



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ A PRODUKTŮ MIKROVLNNÉ PYROLÝZY

ENERGETIC USE OF WASTEWATER SLUDGE AND MICROWAVE PYROLYSIS PRODUCTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Šimek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. PETR HLAVÍNEK, CSc., MBA

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Radim Šimek
Název	Energetické využití čistírenských kalů a produktů mikrovlnné pyrolýzy
Vedoucí práce	prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] Metcalf & Eddy. Wastewater engineering: treatment and reuse (4th International Edition). McGraw-Hill, New York. 2003. ISBN 0-07-041690-7.
- [2] SHI, Cao Ye. Mass Flow and Energy Efficiency of Municipal Sewage Treatment Plant. London: Intl Water Assn, 2011. ISBN 978-184-3393-825.
- [3] GRADY, C.P.Leslie ; DAIGGER, Glen T. ; LOVE, Nancy G. ; FILIPE, Carlos D.M. Biological Wastewater Treatment, Third Edition, IWA Publishing, 2011. 991 s. ISBN 9780849396793.
- [4] HLAVÍNEK, P.; MIČÍN, J.; PRAX, P. Příručka stokování a čištění, Brno: NOEL 2000, 2001, ISBN 80-86020-30-4.
- [5] KREJČÍ a kol. Odvodnění urbanizovaných území - koncepční přístup, Brno: NOEL 2000, 2002, ISBN 80-86020-39-8.
- [6] Sborníky Water Science and Technology, IWA Publishing
- [7] Časopisy SOVAK, VODNÍ HOSPODÁŘSTVÍ.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Diplomová práce bude zaměřena na energetické využití čistírenských kalů a produktů mikrovlnné pyrolýzy. V první části práce bude zpracována rešerše zaměřená na způsoby sušení čistírenských kalů pro energetické využití: spalování, zplyňování a pyrolýza. Bude podrobně popsána technologie mikrovlnné pyrolýzy včetně jejich produktů: pyrolýzní olej, pyrolýzní plyn a biochar. Dojde k porovnání energetického potenciálu způsobu energetického využití čistírenských kalů i s ohledem na jejich produkty.

V praktické části budou provedeny palivové zkoušky pro zjištění a porovnání energetické využitelnosti sušeného čistírenského kalu a biocharu po mikrovlnné pyrolýze. Bude provedena případová studie, ve které bude koncepčně navržena technologie a) sušení kalu s mikrovlnnou pyrolýzou na ČOV, produkty budou energeticky využity na ČOV a v blízkém okolí a b) sušení kalu u kotelny s přímým spalováním. V rámci případové studie bude porovnána ekonomika dvou odlišných návrhů.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na energetické využití čistírenských kalů před a po procesu mikrovlnné pyrolýzy. První část práce se zabývá problematikou kalového hospodářství, nakládání s čistírenskými kaly a jejich následnému využití nebo likvidaci. V druhé části práce jsou připravené a upravené vzorky čistírenského kalu z ČOV 1 a ČOV 2 podrobeny procesu mikrovlnné pyrolýzy. Následně jsou vzorky dány na rozbor pro stanovení celkového organického uhlíku, specifického měrného povrchu, obsahu těžkých kovů a hodnot spáleného tepla. Výsledná data byla zpracována v programu Microsoft Office Excel a jsou v práci prezentována. V závěru práce jsou poté navrženy dvě případové studie na konkrétní návrh koncepčního umístění mikrovlnné pyrolýzy za proces sušení čistírenského kalu a umístění procesu sušení čistírenského kalu u kotelny s přímým spalováním.

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on the energy utilization of sewage sludge before and after microwave pyrolysis process. The first part of the thesis deals with sludge management, treatment of sludge and its subsequent use or disposal. In the second part of the thesis prepared and modified samples of sludge from WWTP 1 and WWTP 2 are subjected to microwave pyrolysis process. Subsequently, samples are taken for analyzes to determine the total organic carbon, the specific surface area, the heavy metal content and the calorific values. The resulting data was processed in Microsoft Office Excel and presented at work. At the end of the thesis two case studies are then proposed for a specific design of the conceptual location of microwave pyrolysis for the sludge drying process and the drying process of the sewage sludge in the direct combustion boiler room.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pyrolýza, mikrovlnná pyrolýza, biochar, pyrolýzní olej, čistírenský kal, kalové hospodářství

KEYWORDS

Pyrolysis, microwave pyrolysis, biochar, pyrolysis oil, sewage sludge, sludge management

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Radim Šimek *Energetické využití čistírenských kalů a produktů mikrovlnné pyrolýzy*. Brno, 2018. 92 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce prof. Ing. Petr Hlavínek, CSc., MBA

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Energetické využití čistírenských kalů a produktů mikrovlnné pyrolýzy* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16. 12. 2018

Bc. Radim Šimek
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce, prof. Ing. Petrovi Hlavínkovi, CSc., MBA za jeho vstřícnost a odborné vedení při psaní závěrečné práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jakubovi Račkovi, Ph.D, za poskytnuté konzultace a všem, kteří se aktivně podíleli na mém výzkumu.

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	PROBLEMATIKA KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ	10
3	KALY A SOUVISEJÍCÍ LEGISLATIVA	12
3.1	LEGISLATIVA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ	12
3.2	LEGISLATIVA ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ	12
3.3	KALY V LEGISLATIVĚ ČR	12
3.4	KALY A SOUVISEJÍCÍ LEGISLATIVNÍ PŘEDPISY	13
3.4.1	<i>Odpady</i>	<i>13</i>
3.4.2	<i>Energetika</i>	<i>13</i>
3.4.3	<i>Výrobek</i>	<i>14</i>
3.4.4	<i>Hnojiva</i>	<i>14</i>
3.4.5	<i>Komposty.....</i>	<i>14</i>
4	ČISTÍRENSKÉ KALY	15
4.1	VZNIK ČISTÍRENSKÝCH KALŮ	15
4.1.1	<i>Primární kal</i>	<i>16</i>
4.1.2	<i>Sekundární kal</i>	<i>16</i>
4.2	CIRKULÁRNÍ EKONOMIKA	16
4.3	STABILIZACE A HYGIENIZACE ČISTÍRENSKÝCH KALŮ	16
4.3.1	<i>Vedlejší produkt stabilizace kalu</i>	<i>17</i>
4.4	SNIŽOVÁNÍ OBSAHU VODY V ČISTÍRENSKÝCH KALECH	18
4.4.1	<i>Zahušťování čistírenských kalů</i>	<i>18</i>
4.4.2	<i>Odvodňování čistírenských kalů</i>	<i>19</i>
4.4.2.1	<i>Přirozené způsoby odvodnění</i>	<i>19</i>
4.4.2.2	<i>Strojní (mechanické) odvodňování</i>	<i>19</i>
4.4.3	<i>Sušení čistírenských kalů</i>	<i>20</i>
4.4.3.1	<i>Kontaktní sušení (nepřímé)</i>	<i>21</i>
4.4.3.2	<i>Konvekční sušení (přímé)</i>	<i>23</i>
4.4.3.3	<i>Sálavé sušení (solární)</i>	<i>26</i>
4.4.4	<i>Peletizace vysušených čistírenských kalů</i>	<i>27</i>
4.5	ENERGETICKÉ VYUŽITÍ VYSUŠENÉHO ČISTÍRENSKÉHO KALU	28
5	MOŽNOSTI NAKLÁDÁNÍ S ČISTÍRENSKÝMI KALY	29
5.1	PŘÍMÁ APLIKACE KALŮ A REKULTIVACE	30
5.1.1	<i>Rekultivace</i>	<i>32</i>
5.2	KOMPOSTOVÁNÍ KALŮ	33
5.3	SKLÁDKOVÁNÍ KALŮ	34
5.4	SPALOVÁNÍ KALŮ	35
5.4.1	<i>Spoluspalování v elektrárnách</i>	<i>38</i>
5.4.2	<i>Spoluspalování v cementářských pecích.....</i>	<i>38</i>
5.4.3	<i>Spoluspalování ve spalovnách odpadů</i>	<i>39</i>
5.5	ZPLYŇOVÁNÍ KALŮ	39
5.5.1	<i>Autotermní zplyňování</i>	<i>40</i>

5.5.2	<i>Alotermní zplyňování.....</i>	41
5.6	PYROLÝZA	42
5.6.1	<i>Mikrovlnná pyrolýza</i>	43
5.6.2	<i>Pevný uhlíkatý zbytek - biochar</i>	45
5.6.3	<i>Organický kapalný produkt - pyrolýzní olej</i>	46
5.6.4	<i>Pyrolýzní plyn</i>	47
5.7	ZHODNOCENÍ VYUŽITÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ	48
6	PŘÍPRAVA VZORKŮ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ, JEJICH MIKROVLNNÁ PYROLÝZA A NÁSLEDNÉ ROZBORY	49
6.1	METODIKA ZNAČENÍ VZORKŮ.....	50
6.2	MÍCHÁNÍ VZORKŮ S PŘÍMĚSMI.....	52
6.3	PELETIZOVÁNÍ VZORKŮ	53
6.4	MIKROVLNNÁ PYROLÝZA	54
6.4.1	<i>Postup zkoušky</i>	55
6.4.2	<i>Výstupní složky</i>	56
6.5	PROVEDENÉ ROZBORY A MĚŘENÍ	59
6.5.1	<i>Obsah organického uhlíku (TOC)</i>	59
6.5.1.1	<i>Popis zkoušky.....</i>	59
6.5.1.2	<i>Výsledky měření.....</i>	60
6.5.2	<i>Stanovení specifického měrného povrchu (BET).....</i>	62
6.5.3	<i>Stanovení těžkých kovů</i>	63
6.5.4	<i>Palivové zkoušky.....</i>	65
6.5.4.1	<i>Popis zkoušky.....</i>	65
6.5.4.2	<i>Výsledky měření.....</i>	66
6.6	PŘÍPADOVÉ STUDIE	69
6.6.1	<i>Solární sušení čistírenského kalu s mikrovlnnou pyrolýzou na ČOV</i>	69
6.6.2	<i>Sušení čistírenského kalu u kotelny s přímým spalováním</i>	71
6.6.3	<i>Ekonomické zhodnocení</i>	73
6.6.4	<i>Shrnutí.....</i>	74
7	ZÁVĚR	75
8	POUŽITÁ LITERATURA	76
	SEZNAM TABULEK	81
	SEZNAM OBRÁZKŮ	82
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	84
	SEZNAM PŘÍLOH.....	85
	<i>Příloha 1- Návrh poměru aditiva do čistírenského kalu určeného k peletizaci</i>	86
	<i>Příloha 2- Protokol provedené peletizace vzorků.....</i>	87
	<i>Příloha 3- Protokol o provedené mikrovlnné pyrolýze vybraného vzorku.....</i>	88
	<i>Příloha 4- Vzorový protokol výsledků pro stanovení těžkých kovů pro jeden vzorek.....</i>	89
	<i>Příloha 5- Softwarové výsledky naměřených hodnot pro určení celkového organického uhlíku</i>	90
	<i>Příloha 6- Obdržené výsledné hodnoty spáleného tepla čistírenských kalů.....</i>	91
	SUMMARY	92

1 ÚVOD

Čištění komunálních a průmyslových odpadních vod je doprovázeno produkcí celé řady druhů odpadů, se kterými musí každý provozovatel čistírny odpadních vod (ČOV) řádně nakládat podle platné legislativy. Hlavním odpadem, kterým se zabývá tato diplomová práce, je čistírenský kal vzniklý právě při procesu čištění odpadních vod.

Cílem této diplomové práce je seznámení s problematikou kalového hospodářství, nakládáním s čistírenskými kaly a jejich následným využitím. Práce je rozdělena do dvou částí. První část se zabývá teoretickými poznatky z oblasti produkce a vzniku čistírenských kalů, platnou legislativou a problematikou kalového hospodářství. Dále je v této části řešena stabilizace a hygienizace, možné způsoby sušení pro další energetické využití a finální možnosti zpracování čistírenských kalů. Podrobněji se práce zabývá technologií mikrovlnné pyrolýzy a produkty mikrovlnné pyrolýzy, kterými jsou biochar, pyrolýzní plyn a pyrolýzní olej.

V druhé části diplomové práce je popsána příprava čistírenských kalů pro následné zkoušky a rozborů. Tyto kaly byly získány ze dvou reálných ČOV, označované pro potřeby práce ČOV 1 a ČOV 2. Příprava těchto kalů spočívala v jejich smíchání s různými přísadami a úpravě peletizací. Takto připravené vzorky byly následně zpracovány pomocí nízkoteplotní mikrovlnné pyrolýzy za vzniku produktů biocharu, pyrolýzního oleje a pyrolýzního plynu. Vstupní vzorky spolu s výstupním produktem biocharu byly zaslány na palivové zkoušky, kde byla zjištěna jejich energetická hodnota po procesu mikrovlnné pyrolýzy. V rámci diplomové práce byly vzorky dále podrobeny rozborům pro stanovení obsahu těžkých kovů, určení celkového organického uhlíku a stanovení velikosti měrného povrchu. Pro celkové doplnění informací o vlastnostech produktů po procesu mikrovlnné pyrolýzy bylo dále provedeno měření pH vybraných vzorků biocharu a měření měrné hmotnosti pyrolýzního oleje. Obdržené a naměřené hodnoty byly zpracovány v programu Microsoft Office Excel a v podobě tabulek a výsledných grafů jsou prezentovány v diplomové práci.

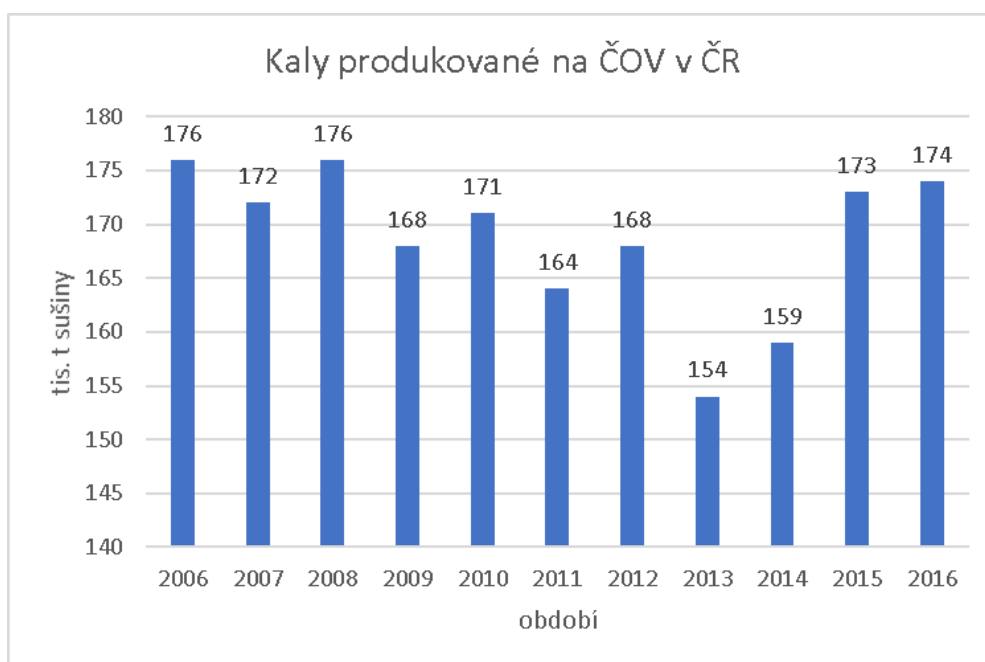
Na závěr praktické části byl proveden konkrétní koncepční návrh finálního zpracování čistírenského kalu na ČOV. Jako první varianta byla navržena případová studie, kde je využita mikrovlnná pyrolýza umístěná za procesem sušení kalu. V druhé variantě je poté navrženo umístění procesu sušení kalu přímo u kotelny s přímým spalováním kalu.

Práce spojené s přípravou, provedenými zkouškami a rozborů čistírenských kalů probíhaly za spolupráce s firmami Bionic, výzkumným střediskem AdMaS a Chemickou fakultou VUT v Brně.

2 PROBLEMATIKA KALOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ

Nakládání s čistírenským kalem se v dnešní době stává čím dál více problematické, a to především z důvodů stále se zpřísnující legislativy ohledně využívání čistírenských kalů. Neustálým vývojem technologií, zvyšujícím se počtem čistíren odpadních vod a obecně celkovou modernizací, se do odpadních vod dostává velké množství znečištění v podobě chemikálií, těžkých kovů či mikroplastů a organických polutantů (pesticidy, léčiva apod.). Tyto látky se prostřednictvím odpadních vod a čistírenských procesů dostávají do přebytečných čistírenských kalů. Na obrázku 2.1, kde je zobrazena celková produkce kalů v ČR, je patrná nutnost zaměření se právě na kalové hospodářství a znovu využívání čistírenských kalů. [1]

Současná legislativa se snaží zabránit přímému aplikování a rekultivaci kalů. Výsledkem těchto legislativních změn je zpřísnování limitů látek obsažených v čistírenských kalech a popřípadě i zákaz přímých aplikací těchto kalů na zemědělskou půdu. Aby bylo možné kal i nadále vnímat jako obnovitelný zdroj, je snaha zavést do čistírenských procesů takové metody, které by umožnily jeho další využití. To znamená využití kalů s co nejmenším negativním dopadem na zdraví člověka a životní prostředí. [1]



Obr. 2.1 Celková produkce kalů v ČR v letech 2006-2016 [4]

Čistírenský kal je nevyhnutelným odpadem při čištění odpadních vod. Problematika řešení kalového hospodářství čistíren odpadních vod je vysoce aktuální téma v EU, ale také v České republice. Kaly představují přibližně 1-2 % objemu čištěných vod. Je v nich však obsaženo až 50–80 % původního znečištění. Náklady na provoz kalového hospodářství představují až 50 % celkových provozních nákladů čistírny odpadních vod. [1]

Současné metody „recyklace“ čistírenských kalů zahrnují použití těchto kalů na půdu jako organické hnojivo nebo pro vylepšení kvality zemědělské půdy a pro rekultivace. Ale i tyto metody již některé státy považují za neudržitelné. Závažná jsou rovněž zjištění, že v hospodaření s čistírenskými kaly na zemědělské půdě dochází k zásadním a systematickým porušením schválených pravidel. Je tak ohroženo zdraví živočichů, kvalita produkce a následně i zdraví člověka. Je evidentní, že prostor pro uplatnění kalů v zemědělství v současné podobě se v blízkém výhledu významně zmenší. Zajímavý je často výrazně odlišný přístup k hodnocení rizik spojených se zemědělským využitím kalů v různých částech světa. Některé evropské země dokonce princip předběžné opatrnosti dovádí do extrému a již zakazují jakoukoli aplikaci kalů v zemědělství. Naopak někde se plně využívá jistých nedokonalostí směrnice EU o hnojivech, lokálních směrnic a nedostatků supervizních a kontrolních systémů. [2]

Odpadová politika EU potlačuje ukládání odpadů a podporuje zabránění vzniku odpadů, jejich minimalizaci a recyklaci. Produkci kalů nelze zabránit (pouze lze výběrem technologie zmenšit jeho množství). Samotné požadavky na vyšší kvalitu vypouštěné vody budou navíc dále obecně zvyšovat množství produkováných kalů. Jediné zbývající možnosti, jak s přebytečným kalem nakládat jsou recyklace a destrukční metody. Možnosti recyklace zahrnují použití na půdu jako organické hnojivo nebo pro vylepšení kvality půdy v zemědělství a pro rekultivace. Destrukční metody zahrnují spalování bez nebo s využitím energie, zplynování a použití kalu jako procesního paliva, kdy je využíván nebo skládkován popel. [1]

3 KALY A SOUVISEJÍCÍ LEGISLATIVA

Vznik kalu a nakládání s ním je ošetřen právními předpisy vodního hospodářství a odpadového hospodářství.

3.1 LEGISLATIVA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ

Vychází ze zákona č. 254/2001 Sb. o vodách ve znění pozdějších úprav, kaly vznikají při provozu vodního díla (§ 55, odst. 1) – úpravny vody a zejména čistírny odpadních vod. Provoz těchto vodních děl se realizuje podle schváleného provozně-manipulačního řádu (§ 59, odst. 1 písmeno a). V tomto provozně-manipulačním řádu se vymezí kvantitativní, kvalitativní parametry vznikajících kalů a způsob nakládání s nimi v rámci legálního provozu zmíněných vodních děl.

3.2 LEGISLATIVA ODPADOVÉHO HOSPODÁŘSTVÍ

Podle § 32 zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech se za kal považuje:

- kal z čistíren odpadních vod zpracovávajících městské odpadní vody nebo odpadní vody z domácností a z jiných čistíren odpadních vod, které zpracovávají odpadní vody stejného složení jako městské odpadní vody a odpadní vody z domácností;
- kal ze septiků a jiných podobných zařízení;
- kal z čistíren odpadních vod výše neuvedených.

3.3 KALY V LEGISLATIVĚ ČR

Základem pro úvahy, co s odpadem, je jeho zařazení podle zákona o odpadech. Původce a oprávněná osoba jsou povinni odpad zařadit podle katalogu odpadů. Na základě znalosti technologie vzniku kalu je nutno zvážit, jestli nemá finální kal nebezpečnou vlastnost.

Od zařazení se většinou odvíjí i způsob nakládání s kaly. Omezení možnosti ukládání kalů jako biodegradabilního odpadu je dáno požadavky Směrnice Rady 1999/31/ES o skládkách odpadů, která ukládá členským státům omezení množství biodegradabilního odpadu (BRO) ukládaného na skládky, což již zohledňuje vyhláška č.294/2005 Sb.

Koncepce EU ve věci nakládání s odpady vychází ze základního hierarchického rozlišování odpadů, které upřednostňují v první řadě technologie pro zamezení vzniku odpadů, následuje jejich zhodnocení (recyklace, energetické využití s upřednostněním materiálového zhodnocení) a konečně jejich odstranění (spálení bez energetického využití a uložení na skládku). [3]

3.4 KALY A SOUVISEJÍCÍ LEGISLATIVNÍ PŘEDPISY

3.4.1 Odpady

- Zákon č. 185/2001Sb., o odpadech - ve znění pozdějších předpisů
- Vyhláška č. 376/2001 Sb., o hodnocení nebezpečných vlastností odpadů - ve znění pozdějších předpisů
- Vyhláška č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady - ve znění pozdějších předpisů
- Vyhláška č. 437/2016 Sb., 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)
- Vyhláška 381/2001 Sb., kterou se stanoví Katalog odpadů, Seznam nebezpečných odpadů a seznamy odpadů a států pro účely vývozu, dovozu a tranzitu odpadů a postup při udělování souhlasu k vývozu, dovozu a tranzitu odpadů (Katalog odpadů) - ve znění pozdějších předpisů
- Vyhláška 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 č. 382/2001 Sb., o používání kalů na zemědělské půdě - ve znění pozdějších předpisů
- Vyhláška č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady
- směrnice rady 1999/31/EC z roku 1999 o skládkách odpadů stanovující podmínky pro udělování povolení pro odpad, který bude přijat na skládkách, včetně omezení odstraňování čistírenských kalů

3.4.2 Energetika

- Vyhláška č.482/2005 Sb., o stanovení druhů, způsobů využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy - ve znění pozdějších předpisů
- nová německá vyhláška upravující povinnost recyklace P (>50 tis. EO,> 2 % P v kalu)

- rakouský “Federal waste management plan 2017“ podobnost s něm. vyhláškou, ale přísnější (> 20 tis. EO, >2 % P)
- spalování odpadů řešeno směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2000/76 / ES ze dne 2000 o spalování odpadů

3.4.3 Výrobek

- Zákon č.22/1997 Sb., o technických požadavcích na výrobky - ve znění pozdějších předpisů

3.4.4 Hnojiva

- Zákon č.156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd - ve znění pozdějších předpisů
- Vyhláška č.474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva - ve znění pozdějších předpisů
- vyhl. č. 437/2016 Sb. o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě (plat. od 1.1.2017), řada vyhlášek v EU přísnější
- v EU výchozí směrnice rady 86/278 / EHS ze dne 1986 o ochraně životního prostředí, zejména půdy, při použití kalu v zemědělství

3.4.5 Komposty

- Průmyslové komposty - ČSN 465735

4 ČISTÍRENSKÉ KALY

4.1 VZNIK ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

Čistírenský kal je hlavním odpadním produktem procesu čištění odpadních vod. Náklady na zpracování a likvidaci kalu nejsou malé, běžně se pohybují okolo poloviny provozních nákladů ČOV. Nakládání s kalem, jakožto odpadem kategorie „O“, legislativně upravuje Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb. a navazující vyhlášky.

Kaly představují suspenzi pevných látek a agregovaných koloidních látek původně přítomných v odpadních vodách a vzniklých při různých způsobech jejich čištění. Koncentrace kalů se vyjadřuje jako obsah sušiny kalu. Nejčastěji je tato koncentrace vyjádřena v $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ nebo v %. Složení a obsah sušiny kalu závisí především na charakteru znečištění odpadních vod a na čistírenských procesech, kterým byla daná odpadní voda podrobena. [1]

Podle § 32 zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech se za kal považuje:

- kal z čistíren odpadních vod zpracovávajících městské odpadní vody nebo odpadní vody z domácností a z jiných čistíren odpadních vod, které zpracovávají odpadní vody stejného složení jako městské odpadní vody a odpadní vody z domácností;
- kal ze septiků a jiných podobných zařízení;
- kal z čistíren odpadních vod výše neuvedených. [3]

Vzhledem k extrémní nehomogenitě je velmi obtížné provést jednoznačnou charakteristiku složení čistírenského kalu. Čistírenské kaly obsahují celou řadu potenciálně znečišťujících látek. Jedná se především o různé organické látky, které mají hormonální účinky, různé infekční látky, těžké kovy, rezidua léčiv nebo drog. [2]

Čistírenský kal je v současné době z dostupných materiálů jedním z nejlevnějších zdrojů fosforu a nutrientů. Získávání fosforu z kalů v podobě suroviny, která by nebyla znečištěna nežádoucími látkami bude v příštích letech nutností. V současné době již existuje řada metod, které dokáží fosfor z kalu separovat. Míra výtěžnosti však zatím není vždy uspokojivá. Aplikace těchto metod je často spojena s vysokými investičními nebo provozními náklady. V Německu je již od roku 2005 zavedený Program ekologických inovací Spolkového ministerstva pro životní prostředí, který podporuje zavádění technologií snižujících zátěž na životní prostředí. [5]

Zároveň čistírenský kal obsahuje vysoké koncentrace organických látek vytvářejících humus. Dostupnost fosforu pro rostliny je určena hlavně procesem zachycení fosforu (biologicky, chemicky) při čištění odpadních vod a následně pak i metodou jeho získání z kalů. Pokud jde

o humus, je nutno zmínit, že organický podíl v kalu však hraje malou roli, neboť tvorby humusu v půdě je dosahováno především jinými způsoby. [2]

Při procesu čištění odpadních vod rozlišujeme druhy kalů podle toho, odkud je kal ze systému odebírán, a to na primární a sekundární kal.

4.1.1 Primární kal

Odděluje se ze surové odpadní vody v usazovacích nádržích nebo jiných separačních zařízeních. Má zpravidla zrnitou strukturu a je tvořen nerozpuštěnými látkami, které prošly lapákem písku a česlemi. Množství kalu dosahuje 2,5 až 50 g·l⁻¹ sušiny. Protože kal obsahuje i značné množství koloidních látek, má schopnost vázat vodu a udržovat ji, a proto se špatně odvodušňuje (vysouší). [3] [9]

4.1.2 Sekundární kal

Častěji označován jako přebytečný aktivovaný kal je oddělován z biologického stupně čištění v dosazovacích nádržích. Má vločkovitou strukturu a jeho charakter je ovlivněn čistícím zařízením, v němž vznikl. Podstatný vliv na charakter přebytečného kalu z biologického čištění má složení a koncentrace odpadních vod. [3]

4.2 CÍRKULÁRNÍ EKONOMIKA

„Církulární ekonomika“ je pojem, který v současné době začíná být aktuální firmami a vládními institucemi. V zásadě se totiž jedná o způsob chování, který může významnou měrou přispět ke snižování rychlosti globálního oteplování a zároveň generovat zisk v dlouhodobém měřítku. [52]

Církulární ekonomika ve vodním hospodářství zahrnuje především znovu-využívání biologicky vyčištěné odpadní vody a využití kalů z ČOV především jako zdroje energie a fosforu. Většímu rozšíření církulární ekonomiky do praxe v současné době brání především finanční náročnost tohoto procesu. V případě kalů se jedná jak o ekonomické aspekty, tak i nejasný výhled ve vývoji legislativy. Větší rozvoj církulární ekonomiky nastane až v případě nedostatku příslušných zdrojů, což se promítne do jejich ceny. Dalším důvodem pro rozvoj církulární ekonomiky se může stát legislativa, týkající se především kalů z ČOV, která zamezí možnosti využívání pomocí stávajících levných metod zpracování kalů. [23]

4.3 STABILIZACE A HYGIENIZACE ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

Za stabilizovaný lze považovat takový kal, u kterého je po dané úpravě sníženo množství rozložitelných organických látek v % celkového množství kalu a biologická aktivita kalu na takovou hodnotu, že již kal nepodléhá spontánnímu biologickému rozkladu. Stupeň stabilizace kalu se chápe jako míra určitých jeho vlastností. Tento stupeň stabilizace vyjadřuje vhodnost kalu pro daný způsob jeho využití. Pro posouzení stability kalu tedy neexistuje

univerzální kritérium. Stabilizovaný kal je nepáchnoucí hygienicky nezávadný kal, který lze snadno odvodnit. [6][9]

V procesu čištění odpadních vod rozeznáváme dva druhy stabilizace:

- anaerobní stabilizace – je nejrozšířenější metodou a je často označována jako methanizace nebo vyhnívání. Probíhá v podmínkách za nepřístupu vzduchu prostřednictvím mikroorganismů, které rozkládají biologicky rozložitelné organické látky obsažené v surovém kalu;
- aerobní stabilizace – která naopak probíhá v podmínkách za přístupu vzduchu prostřednictvím mikroorganismů, které rozkládají biologicky rozložitelné organické látky obsažené v surovém kalu. [9]

Za hygienizovaný se pokládá kal, který prošel takovou úpravou, že počty indikátorů pathogenních mikroorganismů byly sníženy na požadovanou hodnotu. Patogeny jsou viry, bakterie a parazité, kteří opouští zažívací trakt. Před finální likvidací kalů je nutno zničit, nebo alespoň snížit množství těchto pathogenních mikroorganismů. Během čištění odpadních vod a zpracování kalu je většina choroboplodných zárodků zničena, přesto v něm určité množství patogenů přežívá. Při hygienizaci kalů je nutno tyto mikroorganismy v maximální míře redukovat. Míra hygienického zabezpečení se odvozuje od účelu, pro jaký bude kal následně použit. [6] [9]

Obecně lze k hygienizaci kalů použít všech metod, při kterých dochází k usmrcování mikroorganismů. Základní hygienizační metody je možno rozdělit do tří skupin:

- chemické metody – zahrnují reakci s chemickými činidly (vápno, minerální kyseliny);
- fyzikální metody – zahrnují působení teploty, radiace, ultrazvuk apod;
- biotechnologické metody – zahrnují souběžný proces stabilizace a hygienizace kalů. [3]

Proces stabilizace a hygienizace může, ale nemusí probíhat současně tou samou technologií. Pro další využívání kalu je nutné, aby byl kal stabilizovaný a hygienizovaný. Zároveň platí, že stupeň stabilizace není závislý na stupni hygienizace. [6]

4.3.1 Vedlejší produkt stabilizace kalu

Vedlejším produktem stabilizace kalu je bioplyn. Ten je jedním z hlavních produktů methanizace a vzniká při anaerobní stabilizaci kalů. Většinou je považován za vedlejší produkt, ale z hlediska energetického využití se jedná o velmi důležitou surovinu. Bioplyn se skládá převážně z CH_4 , CO_2 a menšího množství H_2 , N_2 a H_2S . Dále může obsahovat menší podíl vody (3-4 %), stopy amoniaku a mastných kyselin. Složení bioplynu závisí na složení substrátu a na podmínkách procesu vyhnívání.

Methan jako hlavní součást bioplynu je bezbarvý plyn bez zápachu. Se vzduchem tvoří zápalnou směs. Vysoký obsah methanu mu dává vysokou výhřevnost ($18\text{--}25 \text{ MJ}\cdot\text{m}^3$) a řadí ho tak mezi zdroje energie. [10]

Bioplyn je skladován v plynojemech a odtud odváděn k dalšímu zpracování. Část je využívána většinou v kotlích na ohřev vody do výměníků nebo jako ohřev vody pro vytápění objektů ČOV. Nejeefektivnější je využívání bioplynu pro pohon spalovacích motorů spojených s agregátem na výrobu elektrické energie, kterou částečně ČOV pokrývá svůj provoz. [10]

4.4 SNIŽOVÁNÍ OBSAHU VODY V ČISTÍRENSKÝCH KALECH

Jelikož jsou kaly řídkou suspenzí ve vodě, je právě snižování množství vody jednou z nejdůležitějších technologických operací technologie zpracování kalu. Zpracování kalu zahrnuje zahušťování, stabilizaci, odvodňování a finální likvidaci. Často se do procesu zpracovávání kalů zařazuje i hygienické zabezpečení kalu a možnosti předúpravy kalů. [7]

Technologické kroky při snižování obsahu vody lze rozdělit do čtyř základních skupin:

- sedimentace (0,5 % - 3 %)
- zahušťování (3 % - 10 %)
- odvodňování (10 % - 45 %)
- sušení (45 % - 95 %) [6]

4.4.1 Zahušťování čistírenských kalů

Zahušťování kalů je první etapou zpracování kalů v kalovém hospodářství ČOV. Jeho provedení ovlivňuje veškeré další nakládání s kaly. V zásadě má vliv na investiční i provozní náklady kalového hospodářství. Odstraněním části volné vody dochází při zahušťování ke snížení objemového množství kalu. Optimální obsah sušiny kalu po zahuštění se pohybuje mezi 5–6 %, kdy má kal stále ještě tekutou konzistenci potřebnou pro čerpání k dalšímu zpracování. [9]

Zahušťování je definováno jako schopnost kalu zvýšit koncentraci obsahu tuhých částic ($2\text{--}3\times$). Zahušťování se provádí filtrací, gravitačně nebo centrifugací.

Zahušťování kalu je také často využíváno k redukci hydraulického zatížení kalového hospodářství. Gravitační a mechanické způsoby jsou používány k odstranění vody, čímž se podstatně snižuje objem kalu, který musí být v systému zpracován. Redukovaný objem kalu zvýší kapacitu jednotek založených na hydraulickém zdržení (vyhánění kalu). Provozní náklady budou výrazně nižší (cena ohřevu kalu je přímo úměrná objemu kalu, který musí být vyhříván na provozní teplotu). Redukovaný objem kalu pro konečné zpracování zjednodušuje a zlevňuje ukládání kalu. Přetížení nebo špatně nadimenzované zahušťování kalu ovlivňuje

kapacitu ČOV. Obecně biologické kaly mohou být zahuštěny v rozmezí 3 až 6 %, primární kal může být zahuštěn v rozmezí 6 až 8 % sušiny. [3]

4.4.2 Odvodňování čistírenských kalů

Odvodnění kalu slouží k dalšímu podstatnému snížení obsahu vody v kalu a tím zmenšení jeho objemu. Tato redukce snižuje nároky na transport i na samotnou další zpracovatelnost. Výsledným produktem je odvodněný kal s obsahem sušiny 20-50 %, se kterým je možné zacházet jako se zeminou. Zmenšením objemu kalu odstraněním přebytečné kalové vody dochází dále ke snížení dávek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nebo CaO při hygienizaci kalu. To vše vede k úsporám nákladů na zpracování, využití a likvidaci kalů. Před samotným vstupem do odvodňovacího zařízení by měl být kal co nejlépe homogenizován. Před finálním zpracováním je odvodněný kal většinou akumulován v kontejnerech. [3]

4.4.2.1 Přirozené způsoby odvodnění

Přirozené odvodňování kalu se provádí na kalových polích nebo lagunách. Kalové pole je otevřená mělká nádrž s betonovým dnem pokrytým vrstvou štěrkopísku. V této vrstvě je zabudovaná drenáž, která odvádí odseparovanou vodu z kalu. Do nádrží se vypouští stabilizovaný kal ve vrstvě 20–40 cm. Kal je odvodněn vsakováním vody do drenážní vrstvy a částečným vypařováním. Po dosažení požadovaného odvodnění je kal odebrán a transportován k finálnímu zpracování. Kal lze tímto způsobem odvodnit na hodnoty kolem 40 % obsahu sušiny. [9]

Kalové laguny jsou otevřené hlubší nádrže, do kterých se napouští stabilizovaný kal o hloubce 0,7-1,5 m. Odvodnění kalu probíhá především odpařováním vody z hladiny. Vsakování se v tomto procesu uplatňuje v menší míře. Proces odvodnění v kalových lagunách je ještě více časově náročný než u kalových polí. Jeden cyklus může trvat i jeden rok. [9]

4.4.2.2 Strojní (mechanické) odvodňování

Strojní odvodňování odpadních kalů je účinnější a rychlejší než odvodňování přirozené. K zařízením běžně používaným pro tento účel náleží:

- pásové lisy;
- kalolisy;
- vakuová filtrace;
- dekantační odstředivky.

Na pásových lisech je kal odvodňován mezi dvěma nekonečnými filtračními pásy. Kal se zde smíchá s flokulantem a směs se dostává na povrch filtračního pásu, kde se odděluje velká část vody. Následně je kal vtěsnán do klínového prostoru mezi dvěma pásy, kde se stlačováním

vytváří kalový koláč. Ten je vtlačován mezi kladky a je z něj vytlačována další voda. Na výslednou sušinu až 40 % stačí přídavek 100-150 g flokulantu na 1 m³. [10]

Kalolisy, zvané také jako tlakové komorové lisy, jsou filtrační zařízení pracující na tlakovém principu. Kal je po smíchání s flokulantem čerpán do komor lisu, kde je voda pod tlakem 1-2 MPa filtrována přes filtrační plachetku v rámu. Po několikahodinové filtraci je z lisu odstraněn kalový koláč. Nevýhodou kalolisu je přerušovaný provoz, náročná obsluha a vysoké investiční náklady. [10]

Jako vakuová filtrace je nejběžněji používán bubnový filtr. Plášť tohoto bubnu je tvořen z děrovaného plechu a je umístěn ve žlabu s kalem. Na povrchu má buben přidanou jemnou filtrační tkaninu, na které se zachytává kal. Uvnitř bubnu je vakuum, do kterého se odsává voda. Na konci je z bubnu odstraněn kalový koláč. [10]

Dekantační odstředivky jsou používány k zahuštění kalu i k jeho odvodnění. Je to jediné zařízení, kde může dojít k odvodnění i bez flokulantu. Kal se dává do tělesa odstředivky v hlavní ose. Kal se usazuje na vnitřních stěnách rotačního bubnu a zahuštěný kal je pak šnekem uvnitř bubnu vynášen ven. [10]

4.4.3 Sušení čistírenských kalů

Proces sušení představuje podstatný technologický krok při zpracování kalů z ČOV a umožňuje variantní použití získaného granulátu pro následné procesní postupy (spoluspalování, spalování, zplyňování či pyrolýzu). Čistírenské kaly jsou dále sušeny z důvodu minimalizace jejich objemu a úspory nákladů na jejich odvoz. Nakládání s vysušeným kalem a jeho skladování je totiž snadnější. Sušený kal může být použit jako palivo. Svými kalorickými hodnotami se podobá hnědému uhlí. Pro energetické využití je sušení čistírenských kalů nevyhnutelným krokem předúpravy, jelikož je spalování nevysušených kalů energeticky nevýhodné. Vzniká tedy nutnost tyto kaly předem zbavit vody.

Běžně používanými odvodňovacími procesy, zmíněných v předchozích bodech, lze snížit obsah vody v čistírenském kalu na cca 70 až 75 % (30–25 % TS). Dalšího snížení obsahu vody lze dosáhnout pouze zařazením vhodné technologie sušení čistírenských kalů. [11] [12]

Během termálního sušení se vypaří téměř veškerá voda obsažená v kalu (povrchová, kapilární i vázaná). Termální sušení vyžaduje vhodný zdroj tepla. Ideální je kombinace elektrických topných těles s recirkulací odpadního tepla, která může výraznou mírou přispívat k dosažení požadovaných tepelných podmínek. Tímto systémem je docíleno podílu sušiny v kalu 90 %, i více. [12]

Výhody sušení kalů

- Při teplotách sušení, které jsou vyšší než 100 °C, a relativně dlouhé době prodlení při této teplotě dochází k jisté likvidaci enterobakterií, salmonel, zárodků červů a parazitů.

Tuto výhodu však postrádají technologie, založené na nízkoteplotním sušení (např. pásová sušárna). Výhodou uvedeného způsobu je však nižší energetická náročnost.

- Usušený kal s obsahem TS vyšším než 90 % je velmi dobře chráněn proti následné rekontaminaci, protože množení bakterií je podmíněno vyšší vlhkostí. Přesto je nutné v průběhu sušení zamezit tvorbě „vlhkých hnízd“ zejména při transportu a manipulaci, které by mohly být budoucími zdroji reinfekce.
- Od obsahu sušiny 85 % je skladovatelnost suchého kalu z ČOV velmi dobrá, a to i bez přídavku stabilizujících přísad (až 3 roky). Při nižším obsahu sušiny je možno kal stabilizovat například 1 % přídavkem močoviny.
- Velkou předností sušení kalů před jejich následným využitím je redukce hmotnosti, která významně snižuje dopravní náklady a umožňuje dobrou manipulovatelnost. [11]

Existuje velká řada různých sušících zařízení, jen několik z nich je ale běžně používáno pro sušení čistírenských kalů. Tyto sušárny se liší především způsobem, jakým je dodávána energie potřebná k sušení a způsobem transportu materiálu sušárnou. V praxi nacházejí uplatnění tři základní fyzikální principy sušení, a to:

- kontaktní sušení (nepřímé sušení);
- konvekční sušení (přímé sušení);
- sálavé sušení (solární). [13]

4.4.3.1 Kontaktní sušení (nepřímé)

V případě nepřímého sušení je teplo přenášeno k sušenému materiálu nepřímo prostřednictvím tepelných ploch (kontaktní sušení). Teplotní médium, např. pára nebo horký olej, není tedy v přímém kontaktu s kalem.

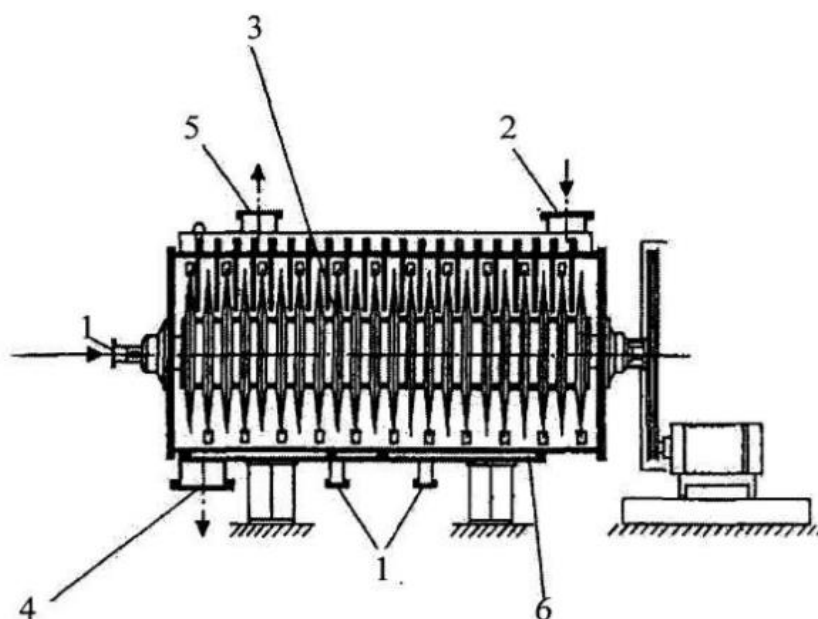
Při kontaktním sušení se přenáší teplo do vysoušeného kalu přes vyhřívané plochy. Tepelné médium tudíž nepřichází do styku s vyhřívacím médiem, nýbrž je vedeno zvláštním uzavřeným okruhem topného systému. Brýdy zpravidla kondenzují v patřičně dimenzovaném výměníku, čímž se získává zpět část tepla. Protože brýdy nejsou smíchány s topným médiem, může být jejich kondenzace jednodušší než u konvekčních způsobů sušení. [3]

Diskové sušárny

Diskové sušárny jsou typickým představitelem kontaktní metody sušení kalů. Základním konstrukčním prvkem je válcové těleso sušárny, jehož vnitřní vyhřívané žebrovaní tvoří stator diskové sušárny. Vyhřívaný rotor slouží k provzdušňování, kypření a transportu sušeného kalu. Systém stěrek a lopatek zabraňuje tvoření nápeků na vyhřívaných plochách. Neustálý kontakt mezi vyhřívanými plochami a sušeným kalem zaručuje vysokou účinnost sušícího procesu. Diskové sušárny umožňují zpracování jak vyhnílého, tak nevyhnílého kalu z čistíren odpadních vod. [3]

Mezi výhody diskových sušáren patří především:

- specifikovaný konečný produkt (pasta, prach, granulát, brikety);
- jednoduchý provoz (pouze jeden pomalu rotující díl);
- samočistící efekt vyhříváných rotujících ploch;
- jednoduchý systém a s tím spojená nenáročná údržba;
- vysoká spolehlivost;
- jednoduchá obsluha;
- nízké nároky na prostor. [3]

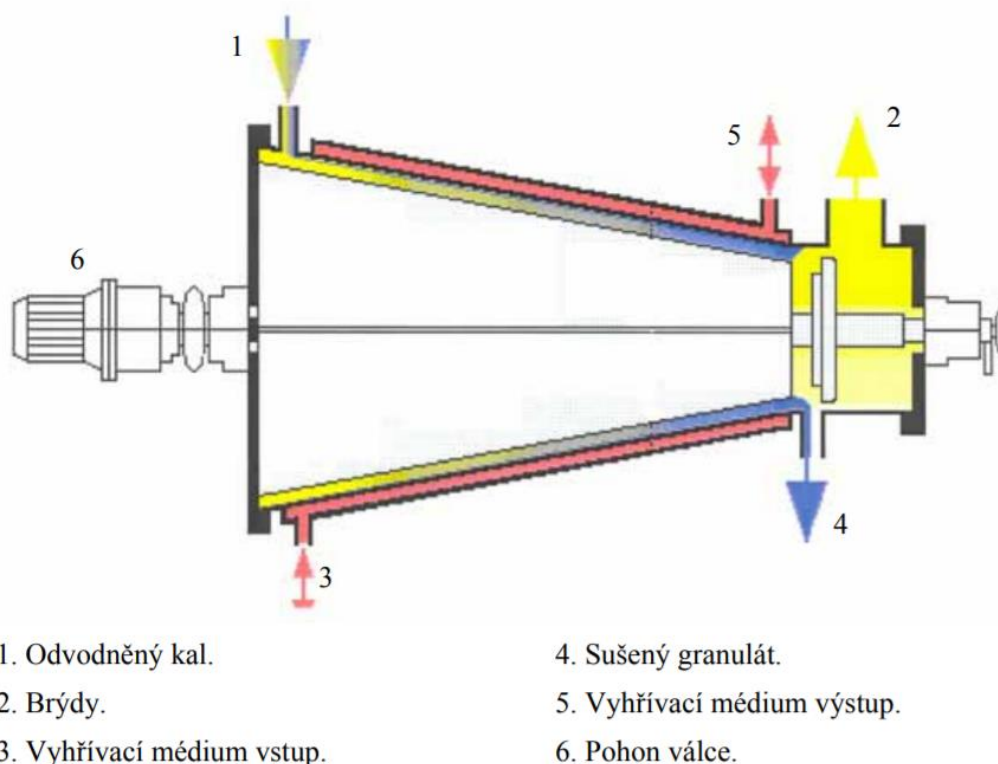


- | | |
|---|---------------------------|
| 1. Přívod páry. | 4. Výstup usušeného kalu. |
| 2. Přívod odvodněného kalu. | 5. Odtah brýd. |
| 3. Disky vyhříváné párou – rotor sušárny. | 6. Plášť sušárny. |

Obr. 4.1 Princip diskové sušárny [14]

Tenkovrstvá (lopatková) sušárna

Principem tenkovrstvého způsobu sušení je roztírání dávek vstupujícího kalu po vnitřním povrchu pláště vyhříváného válce sušičky. Kal je roztírán speciálními lopatkami, které „namáznou“ na válec tenkou vrstvu kalu, do které z něho poté přestupuje tepelná energie. Bezproblémový provoz těchto typů sušáren je ohrožen zvýšeným opotřebením lopatek. Tenkovrstvá a lopatková sušárna mohou být také použity jako dvě zvláštní koncepce. [15]



Obr. 4.2 Princip tenkovrstvé sušárny [16]

4.4.3.2 Konvekční sušení (přímé)

Mezi konvekční sušící systémy patří snad nejvíce sušáren použitelných pro sušení čistírenských kalů. Principem konvekčního sušení je přímé vystavení kalu proudu horkého média (vzduch, inertní plyn, spaliny, výfukové plyny nebo přehřátá vodní pára). Konvekční způsob sušení je založen na schopnosti topného média odnímat vodu (silná závislost na teplotě). Vodní pára (brýdy) opouští společně s topným médiem sušící zařízení. Odtahové plyny nasycené vodní párou obsahují nečistoty. Tyto plyny musí být čištěny ve speciálním zařízení a voda musí zkondenzovat. Brýdový kondenzát je znečištěn organickými látkami a vykazuje relativně vysoký obsah čpavku, proto musí být přiveden k dalšímu zpracování (případně zpracování ve vyhnívací nádrži). [15]

Rotační bubnové sušárny

Rotační bubnové sušárny jsou vysoce výkonné průmyslové sušárny pro sypké hmoty. Jsou často vybírány pro své robustní možnosti zpracování a jejich schopnost dosahovat stejných výsledků navzdory rozdílu v surovinách.

Rotační sušárny pracují za přítomnosti sušícího vzduchu v rotačním bubnu. Mohou být rovněž nepřímě vyhřívány, aby se zabránilo přímému kontaktu mezi materiálem a zpracovatelským médiem. [17]

Výsledkem je granulovaný kal s obsahem sušiny větším než 90 %. Jako prevence proti ucpání bubnu musí mít přiváděný materiál obsah sušiny vyšší než 65 %. Proto je běžné, že vstupu kalu do sušárny předchází míšení sušeného kalu s kalem odvodněným. [17]

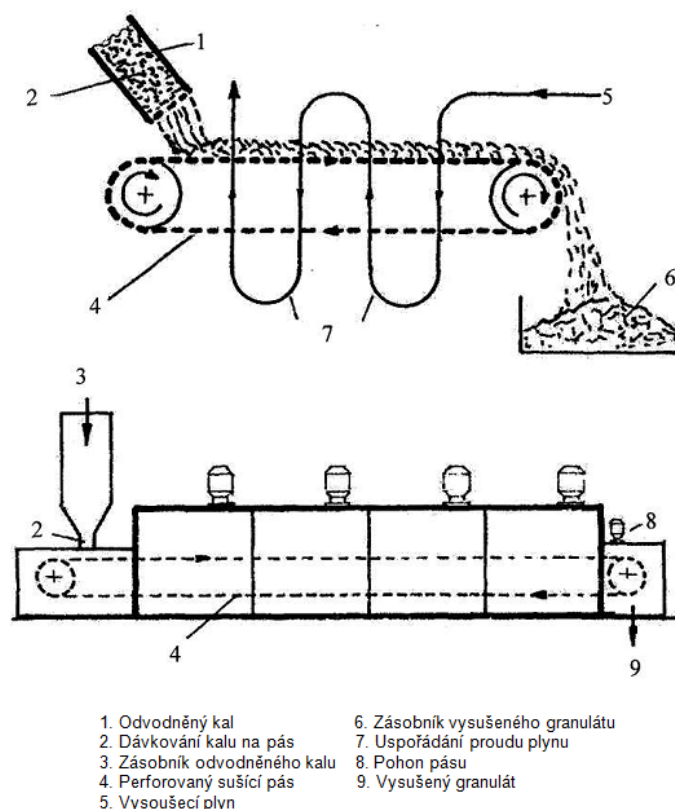


Na pásové sušárny je mechanicky odvodněný vlhký kal přiváděn přes distribuční násypku, která sušený produkt rovnoměrně rozděluje na pás. Perforovaný pás jemně dopravuje výrobek přes sušičku, aby se zabránilo tření výrobku a tím se snížilo riziko výbuchu prachu.

Jak produkt prochází po sobě následujícími komorami, vnitřní teplota vzduchu postupně zvyšuje ohřev kalu na požadovanou teplotu (přibližně 70-130 °C). Na konci horního pásu se produkt přenesení na druhý pás, kde je proces odpařování dokončen. Výrobek je ochlazován, když jde zpět k výstupu ze sušičky. Teploty v sušicích komorách jsou neustále sledovány, tato měření automaticky řídí rychlost pásu a napájecího zařízení, což poskytuje co nejúčinnější dobu schnutí a konzistentní kvalitu produktu. [18]

Z důvodů úspor zastavěné plochy využívají sušárny různé uspořádání pásových systémů a v praxi se vyskytují jednopásové, dvoupásové i vícepásové systémy, přičemž jsou pásy umístěny nad sebou. Metoda pásových sušáren umožňuje tak vícenásobné využití tepelného média a vyznačuje se nízkými náklady na údržbu. [3]

Nepostradatelnou součástí sušárny je pračka vypouštěného vzduchu. Použitý vzduch je prán dvoustupňovým systémem. Alternativně může být zapáchající použitý vzduch použit pro hoření v peci pro spalování vysušeného kalu, čímž je omezen provoz pračky vzduchu. Každá sušárna má tedy svůj vlastní specifický soubor návrhových parametrů. Lze i tak říci, že např. doba zdržení kalu v zařízení se pohybuje řádově v hodinách. [15]



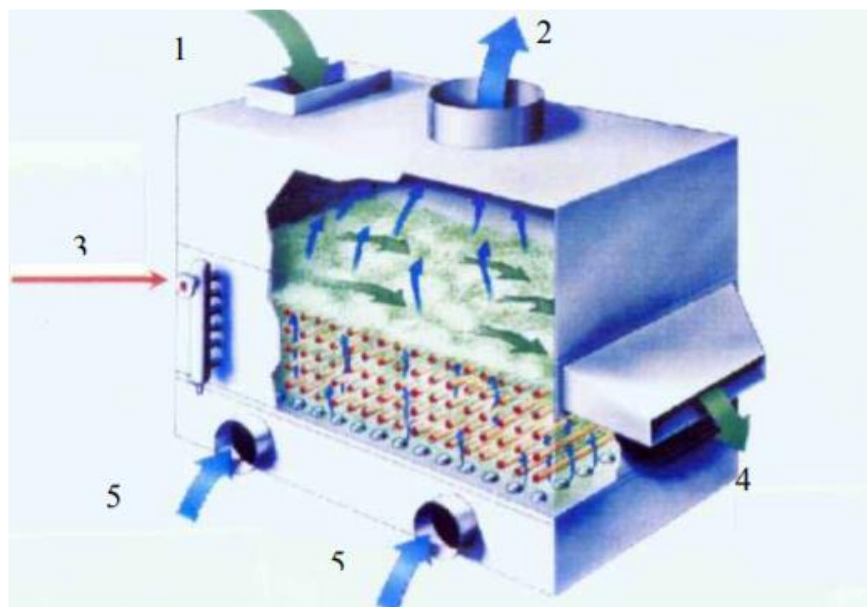
Obr. 4.4 Princip pásové sušárny [14]

Fluidní sušárna

V systému fluidní sušárny se přes perforovanou vrstvu kontinuálně dopravuje proud vlhkého čistírenského kalu. Horký sušicí vzduch je vyfukován přes otvory perforované desky. Vlhké pevné látky se zvedají ze dna a způsobují, že se pevné látky chovají jako tekutina. Rychlost vzduchu je nastavena tak, aby udržovala vrstvu pohybujícího se fluidního materiálu.

Doprava produktu se provádí pomocí třepačky s nízkým kmitočtem, s vysokou amplitudou. "Třepající" tekutý průtok tekutého lože dovoluje prvotřídní sušení produktů a dobře promíchávanou fluidizaci, která pokrývá celé spektrum a dokáže přesně řídit prodloužení doby prodloužení.

Nízkoteplotní sušárna fluidní kategorie pracuje s teplotou 85 °C (voda se odpařuje v podtlaku, což brání úniku škodlivin z cirkulačního plynu). Tato teplota je dostatečně vzdálená od rozsahu teplot, které jsou při sušení nebezpečné z důvodu možného samovznícení, tj. 130 až 150 °C. [19]



- | | |
|---|----------------------|
| 1. Odvodněný kal. | 4. Sušený granulát. |
| 2. Fluidizační plyn + brýdy. | 5. Fluidizační plyn. |
| 3. Vyhřívací médium (horký olej nebo pára). | |

Obr. 4.5 Princip šnekové sušárny [14]

4.4.3.3 Sálavé sušení (solární)

Solární sušárny byly vyvinuty z používaných kalových polí. Tato kalová pole byla před vlivy počasí často chráněna skleněným nebo foliovým zastřešením a sloužila k odvodnění a vysoušení čistírenských kalů. Solární sušárny navíc využívají jako zdroj k sušení kalu sluneční energii. Odvodněný kal je dopravován do skleníku, kde je rozprostřen po jeho dně. Metody solárního sušení čistírenských kalů mohou být aplikovány, jak ke zpracovávání odvodněných, tak i tekutých kalů. Rychlost sušení však závisí na intenzitě slunečního záření. Kolísání sušící kapacity je minimalizováno pomocí řízené ventilace a systému obracení kalu na dně skleníku. Intenzita ventilace je řízena na základě kontinuálního měření teploty a vlhkosti vzduchu venku a uvnitř skleníku. V zimních měsících může být provoz solární sušárny intenzifikován pomocí podlahového topení. Hlavním zdrojem tepelné energie však stále zůstává sluneční záření. Provoz solární sušárny je ekonomický, ale výkon sušárny je přímo úměrný úhrnu slunečního záření. Vzhledem k požadované ploše sušárny je nezbytné při plánovaném použití solární sušárny počítat s větším záborem plochy na sušárnu v porovnání s ostatními metodami sušení kalů. [20]

Mezi hlavní výhody solárních sušáren se dají zařadit:

- nízké investiční a provozní náklady;
- stabilizace kalu;

- eliminace pachové zátěže (aerobní proces);
- vysoká provozní spolehlivost. [11]

4.4.4 Peletizace vysušených čistírenských kalů

Peletizace slouží k úpravě sypkých materiálů, v našem případě kalů tak, aby byly vhodné pro další zpracování (například jako vstupní surovina pro pyrolýzu). Jedná se o využití technologie pro výrobu granulátů o průměru pelety 3 až 20 mm.

Princip peletizace spočívá v použití ploché matrice s otvory, kterou můžeme vidět na obrázku č. 4.6. Vstupní materiál je lisován otvory v matici mlecími rolnami, kde se přetváří v nekonečné prameny. Tyto prameny jsou následně řezány na požadovanou délku rotujícími noži. Válce kolového mlýna a perforované matrice jsou hlavní součásti peletizačního procesu. Zhutňování se děje v otevřených činných otvorech matrice. [21]



Obr. 4.6 Plochá matrice s otvory a hlavní peletizační jednotka [Radim Šimek]

Do lisovací matrice je materiál přiváděn nejčastěji šnekovým nebo pásovým dopravníkem. K vlastní granulaci dochází za společného působení tlaku, tepla a vlhka. Je nutné, aby surovina do granulátorů k vlastnímu slisování vstupovala homogenizovaná. Pelety po výpadu z matrice lisu jsou horké, měkké a lepivé. [22]

Zpracování kalů z komunálních a průmyslových odpadových vod na pelety zaručuje zlepšení dopravy, snížení prašnosti materiálu a pro následné využití při míchání s aditivy.

Pro peletizování odpadových kalů, které jsou předem upraveny jakýmkoliv způsobem, je požadován obsah pevných látek 60 až 95 %. Tento obsah se dosahuje dehydratací a následným tepelným sušením nebo kombinací obou kroků zpracování. Vzor před a po procesu peletizace je zobrazen na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Vzorek před peletizací (vlevo) a vzorek po peletizaci (vpravo) [Radim Šimek]

4.5 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ VYSUŠENÉHO ČISTÍRENSKÉHO KALU

Odpadní vody obsahují v přivedeném znečištění značné množství energie. Jeden ekvivalentní obyvatel odpovídá energii ve výši 170 kWh/EO.rok. Tato energie se z cca 45 % ztratí oxidací v aerobním stupni čištění a rovněž ve zbytkovém znečištění, které je obsaženo v odtoku z ČOV. Zbylý podíl přechází do kalu. Pokud se kal stabilizuje anaerobním způsobem, tak část energie, původně obsažené v odpadní vodě a následně v kalu, odchází ve formě bioplynu. Nepoměrně menší část energie se spotřebuje na vlastní biologický proces a zbytek je obsažen ve stabilizovaném kalu. Energie obsažená v kalu je vždy vázána na organický podíl kalu, proto je dosti velký rozdíl v energii vztažené na sušinu kalu v případě porovnání surového a stabilizovaného kalu. Energetický obsah kalu se nejčastěji vyjadřuje jako spalné teplo, respektive výhřevnost. Často se udává, že odvodněný vyhnilý kal splaškových ČOV má obdobné složení sušiny jako hnědé uhlí, a to jak z hlediska výhřevnosti, tak i složení popelovin. Vysušený kal z komunální ČOV mívá výhřevnost v rozmezí 8–12 MJ·kg⁻¹ sušiny. [38]

5 MOŽNOSTI NAKLÁDÁNÍ S ČISTÍRENSKÝMI KALY

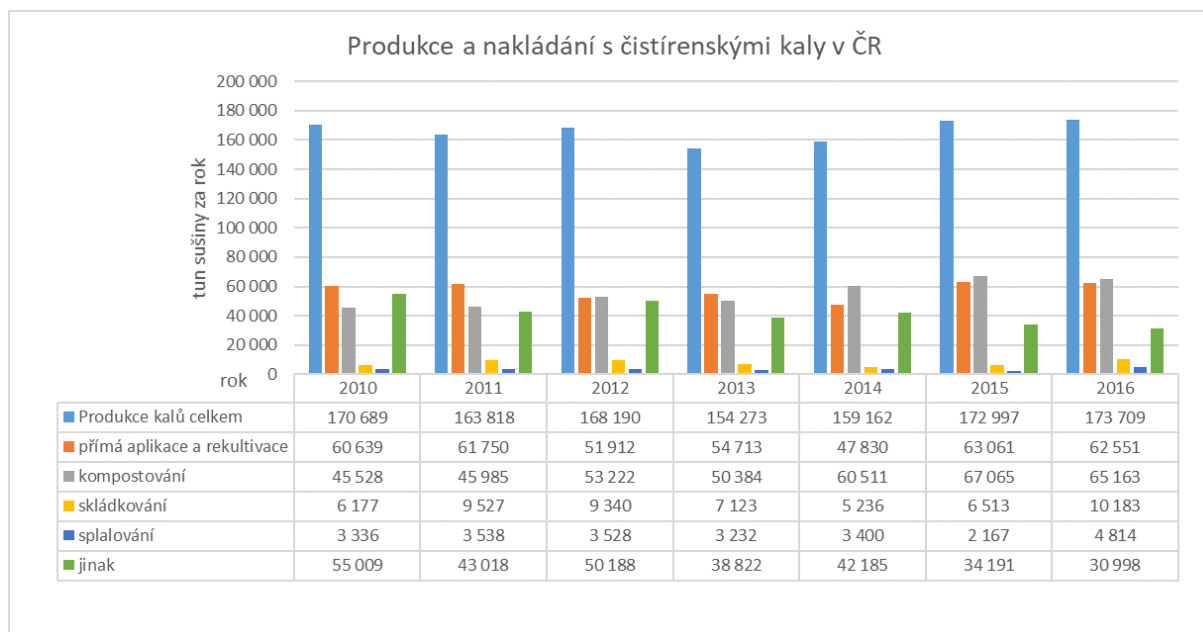
Odvodněný a stabilizovaný kal je třeba z čistírny odpadních vod dále zpracovat. Nejlepším řešením z hlediska principu cirkulární ekonomiky je jeho další využití.

Na základě zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech a znění zákona č. 223/2015 Sb. Schválilo Ministerstvo životního prostředí jako prováděcí předpis Vyhlášku č. 93/2016 Sb., o Katalogu odpadů, s účinností od 1. 4. 2016, kde jsou kaly z čištění komunálních odpadních vod zařazeny do skupiny 19 08 05, tedy kategorie „O“ jako ostatní odpad. Každý původce má při své činnosti nebo v rozsahu své činnosti povinnost předcházet vzniku odpadů, omezovat jejich množství a nebezpečné vlastnosti, dále odpady opětovně využívat a recyklovat. Popřípadě má povinnosti tyto odpady odstraňovat způsobem, který neohrožuje lidské zdraví a životní prostředí. [24]

Obecně můžeme termín odpad s organickým obsahem také definován jako biomasu, pokud je biologický materiál odvozen z původního rostlinného nebo živočišného odpadu. Odpadová biomasa ze zemědělství může být nazývána agromasa. Dalším příkladem je biomasa získaná z dřevozpracujícího průmyslu, potravinářského průmyslu, komunálního odpadu a v našem případě z kalového hospodářství z ČOV ve formě zahuštěných, odvodněných nebo sušených čistírenských kalů. [25]

Hlavním cílem nakládání s kaly by mělo být maximální využití všech cenných látek z kalu. Toho lze dosáhnout využitím kalů v zemědělství, pokud tomu nebrání jiné faktory (patogeny, těžké kovy nebo toxické látky obsažené v kalech). V případě, že kaly nelze aplikovat do zemědělství nebo na rekultivace, přicházejí v úvahu metody využívající energii z kalů, eventuálně dalších cenných látek. Na základě již zmíněných právních předpisů připadají v úvahu tyto možné technologie:

- kompostování;
- skládkování;
- spalování;
- jinak. [26]



Obr. 5.1 Produkce a nakládání s čistírenskými kaly v ČR [4]

Kategorie označená jako jinak obvykle představuje uložení kalů na skládku ve formě takzvané technické vrstvy, kdy je uložena směs s čistírenským kalem.

Na obrázku 5.1. je poté uvedena produkce a způsob nakládání s čistírenskými kaly v České republice v letech 2010-2016. Rozložení mezi jednotlivé způsoby nakládání s čistírenskými kaly je v průběhu let až na výjimky prakticky neměnné. [26]

Energetický obsah čistírenských kalů spočívá v chemické energii přítomných organických látek, schopných oxidace. Čistírenské kaly vznikají v kalovém hospodářství, proto je tento provoz čistíren odpadních vod jediný, který je schopen tuto energii produkovat. Všechny ostatní provozy jsou pouze spotřebiteli této energie. Aby se tyto kaly staly palivem, tedy požadovanou energetickou surovinou, jejímž spalováním energie vzniká, musí být schopny hořet. Tady vzniká problém, protože kaly jsou velmi řídké suspensiony organických a anorganických látek. Výhřevnost, kterou přináší organické látky, je dána stupněm zahuštění, či odvodnění kalů. Jak bylo ukázáno, působí proti sobě obsah organických látek a dosažená sušina při mechanickém odvodňování. [26]

5.1 PŘÍMÁ APLIKACE KALŮ A REKULTIVACE

Použití čistírenských kalů v zemědělství definuje samotný zákon o odpadech 185/2001 Sb., další podrobnosti, technické podmínky a povinnosti definuje nová vyhláška č. 437/2016 Sb., o použití upravených čistírenských kalů v zemědělství.

Zároveň použití čistírenských kalů na zemědělské půdě zásadně ovlivňuje i novela vyhlášky č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, která zavedla mikrobiologické ukazatele pro hnojiva z čistírenských kalů.

Při použití kalů z ČOV na zemědělskou půdu je zákonem o odpadech a prováděcích předpisů stanovena povinnost aplikovat pouze upravené kaly, a to s ohledem na nutriční potřeby rostlin a v souladu s tzv. programem použití kalů stanoveným původcem kalů.

Aplikací kalů na zemědělskou půdu nesmí být ovlivněna kvalita zemědělské půdy a kvalita povrchových a podzemních vod. Je zcela jednoznačné, že uvedená vyhláška pro řadu subjektů znemožnila přímé využití čistírenských kalů na zemědělské půdě.

V případě nadlimitních koncentrací znečišťujících látek, kdy nelze kal aplikovat na půdu, je nutné k odstranění kalů použít některou z jiných metod. [27]

Od 1. ledna 2020 bude možné ukládat na zemědělské půdě pouze kal kategorie I (Příloha č. 4, tabulka č. 1 vyhlášky), kdy je podmínkou mimo splnění kvalitativních parametrů i provedení opakovaného ověření účinnosti hygienizace kalů pro provozované ČOV do 31. 12. 2019.

Nejčastější a nejméně náročné využití kalů, je využití kalů na zemědělské půdě. Problematika zpracování kalů je samozřejmě specifická a je vázaná na lokální podmínky, a to nejen klimatické. Některé státy se daly cestou bez rizik s principem předběžné opatrnosti, který vyústil v úplné či částečné omezení využívání kalů na zemědělské půdě. Nejprísnejší kritéria mají státy západní Evropy a USA. Kromě sledování těžkých kovů a vybraných organických polutantů, které nařizuje Evropská směrnice, tyto právní předpisy berou v úvahu výskyt jak patogenních a rezistentních mikroorganismů, tak dalších polutantů (antibiotika, hormony, endokrinní disruptory). V těchto státech pak vzrůstá termické zpracování, energetické využití a prioritně znovuzískávání některých cenných a hnojivých látek, hlavně fosforu. [28]

V ČR byla novelizována vyhláška, která upravuje využití kalů na zemědělské půdě. Vyhláška č. 437/2016 Sb. byla zpracována v důsledku změn novely zákona o odpadech. Zároveň však byla reakcí na požadavky samotného MŽP, ČIŽP, ale i samotných uživatelů (zemědělců) a v neposlední řadě i producentů ČOV. Specifikuje nové povinnosti pro provozovatele ČOV a zařízení na úpravu kalů, stanoví podmínky pro skladování kalů v zařízení ke sběru a skladování kalů a technické požadavky pro dočasné uložení upravených kalů u zemědělce. Jejím cílem je také stanovení jednoznačných požadavků pro provozovatele zařízení na úpravu kalů tak, aby bylo prokazatelné, že technologie úpravy je schopna účinně kaly hygienizovat na požadované snížení počtu patogenních mikroorganismů. Přestože přísné limity pro mikrobiologické parametry budou v ČR platit až od roku 2020, vydání vyhlášky vyvolalo ihned hledání a postupné zavádění nových technologií s účinnou hygienizací. Je na každém provozovateli, jakou cestou se vydá. Z uveřejněných článků a diskusí na seminářích s touto tematikou se jeví, že cesta vede, podobně jako ve státech západní Evropy, k metodám termického zpracování nebo jednoduššímu způsobu hygienizace vápnem. Vyskytují se i názory, které upřednostňují úplný zákaz využívání kalů na zemědělské půdě. [28]

Rizikové faktory při aplikaci odpadů lze rámcově rozdělit do dvou základních skupin, a to na patogenní mikroorganismy a toxické chemické látky. Počty a druhy patogenních mikroorganismů vždy závisí na místních geografických, klimatických a demografických faktorech. Patogenní organismy do odpadů a odpadních vod přicházejí z různých zdrojů a jako hlavní zdroj je možno označit exkrementy nemocných lidí a zvířat. [29]

Vlastní proces čištění odpadních vod nebo úpravy kalů snižuje počty patogenních organismů. Přesto se mohou z půdy dostat do ovzduší, na zemědělské produkty nebo proniknout do podzemních a povrchových vod a některým z uvedených způsobů se mohou dostat do potravního řetězce. Zvláště nebezpečné je rozšíření patogenních organismů rezistentních na antibiotika. [29]

Dobře stabilizovaný a maximálně hygienizovaný kal vhodného složení je možné využívat v zemědělství jako hnojivo. Kal většinou obsahuje velké množství organických látek (dusík, fosfor, vápník...), což jsou látky potřebné k růstu rostlin. Na druhé straně však kaly mohou obsahovat některé nežádoucí složky, jejichž přítomnost tuto možnost využití kalu značně snižuje. Mezi nežádoucí složky obsažené v kalu patří:

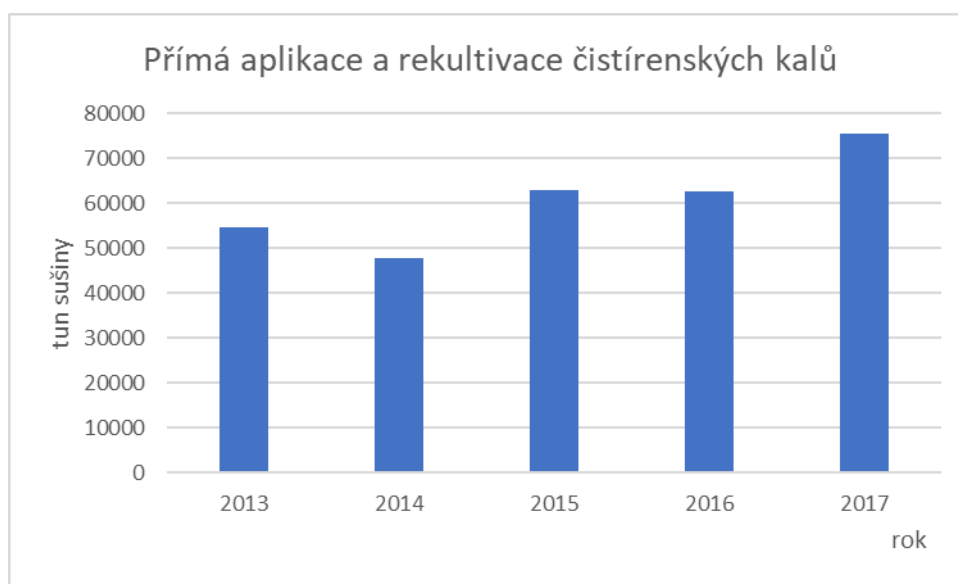
- těžké kovy (Cu, Pb, Cd, As, Ni, Cr, Hg, Zn);
- některé organické látky;
- patogenní mikroorganismy.

Těžké kovy a škodlivé organické látky lze minimalizovat pouze pečlivou kontrolou producentů přímo ve zdroji znečištění (většinou průmyslové podniky), patogeny se z kalu odstraňují dobrou hygienizací. Kal se na zemědělskou půdu aplikuje v tekutém stavu nebo odvodněný. Doporučená dávka je 3 t sušiny kalu na hektar půdy během tří let. [9]

5.1.1 Rekultivace

Kaly z ČOV se uplatňují mimo jiné jako přípravek do rekultivačních substrátů. Rekultivace se řídí zvláštními předpisy, z předpisů odpadového hospodářství jsou to především prováděcí vyhlášky č. 383/2001 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady, č. 294/2001 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a č. 341/2008 Sb. o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady.

Rekultivace je jednou z forem krajinného plánování, kdy dochází k navrácení poškozené nebo zcela zničené krajiny do původního stavu. Při tom se snaží odstranit či zmírnit nepříznivé dopady na životní prostředí změnou fyzických, chemických nebo biologických vlastností. [3]



Obr. 5.2 Přímé využití a rekultivace kalů v roce 2013-2017 [4]

5.2 KOMPOSTOVÁNÍ KALŮ

Kompostování je řízená biologická aerobní technologie pro zpracování biologicky rozložitelných rostlinných surovin a odpadů nejčastěji překopáváním venkovních zakládek. Vzhledem k příznivému obsahu a charakteru organických a anorganických látek je kal vhodný pro použití jako hnojivo pro kompostování. Podporuje tvorbu humusu a upravuje strukturu půdy. Obsah těžkých kovů však může negativně ovlivnit toto využívání kalů. Díky tomuto faktu mohou komposty většinou obsahovat v surovinové skladbě jen malý podíl čistírenských kalů. Řada subjektů však odebírá kaly s vyšším obsahem škodlivin a vyrobené komposty aplikuje na svou zemědělskou půdu, přičemž nerespektuje žádná omezení. [1] [30]

Kompostování se provádí v průmyslových kompostárnách a v podstatě dochází k další stabilizaci kalu a jeho hygienizaci. Kal je nejprve smíchán s plnivem (sláma, kůra, piliny, plasty) pro zvýšení objemu pórů kalu, snížení obsahu vody a naplnění poměru obsahu uhlíku a dusíku. Sušina takto vyrobené směsi se pohybuje kolem 40 % a během procesu se může zvýšit na 50–60 %. Směs se ukládá na haldy ve tvaru komolého jehlanu. Při odbourávání organických látek dochází k uvolňování tepla, díky čemuž je materiál ohříván na 60-80 °C. Tato teplota se udržuje minimálně po dobu 21 dnů, kdy je kompost během této doby třikrát převrstven pro zajištění homogenizace, přístupu kyslíku a stejné teploty v celém objemu. Díky vysoké teplotě dochází v kompostu k usmrcení patogenů. Důležitou součástí kompostování je provádění chemických, fyzikálních i mikrobiologických analýz. [9]



Obr. 5.3 Kompostování kalů v roce 2013-2017 [4]

5.3 SKLÁDKOVÁNÍ KALŮ

Skládkování kalů slouží pro uložení materiálu na zabezpečenou skládku, když se nenaleznou snadnější metoda využití nebo likvidace kalu. Skládkování by se především mělo používat pro inertní materiály. Jedná se o nejméně ekologicky vhodné řešení. V konečném řešení to znamená, že se problém přesouvá pouze na pozdější dobu. [1]

Pro skládkování lze použít pouze kal stabilizovaný a odvodněný. Musí být zajištěna minimalizace jeho objemu. Se skládkováním jsou spojené technické a hygienické potíže s manipulací a dopravou. Na samotnou skládku jsou poté kladeny specifické nároky na její konstrukci. Na rozdíl od spalování přetrvává potenciální infekčnost kalu ještě dlouhou dobu po jeho uložení na skládce, čímž se skládka stává ložiskem patogenních mikroorganismů. Dále může na skládce docházet k vyhnívání kalu, které by bylo doprovázeno emisemi methanu, jehož negativní klimatický vliv je řádově větší než v případě oxidu uhličitého. Skládkování se provádí na skládkách komunálního odpadu. Tento způsob uložení kalů musí však vyhovovat všem legislativním požadavkům. Typ skládky, na kterou má být daný kal uložen, se stanovuje pomocí vodního výluhu z kalu. Původně tekutý nebo plastický kal je převeden na pevné skupenství pomocí matrice, kterou je organická nebo anorganická hydraulicky vazebná látka. Tato matrice reaguje v kalu s vodou. V důsledku srážení a fixace jsou nežádoucí látky v kalu pevně vázány a dochází i k růstu pH, což má za následek ničení patogenů. Konzistence kalu je poté drobná, homogenní a obsaženou vodu pevně váže. [9]

Sušení kalu s následným ukládáním takto vysušeného kalu na skládku se nejeví jako příliš vhodné řešení, a to především z hlediska vysokých nákladů na sušení. Kromě toho může vysušený kal při intenzivním dešti snadno „rozbřednout“, a naopak za sucha se může stát značně prašným, případně se může vznítit. [31]



Obr. 5.4 Skládkování kalů v roce 2013-2017 [4]

5.4 SPALOVÁNÍ KALŮ

Spalování je definováno jako termická přeměna neboli oxidace materiálu za dostatečného přístupu kyslíku. Je to reakce exotermní, jejímž produktem je tepelná energie, kterou je možno dále využívat například pro výrobu tepla nebo elektrické energie. Teplotní podmínky se pohybují okolo 800–1200 °C v závislosti na druhu spalovaného materiálu. [32] [33]

Odpadní kaly lze spalovat, pokud obsahují alespoň zčásti spalitelné složky. Spalitelné složky mohou být přítomny v tuhé i v kapalně fázi. Při spalování odpadních kalů jsou důležitými parametry:

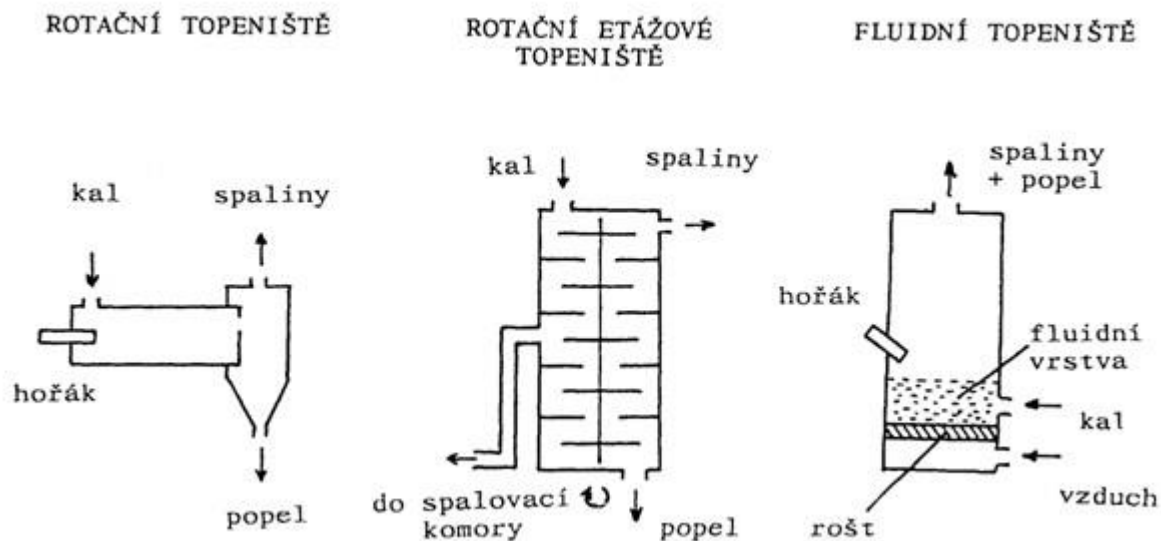
- teplota;
- obsah sušiny;
- obsah organické složky;
- výživná hodnota.

Energetická bilance procesu spalování je závislá na složení kalu a na použité technologii spalování. Pokud jsou v kalu zastoupeny v dostatečné míře složky s vyšší výhřevností, může být kal spalován samostatně a lze získat využitelnou tepelnou energii. Při vyšším obsahu nespalitelných složek v kalu nelze mnohdy proces spalování vůbec realizovat, neboť teplo vzniklé spálením spalitelných složek nestačí na úhradu tepelných ztrát při procesu. V těchto případech je nutné použít přídavné palivo s dostatečnou výhřevností. Jako přídavného paliva lze použít některých tuhých odpadů (papír, hadry, dřevo) nebo hodnotných paliv (topné oleje, plynná paliva). [3]



Obr. 5.5 Spalování kalů v roce 2013-2017 [4]

Odpadní kaly lze spalovat teprve po jejich co možná nejdokonalejším odvodnění. Voda obsažená v kalu se totiž při spalování odpařuje a spotřebovává tak značné množství vznikající tepelné energie. Tím se snižuje energetický přínos procesu spalování, případně je tento proces znemožněn. Základní druhy technologií, použitelné ke spalování odpadních kalů, jsou rotační topeniště, rotační etážové topeniště a fluidní topeniště. [3]



Obr. 5.6 Schémata topenišť (rotační, rotační etážové, fluidní) [3]

Rotační topeniště

Rotační topeniště se používají hlavně ke spalování průmyslových kalů. Ke spalování dochází ve vodorovném, pomalu se otáčejícím válcovém bubnu z ocelového plechu se žáruvzdornou vyzdívkou. Do bubnu je zaveden hořák plynového nebo olejového topení, který slouží v případě potřeby k uvádění přídatného paliva. Na vstupní straně je do bubnu dále přiváděn

vzduch a spalovaný kal. Na výstupní straně bubnu je odvod spalin. Spaliny jsou obvykle uváděny ještě do komory dodatečného tepelného zpracování, kde dochází k úplnému spálení event. zbytků spalitelných složek z nedokonalého spálení v bubnu. Mimo jiné se zde spálí těkavé páchnoucí podíly kalů, které by jinak unikly do ovzduší. [3]

Výhodou bubnových rotačních pecí je dobré přehrnování a mísení odpadů a dobrý přístup spalovacího vzduchu v důsledku otáčení pece. Regulace a řízení procesu spalování, a tím i přizpůsobení pece různým druhům odpadu a různým spalovacím režimům, je možná změnou otáček. [3]

Rotační etážové topeniště

U rotačních etážových topenišť je princip spalování obdobný. Jedná se v podstatě o několik spojených válcových topenišť, situovaných nad sebou ve svislé poloze. Osou válce probíhá masivní hřídel, opatřená rameny, zasahujícími do jednotlivých etáží. Na ramena se nasazují lopatky, nasměrované takovým způsobem, aby při otáčení hřídele byl kal přiváděn do pece shora shrnován do otvorů uspořádaných v jednotlivých etážích střídavě na obvodu válce a v jeho středu, kal tak postupuje v etážích od obvodu ke středu, kde propadne na níže ležící etáž, na níž je opět hrnut od středu k obvodu. V důsledku spirálovitého postupu pecí je zajištěna dlouhá doba průchodu odpadu. Tok spalovacího vzduchu a spalin může být dvojitý, u souproutého systému postupují vzduch a spaliny souběžně se spalovaným kalem, u protiproudého systému opačným směrem. Vstupující kal může být předehříván spalinami, stejně tak i vzduch pro spalování, vstupující do topeniště. I u této technologie se za hlavním topeništěm obvykle instaluje komora pro dodatečné tepelné zpracování. [3]

V minulosti bylo vyvinuto několik různých typů etážových pecí, které pracují odlišnou technologií a jsou známé podle firem, které je uvedly na trh. [3]

Fluidní topeniště

Fluidní topeniště má obvykle tvar svislého válce. Ve spodní části topeniště je instalován tryskový nebo keramický rošt. Tímto roštem je do spalovacího prostoru uváděn vzduch. Na roštu je uložena vrstva písku, která je při provozu topeniště uvedena vstupujícím vzduchem do vznosu a vytvoří ve spalovacím prostoru nad roštem vířivý mrak, ve kterém probíhá spalování rozprašovaného kalu. [3]

Tato technologie spalování vyžaduje účinné rozprášení kalu do spalovacího prostoru. Aby rozprášení kalu na dostatečně jemné částičky bylo vůbec možné, musí být kal velmi dobře odvodněn, resp. vysušen. U některých typů kalů, jejichž účinné rozprášení není dosažitelné, nelze této technologii použít. Rozprášení vhodně upraveného kalu do spalovacího prostoru zajišťují rozmetávací zařízení. Kal je uváděn do prostoru nad rošt a je unášen proudem vzduchu do horní části spalovacího prostoru, který zpravidla funguje i jako prostor pro dodatečné tepelné zpracování. Spaliny jsou odváděny z horní části topeniště a unášejí s sebou

jemnozrnný popel. Do spodní části topeniště je zaveden plynový nebo olejový hořák pro případ nutnosti uvádění přídatného paliva. [3]

Tato technologie našla uplatnění tam, kde je výhodou vyšší relativní rychlost mezi pevnými částicemi a vysoký stupeň promíchání obsahu lože. S úspěchem se používá u chemických procesů, u procesů sušení, čištění spalin, zplynování a pro spalování nízkohodnotných paliv, mezi nimi i čistírenských kalů.

5.4.1 Spoluspalování v elektrárnách

Tato metoda spoluspalování kalů je legislativně upravena Nařízením vlády č. 354/2002 Sb., kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu. Skutečnost, že výroba elektrické energie a tepla je v České republice zajišťována převážně v elektrárnách a teplárnách. Spoluspalování kalů z čistíren odpadních vod v elektrárnách spalujících hnědé nebo černé uhlí lze celkem jednoduše technicky realizovat vzhledem k tomu, že hnědé uhlí o obsahu až 50 % vody a čistírenský kal s obsahem vody mezi 70 až 80 % vody mohou využívat stejná nebo podobná zařízení pro sušení a úpravu paliva (uhlí, kal). [11]

Množství přidávaných kalů bývá mezi 3 % až 4 % z váhového množství dávkovaného uhlí. Pro spoluspalování čistírenských kalů v elektrárnách či teplárnách není proto rozhodující konstrukce spalovacího zařízení (spalování na roštu, granulační kotel, fluidní kotel). Technicky se tedy jedná o doplnění stávajícího technologického řetězce kotelní jednotky spalující uhlí o zásobník kalů, dopravní a dávkovací cesty, zařízení pro eliminaci pachů, bezpečnostní zařízení a doplnění stávajícího provozního souboru měření a regulace. [11]

5.4.2 Spoluspalování v cementářských pecích

Spalování a sušení kalů v cementářské peci je logickým krokem. Vysoká teplota v cementářských pecích zaručuje dokonalou destrukci organických látek včetně látek rezistentních. Při této termické destrukci usušených kalů je minimálně zatěžováno životní prostředí a je využita energie organické i anorganické složky usušeného kalu. Díky pevné vazbě spáleného kalu v cementářském slínku a následnému využití se jedná o materiálové využití odpadu. Tento způsob je ekonomicky zajímavým, pokud dochází k sušení kalů pomocí odpadního tepla z výroby cementu. Unikající škodliviny z výpalu, jako jsou těžké kovy, síra, chlor nebo alkálie, jsou v technologii výpalu cementářského slínku zachyceny. Zkoušky výluhem prokázaly jejich zachycení na silikátových mřížkách. Problematickými složkami jsou těžké látky, jako je rtuť nebo thalium. Při sledování těchto látek během procesu bylo zjištěno, že kondenzují na velmi jemné prachové částice. V této podobě je možné částice snadno odstranit ze systému, například odlučovačem prachových částic. [37]

V zásadě jsou v cementářském průmyslu používány dva typy pecí, a to rotační pece s cyklónovým předehřevem (několika variant) a dále tzv. Lepolovy pece. Jako primární zdroj energie pro technologický řetězec výroby cementu jsou využívána fosilní paliva (plyn, topné

oleje, černé uhlí, hnědé uhlí). Tato mohou být částečně nahrazena odpadem definovaného složení. Cementářský průmysl deklaruje snahu nahradit část fosilních paliv vhodnými spalitelnými odpady definovaných kvalitativních znaků. Takovými odpady mohou být i odvodněné a vysušené vyhnílé kaly z čistíren odpadních vod, jejichž výhřevnost se po vysušení na cca 90 % pohybuje v rozmezí 8-12 MJ·kg⁻¹. [11]

5.4.3 Spoluspalování ve spalovnách odpadů

Ve spalovnách odpadů se čistírenské kaly mohou spalovat spolu s odpadem. V zásadě jsou aplikovány dvě metody, které se odlišují fyzikálním stavem kalu a jeho dopravou do spalovenského kotle. Jedná se o metody:

- metoda spalování odvodněného kalu (do cca 25 %);
- metoda spalování vysušeného kalu (na cca 75 %).

Komunální odpad se přiváží sběrnými vozy. Uskladněn je v bunkrech hrubého a drobného odpadu. Hrubý odpad se před vlastním vkladem do ohniště drtí. V bunkrech se odpad dále promíchává, čímž se homogenizuje za účelem zajištění optimálního průběhu spalovacího procesu. Manipulace s odpadem se provádí pomocí jeřábů s drapáky, které dávkuje odpad do roštového ohniště. Spalovací prostor tvoří vlastní ohniště a dohořivací komora, ve které je teplota vyšší než 850 °C (po dobu 2 s po přívodu sekundárního vzduchu). Jsou zde rovněž zapalovací a podpůrné hořáky na zemní plyn. [11]

Spalování odvodněného kalu je oproti spalování vysušeného kalu energeticky náročné, neboť se musí odpařit voda obsažená v kalu. To přináší cca 10-12 % snížení výkonu spalovenského kotle. Spalování vysušeného kalu (na zbytkový obsah vody 25 %) spolu s tuhým komunálním odpadem nepřináší výrazné další nároky na energie, neboť předsušený vyhnílý kal má nepodstatně menší výhřevnost než komunální odpad. [11]

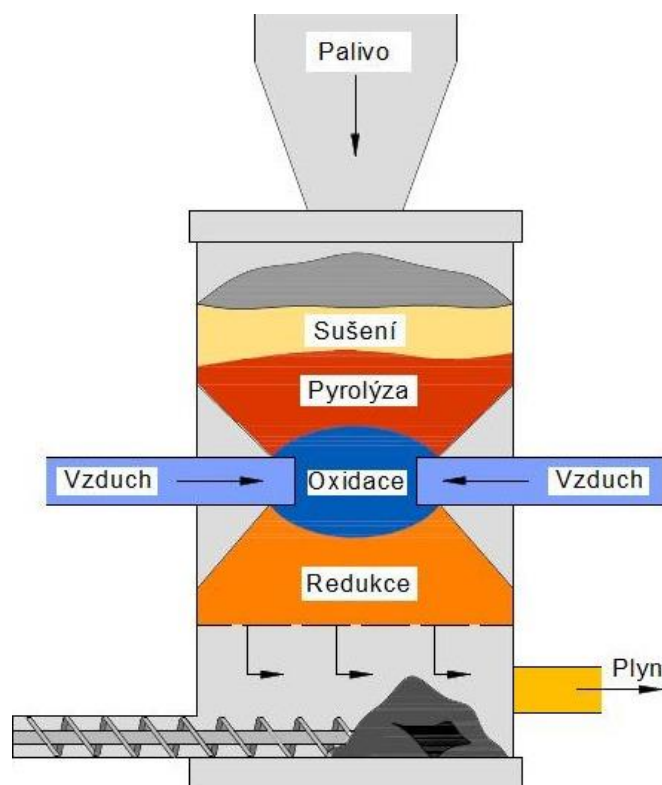
5.5 ZPLYŇOVÁNÍ KALŮ

Zplyňování je termochemická přeměna uhlíkatého materiálu v pevném či kapalném skupenství na výhřevný energetický plyn pomocí zplyňovacích médií a tepla. Produktem zplyňování je plyn obsahující výhřevné složky (H₂, CO, CH₄ a další minoritní sloučeniny), doprovodné složky (CO₂, H₂O, N₂) a znečišťující složky (dehet, prach, sloučeniny síry, chlóru, alkálie a další). [34]

Využívané termochemické procesy při zplyňování přímo navazují na sebe. Probíhající fáze každého procesu se prostorově i časově rozděluje do jednotlivých fází. Toto rozdělení lze realizovat pouze u reaktoru s pevným ložem, které je zobrazeno na Obr. 5.7. U reaktoru pracujícího se zplyňováním ve vznosu (tzv. fluidní reaktor) se jednotlivé fáze nedají rozdělit, ale všechny fáze probíhají v celém reaktoru současně.

Procesy rozdělené na jednotlivá pásma:

- sušení paliva – ohřev paliva s odpařením vázané vody;
- pyrolýza – tepelný rozklad paliva na plynné složky, kondenzující páry, polokoks, následné tepelné štěpení par na plyn a pevný uhlík;
- oxidace – částečná oxidace hořlavých plynů, složek a pevného uhlíku;
- redukce – zplyňování pevného uhlíku párou nebo oxidem uhličitým. [34]

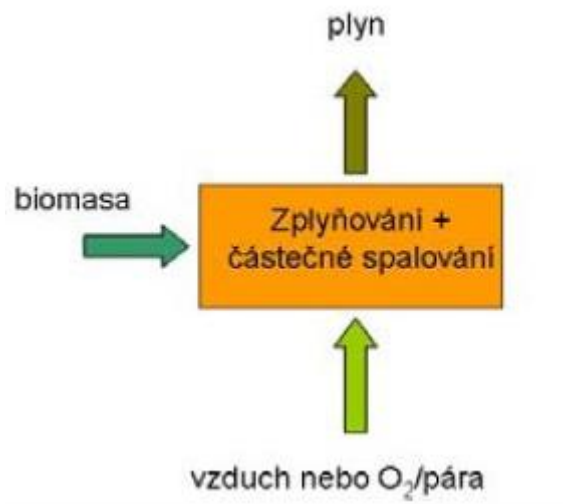


Obr. 5.7 Průběh reakcí v reaktoru [36]

Pokud je praktikován způsob pokrytí tepelné spotřeby částečným spálením paliva přímo v reaktoru, používá se termín autotermní neboli přímé zplyňování. Pokud je teplo přiváděno z okolí do reaktoru, hovoříme o tzv. alotermním, nebo nepřímém zplyňování.

5.5.1 Autotermní zplyňování

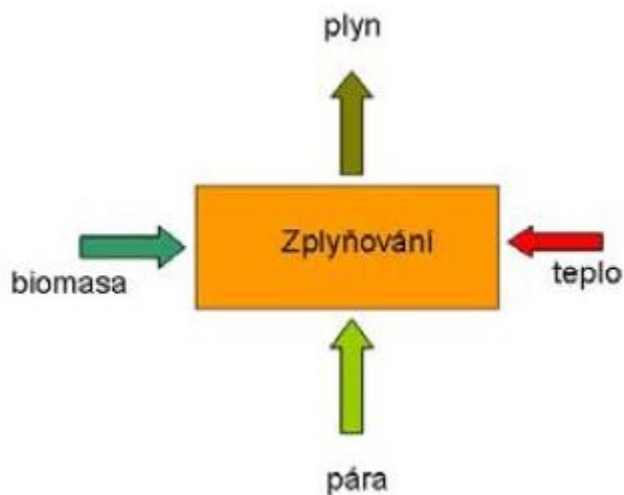
Při autotermním zplyňování musí být do reaktoru přiváděn kyslík, aby docházelo k potřebným spalovacím exotermním reakcím, které pokrývají potřebu tepla pro zplyňování. Nejčastěji je používán vzdušný kyslík, což má ale za následek naředění produkovaného plynu dusíkem ze vzduchu, a tedy i snížení obsahu výhřevných složek. Výhřevnost plynu se při autotermním zplyňování vzduchem pohybuje v rozmezí 2,5–8,0 MJ·m³. [34]



Obr. 5.8 Autotermní zplyňování [34]

5.5.2 Alotermní zplyňování

Při alotermním (nepřímém) zplyňování je produkován plyn o vyšší výhřevnosti (až $14 \text{ MJ} \cdot \text{m}^3$) a se širšími možnostmi využití. Nevýhodou je nutnost zajistit přísun tepla, což vyžaduje složitější zařízení s vyššími investičními náklady. Zplyňovacím médiem při alotermním zplyňování bývá vodní pára. Přísun tepla pro alotermní zplyňování bývá zajištěn předehřevem zplyňovacího média a paliva, otopem stěn reaktoru nebo přenosem tepla inertním materiálem (např. pískem) přímo do reaktoru. [34]



Obr. 5.9 Alotermní zplyňování [34]

5.6 PYROLÝZA

Pyrolýza patří spolu se spalováním a zplyňováním mezi procesy termochemické konverze. Tyto procesy se navzájem výrazně odlišují v obsahu kyslíku v reakčním prostoru. Na rozdíl od zplyňování a spalování je pyrolýzní proces využíván pro vývoj inovativních technologií založen na rozkladu organických látek působením tepla bez přístupu oxidačních médií. V technické praxi bývá tento proces dělen do třech kategorií podle používaných teplot, a to na procesy:

- nízkoteplotní (<500 °C);
- středněteplotní (500–800 °C)
- vysokoteplotní (>800 °C). [36]

Do reaktoru je vkládán vstupní materiál – částečně nebo zcela sušený kal, který je zahříván a rozkládán na menší a jednodušší molekuly plynu, oleje a pevného zbytku – biocharu. Při tepelném rozkladu klesá stabilita vysokomolekulárních látek, což vede k jejich štěpení s uvolňováním látek nízkomolekulárních. V podstatě při tepelném rozkladu dochází k uvolnění prchavé hořlaviny z tuhého odpadního materiálu. Výstupy z pyrolýzní technologie lze využít jako opětovnou vstupní surovinu k dalšímu zpracování, ale především k výrobě tepelné a elektrické energie. [36]

Podle rychlosti ohřevu a finální teploty procesu, rozeznáváme dva základní typy pyrolýzy:

- rychlá pyrolýza;
- pomalá pyrolýza.

Rychlá pyrolýza má rychlý teplotní nárůst, krátkou dobou zdržení v reaktoru (v řádech sekund) a vysokou finální teplotou (až 1000 °C), vzniká při ní vyšší podíl pyrolytického oleje (60–75 hm. %) a nižší podíly biocharu (15–25 hm. %) a pyrolýzního plynu (10–20 hm. %).

Naopak při pomalé pyrolýze je nárůst teploty pozvolný, finální teplota se pohybuje až do 800 °C (obvykle 500 až 600 °C), vzniká 20-25 hm. % bio-oleje, 25-35 hm. % plynu, a 35-55 hm. % biocharu. Při zpracování čistírenských kalů na hnojivo je konfigurací pyrolýzního reaktoru podporována produkce biocharu, zároveň se provozními podmínkami potlačuje produkce pyrolýzního oleje a podporuje vznik pyrolýzního plynu, který se pak okamžitě využívá k energetickému zabezpečení procesu pyrolýzy. Obvykle je pyrolýzní plyn spalován ve speciálních nízko-emisních hořácích, které jsou součástí pyrolyzéro. Proces pyrolýzy se tak stává energeticky soběstačným, či spíše tepelně přebytkovým. Odpadní teplo pyrolyzéro se může dále využívat k sušení vstupního materiálu. [2]

Podrobněji lze ještě rozdělit rychlou a pomalou pyrolýzu dle tabulky 5.1., kde jsou uvedeny doplňující informace jako teplota při procesu, samotná doba trvání a výtěžky produktů jednotlivých typů pyrolýzy.

Tab. 5.1. Rozdílné třídy pyrolýzní úpravy podle doby trvání procesu [25]

Proces pyrolýzy	Procesní teplota [°C]	Doba procesu	Produkty pyrolýzního procesu [%]		
			Pyr. plyn	Pyr. olej	Biochar
Blesková	800 - 1 300	<5 s	40	-	60
Rychlá	300 - 1200	<20 s	15-25	50-70	10-30
Pomalá	100 - 1 000	5 min-12 hod	25-35	20-30	25-35
Torefakce	200 - 300	30 min-4 h	20-40	-	60-80

V případě tuhých odpadních materiálů lze pyrolýzní postupy považovat za alternativu spalování. Při pyrolýzním procesu vznikají zpravidla čtyři hlavní produkty:

- pevný uhlíkatý zbytek (biouhlí – angl. biochar);
- pyrolýzní plyn;
- organický kapalný produkt (označován jako pyrolýzní olej);
- pyrolýzní vodu – větší část obvykle pochází z vlhkosti obsažené v rozkládaném materiálu.

Na rozdíl od spalování, které se vyznačuje produkcí velkého množství spalin, je objem pyrolýzního plynu výrazně menší. Při spalování odpadů je produkována tepelná energie umožňující např. výrobu páry nebo teplé užitkové vody jejichž další využití může být problematické. Naproti tomu pyrolýzní proces produkuje organický kondenzát a pyrolýzní plyn. Oba tyto produkty mohou být využitelné jako palivo. Kapalně a plynné produkty lze navíc dále rafinovat a tím zušlechťovat. [25]

Proces pyrolýzy lze dále rozdělit podle druhu ohřevu do dvou tříd. První třídou je konvenční pyrolýza a druhou mikrovlnná pyrolýza (MP). MP je jednou z nejúčinnějších tepelných úprav, za kterých jsou podmínky procesu příznivější z hlediska energetiky a ekonomiky. MP může mít výhody spojené s rychlejší produkcí a významným snížením energetických ztrát ve srovnání s konvenčními metodami [25]. V rámci diplomové práce byly pokusy prováděné právě na jednotce MP, a proto zde bude uveden její podrobnější princip.

5.6.1 Mikrovlnná pyrolýza

Princip mikrovlnného ohřevu spočívá v účincích rychle se měnícího mikrovlnného záření (elektromagnetického pole), což vede k vibracím molekul materiálu, což v podstatě vede ke zvýšení tření. Vibrace zvyšují střední teplotu, což zvyšuje vnitřní energii. Z hlediska reakce na mikrovlnné záření mohou být materiály rozděleny na absorpční materiály, vodiče a izolátory. Dielektrické materiály obsahující uhlík mají dobrou schopnost absorbovat a přeměňovat je na tepelnou energii. Takové absorbéry mikrovlnného záření obsahují minimální nosiče náboje a při vystavení mikrovlnnému záření přenášejí jen zanedbatelný podíl a absorbují většinu z nich a přeměňují je na tepelnou energii. Pyrolýza různých

organických materiálů může tvořit tři základní komponenty: bionafta, pyrolýzový olej (nebo podobná kapalina složená z oleje a vody) a plyn, který opouští systém po kondenzaci par. [38]

Mikrovlnná pyrolýza je tedy slibným způsobem pro zlepšení výnosu, kvality produktů a ke zvýšení energetické účinnosti celého procesu. Rozdíl mikrovlnného ohřevu oproti konvenčnímu je v odlišnosti topného zařízení. Mikrovlnné ohřívání je zprostředkováno dielektrickým vytápěním, konvenční ohřev se provádí přiváděním tepla. Mikrovlnami také dochází k ohřevu materiálu v celém objemu, protože mikrovlny procházejí přímo materiálem. Mikrovlnný ohřev závisí na druhu materiálu, který je zpracováván, a to podle jeho dielektrického chování [39].

Mikrovlnná pyrolýza vyžaduje menší množství vstupní energie a kratší reakční čas, ale dochází k vyššímu stupni termochemického rozkladu. Ve srovnání s konvenčními způsoby pyrolýzy je rychlostní konstanta mikrovlnné pyrolýzy mnohem vyšší a aktivací energie mnohem nižší [39].

Mikrovlnný ohřev nám tedy nabízí řadu výhod oproti konvenčnímu ohřevu. Těmito výhodami jsou hlavně:

- nekontaktní ohřev;
- přenos energie, ne tepla;
- vyšší rychlost ohřevu;
- selektivní ohřívání materiálu;
- ohřívání v objemu;
- rychlý start a konec vyhřívání;
- vytápění zevnitř materiálu;
- vyšší úroveň bezpečnosti a automatizace [28].



**Obr. 5.10 Velká provozní jednotka mikrovlnné pyrolýzy umístěná ve výzkumném středisku AdMaS
[Radim Šimek]**

5.6.2 Pevný uhlíkatý zbytek - biochar

Biouhlí (anglicky biochar) je spalitelným produktem pyrolýzy biomasy (v našem případě čistírenských kalů), kdy se tato biomasa zahřívá za nepřítomnosti kyslíku. Výroba biocharů byla původně spojena s "pomalou pyrolýzou". Při tomto druhu pyrolýzy je doba trvání v rozmezí od několika sekund do 10 hodin a vrcholové teploty jsou relativně nízké. Existují však zprávy o biotvorbě vzniklé během "rychlé pyrolýzy" s krátkou dobou trvání a vyššími teplotami, a dokonce i novými technikami, jako je například konverze mikrovln. Během procesu výroby bioplynu je transformace z energie na teplo poměrně nízká, což vedlo k vysokému ukládání uhlíku v biosyntéze a k výrazně nízkým emisím globálních oteplovacích plynů do atmosféry. [42]

Biouhlí z čistírenských kalů může obsahovat těžké kovy a organické znečišťující látky, které by mohly při použití biouhlí jako hnojiva pro zemědělské využití, spíše kontaminovat půdu než ji zlepšit. Kvůli této možnosti je zapotřebí dalších výzkumů k charakterizaci různých typů kalů z čistíren odpadních vod za různých podmínek. Úroveň kontaminace se může v různých místech a časech lišit. Mokrý suroviny, jako je splaškový kal a živočišná hnojiva, navíc kladou otázku, jaký druh karbonizačního procesu by byl nejlepší, protože by vyžadovaly značnou energii k sušení dřívě, než projdou pomalou pyrolýzou. [42]

Označování výstupního pevného zbytku čistírenských kalů po mikrovlnné pyrolýze jako biochar není pro tento případ vhodné, a to např. kvůli faktu, že není získáván pouze

z organické hmoty. Pro biochar již navíc existují vlastní certifikace. Mezi nejzásadnější patří European Biochar Certificate (EBC) [50] a International Biochar Initiative (IBI) [51]. Tyto certifikace nezahrnují biochar získaný z čistírenského kalu. Vstupní čistírenský kal totiž obsahuje i značný podíl anorganických složek. Jako další varianty značení se nabízejí např. microchar, pyrolýzní uhlí apod. Nicméně pro potřeby této práce a následných rozborů a měření je použita terminologie biochar i přes uvedené omezení. [41]



Obr. 5.11 Výstupní složka biochar po mikrovlnné pyrolýze čistírenského kalu z ČOV 1 (vlevo) a z ČOV 2 (vpravo) s příměsí odpadu z celulózy [Radim Šimek]

5.6.3 Organický kapalný produkt - pyrolýzní olej

Dalším produktem pyrolýzy je organický kapalný produkt nazývaný jako pyrolýzní olej (bio-olej). Výtěžnost pyrolýzního oleje může být až 70 % váhy vstupní suroviny. Za normálních podmínek je pyrolýzní olej tmavá kapalina s hustotou přibližně 1 200 kg/m³. Viskozita této kapaliny se liší v závislosti na obsahu vody a typu vstupní biomasy. Obsah vody bývá v rozmezí 15 až 30 %. Voda snižuje viskozitu bio-oleje a tím usnadňuje jeho přepravu, čerpání i atomizaci. Kromě toho zvyšuje stabilitu a snižuje teplotu spalování, což má za následek snížení emisí NO_x během spalování. Při vyšším obsahu vody (> 25 %) může mít bio-olej sklon k fázové separaci, které se dá snadno zabránit promícháváním skladovaného oleje nebo snížením obsahu vody. U pyrolýzního oleje získaného z dřevní biomasy však k fázové separaci nedochází. [40]

Pyrolýzní olej je považován za obnovitelný zdroj energie s vysokým potenciálem aplikace jako alternativního paliva ve výrobě tepla, elektřiny, pohonných hmot i v chemickém průmyslu. Dále může být využíván jako chemická surovina obsahující cenné organické látky. Pyrolýzní olej lze spalovat v existujících kotlích a nebo v plynových elektrárnách. Pyrolýzní olej obsahuje zejména různé uhlovodíky, organické kyseliny, karbonylové

sloučeniny s vysokou molekulární hmotností, fenoly, aromatické složky, alifatické alkoholy, kyselinu octovou a vodu. [40] [41]

Pyrolýzní olej je stabilní kapalné biopalivo, které lze, na rozdíl od biomasy nebo jiných objemných energetických surovin, snadno skladovat i přepravovat. Jeho energetická hustota je 4× až 5× vyšší než u vstupní suroviny, což výrazně usnadňuje logistiku [40]. Literatura uvádí, že výhřevnost pyrolýzního oleje se pohybuje v rozmezí 16-25 MJ·kg⁻¹ [48] v závislosti na vstupní surovině. [40]



Obr. 5.12 Výstupní složka pyrolýzní olej po mikrovlnné pyrolýze čistírenského kalu z ČOV 1 (vlevo) a z ČOV 2 (vpravo) s příměsí odpadem z celulózy [Radim Šimek]

5.6.4 Pyrolýzní plyn

Dalším produktem pyrolýzy je pyrolýzní plyn, někdy též nazývan jako syngas. Šejvl uvádí výhřevnost pyrolýzního oleje 46,5 MJ·m⁻³ [49].

Pyrolýzní plyn opouští reaktor jako horká směs kondenzovatelných a nekondenzovaných složek. Složení směsi závisí na zdroji materiálu a provozních podmínkách pyrolýzy. Pyrolýzní plyn z pyrolýzy obsahuje typicky významná množství methanu, vodíku, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého, stejně jako vyšší uhlovodíky, které zvyšují jeho výhřevnost a činí z něj důležité palivo pro chemický a energetický průmysl. [53]

V horkém stavu může být pyrolýzní plyn považován za alternativní nebo obnovitelný zdroj energie a jako palivo pro vysokoteplotní plynové hořáky.

Jako další možnosti využití pyrolýzního plynu lze uvažovat:

- výroba tepla pro sušení nebo pro průmyslové účely;
- průmyslová výroba páry nebo tepelného oleje;
- výměna konvenčního paliva ve stávajících kotlích;
- výroba elektřiny. [53]

5.7 ZHODNOCENÍ VYUŽITÍ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ

Využití čistírenského kalu by mělo být vždy promítnuto do konkrétního případu v rámci oběhové ekonomiky. Zdá se, že vzhledem k posunu na evropské legislativě, najde uplatnění čistírenských kalů v energetice jako paliva více prostoru než doteď a podpora státu bude výraznější. V současné době se již objevují první dotační tituly na OPŽP.

Nastává tedy souboj tradičních cest odpadů s novými, kdy odpady již nejsou vnímány jako materiál určený ke stabilizaci, ale k materiálové transformaci. Klíčovým opatřením bude řada již připravených opatření v oblasti biopaliv, ale i obecné povědomí ve společnosti. Bez provedených dalších výzkumů však nelze teoreticky dostatečně prokázat palivové vlastnosti a splnění enviromentální legislativy, zejména ochrany ovzduší. [25]

6 PŘÍPRAVA VZORKŮ ČISTÍRENSKÝCH KALŮ, JEJICH MIKROVLNNÁ PYROLÝZA A NÁSLEDNÉ ROZBORY

V této části práce se v první řadě budu zabývat přípravou čistírenských kalů, provedením pyrolýzních zkoušek a jejich následným rozborům a vyhodnocením. Detailněji je poté proveden rozbor pro zjištění celkového organického uhlíku a porovnání energetické využitelnosti sušeného čistírenského kalu a biocharu po mikrovlnné pyrolýze.

Pro rozbory byl získán vysušený čistírenský kal ze dvou reálných ČOV. Pro potřeby práce jsou označené jako ČOV 1 a ČOV 2. Na první pohled je patrný rozdíl v samotné struktuře obou kalů. Kal z ČOV 1 je sypké struktury na rozdíl od kalu z ČOV 2, který má pevnou strukturu. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben rozdílnou technologií obou ČOV a jiným způsobem sušení kalu. Oba druhy kalů jsou zobrazeny na obrázku 6.1.

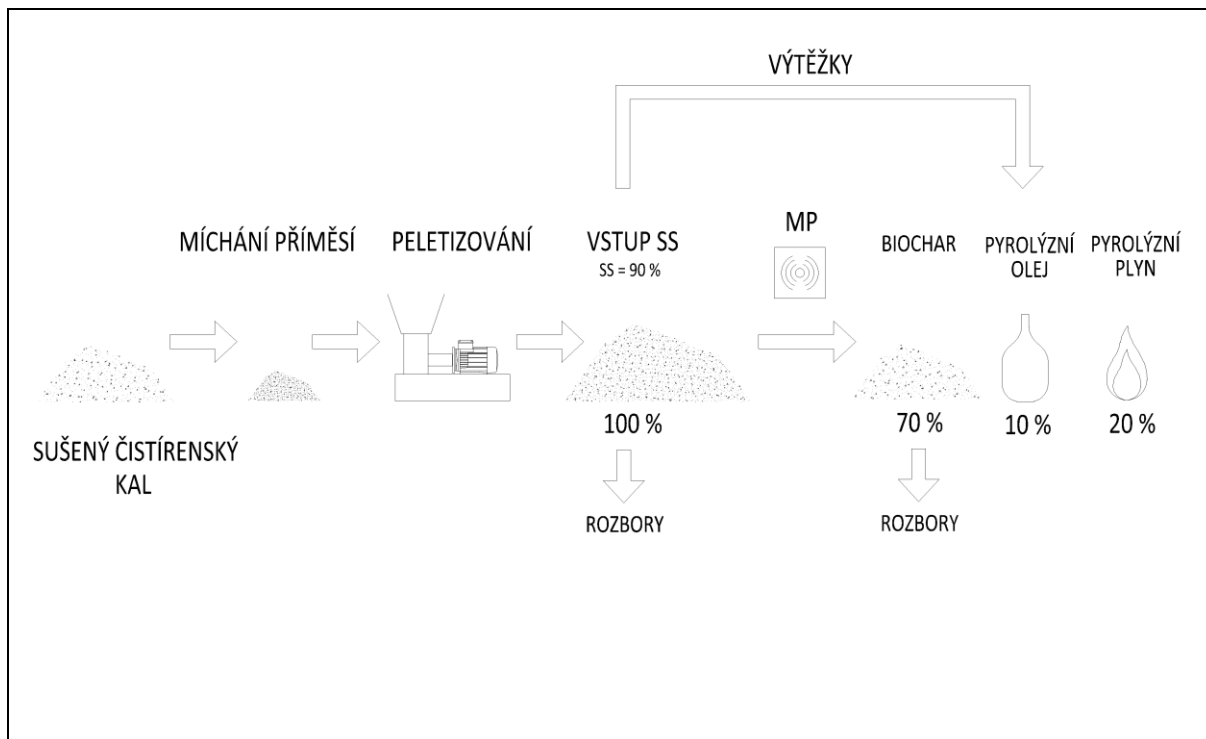


Obr. 6.1 Vysušený čistírenský kal z ČOV 1 (vlevo) a vysušený čistírenský kal z ČOV 2 (vpravo)
[Radim Šimek]

Před samotnou mikrovlnnou pyrolýzou a následně prováděných rozborech, bylo nutné vysušený čistírenský kal upravit. Schématicky je postup přípravy kalů s následnou pyrolýzou znázorněn na obrázku 6.2. Tato příprava kalu spočívala převážně v:

- vytvoření metodiky pro značení a uchovávání vzorků;
- míchání vzorků vysušeného kalu s přísadami v určených poměrech;
- peletizace připravené směsi;
- skladování připravených pelet určených pro pyrolýzní proces;
- skladování vstupních a výstupních vzorků pro následné rozbory.

Pro účely skladování a uchovávání vzorků pro další rozborů byl ve výzkumném středisku AdMaS zhotoven samostatný archiv, kde byly vzorky pod svým číselným kódem uchovány. V případě jakékoli nesrovnalosti, či potřebě podrobit vzorek dalším rozborům, je možné v tomto archivu dohledat všechny vstupní a výstupní vzorky podrobené mikrovlnné pyrolýze.



Obr. 6.2 Shématické znázornění potupu přípravy čistírenských kalů pro proces mikrovlnné pyrolýzy a její produkty [Radim Šimek]

6.1 METODIKA ZNAČENÍ VZORKŮ

Vzhledem k velkému množství vzorků a nutnosti jejich zasílání na rozborů, bylo v první řadě nutné sjednotit označování jednotlivých vstupních a výstupních vzorků. Pro jednoznačnost a přehlednost byla vytvořena metodika 6tímístného značení vzorků:

A B C D D D

První pozice šestímístného číselného kódu (A) definuje druh suroviny:

- A.1. definice "1" je pro vstupní materiál - sušený čistírenský kal;
- A.2. definice "2" je pro výstupní materiál - biochar;
- A.3. definice "3" je pro výstupní materiál - pyrolýzní olej;

Druhá pozice šestímístného číselného kódu (B) definuje zdroj vstupní suroviny:

- B.1. definice "1" je pro vstupní surovinu - ČOV 1;
- B.2. definice "2" je pro vstupní surovinu - ČOV 2;

Třetí pozice šestimístného číselného kódu (C) definuje úpravu a přísady se vstupní surovinou:

- C.1. definice "1" znamená - bez peletizace a bez příměsi (čistá vstupní surovina);
- C.2. definice "2" znamená - s peletizací ale bez příměsi (čistá vstupní surovina);
- C.3. definice "3" znamená - bez peletizace ale s přidavkem organiky (např. seno, plevy, piliny, plast);
- C.4. definice "4" znamená - s peletizací a s přidavkem organického materiálu;
- C.5. definice "5" znamená - bez peletizace ale s přidavkem katalyzátoru (např. Zeolit, vápenec...);
- C.6. definice "6" znamená - s peletizací a s přidavkem katalyzátoru;
- C.7. definice "7" znamená - bez peletizace ale společný přidavek organiky a katalyzátoru;
- C.8. definice "8" znamená - s peletizací a společný přidavek organiky a katalyzátoru.

Čtvrtá, pátá a šestá pozice (D) definuje prosté pořadové číslo vzorku při provádění pyrolýzního procesu.

Názorný příklad značení jednotlivých vzorků je ukázán na obrázku 6.3. Pro lepší přehlednost a případné dohledání doplňujících informací, je u výstupních vzorků doplněn i datum provedení mikrovlnné pyrolýzy, který koresponduje s datem uvedeným na protokolu o provedené zkoušce (viz. příloha 2- Protokol o provedené mikrovlnné pyrolýze).



Obr. 6.3 Ukázka označení a číslování jednotlivých vzorků [Radim Šimek]

6.2 MÍCHÁNÍ VZORKŮ S PŘÍMĚSMI

Za účelem zvýšení organického podílu (c_{org}) a specifického měrného povrchu (S_{BET}) byly sušené čistírenské kaly z ČOV 1 a ČOV 2 smíchány s různými příměsmi. Smícháním bylo možné dosáhnout i vzájemného porovnání jednotlivých příměsí pro možné budoucí využití. Jako hlavní příměsi byly použity tyto materiály:

- dřevěné piliny;
- odpad z celulózy;
- plasty;
- seno;
- plevy.

Byl zhotoven návrh poměru míchání jednotlivých příměsí s čistírenskými kaly. Zvolený poměr hmotnosti jednotlivých kalů a hmotnosti příměsí je znázorněn tabulkou v příloze 1- *Návrh poměru přísad do čistírenského kalu určeného k peletizaci*. Samotné míchání bylo provedeno ve výzkumném centru AdMaS v otevřené kruhové míchačce. Míchání čistírenských kalů s přidanými plevami a senem poté proběhlo ve Žďáru nad Sázavou, kde byl kal dále peletizován. Výsledný smíchaný sušený kal s přidanou příměsí, který je takto připraven k peletizaci, je zobrazen na obrázku 6.4.



Obr. 6.4 Vysušený čistírenský kal z ČOV 1 (vlevo) a vysušený čistírenský kal z ČOV 2 (vpravo) smíchaný s odpadem z celulózy [Radim Šimek]

Celkem bylo tedy připraveno k pokusům na mikrovlnné pyrolýze 10 sudů smíchaných vzorků čistírenského kalu. Pět vzorků čistírenského kalu z ČOV 1 a pět vzorků z ČOV 2.

6.3 PELETIZOVÁNÍ VZORKŮ

Jako další přípravou vzorků čistírenských kalů byla jejich peletizace. Tato úprava byla provedena z důvodů zlepšení manipulace s kalem, snížení prašnosti a zlepšení samotného procesu mikrovlnné pyrolýzy. Peletizování kalů proběhlo ve Žďáru nad Sázavou, kam byly smíchané vzorky v sudech dopraveny. Peletizace kalů byla provedena na peletizační jednotce zobrazené na obrázku 6.5.



Obr. 6.5 Peletizační jednotka [Radim Šimek]

Výsledným produktem byl poté peletizovaný vysušený čistírenský kal s přidanou příměsí (obr. 6.6). Velikost jednotlivých pelet se pohybovala v rozmezí průměru od 6-7 mm a délce 20-40 mm. Vlhkost peletizovaných kalů se pohybovala v rozmezí od 75-89 %. Takto připravený kal byl uložen v archivu výzkumného střediska AdMaS a připraven pro zpracování na mikrovlnné pyrolýze. O provedené peletizaci byl dodán protokol s uvedenými hodnotami měřené vlhkosti a měrné hmotnosti jednotlivých vzorků. První strana protokolu je pro ukázkou přiložena v příloze č. 2.



Obr. 6.6 Vysušený čistírenský kal po peletizaci z ČOV 1 (vlevo) a vysušený čistírenský kal po peletizaci z ČOV 2 (vpravo) smíchaný s odpadem z celulózy [Radim Šimek]

6.4 MIKROVLNNÁ PYROLÝZA

Jak již bylo v dřívější kapitole zmíněno, princip mikrovlnného ohřevu spočívá v účincích rychle se měnícího mikrovlnného záření, díky němuž dochází k rozkmitání molekul materiálu, a tím nárůstu teploty v reaktoru.

Mikrovlnná pyrolýza čistírenského kalu probíhala ve výzkumném centru AdMaS za spolupráce s firmou Bionic. Pokusy jednotlivých vzorků byly provedeny za použití technologie nízkoteplotní mikrovlnné pyrolýzy v reaktoru s procesem depolymerizace organické části čistírenského kalu. Celý proces mikrovlnné pyrolýzy probíhal v podtlakovém režimu. Nejvyšší naměřená teplota při procesu byla do 350 °C. Můžeme tedy proces považovat za nízkoteplotní pyrolýzu, která je v zahraniční literatuře označována někdy také jako slabá pyrolýza – torefakce.

V rámci pokusu mikrovlnné pyrolýzy byla vždy měřena:

- hmotnost vstupního a výstupního vzorku;
- hladina vstupního a výstupního vzorku;
- množství kapalně složky po samotném procesu;
- průměr pelety před a po procesu mikrovlnné pyrolýzy;
- teplota v reaktoru;
- vstupní vlhkost vzorku.

6.4.1 Postup zkoušky

Jednotlivé vstupní vzorky byly před samotnou zkouškou nejdříve naváženy a byla provedena jejich fotodokumentace. Hmotnost naváženého vstupního vzorku byla vždy stejná, a to 1 300 g. Byla vždy změřena velikost pelet a jejich průměr. Vstupní materiál byl umístěn do kruhové nerezové mísy, která byla následně vložena do reaktoru. Samotný proces mikrovlnné pyrolýzy probíhal 60 min. Poté se reaktor se vzorkem nechal vychladnout a byl vyjmut z reaktoru. Byl odebrán zbytkový pyrolýzní olej do měrného válce a změřen jeho výsledný objem. V tuhém pyrolýzním zbytku (biocharu) byla změřena velikost pelet a výsledná hmotnost vzorku. Pro každý výstupní vzorek biocharu a pyrolýzního oleje byla provedena fotodokumentace.

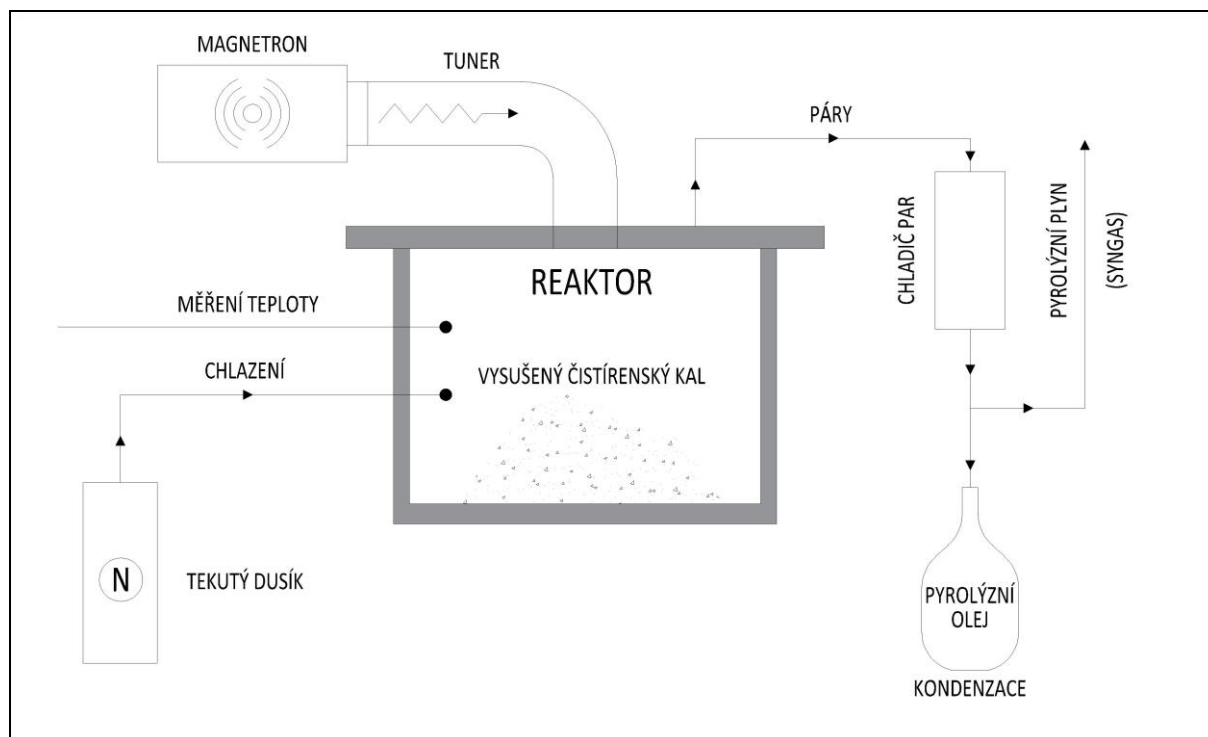
Samotné pokusy byly prováděny v malé poloprovozní jednotce zobrazené na obr. 6.7. Schéma této poloprovozní jednotky je poté zobrazeno na obr. 6.8. Tato malá poloprovozní jednotka je schopna pojmout až 10 kg sušeného čistírenského kalu na jeden pokus.



Obr. 6.7 Malá poloprovozní jednotka mikrovlnné pyrolýzy [Radim Šimek]

Pro každý vstupní vzorek čistírenského kalu byly provedeny vždy minimálně 3 pokusy mikrovlnné pyrolýzy. Pro našich 10 vstupních vzorků to tedy znamenalo provedení minimálně 30 pokusů.

Dále byl ke každému provedenému pokusu zhotoven protokol se záznamem naměřených hodnot, průběhem teploty při pokusu. Ukázka protokolu jednoho pokusu pro vzorek označený jako 114 201 - ČOV 1 – pelety, kal 90 %, dřevěné piliny 10 % je ukázána v příloze 3.



Obr. 6.8 Schéma malé poloproduční jednotky mikrovlnné pyrolýzy [Radim Šimek]

6.4.2 Výstupní složky

Po každém provedeném pokusu byl odebrán výstupní vzorek biocharu a výstupní vzorek pyrolýzního oleje. Tyto vzorky byly označeny příslušným číselným kódem a uloženy do archivu pro další možné využití.

Biochar

Z protokolů o provedených pyrolýzních zkouškách bylo zjištěno, že výtěžnost tuhého zbytku biocharu činila okolo 70 % z celkových 100 % vstupního vzorku.

Mimo stanovení spáleného tepla bylo na vybraných vzorcích biocharu provedeno měření pH. Měření bylo provedeno z důvodů ověření, zda má mikrovlnný proces vliv na hodnotu pH u výstupních vzorků. Měřením bylo prokázáno, že nízkoteplotní mikrovlnná pyrolýza nemá vliv na hodnotu pH, jelikož u vstupního i výstupního vzorku vyšla hodnota pH téměř stejná.

Na obrázku 6.9 je poté vidět provedená fotodokumentace pro vstupní navážený vzorek před mikrovlnnou pyrolýzou a pro výstupní vzorek biocharu po jeho vychladnutí a vyndání z reaktoru.



Obr. 6.9 Fotodokumentace vstupního vzorku čistírenského kalu a výstupního biocharu při pyrolýzní zkoušce [Radim Šimek]

Měření pH vzorků bylo pouze jako doplňující měření ke stanovení těžkých kovů. Z tohoto důvodu byly na rozbor zvoleny pouze dva vzorky. Samotné měření bylo provedeno Fakultou chemickou VUT v Brně.

Obdržené výsledné hodnoty z Fakulty chemické VUT v Brně byly zpracovány a jsou uvedeny níže v tabulkách 6.1 a 6.2. Měření dále prokázalo, že hodnota pH se pohybuje okolo 7. Čistírenské kaly lze tedy považovat za neutrální látky.

Tab. 6.1. Naměřené hodnoty pH vybraných vzorků biocharu z ČOV 1 [Radim Šimek]

ČOV 1 + dřevěné piliny		
Vzorek	OZN.	pH
Vstup	114201	7,03
Výstup	214208	7,17
	214210	7,16
	214212	6,76
	Průměr	7,03

Tab. 6.2. Naměřené hodnoty pH vybraných vzorků biocharu z ČOV 2 [Radim Šimek]

ČOV 2 + dřevěné piliny		
Vzorek	OZN.	pH
Vstup	124205	7,15
Výstup	224200	7,26
	224215	6,88
	224218	7,21
	Průměr	7,12

Pyrolýzní olej

V návaznosti na uvedenou hodnotu hustoty pyrolýzního oleje v kapitole 5.6.3, jsem provedl měření měrné hmotnosti vybraných pyrolýzních olejů pro srovnání výsledků. V našem případě se jednalo o pyrolýzní olej získaný mikrovlnnou pyrolýzou čistírenských kalů. Hustota pyrolýzního oleje byla měřena u devíti různých vzorků. Pro jeden vzorek byly provedeny vždy tři měření. Výsledkem je poté průměrná hodnota z těchto třech měření. Jednotlivé hodnoty a výsledky jsou sepsány v tabulce č. 6.3. Hustota našich pyrolýzních olejů, po mikrovlnné pyrolýze čistírenských kalů, se pohybovala v rozmezí od $888,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ do maximálně $984,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Z výsledků vyplývá, že naměřené hodnoty vyšly menší oproti udávané hodnotě $1200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Tab. 6.3. Naměřené hodnoty měrné hmotnosti u vybraných vzorků pyrolýzního oleje [Radim Šimek]

OZN.	V		hm. oleje	hm. nádoby	výsledná hm.	Ø	ρ
	ml	m3	g	g	g	kg	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
314174	154	0,000154	479	332	147	0,147	956,7
			480	332	148		
			479	332	147		
314176	126	0,000126	433	313	120	0,120	955,0
			433	313	120		
			434	313	121		
314178	204	0,000204	488	287	201	0,200	982,0
			487	287	200		
			487	287	200		
322186	92	0,000092	393	308	85	0,085	923,9
			393	308	85		
			393	308	85		
322188	68	0,000068	347	280	67	0,066	975,5
			346	280	66		
			346	280	66		
322190	72	0,000072	386	322	64	0,064	888,9
			386	322	64		
			386	322	64		
314180	124	0,000124	415	294	121	0,121	978,5
			415	294	121		
			416	294	122		
314183	174	0,000174	459	295	164	0,164	942,5
			459	295	164		
			459	295	164		
314192	168	0,000168	523	358	165	0,165	984,1
			524	358	166		
			523	358	165		

6.5 PROVEDENÉ ROZBORY A MĚŘENÍ

6.5.1 Obsah organického uhlíku (TOC)

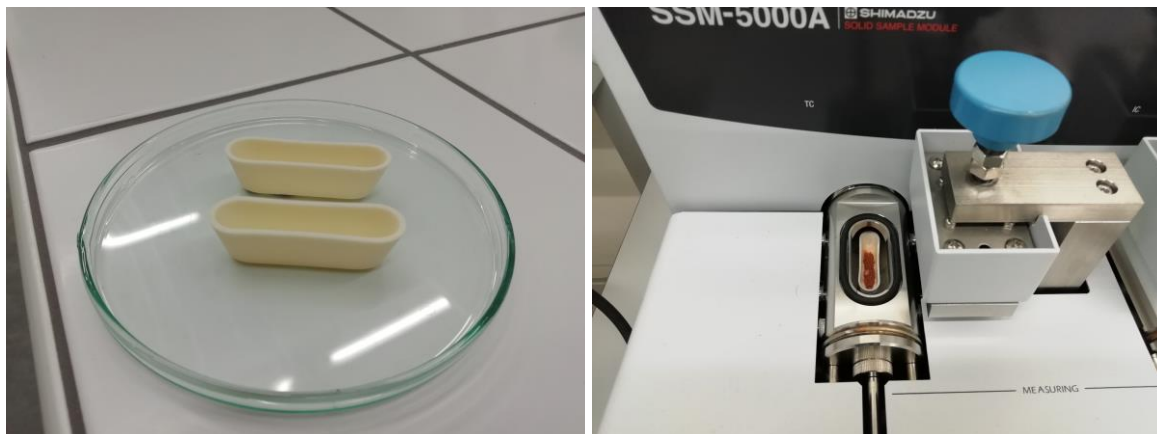
Organický podíl byl sledován pomocí ukazatelů celkového organického uhlíku (TOC). Tyto organické složky jsou pro mikrovlnnou pyrolýzu důležité, protože z nich v průběhu procesu vzniká pyrolýzní olej a pyrolýzní plyn. Zkoušky jsem provedl pomocí analyzátoru Shimadzu TOC-LCSH/CPH, který je součástí vybavení výzkumného centra AdMaS (obr 6.10). Zkoušky byly provedeny na části pro stanovení organického uhlíku z pevných látek, za použití softwaru TOC-L Sample Table Editor.



Obr. 6.10 Přístroj Shimadzu TOC pro stanovení celkového organického uhlíku [Radim Šimek]

6.5.1.1 Popis zkoušky

Z jednotlivých vzorků bylo vždy předepsaným způsobem odebráno potřebné množství pro určení celkového organického uhlíku. Odebraný vzorek byl rozmělněn pomocí třecí misky na jemný prach. Z prachu bylo vždy pro jednotlivé stanovení odebráno množství v rozmezí 50-150 mg. Přesně zvážené množství vzorku bylo umístěno do nádoby, která byla poté vložena do přístroje (obr. 6.11). Pro zahájení procesu musela být teplota v peci 900 °C. Takto nachystaný vzorek byl pomocí posuvné páky umístěn do pece. Doba samotného pokusu a ponechání vzorku v peci se pohybovala řádově v rozmezí 5–10 min v závislosti na hmotnosti vloženého vzorku a druhu příměsi. Po ukončení procesu byl vzorek z přístroje odebrán a ponechán na vychladnutí. Po dobu procesu software zaznamenával hodnoty a na základě zadané hmotnosti vzorku dopočítal procentuální množství celkového uhlíku obsaženého ve vzorku. Pro jeden vzorek se takto postup opakoval celkem třikrát. Z těchto hodnot se poté vypočítala průměrná výsledná hodnota, udávající procentuální celkový organický uhlík obsažený v daném vzorku.



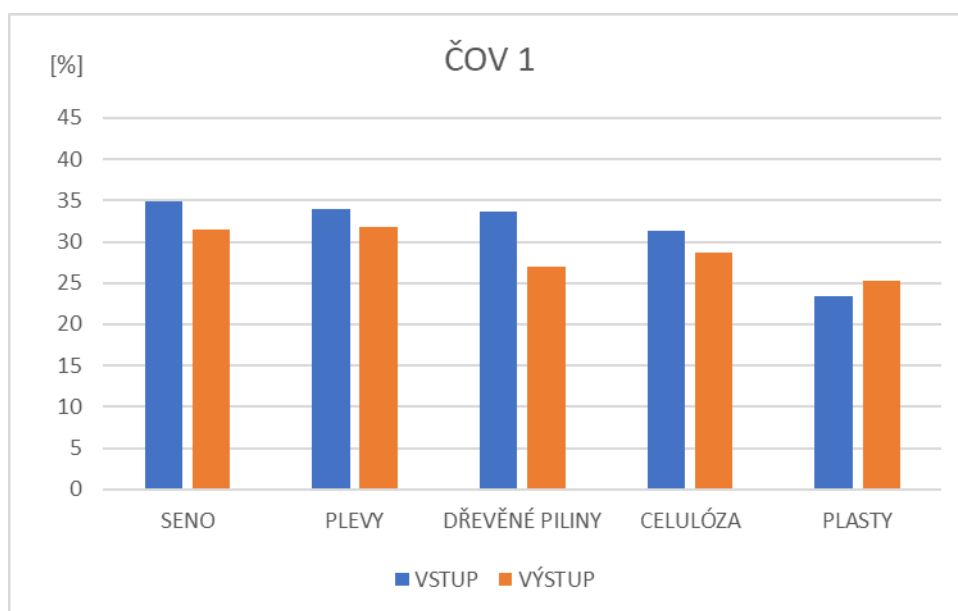
Obr. 6.11 Nádobka pro vložení měřeného vzorku (vlevo) a vložení vzorku do přístroje (vpravo)
[Radim Šimek]

6.5.1.2 Výsledky měření

Výsledné průměrné hodnoty celkového organického uhlíku jsou uvedeny v procentech a zobrazeny v tabulce 6.4. Jako vstup je v tabulkách a grafech myšlen vstupní vzorek čistírenského kalu před mikrovlnnou pyrolýzou. Za výstup je poté označován vzorek biocharu. Pro názornější zobrazení výsledků byly jednotlivé hodnoty vyneseny do sloupcových grafů (obr. 6.12 a 6.13). V příloze č. 5 je poté vložen protokol z jednoho celkového provedení měření a výsledné hodnoty pro jeden konkrétní vzorek s grafickým znázorněním nárůstu měřené hodnoty.

Tab. 6.4. Stanovené hodnoty celkového organického uhlíku vzorků z ČOV 1 [Radim Šimek]

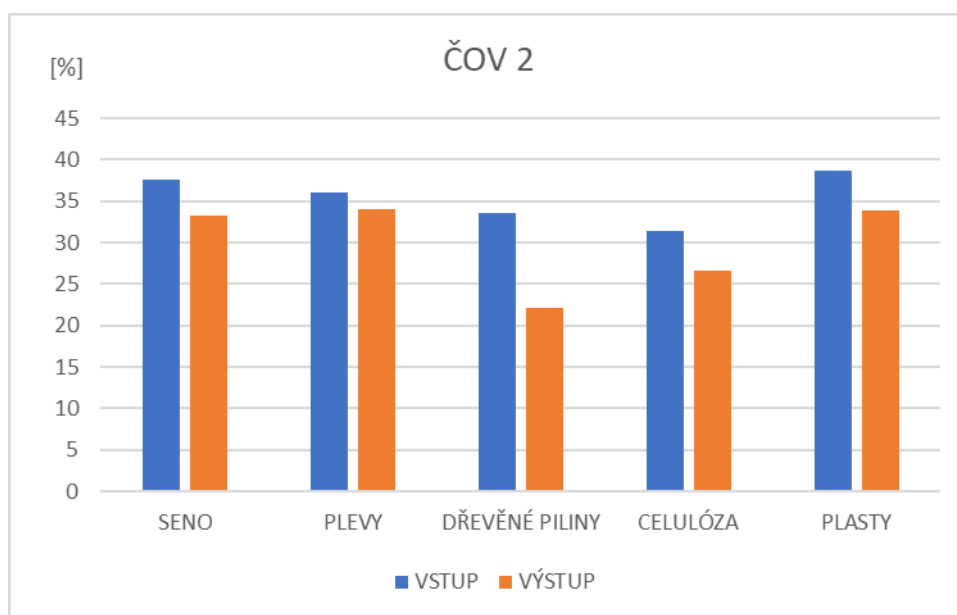
ČOV 1	PŘÍSADA	OZN	TOC [%]
	SENO	VSTUP	34,87
		VÝSTUP	31,46
	PLEVY	VSTUP	33,92
		VÝSTUP	31,73
	DŘEVĚNÉ PILINY	VSTUP	33,62
		VÝSTUP	26,93
	CELULÓZA	VSTUP	31,29
		VÝSTUP	28,63
	PLASTY	VSTUP	23,46
		VÝSTUP	25,27



Obr. 6.12 Graf výsledných hodnot celkového organického uhlíku pro vzorky kalů z ČOV 1 [Radim Šimek]

Tab. 6.5. Stanovené hodnoty celkového organického uhlíku vzorků z ČOV 2 [Radim Šimek]

ČOV 2	PŘÍSDA	OZN	TOC [%]
	SENO	VSTUP	37,65
		VÝSTUP	33,29
	PLEVY	VSTUP	35,99
		VÝSTUP	33,97
	DŘEVĚNÉ PILINY	VSTUP	33,59
		VÝSTUP	22,19
	CELULÓZA	VSTUP	31,46
		VÝSTUP	26,64
	PLASTY	VSTUP	38,71
		VÝSTUP	33,95



Obr. 6.13 Graf výsledných hodnot celkového organického uhlíku pro vzorky kalů z ČOV 2 [Radim Šimek]

Z měření vyplývá, že u vzorků po mikrovlnné pyrolýze byl naměřen menší obsah celkového organického uhlíku než u vstupních vzorků. Odchylku tvoří pouze kal z ČOV 1 smíchaný s plasty, kde se naopak obsah u výstupního biocharu zvětšil.

Obecně lze říci, že vstupní a výstupní vzorky z ČOV 1 a ČOV 2 mají obdobné, až srovnatelné hodnoty. V tomto ohledu tvoří odchylku opět vzorek kalu z ČOV 1 smíchaný s plasty a hodnota výstupního biocharu z ČOV 2 smíchaného s dřevěnými pilinami.

Tyto naměřené odchylky jsou pravděpodobně způsobeny možnou heterogeností vzorků. Pro provedenou zkoušku bylo odebíráno velmi malé množství z každého vzorku. Je proto možné, že zrovna vybraná část nebyla dobře homogenizována v předchozích úpravách nebo odchylka vznikla už při samotném procesu mikrovlnné pyrolýzy. Pro potvrzení nebo vyvrácení naměřených hodnot by proto bylo dobré zkoušku pro dané vzorky zopakovat.

6.5.2 Stanovení specifického měrného povrchu (BET)

Specifický měrný povrch je plocha povrchu pevné látky, vztažená na jednotku hmotnosti S_{BET} (obvykle $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$). Velikost plochy povrchu pevných látek se nejčastěji zjišťuje z adsorpčních dat (z plynné i kapalné fáze), nebo z hodnot smáčecích tepel. [43]

Specifický povrch je důležitá veličina, která vypovídá o použitelnosti adsorbentů. Ke zjištění vnitřního povrchu je třeba proměřit průběh adsorpční izotermy vhodného adsorptivu. Adsorpční izoterma poskytuje informace o rovnovážném stavu příslušného adsorpčního systému a získá se měřením rovnovážného tlaku plynu a adsorbovaného množství při konstantní teplotě. Adsorpční izoterma určuje nejen vnitřní povrch adsorbentu, ale i objem a distribuci pórů, hodnotu adsorpčního tepla aj. [44].

Pro stanovení měrného povrchu byly vzorky předány na výzkumné centrum AdMaS panu doc. Ing. Karlovi Dvořákovi, Ph.D. Z důvodu časové vytíženosti a náročnosti provádění měření, byly na rozborů specifického povrchu dány pouze 4 vzorky. Rozbor byl dále prováděn pouze za účelem zjištění doplňujících informací chování čistírenských kalů po procesu mikrovlnné pyrolýzy. Obdržené výsledky byly zpracovány a jsou uvedeny v tabulce 6.6.

Tab. 6.6. Stanovené hodnoty měrného povrchu vzorků z ČOV 2 [Radim Šimek]

ČOV 2	PŘÍSADA	OZN	SPECIFICKÝ MĚRNÝ POVRCH [$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$]
	SENO	VSTUP	1,08
		VÝSTUP	8,13
	PLEVY	VSTUP	1,30
		VÝSTUP	3,82

Z výsledných hodnot vyplývá, že u peletizovaného čistírenského kalu po procesu mikrovlnné pyrolýzy se měrný povrch u vzorků zvětšil. Čistírenské kaly po mikrovlnné pyrolýze se stávají lepšími adsorbenty a mohou být dále využívány například jako plnivo pro filtrační kolony pro čištění vody.

6.5.3 Stanovení těžkých kovů

Pro stanovení obsahu těžkých kovů byly vzorky předány na Fakultu chemickou VUT v Brně. Z důvodů časové náročnosti provádění nejsou zhotoveny rozborů všech vzorků, a není proto možné uvést jejich celkové vyhodnocení. Diplomová práce se však spíše zaměřuje na energetické využití čistírenských kalů, proto jsou zde rozborů na stanovení těžkých kovů zmíněny pouze pro komplexnost všech prováděných rozborů. Předběžné výsledky obsahu těžkých kovů v kalech jsou pro zhotovené vzorky zobrazeny ve zjednodušené tabulce 6.7. níže. Jako vstup je v tabulce označován vstupní vzorek čistírenského kalu před mikrovlnnou pyrolýzou. Za výstup je poté označován vzorek biocharu. Výsledky uvedené v tabulce jsou vždy průměrnou hodnotou z třech provedených měření a jedná se o výsledky celkového množství těžkých kovů v kalu, stanovených metodou kyselinového výluhu.

Pro každý vzorek byly stanoveny vždy tři hodnoty z kyselinového a vodného výluhu. Z průběžně získaných výsledků jsem pro jednotlivé vzorky zpracoval protokol, kde byly průměrné hodnoty sepsány do přehledných tabulek a vyneseny do grafů. Pro ukázkou je v příloze č. 4 přiložen jeden výsledný protokol z provedeného rozboru jednoho vzorku.

Těžké kovy (TK) byly pro porovnání výsledků stanoveny jak pro vstupní vzorky čistírenského kalu, tak i v biocharu ve formě rozpustné (extrahovatelné, vyluhovatelné) a nerozpustné (nevyluhovatelné). Pro stanovení obsahu TK byly použity metody atomové absorpce. Analyzátor rtuti AMA 254 (pouze pro stanovení Hg) a metoda atomové absorpce s elektrotermickou atomizací (ET-AAS ZEE nit Jena 60) pro stanovení ostatních TK. Tyto

metody byly optimalizovány za použití certifikovaných referenčních kalibračních standardních roztoků ASTASOL® s koncentrací měřeného kovu $1000 \pm 0,002 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ v 5 % HNO_3 (firma Analytika s.r.o., ČR). [45]

Metodiky založené na kyselinových a vodných výluzích byly vytvořeny jako alternativa k pokročilejším metodám. Podrobněji jsou metodiky popsány níže.

Extrakce v lučavce královské (kyselinový výluh)

10 g mletého vzorku bylo přeneseno do baňky obsahující 60 ml lučavky královské ($\text{HCl}:\text{HNO}_3$ v poměru 3: 1). Takto připravený vzorek se vaří pod zpětným chladičem po dobu 2 hodin. Po ochlazení se vzorek filtruje. Pro analýzu byl extrakt zředěn destilovanou vodou v poměru 1: 8. [43]

Extrakce ve vodě (vodný výluh)

10 gramů mletého vzorku bylo přeneseno do Erlenmeyerovy baňky obsahující 100 ml destilované vody. Po uzavření byla baňka protřepávána na třepačce po dobu 24 hodin. Po 24 hodinách extrakce byl roztok zfiltrován, zředěn destilovanou vodou v poměru 1: 4 a následně analyzován. [43]

Tab. 6.7. Množství těžkých kovů ve vzorcích čistírenského kalu [Radim Šimek]

KAL	PŘÍMĚS	TĚŽKÉ KOVY	VSTUP	VÝSTUP
			[mg]	[mg]
ČOV 1	SENO	Cu	140,81	83,42
		Pb	28,75	20,89
		Cd	0,74	1,09
		As	1,39	7,18
		Ni	9,81	12,24
		Cr	85,60	61,99
		Hg	41,81	1,25
		Zn	581,46	429,94
	PLEVY	Cu	97,60	115,95
		Pb	30,51	26,13
		Cd	0,37	1,38
		As	1,66	10,80
		Ni	11,04	14,93
		Cr	79,38	69,09
		Hg	35,89	4,22
		Zn	481,73	535,04
	DŘEVĚNÉ PILINY	Cu	668,50	534,62
		Pb	50,85	41,64
		Cd	3,51	2,72
		As	4,95	3,93
		Ni	37,67	35,75
		Cr	668,50	534,62
		Hg	99,50	7,43
		Zn	673,15	454,29

ČOV 2	SENO	Cu	149,59	119,94
		Pb	36,24	35,34
		Cd	0,36	0,78
		As	17,62	8,43
		Ni	19,79	18,74
		Cr	126,24	49,97
		Hg	31,33	1,22
		Zn	1319,26	2827,84
	PLEVY	Cu	134,15	115,39
		Pb	41,08	22,34
		Cd	0,28	0,16
		As	12,84	7,27
		Ni	19,84	16,56
		Cr	63,07	41,32
		Hg	35,12	1,12
		Zn	615,35	960,27
	DŘEVĚNÉ PILINY	Cu	124,87	66,47
		Pb	34,98	25,04
		Cd	0,26	1,08
		As	11,79	8,08
		Ni	18,57	13,09
		Cr	89,69	36,50
		Hg	23,42	1,89
		Zn	1730,63	1719,24

6.5.4 Palivové zkoušky

Pro zjištění energetického využití čistírenských kalů po procesu mikrovlnné pyrolýzy, bylo nutné zhotovení palivových zkoušek. Stanovení spáleného tepla bylo provedeno ve výzkumném centru AdMaS panem Ing. Vítězslavem Novákem. Výsledné hodnoty jednotlivých vzorků jsou uvedeny níže v tabulce 6.8. – 6.10.

6.5.4.1 Popis zkoušky

Celá zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 1716:2010. Stanovení hodnoty bylo provedeno pomocí poloautomatického přístroje IKA C 200 (obr. 6.14) při standardních laboratorních podmínkách.



Obr. 6.14 Přístroj IKA C 200 pro stanovení hodnot spáleného tepla čistírenských kalů [Radim Šimek]

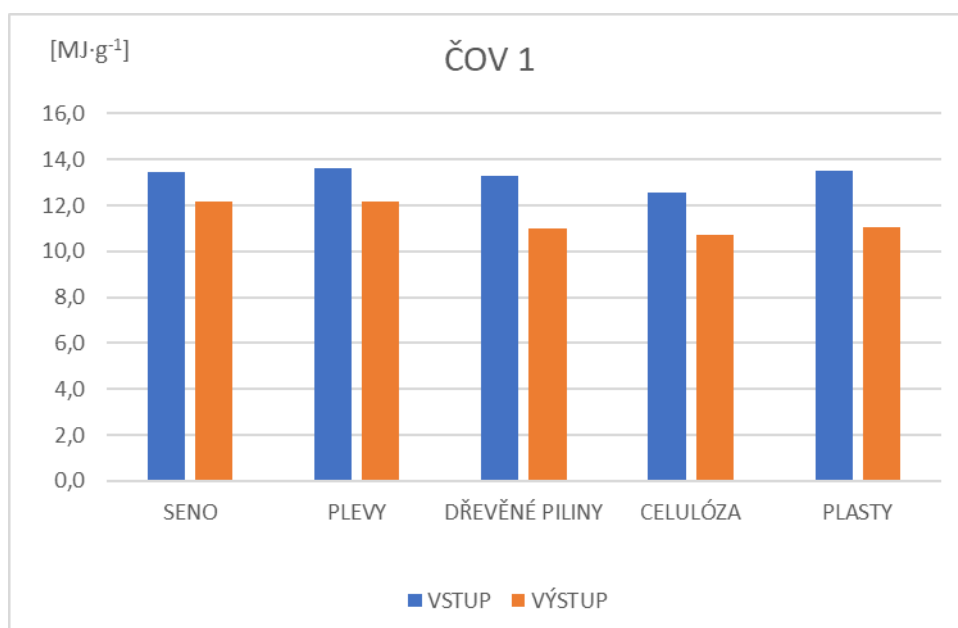
Z jednotlivých vzorků bylo vždy předepsaným způsobem odebráno množství potřebné pro stanovení 5 hodnot spalného tepla. Odebraný vzorek byl rozmělněn pomocí třecí misky na jemný prach. Z prachu bylo vždy pro jednotlivé stanovení spalného tepla odebráno množství v rozmezí 0,4 - 0,8 g. Přesně zvážené množství vzorku bylo umístěno do kelímku, který byl upevněn do držáku vzorku v kalorimetrické bombě. Pomocí bavlněné nitě byl vzorek propojen se zapalovacím okruhem držáku. Celá soustava držáku se vzorkem byla umístěna do kalorimetrické bomby, která byla uzavřena a doplněna čistým kyslíkem na vnitřní tlak 34 bar. Bomba byla umístěna do kalorimetrické tepelně izolované nádoby. Nádoba byla naplněna přesně stanoveným množstvím demineralizované vody. Za stálého intenzivního míchání vody v kalorimetrické nádobě byla po dobu 3 minut sledována teplota vody do ustálení konstantní hodnoty. Následně byl pomocí zapalovacího okruhu zapálen vzorek v bombě a ze změny teploty v kalorimetrické nádobě v důsledku spálení vzorku byla stanovené hodnoty spalného tepla. Výsledek je průměrná hodnota, ze tří stanovení spalného tepla pro každý vzorek.

6.5.4.2 Výsledky měření

Obdržené výsledky měření byly zpracovány a rozděleny podle vstupního kalu z obou ČOV. V první tabulce 6.7. jsou zobrazeny výsledné průměrné hodnoty kalu z ČOV 1. V druhé tabulce 6.8. jsou poté průměrné výsledné hodnoty pro kaly z ČOV 2. Jednotlivé kaly byly dále rozděleny podle druhu příměsi. Jako vstup je v tabulkách a grafech označován vstupní vzorek čistírenského kalu před mikrovlnnou pyrolýzou. Za výstup je poté označován vzorek biocharu. Pro názornější zobrazení výsledků byly jednotlivé hodnoty vyneseny do sloupcových grafů (obr. 6.15 a 6.16). Z těchto grafů je na první pohled patrné, že kaly po procesu mikrovlnné pyrolýzy ztrácejí část své energie a hodnoty spalného tepla se vždy snížily.

Tab. 6.8. Stanovené hodnoty spáleného tepla vzorků z ČOV 1 [Radim Šimek]

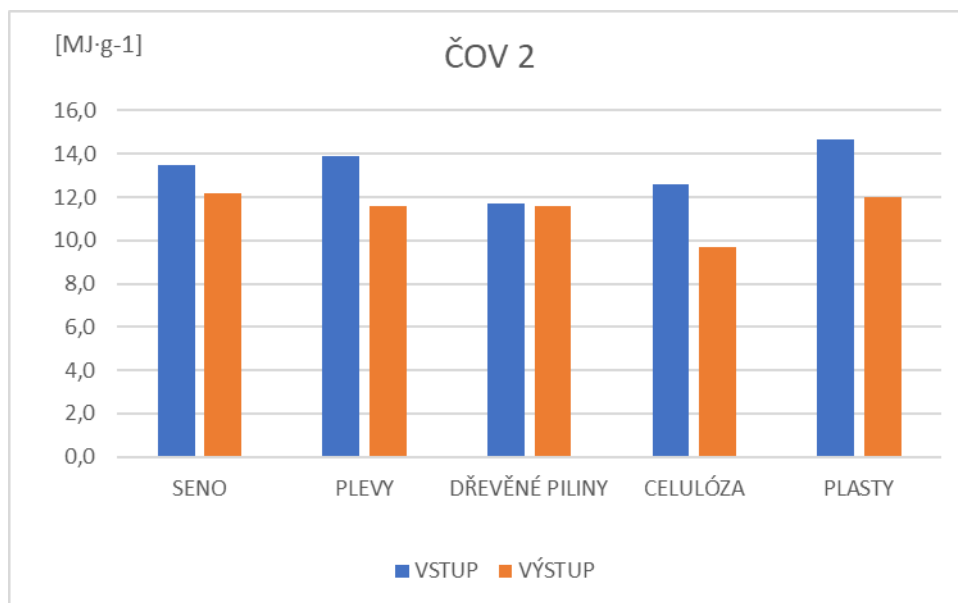
ČOV 1	PŘÍSADA	OZN	ø spálené teplo [MJ·kg ⁻¹]
	SENO	VSTUP	13,46
		VÝSTUP	12,19
	PLEVY	VSTUP	13,60
		VÝSTUP	12,18
	DŘEVĚNÉ PILINY	VSTUP	13,29
		VÝSTUP	10,99
	CELULÓZA	VSTUP	12,56
		VÝSTUP	10,71
	PLASTY	VSTUP	13,48
		VÝSTUP	11,02



Obr. 6.15 Graf výsledných hodnot spáleného tepla pro vzorky kalů z ČOV 1 [Radim Šimek]

Tab. 6.9. Stanovené hodnoty spáleného tepla vzorků z ČOV 2 [Radim Šimek]

ČOV 2	PŘÍSADA	OZN	ø spálené teplo [MJ·kg ⁻¹]
	SENO	VSTUP	13,48
		VÝSTUP	12,16
	PLEVY	VSTUP	13,89
		VÝSTUP	11,58
	DŘEVĚNÉ PILINY	VSTUP	11,67
		VÝSTUP	11,57
	CELULÓZA	VSTUP	12,61
		VÝSTUP	9,67
	PLASTY	VSTUP	14,67
		VÝSTUP	12,00

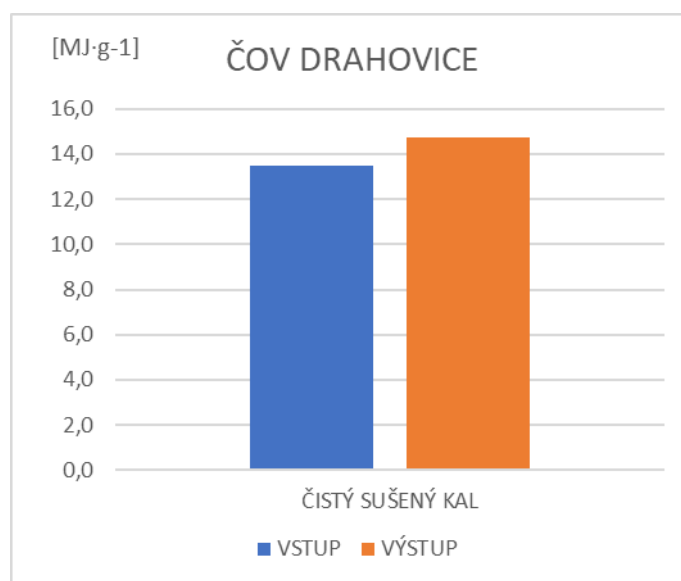


Obr. 6.16 Graf výsledných hodnot spáleného tepla pro vzorky kalů z ČOV 2 [Radim Šimek]

Na rozbor spáleného tepla byl také předán vzorek peletizovaného kalu z ČOV 2 bez přidané příměsi a jeho výstupní vzorek biocharu. Na rozdíl od předchozích vzorků, kde byla ke kalu přidána organická příměs, byla zde naměřena vyšší hodnota spáleného tepla u biocharu oproti vstupnímu vzorku.

Tab. 6.10. Stanovené hodnoty spáleného tepla vzorku z ČOV 2 bez příměsi [Radim Šimek]

ČOV 2	PŘÍSADA	OZN	σ spálené teplo [MJ·kg⁻¹]
	-	VSTUP	13,48
		VÝSTUP	14,72



Obr. 6.17 Graf výsledných hodnot spáleného tepla pro vzorek kalu z ČOV 2 bez přidané příměsi [Radim Šimek]

Výhřevnost u vstupních vzorků se pohybovala v rozmezí 12-14 MJ·kg⁻¹ u výstupních vzorků poté v rozmezí 10-12 MJ·kg⁻¹. Energetické hodnoty jsou srovnatelné s výhřevností například hnědého uhlí, u kterého je výhřevnost udávána v rozmezí 10-17 MJ·kg⁻¹ [46] nebo se blíží hodnotě palivového dřeva, kde je hodnota kolem 14 MJ·kg⁻¹ [46].

6.6 PŘÍPADOVÉ STUDIE

V druhé řadě se práce zabývá návrhem koncepční technologie pro sušení čistírenského kalu s mikrovlnou pyrolýzou na ČOV, kde budou produkty energeticky využity na ČOV a v blízkém okolí a pro koncepční návrh sušení kalu u kotelny s přímým spalováním. V rámci případové studie je provedeno porovnání ekonomického potenciálu těchto dvou odlišných návrhů.

Návrhová koncepce vychází z předpokladu velikosti ČOV, a to v závislosti na počtu ekvivalentních obyvatel (EO) nebo v množství odvodněného kalu za rok (t odv. kalu·rok⁻¹). Na základě těchto parametrů jsou navrženy tři možné koncepce zpracování čistírenského kalu viz. tabulka 6.11.

Z těchto uvedených parametrů je využití mikrovlnné pyrolýzy na ČOV výhodné použít pro malé a střední ČOV do 50 000 EO. Pro střední a velké ČOV je poté výhodnější využití přímého spalování kalu, zařazeného za procesem sušení.

Tab. 6.11. Návrhové koncepce možností zpracování kalu [47]

Velikost ČOV		Navrhovaná koncepce
EO	t odv. kalu·rok ⁻¹	
15 000 - 30 000	800 - 1 700	solární sušení kalu + příprava kalu + pyrolýza
30 000 - 50 000	1 600 - 3 000	pásové sušení kalu+ pyrolýza
> 50 000	> 2 800	pásové sušení kalu + spalování kalu

V rámci diplomové práce byly navrženy dva koncepty zpracování čistírenského kalu. Prvním návrhem je koncepce sušení čistírenského kalu v solární sušárně, jeho následná úprava a zpracování pomocí mikrovlnné pyrolýzy. Druhým návrhem je sušení čistírenského kalu v pásové sušárně s následným přímým spalováním ve fluidní peci.

6.6.1 Solární sušení čistírenského kalu s mikrovlnnou pyrolýzou na ČOV

Tento koncept využívá kombinace energeticky efektivního sušení pomocí solárního zdroje energie, podpořeného eventuálními lokálními dostupnými zdroji tepla s následným zpracováním vysušeného kalu pomocí mikrovlnného pyrolýzního procesu [47]. V rámci koncepčního návrhu nemusí být striktně navržen mikrovlnný ohřev, ale může být aplikován i

jiný druh pyrolýzy. Příklad konceptu zpracování čistírenského kalu je schematicky uveden na obr. 6.18.

Pro využití solární sušárny vyvstává několik dalších požadavků. Mezi hlavní patří požadavek na nezastíněnou rozsáhlou plochu, nutnost vybudování skleníku a je-li požadováno, tak čištění odpadního vzduchu. Dále je nutné zhotovení úpravy výstupního kalu po procesu sušení. Kal ze solární sušárny má granulometrickou charakteristiku vysušeného kalu a vykazuje vyšší podíl jemných frakcí - prachu a je nutná jeho úprava (například peletizací). Z důvodů kolísající kapacity v ročních obdobích je nutností umístění akumulace na ČOV, umožňující skladování vysušeného kalu.

Při použití mikrovlnné pyrolýzy je požadavek na potřebu elektrické energie pro magnetrony. Z tohoto důvodu je tento koncept vhodný právě pro menší aplikace. Při použití na velkých ČOV je požadován velký příkon a koncept by se stával neekonomický. Dalším požadavkem je nutnost úpravy výparů a nakládání s kondenzátem. Při využívání výstupního biocharu v zemědělství je potřeba optimalizovat proces za účelem nastavení jeho konkrétních parametrů.

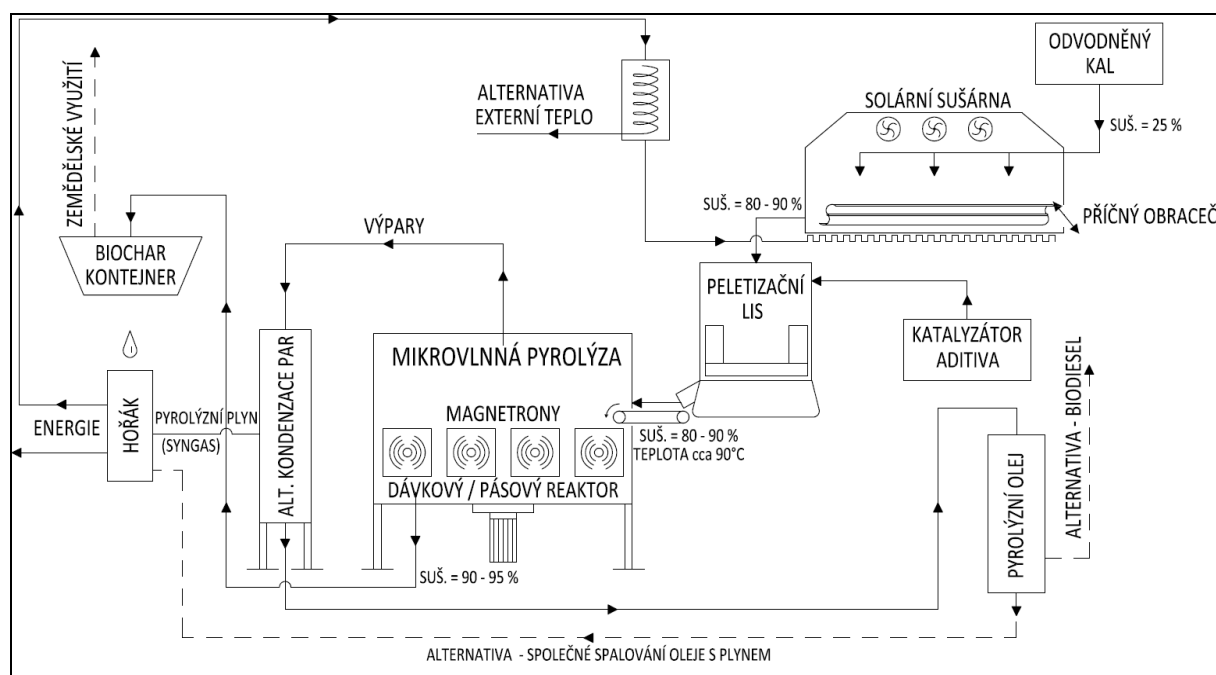
Příklad základních návrhových a energetických parametrů [47]:

Solární sušárna

- Kapacita (odv. kal): cca 900 t·rok⁻¹ bez příhřevu, 1200 t·rok⁻¹ s příhřevem
- Vysušený kal: 150–170 t·rok⁻¹ bez, až cca 225 t·rok⁻¹ s příhřevem
- Půdorysný zábor: nezastíněno cca 11 x 75 m
- Sušina: vstup 23 %, výstup 85 %

Mikrovlnná pyrolýza

- Kapacita (sušený kal): cca 150–170 t·rok⁻¹
- Příkon magnetronu: do 75 kW (po najetí cca 23 kW)
- Výstup biocharu: cca 85–129 t·rok⁻¹ (v závislosti na procesu a aditivech)



Obr. 6.18 Schéma návrhu solární sušárny a mikrovlnné pyrolýzy [47]

Navrhovaná koncepce kombinuje solární sušení s mikrovlnnou pyrolýzou. Odvodněný kal je dávkován do solární sušárny, kde dojde k jeho vysušení. Dále je kal směřován s aditivou (agromasa, zeolit aj.) za účelem dosažení parametrů výstupního biocharu, které odpovídají limitům pro jeho certifikaci. Tato směs je následně před vstupem do mikrovlnného reaktoru peletizována. Následuje proces mikrovlnné pyrolýzy, který probíhá v pyrolýzním reaktoru. Vyrobený biochar je odváděn dopravníkem do kontejneru. Pyrolýzní páry, které při procesu vznikají, jsou odvedeny do chladiče, kde zkondenzují a je možné z nich separovat pyrolýzní olej. Aby mohl být mikrovlnnou pyrolýzou produkován biochar použitelný v zemědělství, je nevyhnutelné směřovat jej s aditivou a přísadami. [47]

Produkty po mikrovlnné pyrolýze je popřípadě možné dále energeticky využívat. Měřením v předchozí části bylo prokázáno, že výhřevnost biocharu je téměř srovnatelná s výhřevností hnědého uhlí. Z pohledu využití biocharu v zemědělství je ovšem škoda tuto surovinu spalovat. Biochar v sobě totiž obsahuje fosfor a dusík potřebný pro růst rostlin.

6.6.2 Sušení čistírenského kalu u kotelny s přímým spalováním

Tento koncept využívá kombinaci sušení pomocí pásové sušárny s následným fluidním spalováním vysušeného kalu. Příklad tohoto konceptu zpracování čistírenského kalu je schematicky uveden na obr. 6.19.

Pro samotnou pásovou sušárnu je potřeba uvažovat s větším instalačním půdorysným prostorem a nutností přivádět horkou vodu (60-145 °C) jako zdroj tepelné energie pro sušení. Obvykle je nutné také čistit odpařený vzduch. Při procesu sušení nám vzniká spotřeba tepelné

energie i spotřeba elektrické energie. Výhodou pásové sušárny je ovšem dosažení hygienizace kalu při dostatečné procesní teplotě.

U fluidní pece je naopak poměrně malý půdorysný zábor na úkor výšky stavby. Pro zajištění energetické soběstačnosti je kladen požadavek na parametry vstupního kalu. Výhodou spalování je možnost recyklace fosforu z popelu a využití pro střední a velké ČOV. Naopak nevýhodou je všeobecná negativní reakce veřejnosti na samotné spalovny.

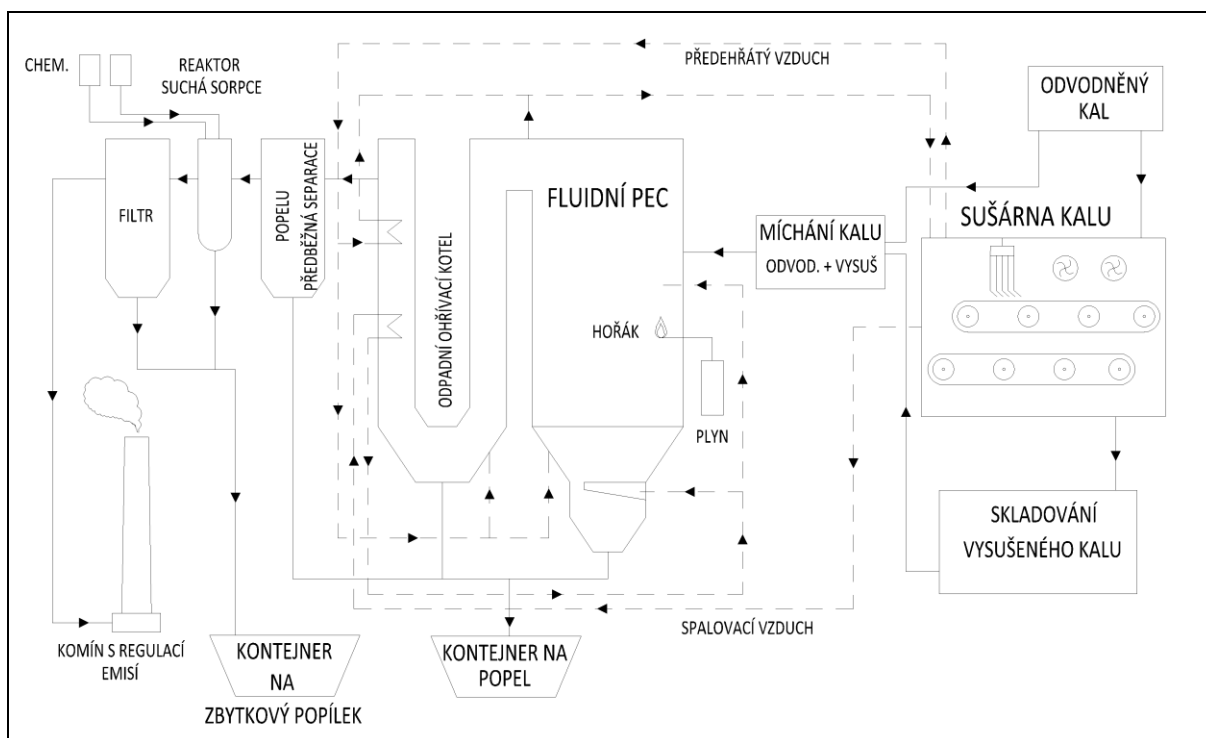
Příklad základních návrhových a energetických parametrů [47]:

Pásová sušárna

- Vstupní sušina: 24 %
- Kapacita: 9 600 t·rok⁻¹
- Sušící teplota: 85–90 °C / 75 °C zpět
- Odpar: cca 825 kg·h⁻¹
- Spotřeba tepelné en.: cca 670 kWh·h⁻¹
- Spotřeba elektrické en.: cca 65 kW

Fluidní spalování

- Vstup: směs odvodněného kalu 5400 t·rok⁻¹ s vysušeným 2560 t·rok⁻¹
- Výstup: cca 1800 t·rok⁻¹ popela + tep. Energie
- Spalovací teplota: cca 900 °C



Obr. 6.19 Schéma návrhu sušení kalu u kotelny s přímým spalováním [47]

Navrhovaná koncepce kombinuje pásové sušení s následným fluidním spalováním. Odvodněný kal přichází do akumulární nádrže před sušárnou, odkud je dopravován na pás samotné sušárny přes extrudér, kterým je kal ve formě nudlí rozprostřen po šířce pásu. Sušárna využívá tepelnou energii ze samotného procesu spalování. Po kondenzaci je použitý vzduch vč. zbytků par zaveden do fluidní pece jako spalovací vzduch. Vysušený kal je dočasně uskladněn a pro potřeby fluidní pece následně smíchán s odvodněným nevysušeným kalem a případně i pískem za účelem optimalizace fluidního spalovacího procesu. Směs je následně dávkována pod tlakem do fluidní pece, která má perforované dno pro odstraňování nežádoucích materiálů a kontrolu nad fluidní vrstvou. Pec je propojená s kotlem dvěma okruhy a soustavou výměníků. Díky tomu je tepelná energie spalin využita pro předehřev spalovacího vzduchu a ohřev vody pro dodávku tepla do sušárny. [47]

Popel má na rozdíl od popílku z filtrů vlastní transportní systém a je vhodnou surovinou pro výrobu certifikovaných hnojiv. Jednou z hlavních výhod je tady recyklace fosforu, který je obecně považován za nedostatkovou surovinu [47]. Popel ze spalování čistírenských kalů obsahuje obvykle 15–25 hm. % oxidu fosforečného, což je srovnatelné s fosfátovou rudou. V popelu ze spalování čistírenských kalů jsou zastoupeny i těžké kovy. Jejich obsahy v popelu se nejčastěji pohybují v těchto mezích:

- Zn - 2000–2700 mg/kg,
- Pb - 100–400 mg/kg,
- Cu - 400–1600 mg/kg,
- Cd - 3–11 mg/kg a
- Cr - 90–333 mg/kg.

Rozptyl hodnot obsahu fosforu a minoritních prvků v popelu je dán rozsahem industriálních aktivit v místě, sezónními výkyvy a charakterem čištěných vod. Při použití správné metody je možné získat až 99 % celkového fosforu obsaženého v čistírenském kalu. [48]

6.6.3 Ekonomické zhodnocení

Pro ekonomické zhodnocení byly stanoveny počáteční investice do obou návrhových konceptů. Pro porovnání je zde uvedena i počáteční investice pro koncept zpravování kalu pro středně velké ČOV s využitím pásové sušárny a mikrovlnné pyrolýzy. Ceny jednotlivých technologií pro zpracování kalu nejsou veřejně dostupné, proto byly stanoveny subjektivním odhadem. Navrhované investice vycházejí z množství zpracovaného kalu za rok. Se zvyšováním množstvím zpracování kalu roste tím pádem i cena za použité technologie a celková cena navrhovaného konceptu. Konkrétní ceny jednotlivých technologií a celkově navrhovaných konceptů jsou uvedeny v tabulce č. 6.12. níže.

Tab. 6.12. Návrhové ceny jednotlivých konceptů a použitých technologií [Radim Šimek]

Koncept	Množství zpracovaného kalu	Velikost ČOV	Použitá technologie	Cena [Kč]	Cena celkem [Kč]
Solární sušení s mikrovlnnou pyrolýzou	800 - 1 700	malé	solární sušárna	20 mil	47 mil
			paletizační jednotka	3 mil	
			mikrovlnná pyrolýza	25 mil	
Pásové sušení s mikrovlnnou pyrolýzou	1600 - 3 000	střední	pásová sušárna	30 mil	70 mil
			mikrovlnná pyrolýza	40 mil	
Pásové sušení s fluidní pecí	> 2 800	velké	pásová sušárna	60 mil	250 mil
			fluidní pec	190 mil	

6.6.4 Shrnutí

Výše zmíněné koncepty se jeví jako vhodné řešení pro menší a velké ČOV. Pro menší ČOV spočívá koncept v solárním sušení spolu s paletizační úpravou kalu a zpracováním pomocí mikrovlnné pyrolýzy. Výsledné produkty této koncepce mohou být využity v zemědělství jako hnojiva nebo jako podpůrné půdní látky. V druhém případě mohou být energeticky využity přímo na ČOV. Koncept zpracování kalu pro velké ČOV využívá pásového sušení kalu a jeho následného přímého spalování ve fluidní peci. Zde jsou produkty energeticky využity a z popelu je těžen fosfor. Jako mezistupeň pro střední ČOV se nabízí využití pásové sušárny, u které odpadá nutnost další úpravy kalu a následné zpracování mikrovlnnou pyrolýzou. U tohoto konceptu by produkty mohly být, mimo energetické využití, použity v zemědělství.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na energetické využití čistírenských kalů po procesu mikrovlnné pyrolýzy. Teoretická část se zabývá problematikou kalového hospodářství a s tím spojenou legislativou. Jsou zde popsány nutné úpravy čistírenského kalu před jeho finálním zpracováním. Z konečných možností zpracování byla detailněji popsána mikrovlnná pyrolýza a její výstupní produkty biochar, pyrolýzní olej a pyrolýzní plyn. U těchto produktů jsou uvedeny jejich energetické hodnoty pro možnost srovnání s výsledky provedených zkoušek.

V praktické části je poté postupně popsána příprava čistírenských kalů spočívající v jejich mísení s příměsmi, peletizací až po finální zpracování mikrovlnnou pyrolýzou. Výsledné produkty biocharu byly poté spolu se vstupními vzorky podrobeny různým rozborům. Mezi nejzásadnější patřil rozbor na určení celkové hodnoty organického uhlíku. Toto měření prokázalo, že u produktů po mikrovlnné pyrolýze dochází ke snížení této veličiny. Dalším důležitým rozbohem bylo stanovení energetické hodnoty vzorků prostřednictvím palivových zkoušek a měřením hodnot spáleného tepla. Opět bylo prokázáno, že procesem mikrovlnné pyrolýzy dochází ke snížení energetických hodnot. Kladným zjištěním je ale fakt, že čistírenské kaly po mikrovlnné pyrolýze mají stále dobrou výhřevnost, téměř srovnatelnou například s hnědým uhlím.

Musíme však brát v úvahu, že ačkoliv byla snaha o co nejdokonalejší homogenizaci vzorků při jejich úpravě, projevují čistírenské kaly značné heterogenní vlastnosti. Tento fakt nám do zhotovených rozborů vnáší v jisté míře odchylky. Snahou bylo tyto odchylky zmenšit provedením opakovaného měření pro daný vzorek.

Na závěr diplomové práce jsou navrženy dva odlišné koncepty možného zpracování kalů. Prvním je použití solárního sušení kalu, jeho následná peletizace a zpracování mikrovlnnou pyrolýzou. Tento koncept je navrhován pro menší až střední ČOV s 15 000-50 000 EO, kde jsou výstupní produkty, vzhledem ke svým uváděným energetickým hodnotám, využívány přímo na samotné ČOV nebo formou biocharu využitého v zemědělství jako hnojiva nebo podpůrné půdní látky. Druhým konceptem je použití pásové sušárny s přímým spalováním kalu ve fluidní peci. Tato koncepce je určena na střední až větší ČOV pro více jak 50 000 EO a její výhodou je možnost získávání fosforu z popela po spálení čistírenského kalu.

Přínosem této práce jsou provedené rozborů, které udávají energetické vlastnosti čistírenských kalů zpracovaných mikrovlnnou pyrolýzou. V důsledku zpříšňování legislativy by v budoucnu, smícháním kalů s danými příměsmi či aditivou a správnou optimalizací procesu pyrolýzy, mohl být biochar využíván jako hnojivo nebo jako podpůrná půdní látka. V dnešní době toto prozatím není možné z důvodu nedostatku informací. Pro získání více informací a uznání biocharu po mikrovlnné pyrolýze čistírenských kalů jako hnojiva, je proto nutné provedení dalších výzkumů, a tato práce by mohla sloužit jako jejich podklad.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DOHÁNYOS, Michal: *Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů*. Biom.cz [online]. 2006-05-09 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>. ISSN: 1801-2655.
- [2] KOS, Miroslav. *Použití pyrolýzy k produkci hnojiva z čistírenských kalů* [online]. Praha, 2016 [cit. 2018-12-31]. ISBN Kaly a odpady 2016. Dostupné z: http://www.cpga.cz/files/prednasky/1603_Kos_Pyrolyza_hnojiva_fulltext.pdf
- [3] LYČKOVÁ, Barbora, Peter FEČKO a Radmila KUČEROVÁ. *Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů* [online]. Ostrava, 2008 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://hgfl0.vsb.cz/546/ZpracovaniKalu/index.html>. Projekt FRVŠ č.639/2008. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [4] Český statistický úřad: *Vodovody, kanalizace a vodní toky* [online]. Praha [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-avodni-toky-2016>
- [5] KOŽÍŠKOVÁ, Yveta. Recyklace fosforu a její perspektivy. *Sovak*. 1/2018, 36-38. [cit. 2018-12-31]
- [6] HAVLÍČKOVÁ, Sabina. *Hygienizace kalů – prezentace*, 2015. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11815016-Hygienizace-kalu-metody-hygienizace-kalu-hygienizace-kalu-muze-probihat.html>
- [7] KUTIL, Josef, DOHÁNYOS, Michal: *Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů*. Biom.cz [online]. 2005-01-05 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu-2>>. ISSN: 1801-2655.
- [8] HLAVÍNEK, P. Mikrovlnná pyrolýza čistírenského kalu. *Vodovod.info – vodárenský informační portal* [online]. 16.11.2015, 11/2015, [cit. 2018-12-31]. Dostupný z WWW:<http://vodovod.info>. ISSN 1804-7157
- [9] HLAVÍNEK, Petr, Jan MIČÍN, Petr PRAX, Petr HLUŠTÍK a Radim MIFEK. *Stokování a čištění odpadních vod: Čištění odpadních vod Modul 2*. Brno, 2006. Studijní opora. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. [cit. 2018-12-31].
- [10] ČESALOVÁ, Marcela: *Nebezpečné chemické látky a přípravky: skripta: Kalové hospodářství, odstraňování nutrientů* [online]. Olomouc: Katedra fyzikální chemie Universita Palackého v Olomouci [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://chemikalie.upol.cz/skripta/tv/index.htm>

- [11] E.I.C., spol. s r.o. Realizační program Plánu odpadového hospodářství Libereckého kraje. *Kalové hospodářství Libereckého kraje* [online]. Liberec, 2005, 236 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: https://www.kraj-lbc.cz/public/ozivpr/realizacni_program_kh_lk_6af0ffdfc9.pdf
- [12] HUBER Technology: HUBER řešení pro sušení kalů [online]. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://www.huberco.cz/cz/reseni/uprava-kalu/suseni.html>
- [13] Hartig K., *Problematika kalového hospodářství – sušení kalů*, Sweco Hydroprojekt a.s., Tábořská 31, Praha, časopis Vodní hospodářství 04/2017 [cit. 2018-12-31].
- [14] W. Vater Schlammtrocknung, Müll-Handbuch, Band 3, Erich Schmidt Verlag [cit. 2018-12-31].
- [15] RAČEK, Jakub, Boris DOSKOČIL, Jan ŠEVČÍK a Petr HLAVÍNEK. Sušení čistírenského kalu pro podmínky České republiky. *Vodovod.info* [online]. 2018 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://www.vodovod.info/index.php/kanalizace-a-cov/388-suseni-cistirenskeho-kalu-pro-podminky-ceske-republiky#.XConeFxKhPZ>
- [16] BUSS – SMS – Canzler, GmbH, Butzbach [cit. 2018-12-31].
- [17] FEECO INTERNATIONAL: Rotary Dryers [online]. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://feeco.com/rotary-dryers/>
- [18] HAARSLEV Procesing Technology: Belt Dryer - [online]. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://www.haarslev.com/products/belt-dryer/>
- [19] TEMA PROCESS: Fluid bed dryers & coolers [online]. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://temaprocess.com/fluid-bed-dryers/>
- [20] HARTIG, Karel. *Sušení kalů*, Sweco Hydroprojekt a.s., Tábořská 31, Praha, prezentace. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://www.agrocs.cz/get.php?id=408>
- [21] VEKAMAF Industry expert since 1959: Peletovací lisy [online]. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://www.vekamaf.cz/peletovaci-lisy/#principy-peletizace>
- [22] JANSÁ, Oldřich. *Skladba peletizační linky* [online]. In: . Plzeň: Fakulta Západočeské univerzity v Plzni Katedra energetických strojů a zařízení, Prezentace [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/13_Zemedelska-technologie_33-34/33_IUT/065_Skladba-peletizacni-linky---Jansa---P1.pdf
- [23] HARTIG, Karel, Milan MORAVEC a Soňa JONÁŠOVÁ. Cirkulární ekonomika ve vodním hospodářství. *Vodní hospodářství* [online]. 2018 [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <http://vodnihospodarstvi.cz/cirkularni-ekonomika/>
- [24] KOS, Miroslav, *Regionální zpracování čistírenských kalů*, str. 14-17, SOVAK, 8/2017 [cit. 2018-12-31].

- [25] RAČEK, Jakub, Jan ŠEVČÍK, Jiří KUČEŘÍK a Petr HLAVÍNEK. *Biochar – Recovery Material from Pyrolysis of Sewage Sludge: A Review*. Brno, 2018, 30. [cit. 2018-12-31].
- [26] WANNER, Filip, *Nakládání s čistírenskými kaly*, Odpadové fórum, 11/2017. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://www.tretiruka.cz/news/nakladani-s-cistirenskymi-kaly1/>
- [27] SOVAK ČR. Průmyslová ekologie. *SOVAK ČR k nakládání s čistírenskými kaly* [online]. 2018 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://www.prumyslovaekologie.cz/Dokument/104873/sovak-cr-k-nakladani-s-cistirenskymi-kaly.aspx>
- [28] MATĚJŮ, Ladislava, Zdislava BOŠTÍKOVÁ, Magdalena ZIMOVÁ a Státní zdravotní ústav, *Rizika a výhody při využití čistírenských kalů na zemědělské půdě*, Odpadové fórum, č.3/2018. [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://www.tretiruka.cz/news/rizika-a-vyhody-pri-vyuziti-cistirenskych-kalu-na-zemedelske-pude/>
- [29] GRZYWA, Martina Bagarová. Využití čistírenských kalů ve smyslu současné legislativy. *Odpady.cz*. [online]. 2013 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/vyuziti-cistirenskych-kalu-ve-smyslu-soucasne-legislativy/>
- [30] STANĚK, Karel: Kompostování - řízená biologická aerobní technologie. *Biom.cz* [online]. 2006-05-18 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/kompostovani-rizena-biologicka-aerobni-technologie>>. ISSN: 1801-2655.
- [31] BEDNAŘÍK, Vratislav. Co s čistírenským odpadem? *Odpady.cz*. [online]. 2001 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <https://odpady-online.cz/co-s-cistirenskym-odpadem/>
- [32] JAKUBES, Jaroslav, Helena BELLINGOVÁ a Michal ŠVÁB. Moderní využití biomasy: Technologické a logistické možnosti [online]. 1.vyd. Česká energetická agentura, 2006 [cit. 2018-12-31]. Dostupné z: <http://www.mpo-efekt.cz/dokument/02.pdf>
- [33] STUDIE ZAŘÍZENÍ NA PYROLYTICKÝ ROZKLAD ODPADŮ: část 1. Ostrava: Ministerstvo, životního prostředí ČR, 2010. [cit. 2018-12-31].
- [34] POHOŘELÝ, Michael, JEREMIÁŠ, Michal: Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění. (kolektiv autorů), Výsledky výzkumu, vývoje a inovací pro obnovitelné zdroje energie (OZE 2010). [cit. 2018-12-31]
- [35] ENVIWEB. Pyrolýza odpadů - moderní způsob jejich zneškodnění. *Enwiweb.cz* [online]. 2013 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/94618>

- [36] VÁCLAV, Peer a Friedel PAVEL. Zplyňování - principy a reaktory. *Tzb-info* [online]. 2016 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory>
- [37] HARTIG, Karel. Problematika kalového hospodářství: termická destrukce kalů. *Vodní hospodářství*. Bohumilice, Čkyně, 2017, s. 5. [cit. 2018-12-31].
- [38] RAČEK, J.; ŠEVČÍK, J.; CHORAZY, T.; KUČERÍK, J.; HLAVÍNEK, P., Biochar – recovery material from microwave pyrolysis of sewage sludge , , ČSCHI, Praha, 2018
- [39] HUANG, Yu-Fong, Pei-Te CHIUEH, Wen-Hui KUAN a Shang-Lien LO. Microwave pyrolysis, of lignocellulosic biomass: Heating performance and reaction kinetics. *Energy* [online]. Elsevier Ltd, 2016, 100, 137-144 [cit. 2018-12-31]. ISSN 03605442. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0360544216300251>
- [40] MICHAELA, Kolská. Využití pyrolýzního oleje nejen v teplárenství. *Vytápění, větrání, instalace*. 3/2011, 122-123.
- [41] RAČEK, J.; ŠEVČÍK, J.; CHORAZY, T.; HLAVÍNEK, P.; KUČERÍK, J., Zpracování čistírenských kalů prostřednictvím mikrovlnné pyrolýzy, článek v *Vodní hospodářství*, ISSN 1211-0760, Vodní hospodářství, spol. s r.o., Čkyně, 2018
- [42] What is biochar?: Biochar for sustainable soils [online]. 2015 [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://biochar.international/the-biochar-opportunity/biochar-production-and-by-products/>
- [43] BARTOVSKÁ, Lída a ŠIŠKOVSKÁ Marie, Fyzikální chemie povrchů a koloidních látek, publikace součástí Transformačních rozvojových programů MŠMT ČR na rok 2005 - projekt č. 602 „Integrovaný systém elektronických studijních opor VŠCHT Praha“, Praha, 2005
- [44] JÍLKOVÁ, Lenka, Veronika VRBOVÁ a Karel CIAHOTNÝ. Stanovení vnitřního povrchu adsorbentů vhodných k úpravě bioplynu. *Energie z biomasy*. 9/2014, 61-68.
- [45] RAČEK, J.; ŠEVČÍK, J.; KOMENDOVÁ, R.; KUČERÍK, J.; HLAVÍNEK, P., Transformace těžkých kovů mikrovlnnou pyrolýzou čistírenských kalů, příspěvek na konferenci *Odpadové vody 2018*, ISBN 978-80-973196-0-1, Asociácia čistírenských expertov Slovenskej republiky, Bratislava, 2018
- [46] NOVÁK, Jan. Výhřevnosti paliv: Tabulky a výpočty. *tzp-info* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>

- [47] HLAVÍNEK, P.; CHORAZY, T.; RAČEK, J.; ŠEVČÍK, J., Koncepce řešení kalového hospodářství středních ČOV ve světle nové legislativy EU, příspěvek na konferenci *Odpadové vody 2018*, ISBN 978-80-973196-0-1, Asociácia čistírenských expertov SR, Bratislava, 2018
- [48] ŠYC, Michal, Matěj KRUML, Michal POHOŘELÝ, Karel SVOBODA a Miroslav PUNČOCHÁŘ. *Recyklace fosforu z popelu po spalování čistírenských kalů* [online]. [cit. 2019-01-06]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2016/prispevky/304.pdf>
- [49] ŠEJVL, Radovan: Energie z odpadů II. *Biom.cz* [online]. 2013-04-01 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/energie-z-odpadu-ii>>. ISSN: 1801-2655.
- [50] EBC (2012) 'European Biochar Certificate - Guidelines for a Sustainable Production of Biochar.' European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland. <http://www.europeanbiochar.org/en/download>. Version 6.4E of 2nd June 2018, DOI: 10.13140/RG.2.1.4658.7043
- [51] IBI (2015) International Biochar Initiative. Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. Product Definition and Specification Standards (2015)
- [52] HARTIG, Karel a Soňa JONÁŠOVÁ. Kaly a cirkulární ekonomika. *Vodní hospodářství* [online]. 2018 [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <http://vodnihospodarstvi.cz/kaly-a-%E2%80%AFcirkularni-ekonomika/>
- [53] *Bioregen - Syngas: energy-rich gas for power applications*. [online]. France [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <http://www.biogreen-energy.com/syngas/>

SEZNAM TABULEK

TAB. 5.1. ROZDÍLNÉ TŘÍDY PYROLÝZNÍ ÚPRAVY PODLE DOBY TRVÁNÍ PROCESU [25]	43
TAB. 6.1. NAMĚŘENÉ HODNOTY PH VYBRANÝCH VZORKŮ BIOCHARU Z ČOV 1 [RADIM ŠIMEK]	57
TAB. 6.2. NAMĚŘENÉ HODNOTY PH VYBRANÝCH VZORKŮ BIOCHARU Z ČOV 2 [RADIM ŠIMEK]	57
TAB. 6.3. NAMĚŘENÉ HODNOTY MĚRNÉ HMOTNOSTI U VYBRANÝCH VZORKŮ PYROLÝZNÍHO OLEJE [RADIM ŠIMEK]	58
TAB. 6.4. STANOVENÉ HODNOTY CELKOVÉHO ORGANICKÉHO UHLÍKU VZORKŮ Z ČOV 1 [RADIM ŠIMEK]	60
TAB. 6.5. STANOVENÉ HODNOTY CELKOVÉHO ORGANICKÉHO UHLÍKU VZORKŮ Z ČOV 2 [RADIM ŠIMEK]	61
TAB. 6.6. STANOVENÉ HODNOTY MĚRNÉHO POVRCHU VZORKŮ Z ČOV 2 [RADIM ŠIMEK]	63
TAB. 6.7. MNOŽSTVÍ TĚŽKÝCH KOVŮ VE VZORCÍCH ČISTÍRENSKÉHO KALU [RADIM ŠIMEK]	64
TAB. 6.8. STANOVENÉ HODNOTY SPÁLENÉHO TEPLA VZORKŮ Z ČOV 1 [RADIM ŠIMEK]	67
TAB. 6.9. STANOVENÉ HODNOTY SPÁLENÉHO TEPLA VZORKŮ Z ČOV 2 [RADIM ŠIMEK]	67
TAB. 6.10. STANOVENÉ HODNOTY SPÁLENÉHO TEPLA VZORKU Z ČOV 2 BEZ PŘÍMESI [RADIM ŠIMEK]	68
TAB. 6.11. NÁVRHOVÉ KONCEPCE MOŽNOSTÍ ZPRACOVÁNÍ KALU [47]	69
TAB. 6.12. NÁVRHOVÉ CENY JEDNOTLIVÝCH KONCEPTŮ A POUŽITÝCH TECHNOLOGIÍ [RADIM ŠIMEK]	74

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 2.1 CELKOVÁ PRODUKCE KALŮ V ČR V LETECH 2006-2016 [4].....	10
OBR. 4.1 PRINCIP DISKOVÉ SUŠÁRNY [14]	22
OBR. 4.2 PRINCIP TENKOVRSŤVÉ SUŠÁRNY [16].....	23
OBR. 4.3 PRINCIP BUBNOVÉ SUŠÁRNY [14].....	24
OBR. 4.4 PRINCIP PÁSOVÉ SUŠÁRNY [14]	25
OBR. 4.5 PRINCIP ŠNEKOVÉ SUŠÁRNY [14]	26
OBR. 4.6 PLOCHÁ MATICE S OTVORY A HLAVNÍ PELETIZAČNÍ JEDNOTKA [RADIM ŠIMEK]	27
OBR. 4.7 VZOREK PŘED PELETIZACÍ (VLEVO) A VZOREK PO PELETIZACI (VPRAVO) [RADIM ŠIMEK]	28
OBR. 5.1 PRODUKCE A NAKLÁDÁNÍ S ČISTÍRENSKÝMI KALY V ČR [4]	30
OBR. 5.2 PŘÍMÉ VYUŽITÍ A REKULTIVACE KALŮ V ROCE 2013-2017 [4]	33
OBR. 5.3 KOMPOSTOVÁNÍ KALŮ V ROCE 2013-2017 [4]	34
OBR. 5.4 SKLÁDKOVÁNÍ KALŮ V ROCE 2013-2017 [4]	35
OBR. 5.5 SPALOVÁNÍ KALŮ V ROCE 2013-2017 [4].....	36
OBR. 5.6 SCHÉMATA TOPENÍŠŤ (ROTAČNÍ, ROTAČNÍ ETÁŽOVÉ, FLUIDNÍ) [3]	36
OBR. 5.7 PRŮBĚH REAKCÍ V REAKTORU [36]	40
OBR. 5.8 AUTOTERMNÍ ZPLYŇOVÁNÍ [34]	41
OBR. 5.9 ALOTERMNÍ ZPLYŇOVÁNÍ [34].....	41
OBR. 5.10 VELKÁ PROVOZNÍ JEDNOTKA MIKROVLNNÉ PYROLÝZY UMÍSTĚNÁ VE VÝZKUMNÉM STŘEDISKU AdMAS [RADIM ŠIMEK].....	45
OBR. 5.11 VÝSTUPNÍ SLOŽKA BIOCHAR PO MIKROVLNNÉ PYROLÝZE ČISTÍRENSKÉHO KALU Z ČOV 1 (VLEVO) A Z ČOV 2 (VPRAVO) S PŘÍMĚSÍ ODPADU Z CELULÓZY [RADIM ŠIMEK]	46
OBR. 5.12 VÝSTUPNÍ SLOŽKA PYROLÝZNÍ OLEJ PO MIKROVLNNÉ PYROLÝZE ČISTÍRENSKÉHO KALU Z ČOV 1 (VLEVO) A Z ČOV 2 (VPRAVO) S PŘÍMĚSÍ ODPADEM Z CELULÓZY [RADIM ŠIMEK]	47
OBR. 6.1 VYSUŠENÝ ČISTÍRENSKÝ KAL Z ČOV 1 (VLEVO) A VYSUŠENÝ ČISTÍRENSKÝ KAL Z ČOV 2 (VPRAVO) [RADIM ŠIMEK]	49
OBR. 6.2 SHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ POTUPU PŘÍPRAVY ČISTÍRENSKÝCH KALŮ PRO PROCES MIKROVLNNÉ PYROLÝZY A JEJÍ PRODUKTY [RADIM ŠIMEK]	50
OBR. 6.3 UKÁZKA OZNAČENÍ A ČÍSLOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VZORKŮ [RADIM ŠIMEK]	51
OBR. 6.4 VYSUŠENÝ ČISTÍRENSKÝ KAL Z ČOV 1 (VLEVO) A VYSUŠENÝ ČISTÍRENSKÝ KAL Z ČOV 2 (VPRAVO) SMÍCHANÝ S ODPADEM Z CELULÓZY [RADIM ŠIMEK]	52
OBR. 6.5 PELETIZAČNÍ JEDNOTKA [RADIM ŠIMEK]	53

OBR. 6.6 VYSUŠENÝ ČISTÍRENSKÝ KAL PO PELETIZACI Z ČOV 1 (VLEVO) A VYSUŠENÝ ČISTÍRENSKÝ KAL PO PELETIZACI Z ČOV 2 (VPRAVO) SMÍCHANÝ S ODPADEM Z CELULÓZY [RADIM ŠIMEK]	54
OBR. 6.7 MALÁ POLOPROVOZNÍ JEDNOTKA MIKROVLNNÉ PYROLÝZY [RADIM ŠIMEK]	55
OBR. 6.8 SCHÉMA MALÉ POLOPROVOZNÍ JEDNOTKY MIKROVLNNÉ PYROLÝZY [RADIM ŠIMEK]	56
OBR. 6.9 FOTODOKUMENTACE VSTUPNÍHO VZORKU ČISTÍRENSKÉHO KALU A VÝSTUPNÍHO BIOCHARU PŘI PYROLÝZNÍ ZKOUŠCE [RADIM ŠIMEK]	57
OBR. 6.10 PŘÍSTROJ SCHIMADZU TOC PRO STANOVENÍ CELKOVÉHO ORGANICKÉHO UHLÍKU [RADIM ŠIMEK]	59
OBR. 6.11 NÁDOBKA PRO VLOŽENÍ MĚŘENÉHO VZORKU (VLEVO) A VLOŽENÍ VZORKU DO PŘÍSTROJE (VPRAVO) [RADIM ŠIMEK]	60
OBR. 6.12 GRAF VÝSLEDNÝCH HODNOT CELKOVÉHO ORGANICKÉHO UHLÍKU PRO VZORKY KALŮ Z ČOV 1 [RADIM ŠIMEK]	61
OBR. 6.13 GRAF VÝSLEDNÝCH HODNOT CELKOVÉHO ORGANICKÉHO UHLÍKU PRO VZORKY KALŮ Z ČOV 2 [RADIM ŠIMEK]	62
OBR. 6.14 PŘÍSTROJ IKA C 200 PRO STANOVENÍ HODNOT SPÁLENÉHO TEPLA ČISTÍRENSKÝCH KALŮ [RADIM ŠIMEK] ..	66
OBR. 6.15 GRAF VÝSLEDNÝCH HODNOT SPÁLENÉHO TEPLA PRO VZORKY KALŮ Z ČOV 1 [RADIM ŠIMEK]	67
OBR. 6.16 GRAF VÝSLEDNÝCH HODNOT SPÁLENÉHO TEPLA PRO VZORKY KALŮ Z ČOV 2 [RADIM ŠIMEK]	68
OBR. 6.17 GRAF VÝSLEDNÝCH HODNOT SPÁLENÉHO TEPLA PRO VZOREK KALU Z ČOV 2 BEZ PŘIDANÉ PŘÍMĚSI [RADIM ŠIMEK]	68
OBR. 6.18 SCHÉMA NÁVRHU SOLÁRNÍ SUŠÁRNY A MIKROVLNNÉ PYROLÝZY [47]	71
OBR. 6.19 SCHÉMA NÁVRHU SUŠENÍ KALU U KOTELNY S PŘÍMÝM SPALOVÁNÍM [47]	72

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ČOV...	čistírna odpadních vod
MŽP...	Ministerstvo životního prostředí
ČIŽP...	Česká inspekce životního prostředí
OPŽP...	Operační program životního prostředí
MP...	mikrovlnná pyrolýza
TOC...	celkový organický uhlík
BET...	specifický měrný povrch
TK...	těžké kovy

SEZNAM PŘÍLOH

1. Příloha 1- Návrh poměru aditiva do čistírenského kalu určeného k peletizaci
2. Příloha 2- Protokol provedené peletizace vzorků
3. Příloha 3- Protokol o provedené mikrovlnné pyrolýze vybraného vzorku
4. Příloha 4- Vzorový protokol výsledků pro stanovení těžkých kovů pro jeden vzorek
5. Příloha 5- Softwarové výsledky naměřených hodnot pro určení celkového organického uhlíku
6. Příloha 6- Obdržené výsledné hodnoty spáleného tepla čistírenských kalů

Příloha 1- Návrh poměru aditiva do čistírenského kalu určeného k peletizaci

Návrh poměru příměsí do čistírenského kalu určeného k peletizaci - Žďár nad Sázavou

Míchání kalu s příměsmi na AdMaS, příprava vzorků do sudů s převozem k peletizaci

Číslo vzorku	Zdroj kalu	Smíchaný vzorek	Příměs			Množství surového kalu
[-]	[-]	[kg]	[-]	[%]	[kg]	[%]
113201	ČOV 1	40,00	Dřevěné piliny	10	4,00	36,00
113203	ČOV 1	40,00	Odpad z celulózy	5	2,00	38,00
113204	ČOV 1	40,00	Plast	5	2,00	38,00
123205	ČOV 2	40,00	Dřevěné piliny	10	4,00	36,00
123207	ČOV 2	40,00	Odpad z celulózy	5	2,00	38,00
123208	ČOV 2	40,00	Plast	5	2,00	38,00
Celkem		240,00	-	-	16,00	224,00

Míchání kalu s aditivu v místě peletizace Žďár

Číslo vzorku	Zdroj kalu	Smíchaný vzorek	Příměs			Množství surového kalu
[-]	[-]	[kg]	[-]	[%]	[kg]	[%]
113209	ČOV 1	40,00	Seno pelety	30	12,00	28,00
113210	ČOV 1	40,00	Plevy	30	12,00	28,00
123211	ČOV 2	20,00	Seno pelety	30	6,00	14,00
123212	ČOV 2	20,00	Plevy	30	6,00	14,00
Celkem		120,00	-	-	36,00	84,00

Kal navíc

Číslo vzorku	Zdroj kalu	Smíchaný vzorek	Příměs			Množství surového kalu
[-]	[-]	[kg]	[-]	[%]	[kg]	[%]
121214	ČOV 2	20,00	-	0	0,00	20,00
Celkem		20,00	-	-	0,00	20,00

Příloha 2- Protokol provedené peletizace vzorků

5.6.2018 TEST PELETIZACE KALŮ - VUT - ADMAS MATRICE z. 91 P6

Výkonový test ze dne																								
č.	Čas	Vstup		Zatížení										Příkon celkový		Výstup - pelety			Poznámky	Poruchy				
		Typ materiálu	o vlhkosti %	ve tvaru	velikost síta	sykka hmotnost frakce	Vstupní dopravnik	Rezdružovač	Drtič	Dávko vací dopravnik	Lis	Chladič dopravnik	Dávko vací dopravnik	Lis	Chladič dopravnik	počítadlo	množství Kg/h	kvalita		o vlhkosti %	Popis poruchy	Popis opravy	Návrh na nápravné opatření	
1.		ZAHÁJENÍ	TESTU	NA	LINCE				870															
2.		1)	VZOREK	111204	(C0V				+ PLAST															
3.																								
4.																								
5.																								
6.																								
7.																								
8.		2)	VZOREK	111202	(C0V				+ DŘEVNÍ VÁPENEC)															
9.																								
10.																								
11.																								
12.																								
13.		3)	VZOREK	111203	(C0V				+ ODPADEK Z CELULOZU)															
14.																								
15.																								
16.																								
17.																								
18.																								
19.		4)	VZOREK	111201	(C0V				+ DŘEVNÍ PILINKY)															
20.																								
21.																								
22.																								
23.																								
24.																								
25.																								
26.																								
27.																								
28.																								
29.																								
30.																								

1)

Příloha 3- Protokol o provedené mikrovlnné pyrolýze vybraného vzorku

03.07.2018

ČOV 1 -pelety.kal 90%/dřevěné piliny 10%

zp.110

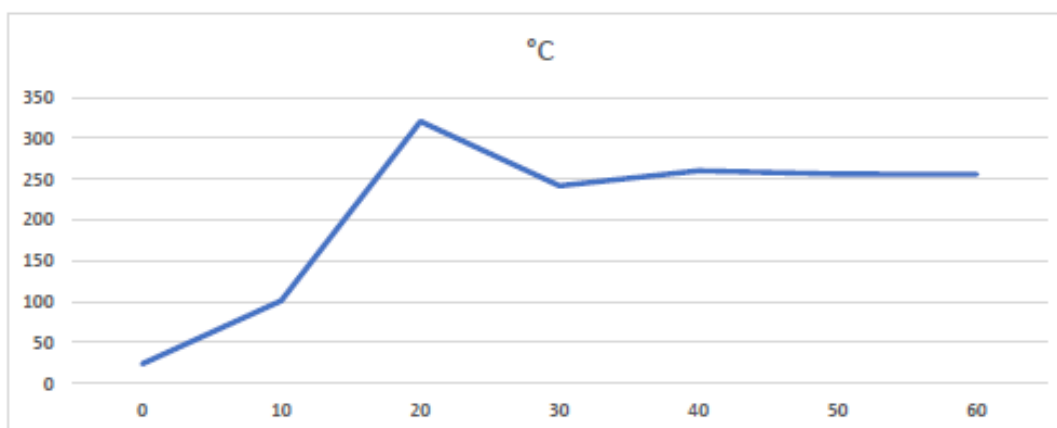
Návrh poměru aditiva do čistírenského kalu určeného k peletizaci - Žďár nad Sázavou

Č.vzorku po peletizaci	114201
vstup/výstup/rozdíl (g)	1300/802/498
hladina: vstup/výstup/rozdíl (mm)	63/43,25/19,75
výstup kap.:složka 1/2/celkem (ml)	74/42/116
(10g) vstup vlhkost (%)	3,38
vzdálenost hladiny od vlnovodu (mm)	100
průměr pelet: vstup/výstup/rozdíl (mm)	6,49/5,46/1,03
200 výkon MW=2,7 kW	

Vzorky: 207-vstup pelety (114 201)
208-výstup biochar (214 208)
209-výstup složky kapalin (314 209)

Průběh reakce:

mm	°C	-mba	MW/v
0	23,9	-405	200
10	101,3	-398	200
20	320,7	-383	90
30	241,8	-375	60
40	260,2	-371	60
50	256,4	-379	60
60	255,8	-380	60
120	122,3		

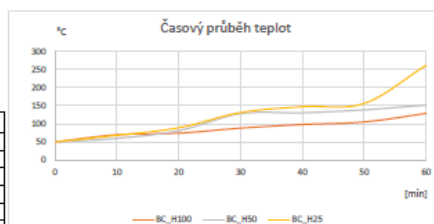


Příloha 4- Vzorový protokol výsledků pro stanovení těžkých kovů pro jeden vzorek

popis vzorků	
122214	Vstupní vzorek - ČOV Drahovice peletizováno
222185	Biochar:
222187	
222189	

Tabulka výtěžků a koncentrací					
vodný výluh					
OZN.	Jednotky	Vstup	BC_H100	BC_H50	BC_H25
122214	222185	222189	222187		
Vstup	[kg]	1,645	1,645	1,645	1,645
Biochar	[%]	-	1,424	1,152	1,185
	[%]	-	86,6	70,0	72,0
Oil	[kg]	-	0,085	0,064	0,066
	[%]	-	5,2	3,9	4,0
Plyn	[kg]	-	0,136	0,429	0,394
	[%]	-	8,3	26,1	24,0
Cu	δ [mg/kg]	0,319	0,303	0,112	0,165
	[%]	100	95,0	35,0	51,8
Pb	δ [mg/kg]	0,035	0,078	0,023	0,022
	[%]	100	221,5	66,6	62,0
Cd	δ [mg/kg]	0,003	0,002	0,003	0,003
	[%]	100	69,2	107,5	99,0
As	δ [mg/kg]	0,037	0,069	0,130	0,030
	[%]	100	185,7	371,1	103,6
Ni	δ [mg/kg]	4,084	1,059	0,163	1,833
	[%]	100	25,9	4,0	44,9
Cr	δ [mg/kg]	0,094	0,092	0,006	0,064
	[%]	100	98,0	6,2	68,1
Hg	δ [mg/kg]	0,159	0,140	0,108	0,146
	[%]	100	89,1	67,9	91,7
Zn	δ [mg/kg]	0,374	0,603	0,195	0,577
	[%]	100	161,1	52,2	154,1

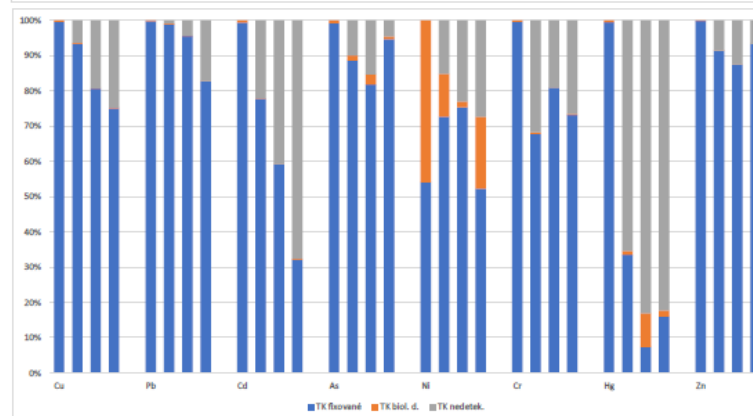
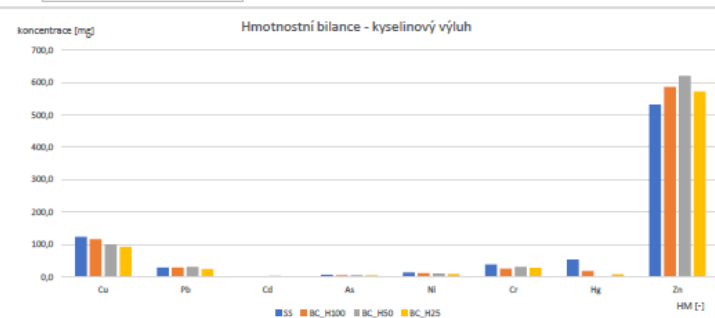
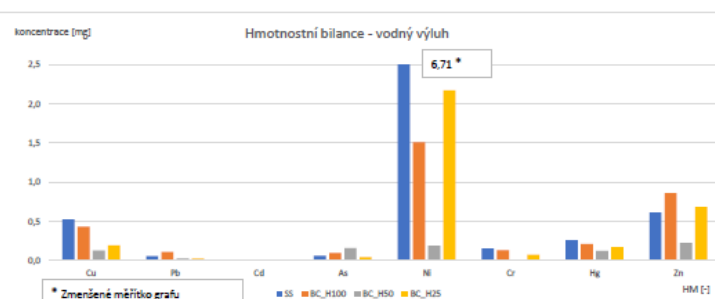
Tabulka výtěžků a koncentrací					
kyselinový výluh					
OZN.	Jednotky	Vstup	BC_H100	BC_H50	BC_H25
122214	222185	222189	222187		
Vstup	[kg]	1,645	1,645	1,645	1,645
Biochar	[%]	-	1,424	1,152	1,185
	[%]	-	86,6	70,0	72,0
Oil	[kg]	-	0,085	0,064	0,066
	[%]	-	5,2	3,9	4,0
Plyn	[kg]	-	0,136	0,429	0,394
	[%]	-	8,3	26,1	24,0
Cu	δ [mg/kg]	75,711	81,883	87,328	79,097
	[%]	100	108,2	115,3	104,5
Pb	δ [mg/kg]	16,030	21,015	26,968	20,727
	[%]	100	116,6	149,6	115,0
Cd	δ [mg/kg]	0,484	0,780	3,102	0,976
	[%]	100	161,3	641,2	201,9
As	δ [mg/kg]	4,439	4,621	4,835	4,936
	[%]	100	104,1	108,9	111,2
Ni	δ [mg/kg]	8,893	8,720	9,776	8,970
	[%]	100	98,1	109,9	100,9
Cr	δ [mg/kg]	23,838	18,793	27,567	24,309
	[%]	100	78,8	115,6	102,0
Hg	δ [mg/kg]	32,886	13,152	1,120	8,100
	[%]	100	40,0	3,4	24,6
Zn	δ [mg/kg]	322,679	411,370	538,203	482,582
	[%]	100	127,4	166,7	149,5



Tabulka přepočtu koncentrací na hmotnosti					
HM	Jedn.	Vstup	BC_H100	BC_H50	BC_H25
122214	222185	222189	222187		
Cu	mg	0,5248	0,4317	0,1287	0,1958
	[%]	100	82,3	24,5	37,3
Pb	mg	0,0578	0,1109	0,0270	0,0258
	[%]	100	0,1	0,03	0,03
Cd	mg	0,0049	0,0029	0,0037	0,0035
	[%]	100	59,9	75,3	71,3
As	mg	0,0610	0,0981	0,1565	0,0455
	[%]	100	160,7	259,9	74,6
Ni	mg	6,7177	1,5085	0,1876	2,1715
	[%]	100	22,5	2,8	32,3
Cr	mg	0,1544	0,1309	0,0067	0,0757
	[%]	100	84,8	4,3	49,0
Hg	mg	0,2615	0,2108	0,1244	0,1726
	[%]	100	80,6	47,6	32,9
Zn	mg	0,6156	0,8587	0,2250	0,6832
	[%]	100	139,5	36,6	111,0

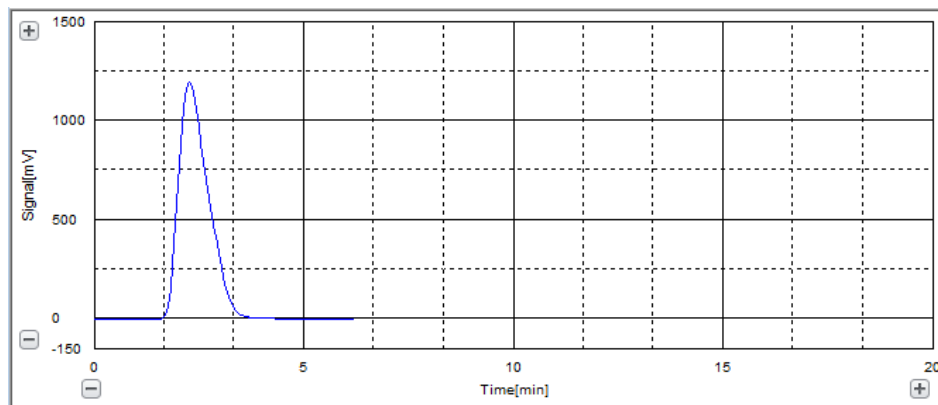
Posuvná:
Měnná vzdálenost hladiny od vlnovodu 25/50/100 mm
Délka ozařování 60 mm
1 kW = 73 výkonu MW
rozborů prováděný na přístroji: Oscilační mlýn RETSCH MM 200

Tabulka přepočtu koncentrací na hmotnosti					
HM	Jedn.	Vstup	BC_H100	BC_H50	BC_H25
122214	222185	222189	222187		
Cu	mg	124,5443	116,6015	100,6015	93,7299
	[%]	100	93,6	80,8	75,3
Pb	mg	29,6566	29,9253	31,0668	24,5619
	[%]	100	100,9	104,7	82,8
Cd	mg	0,7958	1,1109	3,5734	1,1571
	[%]	100	139,6	449,1	145,4
As	mg	7,3022	6,5797	5,5698	5,6496
	[%]	100	90,1	76,3	80,1
Ni	mg	14,6291	12,4179	11,2617	10,6293
	[%]	100	84,9	77,0	72,7
Cr	mg	39,2140	26,7613	31,7570	28,0667
	[%]	100	68,2	81,0	71,5
Hg	mg	54,0970	18,7286	1,2908	9,5985
	[%]	100	34,6	2,4	17,7
Zn	mg	531,1353	585,7913	620,0096	571,6597
	[%]	100	110,3	116,7	107,7



Příloha 5- Softwarové výsledky naměřených hodnot pro určení celkového organického uhlíku

	Type	Analysis	Sample Name	Sample ID	Origin	Result	Notes	Status	Date / Time
1	Unknown	SSM-TC	124207	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:31,46%		Completed	4.1.2019 11:18:21
2	Unknown	SSM-TC	224226	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:26,64%		Completed	4.1.2019 12:40:15
3	Unknown	SSM-TC	124212	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:35,99%		Completed	4.1.2019 13:04:25
4	Unknown	SSM-TC	224240	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:33,97%		Completed	4.1.2019 13:29:41
5	Unknown	SSM-TC	124208	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:38,71%		Completed	4.1.2019 13:53:50
6	Unknown	SSM-TC	226258	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:33,95%		Completed	4.1.2019 14:20:57
7	Unknown	SSM-TC	114203	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:31,29%		Completed	4.1.2019 14:45:48
8	Unknown	SSM-TC	214272	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:28,63%		Completed	4.1.2019 15:12:07
9	Unknown	SSM-TC	114204	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:32,46%		Completed	4.1.2019 15:35:40
10	Unknown	SSM-TC	214280	Untitled	TC_SSM_TS	SSM-TC:25,27%		Completed	4.1.2019 16:02:17
11									
12									



Parameter	Value
Sample Name	124208
Sample ID	Untitled
Object ID	OL-10000102983-H54415200178-13413981...
Analysis	SSM-TC
Manual Dilution	1,000
Result	SSM-TC:38,71%

	Spl. No.	Inj. No.	Area	CNV	Mean CNV	Abs C	Conc.	Mean Conc.	Result	Remarks	Weight	Volume	SD Conc.	CV Conc.	Excluded	Calibr. Curve	Date / Time
	1	1	5831	5831	6099	44116	37,01	38,71	SSM-TC:38,	*H*****	119,2	119	1,479	3,82		kalibrace_T	4.1.2019 13:
		2	5961	6211		45099	39,42			*H*****	114,4	114				kalibrace_T	4.1.2019 13:
		3	5107	6255		38638	39,70			*H*****	97,33	97				kalibrace_T	4.1.2019 13:

Příloha 6- Obdržené výsledné hodnoty spáleného tepla čistírenských kalů

vzorek splané teplo [J/g]	14816	222 189 14.6. 14509 14785	14703	vzorek splané teplo [J/g]	11951	226 247 7.8. 11788 11770	11836	vzorek splané teplo [J/g]	12060	214 212 10.7. 12106 12090	12085
vzorek splané teplo [J/g]	12958	214 191 15.6. 12872 13028	12953	vzorek splané teplo [J/g]	11305	226 249 9.8. 11163 11020	11163	vzorek splané teplo [J/g]	14370	222 185 12.6. 14275 14247	14297
vzorek splané teplo [J/g]	11044	224 200 22.6. 10925 11212	11060	vzorek splané teplo [J/g]	12808	226 196 20.6. 12896 12583	12762	vzorek splané teplo [J/g]	10337	214 208 4.7. 10435 10106	10293
vzorek splané teplo [J/g]	15188	222 187 15.6. 15269 15083	15180	vzorek splané teplo [J/g]	10029	214 193 18.6. 9834 9647	9837	vzorek splané teplo [J/g]	11630	226 251 10.8. 11618 11684	11644
vzorek splané teplo [J/g]	13508	214 182 12.6. 13850 13968	13775	vzorek splané teplo [J/g]	13276	214 191 15.6. 12940 13127	13114	vzorek splané teplo [J/g]	9243	226 253 13.8. 9577 9148	9323
vzorek splané teplo [J/g]	13411	124 213 13534 13521	13489	vzorek splané teplo [J/g]	13150	114 201 5.6. 13490 13248	13296	vzorek splané teplo [J/g]	10946	224 244 6.8. 11343 11015	11101
vzorek splané teplo [J/g]	11467	124 205 11697 11865	11676	vzorek splané teplo [J/g]	12588	224 220 22.7. 12621 12474	12561	vzorek splané teplo [J/g]	12668	224 218 18.7. 12981 12334	12661
vzorek splané teplo [J/g]	12432	214 175 12546 12655	12544	vzorek splané teplo [J/g]	12822	224 242 3.8 12307 12885	12671	vzorek splané teplo [J/g]	12804	214 177 10.6. 12805 13115	12908
vzorek splané teplo [J/g]	12572	124 207 12695 12570	12612	vzorek splané teplo [J/g]	13548	124 205 5.6. 13628 13622	13599	vzorek splané teplo [J/g]	9809	224 228 25.7. 10051 10170	10010
vzorek splané teplo [J/g]	9429	214 173 9281 9380	9363	vzorek splané teplo [J/g]	13976	214 179 11.6. 14030 13865	13957	vzorek splané teplo [J/g]	10049	224 233 27.7. 10071 9924	10015
vzorek splané teplo [J/g]	10922	224 240 2.8. 11039 10994	10985	vzorek splané teplo [J/g]	11216	224 235 31.7. 11106 11255	11192	vzorek splané teplo [J/g]	13917	124 212 13843 13915	13892
vzorek splané teplo [J/g]	11723	214 240 2.8. 11712 11729	11721	vzorek splané teplo [J/g]	9409	224 230 26.7. 9795 9959	9721	vzorek splané teplo [J/g]	9186	224 226 24.7. 9327 9386	9300

SUMMARY

The diploma thesis is focused on energy utilization of sewage sludge after microwave pyrolysis process. The theoretical part deals with sludge management and related legislation. The necessary treatment of the sewage sludge prior to its final treatment is described here. Microwave pyrolysis and its output products bio-pyrolysis oil and pyrolysis gas have been described in detail from microwave pyrolysis. These products show their energy values for comparison with test results.

In the practical part is described the preparation of sewage sludge consisting of their mixing with admixtures, burning up to the final treatment by microwave pyrolysis. The resulting biochar products were then subjected to various analyzes along with the input samples. The most important of these was the analysis to determine the total value of organic carbon. These measurements have shown that microwave pyrolysis products reduce this quantity. Another important analysis was the determination of the energy value of the samples by means of fuel tests and the measurement of burned heat. Again, microwave pyrolysis has been shown to reduce energy. The positive finding is that the microporous pyrolysis sludge still has good heat resistance, almost comparable to brown coal, for example.

In the conclusion of the diploma thesis are proposed two different concepts of possible sludge treatment. The first is to use solar sludge drying, subsequent pelletisation and microwave pyrolysis treatment. The second concept is the use of a belt dryer with direct combustion of sludge in a fluidized bed furnace.