v rámci Evropské Unie.

Navazující část práce shrnuje dostupné technologie termického rozkladu a dekontaminace zdravotnických odpadů na základě dokumentů BREF/BAT a metodických doporučení Státního zdravotního ústavu, spolu s jejich porovnáním z ekonomického i environmentálního hlediska. I přes skutečnost, že k termickému zpracování odpadů zaujímá podstatná část široké veřejnosti odmítavý postoj, je při přímém srovnání s metodami dekontaminace srovnatelná nebo výhodnější, zejména při srovnání s poměrně široce rozšířenou parní sterilizací. Naopak pozitivem je možnost využití energie uložené v odpadu a potenciální úspora fosilních paliv. Následně jsou v této části práce popsány možnosti využití energie při termickém zpracování, kdy volba optimální varianty závisí na kapacitě a umístění zařízení. V této části jsou rovněž stručně popsány technologie čištění spalin, avšak touto problematikou se zabývá paralelně zpracovávaná diplomová práce „Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů“ [45].

V hlavní části práce byly zvoleny parametry modelového regionu, který představuje situaci srovnatelnou s reálným stavem na úrovni krajů, přičemž modelový region zahrnuje 5 nemocnic. Na základě těchto parametrů a legislativních požadavků bylo pro zpracování produkovaných zdravotnických odpadů navrženo umístění zařízení EVO o nominální kapacitě 1 400 t/rok do největší z nemocnic. Následně byl vytvořen svozový model a určena skladba technologií navrhovaného zařízení. Vzhledem ke kapacitě a vlastnostem zdravotnických odpadů byla pro termické zpracování zvolena spalovací komora s pohyblivým roštem a dohořivací komorou. Využití produkované energie probíhá v parním kotli a ekonomizéru, přičemž odhadované množství produkované energie je 17 476 GJ/rok. V navazující části byl vytvořen model spotřeb tepla a pokrytí těchto spotřeb energií z odpadu a dle tohoto modelu je potenciálně využitelné teplo 15 521 GJ/rok, což tvoří přibližně 89 % produkované energie ve formě páry. Tento podíl je dále možné zvýšit akumulací tepla, jejíž možnosti jsou v rámci části věnující se využití energie rovněž popsány.

V závěru práce byl popsán environmentální dopad technologie v podobě celkových ročních emisí a na základě bilančních výpočtů v této práci spolu s [45] a na základě odhadů investičních a některých provozních nákladů byla vytvořena základní ekonomická analýza se



třemi variantami lišícími se cenou za zpracování odpadu. Při volbě této ceny 10 000 Kč/t je prostá časová návratnost navrhovaného zařízení 9 let při vnitřním výnosovém procentu 9,3 %, při snížení poplatku na 9 000 Kč/t je prostá časová návratnost navrhovaného zařízení 10 let při vnitřním výnosovém procentu 7,4 % a další redukcí poplatku na 8 000 Kč/rok dojde ke zvýšení prosté časové návratnosti na 12 let při vnitřním výnosovém procentu 5,3 %. Odhadovaná životnost zařízení je přitom 20 let. V této analýze však nejsou zahrnuty náklady na svoz odpadu, které jsou závislé na volbě typu přepravy a analýzu těchto nákladů by bylo vhodné provést v budoucí práci.

V rámci této práce bylo vzhledem ke komplexnosti dané problematiky přistoupeno k řadě odhadů a omezení. Pro vytvoření maximálně reprezentativního modelu by bylo v budoucí práci vhodné tyto odhady nahradit reálnými daty z již provozovaných zařízení, případně přesnějšími odhady na základě analýz dostupných dat. Jedná se například o rozptyl množství produkovaných odpadů v nemocničních zařízeních během týdne, který zásadním způsobem vstupuje do problematiky maximální doby pro konečné odstranění odpadů a ovlivňuje požadovanou nominální kapacitu zařízení EVO. Určité zjednodušení bylo v rámci této práce uvažováno v případě spotřeb tepla v areálu provozovatele zařízení EVO, kdy byly vytvořeny 3 modelové dny, které reprezentují všechny situace během roku. Podrobnější analýzu by bylo rovněž vhodné vytvořit pro svozové modely a náklady na svoz odpadů. Pro přínos celkového systémového přístupu k nakládání se zdravotnickými odpady by bylo možné využít softwarového prostředí NERUDA, který umožňuje analýzu toku odpadů v rámci makroregionu a dle kterého by bylo možné vhodně rozmístit zařízení EVO v rámci České republiky.

Výstavba zařízení na energetické využití zdravotnických odpadů je díky ekonomickému i ekologickému přínosu vhodná nejen na území České republiky, ale i v ostatních zemích. Produkci zdravotnických odpadů totiž lze omezit pouze do určité míry a energetické využití, zejména při vhodném umístění zařízení a možnosti upotřebení energie, znamená nezanedbatelný přínos z pohledu efektivního zneškodnění nebezpečných vlastností zdravotnických odpadů a potenciální úsporu fosilních paliv.

---

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Metodika pro nakládání s odpady ze zdravotnických, veterinárních a jim podobných zařízení. *Státní zdravotní ústav* [online]. Praha: Státní zdravotní ústav, 2016 [cit. 2019-01-04] Dostupné z: [http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/puda/legislativa\\_odpady/metodika.pdf](http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/puda/legislativa_odpady/metodika.pdf)
- [2] Health-care waste. *World Health Organization* [online]. Geneva: WHO, 2019 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>
- [3] Nařízení Komise č. 1357/2014 ze dne 18. prosince 2014: Nařízení, kterým se nahrazuje příloha III směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech a o zrušení některých směrnic. In: . OJ L 365: Úřední věstník, b.r., 19.12.2014. Dostupné také z: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2014.365.01.0089.01.CES](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2014.365.01.0089.01.CES)
- [4] PRÜSS, A., E. GIROULT a P. RUSHBROOK. Safe management of wastes from health-care activities: Definition and characterization of health-care waste. *World Health Organization* [online]. Geneva: WHO, 2019, s. 2-19 [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/42175/1/9241545259.pdf>
- [5] ČESKÁ REPUBLIKA. Zákon č. 263/2016 Sb.: Zákon atomový zákon. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 14.06.2016. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-263>
- [6] Směrnice Rady 1999/31/ES ze dne 26. dubna 1999 o skládkách odpadů. In: . Úřední věstník: OJ L 182, b.r., 16. 7. 1999. ISSN 0378-6978. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/dir/1999/31/oj>
- [7] Směrnice Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic. In: . Úřední věstník: OJ L 312, b.r., 22.11.2008, 3-30. ISSN 1725-5074. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>
- [8] *Guidelines on the interpretation of the R1: energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of municipal solid waste according to annex II of directive 2008/98/EC on waste.* In: . Úřední věstník: OJ L 312, b.r., 22.11.2008. Dostupné také z: <http://ec.europa.eu/environment/waste/framework/pdf/guidance.pdf>
- [9] STEHLÍK, Petr. *Up-to-date waste-to-energy approach: from idea to industrial application.* Switzerland: Springer, 2016. Briefs in applied sciences and technology (Springer). ISBN 978-3-319-15466-4.
- [10] Směrnice Evropského parlamentu a Rady č. 2010/75/EU o průmyslových emisích (integrované prevenci a omezování znečištění). In: . Úřední věstník: OJ L 334, b.r., 17.12.2010, 17-119. ISSN 1725-2555. Dostupné také z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj>

- [11] *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration (Final Draft): Industrial Emissions Directive 2010/75/EU*. In: . Brusel: European Union, 2018, 12/2018. Dostupné také z: [http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI\\_BREF\\_FD\\_Black\\_Watermark.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/WI/WI_BREF_FD_Black_Watermark.pdf)
- [12] Referenční dokumenty o nejlepších dostupných technikách (BREF). *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha: MPO, 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/ippc/bref/--143226>
- [13] ČESKÁ REPUBLIKA. *Nářízení vlády č. 352/2014 Sb.: Nářízení vlády o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024*. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 22. 12. 2014. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-352>
- [14] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č. 185/2001 Sb.: Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů*. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 15. 05. 2001. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [15] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška č. 93/2016 Sb.: Vyhláška o Katalogu odpadů*. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 23. 03. 2016. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-93>
- [16] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška č. 306/2012 Sb.: Vyhláška o podmínkách předcházení vzniku a šíření infekčních onemocnění a o hygienických požadavcích na provoz zdravotnických zařízení a ústavů sociální péče*. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 12. 09. 2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-306>
- [17] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška č. 383/2001 Sb.: Vyhláška Ministerstva životního prostředí o podrobnostech nakládání s odpady*. In: . Sbírka zákonů České republiky, 2001, 17.9.2001. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-383>
- [18] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č. 201/2012 Sb.: Zákon o ochraně ovzduší*. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 02. 05. 2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-201>
- [19] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č. 369/2016 Sb.: Zákon, kterým se mění zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší, ve znění pozdějších předpisů, a zákon č. 634/2004 Sb., o správních poplatcích, ve znění pozdějších předpisů*. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 19.10.2016. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-369>
- [20] ČESKÁ REPUBLIKA. *Vyhláška č. 415/2012 Sb.: Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší*. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 21. 11. 2012. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [21] ČESKÁ REPUBLIKA. *Zákon č. 100/2001 Sb.: Zákon o posuzování vlivů na životní prostředí a o změně některých souvisejících zákonů*. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 20. 02. 2001. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-100>

- [22] Veřejné informace o produkci a nakládání s odpady. *Informační Systém Odpadového Hospodářství* [online]. Liberec: INISOFT s.r.o., 2016 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: <https://isoh.mzp.cz/VISOH/>
- [23] Nakládání s odpady ze zdravotnických zařízení v České republice. In: *Státní zdravotní ústav* [online]. Praha: Státní zdravotní ústav, b.r. [cit. 2019-02-02].
- [24] Informace o spalovnách za rok 2017: Seznam zařízení pro tepelné zpracování odpadu. *Český Hydrometeorologický Ústav* [online]. Praha: ČHMÚ, 2018 [cit. 2019-02-02]. 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)
- [25] *Rozhodnutí o udělení integrovaného povolení: Spalovna nebezpečných odpadů v areálu FN Motol*. Praha, 2010. Dostupné také z: [https://arnika.org/soubory/dokumenty/odpady/spalovny/Praha-Motol/rozhodnutioip\\_SITA.pdf](https://arnika.org/soubory/dokumenty/odpady/spalovny/Praha-Motol/rozhodnutioip_SITA.pdf)
- [26] Spalovna odpadů: Činnost spalovny. *Nemocnice Rudolfa a Stefanie Benešov, a. s., nemocnice Středočeského kraje* [online]. Benešov, 2019 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.hospital-bn.cz/o-nas/spalovna-odpadu/>
- [27] Valentýna – nejmodernější zařízení pro energetické využití nemocničního odpadu. *All for Power* [online]. Praha: AF POWER agency, a.s., c2007-2019 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/valentyna-nejmodernejsi-zarizeni-pro-energeticke-vyuziti-nemocnicniho-odpadu/>
- [28] *Veřejná zakázka: Komplexní obnova spalovny v NPK, a.s., pracoviště Pardubická nemocnice*. Pardubický kraj: E-ZAK, c2006-2019. Dostupné také z: [https://zakazky.pardubickykraj.cz/contract\\_display\\_1737.html](https://zakazky.pardubickykraj.cz/contract_display_1737.html)
- [29] *Zpráva o činnosti: Nemocnice Znojmo*. Znojmo: Nemocnice Znojmo, 2011. Dostupné také z: <https://m.kr-jihomoravsky.cz/Default.aspx?PubID=183004&TypeID=7>
- [30] *VÝROČNÍ ZPRÁVA: 2016*. Uherské Hradiště: Uherskohradištská nemocnice a. s., 2017. Dostupné také z: <https://www.nemuh.cz/doc/ae345c98-2cd0-11e8-971b-0200ac1064ad/@@download>
- [31] Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE. *Eurostat* [online]. Luxembourg: European Union, c1995-2018 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env\\_wasgen&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasgen&lang=en)
- [32] Treatment of waste by waste category, hazardousness and waste management operations. *Eurostat* [online]. Luxembourg: European Union, c1995-2018 [cit. 2019-02-02]. Dostupné z: [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env\\_wastrt&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wastrt&lang=en)

- [33] MACHÁT, Ondřej. *Výpočtový systém pro vyhodnocení výrobních ukazatelů spaloven komunálních odpadů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Michal Touš.
- [34] CZAJCZYŃSKA, D., L. ANGUILANO, H. GHAZAL, R. KRZYŻYŃSKA, A.J. REYNOLDS, N. SPENCER a H. JOUHARA. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2017, **3**, 171-197. DOI: 10.1016/j.tsep.2017.06.003. ISSN 24519049. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2451904917300690>
- [35] Ekotermex Waste Incineration Plant in Vyškov. In: *Centroprojekt* [online]. Zlín: CENTROPROJEKT GROUP a.s, 2019 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: [https://centroprojekt.cz/wp-content/uploads/2015/06/01\\_Spalovna\\_Ekotermex\\_Vyskov\\_-\\_Centroprojekt-1-1024x564.jpg](https://centroprojekt.cz/wp-content/uploads/2015/06/01_Spalovna_Ekotermex_Vyskov_-_Centroprojekt-1-1024x564.jpg)
- [36] VOUDRIAS, Evangelos A. *Technology selection for infectious medical waste treatment using the analytic hierarchy process* [online]. 2016, **66**(7), 663-672 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1080/10962247.2016.1162226. ISSN 1096-2247. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2016.1162226>
- [37] *Návrh metodického doporučení pro hodnocení účinnosti dekontaminace odpadů ze zdravotnictví*. In: . Praha: Státní zdravotní ústav, 2009. Dostupné také z: <http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/puda/priloha5Z.pdf>
- [38] Autoclave-animal-waste. In: *Global Re-Energy* [online]. Miami: Global Re-Energy, 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://www.globalre-energy.com/animal-and-poultry-waste-management/>
- [39] VOUDRIAS, Evangelos A. *Technology selection for infectious medical waste treatment using the analytic hierarchy process* [online]. 2016, **66**(7), 663-672 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1080/10962247.2016.1162226. ISSN 1096-2247. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10962247.2016.1162226>
- [40] HONG, Jingmin, Song ZHAN, Zhaohe YU, Jinglan HONG a Congcong QI. Life-cycle environmental and economic assessment of medical waste treatment. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, **2018**(174), 65-73 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.10.206. ISSN 09596526. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617325155>
- [41] FAGBEMI, L, L KHEZAMI a R CAPART. Pyrolysis products from different biomasses. *Applied Energy*. 2001, **69**(4), 293-306. DOI: 10.1016/S0306-2619(01)00013-7. ISSN 03062619. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261901000137>
- [42] Akumulátory páry. *Aquaterm, s.r.o.* [online]. Šlapanice: Auaterm, b.r. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.aquaterm.cz/akumulatory-pary/>

- [43] ORC. *EXERGY* [online]. Bologna: Exergy S.p.A., 2019 [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <http://www.exergy-orc.com/orc>
- [44] 8.2. Absorption Cooling. *PennState: DEPARTMENT OF ENERGY AND MINERAL ENGINEERING* [online]. University Park, Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2019 [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/eme811/node/670>
- [45] KOTAS, Dan. *Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Tomáš Krejčí.
- [46] MINOGLU, Minas, Spyridoula GERASSIMIDOU a Dimitrios KOMILIS. Healthcare Waste Generation Worldwide and Its Dependence on Socio-Economic and Environmental Factors. *Sustainability*. 2017, 9(2). DOI: 10.3390/su9020220. ISSN 2071-1050. Dostupné také z: <http://www.mdpi.com/2071-1050/9/2/220>
- [47] *Nakládání s infekčními odpady ze zdravotní péče* [online]. In: MUDR. MAGDALENA ZIMOVÁ, CSC., . Praha: SZÚ Praha, 2017, s. 4-6 [cit. 2019-03-24].
- [48] *ADR BOOK: Dangerous Goods by Road* [online]. [adrbook.com](http://adrbook.com), c2015-2018 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://adrbook.com/en/>
- [49] CITYBAC® DASRI\*. *SULO* [online]. Oldbury - West Midlands: Sulo UK, 2019 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <http://www.sulo.co.uk/en/waste-containers/wheel-containers/citybac-dasri.html>
- [50] ČESKÁ REPUBLIKA. *Nařízení vlády č. 272/2011 Sb.: Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*. In: . Sbírka zákonů České republiky, b.r., 24. 08. 2011. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2011-272>
- [51] Phyllis 2: ECN Phyllis classification. *Phyllis 2* [online]. Haag: ECN.TNO, 2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis>
- [52] *Konstrukce a výstroj parních a horkovodních kotlů: článek 413*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1978.
- [53] HYŽÍK, Jaroslav. Spoluspalování tuhého alternativního paliva z mechanicko-biologické úpravy odpadů? Provozní zkušenosti říkají NE!: CHLOROVÁ KOROZE. *All for Power* [online]. Praha: AF POWER agency, a.s., c2007-2019 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/spoluspalovani-tuheho-alternativniho-paliva-z-mechanicko-biologicke-upravy-odpadu-provozni-zkusenosti-rikaji-ne/>
- [54] HUIJBREGTS, W, R LEFERINK a W HUIJBREGTS. Latest advances in the understanding of acid dewpoint corrosion: corrosion and stress corrosion cracking in combustion gas condensates. *Anti-Corrosion Methods and Materials* [online]. 2004, 51(3), 173-18816 [cit. 2019-04-07]. ISSN 0003-5599. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/743270266/>

- [55] YOUNG, Gary C. Municipal solid waste to energy conversion processes. *Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical, and renewable comparisons*. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2010, 4, 145-153. ISBN 978-0-470-53967-5.
- [56] KROPÁČ, Jiří. *Pokročilý výpočtový nástroj pro návrh systému čištění spalin z procesu termického zpracování odpadů*. Brno, 2012, 158 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

$\lambda$	Stechiometrický poměr
ADR	Evropská dohoda o mezinárodní silniční přepravě nebezpečných věcí
AMS	Automatický emisní monitoring (z eng. Automatic Monitoring System)
BAT	Nejlepší dostupné technologie (z eng. Best Available Technologies)
BREF	Referenční dokumenty
BRKO	Biologicky rozložitelný komunální odpad
CCF	Kumulativní peněžní tok (z eng. Cumulative Cash Flow)
CZT	Centrální zásobování teplem
EIA	Posuzování vlivů na životní prostředí (z eng. Environmental Impact Assesment)
EVO	Energetické využití odpadů
HHV	Spalné teplo paliva (z eng. Higher Heating Value)
IPPC	Integrovaná prevence a omezování znečištění (z eng. Integrated Pollution Prevention Controll)
ISOH	Informační systém odpadového hospodářství
IGT	Institute of Gas and Technology
LCA	Analýza životního cyklu (z eng. Life Cycle Analysis)
LHV	Výhřevnost paliva (z eng. Lower Heating Value)
MaR	Měření a regulace (z eng. Measurement and Regulation)
OPS	Objektová předávací stanice
ORC	Organický Rankinův cyklus (z eng. Organic Rankin Cycle)
PCDD/F	Dioxiny a furany (dibenzo-p-dioxiny a dibenzofurany)
SCR	Selektivní katalytická redukce (z eng. Selective Catalytic Reduction)
SNCR	Selektivní nekatalytická redukce (z eng. Selective Non-Catalytic Reduction)
TEQ	Toxický ekvivalent (z eng. Toxicity Equivalent)
TRB	Teplota rosného bodu
TV	Teplá voda
TZL	Tuhé znečišťující látky
W2E	Energie z odpadu (z eng. Waste-to-Energy)



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Hierarchie nakládání s odpady .....	14
Obr. 2 Mapa zařízení spalující a spoluspalující zdravotnický odpad v ČR.....	24
Obr. 3 Typy roštových spalovacích komor dle toku médií.....	29
Obr. 4 Schéma roštové spalovací komory s dohořivací komorou, protiproudé uspořádání ..	30
Obr. 5 Typy rotačních pecí dle toku médií .....	31
Obr. 6 Schéma rotační pece s dohořivací komorou, souproudé uspořádání.....	32
Obr. 7 Pyrolýzní komora Hoval GG 24 (Ekotermex a.s., Vyškov, ČR) [35] .....	33
Obr. 8 Autokláv pro sterilizaci odpadu parou [38] .....	35
Obr. 9 Náklady na zpracování zdravotnického odpadu z LCA analýzy [40], upraveno .....	37
Obr. 10 Schéma absorpčního chlazení.....	41
Obr. 11 Rozmístění nemocnic v modelovém regionu .....	46
Obr. 12 Svozové mapy .....	48
Obr. 13 Blokové schéma termické části a části využití tepla.....	54
Obr. 14 Systém čištění spalin pro navrhované zařízení EVO [45].....	59
Obr. 15 Výkonový diagram roštu spalovací komory .....	67
Obr. 16 Spotřeby a pokrytí spotřeb tepla v zimním dni .....	69
Obr. 17 Spotřeby a pokrytí spotřeb tepla v přechodném dni .....	70
Obr. 18 Spotřeby a pokrytí spotřeb tepla v letním dni .....	70
Obr. 19 Graf měsíčních spotřeb tepla v nemocnici A.....	71
Obr. 20 Graf výroby a spotřeby tepla .....	71
Obr. 21 Schéma napojení zařízení EVO na stávající systém zásobování teplem.....	72
Obr. 22 Personální obsazení zařízení EVO .....	76
Obr. 23 Kumulovaný peněžní tok projektu (CCF) při poplatku za zpracování odpadu 10 000 Kč/t.....	78
Obr. 24 Kumulovaný peněžní tok projektu (CCF) při poplatku za zpracování odpadu 9 000 Kč/t.....	78
Obr. 25 Kumulovaný peněžní tok projektu (CCF) při poplatku za zpracování odpadu 8 000 Kč/t.....	78

## SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Kategorie zdravotnického odpadu.....	18
Tab. 2.2 Emisní limity pro spalovny odpadů [20], [11].....	20
Tab. 3.1 Produkce zdravotnických odpadů v ČR v letech 2013-2017 [t/rok] (data z [22]).....	21
Tab. 3.2 Způsoby nakládání se zdravotnickým odpadem a jejich poměrové zastoupení v letech 2013-2017 [t/rok] (data z [22]).....	22
Tab. 3.3 Zařízení spalující a spoluspalující zdravotnický odpad v ČR (data z [24]).....	23
Tab. 3.4 Seznam a technologie zařízení na termické zpracování zdravotnických odpadů v ČR (data z [24]) .....	24
Tab. 3.5 Způsoby využití tepla v zařízeních na termické zpracování zdravotnických odpadů v ČR .....	25
Tab. 4.1 Charakteristika typů spalovacích komor dle toku médií [11].....	29
Tab. 4.2 Srovnání hlavních parametrů technologií na zpracování odpadu [39] .....	37
Tab. 5.1 Svozové vzdálenosti z jednotlivých nemocnic .....	45
Tab. 5.2 Produkce odpadů kategorie N v nemocnicích modelového regionu [t/rok] .....	46
Tab. 5.3 Tok odpadů v zařízení EVO [t].....	53
Tab. 7.1 Odhad elementárního složení zdravotnických odpadů v modelovém regionu .....	61
Tab. 7.2 Parametry spalovacího vzduchu.....	63
Tab. 7.3 Vstupní předpoklady bilančních výpočtů .....	64
Tab. 7.4 Parametry vstupních a výstupních proudů materiálové a energetické bilance .....	65
Tab. 8.1 Spotřeby tepla v areálu nemocnice A .....	68
Tab. 9.1 Emise a imise navrhovaného zařízení EVO.....	74
Tab. 9.2 Odhad investičních nákladů zařízení EVO.....	75
Tab. 9.3 Odhad provozních nákladů zařízení EVO.....	76
Tab. 9.4 Odhad výnosů provozem zařízení EVO .....	77

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Grafické schéma moderní jednotky EVO

Příloha 2 – Bilanční model softwarového systému W2E, režim 850 °C

Příloha 3 – Bilanční model softwarového systému W2E, režim 1 100 °C

Příloha 4 – Bilanční model softwarového systému W2E včetně systému čištění spalin