



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# INTEGRACE MATERIÁLOVÉHO A ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ KALŮ Z ČOV

INTEGRATION OF MATERIAL AND ENERGY UTILIZATION OF SEWAGE SLUDGE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Zakov

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Krišpín

BRNO 2020

# Zadaní diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	<b>Bc. Tomáš Zakov</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Procesní inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Krišpín</b>
Akademický rok:	2020/21

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:

## **Integrace materiálového a energetického využití kalů z ČOV**

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

Diplomová práce bude řešit koncepční návrh zařízení pro materiálové a energetické využití kalů z ČOV se zaměřením na plnění prioritní osy Evropské unie v oblasti cirkulární ekonomiky. Cílem práce je ověření možností zpětného získávání fosforu použitím vhodné metody zpracování čistírenských kalů.

### **Cíle diplomové práce:**

Literární rešerše z oblasti legislativních omezení  
Volba vhodné technologie  
Materiálová a energetická bilance integrovaného procesu  
Návrh aparátové skladby  
Návrh dispozičního uspořádání zařízení  
Odhad investičních nákladů

### **Seznam doporučené literatury:**

ADAM, Ch., KLEY, G., SIMON, F., Thermal Treatment of Municipal Sewage Sludge Aiming at Marketable P-Fertilisers. MATERIALS TRANSACTIONS. 2007, 48(12), 3056-3061. DOI: 10.2320/matertrans.MK200707. ISSN 1345-9678.

Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, Official Journal of the European Communities, L332/91-L332/111, 28. 12. 2000

FYTILI, D., ZABANIOTOU, A., Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008, 12(1), 116-140. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.014. ISSN 13640321.



EGLE, L., RECHBERGER, H., KRAMPE J., ZESSNER, M., Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. Science of The Total Environment. 2016, 571, 522-542. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.019. ISSN 00489697.

KABBE, Ch., REMY, Ch., Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery in Europe. P-REX - Phosphorus recycling. Germany, 2015

LOMBARDI, L., CARNEVALE, E., CORTI, A., A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. Waste Management. 2015. 37, 26-44. ISSN 0956053x.

PAVLAS, M., BEBAR, L., KROPÁČ, J., STEHLÍK, P., Waste to energy - an evaluation of the environmental impact, Chemical Engineering Transactions, 2009. Vol. 18, p. 671-676.

STEHLÍK P. Up-to-Date Waste-to-Energy Approach - From Idea to Industrial Application, Springer Briefs in Applied Sciences and Technology, 2016. ISBN 978-3-319-15466-4

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Táto diplomová práca sa v prvej časti zaoberá možnosťami a trendami v oblasti nakladania s kalom z komunálnych čistiarní odpadných vôd. Ďalej práca popisuje legislatívu v súvislosti s čistiarenským kalom a jeho spaľovaním v Európskej únii aj v Českej republike. Druhá časť práce sa zaoberá návrhom zariadenia pre materiálové a energetické využitie kalu. V návrhu je postupne spracovaná voľba aparátov a materiálová a energetická bilancia zvoleného systému. Z týchto údajov následne vychádza strojne technologické riešenie jednotky. Podľa zvolených a dopočítaných parametrov jednotlivých aparátov je v práci vytvorený dispozičný návrh. Záverom je spracované ekonomické vyhodnotenie projektu na základe investičných a prevádzkových nákladov a spracovateľskej kapacity navrhovanej jednotky.

## **Kľúčové slová**

Čistiarenský kal, nakladanie s odpadom, materiálové a energetické využitie odpadu, fosfor, spaľovanie

## **ABSTRACT**

This master thesis deals in first part with options and trends on field of municipal sewage sludge management. Further thesis describes legislation in relation with sewage sludge and its incineration in European union and also in Czech republic. Second part of thesis deals with design of mechanism for material and energetic use of sludge. In design is progressively processed choice of aparates and material and energetic balance. This data are further used for mechine technical solution of the unit. Disposition of the unit is done acording to chosen and calculated parameter of chosen aparates. Economical evaluate of project if based on investment and operation costs and capacity design of unit in the end of thesis.

## **Key words**

Sewage sludge, waste management, material and energetic use of waste, phosphorus, incineration

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

Zakov, Tomáš. 2020. *Integrace materiálového a energetického využití kalu z ČOV*. Brno. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ústav procesního a inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jan Křišpin

## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému *Integrace materiálového a energetického využití kalů z ČOV* spracoval samostatne pod vedením Ing. Jan Krišpín. Všetky parametre a zdroje informácií, ktoré som použil k spísaniu tejto práce, sú uvedené v zozname použitých zdrojov.

---

Dátum

---

Bc. Tomáš Zakov

## **POĎAKOVANIE**

Týmto by som rád poďakoval Ing. Janovi Krišpínovi za ústretový prístup a trpezlivosť počas vedenia diplomovej práce. Rovnako ďakujem všetkým blízkym, ktorý ma podporovali a hnali dopredu. Zvlášť by som chcel poďakovať svojim rodičom, ktorý ma podporovali počas celého štúdia.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CIELE PRÁCE</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>CIRKULÁRNA EKONOMIKA</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>ČISTIARENSKÝ KAL</b> .....	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>AKTUÁLNY STAV NAKLADANIA S KALOM V ČR</b> .....	<b>8</b>
5.1	PRIAMA APLIKÁCIA A REKULTIVÁCIA .....	8
5.2	KOMPOSTOVANIE .....	9
5.3	SKLÁDKOVANIE.....	10
5.4	TERMICKÉ METÓDY .....	10
5.4.1	<i>Monospaľovanie</i> .....	11
5.4.2	<i>Spoluspaľovanie</i> .....	15
5.4.3	<i>Sušenie kalu</i> .....	16
<b>6</b>	<b>PROBLEMATIKA FOSFORU</b> .....	<b>19</b>
6.1	SPÄTNÉ ZÍSKAVANIE FOSFORU.....	20
6.1.1	<i>Spätné získavanie fosforu z popola</i> .....	20
<b>7</b>	<b>LEGISLATÍVA NAKLADANIA S KALOM EU</b> .....	<b>22</b>
<b>8</b>	<b>LEGISLATÍVA NAKLADANIA S KALOM V ČR</b> .....	<b>24</b>
8.1	ZÁKON Č. 185/2001 O ODPADOCH .....	24
8.2	VYHLÁŠKA Č. 437/2016 SB. O POUŽITÍ UPRAVENÝCH KALOV NA POĽNOHOSPODÁRSKEJ PÔDE.....	25
8.3	VYHLÁŠKA Č. 383/2001 SB. O PODROBNOSTIACH NAKLADANIA Z ODPADOM .....	26
8.4	ZÁKON Č. 201/2012 SB. O OCHRANE OVZDUŠÍ .....	27
8.5	VYHLÁŠKA Č. 415/2012 O PRÍPUSTNEJ ÚROVNE ZNEČISTENÍ A JEJ ZISŤOVANÍ .....	27
8.6	ZÁKON Č. 156/1998 SB. O HNOJIVÁCH.....	31
<b>9</b>	<b>KONCEPT MONOSPAĽOVNE ČISTIARENSKÝCH KALOV</b> .....	<b>32</b>
<b>10</b>	<b>BILANCIA SYSTÉMU</b> .....	<b>34</b>
10.1	BILANCIA SPAĽOVACIEHO PROCESU ZEMNÉHO PLYNU.....	34
10.2	BILANCIA SPAĽOVACIEHO PROCESU BEZVODÉHO ČISTIARENSKÉHO KALU .....	35
10.3	VÝPOČET VÝHREVNOSTI HORĽAVINY KALU .....	37
10.4	VÝPOČET VÝHREVNOSTI ZEMNÉHO PLYNU.....	38
10.5	MATERIÁLOVÁ BILANCIA SPAĽOVACIEHO PROCESU .....	39
10.6	TEPELNÁ BILANCIA SPAĽOVACIEHO PROCESU .....	42
10.7	VÝPOČET PRISÁVANIA VZDUCHU .....	44
10.8	MATERIÁLOVÁ BILANCIA SUŠIARNE .....	45
10.9	ENERGETICKÁ BILANCIA SUŠIARNE.....	46
10.10	ZHRNUTIE BILANCIE.....	47
<b>11</b>	<b>STROJNE-TECHNOLOGICKÉ RIEŠENIE JEDNOTKY</b> .....	<b>49</b>
11.1	PRÍJEM, SKLADOVANIE A DÁVKOVANIE KALU .....	49
11.1.1	<i>Nádrž odvodneného kalu</i> .....	49

11.1.2	<i>Silo vysušeného kalu</i> .....	50
11.1.3	<i>Silo pre popol</i> .....	50
11.2	TERMICKÁ ČASŤ NAVRHOVANEJ JEDNOTKY .....	51
11.2.1	<i>Rotačná sušička kalu</i> .....	51
11.2.2	<i>Rotačná pec</i> .....	52
11.2.3	<i>Dohorievacia komora</i> .....	53
11.2.4	<i>Prisávanie vzduchu</i> .....	53
11.3	SPÄTNÉ ZÍSKAVANIE FOSFORU.....	54
11.3.1	<i>Silo obohateného popola</i> .....	54
11.4	ČISTENIE SPALÍN.....	54
11.4.1	<i>Multicyklón</i> .....	54
11.4.2	<i>Mokrú práčku</i> .....	55
11.4.3	<i>Dávkovanie močoviny</i> .....	55
11.4.4	<i>Dávkovanie Aktívneho uhlia</i> .....	56
11.4.5	<i>Kontaktor</i> .....	56
11.4.6	<i>Rukávové filtre</i> .....	57
11.5	POMOCNÉ APARÁTY.....	58
11.5.1	<i>Ventilátor</i> .....	58
11.5.2	<i>Komín</i> .....	59
11.5.3	<i>Stanica pre výrobu stlačeného vzduchu</i> .....	59
11.5.4	<i>Popolčekové hospodárstvo</i> .....	59
11.5.5	<i>Popolčekové silo</i> .....	60
<b>12</b>	<b>DISPOZIČNÝ NÁVRH SPALOVNE</b> .....	<b>61</b>
12.1	POSTUP DISPOZIČNÉHO NÁVRHU .....	61
<b>13</b>	<b>EKONOMICKÁ ROZVAHA NAVRHOVANEJ JEDNOTKY</b> .....	<b>66</b>
<b>14</b>	<b>ZÁVER</b> .....	<b>69</b>
<b>15</b>	<b>POUŽITÉ ZDROJE</b> .....	<b>71</b>
<b>16</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV</b> .....	<b>78</b>
<b>17</b>	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV</b> .....	<b>80</b>
<b>18</b>	<b>ZOZNAM TABULIEK</b> .....	<b>81</b>

# 1 ÚVOD

Počet obyvateľov na našej planéte nepopierateľne rastie ako aj požiadavky na kvalitu životnej úrovne. S tým je spojená výrazne rastúca záťaž na prírodné zdroje a životné prostredie. Trendy pre pokus o zabezpečenie udržateľného stavu sa musia prispôbovať aktuálnym globálnym problémom, ktoré sú spôsobené vývojom spoločnosti. Na tento prípad v dnešnej dobe naráža aj problematika likvidácie čistiarenskeho kalu z čistiarní odpadných vôd. Kým v minulosti bol kal bez problémov využívaný a likvidovaný na poľnohospodárskej pôde, dnes už sa toto konanie vo viacerých prípadoch javí ako problematické. Dôvodom je narastajúce množstvo kontaminantov obsiahnutých v kale, ktorý vzišiel ako odpad z čistenia odpadných vôd. S tým jednoznačne súhlasí aj sprísňovanie zákonov v Českej republike pre povolené koncentrácie jednotlivých kontaminantov v kale uloženom na poľnohospodársku pôdu, či už priamo alebo formou kompostu. Iniciatíva krajín západnej Európy smeruje k výraznému obmedzeniu ukladania kalu na ornú pôdu s tým, že napríklad vo Švajčiarsku je to už z preventívnych dôvodov úplne zakázané. [8] Vzhľadom na to, že tento spôsob predstavuje majoritnú časť efektívneho využitia tohto organického odpadu v Českej republike, je potrebné prísť s inou vhodnou alternatívou pre doposiaľ takto využívaný či likvidovaný kal.



## 2 CIELE PRÁCE

Cieľ práce spočíva v návrhu riešenia procesu spracovania kalu z čistiarní odpadných vôd. Pre spracovanie či likvidáciu kalu je potrebné zvolit' vhodný postup z ohľadom na jeho maximálne využitie za dodržania legislatívnych obmedzení.

Práca sa bude v prvej časti zaoberat' aktuálnymi možnosťami nakladania s kalom v Českej republike a trendami, ktoré sa v tomto hospodárstve aktuálne držia aj po vzore krajín západnej Európy. Ďalej bude práca popisovat' možnosti voľby technologických aparátov, ktoré budú zvažované do navrhovaného procesu. S vybranou použitou technológiou bude prevedená bilancia systému navrhovanej jednotky a spracovaná strojne technologická časť uvažujúc túto bilanciu. So známymi aparátmi bude vytvorený dispozičný model a ekonomické zhodnotenie daného projektu.

### 3 CIRKULÁRNA EKONOMIKA

Neustáli rozvoj hospodárstva vytvára rastúci tlak na prírodné zdroje. Tento fakt si Európska únia dobre uvedomuje a preto zavádza opatrenia pre zabezpečenie efektivity ich využívania. Tieto opatrenia majú vo výsledku tiež vplyv na životné prostredie a klimatické zmeny, čo sú rovnako prioritné témy. Globálne udržateľný a inkluzívny rast Európy na týchto faktoroch určite závisí. Cirkulárna ekonomika by mala podľa predpokladov štúdie o udržateľnom raste hospodárstva, ktoré bolo vypracované pre Európsku komisiu, znížiť celkovú potrebu vstupov prírodných zdrojov o 17 až 24 %. Toto zníženie vstupov by mohlo znamenať ročnú úsporu vo výške 630 miliárd euro.[2]

Hlavnou myšlienkou cirkulárnej ekonomiky alebo obehového hospodárstva, pre smerovanie k udržateľnému stavu, je udržať pridanú hodnotu vo výrobkoch čo najdlhšie a obmedziť tak vznik odpadu a spotrebu prírodných zdrojov. Následne po dosiahnutí konca životného cyklu výrobku je vhodné ho ďalej produktívne využiť, čím sa získa ďalšia pridaná hodnota. Samozrejme tento systém sa nikdy nebude dať realizovať na 100% a teda sa vždy bude potrebné počítať s nejakým odpadom a rovnako získavať prírodné zdroje.[2]

Prechod k obehovému hospodárstvu realizovanému vo zvýšenej miere si vyžaduje zmeny v celých hodnotových reťazcoch, od návrhu výrobku po nové obchodné a trhové modely, od nových spôsobov premeny odpadu na zdroje po nové štýly spotrebiteľského správania. Zmeny však musia obsahovať vhodné koncepčné riešenia aby boli tieto procesy ekonomicky akceptovateľné. Grafický obraz integrácie možných oblastí pre zlepšenie do obehového hospodárstva je zobrazený na obr. č. 1.[2]



Obr. 1 Spôsob uplatnenia cirkulárnej ekonomiky [2]

Potreba integrácie foriem obehového hospodárstva do hodnotového reťazca kalového hospodárstva je za súčasného stavu relatívne žiaduca. Narastajúca produkcia kalu ako odpadu si vyžaduje čo možno najefektívnejšie materiálové alebo energetické využitie pre spätné získavanie nových zdrojov. Veľmi významnú úlohu v tomto smere hrá fosfor obsiahnutý v kale. Ten je na zozname surovín EU, ktorých je kritický nedostatok. Import fosforu predstavuje stále viac než 90% celkovej spotreby. Nevyzerá že by mal v najbližších desaťročiach nastať problém so zásobami pri ťažení fosfátovej rudy, no problematická by mohla byť bezpečnosť dodávok pre Európu. Recyklácia fosforu z kalov by mohla prípadný dopad zmierniť.[24] [30]

## 4 ČISTIARENSKÝ KAL

Čistiarenský kal je produkt z čistenia odpadných vôd. Viacerými procesmi sa odpadné vody v čistiarni postupne usadzujú, upravujú a zahusťujú, z čoho nakoniec vznikne čistiarenský kal. Jeho vlastnosti sú závislé na použitých technológiách čistenia ako aj na lokalite a sieti, kde sa daná čistiareň nachádza. Kal sa skladá z organického podielu, čo predstavuje horľavinu a anorganického podielu čo predstavuje popoloviny. Dokopy tieto zložky dávajú sušinu kalu. Obsah sušiny v kale sa na výstupe z čistiarne variuje podľa použitej technológie. Jej hodnoty dosahujú od 25 do 35 % pri kvalitnom odvodnení. V kale sa koncentruje väčšina kontaminantov privedených odpadnými vodami. Tieto kontaminanty ako aj vlastnosti kalu musia byť sledované pre možné zhodnotenie využitia tohto kalu.[8]

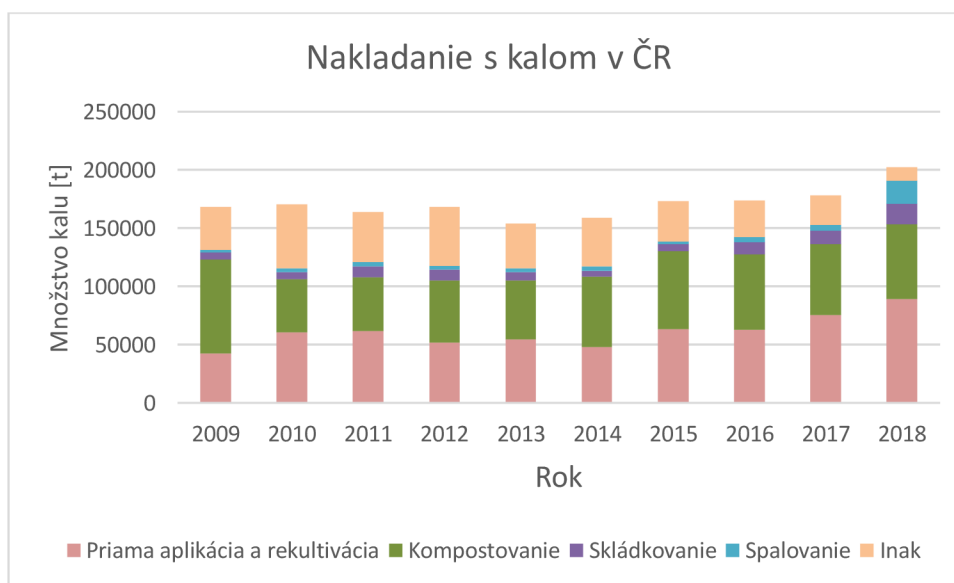
Hodnotenie vhodnosti a kvality kalu pri aplikácii na poľnohospodársku pôdu, či už priamo alebo formou hnojív či kompostu, sleduje okrem živín a prospešných látok, kvôli ktorým sa kal využíva ako nutrient, aj obsahy kontaminantov. V tomto prípade sa sledujú hlavne obsahy ťažkých kovov, mikrobiologické parametre, a obsahy PCB a PAU. Mikrobiologické parametre zahŕňajú kontamináciu fekálnymi baktériami.

S vývojom našej spoločnosti sa zvyšuje diverzita kontaminantov privedených splaškovými vodami. Ich prítomnosť je potrebné zistiť a následne s kalom naložiť podľa možností a platnej legislatívy. Nie však všetky znečisťujúce zložky sú analyzované pri posúdení vhodnosti aplikácie daného kalu. Takýmto spôsobom sa môžu šíriť do ekosystému napríklad mikroplasty, hormóny, antibiotiká prípadne množstvo ďalších liečiv. V prípade aplikácie kontaminovaného kalu na pôdu sa kontaminanty dostávajú okrem pôdy, do potravín, povrchovej či podzemnej vody. [13]

V súčasnosti prebieha intenzívny vývoj názorov ohľadom využitia kalu z čističiek odpadných vôd v rámci obehového hospodárstva. S tým je úzko spojený trend v západnej Európe smerujúci k úplnému zakázaniu využívania kalu na poľnohospodárskych pôdach hlavne z dôvodu prevencie, keďže prítomnosť viacerých kontaminantov v kaloch je preukázateľne rastúca. [8]

## 5 AKTUÁLNÝ STAV NAKLADANIA S KALOM V ČR

V roku 2018 sa v Českej republike vyprodukovalo vo všetkých čistiarnách odpadných vôd zaradených do štatistik ČSÚ 202 tisíc ton sušiny kalu. To je viac ako desaťpercentný nárast oproti predošlému roku podľa grafu na obrázku č. 2. Legislatíva v Českej republike súvisiaca s nakladaním s čistiarenskými kalmi rozlišuje 5 kategórií spôsobov nakladania a to Priama aplikácia a rekultivácia, Kompostovanie, Skládkovanie, Spaľovanie a Inak. Presne tento zoznam uvádza aj Český štatistický úrad s príslušnými absolútnymi hodnotami jednotlivých spôsobov pre jednotlivé kraje ako aj pre celú republiku. V sumačnom grafe na obrázku č. 2 sú zachytené množstvá sušiny čistiarenskeho kalu prislúchajúce jednotlivým spôsobom nakladania s čistiarenským kalom v období 2009 – 2018 pre celú Českú republiku. Pomerne výraznú zmenu môžeme badať v náraste položky spaľovania v poslednom roku, ktorá dosiahla viac ako štvornásobok minuloročnej hodnoty.[31]



Obr. č. 2 Spôsoby nakladania s kalom v Českej republike

### 5.1 Priama aplikácia a rekultivácia

Priamou aplikáciou sa rozumie aplikácia stabilizovaného čistiarenskeho kalu na poľnohospodársku pôdu s ohľadom na nutričné potreby rastlín, pričom by nemalo dôjsť ku kontaminácii. Nutričné potreby sa určujú pomocou agrochemického rozboru pôdneho bloku, kde má byť kal aplikovaný. Rekultiváciou pôdy sa rozumie jej zúrodnenie po

nežiadúcej antropogénnej činnosti vzhľadom na ekosystém pôdy. Príkladom môže byť rekultivácia lomu po ťažení alebo povrchu skládky. Priama aplikácia a rekultivácia je v súčasnosti podľa štatistík navyše využívaný spôsob nakladania s čistiarenskými kalmi v ČR. Táto položka by sa mala ale v najbližšej dobe výrazne znížiť. Začiatkom roku 2020 mala skončiť prechodná doba ustanovenia, ktoré uvádza povinnosť uskutočniť overenie účinnosti technológie čističiek odpadných vôd ako aj sprísňujúce hodnoty mikrobiálnych kritérií podľa vyhlášky č. 437/2016 Sb. o podmienkach použitia kalu na poľnohospodárskej pôde.[5] Koniec prechodnej doby sa podľa novely tejto vyhlášky posunul o 3 roky, teda na 31. Decembra 2022. Tento krok bol pravdepodobne nevyhnutný pre zachovanie udržateľného stavu, keďže nebolo možné jak technologicky tak organizačne zabezpečiť kalové hospodárstvo v súlade s platnou legislatívou.[6]

Pre porovnanie vo švajčiarsku bola zakázaná priama aplikácia kalu už v roku 1997, kedy miestne orgány riešili problém s vyskytnutou chorobou šialených kráv a vznikali obavy z kontaminácie ekosystému, keďže používané metódy hygienizácie kalu v čistiarnach ani zďaleka nedostačovali na zničenie príónov, ktoré mali spôsobovať túto chorobu.[50]

## 5.2 Kompostovanie

Kompostovanie je proces premeny biodegradabilného organického odpadu na hnojivo. Jeho priebeh spočíva v premene organickej hmoty na humusové zložky vďaka aeróbnym mikroorganizmom a prevzdušňovaniu kompostu, pričom celý proces je ľahko exotermický.

Hmotnostný podiel čistiarenského kalu v pripravovanom komposte sa v Českej republike pohybuje okolo 20%. Na takto pridávaný kal sú kladené relatívne vysoké nároky ohľadom fyzikálnych, chemických aj mikrobiologických parametrov. Z tohto ohľadu jednotky na spracovanie kompostu čistiarenský kal odmietajú, aby nemuseli spĺňať stanovené prísne kritériá. Skladba kompostu sa optimalizuje podľa jeho vlhkosti, množstva fosforu, množstva ľahko rozložiteľných látok a pomeru C:N. Pridaním čistiarenského kalu je potrebné tieto vlastnosti zachovať. Pridaním lignocelulóзовého materiálu, ako napríklad stromovej kôry, sa vhodne zachová štruktúra a pórovitosť kompostu. Výslednú podobu spracovania kompostu upravuje vyhláška č.

341/2008, kde sú dané technologické požiadavky na spracovanie bioodpadu a jeho hygienizáciu.[10] [12]

### **5.3 Skládkovanie**

Skládkovanie je jednoznačne neudržateľný spôsob nakladania s kalom. V súčasnej dobe je iniciovaný odklon od tejto formy nakladania jak v Českej republike tak celej Európskej únii. Vyplýva to z dokumentu Európskej komisie o integrácii obehového hospodárstva [2] alebo zo smernice EU 1999/31/ES o skládkach odpadu [42]. Táto iniciatíva by mala čiastočne nahradiť pretrvávajúci lineárny model. Ten sa zakladá na ideológii vyťaž - vyrob - spotrebuj. To vytvára značný tlak jak na prírodné zdroje, tak na ekosystém kvôli veľkej produkcii odpadu. Cirkulárna ekonomika by mala byť riešením pre zníženie tohto tlaku, avšak skládkovanie kalov sa jej celkom vymyká. Už v roku 2005 bola ustanovená vyhláška 294/2005 Sb. o podmienkach ukladania odpadov na skládky a ich využívanie na povrchu terénu, kde je daný v prílohe č. 5 zoznamom odpadov, ktoré je zakázané ukladať na skládky všetkých skupín. Kal je možné zaradiť do bodu 2. tejto prílohy ako odpad, ktorý sedimentáciou uvoľňuje kvapalnú fázu. [3] Paradoxne ale ČSÚ vydáva štatistiky ku skládkovaniu kalu v relevantných hodnotách. Zákon 294/2005 Sb. umožňuje aplikovať kal na skládku ako technickú rekultivačnú vrstvu za určitých podmienok, no časť je reálne skládkovaná ako odpad. Tu hrajú úlohu kompetencie krajských úradov, ktoré môžu vydať súhlas s takýmto nakladaním aj keď to novela zákona neumožňuje. Ide o to, že prevádzkové poriadky fungujúcich zariadení tieto novely stále nerešpektujú a dochádza tým k oneskoreniu aplikácie tejto právnej úpravy. Stojí to v zverejnenom vyjadrení Českej inšpekcie životného prostredia z roku 2013.[4]

### **5.4 Termické metódy**

Pre čistiarenské kaly, ktorých vlastnosti nespĺňujú kvalitatívne podmienky pre ich ďalšie využitie v poľnohospodárstve je aktuálne najvhodnejšie termické spracovanie. Rovnako v prípade veľkej produkcie kalu prevyšujúcej dopyt je potrebné vzniknuté kaly vhodne likvidovať. Obmedzené možnosti skládkovania a narastajúce ceny poplatkov za ukladanie odpadu na skládku ešte umocňujú trend odklonu k deštrukčným metódam.

Z tohto ohľadu sa nasledujúce tri podkapitoly venujú daným metódam pre následnú voľbu vhodného aparátu pre takéto spracovanie čistiarenskeho kalu.[21]

V súčasnosti sa dajú termické procesy rozdeliť do troch základných skupín a to spaľovanie, spoluspaľovanie a alternatívne procesy. Pri nich dochádza k značnému úbytku objemu aj hmotnosti, pričom sú zničené všetky patogénne mikroorganizmy, čo zabezpečuje hygienizáciu kalu.

#### **5.4.1 Monospaľovanie**

Monospaľovanie predstavuje deštrukčné spracovanie kalu v špecializovaných peciach, inak zvané aj monospaľovne. Prebieha tam oxidačná exotermická reakcia, pričom vzniknuté teplo je možné ďalej využiť. Obsah sušiny a obsah organických látok tvoria hlavnú spáliteľnú zložku a teda ich podiely primárne udávajú výhrevnosť kalu. Je teda vhodné ho pred spálením vysušiť. Hodnota výhrevnosti surového vysušeného kalu sa môže pohybovať od 14 do 20 MJ/kg. Po vyhniavaní respektíve stabilizácii sa v kale znižuje obsah organických látok a tým klesá aj jeho výhrevnosť na hodnoty od 8 do 13 MJ/kg. Táto závislosť je popísaná obrázkom č. 9 v kapitole zhrnutie bilancie. Príslušné legislatívne opatrenia sú samostatne popísané v kapitole 7 a 8.[18]

Výhody monospaľovania spočívajú v odstránení organického podielu z kalu, čím sa redukuje hmotnosť aj objem, možnosti spätného získania energie a možnosti spätného získania fosforu z popola. Nevýhodou sú hlavne cenové náklady na zariadenia jak na získavanie energie tak fosforu. Nevýhodou je tiež, že pri preprave zvyškov môže dôjsť k ďalšiemu znečisteniu.

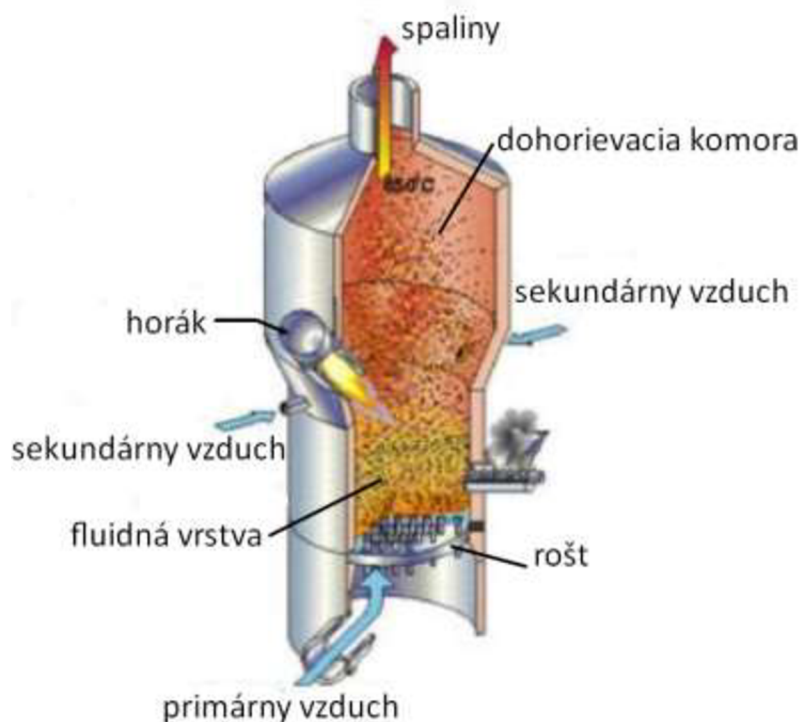
V nasledujúcich troch podkapitolách budú popísané možnosti voľby pecí vhodných pre spaľovanie kalu uvažujúc monospaľovňu.

##### **5.4.1.1 Fluidná pec**

Fluidná pec je izolovaná spaľovacia komora valcového tvaru uložená vertikálne. V spodnej časti je tryskový alebo keramický rošt. Spod neho je vháňaný primárny vzduch, ktorý vytvára fluidnú vrstvu kremičitého piesku. Tá vytvára vhodný rezervoár tepla pre spaľovací proces. Odvodnený alebo vysušený kal je rozprašovaný do fluidnej vrstvy, kde sa teplom vysušuje a pohybom vrstvy dezintegruje. Je vhodné aby bol kal už pred dávkovaním dostatočne vysušený pre jeho jednoduchšie rozprašenie do fluidnej vrstvy



aby sa zvýšila účinnosť procesu. Postupne sa celý organický podiel kalu spáli pri teplotách v peci, ktoré dosahujú okolo 700-800 °C. Nespálené zvyšky sa rozmieľajú o pieskovú fluidnú vrstvu na menšie časti až kým nedôjde k úletu. V hornej časti je udržiavaná teplota minimálne 850 °C a komora je rozšírená tak, aby pri danom prietoku vzduchu v nej bola zdržná doba 2 sekundy podľa podmienok prevádzky stacionárnych zdrojov tepelne spracovávajúcich odpad vo vyhlášky č. 415/2012 Sb. Výhody fluidnej pece spočívajú v nízkych hodnotách NO<sub>x</sub> a CO, potrebe relatívne malého prebytku vzduchu a flexibilitnosti prevádzky (nabíehanie a zastavovanie prevádzky). Táto technológia má majoritné zastúpenie medzi lídrami v oblasti monospaľovania čistiarenského kalu v Nemecku, Fínsku či Holandsku. Príklad fluidnej pece je uvedený na obrázku 2.[19] [20]

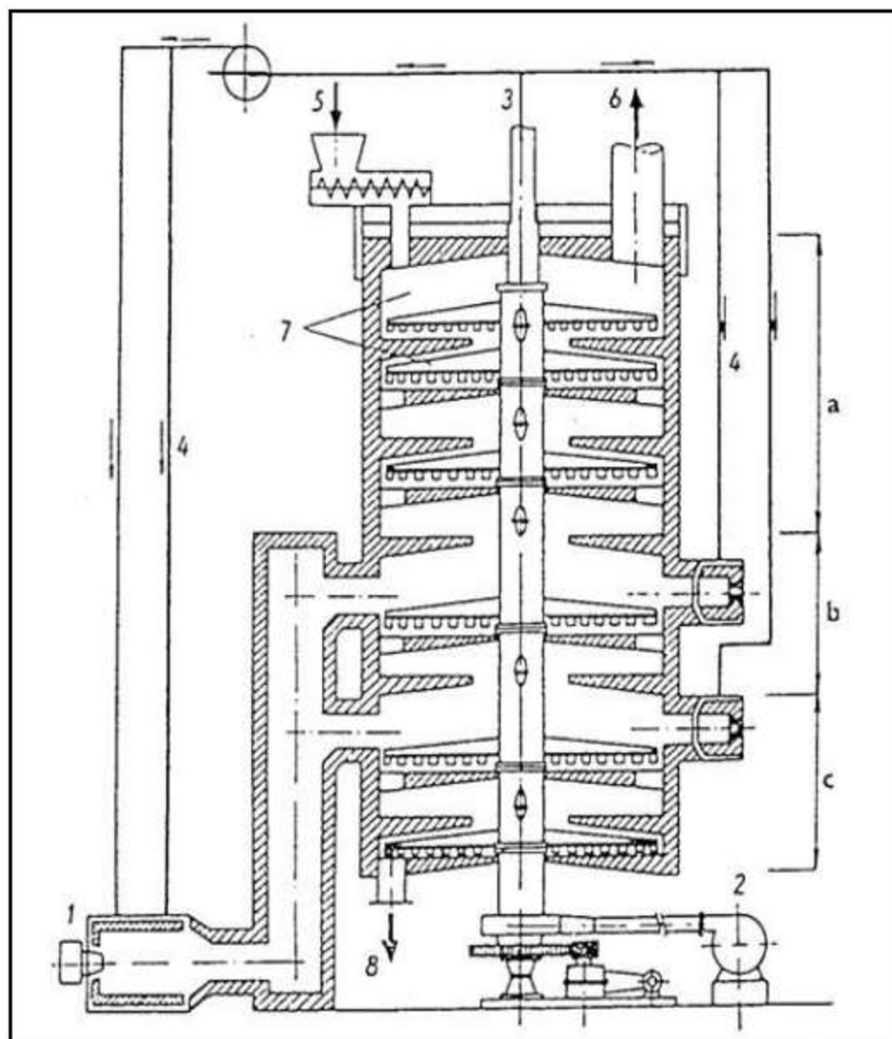


Obr. č. 3 Fluidná pec [14]

#### 5.4.1.2 Etážová pec

Etážová pec je z opisovanej skupiny monospaľovní konštrukčne najzložitejšia. Valcová konštrukcia pozostáva z niekoľkých poschodí či etáží, na ktorých je kal vysušovaný a spaľovaný. Stredom vedie kráľovský hriadeľ, ktorého ramená zasahujú do jednotlivých etáží a ich lopatky zhrabujú kal v špirálovitom smere po jednotlivých

poschodiach. Po obvode a v strede poschodí sú umiestnené otvory, do ktorých je kal zhrabávaný a tým prestupuje zhora nadol. Etážové pece sú navrhované ako súprude aj protiprúde s ohľadom na smer prúdenia spaľovacieho vzduchu. Vzhľadom na to, že sa kal vo vrchných poschodiach vysušuje, je možné do zariadenia dávkovať aj kal s vyšším obsahom vody oproti fluidnej peci, kde by inak mohlo byť problematické jeho rozprašovanie. Vhodne osvedčená je kombinácia fluidnej a etážovej pece, kedy sa etážová pec umiestni nad fluidnú pec. Po presušení v etážovej časti vysušený kal prepadáva do fluidnej vrstvy, kde sa spáli. Fluidné ohnisko má tendenciu byť objemovo menšie pri kombinovaných peciach, keďže doň padá už predsušený kal. Etážová pec samotná aj s jej kombináciou s fluidným ohniskom býva opatrená dohorievacou komorou na výstupe spalín. Na obrázku č. 4 je znázornená Etážová pec typu Lurgi. [15] [16]



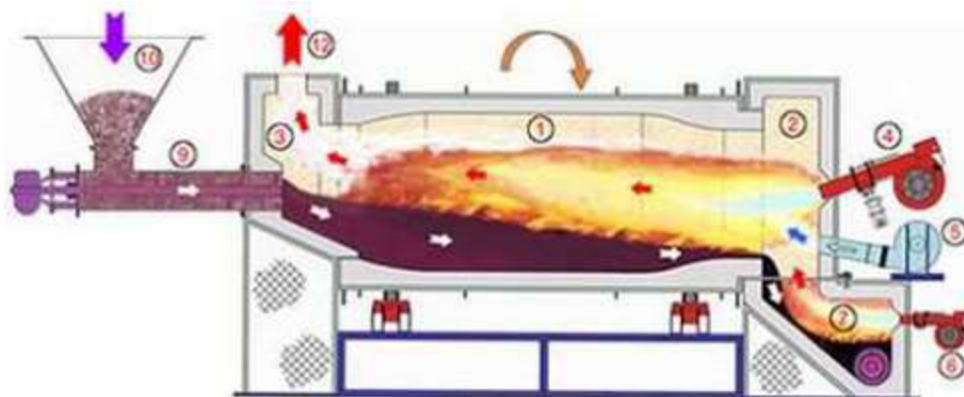
Obr. č. 4 Etážová pec [15]

a – sušiacie pásmo; b – spaľovacie pásmo; c – chladiace pásmo;  
1 – prídavné spaľovanie odpadových kvapalných palív; 2 – ventilátor chladiaceho vzduchu;  
3 – výstup ohriateho vzduchu; 4 – ohriaty vzduch do horáku; 5 – prívod odpadového materiálu; 6 – odvod  
plynných spalín; 7 – etáže sušiacieho pásma; 8 – odvod tuhých zvyškov po spaľovaní

### 5.4.1.3 Rotačná pec

Rotačná pec je oproti etážovej naopak konštrukčne najjednoduchšia. Jej telo tvorí valcový bubon s žiaruvzdornou výmurovkou. Bubon je horizontálne uložený s pár stupňovým náklonom pre zabezpečenie postupu kalu zariadením. Miešanie zabezpečuje pomalá rotácia zariadenia rádovo pár otáčok za minútu. Kombinovaný horák na plynné a olejové palivá môže byť umiestnený aj v prednej aj v zadnej časti, v závislosti či sa jedná o súprude alebo protiprúde zapojenie. Na výstupe spalín z pece je umiestnená dohorievacia komora, kde je opäť udržiavaná teplota minimálne 850 °C. Rotačné pece sa

zväčša využívajú pre spaľovanie priemyselných kalov a nebezpečných odpadov. Príklad protiprúdej rotačnej pece zobrazuje obrázok č. 5.



Obr. č. 5 Rotačná pec [17]

1. Hlavná komora, 2. Predná spaľovacia komora, 3. Zadná spaľovacia komora, 4. Hlavný horák, 5. Prívod primárneho vzduchu, 6. Horák dohorievacej komory, 7. Dohorievacia komora, 8. Pohon rotačnej pece, 9. Podávanie odpadu, 10. Prisun odpadu, 11. Prívod vzduchu v dohorievacej komore

#### 5.4.2 Spoluspaľovanie

Pre likvidáciu kalu je možné kal použiť ako prímies paliva do spaľovacieho procesu spaľovne odpadov, elektrární a teplární, a v neposlednom rade cementární.

V prvom spomenutom prípade je potrebné odvodniť kal nad 20 % obsahu sušiny aby sa nenarušil spaľovací proces. Zvýšenie obsahu sušiny v kale približne na obsah sušiny v komunálnom odpade, teda na 55-65 %, je vhodnejšie pre správny chod spaľovacieho procesu. Vysušený kal s obsahom sušiny cez 90 %, je možné do spaľovania dávkovať ako zmes so spaľovacím vzduchom alebo ho premiešať s odpadom. Len zahustený (neodvodnený) kal je možné dávkovať pod tlakom priamo do priestorov pece v hmotnostnom pomere 1:4 (kal, odpad). [21]

V elektrárňach a teplárnach pri spaľovaní hnedého uhlia je princíp dávkovania kalu do procesu podobný ako pri spoluspaľovaní s komunálnym odpadom. Odvodnený kal je pomiešaný s hnedým uhlím pred mletím, pričom podiel kalu predstavuje asi 1-5% spotreby uhlia. Pomletá zmes je následne pedsušená teplom spalín a spálená. Spaľovaním kalu môže nastať problém kontaminácie produktov čistenia spalín prípadne problém pri vysokom obsahu ortuti. [21]

Spoluspaľovanie kalu v cementárenských rotačných peciach sa z viacerých pohľadov javí ako relatívne výhodné. Vysoké teploty (1700°C – 2000°C), stabilita

procesu a dostatočná doba zdržania zabezpečujú dokonalý rozklad organických látok vrátane PCB a PCDD/F. Jedná sa o bezodpadovú technológiu. Popol z kalu je zachytávaný v slinku a vďaka podobnému zloženiu výrazne neovplyvňuje jeho výsledné vlastnosti. Do cementu môžu byť tiež v malých množstvách primiešavané odprašky z procesu, na ktorých sa zachytili prchavé latky ako ortuť. V silikátových mriežkach slinku sa zachytávajú ťažké kovy ale aj škodliviny ako síra či alkálie. Využitím potenciálu výhrevnosti alternatívnych palív v cementárňach dochádza k úspore fosílnych palív v tomto procese. Vysušený kal na obsah sušiny 90% sa jednoducho pomieša s čiernym uhlím a dávkuje do rotačnej pece. V rámci legislatívy Českej republiky príloha č. 4 vyhlášky 415/2012 Sb. uvádza emisné limity pre spaľovanie odpadu v cementárenských peciach.[21]

Výhodami spoluspaľovania sú úspora fosílnych palív, čo znižuje náklady. Nahradenie fosílnych palív znižuje množstvo oxidu uhličitého, keďže biomasa sa dá pokladať za klimaticky neutrálny materiál. Nevýhodou je, že nie je možné po spálení fosfor spätne získavať.

### 5.4.3 Sušenie kalu

Sušenie je termický proces, pri ktorom sa z tuhej látky oddeľuje obsiahnutá voda alebo iná kvapalina. Tento proces môže prebiehať buď vyparovaním, kedy sa musí byť teplota sušiaceho média vyššia ako teplota varu za daných podmienok alebo difúziou, ktorá je vyvolaná koncentračným spádom. V prípade druhého spomenutého mechanizmu musí byť parciálny tlak pár látky tvoriacej vlhkosť v sušiacom médiu nižší ako jej parciálny tlak na fázovom rozhraní. [33]

Výhodou sušenia kalu okrem následnej dobrej spáliteľnosti je redukcia jeho hmotnosti a objemu a zabezpečenie jeho hygienickej nezávadnosti. Oba tieto benefity zjednodušujú skladovanie prípadne transport. Vysušený kal je možné tiež aplikovať na pôdu pokiaľ splňuje príslušné legislatívne podmienky. [32]

Typy sušiarňí sa dajú rozdeliť podľa teploty procesu na nízkotepelné a vysokotepelné, kde je hraničná teplota 100°C a podľa formy predávania tepla na s priamym ohrevom, s nepriamym ohrevom a kombinovaná forma. Medzi nízkotepelnými je typická pásová sušička. Medzi vysokotepelné sušiarne patrí bubnová sušiareň a fluidná sušiareň. Používaná sušiareň s nepriamym ohrevom je napríklad

disková, ktorá je vhodnou kombináciou s fluidnou pecou. Za zmienku určite stoja aj solárne sušiarne, ktoré by mohli byť zaujímavou alternatívou z energetickej stránky procesu. Problematická sa zdá byť ich nízka priemerná spracovateľská kapacita. Solárne sušiarne zatiaľ v Českej republike nie sú prevádzkované kvôli legislatívnym obmedzeniam. Naopak ich výstavba bola v poslednej dobe iniciovaná v Nemecku.[32] [49]

Kapitola 9 popisuje navrhovaný koncept monospaľovne kalov, kde je uvažované sušenie kalov pomocou prúdu spalín zo spaľovania tohto kalu. Pre sušenie pomocou prúdu spalín je odporúčaná bubnová sušička [49]. Tá funguje vo vysokoteplotnom režime, takže spaliny ako sušiace médium stačí chladiť pod cca 350 °C. Pri použití priameho sušenia spalínami nie je potrebné do sústavy integrovať utilizačné teplosmenné zariadenia, čo ovplyvní výsledne investičné náklady. V nasledujúcej podkapitole bude popísané zvolené zariadenie.

#### **5.4.3.1 Rotační Bubnová sušička**

Rotačná bubnová sušička je zariadenie veľmi podobné rotačnej peci. Telo tvorí dutý valec, ktorého steny tvorí žiaruvzdorná výmurovka. Vďaka pomalej rotácii bubnu s jeho miernym náklonom kal postupne prechádza zariadením. Sušiace médium je vháňané do valca a je teda v priamom kontakte s kalom. Lopatky vnútri bubnu zabezpečujú premiešanie sušeného média. Zariadenie je možné prevádzkovať ako súprude aj protiprúde podľa požiadaviek procesu. Teploty by sa vnútri mali pohybovať okolo 200-350 °C. Pri priamom kontakte kalu a sušiaceho média sa aj pri sušení dostávajú do sušiaceho média nečistoty, ktoré je potrebné vyčistiť. Príklad bubnovej sušičky na kal zobrazuje obrázok 6.





*Obr. 6 Rotačná bubnová sušička kalu [47]*

## 6 PROBLEMATIKA FOSFORU

Pre dnešný spôsob veľkoplošného poľnohospodárstva je fosfátová ruda absolútne nenahraditeľná. Uvádza sa, že až 90% svetovej produkcie fosforu z nerastných zdrojov je použitých na výrobu hnojív. Rovnako ako už bolo uvedené, Európa importuje viac ako 90% svojej spotreby fosforu. Stabilita dodávok by teda mohla byť ľahko otázná, s ohľadom aj na možné výkyvy cien. Určite to má súvis so svetovými zásobami fosforu ako aj jeho kvalitou. Informácie a predpoklady o momentálnom stave svetových zásob majú značný rozptyl. Uvádza sa od 15 miliónov ton do 1000 miliónov ton fosfátovej rudy. S tým priamo súvisia aj odhady, kedy zásoby fosfátu prípadne dôjdu. Štúdie uvádzajú relevantný údaj od 100 do 300 rokov, avšak najextrémnejšie odhady sú asi 25 rokov. Suverénne najväčšie zásoby fosfátu oproti ostatným štátom podľa tabuľky č. 1 má Maroko. To je pre Európu najväčším dodávateľom. Tu prichádza na rad otázka kvality. Fosfátová ruda zvykne obsahovať kadmium, na ktoré sa sprísňujú limity v hnojivách. Práve ložiská v Maroku obsahujú vyššie množstvá tohto škodlivého ťažkého kovu, čo pravdepodobne zapríčini odklon k Ruským zdrojom.[24]

Tab. č. 1 Ťažba fosfátovej rudy a predpokladané zásoby

Ťažba a zásoby fosfátovej rudy	ťažba 2016	zásoby
	milión ton	milión ton
Čína	138	3 100
Maroko a Západná Sahara	30	50 000
USA (Florida, Severná Karolína)	27,8	1 100
Rusko	11,6	1 300
Jordánsko	8,3	1 200
Brazília	6,5	320
Egypt	5,5	1 200
Saudská Arábie	4	680
Peru	4	820
Izrael	2,5	130
Tunis	3,5	100
Vietnam	2,8	30
Austrálie	2,5	1 100
Ďalšie krajiny	13	8215
<b>SPOLU</b>	<b>261</b>	<b>69 295</b>



## 6.1 Spätné získavanie fosforu

Spätné získavanie fosforu z kalov by odhadom mohlo pokryť až 30 % dopytu po fosforečných hnojivách v rámci Európskej únie. Niektoré západné krajiny ako napríklad Nemecko majú už legislatívne podmienenú povinnosť spätné získavať fosfor z komunálnych odpadných vôd.[24]

Metód spätného získavania fosforu bolo vyvinutých už viac ako 50. Dajú sa rozdeliť do troch základných skupín a to získavanie z kalovej vody, z kalu a z popola.[40]

Spätné získavanie fosforu z kalovej vody je zabezpečené zrážaním amónnych čínidiel vo forme struvitu. Struvit je biela, nahnedlá alebo nažltnutá látka nerozpustná vo vode. Proces zrážania je regulovaný v prostredí o kyslosti 7 až 9,5. Minimálny odhadovaný podiel fosforu v kalovej vode je 50 až 60 mg/l aby sa touto metodikou zachytilo relevantné množstvo fosforu. Tieto metódy majú relatívne nízku účinnosť spätného získavania a to do 40 %. Technológie používané pre získavanie fosforu vo zachyteného v struvite sú napríklad OSTRAL PEARL, PRISA, STRUVIA alebo AIR PREX. [24][40]

Spätné získavanie fosforu z kalu je možné tiež prostredníctvom zrážania do struvitu za pomoci minerálnych kyselín. Tento proces využíva napríklad technológia GRIFHORN alebo STUTTGART. Účinnosť spätného získavania týchto technológií sa pohybuje do 50 %.[40] Za technológiu spätného získavania fosforu z kalu by sa dala čiastočne považovať aj pyrolýza. Vzniknutý biochar je možné pri splnení legislatívnych podmienok o hnojivách aplikovať do pôdy. Splnenie legislatívnych podmienok môže naraziť na obsah ťažkých kovov, ktoré sa v procese v biochare koncentrujú. Z tohto ohľadu je kľúčový obsah ťažkých kovov na vstupe do procesu pre ďalšie využitie.[24]

Spätné získavanie fosforu z popola je možné len pri použití monospaľovnia, teda nie je možné recyklovať fosfor z popola zo spoločných procesov. Z tohto dôvodu je venovaná tejto problematike nasledujúca kapitola.

### 6.1.1 Spätné získavanie fosforu z popola

Spätné získavanie fosforu z popola je podľa dostupných informácií najúčinnější spôsob spätného získavania fosforu. Podiel spätné získaného fosforu z kalu činí približne 90 %, čo je omnoho viac ako v prípade predošlých metód. Popolový fosfátový koncentrát

obsahuje fosfor v podobe  $P_2O_5$ , ktorý je veľmi podobný ťaženej fosfátovej rude, prípadne iné formy ako  $Ca_3(PO_4)_2$  či  $AlPO_4$ , ktoré sú biologicky využiteľné. Popol z procesu je obohatený aj ďalšími nutričnými zložkami ako napríklad  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MgO$  alebo  $K_2O$ . [51]

ASHDEC a LEACHPHOS sú známe technológie určené k tomuto procesu. V nasledujúcej podkapitole bude popísaná prvá spomenutá technológia z nižšie uvedených dôvodov.

#### **6.1.1.1 ASHDEC technológia**

Táto technológia využíva pri spätnom získavaní fosforu reaktor v podobe rotačnej pece, ktorý musí byť vyhrievaný zemným plynom. Teplota v peci je udržiavaná optimálne okolo  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Do teploty  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  by sa mal fosfor stabilne držať v popole počas spaľovania. Parametre tohto procesu sa vcelku zhodujú s možnými parametrami spaľovania vysušeného kalu, pričom aj zariadenie v ktorom tento proces prebieha je rovnaké. Z tohto ohľadu bude proces spätného získavania fosforu pokusne integrovaný do spaľovacieho procesu pre overenie takejto možnosti získania fosforu.

Technológia fungovania systému ASHDEC spočíva v dávkovaní prehriateho alkalického činidla do popola, s ktorým je premiešaný. Následne pri teplote do  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  nahradí alkalická zložka v popole ťažké kovy, ktoré sú vytlačené do plynnej fáze v ktorej sú odvádzané preč. [51]

## 7 LEGISLATÍVA NAKLADANIA S KALOM EU

Česká republika vstúpila do Európskej únie 1. Mája 2004 a ako nový štát sa musela prispôbiť svoj právny poriadok poriadku tohto spoločenstva. Aj po vstupe ročne prichádzajú stovky právnych noriem, ktoré musí česká republika implementovať do svojho právneho poriadku. Tieto akty sú vydávané v podobe nariadení, ktoré prichádzajú do platnosti ihneď po uvedení a smerníc, ktoré dávajú členským štátom časovú lehotu pre splnenie danej právnej normy.

V súvislosti s nakladaním s kalom je možné uvažovať 3 základné spôsoby a to uloženie kalu na pôdu, skládkovanie a termické procesy. Príslušné smernice k tomuto nakladaniu popisujú stručne nasledujúce odstavce.

Smernica rady 1999/31/ES z 26. apríla 1999 o skládkach odpadov rieši okrem iného aj obmedzenie ukladania biologicky odbúrateľných komunálnych odpadov na skládku, čo sa priamo dotýka čistiarenskeho kalu. V článku 4 sú popísané jednotlivé hraničné obdobia, kedy je potrebné dosiahnuť zníženie množstva ukladania tohoto odpadu na skládku. Česká republika by aktuálne nemala presiahnuť 35% hmotnosti biologicky odbúrateľného odpadu ukladaneho na skládku oproti produkcii v roku 1995. Jedným z dôvodov je vznik metánu na takýchto skládkach, čo prispieva k hromadeniu skleníkových plynov v atmosfére.[42]

Ukladanie splaškových kalov na pôdu rieši smernica rady 86/278/EHS z 12. Júna 1986, kde sa udávajú hlavne limity ťažkých kovov pri kaloch použitých v poľnohospodárstve. Mikrobiologické parametre rieši nariadenie (ES) č. 208/2006, ktorým sa mení príloha 6 a 8 nariadenia (ES) č. 1774/2002, čím sa sprísnil nároky na mikrobiologické parametre kalu aplikovaného na pôdu. Tieto hodnoty sú v súlade s legislatívnymi mikrobiologickými parametrami hnojív aj kompostu v Českej republike.[44] [43]

Aktuálne najpodstatnejším dokumentom ohľadom spaľovania a spoluspaľovania odpadov je smernica Európskeho parlamentu a rady 2000/76/ES. Podľa rozsahu pôsobnosti tejto smernice uvedenej v článku 2 táto smernica monospaľovne kalu plne zahŕňa. Smernica uvádza prevádzkové podmienky pri spaľovaní, limitné hodnoty emisií do ovzdušia aj limitné hodnoty pre výpuste vôd z čistenia spalín, ktoré sú plne v súlade

s legislatívou v České republice. Smernica 2010/75/EÚ o priemyselných emisiách uvádza , že s cieľom zníženia znečisťovania z priemyselnej činnosti by mala prebehnúť výmena informácií o najlepších dostupných technológiách a na základe toho vypracovať referenčný (BAT) dokument o týchto technológiách. [45] [46]

## 8 LEGISLATÍVA NAKLADANIA S KALOM V ČR

V nasledujúcej časti bude popísaný obsah zákonov a vyhlášok, ktoré sa dotýkajú nakladania s čistiarenským kalom, so zameraním na jeho spaľovanie.

### 8.1 Zákon č. 185/2001 o odpadoch

V oblasti nakladania s kalom je aktuálne určujúci zákon č. 185/2001 o odpadoch. §25 určuje kaly z čističiek odpadných vôd a ďalšie biologicky rozložiteľné odpady ako kategóriu vybraných výrobkov, vybraných odpadov a vybraných zariadení pre účely tohto zákona. Podrobnejšie sú tieto vybrané odpady popísané v §32 kde je uvedená aj definícia čistiarenského kalu. [23]

Ďalej §33 hovorí o povinnostiach pri používaní kalov. Podľa neho osoba ktorá užíva pôdu je povinná používať len upravené kaly s ohľadom na nutričné potreby rastlín a v súlade s programom použitia kalov tak, aby tým nebola zhoršená kvalita pôdy a kvalita povrchových a podzemných vôd. V Zákone sú popísané jednotlivé vyhlášky od ministerstiev, ktoré sú podľa tohto zákona povinné riešiť uvedený zoznam požiadaviek v súvislosti s kalom:

- a) *technické podmienky použitia upravených kalů na zemědělské půdě,*
- b) *mezni hodnoty koncentraci vybraných rizikových látek v půdě,*
- c) *mezni hodnoty koncentraci těžkých kovů, které mohou být přidány do zemědělské půdy za 10 let,*
- d) *mezni hodnoty koncentraci vybraných rizikových látek v kalech pro použití na zemědělské půdě,*
- e) *mikrobiologická kritéria pro použití kalů,*
- f) *postupy analýzy kalů a půdy, včetně metod odběru vzorků,*
- g) *obsah programu použití kalů,*
- h) *technické požadavky na úpravu kalů a požadavky na ověření účinnosti technologie úpravy kalů,*
- i) *podmínky skladování upravených kalů a podmínky dočasného uložení upravených kalů před jejich použitím. [23]*

O termickom spracovaní v tomto zákone hovorí §22 , a to že odpad môže byť spaľovaný pokiaľ je dodržaný zákon 201/2012 Sb. o ovzduší a zákon 406/2000 Sb. o hospodárení energií.

§23 určuje za akých podmienok je ešte odpad energeticky využívaný a kedy ide len o odstránenie odpadu. V prílohe 3. sú kategorizované spôsoby využívania a

odstraňovania odpadu. Kategória R1 predstavuje využitie odpadu ako paliva alebo obdobným spôsobom za účelom výroby energie. Pre zaradenie do tejto kategórie je potrebné splňovať určitú efektivitu spaľovania. V prílohe 12. tohto zákona je daná účinnosť 65% pre zariadenia ktoré dostali súhlas s prevádzkou od roku 2009. Postup výpočtu účinnosti z prílohy 12. je daný vzorcom 1. V prípade, že navrhované zariadenie danú účinnosť nespĺňa je zaradené do D kategórie, konkrétne spaľovanie na pevnine. §23 doslovne hovorí, že pri kategórii R1 je odpad spaľovaný v spaľovni komunálneho odpadu. Definícia komunálneho odpadu ukazuje na katalóg odpadu, kde sú čistiarenské kalý v kategórii 19 a komunálny odpad je kategória 20. Z tohto ohľadu by spaľovanie čistiarenských kalov bolo nutné zaradiť do kategórie D10.

$$R_1 = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0,97 \cdot (E_w + E_f)} \quad (1)$$

Kde:  $R_1$  je energetická účinnosť [-],

$E_p$  je ročné množstvo vyrobenej energie vo forme tepla alebo elektriny [GJ·rok<sup>-1</sup>],

$E_f$  je ročný energetický vstup z palív prispievajúcich k výrobe pary [GJ·rok<sup>-1</sup>],

$E_i$  je ročná dodaná energia bez  $E_w$  a  $E_f$  [GJ·rok<sup>-1</sup>],

$E_w$  je ročné množstvo energie obsiahnuté v spracovávaných odpadoch vypočítané za použitia nižšej čistej výhrevnosti odpadu [GJ·rok<sup>-1</sup>].

0,97 je činiteľom energetických strát v dôsledku odvodu tepla popolom a vyžarovaním

## 8.2 Vyhláška č. 437/2016 Sb. o použití upravených kalov na poľnohospodárskej pôde

Vyhláška č. 437/2016 Sb. a jej novela vyhláška č. 305/2019 Sb. je najaktuálnejšia, čo sa týka použitia upravených kalov na poľnohospodárskej pôde a rieši prakticky všetky požiadavky použitia kalov podľa zákona o odpadoch uvedených na predošlej strane. Keďže je táto aplikácia podľa grafu na obrázku č. 2 najviac obsiahnutá v Českej republike, je táto vyhláška prakticky najinvasívnejšia, vzhľadom na obmedzenia použitia čistiarenských kalov. Ako už bolo spomenuté v kapitole 5.1, vyhláška uvádzala koniec prechodnej doby na 31. decembra 2019. Pre nemožnosť dosiahnutia tohto termínu bol koniec prechodnej doby posunutý novelizáciou vyhlášky o 3 roky, teda na 31. decembra 2022. Ustanovenia prechodnej doby sa týkajú hlavne mikrobiálnych parametrov kalu a teda jeho hygienizácie. Po prechodnom období už nebude možné aplikovať kal na akúkoľvek pôdu, ak presiahne limitné hodnoty tabuľky 2. V súčasnosti v rámci prechodného obdobia zostal kal rozdelený do dvoch kategórií podľa tabuľky 3 a 4. Prítomnosť termotolerantných koliformných baktérií, mikroorganizmov *Escherichia coli* a fekálnych streptokokov (enterokoky), ktoré zobrazujú tabuľky 2 až 4, indikuje prítomnosť fekálií, teda patogénnych mikroorganizmov a vírusov z tráviaceho traktu.

§12 ďalej určuje možnosti a podmienky použitia kalu kategórie 2. Vyhláškou sa tiež určili požiadavky na účinnosť zariadenia pre hygienizáciu v §10, ktoré predstavujú zníženie množstva kolónie tvoriacich jednotiek o  $10^5$  v produkte oproti vstupu pre mikroorganizmy *Escherichia coli* aj enterokoky. V rámci aplikácie kalu ako odpadu do pôdy má toto spracovanie podľa zákona o odpadoch označenie R10.[22] [5]

Tab. č. 2 Mikrobiologické kritéria pre upravený kal pre aplikáciu na poľnohospodársku pôdu [5]

Indikátorový mikroorganizmus	Jednotky	Počet skúšaných vzorkov pri každej kontrole výstupu	Limitní hodnota (nález/ KTJ*)
Salmonella spp.	nález v 50 g	5	negatívny
Escherichia coli a Enterokoky	KTJ* v 1 g	5	4
			1
			$< 10^3$
			$< 5 \cdot 10^3$

\* KTJ - kolóniu tvoriace jednotky

Tab. č. 3 Mikrobiologické kritéria pre upravený kal kategórie 1 pre aplikáciu na poľnohospodársku pôdu v prechodnom období [5]

Indikátorový mikroorganizmus	Jednotky	Počet skúšaných vzorkov pri každej kontrole výstupu	Limitní hodnota (nález/ KTJ*)
Salmonella spp.	nález v 1 g sušiny	5	negatívny
Termotolerantné koliformné baktérie	KTJ* v 1 g sušiny	5	$< 10^3$
Enterokoky	KTJ* v 1 g sušiny	5	$< 10^3$

\* KTJ - kolóniu tvoriace jednotky

Tab. č. 4 Mikrobiologické kritéria pre upravený kal kategórie 2 pre aplikáciu na poľnohospodársku pôdu v prechodnom období [5]

Indikátorový mikroorganizmus	Jednotky	Počet skúšaných vzorkov pri každej kontrole výstupu	Limitní hodnota (nález/ KTJ*)
Salmonella spp.	nález v 1 g sušiny	5	negatívny
Termotolerantné koliformné baktérie	KTJ* v 1 g sušiny	5	$10^3 - 10^6$
Enterokoky	KTJ* v 1 g sušiny	5	$10^3 - 10^6$

\* KTJ - kolóniu tvoriace jednotky

### 8.3 Vyhláška č. 383/2001 Sb. o podrobnostiach nakladania z odpadom

V rámci zaznamenávania údajov je osoba, ktorá prevádzkuje alebo žiada o súhlas na prevádzku zariadenia na spracovávanie kalu, povinná viesť pravidelnú ročnú evidenciu o nakladaní s odpadom podľa prílohy č. 20 tejto vyhlášky. Prevádzkovateľ zariadenia na spracovanie kalov je povinný ohlásiť prevádzku zariadenia podľa prílohy 22. tejto vyhlášky.

## **8.4 Zákon č. 201/2012 Sb. o ochrane ovzduší**

Zákon o ochrane ovzdušia má priamy súvis so spaľovacími zariadeniami. Spaľovanie odpadu sa teda musí riadiť týmto zákonom. Zákon o ovzduší nedefinuje pojem odpad. V tomto prípade platí definícia v plnom znení uvedená v zákone o odpadoch. Zákon o ochrane ovzdušia rovnako nedefinuje ani pojem alternatívne palivá. Z tohto ohľadu je spaľovanie aj spoluspaľovanie kalov v zmysle tohto zákona zaradené do kategórie tepelné spracovanie odpadu. Na tomto zaradení sa zhodol jak odbor ochrany životného prostredia tak odbor odpadu Ministerstva životného prostredia. [41] Toto zaradenie určuje kód vymenovaného stacionárneho zdroja, podľa prílohy 2 tohto zákona na 2.1. a teda tepelné spracovanie odpadu v spaľovniach. Z tohto ohľadu je podľa príslušnej tabuľky potrebné vypracovať rozptylovú štúdiu, vyžadované kompenzačné opatrenia a prevádzkový poriadok podľa §11. Vyhláška č. 415/2012 Sb. o prípustnej úrovni znečistenia a jej zisťovaní popísaná v ďalšej kapitole, ako vykonávací právny predpis pre zákon o ovzduší, stanovuje špecifické aj všeobecné emisné limity pre stacionárne zariadenia podľa §4. V štvrtej časti §17 popisuje povinnosti pre prevádzkovateľa stacionárneho zdroja.

## **8.5 Vyhláška č. 415/2012 o prípustnej úrovni znečistení a jej zisťovaní**

Kategorizácia spaľovacieho zariadenia v rámci danej vyhlášky je potrebná pre ďalší postup určovania príslušných dovolených emisií. Vzhľadom na fakt, že v súčasnosti prakticky monospaľovne čistiarenských kalov nemajú zastúpenie v Českej republike, legislatíva zatiaľ nemá v tomto smere unikátnu kategóriu. Najbližšie je teda možné monospaľovne čistiarenských kalov zaradiť medzi stacionárne zdroje tepelne spracovávajúce odpad prípadne zdroje tepelne spracovávajúce odpad s palivom.

Vyhláška uvádza v druhej časti spôsob, podmienky zisťovania znečistenia a jeho vyhodnotenie jak pre jednorazové tak kontinuálne meranie. Jednorazové meranie je uskutočňované po uvedení do prevádzky, po zmene paliva či odpadu alebo po zásahu do konštrukcie, v prípade že by mohol mať zásah vplyv na produkciu emisií. Pravidelné jednorazové merania pre spaľovanie odpadu sú určené na 2 krát ročne s tým, že prvý rok je to 4 krát ročne. Vyhodnotenie tohto merania by malo obsahovať údaje o hmotnostnej koncentrácii znečisťujúcej látky, jej hmotnostnom toku a mernej výrobnjej emisii aby to bolo možné porovnať s emisnými limitmi. §6 udáva podmienky ,za ktorých sa považuje emisný limit za dodržaný.

Príloha č. 4 tejto vyhlášky uvádza emisné limity pre spaľovanie odpadu. Pre príslušné jednorazové merania je určujúcou tabuľka 4.



Tab. č. 5 Emisné limity pre znečisťujúce látky zisťované primárne jednorazovým meraním

Znečisťujúce látky	Emisný limit
Cd+Tl a ich zlúčeniny	0,05 mg.m <sup>-3</sup>
Hg a jej zlúčeniny	0,05 mg.m <sup>-3</sup>
Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V a ich zlúčeniny	0,5 mg.m <sup>-3</sup>
PCDD/F	0,1 ng TEQ. m <sup>-3</sup>

Ďalej je daný spôsob a podmienky zisťovania úrovne znečisťovania kontinuálnym meraním a vyhodnotenie plnenia emisných limitov týmto meraním v §9.

Vyššie spomínané špecifické emisné limity sú dané v tabuľke 6, ktorú uvádza táto vyhláška v prílohe č. 4, pre kontinuálne meranie emisií spaľovni odpadu. V prípade jednorazového merania emisií látok v tabuľke 6 sa za emisný limit považujú denné priemery. Dané limity sú vzťahnuté k celkovej menovitej kapacite a na normálne podmienky suchého plynu pri referenčnom obsahu kyslíku 11%. Normálne podmienky predstavujú atmosférický tlak a 0 °C, pričom ich prepočet sa vykonáva pomocou stavovej rovnice. Prepočet na referenčný obsah kyslíku je daný vzorcom 2:

$$C_{ref,A} [mg \cdot m_N^{-3}] = C_{real,A} [mg \cdot m_N^{-3}] \frac{21 \% - C_{ref,O_2} [\%]}{21 \% - C_{real,O_2} [\%]} \quad (2)$$

Kde:  $C_{ref,A}$  koncentrácia látky A prepočítaná na referenčný kyslík [mg · m<sub>N</sub><sup>-3</sup>],

$C_{real,A}$  koncentrácia látky A nameraná [mg · m<sub>N</sub><sup>-3</sup>],  
 $C_{ref,O_2}$  referenčná koncentrácia kyslíku (11 %) [%],  
 $C_{real,O_2}$  skutočná koncentrácia kyslíku v spalinách [%].

Tab. č. 6 Emisné limity pre znečisťujúce látky zisťované primárne kontinuálnym meraním

Znečisťujúca látka	Emisný limit <sup>1)</sup> [mg.m <sup>-3</sup> ]			
	Denný priemer	Polhodinový priemer		10 minútový priemer
		97%	100%	95%
TZL	10	10	30	
NO <sub>x</sub>	200	200	400	
SO <sub>2</sub>	50	50	200	
TOC	10	10	20	
HCL	10	10	60	
HF	1	2	4	
CO	50		100 <sup>2)</sup>	150 <sup>2)</sup>

Vysvetlivky:

- 1) V prípade poruchy nesmú byť za žiadnych okolností prekročené špecifické emisné limity pre celkový organický uhlík a oxid uhľnatý stanovené podľa tejto tabuľky a koncentrácia tuhých znečisťujúcich látok 150 mg.m<sup>-3</sup>, vyjadrené ako priemerné polhodinové hodnoty.
- 2) Pre spaľovne odpadu s fluidnou vrstvou môže príslušný orgán povoliť výnimky z emisných limitov pre CO, pokiaľ v povolení prevádzky súčasne stanoví emisný limit vyjadrený ako priemerná hodinová hodnota najviac 100 mg.m<sup>-3</sup> [37]

Vyhláška ďalej určuje spôsob merania tmavosti dymu podľa Ringelmannovej stupnice, pričom je potrebné dosiahnuť druhý stupeň, teda 40% čiernej farby na bielom podklade pri porovnávaní odtieňov. §12 uvádza možnosti zisťovania emisií výpočtom pomocou bilancie procesu, emisného faktoru alebo súčinom merných výrobných emisií.

Piata časť tejto vyhlášky popisuje povinnosti v oblasti tepelného spracovania odpadu. §20 ukazuje na prílohu č. 4 tejto vyhlášky, kde sú uvedené špecifické emisné limity pre spracovanie odpadu. Bod 3 ďalej uvádza, že pre zariadenia spaľujúce odpad s palivom s menovitým príkonom nad 50 MW je potrebné splniť aspoň určitý stupeň odsírenia miesto špecifických limitov, čiže musí byť splnený aspoň minimálny pomer síry odlúčenej v mieste spaľovacieho stacionárneho zdroja v danom časovom úseku k hmotnosti síry obsiahnutej v palive, ktorá je do spaľovacieho zariadenia privedená v rovnakom časovom úseku. Hodnoty stupňa odsírenia pre zariadenia aktuálne uvedené na trh sú dané v tabuľke 7.[37]

Tab. č. 7 Stupeň odsírenia pre spaľovacie zariadenia nad 50 MW [37]

Celkový menovitý tepelný príkon [MW]	Stupeň odsírenia [%]
50-100	93
100-300	93
>300	97

Príloha č. 4 ďalej uvádza emisné limity pre spaľovanie odpadu spolu s palivom s výnimkou spaľovania odpadu a spaľovania odpadu v cementárenských peciach. Práve do tejto kategórie by mohla byť monospaľovňa kalu aktuálne kategorizovaná. Emisné limity sú opäť vzťahované na normálne stavové podmienky, teda atmosférický tlak a 0 °C, suchý plyn a referenčný obsah kyslíku. V prípade tuhých palív je referenčná hodnota 6%. Emisné limity pre TZL, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, TOC, HCL sa pre túto kategóriu počítajú podľa vzorca 3.

$$C = \frac{(V_{odpad} \cdot C_{odpad}) + (V_{proc} \cdot C_{proc})}{V_{odpad} + V_{proc}} \quad (3)$$

Kde : C sú počítané emisné limity ako denný priemer [mg.m<sup>-3</sup>],

V<sub>odpad</sub> objem odpadného plynu vzniknutého len tepelným spracovaním odpadu, stanovený podľa odpadu s najnižšou výhrevnosťou špecifikovanom v povolení a prepočítaný na príslušné podmienky [m<sup>-3</sup>],

C<sub>odpad</sub> emisné limity dané v tabuľke 6 [mg.m<sup>-3</sup>],

V<sub>proc</sub> objem odpadného plynu vzniknutého len spaľovaním palív, na základe referenčného obsahu kyslíku [m<sup>-3</sup>],

C<sub>proc</sub> aktuálne emisné limity stanovené tabuľkou 8, v prípade ak potrebné hodnoty nie sú stanovené použijú sa skutočné hmotnostné koncentrácie. [mg.m<sup>-3</sup>],

Tab. č. 8 Hodnoty C<sub>proc</sub> pre spaľovacie stacionárne zdroje [37]

Druh paliva	Hodnoty C <sub>proc</sub> [mg.m <sup>-3</sup> ]					
	< 50 MW			50 - 100 MW		
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TZL
Pevné palivo všeobecne	-	-	50	400	300	20

Limitná hodnota C<sub>proc</sub> pre HCl je daná v prípade spaľovacích stacionárnych zdrojov na 50 mg.m<sup>-3</sup>. Súčasne s vypočítanými koncentraciami podľa vzorca 3 musia byť splnené aj limity ťažkých kovov a PCDD/F uvedené v tabuľke 5. pri referenčnom obsahu kyslíka

6% v prípade tuhých palív. Vysvetlivky k celej tabuľke 8 vo vyhláške určujú emisné limity pre spaľovanie vo fluidnej vrstve, čo naznačuje správnosť kategorizácie monospaľovne čistiarenskeho kalu.

Posledná časť prílohy 4. obsahuje technické podmienky prevádzky stacionárnych zdrojov tepelne spracovávajúcich odpad. Zásobník odpadu je potrebné skonštruovať tak, aby v ňom bol udržiavaný podtlak a odsávaný vzduch bol privádzaný do spaľovania. Počas spaľovania musí byť zaistená dostatočná doba zdržania pre dokonalé vyhorenie, aby troska a popol obsahovali menej ako 3% organického uhlíku, alebo aby strata žíhaním bola menšia ako 5% suchého materiálu. Ďalej je potrebné zabezpečiť aby odpadný plyn za posledným prívodom spaľovacieho vzduchu dosahoval aj pri najmenej priaznivých podmienkach v celom priereze teplotu najmenej 850 °C po dobu dvoch sekúnd. Teplota sa meria na dostatočne reprezentatívnom mieste blízko vnútornej steny. Ďalší bod uvádza potrebu inštalácie automatických horákov pre zabezpečenie udržania dostatočnej teploty pri nabíhaní a odstavení spaľovne pre dokonalé vyhorenie odpadu. Rovnako je potrebné inštalovať automatický horák pre prípadné udržanie teploty v dohorievacej komore nad 850 °C. Za predpokladu dodržania podmienok stanovených touto vyhláškou, je možné modifikovať technické podmienky prevádzky pre konkrétne odpady a tepelné spracovania, pokiaľ to nepovedie k zvyšovaniu emisií oproti uvedeným podmienkam.

§26 tejto vyhlášky popisuje obsahové náležitosti dokumentov a rozsah ohlasovaných údajov v rámci integrovaného systému plnenia ohlasovacích povinností.

## **8.6 Zákon č. 156/1998 Sb. o hnojivách**

Fosfor získaný z čistiarenských kalov by mal byť podľa aktuálneho dopytu využívaný do hnojív. Zákon o hnojivách uvádza potrebu ohlasovať a registrovať hnojivá na Ústrednom kontrolnom a skúšobnom ústave poľnohospodárstva. Ďalej hovorí o povinnostiach pri balení skladovaní a označovaní. §3 odkazuje na vykonávací právny predpis vyhlášku č. 474/2000 Sb, ktorá bola novelizovaná vyhláškou č. 237/2017 Sb, a ktorá udáva rizikové prvky a ich limitné hodnoty v hnojivách ako aj dlhý zoznam rôznych typov hnojív. Príloha číslo 1 tejto vyhlášky stanovuje medzi minerálnymi hnojivami aj limitné hodnoty prvkov z popola biomasy.

## 9 KONCEPT MONOSPALŔOVNE ČISTIARENSKÝCH KALOV

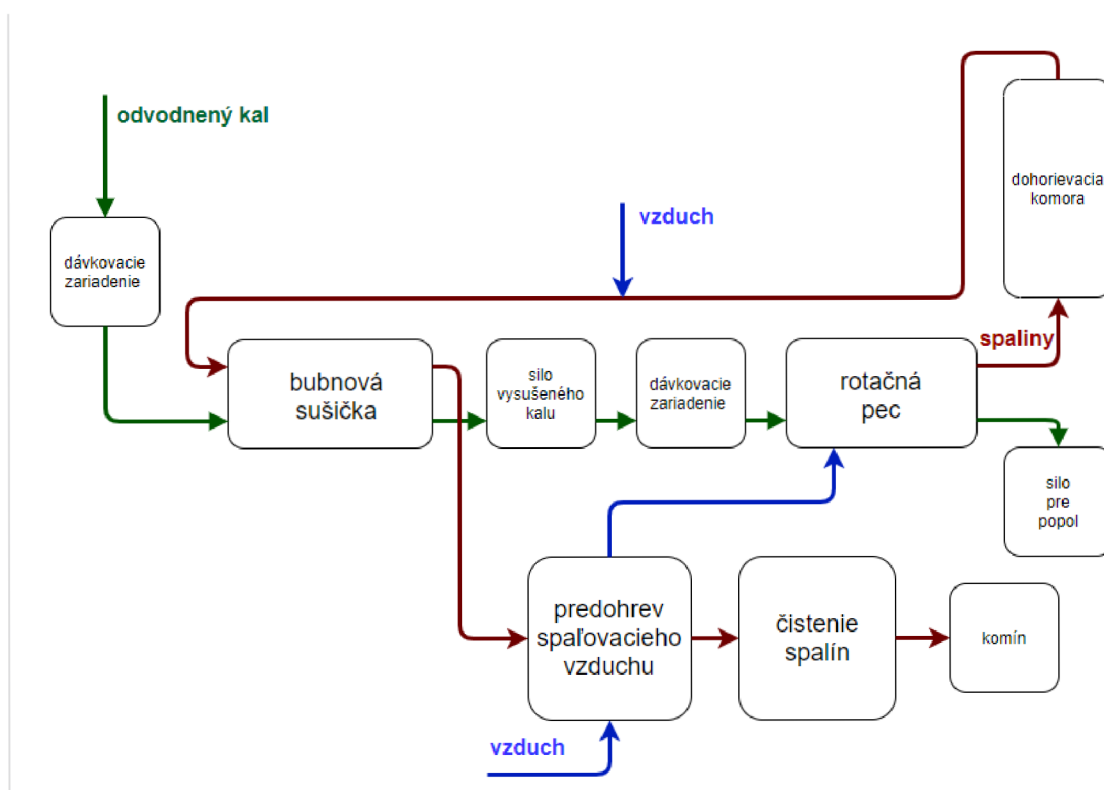
Prioritou navrhovaného zariadenia je likvidácia odvodneného čistiarenského kalu s využitím čo možno najväčšieho potenciálu v rámci výhrevnosti a spätného získavania fosforu.

Voľbou hlavného spaľovacieho zariadenia je rotačná pec. Ako popisuje kapitola o systéme ASHDEC, pre spätné získavanie fosforu z popola je použitý rovnaký aparát, ktorý umožňuje spaľovanie kalov, podľa spaľovacích skúšok poskytnutých firmou EVECO, teda rotačná pec. Užitie jedného aparátu pre oba tieto procesy pri dvojfázovej prevádzke by ušetrilo značnú časť investičných aj prevádzkových nákladov. Do rotačnej pece bude striedavo v určitých dlhších periódach dávkovaný vysušený kal a popol z vysušeného kalu prípadne ich zmes. V prvej fáze bude popol z vysušeného kalu po spálení odvádzaný do sila pre popol a v druhej fáze bude popol z tohto sila naspäť dávkovaný do pece spolu s predhriatým alkalickým činidlom, pričom sa z popola uvoľní fosfor v biologicky využiteľnej forme. Jednotlivé fázy budú mať určité rozdielne prevádzkové podmienky ako náklon pece, rýchlosť rotácie alebo množstvo spaľovaného zemného plynu. Investičné náklady rotačnej pece sú určite nižšie ako pri fluidnej či etážovej peci.

Kal o podiele sušiny približne 25 % je vhodné vysušiť pred vstupom do rotačnej pece. Vysušením sa zníži obsah vody čím sa zefektívni spaľovací proces a zamedzí sa nedokonalému horeniu. V prípade voľby sušiaceho média v podobe spalín nie je potrebná integrácia utilizačných aparátov do systému, ktoré by priviedli teplo zo spalín do procesu sušenia prípadne k inému využitiu. Vynechaním utilizačných aparátov sa opäť zrážajú investičné aj prevádzkové náklady. Navyše podľa grafu na obrázku č. 9 teoreticky takmer nie je možné získať z odvodneného kalu na 25 % sušiny pridanú energiu, keďže jeho výhrevnosť je pri týchto hodnotách veľmi nízka a teda sa všetka energia spotrebuje na proces sušenia. Pri použití spalín ako kontaktného sušiaceho média je potrebné spaliny zo spaľovacieho procesu ochladiť na teplotu požadovanú v sušiarňi. Užitím vysokoteplotného sušenia je potrebné menšie zníženie teploty spalín na požadované parametre. Teplota spalín bude zrážaná pomocou prisávania vzduchu do spalínovodu, vďaka čomu sa zachová teplo v spalínach. Pre vysokoteplotné kontaktné sušenie

spalinami je jedinou vhodnou voľbou rotačná bubnová sušička, ktorá je rovnako odporučená pre sušenie pomocou spalín v kapitole 5.4.3.

Voľbu procesu v tejto kapitole ďalej zohľadňuje bilancia tohto systému. Popis voľby zariadení pre dopravu a skladovanie jednotlivých médií, a čistenie spalín popisuje kapitola 11. Blokové schéma konceptu je zobrazené na obrázku č. 5.



Obr. č. 5 Blokové schéma konceptu monospaľovne kalov

## 10 BILANCIA SYSTÉMU

V nasledujúcej časti bude detailne popísaná materiálová a energetická bilancia základných termochemických procesov prvej fázy navrhovaného konceptu v kapitole 9, uvažujúc vyššie spracované legislatívne podmienky. Návrh technológie ASHDEC je nad rámec tejto práce. Pre osobné účely výpočtu bol najprv vytvorený model spaľovania tuhých palív a zemného plynu v počítačovom programe EXCEL. Následne je vytvorená materiálová bilancia na základe návrhových parametrov uvedených v danej kapitole, užitím merných hodnôt z modelu spaľovania. Výpočet potom pokračuje energetickou bilanciou systému.

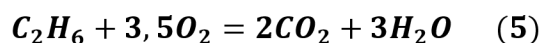
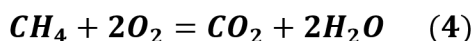
### 10.1 Bilancia spaľovacieho procesu Zemného plynu

Spaľovací proces predstavuje oxidáciu horľaviny v palive, za vzniku produktu z danej reakcie, pričom táto reakcia je z pravidla exotermická. Vo zvolenom procese predstavuje palivo zemný plyn a čistiarenský kal. V zložení zemného plynu, ktorý sa skladá prevažne z uhlíkovodíkov, má hlavné zastúpenie metán s chemickou značkou CH<sub>4</sub>. Prepočty spaľovania zemného plynu vychádzajú z [27], kde sú uvedené objemové podiely jednotlivých zložiek. Tieto hodnoty zachytáva tabuľka 9.

Tab. č. 9 Obsah zemného plynu Juhomoravského

zložka	(obj %)
CH <sub>4</sub>	97,7
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,2
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,5
N <sub>2</sub>	0,6

Pri vytváraní modelu spaľovania zemného plynu boli použité nasledujúce rovnice 4-6 oxidácie jednotlivých uhlíkovodíkov uvedených v tabuľke 9. Dusík je vo výpočte uvažovaný ako inertný plyn.



Vo vyššie uvedených rovniciach uvádzajú stechiometrické koeficienty pri jednotlivých zložkách pomer ich spotreby a tvorby v moloch. Je teda možné podľa uvedených pomerov spočítať množstvo spotreby kyslíku a mernú tvorbu a obsah spalín k danému procesu. Prepočet hodnôt spotreby kyslíku, ktorý bol vytvorený na 1 kg zemného plynu, zachytáva tabuľka 10. Hmotnosti všetkých zložiek boli podelené príslušnou molekulárnou hmotnosťou, pre uvedenie príslušného množstva molov. Moly jednotlivých zložiek boli následne prenasobené koeficientami spotreby kyslíku pre jednotlivé uhľovodíky a molárnym objemom ideálneho plynu, ktorý činí 22,414 m<sup>3</sup><sub>N</sub>/kmol.

Tab. č. 10 Prepočet spotreby kyslíku na 1 kg ZP

zložka	(obj. %)	MW (kg/kmol)	m (kg)	n (kmol)	V O <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )
CH <sub>4</sub>	97,7	16,042	0,977	0,0609	2,73
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,2	30,068	0,012	0,0004	0,03
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,5	44,094	0,005	0,0001	0,01
N <sub>2</sub>	0,6	28,014	0,006	0,0002	
<b>SUMA</b>			1,000	0,0616	2,77

Prepočet merného množstva produktov spaľovania zemného plynu bol vytvorený obdobným spôsobom ako pri spotrebe kyslíku. Tvorba oxidu uhličitého a vody korešponduje so stechiometrickými koeficientami uvedenými v spaľovacích rovniciach 4-6. Molárne množstvá zložiek zemného plynu boli prenasobené koeficientami tvorby produktov a spočítané v tabuľke 11. Prepočet na hmotnosť bol opäť spravený pomocou molekulovej hmotnosti a pre objem za normálnych podmienok bol použitý molárny objem ideálneho plynu. Normálne podmienky sú uvažované 0°C a 101,325 kPa

Tab. č. 11 Prepočet mernej tvorby spalín ZP

Obsah spalín	MW (kg/kmol)	m (kg)	n (kmol)	V (m <sup>3</sup> <sub>N</sub> )
CO <sub>2</sub>	44,01	2,73	0,0620	1,39
H <sub>2</sub> O	18,016	2,22	0,1235	2,77
N <sub>2</sub>	28,014	0,01	0,0002	0,00
<b>SUMA</b>		4,96	0,1857	4,16

## 10.2 Bilancia spaľovacieho procesu bezvodého čistiarenskeho kalu

Čistiarenský kal obsahuje ako horľavinu spáliteľnú organickú zložku, ďalej tiež obsahuje popoloviny ako anorganickú zložku a vodu, ktoré naopak zhoršujú výhrevnosť

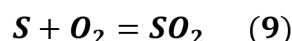
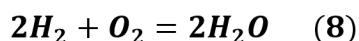
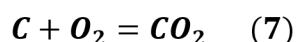


kalu. Obsah horľaviny je daný hmotnostným podielom základných prvkov zúčastňujúcich sa oxidačného procesu. Tieto prvky a hodnoty uvádza tabuľka 12.

Tab. č. 12 Hmotnostné podiely horľaviny čistiarenskeho kalu [32]

zložka	(hm %)
C	62,7
H	8,3
N	7,4
O	19,5
S	2,1
<b>SUMA</b>	100

Podobne ako v predošlom prípade oxidácie uhlíkov u zemného plynu, aj pre spaľovanie daných zložiek horľaviny čistiarenskeho kalu sú využité rovnice 7-9, ktoré uvádzajú stechiometrické koeficienty spotreby a tvorby jednotlivých zložiek.



Z daných rovníc je teda možné opäť ako v prípade zemného plynu spočítať spotrebu kyslíku pre spálenie daného množstva horľaviny. V rovnici 8 je potrebné si uvedomiť, že stechiometrické koeficienty udávajú molárny pomer spotreby kyslíku, teda  $O_2$  ku  $H_2$  a tabuľka 11 uvádza hmotnostný podiel H. Z toho vyplýva, že pomer spotreby  $O_2$  ku H je 0,25. Zvyšné pomery spotreby kyslíku sú teda 1. Prepočet na 1 kg horľaviny zachytáva tabuľka 13. Prepočet na kilomoly bol obdobne spravený pomocou molekulovej hmotnosti a na objem pomocou molárneho objemu ideálneho plynu.

Tab. č. 13 Prepočet spotreby kyslíku na 1 kg horľaviny kalu

zložka	(hm %)	MW (kg/kmol)	m (kg)	n (kmol)	$V O_2$ (m <sup>3</sup> N)
C	62,7	12,010	0,627	0,0522	1,17
H	8,3	1,008	0,083	0,0823	0,46
N	7,4	14,007	0,074	0,0053	
O	19,5	16,000	0,195	0,0122	
S	2,1	32,060	0,021	0,0007	0,01
<b>SUMA</b>	100			1	1,65

Obsiahnutý kyslík v zložení horľaviny je započítaný do účasti v spaľovacích reakciách. Keďže tabuľka 12 udáva podiel O, tak objem  $O_2$ , o ktorý je možné spotrebu

kyslíku znížiť, je rovný polovičnému množstvu molov O uvedených v tabuľke prenasobenému molárnym objemom.

Merná tvorba spalín na kilogram horľaviny kalu je spočítaná rovnako ako predošlé prepočty spotreby a tvorby jednotlivých zložiek. Pomer tvorby H ku H<sub>2</sub>O v tomto prípade vychádza polovičný. Dané prepočty zobrazuje tabuľka 14.

Tab. č. 14 Prepočet mernej tvorby spalín horľaviny čistiarenskeho kalu

Obsah spalín	MW (kg/kmol)	m (kg)	n (kmol)	V (m <sup>3</sup> N)
CO <sub>2</sub>	44,01	2,30	0,0522	1,17
H <sub>2</sub> O	18,016	0,74	0,0412	0,92
N	14,007	0,07	0,0053	0,12
SO <sub>2</sub>	64,06	0,04	0,0007	0,01
<b>SUMA</b>		3,16	0,0993	2,23

### 10.3 Výpočet výhrevnosti horľaviny kalu

Spaľovanie paliva predstavuje oxidačnú exotermickú reakciu, pri ktorej sa uvoľní určité množstvo tepla. Toto teplo je možné spočítať za pomoci daných rovníc spaľovania a uplatnením Hessovho zákona. Ten hovorí, že reakčné teplo u reakcie za stáleho tlaku je rovno zmene entalpie a u reakcie za stáleho objemu zmene vnútornej energie. Okrem toho platí, že reakčné teplo závisí len na počiatocnom a konečnom stave, pričom nezáleží na ceste, ktorou k daným stavom došlo. Vo výpočte sú použité zlučovacie entalpie jednotlivých zložiek. Použité hodnoty sú uvedené v tabuľke 15. Záporné znamienko pri týchto hodnotách znamená uvoľňovanie tepla.

Tab. č. 15 Zlučovacie entalpie zložiek spaľovacieho procesu [34]

zložka	$\Delta H_{\text{sluč}}$ (MJ/kmol)
H <sub>2</sub> O	-242
CO <sub>2</sub>	-393,97
CH <sub>4</sub>	-76,37
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-85
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-104,3
SO <sub>2</sub>	-296,6

Reakčné tepla zo spaľovacích rovníc sa následne vypočítajú pomocou vzorca 10. Pri výpočte je potrebné uvažovať príslušné stechiometrické koeficienty, ktoré boli vo výpočte zahrnuté v tabuľke 10 a 13. V prípade kalu je na strane produktov v spaľovacích

rovniciach len jedna zložka, takže uvoľnené teplo pri reakcii sa rovná presne jeho zlučovacej entalpii. Zlučovacie entalpie prvkov sú nulové.

$$\Delta H^\circ = \sum_{prod} \mu \cdot \Delta H_{stuč} - \sum_{reakt} \mu \cdot \Delta H_{stuč} \quad (10)$$

Kde :  $\Delta H^\circ$  reakčná entalpia [MJ.kmol<sup>-1</sup>],  
 $\mu$  stechiometrické koeficienty [-],  
 $\Delta H_{stuč}$  zlučovacia entalpia [MJ.kmol<sup>-1</sup>],

Výpočet spalného tepla a výhrevnosti horľaviny čistiarenskeho kalu je uvedený v tabuľke 16. Príslušné molárne množstvá z tabuľky 10 a 13 boli prenasobené svojou zlučovacou entalpiou a spočítané pre výpočet spalného tepla. Výhrevnosť bola prepočítaná na základe vzorca 11, kde bolo odčítané teplo pre vyparenie vody, ktorá prislúcha spalinám kalu. Výpočet je vedený ako aj v kapitole 9.1.2 na 1 kilogram horľaviny kalu. Výparné teplo vody je uvažované 2,257 MJ/kg.

$$LHV = HHV - \Delta H_{výp} \cdot \frac{M_{H_2O}}{M_H \cdot 2} \cdot \omega_H \quad (11)$$

Kde :  $LHV$  výhrevnosť horľaviny kalu [MJ.kg<sup>-1</sup>],  
 $HHV$  spalné teplo horľaviny kalu [-],  
 $\Delta H_{výp}$  výparné teplo vody [MJ.kg<sup>-1</sup>],  
 $M$  molekulová hmotnosť [kg. kmol<sup>-1</sup>],  
 $\omega$  hmotnostný zlomok vodíku [-].

Tab. č. 16 Spalné teplo a výhrevnosť 1 kg horľaviny kalu

produkt reakcie	Spal. teplo (MJ/kg)	Výhrevnosť (MJ/kg)
CO <sub>2</sub>	20,5678	
SO <sub>2</sub>	0,1943	
H <sub>2</sub> O	9,9633	
SUMA	30,7254	29,0513

## 10.4 Výpočet výhrevnosti zemného plynu

Výpočet pre zemný plyn je obdobný ako v prípade horľaviny kalu v kapitole 10.3. Užitím Hessovho zákona, ktorý bol vysvetlený v predošlej kapitole, a príslušných zlučovacích entalpií je dopočítané postupne spalné teplo zemného plynu o danom zložení a jeho výhrevnosť. Oproti predošlému prípadu v spaľovacích rovniciach uhlíkovodíkov vystupuje viacero molekúl. Je teda nutné vypočítať reakčnú entalpiu podľa

vzorca 10. Výsledky zachytáva tabuľka 17, kde je následne dopočítané spalné teplo pre 1 kilogram zemného plynu pre násobenie reakčných entalpií príslušným počtom molov z tabuľky 10. Dopočet výhrevnosti LHV podľa vzorca 12 zo spalného tepla bol vytvorený obdobne ako u horľaviny kalu, kedy bolo odčítané množstvo energie, ktoré bolo potrebné na vyparenie daného množstva vody, od spalného tepla. Výparné teplo vody je uvažované 2,257 MJ/kg.

Tab. č. 17 Spalné teplo a výhrevnosť 1 kg zemného plynu

reakcia	$\Delta H^\circ$ (MJ/kmol)	spalné teplo (MJ/kg)	LHV výpočet (MJ/kg)
CH <sub>4</sub>	-801,6	48,82	
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-1428,94	0,57	
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-2045,61	0,23	
<b>SUMA</b>		49,62	44,60

$$LHV = HHV - \Delta H_{vyp} \cdot m_{H_2O} \quad (12)$$

Kde : **LHV** výhrevnosť horľaviny kalu [MJ.kg<sup>-1</sup>],  
**HHV** spalné teplo horľaviny kalu [-],  
 **$\Delta H_{vyp}$**  výparné teplo vody [MJ.kg<sup>-1</sup>],  
**m** hmotnosť vody [kg].

## 10.5 Materiálová bilancia spaľovacieho procesu

Základom materiálovej bilancie je údaj o množstve čistiarenskeho kalu s určitými vlastnosťami, ktorý je nutné spáliť. Navrhovaná kapacita danej jednotky bola stanovená na 60 000 ekvivalentných obyvateľov. Prepočet množstva kalu bol vytvorený lineárnou závislosťou, zo známej produkcie sušiny kalu na EO a to 55 g na ekvivalentného obyvateľa za deň [25]. Prevádzka spaľovne je odhadovaná na 8000 hodín ročne, pričom zvyšných 760 hodín je vyhraných na servis a údržbu. Predpokladaná vlhkosť kalu vstupujúceho do spaľovacieho procesu je 10% podľa skúšok sušenia poskytnutých firmou EVECO Brno. Parametre pre návrh zachytáva tabuľka 18.

Tab. č. 18 Parametre navrhovanej kapacity a uvažovaného kalu

počet ekvivalentných obyvateľov	60000	EO
tok sušiny kalu	148,5	kg/h
obsah sušiny v odvodnenom kale	25	hm %
obsah sušiny vo vysušenom kale	90	hm %
podiel horľaviny v kale	50	hm %
<b>zložky horľaviny</b>		
<b>C</b>	62,7	hm %
<b>H</b>	8,3	hm %
<b>N</b>	7,4	hm %
<b>O</b>	19,5	hm %
<b>S</b>	2,1	hm %

Do spaľovacieho procesu vstupuje okrem kalu, zemný plyn a hlavne spaľovací vzduch, ktorý zabezpečuje potrebu kyslíku pre spaľovanie. Vzduch je v tomto prípade uvažovaný ako suchý, keďže obsah vody v ňom je relatívne zanedbateľný. Toto rozhodnutie vytvára rezervu pri oboch prípadoch prisávania vzduchu, keďže suchý vzduch má nižšiu mernú tepelnú kapacitu. Prípadný negatívny vplyv vlhkosti jednoducho vykompenzuje variabilný výkon horákov v peci aj sušičke. Jeho chemické zloženie použité vo výpočte je uvedené v tabuľke 18.

Tab. č. 19 Chemické zloženie vzduchu

zložka	Obj %
N <sub>2</sub>	78
O <sub>2</sub>	21
Ar	1
SUMA	100

Keďže sa dá predpokladať u vysušeného kalu autotermické horenie, tak by mal horák v peci slúžiť len na zapáľovanie kalu a udržiavanie požadovanej teploty v peci. Z tohto ohľadu je kontinuálna spotreba zemného plynu stanovená relatívne nízka. So znalosťou množstva kalu a zemného plynu vstupujúceho do spaľovacieho procesu je možné stanoviť potrebné množstvo kyslíku a následne vzduchu pre ich dokonalé spálenie. Dodávka kyslíku do systému zvykne počítať pri návrhu s jeho prebytkom  $\alpha$  pre lepší chod procesu. Prebytky vzduchu pre spaľovanie kalu aj zemného plynu boli predbežne stanovené na hodnotu 1,2. Spotreba vzduchu sa počíta pomocou objemového pomeru kyslíku vo vzduchu z tabuľky 18. K prepočtom z hmotnosti na objem boli použité hodnoty mernej hmotnosti daných plynov za normálnych podmienok. Spotrebu kyslíku

a vzduchu pre jednotlivé palivá zobrazuje tabuľka 20. Posledný stĺpec tejto tabuľky určuje spotrebu kyslíku resp. vzduchu zmenšenú o obsah kyslíku v horľavine kalu.

Tab. č. 20 spotreba kyslíku a vzduchu

	O <sub>2</sub> kal	O <sub>2</sub> ZP	O <sub>2</sub> celk	O <sub>2</sub> - O hor.
m (kg)	174,5	19,8	194,3	
m · α (kg)	209,4	23,8	233,2	225,9
vzduch	894,5	101,5	996,0	965,1

Uvažovanú materiálovú bilanciu spaľovacieho procesu zachytáva tabuľka 20. Vstupný tok tvorí vysušený kal so spomínaným obsahom vody 10%, vypočítané potrebné množstvo vzduchu pre spálenie a odhad prietoku zemného plynu. Výstup obsahuje popol po spálení kalu, ktorého množstvo závisí na obsahu horľaviny respektíve popolovín. Ich podiel bol stanovený tabuľkou 18 na 50%. Výstup ďalej počíta s inertnými plynmi privedenými vzduchom, prebytkom kyslíku po dokonalom spálení palív, s vodou z kalu, ktorá prejde do plynného skupenstva, a s produktami spaľovania, kde sú zahrnuté aj inertné látky palív. Hmotnosti inertných plynov vzduchu vychádzajú z ich podielov v tabuľke 19, pričom prepočet na objem bol prevedený pomocou merných hmotností daných plynov za normálnych podmienok. Obsah kyslíku na výstupe je stanovený rozdielom položiek celkovej potreby kyslíku s a bez prebytku v tabuľke 20. Hmotnosť spalín na výstupe určuje súčin množstva paliva a jeho mernej tvorby z tabuľky 10 a 13.

Tab. č. 21 Materiálová spaľovacieho bilancia procesu

vstup	m (kg)	výstup	m (kg)
vlhký kal	165	popol	74,25
suš kal	148,5	N <sub>2</sub>	735,1
voda kal	16,5	Ar	13,5
N <sub>2</sub>	735,1	O <sub>2</sub>	39
Ar	13,5	spaliny ZP	24,8
O <sub>2</sub>	225,9	spaliny kal	234,3
zemný plyn	5,0	voda kal	16,5
<b>SUMA</b>	<b>1135,1</b>	<b>SUMA</b>	<b>1137,2</b>

Vstup a výstup materiálovej bilancie by mal presne, sedieť avšak počas výpočtov došlo k zaokrúhľovacej chybe vplyvom použitých merných hmotností plynov a molárneho objemu ideálneho plynu v kombinácii s molekulovou hmotnosťou. Celková hmotnosť je tiež ovplyvnená použitím suchého vzduchu.



## 10.6 Tepelná bilancia spaľovacieho procesu

Gro tepelnej bilancie spočíva vo vzorci 13. Ten udáva obsiahnuté teplo v danej látke na základe jej hmotnosti, teploty a mernej tepelnej kapacity, pričom je volená referenčná hladina teploty, v tomto prípade 0 °C, s ktorou sa počíta.

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (13)$$

Kde : Q teplo v danej látke [kJ],  
 m hmotnosť [kg],  
 $\Delta T$  rozdiel aktuálnej a referenčnej teploty [°C],  
 Cp merná tepelná kapacita danej látky [kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>],

Teplota všetkých vstupných médií v bilancii je určená na 15 °C. Materiálové toky sa zhodujú so vstupom v tabuľke 20. Merné tepelné kapacity plynov a vody boli prebraté z [26]. Tepelné kapacity tuhých zložiek boli určené z technickej správy spaľovacej skúšky kalu poskytnutou firmou EVECO Brno. Medzi vstupné tepelné toky patrí prirodzene výhrevnosť palív vstupujúcich do procesu. Tabuľka 22 sumarizuje vyššie popísané údaje.

Tab. č. 22 Vstupný energetický tok do spaľovacieho procesu

tok vstup	Cp (kJ/(kg.K))	m (kg/h)	t (°C)	Q (kJ/h)
vlhký kal		165,0	15	
sušina kal	0,904	148,5	15	2014
výhrevnosť kal	14299,940	148,5		2123541
voda	4,180	16,5	15	1035
Zemný plyn	2,155	5,0	15	162
výhrevnosť ZP	44601,805	5,0		223009
vzduch	1,005	965,1	15	14548
<b>SUMA</b>		1135,1		2364308

Výstupný energetický tok zo spaľovacieho procesu bol vytvorený obdobný spôsobom ako vstupný. Pre lepší prehľad pri výpočtoch boli výstupné toky rozdelené podľa zložiek a média, z ktorého boli vytvorené. Jednotlivé tepelné kapacity boli určené z rovnakých zdrojov ako pri vstupe. Volená výstupná teplota z pece je 950°C, na základe ktorej boli lineárnou interpoláciou dopyčítané tepelné kapacity plynov pri tejto teplote. Tepelné straty zariadenia boli odhadnuté na 3 % podľa sušiacich skúšok poskytnutých spoločnosťou EVECO. Výsledky výstupného energetického toku zachytáva tabuľka 23.

Tab. č. 23 Výstupný energetický tok zo spaľovacieho procesu

tok výstup	Cp (kJ/(kg.K))	m (kg/h)	t (°C)	Q (kJ/h)
popol	1,218	74,3	950	85915
CO <sub>2</sub> ZP	1,113	13,7	950	14435
H <sub>2</sub> O spaliny ZP	2,112	11,1	950	22313
CO <sub>2</sub> kal	1,113	170,6	950	180381
H <sub>2</sub> O spaliny kal	2,112	55,1	950	110499
SO <sub>2</sub>	0,779	3,1	950	2306
N <sub>2</sub> z palív kal+zp	1,113	5,5	950	5841
O <sub>2</sub>	1,031	39,0	950	38045
N <sub>2</sub> vzduchu	1,113	735,1	950	777258
Ar	0,52	13,4	950	6638
voda kal	2,112	16,5	950	33106
Q straty	3	%		38302
<b>SUMA</b>		1137,2		1315040

Pri aktuálnom stave tepelnej bilancie vyvstáva veľký rozdiel medzi sumou výstupného a vstupného energetického toku. Pre udržanie volenej teploty na výstupe z pece je potrebné do pece priniesť ďalšie médium, ktoré prebytočné teplo odvedie. V opačnom prípade, pri prepočítaní výstupných teplôt na vyrovnanie rozdielu energetických tokov, vychádzajú teploty cez 1500 °C. Ako chladiace médium bol použitý vzduch. Jeho množstvo pre dorovnanie teplotného rozdielu bolo stanovené pomocou troch rovníc o troch neznámych. Sústavu zobrazujú rovnice 14 až 16. Z rovníc bolo vyjadrené potrebné výstupné teplo vzduchu. Následne z toho bola dopočítaná hmotnosť vzduchu a nakoniec vstupné teplo vzduchu. Vypočítané údaje zachytáva tabuľka 24.

$$Q_{\text{rozdil}} = Q_{\text{výstup}} - Q_{\text{vstup}} \quad (14)$$

$$Q_{\text{výstup}} = m_{\text{vzd}} \cdot Cp^{950} \cdot \Delta T \quad (15)$$

$$Q_{\text{vstup}} = m_{\text{vzd}} \cdot Cp^{15} \cdot \Delta T \quad (16)$$

Tab. č. 24 Výpočet chladiaceho vzduchu

chladiaci vzduch	Cp (kJ/(kg.K))	m (kg)	t °C	Q (kJ/h)
rozdiel tep. bilancie				1049270
vstup	1,005	1037,9	15	15647
výstup	1,08	1037,9	950	1064951



Bezprostredne za výstup spalín z pece je umiestnená dohorievacia komora pre zabezpečenie vyhorenia všetkých prchavých organických látok. Materiálový tok zemného plynu z tohto zariadenia vo výpočte uvažovaný nie je, pričom by predstavoval menej ako 1 % z celkového toku spalín.

## 10.7 Výpočet prisávania vzduchu

Podľa navrhovaného konceptu, ktorý zobrazuje schéma na obrázku č. 5, je prisávaný vzduch k spalínám pre zníženie jeho teploty na požadovanú teplotu sušenia. Pre výpočet množstva prisávaného vzduchu je najprv nutné určiť mernú tepelnú kapacitu zmesi spalín, ktorá vychádza zo spaľovacieho procesu. Výpočet bol prevedený harmonickým priemerom hmotností jednotlivých zložiek a ich tepelných kapacít. Súčin hmotnostného podielu danej zložky v spalínách a jej mernej tepelnej kapacity zachytáva tabuľka 25.

Tab. č. 25 Výpočet mernej tepelnej kapacity zmesi spalín

zložka	Cp (kJ/(kg.K))
CO <sub>2</sub> ZP	0,0072
H <sub>2</sub> O spal ZP	0,0112
CO <sub>2</sub> kal	0,0904
H <sub>2</sub> O spaliny kal	0,0554
SO <sub>2</sub>	0,0012
N <sub>2</sub> z palív kal+zp	0,0029
O <sub>2</sub>	0,0191
N <sub>2</sub> vzduchu	0,3894
Ar	0,0033
voda kal	0,0166
chl. vzduch	0,5336
<b>zmes spalín</b>	<b>1,1302</b>

So známou hodnotou mernej tepelnej kapacity ochladzovaného média je možné spočítať množstvo chladiaceho vzduchu, ktorý je potrebné dodať aby sa teplota systému znížila na požadovanú. Uvažované vstupné parametre do tohto procesu zobrazuje tabuľka 26. Požadovaná teplota bola stanovená s rezervou oproti požadovanej vstupnej teplote sušenia.

Tab. č. 26 Parametre pre výpočet prisávaného vzduchu

vstupná teplota spalín	810	(°C)
požadovaná teplota	410	(°C)
teplota vzduchu	15	(°C)
Cp. vzduchu	1,005	(kJ/(kg.K))
Hmotnostný tok spalín	2107	(kg)
Cp zmesi spalín	1,1302	(kJ/(kg.K))

Potrebný hmotnostný prietok vzduchu je počítaný iteračným spôsobom z dôvodu neznalosti konečného zloženia zmesi vychádzajúcej z tohto procesu. Najskôr bol zvolený náhodný prietok vzduchu, pomocou ktorého sa určila merná tepelná kapacita na výstupe podľa vzorca 17. Následne bol spočítaný rozdiel tepeľ na výstupe a vstupe podľa vzorca 18, pričom táto hodnota by mala byť nulová. Pomocou funkcie hľadanie riešenia bol teda rozdiel bilancie nastavený na požadovanú hodnotu a menená bunka predstavovala hmotnostný prietok vzduchu. Výsledky z výpočtu zachytáva tabuľka 27.

$$Cp_{výstup} = \frac{m_{vzd}}{m_{vzd} + m_{spal}} \cdot Cp_{vzd} + \frac{m_{spal}}{m_{vzd} + m_{spal}} \cdot Cp_{spal} \quad (17)$$

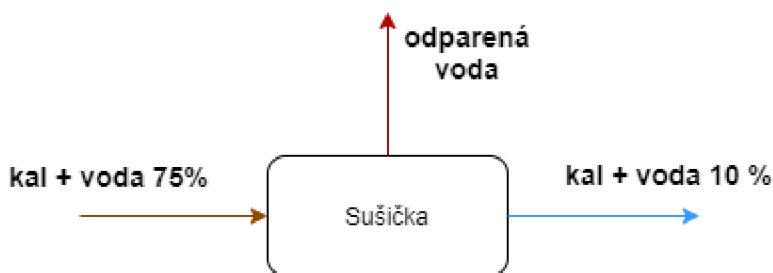
$$0 = Cp_{výstup} \cdot (m_{vzd} + m_{spal}) \cdot t_{požad} - (Cp_{vzd} \cdot m_{vzd} \cdot t_{vzd} + Cp_{spal} \cdot m_{spal} \cdot t_{spal}) \quad (18)$$

Tab. č. 27 Výsledky výpočtu prisávania vzduchu

hmotnostný tok vzduchu	2400	(kg/h)
tok ochladených spalín	4507	(kg/h)
teplo v spalinách	1965212	(kJ/h)

## 10.8 Materiálová bilancia sušiarne

Proces sušenia predchádza spaľovaciemu procesu z dôvodu lepšej spáliteľnosti kalu po vysušení. Vstupujúcim tokom do sušiarne je odvodnený kal a ako sušiacie médium budú použité spaliny zo spaľovacieho procesu vysušeného kalu. Výstup zo sušičky tvorí odparená voda a vysušený kal. Tento proces zobrazuje obrázok č. 8.



Obr. č. 8 Schéma materiálovej bilancie sušiarne kalu

Zo známej sušiny kalu, ktorú je potrebné spracovať, určenej v kapitole 10.5, je možné vytvoriť materiálovú bilanciu kalu v sušičke. Odhadovaná vstupná a výstupná vlhkosť kalu zo sušičky a výpočet množstva vody k odpareniu sú dané v tabuľke 28. Pri sušení sa uplatňujú 2 mechanizmy a to vyparovaním a difúziou, ktorá je hnaná koncentračným spádom na rozhraní. Vo výpočtovom modeli je uvažovaný len prvý spomenutý mechanizmus. Množstvo vody ktoré je potrebné odpariť je vypočítané ako rozdiel množstva vody v kale na vstupe a na výstupe. Efektivitu vyparovania zaisťuje mierny podtlak v komore a vysoké teploty, ktoré prevyšujú dvojnásobok teploty varu vody.

Tab. č. 28 Materiálová bilancia sušiarne

	množstvo	jednotka
odvodnený kal	594	kg/h
sušina v kale	25	%
pož. sušina po sušení	90	%
množství vody na odparenie	429	kg/h
sušina kal	148,5	kg/h
voda vo vysušenom kale	16,5	kg/h

## 10.9 Energetická bilancia sušiarne

Podobne ako v prípade energetickej bilancie spaľovania, je pri bilancii sušiarne využitá rovnica 13, pre určenie obsiahnutého tepla v danom toku. Odhadované a vypočítané parametre vstupného toku zachytáva tabuľka 29.

Tab. č. 29 Vstupný energetický tok do procesu sušenia

vstup	Cp (kJ/(kg.K))	m (kg/h)	t (°C)	Q (kJ/h)
sušina kalu	0,904	148,5	15	2014
voda v kale	4,180	445,5	15	27933
spaliny	1,065	4506,8	380	1821416
<b>SUMA</b>		5100,8		1851363

Výstupný energetický tok z procesu sušenia obsahuje výparné teplo vody, ktoré udáva energiu potrebnú na premenu jej skupenstva. Túto energiu je potrebné dodať odvodnenému kalu, aby sa z neho odparilo požadované množstvo vody. Výstupná teplota zo sušenia musí presahovať 105 °C aby vodná para nezačala kondenzovať. Tepelné straty procesu boli odhadnuté na 3 % podľa sušiacich skúšok poskytnutých spoločnosťou EVECO. Výsledky výstupného toku zachytáva tabuľka 30.

Tab. č. 30 Výstupný energetický tok z procesu sušenia

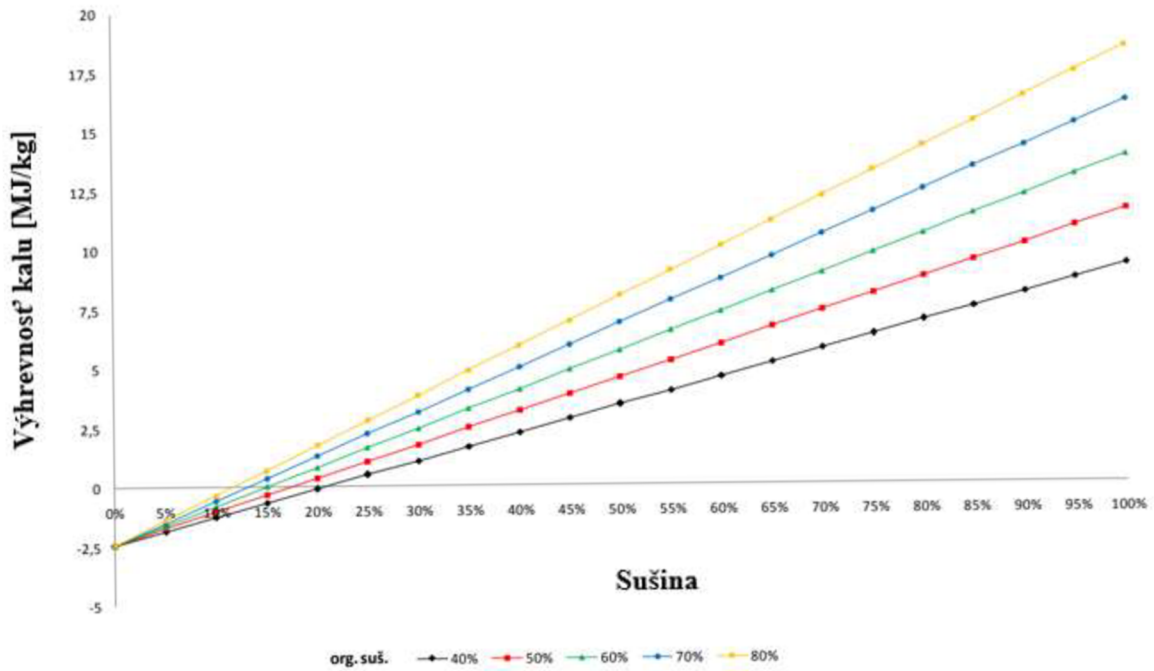
výstup	Cp (kJ/(kg.K))	m (kg/h)	t (°C)	Q (kJ/h)
sušina kal	0,904	148,5	145	19465
voda kal	4,180	16,5	145	10001
odparená voda	2,112	429	145	131377
spaliny	1,065	4506,8	145	695014
výparné teplo vody	2257	429		968253
Q straty (%)	3			54723
<b>SUMA</b>		5100,8		1878833

Suma vstupného a suma výstupného energetického toku by sa mala rovnať. Vyrovnanie momentálneho nepatrného rozdielu bilancie by bolo možné zmenou výstupnej teploty médií pomocou funkcie hľadanie riešenia. Z bilancie vyplýva rozdiel medzi vstupnou a výstupnou teplotou 260°C je relatívne významný, aby sa odparilo požadované množstvo vody. Aby sa zabezpečil čo možno najväčší potenciál absorpcie tepla zo spalín, mohol by byť zaradený recykel sušiaceho média k sušičke.

## 10.10 Zhrnutie bilancie

Podľa spočítaných výsledkov z bilancie procesu je zrejmé, že systém by mohol byť akurát sebestačný a nezávislí na ďalších podporných palivách no nezostáva takmer žiadne zbytkové teplo, ktoré by sa dalo ďalej efektívne využiť. Tiež to potvrdzuje správnosť grafu z obrázku č. 9, ktorý zobrazuje energetický potenciál kalu v závislosti na podiele

sušiny a horľaviny v nej. Záporné hodnoty výhrevností zobrazené v grafe sú len fiktívne pre lepší prehľad v tejto vlastnosti.



Obr. č. 9 Závislosť výhrevnosti na podiele sušiny v kale a organickej zložky v ňom [28]

## 11 STROJNE-TECHNOLOGICKÉ RIEŠENIE JEDNOTKY

Nasledujúce kapitoly popisujú riešenia technologických procesov pre zabezpečenie chodu navrhovaného konceptu. Jednotlivé kapitoly popisujú rozmerové návrhy aparátov, ktoré budú použité pre dispozičné riešenie spaľovacej jednotky.

### 11.1 Príjem, skladovanie a dávkovanie kalu

Monospaľovňa kalov je uvažovaná ako prístavba k čističke odpadných vôd pričom pre skladovanie kalu čakajúceho na spálenie bola navrhnutá skladovacia nádrž. Tá by mala prípadne slúžiť aj na príjem kalu dovezeného z iných čističiek. Kal z priestorov dotknutej čističky by mal byť dopravovaný do nádrže potrubnou dopravou pomocou kalových čerpadiel. Kal, ktorý bol privezený do areálu cisternou bude do nádrže dopravovaný cez stáčaciu stanicu kalu.

#### 11.1.1 Nádrž odvodneného kalu

Pri návrhu bola uvažovaná týždenná kapacita spracovávanej produkcie z čističky navýšená o 10% pre vytvorenie objemovej rezervy. Uvažovaná hustota odvodneného kalu, pomocou ktorej bol stanovený objem nádrže v tabuľke 31, je  $1080 \text{ kg/m}^3$ . Týždenná hmotnosť uvedená v tabuľke zodpovedá produkcii odvodneného kalu z bilancie. Z vrchnej časti nádrže je privádzaná časť spaľovacieho vzduchu do priestorov rotačnej pece pre vytvorenie podtlaku v nádrži pomocou potrubného ventilátoru ovládaného frekvenčným meničom. Tým sa zabráni šíreniu zápachu z nádrže do okolia. Podtlak, ktorý vytvára odsávanie vzduchu vyrovnáva prietok vzduchu do nádrže cez pachový filter umiestnený navrchu nádrže. Navrhované parametre zachytáva tabuľka 31.

Tab. č. 31 Parametre nádrže pre odvodnený kal

časová kapacita	7	dní
týždenná hmotnosť kalu	61938	kg
objem nádrže	57,4	$\text{m}^3$
navýšený objem	63,1	$\text{m}^3$
priemer	3,5	m
výška	6,5	m

### 11.1.2 Silo vysušeného kalu

Kal je po vysušení v rotačnej bubnovej sušičke dopravovaný pneumatikou dopravou do skladovacieho sila. Vrch sila je opatrený filtrom prachu, cez ktorý prúdi vzduch zo sila vplyvom pretlaku z pneumatikovej dopravy. Dopravu kalu je potrebné dostatočne uzavrieť aby sa zabránilo prášeniu v okolí zariadenia, keďže horľavina v kale môže vo vzduchu tvoriť horľavú až výbušnú zmes. Z tohto ohľadu je tiež potrebné zabrániť možným iniciáciám horenia tejto zmesi, napríklad vplyvom statickej elektriny. Silo je opäť navrhované na týždennú kapacitu pre uvažovanú produkciu vysušeného kalu s vlhkosťou 10 %. Táto kapacita by mala dostatočne pokryť produkciu sušiny kalu zo sušičky počas spaľovania popola. Jeho konštrukciu tvorí valcová nádoba zužujúca sa v spodnej časti, kde sa silo vyprázdňuje. Objem sila je navrhnutý na základe sypnej hmotnosti sušiny kalu  $620 \text{ kg/m}^3$  [38] a týždennej uvažovanej produkcii. Odhad rozmerov zachytáva tabuľka 32. Dávkovanie vysušeného kalu do spaľovacieho procesu zabezpečuje turniketový podávač a pneumatiká doprava.

Tab. č. 32 Parametre nádrže pre odvodnený kal

časová kapacita	7	dní
týždenná hmotnosť kalu	17076,9	kg
objem nádrže	27,5	$\text{m}^3$
navýšený objem	30,3	$\text{m}^3$
priemer	2,7	m
výška	5,3	m

### 11.1.3 Silo pre popol

Popol zo spaľovacieho procesu vysušeného kalu je pneumatikou dopravou dopravovaný do sila pre popol. Jeho konštrukciu tvorí valcová nádoba zužujúca sa na spodnej strane. Objem sila bol navrhnutý na 60 % kapacity sila pre vysušený kal, tak aby pokrylo predpokladanú týždennú produkciu. Silo bude navrhnuté nad vozovkou tak, aby ho bolo možné prípadne gravitačne vyprázdniť do nákladného automobilu. Popol zo sila bude dávkovaný turniketovým dávkovačom vo do rotačnej pece za účelom získania fosforu. Parametre pre silo na popol zachytáva tabuľka 33.



Tab. č. 33 parametre nádrže pre popol z kalu

časová kapacita	7	dni
hmotnosť kalu	10246	kg
objem nádrže	17	m <sup>3</sup>
priemer	2,7	m
výška	2,9	m

## 11.2 Termická časť navrhovanej jednotky

Základ termickej časti tvorí podľa voľby v kapitole 9 rotačná sušička a rotačná pec. V nasledujúcich podkapitolách budú popísané odhadované technické parametre a riešenia daných aparátov. Termická časť rieši fázu procesu spaľovania vysušeného kalu. Návrh technológie ASHDEC je nad rámec tejto práce.

### 11.2.1 Rotačná sušička kalu

Rotačná sušička zabezpečuje odstránenie majoritnej časti vody obsiahnutej v odvodnenom čistiarenskom kale. Tento proces je zabezpečený odparením vody vďaka privedenému teplu obsiahnutému v prúde spalín zo spaľovacieho procesu vysušeného kalu a inštalovaného horáku, ktorý má za úlohu stabilizovať požadované podmienky v zariadení. Konštrukciu sušičky tvorí dutý valec s vonkajšou izoláciou a vnútornou vstavbou, ktorá napomáha jeho rozmiešaniu. Kal je do sušičky dávkovaný zo skladovacej nádrže odvodneného kalu pomocou dávkovacieho kalového čerpadla a špirálového dopravníku. Špirálový dopravník pretláča kal pred vstupom do pece kovovou mriežkou pre rozdelenie väčších kusov, ktoré by sa v ňom mohli nachádzať. Tieto agregáty by totiž nemuseli byť v bubne dostatočne usušené. Proces sušenia je navrhnutý ako súprudy, takže kal a spaliny vstupujú do pece na jednom mieste a obe médiá vystupujú na opačnej strane. Vďaka tomuto riešeniu je výsledný produkt dobre granulovaný, z čoho ďalej benefituje spaľovací proces. Náklon sušičky a rýchlosť jej rotácie určujú dĺžku zdržnej doby. Menší náklon a pomalšia rotácia spôsobujú pomalší prechod zariadením. Zdržná doba kalu by sa mala pohybovať medzi 30 až 90 minút. Bubon je uložený na šiestich malých hladkých kolieskach, na ktorých rotuje. Prenos momentu zabezpečuje ozubené kolo uchytené v strede vonkajšieho plášťa.



Rozmery použitej pece sú odhadnuté na základe spaľovacích skúšok čistiarenskeho kalu poskytnuté firmou EVECO. Odhadované rozmery sú zachytené v tabuľke 34.

*Tab. č. 34 Rozmerové parametre rotačnej sušičky*

dĺžka	7	m
vnútorný priemer	1,2	m
hrúbka izolácie	0,1	m

### 11.2.2 Rotačná pec

Rotačná pec je najpodstatnejšie zariadenie spaľovacej jednotky. V dutom valci, ktorého plášť tvorí niekoľko vrstiev výmuroviek a izolácie prebieha spaľovací proces. Valec je mierne naklonený a pomaly rotuje, pričom uhol náklonu a rýchlosť rotácie určujú zdržnú dobu, ktorá by sa mohla pohybovať okolo 30 až 90 minút. Rotácia zároveň zabezpečuje premiešanie paliva. Kal je vo valcovej konštrukcii spaľovaný pomocou horáku na zemný plyn, ktorého výkon bude variabilný a to 100 až 400 kW. Inštalovaný horák slúži hlavne na zapalovanie a udržiavanie stability horenia, pričom jeho súčasťou je prívod primárneho vzduchu. Pec rotuje na šiestich malých hladkých valčekoch, pričom jeden pár zaisťuje axiálny pohyb a rotáciu zabezpečuje ozubené kolo upevnené v strede na plášti pece. Spaľovací proces je navrhovaný ako protiprúdny. To znamená, že horák s prívodom plynu a spaľovacieho vzduchu bude umiestnený na strane pece, ktorá je položená nižšie. Na rovnakej strane bude umiestnený aj výstup popola. Ten prepadáva do špirálového dopravníku a následne do pneumatickej dopravy, odkiaľ je dopravovaný do skladovacieho sila pre popol. Na opačnej strane do procesu vstupuje vysušený kal pomocou špirálového dopravníku a vystupujú spaliny smerom nahor do dohorievacej komory. Ideálna spaľovacia teplota by sa mala pohybovať okolo 950 °C. Obrázok č. 5. v kapitole 5.4.1.3 zobrazuje rotačnú pec s protiprúdnym zapojením.

Rozmery použitej pece sú odhadnuté na základe spaľovacích skúšok čistiarenskeho kalu poskytnuté firmou EVECO. Odhadované rozmery sú zachytené v tabuľke 35.

*Tab. č. 35 Rozmerové parametre rotačnej pece*

dĺžka valca	7	m
vnútorný priemer	1	m
hrúbka izolácie	0,1	m
hrúbka výmurovky	0,15	m

### 11.2.3 Dohorievacia komora

Dohorievacia komora je valcová konštrukcia opatrená na vonkajšej strane výmurovkou a izoláciou. Jej súčasťou je horák, ktorý má za úlohu udržiavať teplotu v komore podľa vyhlášky [36] aspoň 850 °C po dobu dvoch sekúnd, aby prehoreli všetky prchavé organické látky. Keďže je do komory umiestnený aj systém odstraňovania oxidov dusíku pomocou technickej močoviny, je potrebné v komore udržať v určitom úseku teplotu približne 1050 °C pre optimálne prebehnutie tejto reakcie po dobu 0,2 - 0,5 s. Z tohto ohľadu teda bude v celej komore udržiavaná teplota 1050 °C. Rovnako je potrebné zaistiť v komore dostatočnú turbulenciu spalín pre ich premiešanie s roztokom močoviny. Prívod spalín do komory je navrhovaný ako tangenciálny pre rozvírenie prechádzajúcich spalín.

Návrh rozmerov komory je určený pomocou skutočného prietoku spalín, ktoré vychádzajú z pece. Zdržná doba je uvažovaná 2,5 sekundy aby návrh počítal s určitou rezervou. Podiel prietoku spalín a požadovanej zdržnej doby dáva potrebný objem komory. Keďže je komora valcová, je priemer komory volený a k nemu podľa objemu dopočítaná dĺžka. Okrajové podmienky a vypočítané parametre zachytáva tabuľka 36.

Tab. č. 36 Okrajové podmienky a parametre dohorievacej komory

výpočtová teplota	1050	°C
hmotnostný tok spalín	2100,9	kg/h
prietok spalín	8212,8	m <sup>3</sup> /h
výpočtová zdržná doba	2,5	s
objem komory	5,7	m <sup>3</sup>
vnútorný priemer	1,8	m
dĺžka	2,3	m

### 11.2.4 Prisávanie vzduchu

Keďže je teplo obsiahnuté v spalínach potrebné využiť v procese sušenia, je miesto využitia teplosmenných aparátov, ktoré by znížili jak obsah tepla tak teplotu, zaradené do trasy spalín prisávanie vzduchu. Prisatý vzduch o okolitej teplote zníži teplotu spalín na požadovanú pre proces sušenia, pričom sa zachová teplo obsiahnuté v spalínach.

Toto technické riešenie je vzhľadom na náročnosť prevádzky a investície určite prijateľnejšie oproti utilizačným aparátom. Prisávanie vzduchu bude realizované

pomocou ejektoru inštalovaného do spalinovodu, vďaka čomu sa bude vzduch samonasávať.

### **11.3 Spätné získavanie fosforu**

Spätné získavanie fosforu z popola zabezpečuje technológia ASHDEC. Rotačná pec použitá na spaľovanie kalu funguje zároveň aj ako reaktor pre technológiu ASHDEC, pričom jednotlivé fázy procesu sa striedajú. Popol bude dávkovaný turniketovým dávkovačom do pneumatickej dopravy, ústiacej do špirálového dopravníku smerom do pece.

#### **11.3.1 Silo obohateného popola**

Silo pre obohatený popol je veľkostne rovnaké ako silo pre popol zo spaľovania vysušeného kalu. Obdobne je pri ňom prevedená aj pneumatická doprava. Popol je ňou dopravovaný do sila pre obohatený popol rovnakou pneumatickou dopravou, ktorá ústi do sila pre popol. Smerovacia klapka na rozdelení potrubia pneumatickej dopravy smeruje popol do správneho sila podľa prebiehajúcej fázy. Silo je umiestnené nad cestou pre jeho jednoduché gravitačné vyprázdnenie.

### **11.4 Čistenie spalín**

Pre zamedzenie znečisťovaniu životného prostredia je absolútne nevyhnutné predchádzať tvorbe emisií zo spaľovacích procesov ako aj zaradenie sekundárnych riešení pri čistení spalín. V nasledujúcich podkapitolách sú popísané potrebné aparáty pre čistenie spalín, ich prevádzkové podmienky a navrhované rozmery. Uvedené riešenie je v súlade s dokumentom BAT/BREF pre spaľovanie odpadu [39].

#### **11.4.1 Multicyklón**

Spaliny vychádzajúce z procesu sušenia prechádzajú najprv multicyklónom. Tu sa oddeľuje väčšia časť tuhých znečisťujúcich látok aby nevstupovali do ďalších krokov čistenia spalín. Konštrukciu zariadenia tvorí sústava paralelne zapojených menších cyklónov, čím sa tento proces intenzifikuje. Princíp cyklónu sa zakladá na rozdielnych hustotách látok, ktoré sú separované. Tangenciálne privádzané spaliny do vrchnej časti valcovej nádoby sú vystavené kombinácii gravitačných a odstredivých síl. Vplyvom

odstredivej sily je hustejšia látka, v tomto prípade tuhé znečisťujúce látky, tlačené k okraju nádoby a vplyvom gravitačnej sily klesá nadol nádoby odkiaľ prepadáva do výsypky. Ľahšie zložky spalín sú ťahané stredom cyklónu smerom nahor.

#### **11.4.2 Mokrú práčka**

Mokrý systém čistenia spalín poskytuje najvyššiu účinnosť pri odstraňovaní rozpustných kyslých plynov zo všetkých systémov čistenia spalín a s najnižšími stechiometrickými prebytkami. Zabezpečuje odstránenie oxidov síry a kyslých zložiek ako kyseliny chlorovodíkovej a fluorovodíkovej. Tento proces je zabezpečený v jednostupňovej mokrej práčke sprchovaním spalín silnou zásadou. V tomto prípade je za zásadu volený roztok hydroxidu sodného. Roztok je vedený do dýz vyústených v mokrej práčke, ktoré ho atomizujú pre zvýšenie reakčného povrchu. V spodnej časti zariadenia sa nachádza odvod znečisteného roztoku, ktorý je možné za prijateľných podmienok recyklovať. Pred výstupom spalín z práčky je v zariadení umiestnený oddeľovač kvapiek pre zabránenie ďalšiemu zvyšovaniu emisií.

Roztok zásady bude dovážaný cisternou, z ktorej bude prečerpávaný do IBC kontajnerov s objemom 1 m<sup>3</sup>. Z tohto skladovacieho miesta bude následne prečerpávaný dávkovacími čerpadlami do rozprašovačov v hornej časti mokrej práčky. Časť z recyklovaného výluhu je prečerpávaná z okruhu do druhého IBC kontajnera, kde sa skladuje kým nie je odvezený k ďalšej likvidácii. Skladovanie výluhu zaisťuje možnosť kontroly jeho kontroly pred ďalším vypustením. Prečerpávané množstvo by malo závisieť na monitoringu emisií kyslých zložiek.

#### **11.4.3 Dávkovanie močoviny**

Roztok technickej močoviny (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) o koncentrácii približne 40 % sa používa na zníženie emisií oxidov dusíku v spalinách. Tento proces je tiež označovaný ako selektívna nekatalytická redukcia. Ako redukčné činidlo je tiež možné využiť amoniak. Pri reakcii oxidov dusíku s močovinou vzniká neškodný plynný dusík, kyslík a voda. Ideálna teplota pri ktorej táto reakcia prebieha je 950-1050 °C. Z tohto ohľadu je roztok možné dávkovať buď priamo do pece alebo do dohorievacej komory. Pre dosiahnutie požadovanej účinnosti, ktorá obvykle dosahuje 55 %, je nutné roztok dostatočne atomizovať a dobre premiešať so spalinami pri zdžnej dobe do pol sekundy. V navrhovanej jednotke je močovina vstrekaná do dohorievacej komory, kde bude

udržiavaná dostatočne vysoká teplota pre tento proces. Tangenciálny prívod spalín do dohorievacej komory by mal zabezpečiť dostatočné premiešanie spalín a reagentu.

Roztok močoviny bude dovážaný cisternou, z ktorej bude prečerpávaný do IBC kontajnerov s objemom 1 m<sup>3</sup>. Z tohto skladovacieho miesta bude následne prečerpávaný dávkovacími čerpadlami do rozprašovačov v dohorievacej komore. Prečerpávané množstvo by malo závisieť na monitoringu emisií oxidov dusíku.

#### **11.4.4 Dávkovanie Aktívneho uhlia**

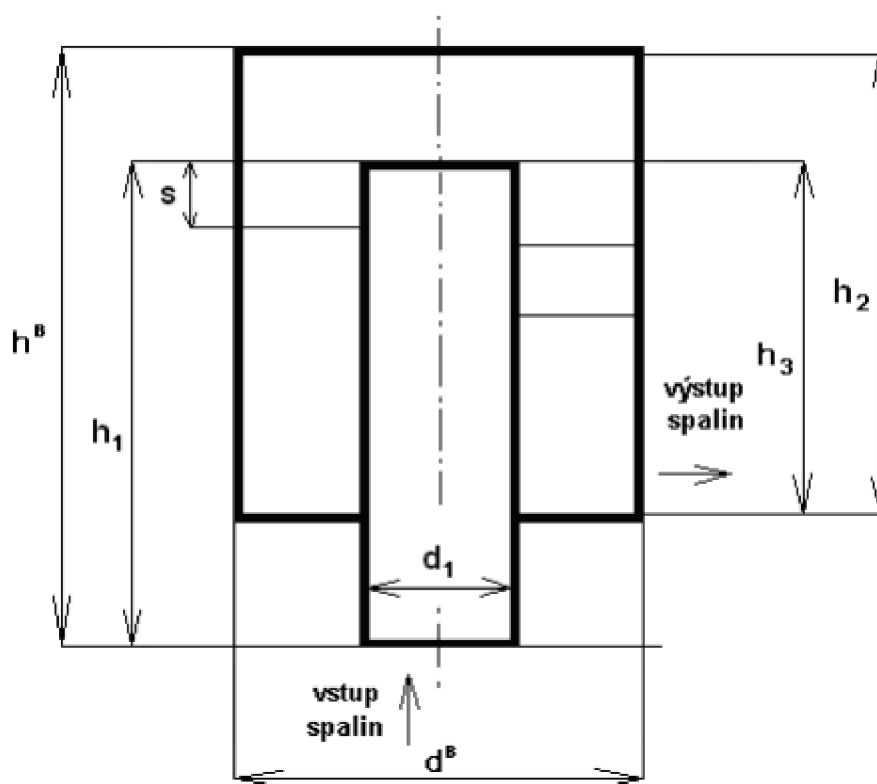
Pre odstránenie ťažkých kovov, dioxínov a furnánov zo spalín je využívaný proces adsorpcie. Porézny sorbent aktívneho práškoveho uhlia má veľmi veľký povrch v pomere ku svojmu objemu. Naň sa zachytávajú spomínané kontaminanty. Sorbent je prsto dávkovaný do spalínovodu a následne na rukávových filtroch odlúčený aj so zachytenými kontaminantmi.

Sorbent bude dovážaný v bigbagoch, ktoré sú následne umiestnené na nosnú oceľovú konštrukciu s výsypkou, na ktorú je privedený tlakový vzduch. Odfuky vzduchu zaistujú výsyp sorbentu v prípade vytvorenia klenby v bigbago. Z výsypky je pomocou špirálového dopravníku a turniketového dávkovača sorbent dávkovaný do ejektoru, ktorý slúži ako podávač pneumatickej dopravy. Dúchadlom s bočným kanálom je vytváraný pretlak, ktorý zabezpečuje dopravu sorbentu až do dýzy ústiacej do spalínovodu. Práškové aktívne uhlie ako sorbent s podielom horľaviny má schopnosť tvoriť vo vzduchu horľavú až výbušnú zmes. Z tohto ohľadu je potrebné dbať na manipuláciu so sorbentom aby nedošlo k prášeniu v okolí zariadení. Tiež je potrebné zabrániť možným iniciáciám exotermickej reakcie.

#### **11.4.5 Kontaktor**

Kontaktör je zariadenie, ktoré zabezpečuje zdržnú dobu a dostatočné premiešanie s adsorpčným sorbentom. Pre tento proces je volený kontaktör so špirálovou vstavbou. Jeho konštrukciu tvorí valec so vstupom spalín na spodnej strane v strede. Stredom zariadenia prechádzajú spaliny do vrchnej časti a špirálovou vstavbou s obdĺžnikovým prierezom sa vracajú do spodnej časti.

Rozmery tohto zariadenia sú potom prepočítané podľa želanej zdržnej doby a prietoku spalín. Navrhované parametre zachytáva tabuľka 37. Schému zariadenia zobrazuje obrázok č. 10.



Obr. č. 10 Schéma špirálového kontaktoru kde:  $d^B$  vonkajší priemer kontaktoru,  $d_1$  priemer vnútorného potrubia,  $s$  stúpanie špirály,  $h^B$  celková výška kontaktoru,  $h_1$  výška vnútorného potrubia,  $h_2$  výška valcovej časti,  $h_3$  výška prekrytia. [48]

Tab. č. 37 Navrhované parametre kontaktoru

prietok spalín	3955,5	m <sup>3</sup> /h
zdržná doba	2	s
výška vstupného potrubia	2,8	m
výška prekrytia	2,4	
výška stúpania	0,4	m
počet otáčok	6	
priemer vstupu	0,70	m
prierez vstupu	0,38	m <sup>2</sup>
celková šírka	2,00	m
šírka vstavby	0,65	m
stredný priemer špirály	1,35	m
prierez špirálovej vstavby	0,26	m <sup>2</sup>
dĺžka špirály	4,26	m

#### 11.4.6 Rukávové filtre

Rukávové filtre zachytávajú v spalinách zvyšné tuhé znečisťujúce látky, soli a kontaminovaný sorbent z čistenia spalín. Ich konštrukcia pozostáva z plášťa v tvare kvádra, v ktorom je uložená vstavba držiaca rukávy filtrov. Spaliny týmto aparátom

prechádzajú zo spodnej do vrchnej časti, pričom prechádzajú cez filtračné rukávy. Pri navýšení tlakovej straty vplyvom filtračného koláču, je táto usadenina odstránená pomocou dýz s tlakovým vzduchom umiestnených v hornej časti nad filtrami. Spätný tlak opráša zachytený popolček do výsypky odkiaľ je odvádzaný špirálovým dopravníkom.

Rozmery filtračnej plochy a následne celého zariadenia sa navrhujú podľa prietoku spalín a predpokladanej rýchlosti filtrácie, ktorá bola určená z [35] na 1 m/min. Objem suchých spalín bol spočítaný pomocou hustôt jednotlivých plynov za normálnych podmienok. Pre prepočet na aktuálne podmienky bola použitá stavová rovnica ideálneho plynu. Uvažované a vypočítané parametre sú zachytené v tabuľke 38.

Tab. č. 38 Navrhované parametre rukávových filtrov

rýchlosť filtrácie	0,017	m/s
prietok spalín	3955,5	m <sup>3</sup> /h
prietok spalín	1,1	m <sup>3</sup> /s
vypočítaná plocha	65,9	m <sup>2</sup>
teplota na filtre	130	°C
odhadovaná výška rukávu	2	m
odhadovaný priemer	0,16	m
vypočítaný počet rukávov	64,3	
počet navrhovaných rukávov	64	
medzery medzi rukávmi	0,07	m
počet filtrov na šírku	8	
počet filtrov na dĺžku	8	
šírka zariadenia	1,91	m
dĺžka zariadenia	1,91	m

## 11.5 Pomocné aparáty

V nasledujúcej kapitole sú opísané procesy dopravy, úpravy prípadne skladovania jednotlivých médií v rámci spaľovne, ktoré neboli spomenuté v predchádzajúcich kapitolách.

### 11.5.1 Ventilátor

Ťah spalín v celej jednotke by mal zabezpečovať jeden radiálny ventilátor, ktorý zabezpečí tlakový spád v celej jednotke pred ním a následne výtlak na komíne. Spalinový ventilátor musí prekonať všetky miestne a dĺžkové tlakové straty celej trasy spalín. Jeho

příkon sa následne stanoví podľa prietoku sumy všetkých tlakových strát a jeho účinnosti.

### **11.5.2 Komín**

Komín slúži ako výdych jednotky pre prečistené spaliny zo spaľovacieho procesu. Ťah v komíne v podobe pretlaku zabezpečuje ventilátor, ktorý zabezpečuje tlakový spád pre spaliny v celej jednotke. Komín je tiež vybavený systémom kontinuálneho merania emisií. Návrh jeho výšky sa uskutočňuje pomocou rozptylovej štúdie, ktorá zvažuje aktuálny stav znečisťujúcich zdrojov v danej lokalite.

Okrem hlavného komínu je v jednotke umiestnený aj havarijný komín za dohorievacou komorou. Pri prevádzkových poruchách môže tok spalín odklonený do núdzového komína dvojcennou klapkou.

### **11.5.3 Stanica pre výrobu stlačeného vzduchu**

Požadovaná kvalita vyrobeného stlačeného vzduchu závisí hlavne na účele použitia. V navrhovanej jednotke bude tlakový vzduch používaný na oprašovanie rukávových filtrov prípadne prevzdušenie sypkých materiálov, kde nemusí byť jeho kvalita zrovna vysoká. Ale keďže sa bude používať aj pre meracie prístroje, je potrebné zaistiť jeho dôkladné odolejovanie, odstránenie tuhých častí a odstránenie vody, aby neovplyvňovali ich funkciu. Pre odstránenie vody je vhodná pre priemyselné použitie adsorbčná sušička. Pre odstránenie tuhých častíc bude použitá séria tkaninových filtrov. Odolejovanie vzduchu zabezpečuje separátor oleja. Pre priemyselné použitie tlakového vzduchu je vhodný skrutkový kompresor. Nerovnomernosť potrebných dodávok do systému zabezpečujú zásoby vo vzdušníku.

### **11.5.4 Popolčkové hospodárstvo**

Tuhé znečisťujúce látky v spalinách, zvané aj popolček, sa v čistení spalín odlučujú v multicyklóne a na tkaninových filtroch. Ihlanové výsyvky týchto odlučovačov ústia k špirálovým dopravníkom, ktoré sa schádzajú v jednom mieste. Popolček z oboch dopravníkov prepadáva cez dvoj-klapku do pneumatickej dopravy. Ako podávač je v tomto prípade použitý ejektor a ako zdroj tlakového vzduchu dúchadlo s bočným kanálom. Potrubie je vyvedené do vrchnej časti skladovacieho sila. Vytváraný pretlak



pneumatickou dopravou v síle je vyrovnávaný pomocou prietoku vzduchu cez prachový filter, ktorý je umiestnený navrchu síla.

#### **11.5.5 Popolčkové sílo**

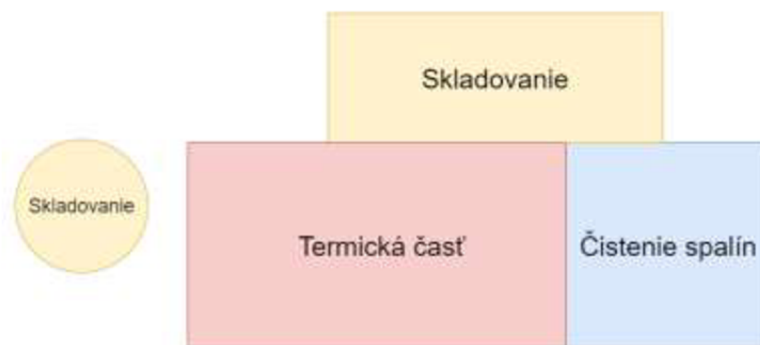
Sílo slúži k uskladneniu popolčeka po dobu, než je cisternou odvezený na skládku nebezpečného odpadu. Konštrukciu síla tvorí dutý valec, postavený na nosnej konštrukcii tak, aby mohla cisterna pod sílo vojsť. Popolček je následne cez hubicu presypaný do nákladného priestoru vozidla a odvážaný preč. Veľkosť síla pre popolček bola zvolená rovnaká ako u síla pre popol.

## 12 DISPOZIČNÝ NÁVRH SPALOVNE

Návrh presného rozmiestnenia všetkých aparátov je v realite zdĺhavý iteratívny proces, kedy sa do navrhovaného modelu postupne včleňujú všetky potrebné prvky a zvažujú všetky aspekty pre technologickú funkčnosť navrhovanej jednotky. Výsledok tohto procesu tvorí rada kompromisov, ktoré je potrebné urobiť pre optimálny návrh jednotky z hľadiska prevádzkových a investičných nákladov, zastavanej plochy a náročnosti obsluhy jednotky. V realite je zväčša pri návrhu uvažovaný konkrétny terén, na ktorom sa bude stavať prípadne už zastavané priestory, kam je potrebné návrh zmestiť. V tejto práci je uvažovaná pri dispozičnom návrhu rovná prázdna plocha vedľa dotknutej čističky.

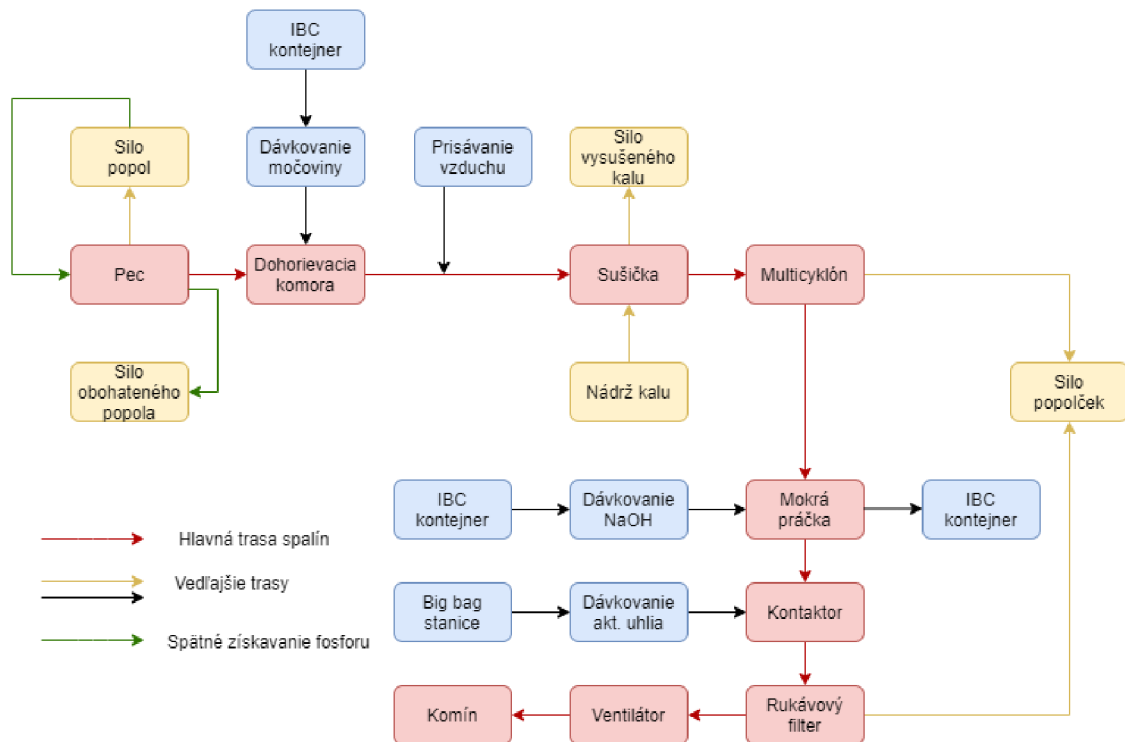
### 12.1 Postup dispozičného návrhu

Postup návrhu začína rozmiestnením hlavných technologických celkov do priestoru. Hlavné celky tvorí termická časť, čistenie spalín a skladovanie. Tri silá a jedna nádrž musia byť bezprostredne prepojené s termickou časťou a jedno silo s čistením spalín. Uvažujúc tento aspekt, vychádza schéma rozloženia podľa obrázku 11.



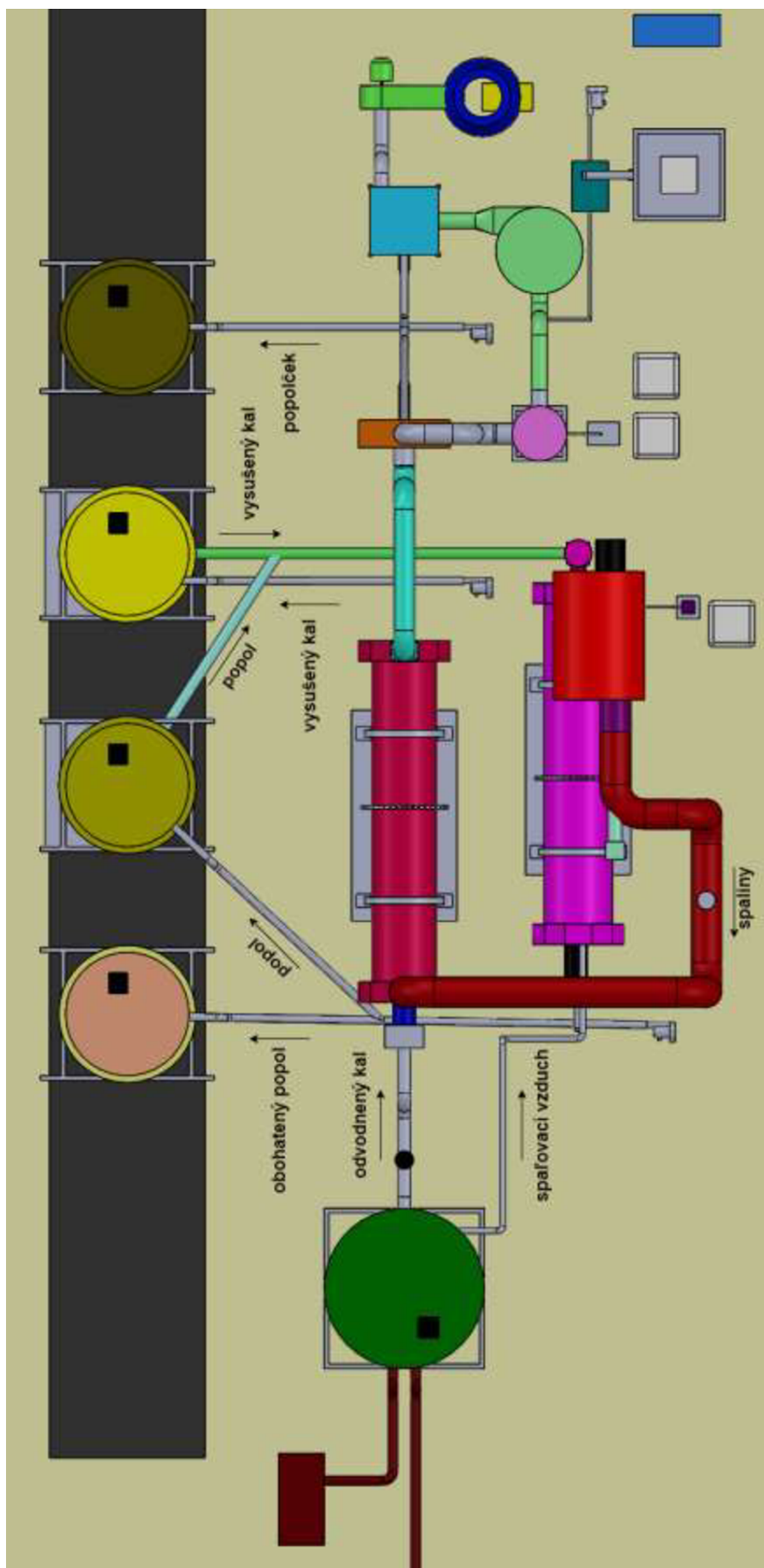
Obr. 11 Schéma navrhovanej dispozície technických celkov.

Následne je nutné stanoviť všetky potrebné technologické zariadenia, ktoré do jednotky vstupujú a navrhnuť ich rozmiestnenie v rámci technologického celku. Blokové schéma postupnosti včlenených zariadení zobrazuje obrázok 12.

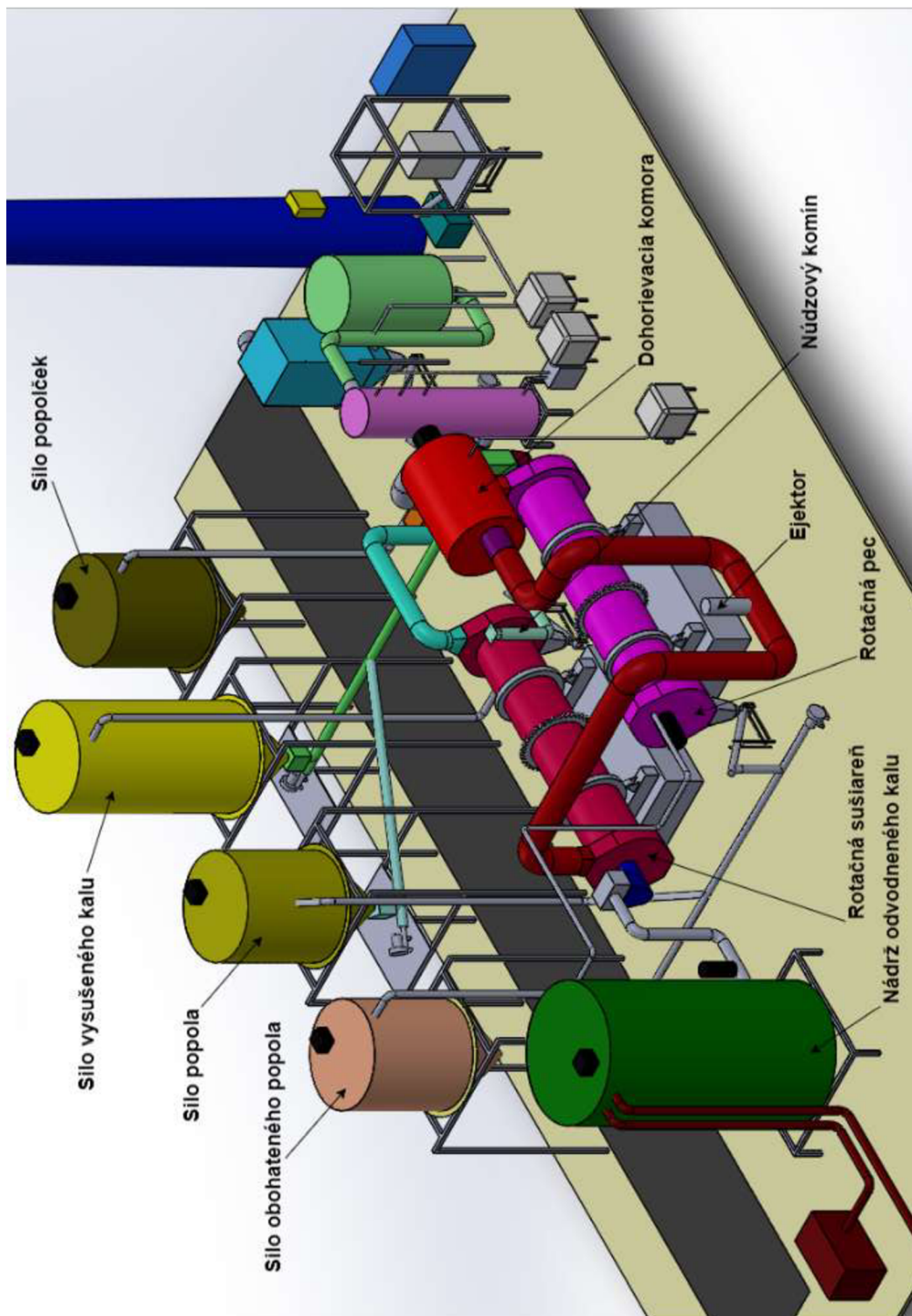


Obr. č. 12 Schéma použitých zariadení

Vzájomná poloha pece a sušičky je navrhnutá tak aby bol výsyp zo sušičky a násyp do pece na jednej strane pre skrátenie dopravnej trasy sušeného kalu. Zo sušičky prechádzajú spaliny do multicyklónu, ktorý musí byť v blízkosti tkaninového filteru, aby mohli mať spoločnú pneumatickú dopravu do sila pre popolček. Umiestnenie skladovania médií na čistenie spalín je v bezprostrednej blízkosti aparátov a zároveň centralizované pre jednoduchú obsluhu. Umiestnenie stanice na výrobu tlakového vzduchu je na opačnej strane jednotky od termickej časti, aby nedochádzalo zbytočne k strate jej výkonnosti vplyvom vyššej teploty. Pri návrhu je ďalej potrebné uvažovať prítomnosť nosných konštrukcií a obslužných zariadení tak, aby bolo možné dané konštrukcie využiť pre viaceré zariadenia a ako podporu pre rozvody. Výsledné dispozičné riešenie zachytávajú obrázky 13 14 a 15.

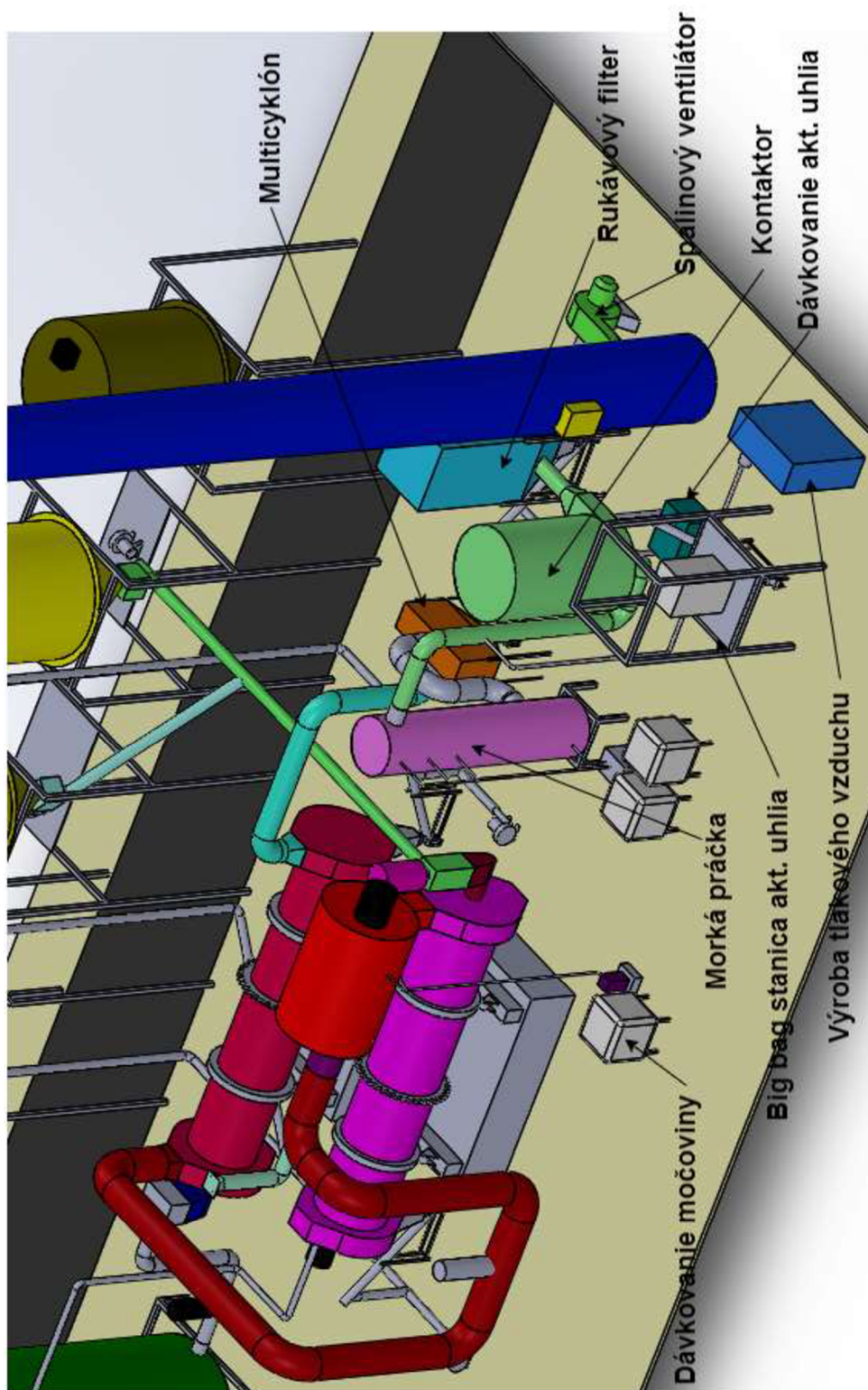


Obr. č. 13 Pódorys spalovne a hlavné průduy médií



Obr. č. 14 Dispozičné riešenie spaľovne – termická časť





Obr. č. 15 Dispozičné riešenie spaľovne – čistenie spalin

## 13 EKONOMICKÁ ROZVAHA NAVRHOVANEJ JEDNOTKY

Nasledujúca kapitola popisuje odhady hlavných investícií a peňažných tokov navrhovanej jednotky za účelom posúdenia rentabilnosti daného projektu.

Odhad investičných nákladov projektu je väčšinou založený na predošlých skúsenostiach firmy s projektovaním podobných zariadení. S predpokladanou garanciou funkčnosti projektu a dobrým cenovým odhadom je možné zvýšiť šance vyhrať tender na zákazku takým spôsobom, aby sa firme maximalizovali zisky pri cene, ktorú si za projekt na kľúč stanoví.

Tabuľka 39 stanovuje odhady pre jednotlivé časti investície projektu a ich výslednú hodnotu. Tieto odhady boli zvolené na základe konzultácie s odbornými pracovníkmi firmy EVECO Brno.

Tab. č. 39 Odhad investičných nákladov

projekčné práce	8 000 000,00 Kč
termická časť	24 000 000,00 Kč
čistenie spalín	20 000 000,00 Kč
skladovanie, doprava a pomocné aparáty	22 000 000,00 Kč
<b>SUMA</b>	<b>74 000 000,00 Kč</b>

Prevádzkové náklady spaľovne vychádzajú z jednotlivých materiálových tokov v rámci spaľovne, spotrebe elektriny podľa voľby výkonu jednotlivých aparátov a podľa počtu zamestnancov, ktorý navrhovanú jednotku obsluhujú. Pravidelné výdaje zahŕňajú aj servis a údržbu zariadení. Odhad tejto sumy je stanovený na 2% z investícií.

Počet zamestnancov trojsmennej prevádzky, pričom jedna smena je uvažovaná 8 hodín, vychádza tesne na 7 pri uvažovaných 160 odpracovaných hodinách týždenne s dovolenkou po dobu 20 dní v roku. Na každej smene je uvažovaný vždy jeden operátor. Na jednej smene za deň je uvažovaný pomocný pracovník, ktorý bude mať na starosti manipuláciu s pomocnými médiami hlavne v rámci čistenia spalín.

Všetky uvažované vstupné parametre do prevádzkových nákladov zachytáva tabuľka 40. Toky médií čistenia spalín boli odhadnuté pomocou údajov z BAT/BREF dokumentu. Jednotkové ceny médií boli zvolené po konzultácii s odborníkmi firmy EVECO Brno. V bilancii nie je uvažované likvidovanie produktu mokrého čistenia spalín, pričom táto

hodnota by nemala prevyšovať 1% uvažovaných nákladov. Ceny skládkovania popola nie sú uvažované, keďže popol by mal byť ďalej materiálovo využiteľný vďaka technológii ASDDEC. Prakticky by jeho zhodnotenie mohlo generovať zisk.

Tab. č. 40 prevádzkové náklady jednotky

	množstvo	ceny za jednotku	ročné náklady
Zemný plyn	22 m <sup>3</sup> N/h	17 Kč	2 947 976,88 Kč
Aktívne uhlie	0,2 kg/h	45 Kč	72 000,00 Kč
Popolček	3,2 kg/h	2,5 Kč	92 800,00 Kč
NaOH	1,8 kg/h	10 Kč	144 000,00 Kč
Elektrina	47,5 kW	3 Kč	1 044 000,00 Kč
Zamestnanci	7	26700	1 944 000,00 Kč
Servis a údržba	2%		1 480 000,00 Kč
<b>SUMA</b>			<b>7 695 976,88 Kč</b>

Oproti nákladom na proces je potrebné postaviť zisky dosiahnuté vďaka tomuto procesu, aby bolo možné stanoviť výnosnosť projektu. Kal, ktorý nie je možné použiť na poľnohospodársku pôdu musí byť jednoducho skládkovaný. Z tohto ohľadu sú pri tomto procese ušetrené peniaze za skládkovanie kalu. Ceny skládkovania odpadu možno dohľadať v cenníkoch skládok. Aktuálny legislatívny poplatok za skládkovanie činí 500 Kč za tonu odpadu. Táto suma sa do roku 2023 plánuje zvýšiť viac ako trojnásobne na 1850 Kč a po roku by sa malo skládkovanie využiteľných odpadov úplne zakázať. Aktuálny poplatok za ukladanie čistiarenskeho kalu na skládku a ušetrené peniaze za tento poplatok zobrazuje tabuľka 41.[52]

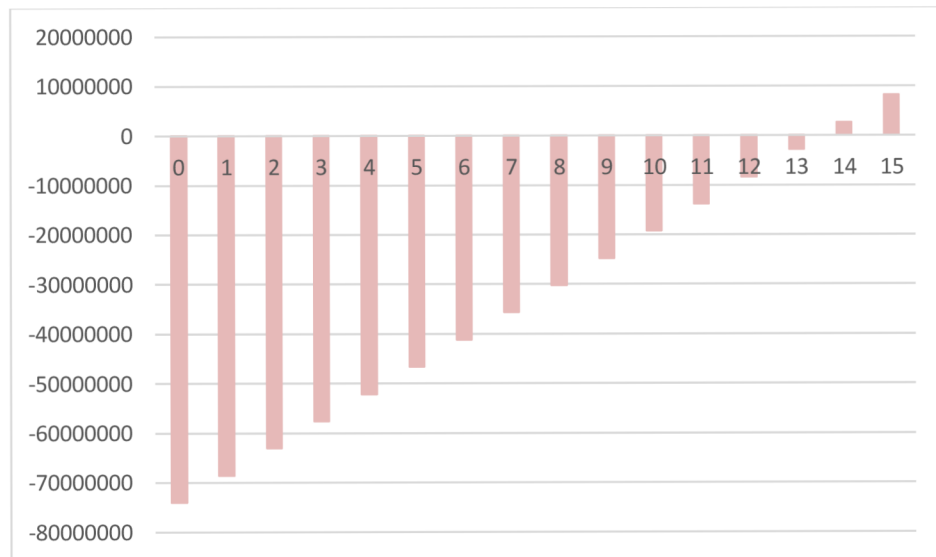
Tab. č. 41 Predpokladaná úspora nákladov pri skládkovaní kalu

	cena (Kč/t)	ročná úspora
skládkovanie kalov	1400	6 720 000,00 Kč
skládkovanie kalov 2023	2750	13 200 000,00 Kč

Jednoduchým porovnaním cifry z prvého riadku tabuľky 41 a sumy výdajov z tabuľky 40 je zrejmé, že daný projekt je za takého stavu nerentabilný. Dôvodom je určite volená relatívne nízka kapacita takejto jednotky ale aj uvažovanie nulového príjmu z produkcie popola bohatého na fosfor. Uvážením skládkovacích poplatkov pre rok 2023 sa daná situácia mení. Graf na obrázku č. 16, ktorý zobrazuje kumulatívny tok peňazí tejto varianty a naznačuje ziskovosť projektu pri 14 rokoch fungovania zariadenia. Táto hodnota je vyslovene fiktívna, keďže sa predpokladá úplné zakázanie skládkovania



využiteľného odpadu do konca roku 2023. Treba podotknúť, že pri návrhu takéhoto zariadenia budú určite štátom poskytnuté dotácie, pre financovanie časti investičných nákladov. To zapríčini posunutie bodu, kedy sa zariadenie dostane do ziskového stavu.[52]



Obr. č. 16 Kumulatívny tok peňazí navrhovanej jednotky pri navýšených skladovacích poplatkoch

## 14 ZÁVER

Táto diplomová práca sa zaoberá voľbou vhodného spôsobu nakladania s čistiarenským kalom s ohľadom na aktuálne trendy v tomto odvetví.

V prvej časti diplomovej práce je popísaná cirkulárna ekonomika, ktorá by mala utvárať smerovanie aktivít v hospodárstve za účelom zefektívnenia využívania zdrojov. Na to ďalej naráža kal ako odpad, ktorý je potrebné za nevyhovujúcich podmienok pre aplikáciu na pôdu likvidovať, pričom sa k tomuto účelu využívajú skládky. Ukladanie na skládky predstavuje neutržateľný lineárny model, ktorý je nutné nahradiť, no za súčasného stavu je na území Českej republiky veľmi málo možností ako kontaminovaný kal likvidovať. Kaly sú aktuálne podľa štatistík ČSÚ najviac využívané na poľnohospodárskej pôde, no so sprísňujúcimi sa kritériami na kvalitu kalu bude toto množstvo degradovať.

Alternatívou k materiálovému využitiu sú termické deštrukčné metódy. Takáto likvidácia kalu je v niektorých vyspelejších štátoch vyslovene dominantná v rámci nakladania s kalom. Primárne medzi deštrukčné metódy patrí monospaľovanie a spoluspaľovanie kalov. Kal je možné spoluspaľovať s komunálnym odpadom, uhlím alebo v cementárenských peciach, no podiel kalu v palive netvorí zásadné množstvo, aby to vyriešilo likvidáciu majoritnej časti domácej produkcie kalu. Monospaľovne kalu predstavujú zdanlivo vhodné riešenie pre likvidáciu kalu, no možnosti skládkovania s nízkym poplatkom za skládkovanie stavajú projekt do novej nerentabilnosti. Napriek tomu vyzerá byť výstavba monospaľovní jediným riešením pre likvidáciu kalu. Do konca roku 2023 by sa malo skládkovanie úplne zakázať, pričom následne ostane už len jediná spomínaná možnosť, ktorú je nutné sprostredkovať.

Nakladanie s kalom ako odpadom so sebou nesie radu legislatívnych obmedzení, ktoré je potrebné dodržiavať pri jeho využívaní aj likvidácii. Časť práce sa preto zaoberá legislatívou v oblasti nakladania s kalom a legislatívou ohľadne jeho spaľovania. Výstavba spaľovacieho zariadenia so sebou nesie radu legislatívnych požiadaviek, ktoré je potrebné v spaľovacej jednotke dodržať. Vzhľadom na zachovanie životného prostredia ide hlavne o limity kontaminantov, ktoré môže spaľovňa vypúšťať do okolia alebo prevádzkové podmienky spaľovacej jednotky.

V práci sú popísané 2 bežne používané monospaľovne kalov. Fluidná pec, ktorá je najviac využívaná ako monospaľovňa kalov a etážová pec. Napriek tomu bol zvolený tretí popisovaný aparát a to rotačná pec. Predpoklad navrhovanej jednotky spočíva vo využití rotačnej pece na spaľovanie kalov aj na spätné získavanie fosforu pomocou technológie ASHDEC. Ako naznačujú interné spaľovacie skúšky firmy EVECO Brno, rotačnú pec je možné využiť na spaľovanie čistiarenskeho kalu. Zároveň použitie rotačnej pece ako reaktoru pre technológiu ASHDEC by ušetrilo značné investície. Vysokoteplotné sušenie spalínami je zdanlivo najvhodnejšia voľba do procesu, vzhľadom na investičné aj prevádzkové náklady takéhoto riešenia.

Práca sa ďalej zaoberá návrhom monospaľovne s použitím zvolených aparátov a bilanciou spaľovacieho procesu. Spracovateľská kapacita jednotky bola zvolená na 60000 EO. V rámci jednotky sú riešené transporty a skladovanie procesných médií pre zabezpečenie funkčnosti a vhodnej obslužnosti procesu. Súčasťou návrhu je tiež celok čistenia spalín pre splnenie limitov emisií na výduchu. V rámci dispozičného návrhu jednotky bol vytvorený orientačný priestorový model, ktorý zachytáva vhodné rozloženie aparátov uvažujúc voľnú stavebnú plochu.

Záverom práce je posúdená rentabilita navrhovanej jednotky s ohľadom na investičné a prevádzkové náklady. Za zisk sú považované ušetrené skládkovacie poplatky za čistiarenský kal, ktorý bol spálený. Pri aktuálnych skládkovacích poplatkoch vychádza zariadenie nerentabilné kvôli odhadovaným vyšším nákladom ako potenciálnej úspore. Úspešným speňažením popola ako hnojiva by príjmy pravdepodobne presiahli prevádzkové náklady a zariadenie by tak malo byť ziskové.

## 15 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] KOS, M. 2019. Odpadní vody, čistírenské kaly a organická hnojiva jako prostředek vstupu antibiotik a antibiotické rezistence do životního prostředí? In: Vodní hospodářství. 2019, roč. 69, č 5., s. 12 – 13. ISSN 1211-0760.
- [2] EURÓPSKA KOMISIA. 2014. Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe [online]. Brusel: 2014.[cit. 3-2-2020] Dostupné z: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52014DC0398>
- [3] ČESKO. Vyhláška 294/2005 Sb. o podmienkach ukladania odpadov na skládky a ich využívanie na povrchu terénu a zmene vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostiach nakladania s odpadmi. *Sbírka zákonů České republiky*. [online]. 2005 [cit. 3-2-2020] Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-294>
- [4] ČESKÁ INSPEKCE ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Vyjadrenie k pokračovaniu skládkovania. [online]. 2013 [cit. 3-2-2020]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/100994>
- [5] ČESKO. Vyhláška 437/2016 Sb. Vyhláška o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady a změně vyhlášky č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady). *Sbírka zákonů České republiky*. [online]. 2016 [cit. 3-2-2020] Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-437>
- [6] HAVELKA, P. 2019. Změny s nakládání s kaly z čistíren odpadních vod. [online] 2019. [cit. 3-2-2020] Dostupné z: <https://www.envigroup.cz/zmeny-v-nakladani-s-kaly-z-cistiren-odpadnich-vod.html>
- [7] TOMÁŠOVÁ, H. 2019. Přírodní zdroje, které máme na rok, jsme vypotřebovali již 10. května. [online] 2019. [cit. 11-2-2020] Dostupné z: <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/prirodni-zdroje-ktere-mame-na-rok-jsme-vypotrebovali-jiz-10->

[kvetna?fbclid=IwAR0s6CjW5oebQJSPEx2p0EC4iVHetpXgPZmq\\_ZJRUJK-VRk7IKKPZIDXa\\_g](https://www.prumyslovaekologie.cz/info/aktualni-nazory-na-vyuzivani-kalu)

- [8] KOS, M. 2019. Aktuální názory na využívání kalů. [online]. 2019 [cit. 27-2-2020]. Dostupné z: <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/aktualni-nazory-na-vyuzivani-kalu>
- [9] Mercl F., Košnář Z., Najmanová J., Hanzlíček T., Száková J., Tlustoš P. (2018) Hodnocení obsahů minerálních živin a rizikových prvků v anaerobně stabilizovaných kalech z ČOV. In: WASTE FORUM. 2018, č. 1, s. 78-82. ISSN 1804-0195
- [10] Ing. Barbora Lyčková, Ph.D., prof. Ing. Peter Fečko, CSc., doc. Dr. Ing. Radmila Kučerová. 2008. Využití odpadních kalů. [online]. 2008 [cit. 7-3-2020]. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/vyuziti.html>
- [11] ČESKO. Vyhláška 341/2008 Sb. o odrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady). *Sbírka zákonů České republiky*. [online]. 2008 [cit. 7-3-2020] Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2008-341>
- [12] NĚMCOVÁ, Miroslava. Kompostování čistírenských kalů malých producentů. Brno, 2013. 68 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Michal Křiška, Ph.D..
- [13] Mackuľak T., Grenčíková A., Brandeburová P. Mikroplasty výskyt a správanie v životnom prostredí. [online] [cit. 14-3-2020] Dostupné z: <http://vodnihospodarstvi.cz/mikroplasty/>
- [14] BORÁNĚ, Jaroslav. Zpracování kalů z čistíren odpadních vod s energetickým využitím: zkrácená verze Ph.D. Thesis. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. ISBN 978-80-214-36-7.

- [15] POLÁKOVÁ, A. Energetické využití kalů z čistíren odpadních vod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Frýba.
- [16] HAVLÁSEK, M. Energetické využívání odpadů, zejména kalů z čistíren odpadních vod. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 38 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Frýba.
- [17] HRUŠECKÝ J. Rotačná pec. [online] [cit. 17-3-2020] Dostupné z: <http://www.stavimex.sk/rservice.php?akce=tisk&cisloclanku=2010060001>
- [18] ŠIRŮČEK, V. Experimentální sušárna čistírenských kalů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 69 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková, Ph.D.
- [19] KREJČÍ, T. Spoluspalování kalů v již stávajícím zařízení. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Frýba.
- [20] URBAN, V. Spalování čistírenských kalů s přidavkem alkálií. Brno, 2011. 66 s. Diplomová práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí diplomové práce Ing. Lucie Houdková Ph.D.
- [21] ŠŤASTA, P. Využití čistírenských kalů jako alternativního paliva. Brno, 2009. 147 s. Disertační práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně, Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [22] ONDERKOVÁ B. , KOŠČOVÁ M., MAŤAŠOVÁ Z., SIČÁKOVÁ L. 2005 Mikrobiálna kontaminácia povodia Bodrogu. [online] [cit. 25-3-2020] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/26412561\\_The\\_microbial\\_contamination\\_of\\_the\\_Bodrog\\_river\\_drainage/fulltext/5981de330f7e9b7b524bcb72/The-microbial-contamination-of-the-Bodrog-river-drainage.pdf](https://www.researchgate.net/publication/26412561_The_microbial_contamination_of_the_Bodrog_river_drainage/fulltext/5981de330f7e9b7b524bcb72/The-microbial-contamination-of-the-Bodrog-river-drainage.pdf)
- [23] ČESKO. Zákon 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů. *Sbírka zákonů České republiky*. [online]. 2016 [cit. 25-3-2020] Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185#f2200017>

- [24] KODEŠOVÁ, R., KLEMENT, A., KOČÁREK, M., FÉR, M. 2019. Jak na fosfor – budoucí trendy a realita. [online] 2019. [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <https://www.energieag-bohemia.at/180405-Tagungsband-MTrebova.pdf?ch=jDrI0b1U&:hp=6;82;de>
- [25] Křiška, M., Šálek, J. 2012. Využití vegetace k odvodnění kalu. [online] 2012. [cit. 11.9.2020] Dostupné z: [https://fns.uniba.sk/fileadmin/prif/actaenvi/ActaEnvi\\_2012\\_1/06\\_A\\_Kriska\\_et\\_al.pdf](https://fns.uniba.sk/fileadmin/prif/actaenvi/ActaEnvi_2012_1/06_A_Kriska_et_al.pdf)
- [26] ÚSTAV ENERGETIKY VŠCHT PRAHA. TABULKY [online] Dostupné z: <http://uen.vscht.cz/files/uzel/10466/S81LLUpPLclMzj68UqEkMak0J7sSAA.pdf?re-directed>
- [27] FÍK, J. Složení zemních plynu. [online] [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/89-slozeni-zemnich-plynu>
- [28] EKO TREND RESEARCH CENTRE. 2015. Optimalizace nakládání s kaly z komunálních čistíren odpadních vod. [online] 2015. [cit. 11.9.2020] Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty\\_po8\\_opzp\\_2007\\_2013/\\$FILE/OODP-Oddil\\_III\\_Navrhova\\_cast-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-Oddil_III_Navrhova_cast-20160810.pdf)
- [29] KOS, M. 2018. Mikroplasty v odpadní vodě a půdě. In: SOVAK.2019, roč. 27, č. 3., s. 18. ISSN 1210-3039.
- [30] HARTIG, K. 201. Kaly a cirkulární ekonomika In: Vodní hospodářství.2018, roč. 68, č. 1., s. 10 – 13. ISSN 1211-0760.
- [31] ČESKÝ ŠTATISTICKÝ ÚRAD. Vodovody, kanalizace a vodní toky. [online] [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/>
- [32] FRÝBA, L. Koncepce termického zpracování odpadů z komunální sféry. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 127 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [33] KOSSACZKÝ, E, SUROVÝ, J. 1987. Chemické inžinierstvo 2, Sušenie [online] 1987. [cit. 10.9.2020]. Dostupné z: [http://kchbi.chtf.stuba.sk/upload\\_new/file/CHI-2/SUSENIE.PDF](http://kchbi.chtf.stuba.sk/upload_new/file/CHI-2/SUSENIE.PDF)



- [34] VOHLÍDAL, J., JULÁK, A., ŠTULÍK, K. 1999. Chemické a analytické tabulky, Grada, Praha [online] [cit. 11.9.2020] Dostupné z:  
<http://old.pglbc.cz/files/chemie/termodynamika2.html>
- [35] KOTAS, Dan. Moderní technologie čištění spalin pro energetické využití zdravotnických odpadů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství, 2019. Diplomová práce. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Krejčí. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116737>.
- [36] MIČEK, M. Separace drobných kapiček rozptýlených v proudu páry. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 55 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..
- [37] ČESKO. Vyhláška 415/2012 Sb. Vyhláška o přípustné úrovni znečištění a jejím zjištění a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. *Sbírka zákonů České republiky*. [online]. 2012 [cit. 28-8-2020] Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-415>
- [38] KUTIL, J., DOHÁNYOS, M. 2005 Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz* [online]. 2005-01-05 [cit. 2020-09-11]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu-2>. ISSN: 1801-2655.
- [39] ODBOR PRUMYSLOVÉ EKOLOGIE. 2005 Integrovaná prevence a omezování znečištění, Referenční dokument o nejlepších dostupných technologiích spalování odpadů. [online] 2005. [cit. 11.9.2020] Dostupné z:  
<https://www.mpo.cz/cz/prumysl/ippc-integrovana-prevence-a-omezovani-znecisteni/referencni-dokumenty-bref/referencni-dokumenty-o-nejlepsich-dostupnych-technikach-bref--143226/>
- [40] A. Amann, O. Zoboli, J. Krampe, H. Rechberger, M. Zessner, L. Egle, Environmental, impacts of phosphorus recovery from municipal wastewater, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 130, 2018, Pages 127-139, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.002>.  
(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917303786>)



- [41] ODBOR ODPADU. 2019. Odpověď na žádost o stanovisko k záměrům výstavby zařízení k energetickému využití čistírenského kalu. [online] [cit. 11.9.2020]  
Dostupné z: <https://www.sovak.cz/sites/default/files/2019-07/energerick%C3%A9%20vyu%C5%BEit%C3%AD%20kal%C5%AF%20-%20odpov%C4%9B%C4%8F%20M%C5%BDP%20-%20povolen%C3%AD%20spalov%C3%A1n%C3%AD.pdf>
- [42] RADA EURÓPSKEJ ÚNIE. 1999. SMERNICA RADY 1999/31/ES z 26. apríla 1999 o skládkach odpadov. [online] 1999. [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A31999L0031>
- [43] KOMISIA EURÓPSKY SPOLOČENSTIEV. 2006. NARIADENIE KOMISIE (ES) č. 208/2006 zo 7. februára 2006, ktorým sa menia a dopĺňajú prílohy VI a VIII k nariadeniu Európskeho parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002, pokiaľ ide o normy na spracovanie pre zariadenia na výrobu bioplynu a kompostu a požiadavky na hnoj. [online] 2006. [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32006R0208>
- [44] KOMISIA EURÓPSKY SPOLOČENSTIEV. 1986. SMERNICA RADY z 12. júna 1986 o ochrane životného prostredia a najmä pôdy pri použití splaškových kalov v poľnohospodárstve. [online] 1986. [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=celex:01986L0278-20090420>
- [45] EURÓPSKY PARLAMENT A RADA EURÓPSKEJ ÚNIE. 2000. SMERNICA 2000/76/ES EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY zo 4. decembra 2000 o spaľovaní odpadov. [online] 2000. [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32000L0076>
- [46] EURÓPSKY PARLAMENT A RADA EURÓPSKEJ ÚNIE. 2010. SMERNICA EURÓPSKEHO PARLAMENTU A RADY 2010/75/EÚ z 24. novembra 2010 o priemyselných emisiách. [online] 2010. [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0075>
- [47] OKAWARA. SLUDGE DRAYER [online] [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <http://www.okawara-mfg.com/english/products/170/>

- [48] VOTAVA, J. Jednotka pro energetické využití kontaminované biomasy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2010. 78 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Kropáč.
- [49] WIECHMANN, B., DIENEMANN, C., KABBE, CH., BRANDT, S., VOGEL, I., ROSKOCH, A. 2013. Sewage sludge management in Germany. [online] [cit. 11.9.2020] Dostupné z: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/sewage\\_sludge\\_management\\_in\\_germany.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/sewage_sludge_management_in_germany.pdf)
- [50] MORF, L. 2012. Phosphorus from sewage sludge – The strategy of the Canton of Zurich and Switzerland. [online] [cit. 11.9.2020] Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/271704671\\_Phosphorus\\_from\\_sewage\\_sludge\\_-\\_The\\_strategy\\_of\\_the\\_Canton\\_of\\_Zurich\\_and\\_Switzerland](https://www.researchgate.net/publication/271704671_Phosphorus_from_sewage_sludge_-_The_strategy_of_the_Canton_of_Zurich_and_Switzerland)
- [51] HERMAN, L. Outotec modular energy and phosphorus recovery process. [online] [cit. 11.9.2020] Dostupné z: <https://phosphorusplatform.eu/images/Conference/ESPC2-materials/Hermann%20poster%20ESPC2.pdf>
- [52] MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Lidové noviny: Vozit odpady na skládky se prodraží. [online] [cit. 11.9.2020] Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/articles\\_160217\\_LN](https://www.mzp.cz/cz/articles_160217_LN)

## 16 ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV

Symbol	Význam	Jednotka
$R_1$	Energetická účinnosť	-
$E_p$	Ročné množstvo vyrobenej energie vo forme tepla	GJ·rok <sup>-1</sup>
$E_f$	Ročný energetický vstup palív	GJ·rok <sup>-1</sup>
$E_i$	Ročná dodaná energia bez $E_w$ a $E_f$	GJ·rok <sup>-1</sup>
$E_w$	Ročné množstvo energie obsiahnuté v spracovávaných odpadoch za použitia nižšej výhrevnosti	GJ·rok <sup>-1</sup>
KTJ	Kolóniu tvoriace jednotky	-
$C_{ref,A}$	Koncentrácia látky A prepočítaná na referenčný kyslík	mg.mN <sup>-3</sup>
$C_{real,A}$	Nameraná koncentrácia látky A	mg.mN <sup>-3</sup>
$C_{ref,O_2}$	Referenčná koncentrácia kyslíku	%
$C_{real,O_2}$	Skutočná koncentrácia kyslíku v spalinách	%
C	Emisné limity ako denný priemer	mg.m <sup>-3</sup>
$V_{odpad}$	Objem odpadného plynu z odpadu	m <sup>-3</sup>
$C_{odpad}$	Emisné limity dané tabuľkou	mg.m <sup>-3</sup>
$V_{proc}$	Objem odpadného plynu z palív	m <sup>-3</sup>
$C_{proc}$	Emisné limity stanovené tabuľkou	mg.m <sup>-3</sup>
m	Hmotnosť	kg
n	Počet molov	mol
V	Objem	m <sup>-3</sup>
MW	Molekulárna hmotnosť	kg.kmol <sup>-1</sup>
hm %	Hmotnostné percento	%
obj %	Objemové percento	%
$\Delta H_{sluč}$	Zlučovacia entalpia	MJ.kmol <sup>-1</sup>
$\Delta H^\circ$	Reakčná entalpia	MJ.kmol <sup>-1</sup>
$\mu$	Stechiometrický koeficient	-
LHV	Výhrevnosť	MJ.kg <sup>-1</sup>
HHV	Spalné teplo	MJ.kg <sup>-1</sup>
$\Delta H_{vyp}$	Výparné teplo vody	MJ.kg <sup>-1</sup>
$\omega$	Hmotnostný zlomok	-
EO	Ekvivalentný obyvateľ	-

Symbol	Význam	Jednotka
$\alpha$	Prebytok plynu	-
Q	Teplo	kJ
$\Delta T$	Rozdiel teplôt	$^{\circ}\text{C}$
$C_p$	Merná tepelná kapacita	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
t	Teplota	$^{\circ}\text{C}$

## 17 ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok	Strana
Obr. č. 1 Spôsob uplatnenia cirkulárnej ekonomiky	6
Obr. č. 2 Spôsoby nakladania s kalom v Českej republike	8
Obr. č. 3 Fluidná pec	12
Obr. č. 4 Etážová pec	14
Obr. č. 5 Rotačná pec	15
Obr. č. 6 Rotačná bubnová sušička	18
Obr. č. 7 Blokové schémna monospal'ovne kalov	33
Obr. č. 8 Schéma materiálovej bilancie sušiarne kalu	46
Obr. č. 9 závislosť výhrevnosti na podiele sušiny v kale a organickej zložky vňom	48
Obr. č. 10 Schéma špirálového kontaktoru	57
Obr. č. 11 Schéma navrhovanej dispozície technických celkov	61
Obr. č. 12 Schéma použitých zariadení	62
Obr. č. 13 Pôdorys spal'ovne a hlavné prúdy médií	63
Obr. č. 14 Dispozičné riešenie spal'ovne – termická časť	64
Obr. č. 15 Dispozičné riešenie spal'ovne – čistenie spalín	65
Obr. č. 16 Kumulatívny tok peňazí navrhovanej jednotky pri navýšených skladovacích poplatkoch	68

## 18 ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka	Strana
Tab. č. 1 Ťažba fosfátovej rudy a predpokladané zásoby	19
Tab. č. 2 Mikrobiologické kritéria pre upravený kal pre aplikáciu na poľnohospodársku pôdu [5]	26
Tab. č. 3 Mikrobiologické kritéria pre upravený kal kategórie 1 pre aplikáciu na poľnohospodársku pôdu v prechodnom období [5]	26
Tab. č. 4 Mikrobiologické kritéria pre upravený kal kategórie 2 pre aplikáciu na poľnohospodársku pôdu v prechodnom období [5]	26
Tab. č. 5 Emisné limity pre znečisťujúce látky zisťované primárne jednorázovým meraním	28
Tab. č. 6 Emisné limity pre znečisťujúce látky zisťované primárne kontinuálnym meraním	29
Tab. č. 7 Stupeň odsírenia pre spaľovacie zariadenia nad 50 MW	30
Tab. č. 8 Hodnoty $C_{proc}$ pre spaľovacie stacionárne zdroje	30
Tab. č. 9 Obsah zemného plynu Juhomoravského	34
Tab. č. 10 Prepočet spotreby kyslíku na 1 kg ZP	35
Tab. č. 11 Prepočet mernej tvorby spalín ZP	35
Tab. č. 12 Hmotnostné podiely horľaviny čistiarenskeho kalu	36
Tab. č. 13 Prepočet spotreby kyslíku na 1 kg horľaviny kalu	36
Tab. č. 14 Prepočet mernej tvorby spalín horľaviny čistiarenskeho kalu	37
Tab. č. 15 Zlučovacie entalpie zložiek spaľovacieho procesu	37
Tab. č. 16 Spalné teplo a výhrevnosť 1 kg horľaviny kalu	38
Tab. č. 17 Spalné teplo a výhrevnosť 1 kg zemného plynu	39
Tab. č. 18 Parametre navrhovanej kapacity a uvažovaného kalu	40
Tab. č. 19 Chemické zloženie vzduchu	40
Tab. č. 20 spotreba kyslíku a vzduchu	41
Tab. č. 21 Materiálová spaľovacieho bilancia procesu	41
Tab. č. 22 Vstupný energetický tok do spaľovacieho procesu	42
Tab. č. 23 Výstupný energetický tok zo spaľovacieho procesu	43
Tab. č. 24 Výpočet chladiaceho vzduchu	43
Tab. č. 25 Výpočet mernej tepelnej kapacity zmesi spalín	44
Tab. č. 26 Parametre pre výpočet prisávaného vzduchu	45
Tab. č. 27 Výsledky výpočtu prisávania vzduchu	45
Tab. č. 28 Materiálová bilancia sušiarne	46

<b>Tabuľka</b>	<b>Strana</b>
Tab. č. 29 Vstupný energetický tok do procesu sušenia	47
Tab. č. 30 Výstupný energetický tok z procesu sušenia	47
Tab. č. 31 parametre nádrže pre odvodnený kal	49
Tab. č. 32 Parametre nádrže pre odvodnený kal	50
Tab. č. 33 parametre nádrže pre popol z kalu	51
Tab. č. 34 Rozmerové parametre rotačnej sušičky	52
Tab. č. 35 Rozmerové parametre rotačnej pece	52
Tab. č. 36 Okrajové podmienky a parametre dohorievacej komory	53
Tab. č. 37 Navrhované parametre kontaktoru	57
Tab. č. 38 Navrhované parametre rukávových filtrov	58
Tab. č. 39 Odhad investičných nákladov	66
Tab. č. 40 prevádzkové náklady jednotky	67
Tab. č. 41 Predpokladaná úspora nákladov pri skládkovaní kalu	67

