

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická

Využití hydrofilních sorbentů pro možné zhodnocení kapalných vedlejších
produktů z výroby bioplynu

Diplomová práce

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vendula Geržová**
Osobní číslo: **C22308**
Studijní program: **N0711A130013 Chemické a procesní inženýrství**
Specializace: **Chemické inženýrství**
Téma práce: **Využití hydrofilních sorbentů pro možné zhodnocení kapalných vedlejších produktů z výroby bioplynu**
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši (od roku 2020 včetně) na téma nakládání s digestátem z bioplynových stanic. Pozornost zaměřte především na metody úpravy digestátu na tuhé, dále komerčně využitelné produkty.
2. V rámci své experimentální práce se zaměřte na solidifikaci digestátu s použitím hydrofilních sorbentů a ověření mechanické odolnosti vzniklých solidifikátů.
3. Výsledky experimentů vhodným způsobem zpracujte, provedte jejich diskusi zaměřenou především na vliv dávky hydrofilních sorbentů na mechanickou odolnost vzniklého solidifikátu.
4. Diplomovou práci zpracujte v souladu se Směnicí UPa č. 7/2019 "Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací" v platném znění.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Tomáš Weidlich, Ph.D.**
Ústav environmentálního a chemického inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **26. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

L.S.

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
děkan

doc. Ing. Anna Krejčová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 26. ledna 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem Využití hydrofilních sorbentů pro možné zhodnocení kapalných vedlejších produktů z výroby bioplynu jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9.5.2024

Vendula Geržová

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych vyjádřil vděk Laboratoři Písek a panu Ing. Josefu Němcovi za poskytnutí experimentálního prostoru. Děkuji i mému vedoucímu prof. Ing. Tomáši Weidlichovi, Ph.D. za jeho trpělivost. Velké poděkování patří také laborantkám z Laboratoře Písek, zejména Karolíně Holkové a Kláře z oddělení Bioplynu. Na závěr bych ráda vyjádřila vděk svým rodičům a příteli za poskytnutí veškeré podpory.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá způsoby zpracování digestátu na další potencionálně využitelné produkty. V experimentální části popisuje experimenty zaměřené na srovnání efektu několika hydrofilních sorpčních systémů a z nich vzniklých solidifikátů. Dále se práce zabývá mechanickou stabilitou, dlouhodobou stálostí a možnostmi přepravy vzniklých solidifikátů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Digestát, Hydrofilní sorbenty, Mechanická stabilita, Zahušťování

TITLE

Use of hydrophilic sorbents for possible recovery of liquid by-products from biogas production

ANNOTATION

The thesis deals with the methods of digestate processing into the potentially usable products. The experimental part describes experiments testing several hydrophilic sorbents systems. Furthermore, the thesis deals with mechanical stability, long-term stability and transportability of the resulting solidifiers.

KEYWORDS

Digestate, Hydrophilic sorbents, Mechanical stability, Thickening

Obsah	
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM GRAFŮ	11
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM ZKRATEK	12
ÚVOD	13
TEORETICKÁ ČÁST	14
1. Digestát	14
2. Úprava digestátu na pevnou formu	16
2.1. Mechanické odvodňování	16
2.2. Membránové procesy	17
2.3. Tepelné metody	19
2.4. Kompostování	23
2.5. Pyrolýza	24
2.6. Hydrofilní sorbenty	25
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	26
1. Provádění experimentu	26
1.1. Průběh solidifikace s použitím různých sorpčních systémů	26
1.2. Měření amonných iontů	27
1.3. Rozklad vzorku pro stanovení dusíku, fosforu a draslíku	28
1.4. Stanovení celkového dusíku	29
1.5. Stanovení celkového fosforu	30
1.6. Stanovení celkového draslíku	31
1.7. Stanovení obsahu sušiny a popela	31
1.8. Testy mechanické stability	32
2. Výsledky solidifikace jednotlivých sorbentů	33
2.1. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 1702TW	34
2.2. Solidifikace fugátu pomocí sorbentu 2311TW	36
2.3. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 2311TW	37
2.4. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 2802TW	38
2.5. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 1503TW	40
2.6. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 2703TW	43
2.7. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 1804TW	45
2.8. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 2610TW	48
2.9. Vliv poměru sorbentu 1503TWA a 1503TWB	49

3.	Vznik a zpracování vzniklých eluátů.....	51
3.1.	Kinetika vzniku eluátů.....	51
3.2.	Solidifikace eluátů pomocí vybraných sorbentů.....	53
3.3.	Podvojná solidifikace.....	55
3.4.	Mísení eluátů s digestátem.....	57
4.	Zvětšování měřítka procesu solidifikace.....	60
5.	Chování solidifikátů z dlouhodobého hlediska.....	62
5.1.	Tvarová stálost.....	62
5.2.	Hmotnostní stálost.....	63
5.3.	Obalování pelet.....	66
6.	Odolnost pelet vůči mechanickému poškození.....	70
6.1.	Porovnání křehkosti pelet 1x1cm a 3x1 cm.....	70
6.2.	Porovnání účinků obalovacích materiálů na mechanickou odolnost pelet.....	71
6.3.	Vliv planetárního pohybu na pelety a jejich destrukci.....	76
	DISKUSE.....	79
	ZÁVĚR.....	82
	LITERATURA.....	83
	SEZNAM PŘÍLOH.....	89

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Schéma dekantace [12].....	15
Obrázek 2 Laboratorní uspořádání dopředné osmózy [26]	19
Obrázek 3 Zleva nová membrána, membrána po separaci a membrána po vyčištění [17]	20
Obrázek 4 Schéma solární sušárny [50]	22
Obrázek 5 Solární sušička [33]	23
Obrázek 6 Aparatura pro odvodnění digestátu/fugátu smíchaného se sorbentem	26
Obrázek 7 Aparatura pro větší navážky digestátu smíchaného se sorbentem	27
Obrázek 8 Univerzitní planetární třepačka Heidolph Unimax 1010	32
Obrázek 9 Třepačka Laboratoř Písek s horizontálními kmity	32
Obrázek 10 Třepačka Laboratoř Písek s rotačním pohybem	32
Obrázek 11 1702TWD17S.....	35
Obrázek 12 1702TWD18S.....	35
Obrázek 13 1702TWD19S.....	35
Obrázek 14 1702TWD22S.....	35
Obrázek 15 1702TWD23S.....	35
Obrázek 16 2311TWF1S	36
Obrázek 17 2311TWF2S	36
Obrázek 18 2311TWD3S.....	37
Obrázek 19 2311TWD4S.....	37
Obrázek 20 2802TWD1S.....	39
Obrázek 21 2802TWD2S.....	39
Obrázek 22 2802TWD3S.....	39
Obrázek 23 2802TWD4S.....	39
Obrázek 24 2802TWD5S.....	39
Obrázek 25 2802TWD6S.....	39
Obrázek 26 1503TWD1S.....	41
Obrázek 27 1503TWD2S.....	41
Obrázek 28 1503TWD3S.....	41
Obrázek 29 1503TWD4S.....	41
Obrázek 30 1503TWD5S.....	41
Obrázek 31 1503TWD6S.....	41
Obrázek 32 2703TWD2S.....	44
Obrázek 33 2703TWD3S.....	44
Obrázek 34 2703TWD4S.....	44
Obrázek 35 1804TWD1S.....	46
Obrázek 36 1804TWD2S.....	46
Obrázek 37 1804TWD3S.....	46
Obrázek 38 1804TWD4S.....	46
Obrázek 39 1804TWD5S.....	46
Obrázek 40 2610TWD6S.....	48
Obrázek 41 2610TWD7S.....	48
Obrázek 42 Solidifikát z poměru 13:10	50
Obrázek 43 Solidifikát z poměru 14:10	50
Obrázek 44 Solidifikát z poměru 15:10	50
Obrázek 45 Solidifikát z poměru 16:10	50

Obrázek 46 2703TWU1S.....	54
Obrázek 47 1702TWU15S.....	54
Obrázek 48 1804TWU1S.....	54
Obrázek 49 2610TWD1S.....	56
Obrázek 50 2610TWD3S.....	56
Obrázek 51 2610TWD4S.....	56
Obrázek 52 2610TWD5S.....	56
Obrázek 53 2610TWD5D.....	56
Obrázek 54 Porovnání vzorku 1503TWDU13S a 1503TWD12	58
Obrázek 55 1503TWD14S.....	59
Obrázek 56 1503TWD16S.....	59
Obrázek 57 1503TWD17S.....	59
Obrázek 58 2610TWD2S.....	61
Obrázek 59 1503TWD7S.....	61
Obrázek 60 1503TWD8S.....	61
Obrázek 61 Test tvarové stálosti.....	62
Obrázek 62 Pelety ze solidifikátu 1503TW4S obalené v jednotlivých práškových materiálech. Řada 1 den 0 a řada 2 den 14.	68
Obrázek 63 Pelety ze solidifikátu 1503TW8S obalené v jednotlivých práškových materiálech. Řada 1 den 0 a řada 2 den 14.	69
Obrázek 64 Pelety ze solidifikátu 1804TWD4S obalené v jednotlivých práškových materiálech. Řada 1 den 0 a řada 2 den 14.	70
Obrázek 65 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v Ca(OH) ₂ . Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	71
Obrázek 66 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v CaO. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	72
Obrázek 67 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v dolomitu. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	72
Obrázek 68 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v elementární síře. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	73
Obrázek 69 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v MgO. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	73
Obrázek 70 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v Ca(OH) ₂ . Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	74
Obrázek 71 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v dolomitu. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	74
Obrázek 72 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v CaO. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	75
Obrázek 73 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v elementární síře. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	75
Obrázek 74 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v MgO. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce	76
Obrázek 75 Pelety z 1503TWD7S. Řádek označený s číslem 1 pelety před třepání a řádek číslo 2 pelety po třepání.	77
Obrázek 76 Pelety z 1503TWD8S. Řádek označený s číslem 1 pelety před třepání a řádek číslo 2 pelety po třepání.	77

Obrázek 77 Pelety z 1503TWD7S. Řádek označený s číslem 1 pelety před destrukcí a řádek číslo 2 pelety po destrukci.	78
Obrázek 78 Pelety z 1503TWD8S. Řádek označený s číslem 1 pelety před destrukcí a řádek číslo 2 pelety po destrukci.	78

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Teplotní profil metody	29
Graf 2 Kalibrační křivka stanovení fosforu	30
Graf 3 Hodnoty živin pro solidifikát ze sorbentu 1503TW	42
Graf 4 Hodnoty živin pro separovanou tekutinu ze sorbentu 1503TW	42
Graf 5 Hodnoty živin pro solidifikát ze sorbentu 1804TW	47
Graf 6 Hodnoty živin pro separovanou tekutinu 1804TW	47
Graf 7 Časová závislost množství získaného eluátu při navážce 140 g digestátu	52
Graf 8 Časová závislost množství získaného eluátu při navážce 280 g digestátu	53
Graf 9 Hmotnostní stálost 2610TW za 14 dnů volného stání na vzduchu	63
Graf 10 Hmotnostní stálost za 14 dnů volného stání na vzduchu	65
Graf 11 Hmotnostní stálost 1804TW za 14 dnů volného stání na vzduchu	66

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Porovnání živin v NPK a digestátu [7]	15
Tabulka 2 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 1702TW	34
Tabulka 3 Složení vzorků připravovaných z fugátu a sorbentu 2311TW	36
Tabulka 4 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 2311TW	37
Tabulka 5 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 2802TW	38
Tabulka 6 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 1503TW	40
Tabulka 7 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 2703TW	43
Tabulka 8 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 1804TW	45
Tabulka 9 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 2610TW	48
Tabulka 10 Vliv poměru sorbentů na pevnost koláče	49
Tabulka 11 Složení vzorků pro měření kinetiky pro 140 g	51
Tabulka 12 Složení vzorků pro měření kinetiky pro 280 g	52
Tabulka 13 Složení vzorků připravovaných ze směsných matric a různých sorbentů	53
Tabulka 14 Data po první separaci	55
Tabulka 15 Data po druhé separaci	55
Tabulka 16 Tabulka množství sorbentů, násady pro experiment 1503TWD12 a 1503TWD13	57
Tabulka 17 Rozdělení hmotnosti u experimentu přidávání eluátu	58
Tabulka 18 Data z první solidifikace	60
Tabulka 19 Data po druhé solidifikaci	60
Tabulka 20 Procenta odpařené vody v jednotlivých vzorcích experimentu 2610TW	64
Tabulka 21 Sušina a procenta odpařené tekutiny	64
Tabulka 22 Sušina a odpařená voda u série 1804TW	65
Tabulka 23 Hmotnost potřebná pro obalení 100 g solidifikátu	67

SEZNAM ZKRATEK

BPS – Bioplynová stanice

NPK – dusík, fosfor a draslík

USD – United States Dollar

ÚVOD

Bioplyn je v oblasti obnovitelných zdrojů velmi důležitý, a právě proto se stává nezbytným pilířem energetiky. Jedním z hlavních výstupů procesu anaerobní digesce jsou polotekuté vedlejší produkty, konkrétně digestát, který obsahuje anaerobně nerozložitelné nebo obtížně rozložitelné přitom, ale pro pěstování zemědělských plodin cenné látky. Problém nastává s enormním množstvím tohoto materiálu, který při provozu velkokapacitních bioplynových stanic kontinuálně vzniká. Ne vždy mají bioplynové stanice dostatek polí, aby mohly veškerý digestát použít jako hnojivo. Navíc kvůli vysokému obsahu vody může být doprava poměrně nákladná.

Digestát tak na jednu stranu představuje významný zdroj organické hmoty a anorganických živin pro zemědělskou půdu, která by mohla být potenciálně mnohem lépe a efektivněji využita, než je tomu doposud, na druhou stranu je tento zdroj k dispozici v komerčně těžko uplatnitelné formě.

Tato diplomová práce navazuje na mou předchozí bakalářskou práci a zaměřuje se na inovativní přístup ke zlepšení využití digestátu. Konkrétně se soustředí na využití hydrofilních sorbentů pro solidifikaci digestátu s cílem zjednodušit možnost distribuce digestátu na velké vzdálenosti a umožnit tak jeho potenciální komerční uplatnění.

Věřím, že výsledky této práce mohou přinést přínosy nejen pro sektor zemědělství, ale také obecně pro odvětví obnovitelných zdrojů energie.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Digestát

Anaerobní digesce je proces, pomocí kterého lze zpracovávat biomasu a bio degradovatelné odpady. Nejčastěji se pro anaerobní digesci používají energetické rostliny (kukuřice) nebo chlévský hnůj či mřva. Dalším poměrně běžným vstupem jsou kaly z čištění odpadních vod. Novým atraktivním vstupem jsou potravinové odpady. [1] [2]

Právě digestát je jeden z produktů (nebo odpadů) anaerobní digesce, která v posledních letech slaví velký úspěch. Celý proces probíhá v zařízeních zvaných bioplynová stanice (BPS). Tyto stanice se v České republice, v relativně krátké době, hojně rozšířily.

Jen pro představu o jak enormní nárůst bioplynových stanic se jedná, tak v roce 2005 zde bylo 133 BPS (pouze 8 z nich bylo zemědělských). Počet BPS k datu 31.12.2022 je 540. Množství energie, které tyto stanice vyrobí je zhruba 2 600 GWh a zastupuje tak 24 % energie získané z obnovitelných zdrojů. [3] [4]

Rozkvět technologie anaerobní digesce s sebou nepřinesl pouze další obnovitelný zdroj energie, ale i produkci vedlejšího produktu v podobě digestátu. Průměrná bioplynová stanice v České republice vyprodukuje zhruba deset až čtrnáct tisíc tun digestátu ročně [5]. V této situaci se objevuje nový problém, a to co s tímto zbytkem po anaerobní digesci. Vzniká tak mnoho studií, které se zabývají potenciálním využitím digestátu. V hledáčku výzkumníků není jen možnost přímého využití digestátu jako hnojiva nebo půdního kondicionéru¹, ale i možnost efektivní odvodnění tohoto materiálu a tím i dosažení lepší manipulovatelnosti s tímto materiálem.

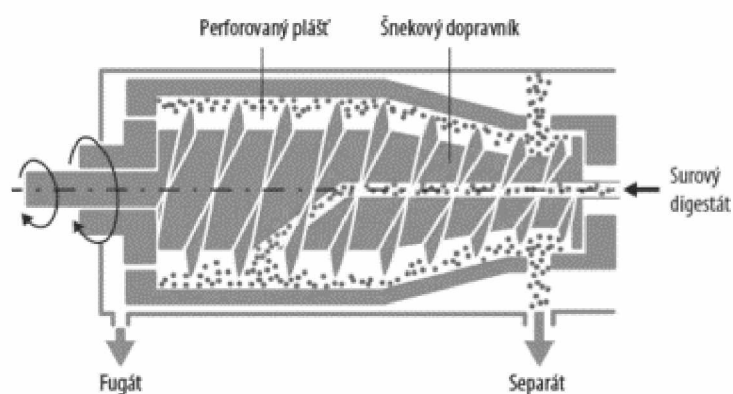
Digestát je polotekutá látka s hodnotou pH pohybující se mezi 7-8. Hlavní nevýhodou digestátu oproti minerálním hnojivům je nízké množství živin v něm obsažené. U digestátu se tak díky vysokému podílu vody a nízké koncentraci živin prodražuje doprava na delší vzdálenosti. V tabulce 1 jsou porovnány koncentrace živin mezi směsným NPK hnojivem a průměrem hodnot z čtyř analyzovaných digestátů. [6]

¹ Zlepšení fyzikálních podmínek např. objemová hmotnost, schopnost zadržování vody, celková pórovitost. Tyto faktory jsou prospěšné pro půdní mikroorganismy a příznivé pro pronikání kořenů. [49]

Tabulka 1 Porovnání živin v NPK a digestátu [7]

	Digestát (kg/t)	NPK (kg/t)
Celkový dusík	5,4	303
Amoniakální dusík	3,6	148
Fosfor	0,6	114
Draslík	2,3	245

Aby se přepravované množství snížilo, velmi často se používá separace digestátu na separát a fugát. Separace se provádí na dekantacích zařízeních (obrázek 1), pásových filtrech nebo šnekových lisech [8]. Kapalná část této separace se označuje fugát a lze ho využít pro závlahy i jako hnojivo [9]. Tuhá část se nazývá separát a využívá se jako podestýlka pro zvířata [10]. Česká legislativa udává, že fugát má méně než 3% sušiny a separát více než 13 %. [2] [11]



Obrázek 1 Schéma dekantace [12]

Díky této separaci vzniká nepochopitelný rozdíl v rozdělení živin. V kapalně frakci převažuje dusík (65-70 %) a draslík (70-80 %). V separátu nalezneme ve větší míře obsažen fosfor (55-65 %) a uhlík (60-70 %). [6]

2. Úprava digestátu na pevnou formu

Důvodů pro úpravu digestátu na pevnou formu je mnoho. Jedním z nich je lepší skladovatelnost a manipulovatelnost. Digestát obsahuje mnoho solí a rozpustného amonného dusíku. Tento fakt výrazně omezuje přímé využití, jako organické hnojivo. Nesprávné zacházení s digestátem může vést k eutrofizaci a salinizaci. [13] [14]

Snižovat obsah vody v digestátu lze mnoha způsoby já tu zmiňuji pouze několik. První tři se zakládají na gradientu tlaku nebo gradientu teploty. Další dva se věnují možnosti kompostování digestátu a pyrolýze.

2.1. Mechanické odvodňování

Mezi konvenční metody úpravy digestátu patří separace na pevnou a kapalnou frakci. K tomuto účelu se nejčastěji používají dekantáčnι odstředivky, vibrační síto nebo šroubový lis. [15]

Je zajímavé, že koncentrace sušiny v kapalně frakci zpracované různými technikami se liší v závislosti na typech surovin zpracovávaných v bioplynových zařizováních. Dále bylo zjištěno, že žádná z technik separace neposkytovala kapalnou frakci s koncentrací sušiny pod 20 g suché hmoty na litr, což je limit, klíčový pro účinné odstranění amoniaku a zpětné získání fosforu. [16]

Pro snížení sušiny v kapalině lze za šnekovým lisem do kapaliny přidávat polyakrylamidové flokulanty. Tuto směs následně odstředit. Sušina separované směsy klesá úměrně množství flokulantu a délce odstředování. Nejlepší výsledky separace pomocí odstředivky byli dosaženy s dávkou flokulantů 20 g/kg sušiny. V pevně frakci se nacházelo vyšší množství sušiny, fosforu, niklu, olova, kadmia a chromu, zatímco v kapalně byly zaznamenány vyšší koncentrace dusíku, draslíku, zinku a mědi. [17]

Pokud porovnáme odstředivky a šnekové lisy, tak odstředivky oddělily o 60 % více sušiny a celkového fosforu. Avšak odstředivka potřebovala 4,5x více energie než šnekový lis. Při regeneraci fosforu spotřebovala odstředivka 2x víc energie než šnekový lis. Ve všech typech digestátu dochází po použití flokulantů k vyššímu výtěžku sušiny, organického dusíku a celkového fosforu. Nejvyšší hodnoty těchto parametrů patřily digestátům, které obsahovaly hnůj. Z toho vyplývá, že při navrhování separační metody je důležitý nejen typ separační techniky ale i typ digestátu. [16]

2.2. Membránové procesy

V posledních letech se membránové procesy dostaly do popředí zájmu. I v problematice digestátu bylo zkoumáno mnoho možností, jak uplatnit membrány pro zpracování tohoto hodnotného, leč problematického produktu. Membránové procesy, používané k zpracování digestátu, často bojují s vysokým obsahem nerozpustných nečistot, což může vést k problémům se zanášením membrán.

2.2.1. Membránová filtrace

Jak již bylo řečeno, hlavním problémem využití membránových technologií u digestátu je jejich zanášení. Jedním z možných řešení je nahradit membránovou technologií sedimentací, použití centrifugace s flokulací anebo hydrotermální úpravou. [14] [18]

Vzhledem k obsahu částic v digestátu byla v jedné studii před membránovou filtrací zahrnuta sedimentace. Různě naředěný digestát byl nechán 24 hodin sedimentovat, a poté neusazená část byla filtrována přes mikrofiltraci, ultrafiltraci a nanofiltraci. [19]

Mikrofiltrace byla provedena pomocí keramické membrány o velikosti pórů 0,2 μm . Permeát byl shromažďován, zatímco retentát byl vrácen zpět do nádrže s digestátem. Proces byl ukončen, když se původních 60 litrů digestátu snížilo na pouhých 10 litrů, a vzniklý retentát byl hustý a koncentrovaný kal. [19]

Permeát z mikrofiltrace byl dále podroben ultrafiltraci s membránou o velikosti pórů 10 kDa. Permeát z ultrafiltrace byl opět shromažďován, zatímco retentát byl vrácen zpět do nástřikové nádoby. Filtrace byla zastavena, když hladina retentátu klesla z 20 litrů na 5 litrů. [19]

Během těchto kroků bylo zjištěno, že většina fosforu byla zachycena během mikrofiltrace, což vedlo k významnému snížení jeho koncentrace ve finálním permeátu. Naopak, koncentrace dusíku zůstala relativně vysoká i po nanofiltraci. Zpracování digestátu membránovou filtrací se ukázalo jako efektivní metoda pro čištění digestátu od částic a udržení vhodných koncentrací dusíku pro mikro-řasy. Nicméně, tato metoda významně snížila množství biologicky dostupného fosforu. [19]

Díky této vícestupňové technologii je možné vytvářet hnojiva se specifickým využitím. Tento fakt zvyšuje hodnotu surového digestátu. Avšak, tato technologie je nákladná a obtížně škálovatelná. [19]

Ovšem co se týče pouze mikrofiltrovaného digestátu, tak existuje málo závodů, jež vyrábějí mikrofiltrovaný digestát (s využitím hlavně pro vědecké účely) [20]. Dle studie, která se zabývala životaschopností této výroby, je mikrofiltrovaný digestát ekonomicky výhodný. Tato studie nezohlednila náklady na dopravu z BPS na farmu, takže i tato technologie zápasí se stejným problémem jako surový digestát. S rostoucí vzdáleností roste cena dopravy, a tak prodražuje celkový produkt. [20]

2.2.2. Dopředná osmóza

Jednou z nejnovějších technologií v oblasti membránových procesů je dopředná osmóza. Ta byla navržena jako alternativa k zpracování náročných odpadních vod (např. surová odpadní voda). Funkce dopředné osmózy je, že se čistá voda transportuje z nástřiku přes polopropustnou membránu do tahového roztoku, přičemž odchylka osmotického tlaku mezi těmito dvěma roztoky působí jako hnací síla. Tato technologie je charakteristická svou vysokou selektivitou, nízkou tendencí k zanesení a vysokou reverzibilitou zanesení. Mezi další výhody patří relativně malá spotřeba energie. [21] [22]

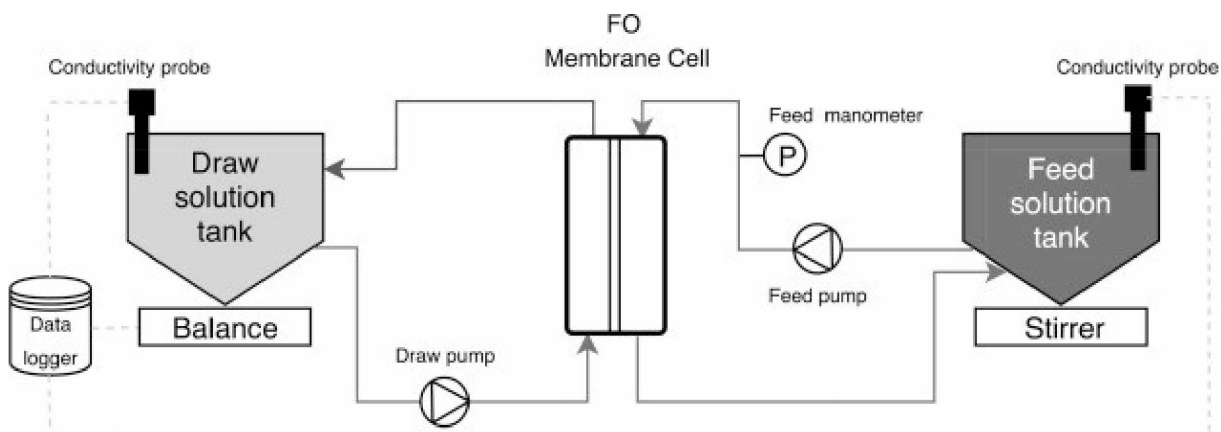
V této technologii se používají membrány založené na aquaporinu, acetátu celulózy a triacetátu celulózy a dalších materiálech [21] [23]. Aquaporin je integrální membránový protein, který se hojně nachází v rostlinné i živočišné říši. Funkce těchto proteinů je v transportu vody přes buněčné membrány, jako odpověď na osmotický rozdíl, který je vytvořen transportem rozpuštěných látek. [24]

Porovnání aquaporinové membrány, která je novější, s membránou z triacetátu celulózy ukazuje, že aquaporin má menší sklon k zanášení. Propustnost amonných iontů skrze aquaporinovou membránu je nižší než u membrány z triacetátu celulózy. Dalším pozitivem pro membránu z triacetátu celulózy je její lepší schopnost zadržovat antibiotika. [21]

I dopředná osmóza má své problémy. Jedná se o absenci ideálního tahového roztoku. Tahový roztok by měl mít vysoký osmotický potenciál a snadnou regeneraci. Výzkumy tahového roztoku se zabývali i možností využití průmyslových odpadních vod s vysokou salinitou (např. koželužské odpadní vody). [25]

Jednou z potenciálních aplikací dopředné osmózy je zahuštění tekuté frakce digestátu (obr.2). V této studii byly jako tažné roztoky použity roztoky NaCl o různých koncentracích a odpadní vody z koželužského průmyslu. Zjištěno bylo, že průměrně 95 % amonných iontů zůstává v retentátu, bez ohledu na to, zda je digestát okyselený nebo ne. Znečištění membrány

bylo úspěšně odstraněno opláchnutím, přičemž po opláchnutí bylo znečištění membrány mírné a reversibilní. [25]



Obrázek 2 Laboratorní uspořádání dopředné osmózy [26]

2.3. Tepelné metody

Kromě odvodnění pomocí membránové technologie existují starší alternativy, jako je odpařování a sušení. V této kapitole se zaměříme na tři přístupy: membránová destilace, vakuové odpařování a solární sušení. Membránová destilace a vakuové odpařování využívá odpadní teplo z bioplynových stanic k odstraňování amoniaku při nižších teplotách, což umožňuje získání cenných produktů jako fosforu, draslíku a čisté vody. Na druhou stranu solární sušení využívá energii slunce k odpařování vody z digestátu, přičemž se snižuje energetická náročnost procesu.

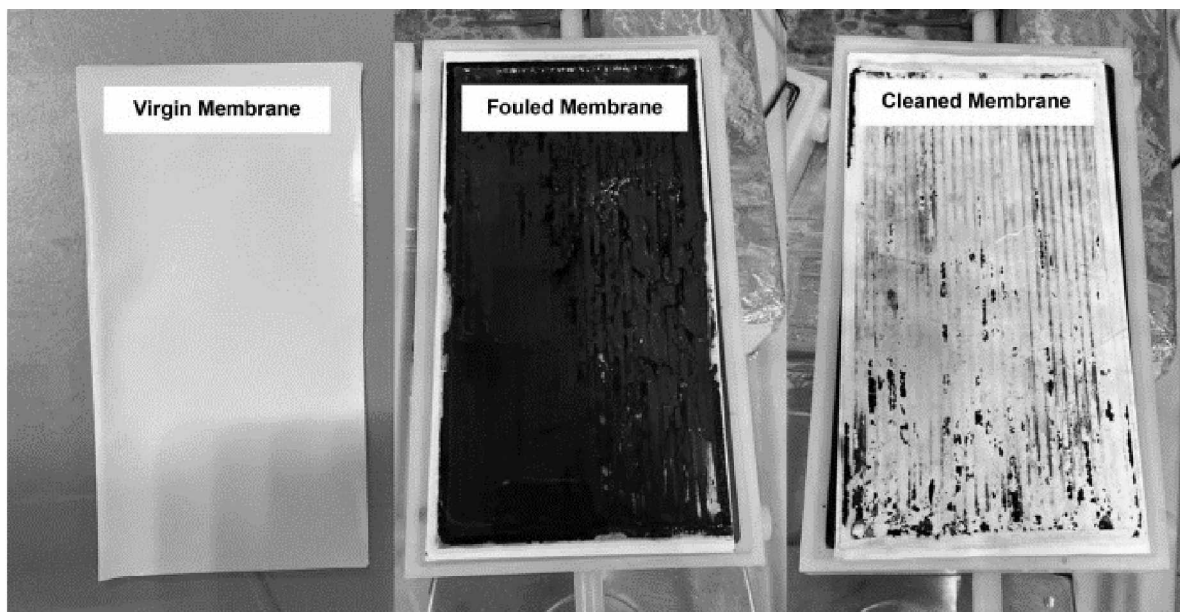
2.3.1. Membránová destilace

V membránové destilaci se používá hydrofilní mikroporézní membrány. Kvůli hydrofobní povaze membrány nejsou kapaliny schopny přes ní procházet. Voda tak může být transportována přes membránu pouze v podobě páry. [27] Teplotního gradientu, který je hnací silou tohoto procesu lze dosáhnout využitím odpadního tepla z bioplynové stanice. Toto odpadní teplo je nízké kvality a má omezené další využití. [28]

Membránová destilace je hybridní proces, který dokáže odstraňovat vodu již při malém teplotním gradientu. Membrány zde umožňují přestup těkavým sloučeninám, a naopak zabráňují přestup netěkavým. [29]

Jeden z problémů při zpracování digestátu membránovou destilací je znečištění membrány, protože silně ovlivňuje výkon. Na obrázku 3 je vidět silně zanesená membrána

v průběhu separace, ale i membrána po čištění. Problém zanášení je stěžejní problém pro stabilitu procesu. [13]



Obrázek 3 Zleva nová membrána, membrána po separaci a membrána po vyčištění [17]

Za specifických podmínek ($T_{\text{Nástřiku}}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$) membránová destilace umožňuje regenerovat až 40 % vody. Díky změně pH je rovněž možné ovlivnit množství amonných iontů jak v retentátu, tak v permeátu. Při pH, které je standardní pro digestát je permeát využitelný, jako hnojivo v zemědělství kvůli obsahu amonných iontů. Pokud se vstup okyselí na pH 6 vzniká permeát bez amonných iontů a je vhodný k zavlažování či likvidaci v kanalizaci. [13]

2.3.2. Odpařování

Odpařování potřebuje velké množství energie, ale díky vakuovému procesu je možné použít i odpadní teplo. Díky tomuto by toto řešení mohlo být proveditelné na bioplynových stanicích, kde je k dispozici odpadní teplo. Tímto opatřením by se mohlo dostat lepší udržitelnosti anaerobní digesce. [30]

Pomocí dvoustupňového vakuového odpařování lze získat kapalné hnojivo a čistou vodu. Pro první stupeň odpařování byla použita teplota $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vzniká koncentrát, který je bohatý na fosfor a draslík. Díky pH, které bylo vyšší než 8 přešel amoniak z vodného roztoku do plynné fáze. Zde vzniká roztok síranu amonného. Vznikající plynný amoniak byl absorbován v 10 % kyselině sírové za vzniku síranu amonného. U druhého stupně byla použita teplota $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pomocí simulace bylo zjištěno, že pára z druhého stupně může poskytnout

dostatečné teplo, aby mohla být použita jako teplotně nosné médium pro první stupeň. Druhý stupeň by mohl být ohříván odpadním teplem z technologické vody. [30]

Přednosti této metody vidím ve vzniku několika cenných produktů jako jsou kapalné hnojivo bohaté na fosfor a draslík, 36 % roztok síranu amonného a čistou vodu. Čistou vodu lze použít na ředění vstupních substrátů do fermentoru. [30]

Osobně vidím nevýhodu vakuového odpařování digestátu v energetické náročnosti provozu, technické složitosti zařízení a náročnosti na management. Tyto faktory mohou zvýšit provozní náklady, vyžadovat pravidelnou údržbu a vyžadovat kvalifikovaný personál pro řádný provoz.

2.3.3. Solární sušení

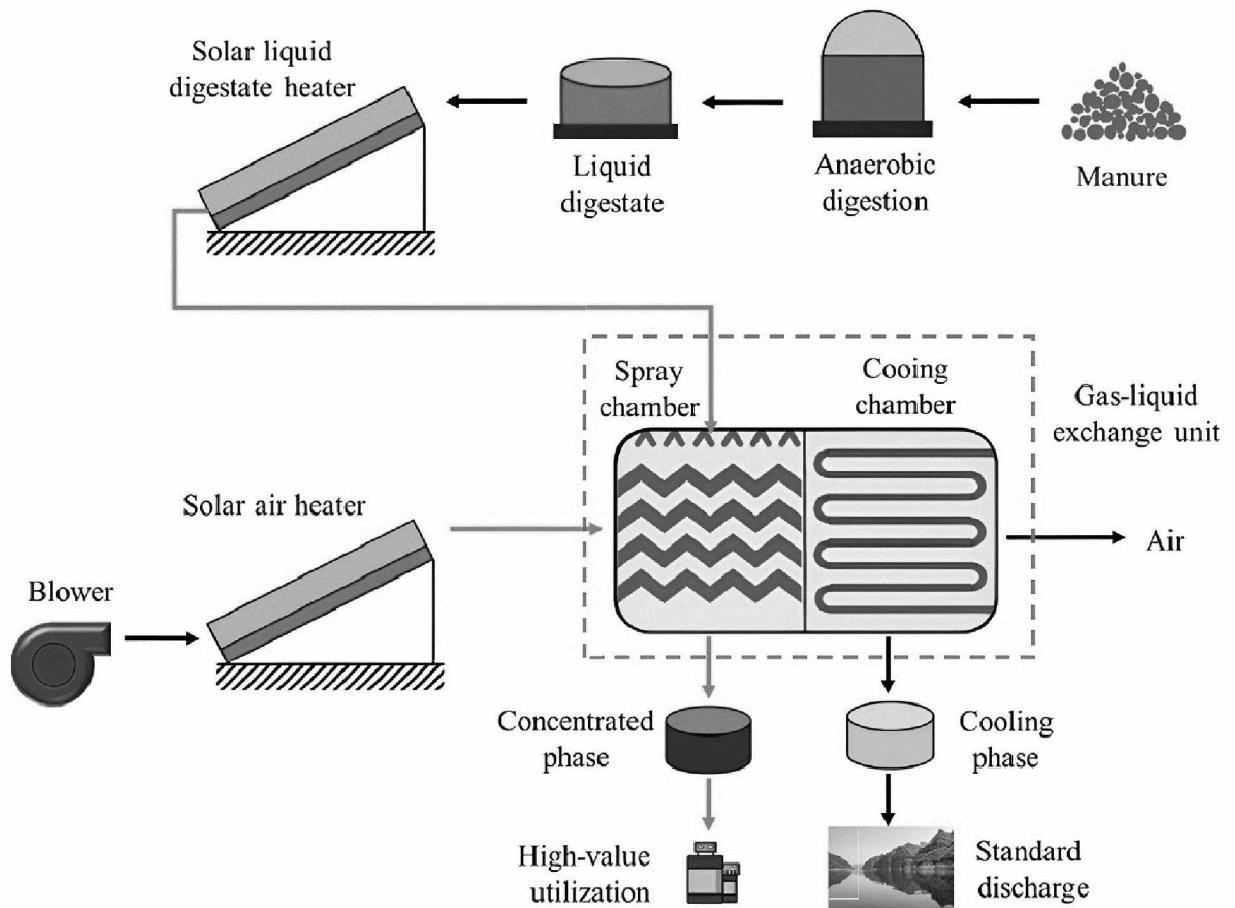
Další z celé řady technologií je solární sušení. Solární sušičky, spolu s vyhřívanou podlahou, využívají mnohem menší množství elektrické energie na odpaření vody než konvenční sušičky. Solární sušení se provádí pomocí dvou technologií. První, kterou zde budu zmiňovat, je pomocí solárních panelů a druhá pomocí skleníků. [31]

Technologie pomocí solárních panelů je založena na odsolovacím systému zvlhčování – vysoušení. Tento systém funguje, protože vzduch zvládne přenášet velké množství vodní páry. Při zvlhčování digestát přichází do přímého kontaktu s vzduchem a ten je obohacen o vodní páru. Ve fázi odvlhčování dochází ke kondenzaci vodní páry, vzniká sladká voda. [32]

Surový tekutý digestát se před vlastním sušením vyvločkuje, aby došlo k odstranění velkých částic (pomocí 100 g/l roztoku polychloridu hlinito-železitého a 2 g/l roztoku kationtového polyakrylamidu). Vylvločkovaný tekutý digestát protéká deskou v solárním ohřivači. Zde se ohřeje a pokračuje do rozprašovací komory. Ve stejný moment byl též vzduch ohříván pomocí solárního ohřivače a následně vháněn do rozstříkovací komory. Zde se relativní vlhkost vzduchu zvýšila. Horký vlhký vzduch vstupuje do chladicí komory, kde dojde ke kondenzaci vody ze vzduchu. [32]

Rychlost průtoku tekutého digestátu solární sušárnou je 4-6 l/min. Až 44 % účinnost, které tato sušárna může dosáhnout se odvíjí od míry slunečního záření a s tím spojenou teplotou vzduchu. Tento proces nebyl příznivý pro získávání amoniakálního dusíku. Důvod je ten, že zvýšená teplota vede k vyššímu těkání amoniaku. Dle ekonomické analýzy by cena za

koncentrování tekutého digestátu pro bioplynovou stanici, která produkuje 100 t tohoto materiálu denně byla přibližně 1 USD na tunu. [32]

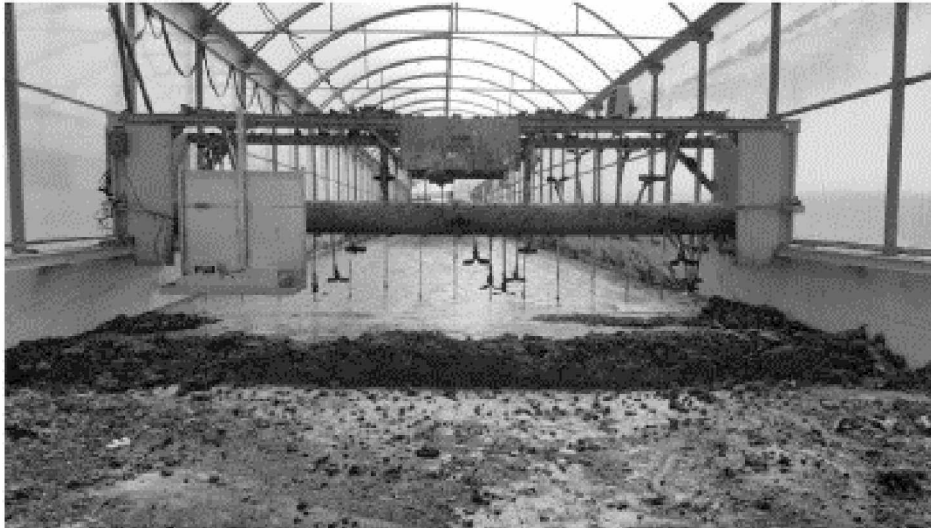


Obrázek 4 Schéma solární sušárny [50]

Další solární metodou je sušení pomocí solárních skleníků. Jako i v předchozím případě tak i tato metoda bojuje s únikem amonných iontů. Zde digestát okyselovali kyselinou sírovou, aby tomuto úniku zabránily. [31]

Solární skleníková sušička (obr. 5) se skládá z dmyhadla vzduchu, bio filtru a solární sušičky. V této studii se testovalo poloprovozní měřtko a skleník měl pracovní plochu 468 m² (cca 4000 kg digestátu). Aby se zabránilo tvorbě krusty byla výška digestátu maximálně 40 cm. Sušení trvalo 21 až 35 dnů. [31]

Po okyselení se zvýšila celkové množství dusíku o 1,3 až 1,5krát, přičemž množství amoniaku vzrostlo až 14krát. Okyselením došlo k významnému snížení emisí amoniaku až o 94 %, avšak zároveň došlo k nárůstu emisí N₂O o 620 %. [31]



Obrázek 5 Solární sušička [33]

Solární sušení a sušení pomocí solárních skleníků představují účinné metody pro zpracování digestátu. Použití solární energie umožňuje úsporu energie a snižuje náklady na provoz. Výzkumy ukazují, že při správném využití těchto technologií lze dosáhnout významného zvýšení účinnosti sušení a současně snížit emise amoniaku. [31]

Nevýhody obou metod vnímám v silné závislosti na slunečním záření a přízni počasí. Další negativa vidím především u skleníkové metody, a to v možnosti uvolňování škodlivých látek do ovzduší a případné negativní dopadu na životním prostředí. Velký problém a nevýhodu vidím v kapacitě skleníkových sušiček.

Pokud vezmeme v úvahu, že plocha 468 m² dokáže obsáhnout 4 000 kg digestátu, který se suší po dobu 30 dnů. Průměrná česká bioplynová stanice pak vyprodukuje 1 020 tun digestátu za měsíc [5]. To znamená, že každý měsíc vyžaduje 119 340 m² skleníků pro sušení. Toto množství představuje plochu srovnatelnou s 16 fotbalovými hřišti². Je zřejmé, že taková velká plocha by mohla být využita mnohem efektivněji.

2.4. Kompostování

Kompostování je široce uznávaný proces stabilizace organické hmoty různého původu pomocí biochemických reakcí. Tento proces přináší několik výhod, jako je zmenšení objemu materiálu, odstranění patogenů a redukce množství kapalných znečišťujících látek. [34]

² Hřiště o velikosti 105x68m

Kompostování pevné frakce digestátu obvykle zahrnuje zpracování velkého objemu materiálu a vyžaduje dlouhou dobu zdržení. Aby nedošlo k vytvoření anaerobních podmínek tak se přidávají do kompostu plnidla. Malé částice materiálu mohou zvyšovat riziko anaerobních podmínek v hromadě, což může vést k nežádoucím jevům, jako je únik amoniaku. [35]

Společné kompostování biouhlu a digestátu může celý proces urychlit. Další výhody spočívají v potenciální podpoře mikrobiologické aktivity a zlepšení procesu humifikace. Biouhel je pevný produkt pyrolýzy lignocelulóзовé biomasy. Vyznačuje se vysokým obsahem uhlíku a vyrábí se pomalou pyrolýzou. [35]

Výzkum zaměřený na kombinaci biouhlu a digestátu zkoumal čtyři směsi. První tvořila směs pouze digestátu a slámy. U dalších tří měl základ stejný, avšak se lišil přídavek biouhlu. Konkrétně ve druhé směsi bylo přidáno 7,3 % biouhlu, ve třetí 11,2 % kg a ve čtvrté 15,2 %. Z výsledků vyplývá, že vzorky s přídavkem 11,2 % a 15,2 % biouhlu dokončily biooxidační fázi o 4 dny dříve než vzorek bez biouhlu a s 12 kg biouhlu. Pro dosažení bezpečné sanitace je potřeba dosáhnout teploty vyšší než 55 °C po dobu 10 dnů, což splnily pouze vzorky bez biouhlu a s 18 kg biouhlu. [35]

2.5. Pyrolýza

Pyrolýza je tepelný rozklad organického materiálu za anaerobních podmínek. Produkty tohoto procesu jsou tři a to plyn, koks a bioolej. Tyto termochemické přeměny zpracovávají biomasu na bioenergií díky teplu a katalyzátoru (např. zeolity nebo aktivní uhlí [36]). Tento pochod je daleko rychlejší a efektivnější než biochemické přeměny. Tyto biouhly mohou být využity jako palivo, adsorbent nebo katalyzátor pro anaerobní digesci. [37]

Využití pyrolýzy u digestátu je problematické kvůli jeho vysokému obsahu vody. Nové studie přináší novou metodu hydrotermální karbonizace. Ta by v kombinaci s mechanickým odvodněním mohla sloužit jako před úprava digestátu. Hydrotermální karbonizace je tepelný proces, který přeměňuje organické vstupní látky na uhlovodíky – tedy látky bohaté na uhlík. [38]

Hydrotermální karbonizace pracuje při teplotách mezi 160-250 °C. Tlak zde vzniká interně pomocí vodní páry a ostatních plynných produktů (např. CO₂). Tento tlak je natolik vysoký, že většina vody zůstává (i přes vysoké teploty) v kapalném skupenství. S rostoucí teplotou roste i tlak a u vysokých tlaků je nutné použít silnější stěny reaktorů. Z tohoto důvodu se pro pilotní jednotky používají nejnižší možné teploty okolo 200 °C. Tato metoda dokáže

přeměnit hydrofilní skupiny na povrchu digestátu na hydrofobní skupiny. Mechanické odvodnění, které následuje po hydrotermální karbonizaci je daleko účinnější. [39]

Předúprava pomocí této technologie rozjíždí proces karbonizace v digestátu. To velmi ovlivňuje jeho následné pyrolytické chování. Výsledek hydrotermální karbonizace je produkt, který má zvýšenou tepelnou stabilitu. Tento produkt se dále pyrolyzoval. Bylo zjištěno, že díky této úpravě došlo k přechodu reakce z endotermické na exotermickou. Tento posun umožnil efektivnější využití energie při termální konverzi digestátu. [38]

2.6. Hydrofilní sorbenty

Novou a zatím v oblasti digestátu běžně nepoužívanou metodou je solidifikace pomocí hydrofilních sorbentů. Touto metodou se zabývala má bakalářská i diplomová práce.

Tyto sorbenty by mohly díky své schopnosti vázat vodu rychle a efektivně ztužit digestát a vytvořit z něj tak hodnotný produkt. Úskalí v použití sorbentů může být v jejich použitím množství. Je možné že tato technologie bude příliš drahá pro průmyslové použití díky vysokým navázkám sorbentů.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této práci pro zahušťování digestátu nebudu používat žádnou změnu tlaku či teploty. Pomocí různých sorpčních látek budu digestát převádět na pevnou formu.

1. Provádění experimentu

V této kapitole se zaměřuji na detailní popis průběhu a metodiky provádění experimentů v rámci diplomové práce. Cílem této části je přehled o postupu, použitých nástrojích a metodách, které byly použity k získání dat a vyhodnocení výsledků.

1.1. Průběh solidifikace s použitím různých sorpčních systémů

V kádince o objemu 600 ml byla přesně odměřena hmotnost 140 ± 1 g materiálu digestátu. Na základě informací z tabulky (viz jednotlivé experimenty) byly odváženy komponenty sorbentu A a B. Tyto komponenty byly postupně za neustálého míchání přidány do navážky digestátu.

Solidifikát, který vznikl zhruba po 15 minutách míchání byl převeden na síto (obrázek 6.). Toto síto má oka o velikosti 2 mm a filtrační plochu 65 cm^2 . Síto se solidifikátem a nádobkou pro odkap bylo přikryto alobalem, aby se zabránilo případnému odparu. Solidifikát byl ponechán na sítu 12 h odkapat a po uplynutí časové doby bylo síto odstraněno.



Obrázek 6 Aparatura pro odvodnění digestátu/fugátu smíchaného se sorbentem

Tekutá fáze, která protékla sítím (dále označovaná písmenem L či jako "separovaná tekutina"), byla měřena odměrným válcem o objemu 100ml. Pro zjištění hmotnosti separované tekutiny byla zvažena odkapávací kádinka se separovanou tekutinou. Po důkladném vyčištění

a vysušení nádoby byla znovu zvážena v prázdném stavu, a rozdíl mezi hmotnostmi byl zaznamenán k jednotlivým měřením v dalších kapitolách. Zjištění hmotnosti tuhé fáze probíhalo stejným způsobem. Nejprve bylo zváženo plné síto a po důkladném vyčištění a vysušení prázdné. Rozdílem těchto vah je hmotnost solidifikátu po separaci. Tuhá fáze, která se na sítu zachytila (dále označována písmenem S nebo jako "solidifikát"), byla po zvážení vyklopena na alobalovou folii a zde byla fotograficky dokumentována její soudržnost.

Každý experiment nese označení minimálně 9 místním kódem. Prvních 6 čísel je označení použitého sorbentu. Další je označení pomocí písmen D, F a U. Ty označují použitou násadu pro solidifikaci. D označuje pokusy na digestátu, F na fugatu a U pokusy na směsi eluátů. Předposlední číslo je označení experimentu a poslední udává, zda se jedná o kapalnou fázi nebo pevnou fázi.

Pro experimenty, kde byla použita a dvojnásobná navážka byla sestavena jiná aparatura. Ta se skládala ze stojanu, křížové svorky, držáku, re-sáčku na ovoce a kádinky. Přesné sestavení je na obrázku 7.



1.2. Měření amonných iontů

Amonné ionty byly detekovány pomocí zařízení nazývaného Ionosep. Tento přístroj provádí analýzu vzorků využitím principu kapilární izotachoforézy. [40] [41]

Analýza amonných iontů pomocí ionosepu trvá 15 minut a provádí se v módu kationickém módu. Velikost hnacího proudu je počáteční 100 μA a pro koncový 50 μA . Vedoucí elektrolyt pro stanovení amonných iontů se skládá z 7,5 mM H_2SO_4 + 7 mM-18-crown-6 + 0,1% hydroxypropylmethyl celulóza a koncový z 10 mM 1,3-bis[tris(hydroxymethyl)methylamino] propan (BisTrisPropan). [42]

Amonné ionty byly analyzovány ve třech různých typech vzorků – sorbenty, separovaná tekutina a gel. Následující kapitoly podrobně popisují postup přípravy těchto vzorků. Níže uvedené postupy pro přípravu amonných iontů pomocí Ionosepu jsou interními laboratorním postupem v Laboratoři Písek.

1.2.1. Měření amonných iontů v matrici a v separované tekutině (L)

Pomocí 10ml válce bylo 10 ml vzorku kvantitativně převedeno do 100ml odměrného válce. Válec byl doplněn do sta mililitrů destilovanou vodou. Poté byla přidána kyselina sírová 1:1 v množství 0,5ml. Roztok, který takto vznikl ve válci byl promíchán a přelit do zkumavky. Zkumavka se pomocí laboratorní odstředivky 4,5 minuty odstředí uje při 4500 RPM. [2]

Z vzorku bylo po odstředění pipetou odebráno 6,25ml do odměrné baňky o objemu 25ml. K tomuto objemu bylo ještě napipetováno 3,75 ml isopropylalkoholu a následně byla odměrná baňka doplněna po rysku destilovanou vodou. Roztok v odměrné baňce byl promíchán a přes stříkačkový filtr se skleněnými vlákny o velikosti pórů 1,2 μm byl zfiltrován do kádinky. Z filtrátu byl pipetou odebrána 1 ml a přenesen do měřicí nádoby. Následně do této měřicí nádoby bylo přidáno 5 ml destilované vody. [2]

1.2.2. Měření amonných iontů u výluhů ze sorbentů

Přibližně přesná navážka sorbentu byla navážena do odměrné baňky o objemu 25ml. Baňka byla doplněna destilovanou vodou po rysku a obsah byl důkladně promíchán. Odměrná baňka se nechala dvě hodiny stát. Následně bylo stříkačkou odebráno 5-10ml vzorku. Tento objem byl přefiltrován skrz stříkačkový filtr se skleněnými vlákny o velikosti pórů 1,2 μm . [2]

1.2.3. Měření amonných iontů v připraveném solidifikátu (S)

Do kádinky bylo naváženo přibližně přesně 10 g solidifikátu. Navážka byla kvantitativně převedena do 100ml odměrného válce. Válec byl doplněn do 100ml destilovanou vodou a bylo přidáno 0,5 ml 1:1 H_2SO_4 . Roztok ve válci byl důkladně promíchán a přelit do zkumavky. Zkumavka se pomocí laboratorní odstředivky 4,5 minuty odstředí uje při 4500 RPM. [2]

Z odstředěné zkumavky byl odebrán 1ml do 25ml odměrné baňky. Baňka byla doplněna po rysku a promíchána. Stříkačkou bylo odebráno 5-10ml roztoku vzorku a přes stříkačkový filtr o velikosti pórů 1,2 μm zfiltrován do měřicí nádoby. [2]

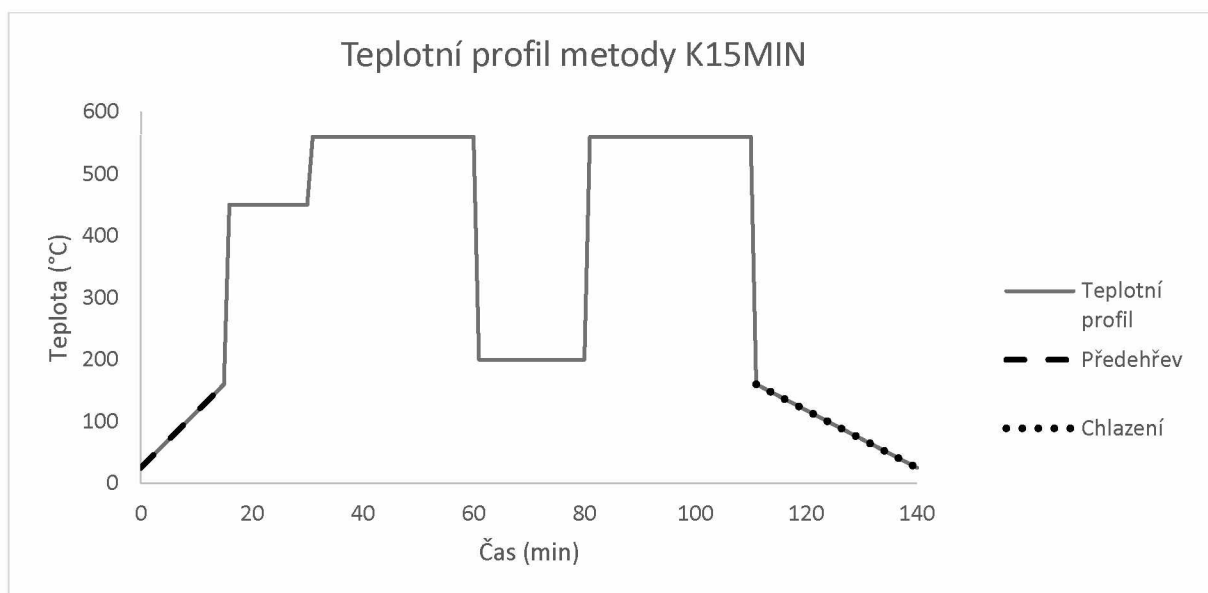
1.3. Rozklad vzorku pro stanovení dusíku, fosforu a draslíku

Následující postup předchází stanovením popsáním v kapitole 1.4., 1.5. a 1.6.

Pro rozklad bylo použito mineralizační zařízení Büchi Speeddigester K-439 + Scrubber B-414. Byly odváženy přibližně 3 g vzorku. Vzorek byl kvantitativně převeden do rozkladné

tuby a bylo přidáno 10ml koncentrované kyseliny sírové. Mineralizační zařízení bylo nastaveno na metodu rozkladu „K15MIN” (průběh metody graf 1). Rozkladné tuby byly umístěny do mineralizačního zařízení (Büchi Speeddigester K-439) a byl spuštěn přehřev. Skrz nálevky s fritou bylo do tub vpraveno 10ml H₂O₂. Byla zapnuta chladicí voda a odtah par Scrubber B-414. [2]

Po 60 minutách bylo přes frity přidáno dalších 10 ml H₂O₂. Po skončení programu byly rozkladné tuby vytaženy a nechaly se vychladnout na laboratorní teplotu. Následně byl obsah v tubě zředěn a přes filtr 100psc zfiltrován do odměrné baňky o objemu 250ml. Po vytemperování byla baňka doplněna po rysku a řádně promíchána. Stejným postupem, ale bez navážky se provede slepý pokus. Výsledek mineralizace dále v postupech nazývám mineralizát. [2]



Graf 1 Teplotní profil metody

1.4. Stanovení celkového dusíku

Stanovení celkového dusíku bylo provedeno dle SOP 6 (ta má zdroje [43] [44]). Zařízení využitá v stanovení jsou destilační stroj s vodní parou Büchi Kjelflex K-360 a automatický titrátor Titroline easy. [2]

Destilační zařízení bylo uvedeno do provozu a byla provedena kalibrace titrátoru na pufrů o pH 4,01 a 7. Do jímací baňky byla vložena pH elektroda a titrační nástavec. Do zařízení byla vložena prázdná tuba a byl spuštěn program „CLEANING”. Po vyčištění zařízení bylo do destilační tuby napipetováno 50ml slepého vzorku (z kapitoly 1.3.). Po umístění vzorku a spuštění zařízení začala destilace. Do destilační tuby se vzorkem bylo nadávkováno 40ml

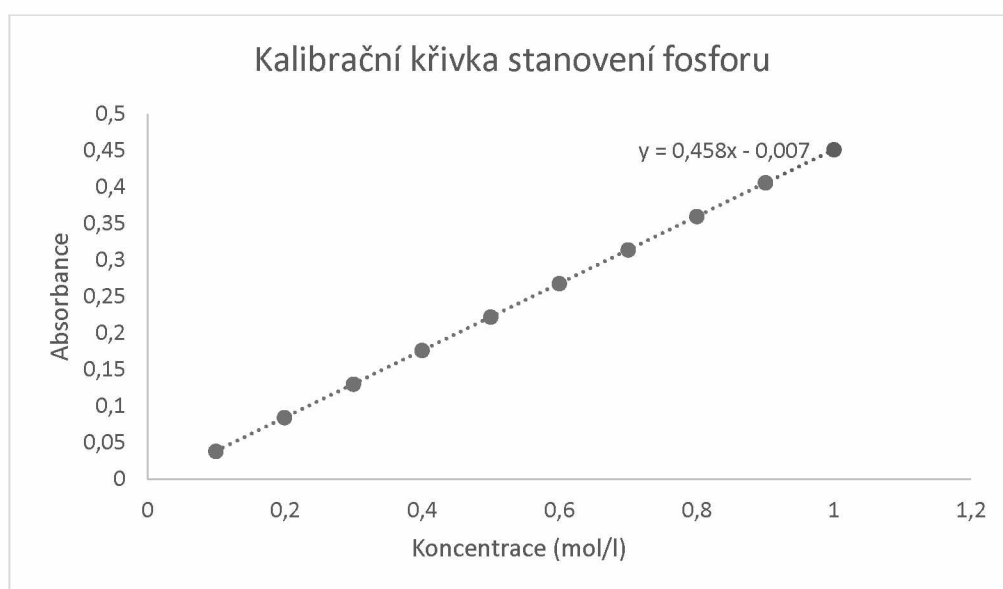
NaOH a do jímací baňky 60ml ml 4% H₃BO₃. Po skončení destilace začne automatická titrace jejímž výsledkem je spotřeba, která je uvedena na titrátoru v mililitrech HCl. [2]

1.5. Stanovení celkového fosforu

Stanovení celkového fosforu vychází z SOP 11 (ze zdroje [45] [44]). Činidlo 1 se připraví z 2,35 g vanadičnanu amonného a 8 ml 65% kyseliny dusičné. Vanadičnan amonný se rozpustí ve 500 ml destilované vody a následně se přidá 8 ml kyseliny dusičné. Celý objem se přelije do 1 l odměrné baňky a dovede k rysce destilovanou vodou. Činidlo 2 se připraví z 100 g tetrahydrátu molybdenanu amonného a 10 ml čpavku. Molybdenan se rozpustí ve 500 ml vody, poté se přidá 10 ml čpavku. Celý objem se přelije do 1 l odměrné baňky. [2]

Do odměrné baňky o objemu 100 ml bylo napipetováno 25 ml mineralizátu. Totéž bylo provedeno i u slepého vzorku a u vzorku IRM 1436. Poté byl do kádinky smíchán příslušný objem činidel. Na každý vzorek bylo připadá 10 ml činidla 1 a 10 ml činidla 2. Odměrné baňky byly doplněny po rysku a nechány stát po dobu 60 minut. Samotné měření probíhalo pomocí spektrofotometru GENESYS 50 UV-VIS při vlnové délce 420 nm. [2]

V zařízení byla uložena kalibrační křivka (graf 2). Nejprve bylo provedeno nastavení nulové hodnoty na slepém vzorku a ověření přesnosti na vzorku IRM 1436. Poté bylo zahájeno samotné měření. [2]



Graf 2 Kalibrační křivka stanovení fosforu

1.6. Stanovení celkového draslíku

Celkový obsah draslíku byl stanoven pomocí atomové absorpční spektrometrie, konkrétně na zařízení ICE 3000 Series AA spectrometer. Toto zařízení může pracovat ve třech režimech (Flame, Furnace a Vapor). V tomto postupu byl použit režim Flame. Palivo dodávané do hořáku bylo acetylen. [2]

Byl spuštěn program Solaar a podle jeho pokynů byla změřena kalibrační řada spolu s blankem (slepým vzorkem). Po dokončení kalibrace je zařízení připraveno k samotnému měření. Hadička byla zavedena do mineralizátu z kapitoly 1.4. a měření bylo spuštěno. Program převede naměřenou absorbanci na koncentraci pomocí kalibrační křivky. [2]

1.7. Stanovení obsahu sušiny a popela

Metoda spočívala ve vysoušení vzorků až do dosažení konstantní hmotnosti při teplotě $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Zdroj této metody je [46]. Toto stanovení nemá aktuálně žádnou platnou normu. Stanovení probíhá v žíhací peci při $550\text{ °C} \pm 25\text{ °C}$.

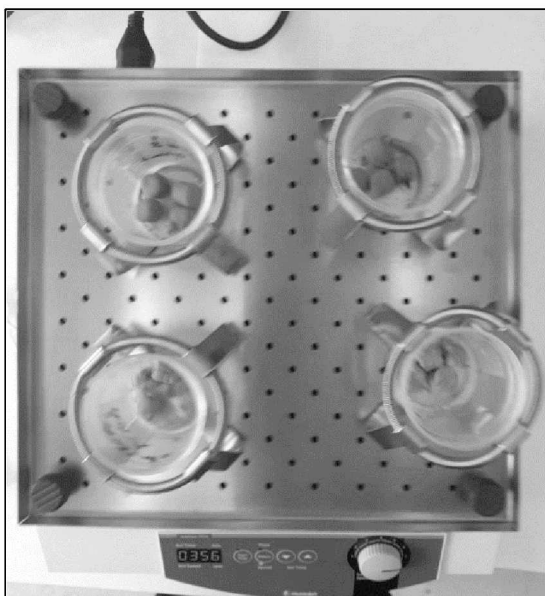
Keramický kelímek byl před zkouškou sušen po dobu 30 minut při teplotě 105 °C . Po vysušení byl umístěn do exsikátoru. Vychlazený kelímek byl zvážen s přesností na 1 mg a jeho hmotnost byla zaznamenána. Následně byl do kelímku navážen vzorek. Navážka vzorku byla volena tak, aby po sušení zůstalo alespoň 0,5 g vysušeného materiálu. [2]

Kelímek s vzorkem byl umístěn do sušárny. Po uplynutí 6 hodin byl kelímek vyjmut, nechal se vychladnout v exsikátoru a následně byl zvážen. Po tomto vážení byl opět přemístěn do sušárny a znovu sušen. Pokud se hmotnost při následném zvážení neměnila o více než 0,5 % nebo 2 mg, byla tato hodnota považována za konstantní. V případě větší změny se postup sušení opakoval, dokud nebyla splněna tato podmínka. [2]

Kelímek s vzorkem po stanovení sušiny byl umístěn do pece a minimálně hodinu žíhán. Po ukončení žíhání byl kelímek přemístěn k vychladnutí do exsikátoru. Po zvážení vytemperovaného kelímky byl opět umístěn do pece a dále žíhán. Pokud se hmotnost při následném zvážení neměnila o více než 0,5 % nebo 2 mg, byla tato hodnota považována za konstantní. V případě větší změny se postup žíhání opakoval, dokud nebyla splněna tato podmínka. [2]

1.8. Testy mechanické stability

Mechanická stabilita testována v Laboratoři Písek, kde byly k dispozici starší třepačky horizontálního a rotačního typu. Třepačky jsou znázorněny na obrázku 8 a 9. Další měření stability a testy s cílem destrukce pelet proběhly na univerzitní třepačce Heidolph Unimax 1010, jako držáky byly použity takzvané Tulipány 500.



Obrázek 8 Univerzitní planetární třepačka Heidolph Unimax 1010



Obrázek 9 Třepačka Laboratoř Písek s horizontálními kmity



Obrázek 10 Třepačka Laboratoř Písek s rotačním pohybem

2. Výsledky solidifikace jednotlivých sorbentů

V této práci jsem jako vstupní materiál pro solidifikaci používala tři typy tekutého odpadu z procesu anaerobní digesce. Jednalo se o digestát ze Střížova (provozovatel Úslava Bioenergie a.s. [47]), fugát z Písku (provozovatel Smart BioEnergy s.r.o. [48]) a směsi eluátu z jednotlivých experimentů.

Digestát i fugát pocházejí z bioplynových stanic, které své fermentory krmí výhradně zemědělskými produkty nikoli odpady nebo kaly. Bohužel separace fugátu v Písku skončila, a tak mi z něj zbylo pouze velmi omezené množství, které stačilo na poslední experiment.

Eluáty bylo nutné smíchat z několika experimentů, protože jejich množství po ukončení všech stanovení (které z rozsahových důvodů nejsou obsaženy v této práci) bylo velmi nízké. Rovněž na stanovení všech parametrů směsi byly potřeba nemalé navážky.

Dále tedy bylo pracováno s těmito třemi směsmi:

- **Směs 1** vznikla smícháním zbytků eluátů vzorku 1702TWF9 až 1702TWF14. Výsledná hmotnost směsi byla 27 g. Z této směsi byl připraven vzorek 1702TWU15.
- **Směs 2** vznikla smícháním zbytků eluátů 1702TWF16 až 1702TWF21 a 1702TWD17 až 1702TWD23. Vzhledem k většímu množství vzorku tak hmotnost byla 55 g. Z této směsi byl připraven vzorek 2703TWU1.
- **Směs 3** vznikla smícháním eluátů 1503TWD1, až 1503TWD6 a 2703TWD2 až 2703TWD4. Bylo smícháno tolik eluátů, aby vzniklo větší množství. Po smíchání bylo 67 g. Z této směsi byl připraven vzorek 1804TWU6.

2.1. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 1702TW

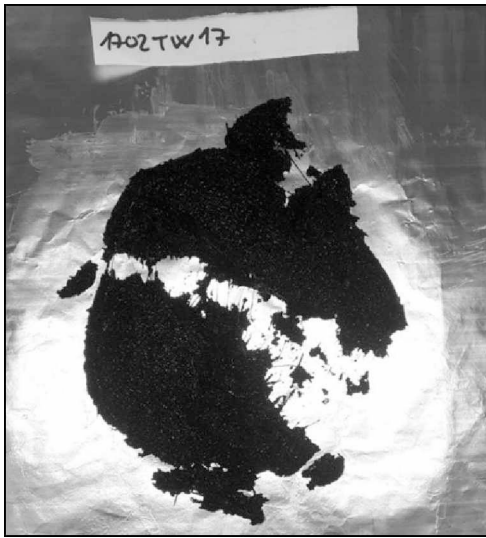
První série testů byla prováděna se stejným sorbentem jako v mé bakalářské práci. V tomto pokusu byla použita jinou matici, a to konkrétně digestát z bioplynové stanice Strážov. V tabulce 2 jsou obsaženy navážky sorbentů a podíl separované tekutiny.

Tabulka 2 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 1702TW

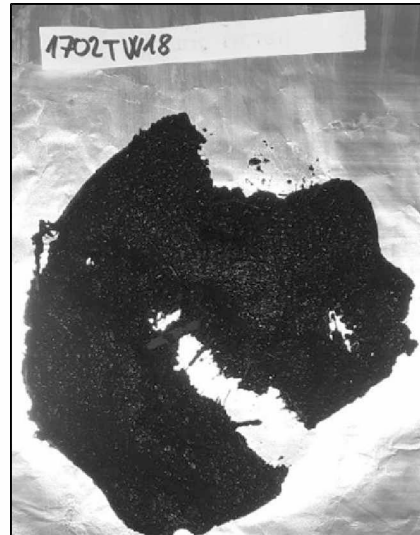
Číslo experimentu	Násada digestátu (g)	Násada složky 1702TWA (g)	Násada složky 1702TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
1702TWD17	140,6	7,0	4,2	106,7	37,4	36
1702TWD18	141,8	6,5	3,9	110,0	35,0	34
1702TWD19	140,1	6,5	3,6	111,7	23,6	21
1702TWD22	139,7	7,5	4,2	117,8	26,9	25
1702TWD23	141,4	6,0	3,6	111,7	29,1	28

Digestát pro svou solidifikaci potřeboval poloviční navážku sorbentu než testy na fugátu. Opět nejlepší výsledek se dostavil u vzorků s nejvyšší navážkou sorbentu tedy 1702TWD22 a 1702TWD17 (obrázek 14 a 11). Postupně se snižující se navážkou účinek Solidifikace klesal. Nejúčinnější poměr v množství sorbentu a pevnosti koláče je u 1702TWD18 a 1702TWD19 (obrázek 12 a 13). Experiment pro digestát jsem ukončila u vzorku 1702TWD23 (obrázek 15), jelikož koláč začal působit jako bahno a lepil se na podložku.

Dle očekávání se sušina solidifikátů podstatně zvýšila, a to až dvojnásobně. U solidifikátů se zvýšila z 7,5 % na 15-17 %. Naopak pro separované tekutinu klesla na 3 %.



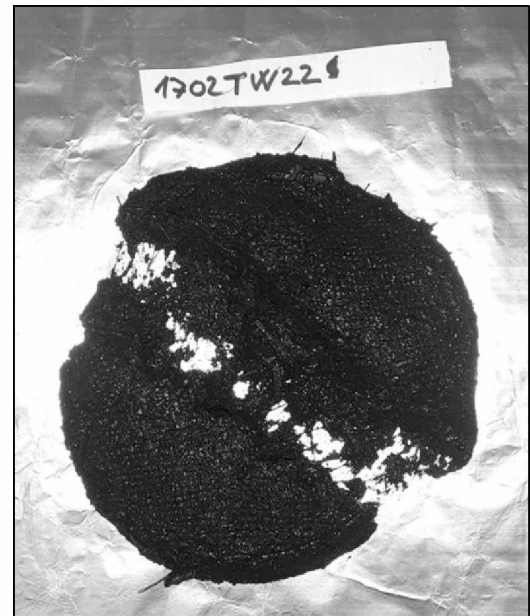
Obrázek 11 1702TWD17S



Obrázek 12 1702TWD18S

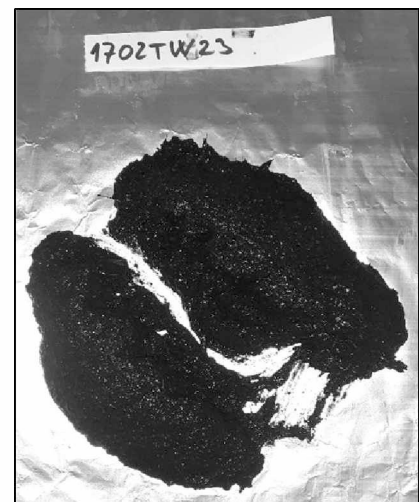


Obrázek 13 1702TWD19S



Obrázek 14 1702TWD22S

Obrázek 15
1702TWD23S



2.2. Solidifikace fugátu pomocí sorbentu 2311TW

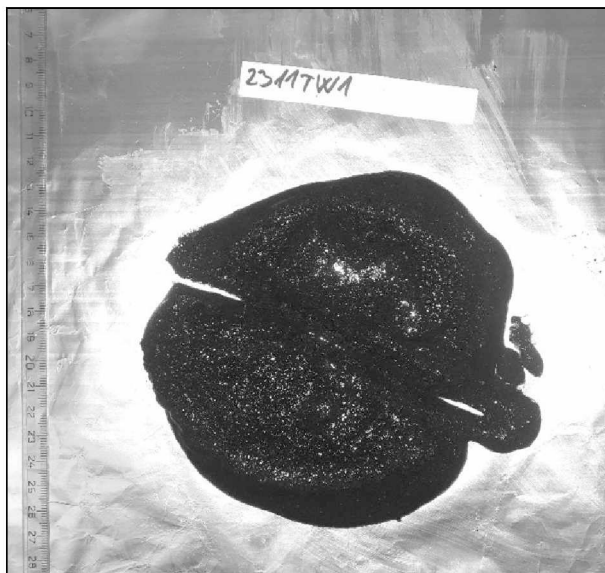
Pro docílení ještě lepších vlastností byl vytvořen další sorbent a dále testován. Vzhledem k ukončení separace fugátu v BPS Písek jsou toto jediné testy na fugátu v této práci. V tabulce 3 jsou zapsány navážky matrice a násad pro experiment 2311TW.

Tabulka 3 Složení vzorků připravovaných z fugátu a sorbentu 2311TW

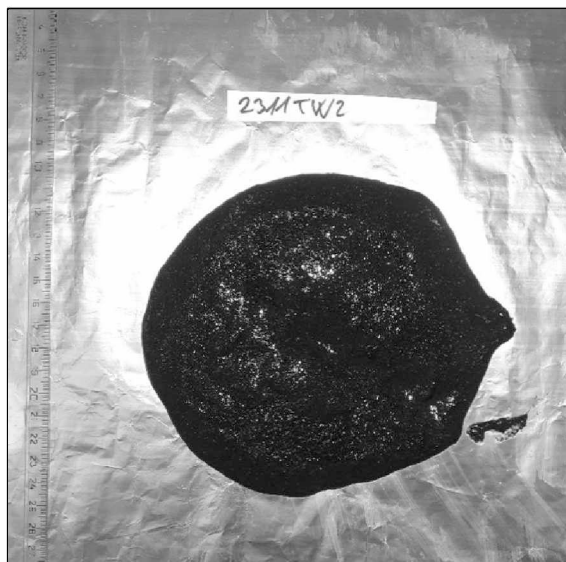
Číslo experimentu	Násada fugátu (g)	Násada složky 2311TWA (g)	Násada složky 2311TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
2311TWF1	140,6	15	8,4	133,5	14,8	12
2311TWF2	140,9	16	10	114,7	22,5	21

Solidifikace pomocí sorbentu 2311TW nebyla vůbec úspěšná. Vzhledem k neznalosti míry solidifikace nového sorbentu byla vzata stejná navážka, která u předcházejícího sorbentu (1702TW) fungovala. Tato navážka byla nízká, jak je vidět na vzorku 2311TWF1 (obrázek 16). Po zvýšení se nedostavil o mnoho lepší výsledek u vzorku 2311TWF2 (obrázek 17).

Ačkoli se sušina zvýšila z původních 4,5 % na 17,9 % a 18,3 % tak konzistence je nevyhovující. Vzhledem k sušině separované tekutiny, která je 6,4 % a 8,9 % to vypadá, že vzniklá směs byla natolik řídká, že částice sorbentu protekly do separované kapaliny.



Obrázek 16 2311TWF1S



Obrázek 17 2311TWF2S

2.3. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 2311TW

Stejný sorbent byl vyzkoušen i na digestátu. Zde jsou pouze dva vzorky, protože při experimentu nebyl dostatek sorbentu 2311TW. Tabulka 4 shrnuje složení jednotlivých experimentů a výsledné množství solidifikátu a separované tekutiny.

Tabulka 4 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 2311TW

Číslo experimentu	Násada digestátu (g)	Násada složky 2311TWA (g)	Násada složky 2311TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
2311TWD3	140,8	6,5	3,6	105,5	28,9	29
2311TWD4	139,8	7,5	3,9	108,8	27,8	28

Sorbent 2311TW s digestátem fungoval lépe než v případě fugátu. Bude to důsledek vyšší sušiny digestátu. Vzniklé vzorky 2311TWD3S (obrázek 18) a 2311TWD4S (obrázek 19) jsou v porovnání s pevností vzorků v případě sorbentu 1702TW velmi blátivé a řidší. Též mají tendenci se roztékat. Sušina zde stoupla z 7,5 % na 15,5 %.



Obrázek 18 2311TWD3S



Obrázek 19 2311TWD4S

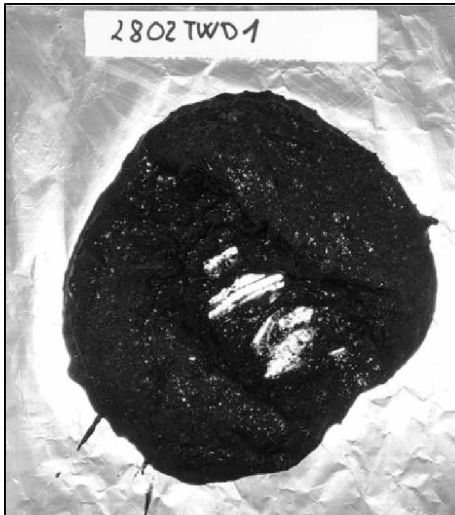
2.4. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 2802TW

Po předchozí neúspěšné solidifikaci byla vytvořena nová receptura a vznikl tak sorbent 2802TW. V tabulce 5 je opět vypsáno složení jednotlivých vzorků a odpovídajících hmotností solidifikátu a separované tekutiny. Jelikož šlo o nový sorbent první navážka byla stejná jako jeden z úspěšných poměrů v pokusu 1702TW.

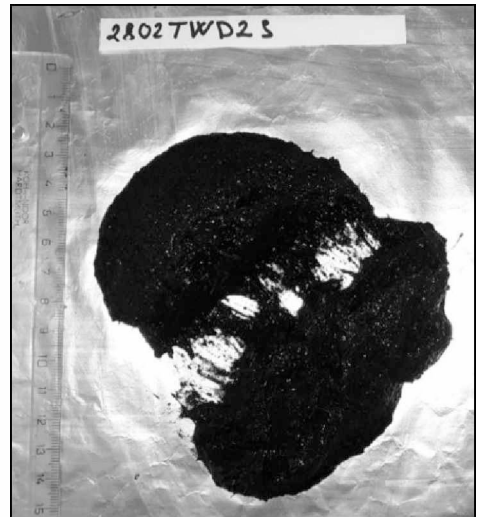
Tabulka 5 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 2802TW

Číslo experimentu	Násada digestátu (g)	Násada složky 2802TWA (g)	Násada složky 2802TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
2802TWD1	139,5	7	4,2	111	19,2	22
2802TWD2	139,2	7	4,7	108	26,2	27
2802TWD3	140,4	8	5,3	121	24,4	25
2802TWD4	139,4	9	6,0	121	20,2	21
2802TWD5	140,5	6	4,0	110	33,5	34
2802TWD6	139,3	10	6,7	120	24,9	25

Vzorek 2802TWD1S (obrázek 20) se roztěkal a konzistencí připomíná bahno. U vzorku 2802TWD2S (obrázek 21) byla zvednuta navážka sorbentu 2802TWB přibližně o 10 % a vzorek znatelně zhoustnul. V tomto poměru bylo pokračováno v přidávání. U vzorků 2802TWD3S (obrázek 22) a 2802TWD4S (obrázek 23) bylo krásně vidět, jak zvyšováním navážky vzorků dochází k lepší solidifikaci. Vzorek 2802TWD5S (obrázek 24) velmi připomínal vzorek 2802TWD2S. Nejlepší výsledek ze všech byl 2802TW6S (obrázek 25). Jednalo se o velmi tuhý materiál velmi podobný plastelině. V rámci pokusů na digestátu měl sušinu 18,5 % a pouhé 2,5 % sušiny v separované tekutině.



Obrázek 20 2802TWD1S



Obrázek 21 2802TWD2S



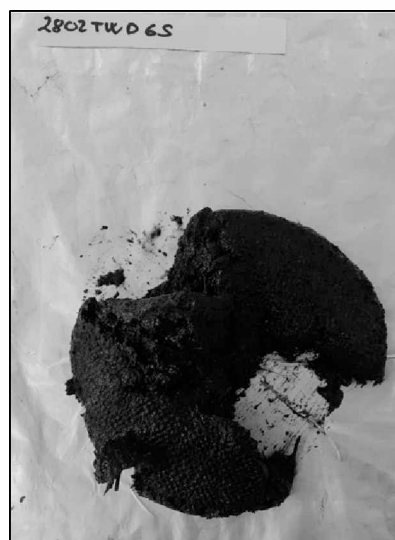
Obrázek 22 2802TWD3S



Obrázek 23 2802TWD4S



Obrázek 24 2802TWD5S



Obrázek 25 2802TWD6S

2.5. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 1503TW

V rámci pátrání po co možná nejlepší složení sorbentu byl vyvinut nový sorbent. Vzniklo tak šest nových vzorků jejich složení je zapsané v tabulce 6.

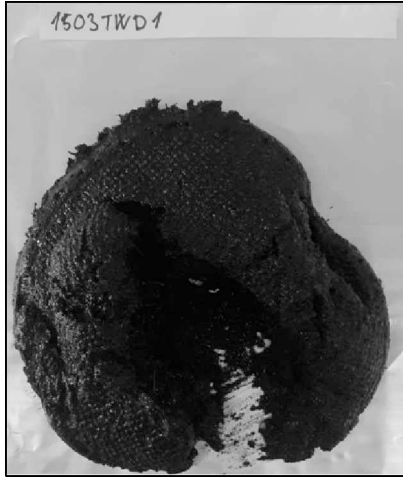
Tabulka 6 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 1503TW

Číslo experimentu	Násada digestátu (g)	Násada složky 1503TWA (g)	Násada složky 1503TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
1503TWD1	139,5	7	4,2	115	25,9	22
1503TWD2	140,5	6	3,6	112	25,6	22
1503TWD3	141,5	8	4,8	117	25,5	21
1503TWD4	141,4	9	5,4	122	25,6	21
1503TWD5	139,9	5	3,0	103	31,3	32
1503TWD6	141,5	4,5	3,2	100	35,4	37
1503TWD12	140,8	16,0	9,80	157,3	5,4	5

Tento sorbent měl nejlepší solidifikaci. Již při nástřelové navážce (solidifikát 1503TWD1S) měl solidifikát vyhovující pevnost (obrázek 26). Při snížení navážky začal být solidifikát mazlavější a znatelně hůř se s ním pracovalo. Jeho konzistence je na obrázku 27. Při ještě dalším snížení navážky sorbentu se ze solidifikátu (solidifikát 1503TWD5S) stala mazlavá a lepkavá hmota. Velmi obtížně se odstraňovala z podložky (obrázek 30). Solidifikát 1503TWD6S byl proveden s nízkou navážkou sorbentu, ale v jiném poměru než předchozí. Konzistence (obrázek 31) je velmi podobná solidifikátu 1503TWD5S (obrázek 30). I sušiny jsou si velmi podobné pro solidifikát 1503TWD5S 14,5 % a pro 1503TWD6S 14,3 %.

Nejlepší výsledek měl vzorek s nejvyšší navážkou sorbentů – tedy 1503TWD4S (obrázek 29). Tento vzorek byl velmi tuhý. Daleko tužší než 2802TWD6S, a to s použitím nižší navážky (na solidifikaci bylo použito pouze 14,4g sorbentů a ne 16,6g sorbentu jako v případě vzorku 2802TWD6S).

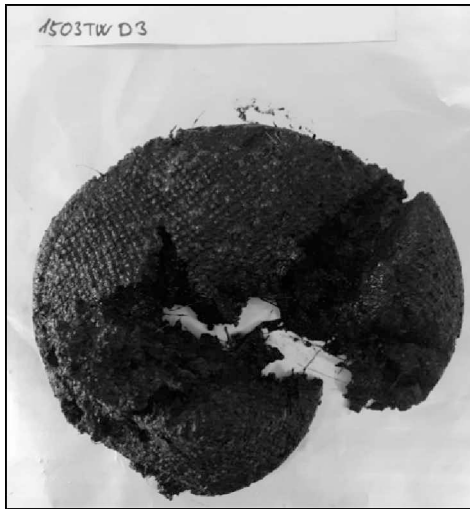
Z grafu 3 a 4 lze pozorovat, že část amonných iontů zůstala obsažena v solidifikátu. Přesné hodnoty z grafu 3 a 4 jsou zapsány v příloze 1. Solidifikát rovněž zachytil větší část fosforu a dusíku. Tento záchyt je nezávislý na množství sorbentů. Dusík, který byl zastoupen ve velkém množství zůstal zachycen v solidifikátu. U vzorku 1503TWD12L nebyla provedena analýza z důvodu nedostatku vzorku. Z grafů je taky patrné, že solidifikáty obsahují větší množství živin než separované tekutiny.



Obrázek 26 1503TWD1S



Obrázek 27 1503TWD2S



Obrázek 28 1503TWD3S



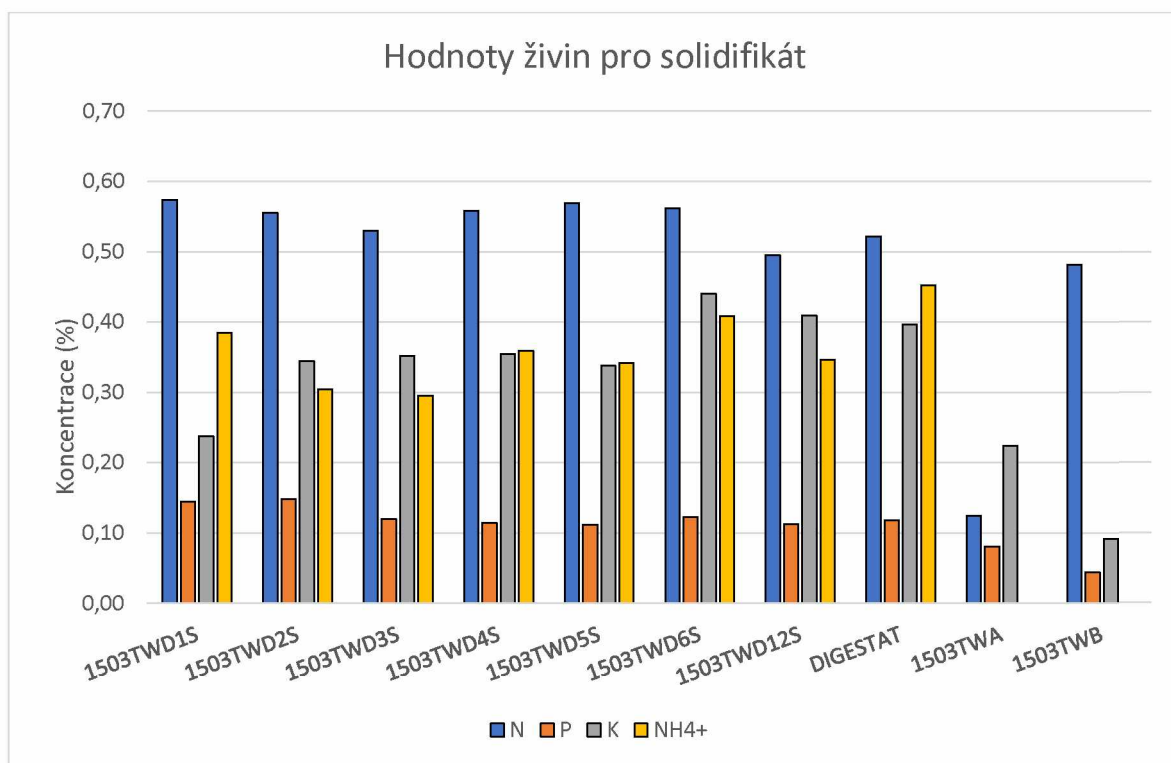
Obrázek 29 1503TWD4S



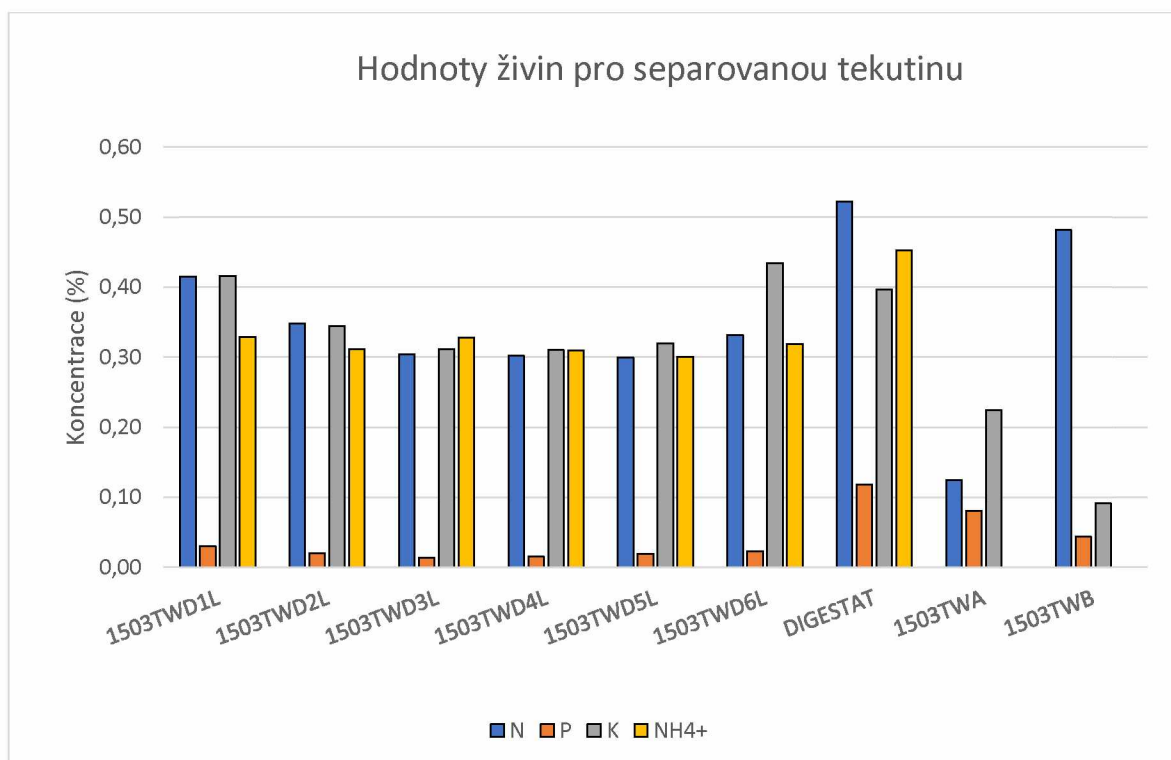
Obrázek 30 1503TWD5S



Obrázek 31 1503TWD6S



Graf 3 Hodnoty živin pro solidifikát ze sorbentu 1503TW



Graf 4 Hodnoty živin pro separovanou tekutinu ze sorbentu 1503TW

2.6. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 2703TW

I přes předchozí velmi úspěšnou solidifikaci přechozího sorbentu byla vyzkoušena další formulace 2703TW. Kvůli pokusu solidifikace eluátu byly zde provedeny pouze 3 pokusy kvůli nedostatku sorbentů. V tabulce 7 jsou zapsány hmotnosti násady a poměry použitých sorbentů.

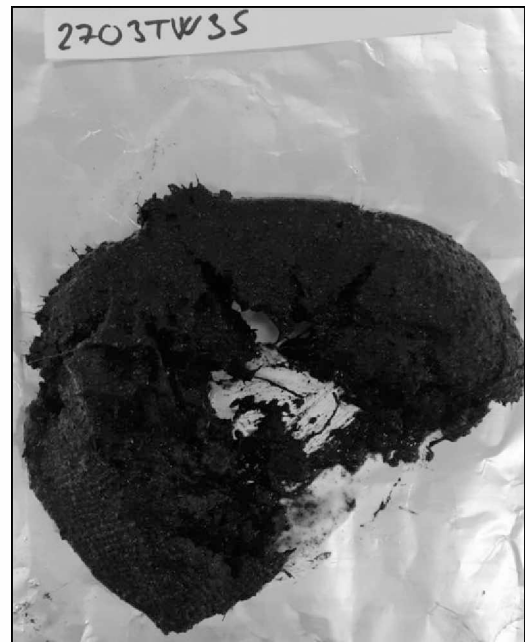
Tabulka 7 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 2703TW

Číslo experimentu	Násada digestátu (g)	Násada složky 2703TWA (g)	Násada složky 2703TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
2703TWD2	139,5	7	4,2	111,3	29,5	30
2703TWD3	140,5	7	5	114,5	29,5	30
2703TWD4	141,5	9	6,4	123,8	19,3	25

Po prvním experimentu je zřejmé že sorbent 2703TW solidifikuje hůře než 1503TW. Již při startovní (2703TWD2S) násadě koláč působil mazlavě a lepil se na podložku (obrázek 32). U vzorku 2703TWD3 byl změněn poměr navažovaných sorbentů. Soudržnost solidifikátu se zlepšila pouze nepatrně jak je vidět na obrázku 33. U dalšího vzorku bylo navaženo sorbentů zvýšila. Výsledek experimentu 2703TWD4 byl uspokojivý (obrázek 34). Pevností se podobal solidifikátu 1503TWD3S. I když byla konzistence vzorku uspokojivá pro ideální výsledek by bylo nutné přidat více sorbentu.



Obrázek 32 2703TWD2S



Obrázek 33 2703TWD3S



Obrázek 34 2703TWD4S

2.7. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 1804TW

Další sorbent nese název 1804TW. Jedná se o předposlední sorbent. V tabulce 8 je složení pěti vzorků ze sorbentu 1804TW.

Tabulka 8 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 1804TW

Číslo experimentu	Násada digestátu (g)	Násada složky 1804TWA (g)	Násada složky 1804TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
1804TWD1	140,8	7	4,2	111,5	34,0	32
1804TWD2	140,9	7	5	114,2	33,5	32
1804TWD3	140,5	8	5,8	119,9	30,7	29
1804TWD4	140,5	9	6,5	127,6	26,1	25
1804TWD5	139,9	10	8,1	131,1	23,9	19

Při startovní navážce (vzorek 1804TWD1) solidifikoval tento sorbent hůř než 1503TW (obrázek 35). Při změně poměru sorbentů u vzorku 1804TWD2 (obrázek 36) byl solidifikát pořad lepivý, ale znatelně méně než solidifikát 1804TWD1S. Konzistence sorbentu se s přidavkem sorbentu zlepšila (vzorek 1804TWD3), jak je vidět na obrázku 37. I přes zlepšení je vzorek stále velmi blátivý a lepivý. Další nepatrné zlepšení se projevilo u vzorku 1804TWD4 (obrázek 38). Nejlepší konzistence se dosáhlo u posledního vzorku 1804TWD5. Solidifikát byl pevný a při řezu držel svůj tvar (obrázek 39). Měl také nejnižší množství eluátu.

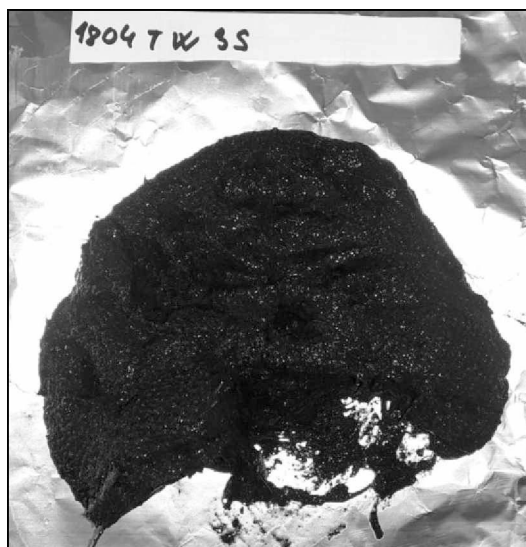
V grafech 5 a 6 je vyobrazeno zastoupení jednotlivých živin v jednotlivých vzorcích. Přesné hodnoty z grafu 5 a 6 jsou zapsány v příloze 2. Množství amonných iontů v solidifikátu postupně stoupá se zvyšující se navázkou sorbentů. Fosfor u tohoto sorbentu unikl do separované tekutiny více než u sorbentu 1503TW. Zato draslík zůstal v solidifikátu ve větším množství než u 1503TW. U vzorku 1804TW5L je výrazný pokles živin, to může být způsobeno chybou při měření. Vzhledem k nízkému množství separované tekutiny nebylo zkoušku možné zopakovat.



Obrázek 35 1804TWD1S



Obrázek 36 1804TWD2S



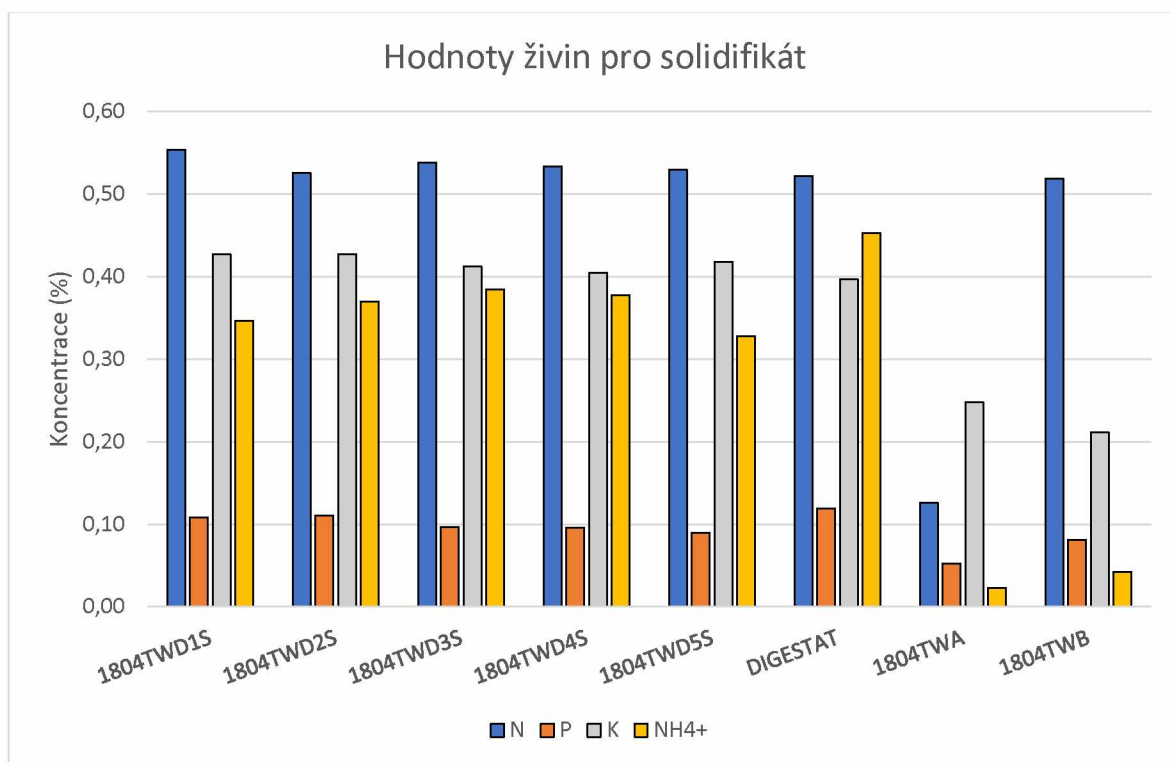
Obrázek 37 1804TWD3S



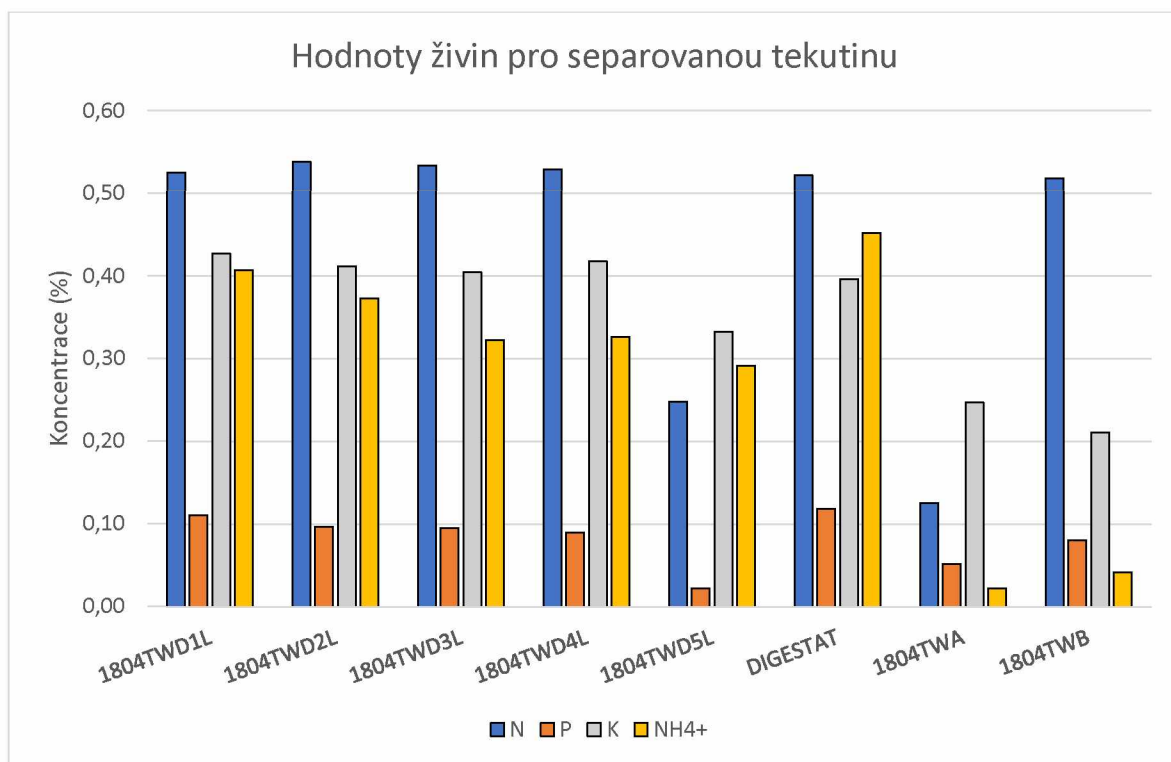
Obrázek 38 1804TWD4S

Obrázek 39
1804TWD5S





Graf 5 Hodnoty živin pro solidifikát ze sorbentu 1804TW



Graf 6 Hodnoty živin pro separovanou tekutinu 1804TW

2.8. Solidifikace digestátu pomocí sorbentu 2610TW

Tato kapitola se zabývá solidifikací pomocí sorbentu 2610TW. Jedná se v pořadí o sedmý otestovaný sorbent a zároveň o předposlední formulaci o kterou se v této diplomové práci budu zabývat. Díky dalším pokusům na tomto sorbentu na tento experiment zbylo malé množství látky. Vznikly pouze dva solidifikáty, jejich složení a zastoupení je v tabulce 9.

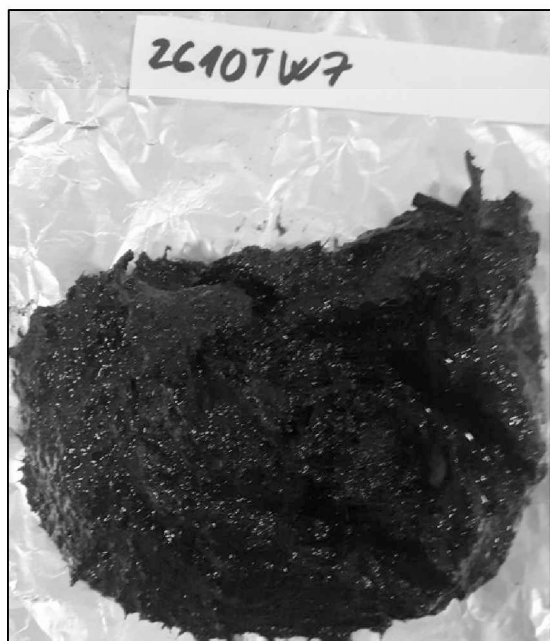
Tabulka 9 Složení vzorků připravovaných z digestátu a sorbentu 2610TW

Číslo experimentu	Násada digestátu (g)	Násada složky 2610TWA (g)	Násada složky 2610TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
2610TWD6	139,3	7	4,2	105,7	42,7	42
2610TWD7	139,2	5,2	3,7	98,5	47,2	45

Tento sorbent měl nejvyšší množství eluátu ze všech otestovaných sorbentů. Na obrázku 39 je 2610TWD6S oproti předchozímu sorbentu 1804TW je mazlavý, velmi blátivý a špatně se s ním manipuluje. Ačkoli na obrázku 40 vypadá vzorek 2610TWD7S soudržně není tomu tak. Tento vzorek byl konzistencí podobný 2610TWD6. Podobal se spíše blátu, lepil se na o podložku a velmi obtížně se s ním pracovalo.



Obrázek 40 2610TWD6S



Obrázek 41 2610TWD7S

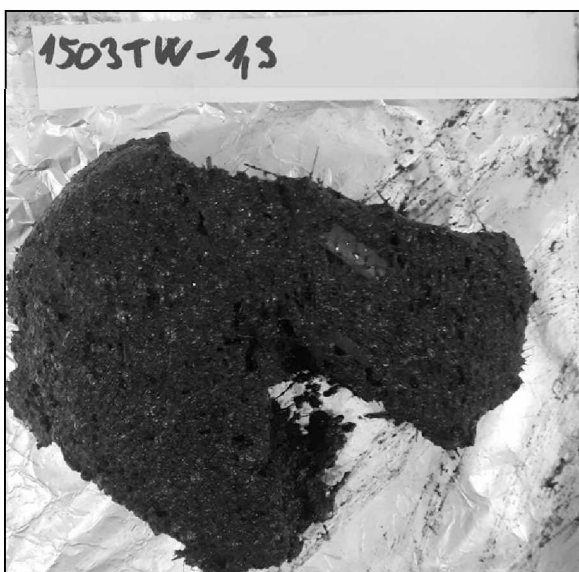
2.9. Vliv poměru sorbentu 1503TWA a 1503TWB

Jedním z dalších experimentů bylo testování vlivu poměru sorbentu 1503TWA a 1503TWB. Navážka digestátu byla vždy 100 ± 1 g a celková hmotnost sorbentů byla 10 g. Byli testovány 4 poměry sorbentů. Tyto násobky jsou zapsány v tabulce 10. Poměry sorbentu použité v tabulce ve výsledkem podílu navážky sorbentu A a sorbentu B.

Tabulka 10 Vliv poměru sorbentů na pevnost koláče

Poměr	Násada digestátu (g)	Násada složky 1503TWA (g)	Násada složky 1503TWB (g)	Hmotnost solidifikátu (g)	Hmotnost separované tekutiny (g)	Objem separované tekutiny (ml)
13:10	100,4	5,65	4,34	81,76	25,74	26
14:10	99,3	5,87	4,16	88,97	18,13	19
15:10	100,3	6	4	82,58	25,3	23
16:10	100,3	6,15	3,85	84,33	24,97	23

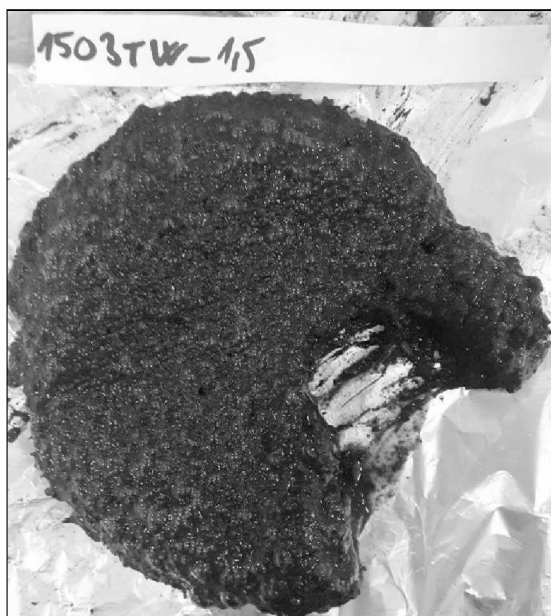
Pokud bychom hleděli pouze na objem odseparované tekutiny tak by poměr 14:10 byl nejlepší volbou (obrázek 43). Ovšem koláč o poměru 13:10 byl ze všech nejpevnější, jak je vidět na obrázku 42. Postupným zvyšováním poměru se koláč stával méně soudržným a více mazlavým. Na obrázku 44 a 45 jsou vidět solidifikáty s poměry sorbentu 15:10 a 16:10. Poměr 15:10 je méně lepivý a mazlavý než 16:10.



Obrázek 42 Solidifikát z poměru 13:10



Obrázek 43 Solidifikát z poměru 14:10



Obrázek 44 Solidifikát z poměru 15:10



Obrázek 45 Solidifikát z poměru 16:10

3. Vznik a zpracování vzniklých eluátů

Původní snaha o nalezení optimálního poměru sorbentů A a B tak, aby nevznikl žádný eluát, byla neúspěšná. Podíl vznikajícího eluátu představuje 18,5 % z celkové hmotnosti, což je značné množství. Proto se dále zaměřuji na jejich další možné zpracování. Eluáty jsou až o polovinu tekutější než digestát. Digestát má sušinu 7,5 % zatím co eluáty průměrně pouze 3,2 %. Barvou i konzistencí připomínají kalnou vodu. Pozitivem je absence zápachu těchto eluátů.

V této kapitole byli zpracovány tři možnosti zpracování eluátů a také doba trvání vzniku eluátů. První testovanou možností zpracování byla solidifikace vzniklých eluátů, jako nové matrice, další testovanou možností byla solidifikace úkapu a jeho opětovné zamíchání do masy. Poslední možností, která byla zkoumána byl přidavek deseti procent eluátu do navážky digestátu.

3.1. Kinetika vzniku eluátů

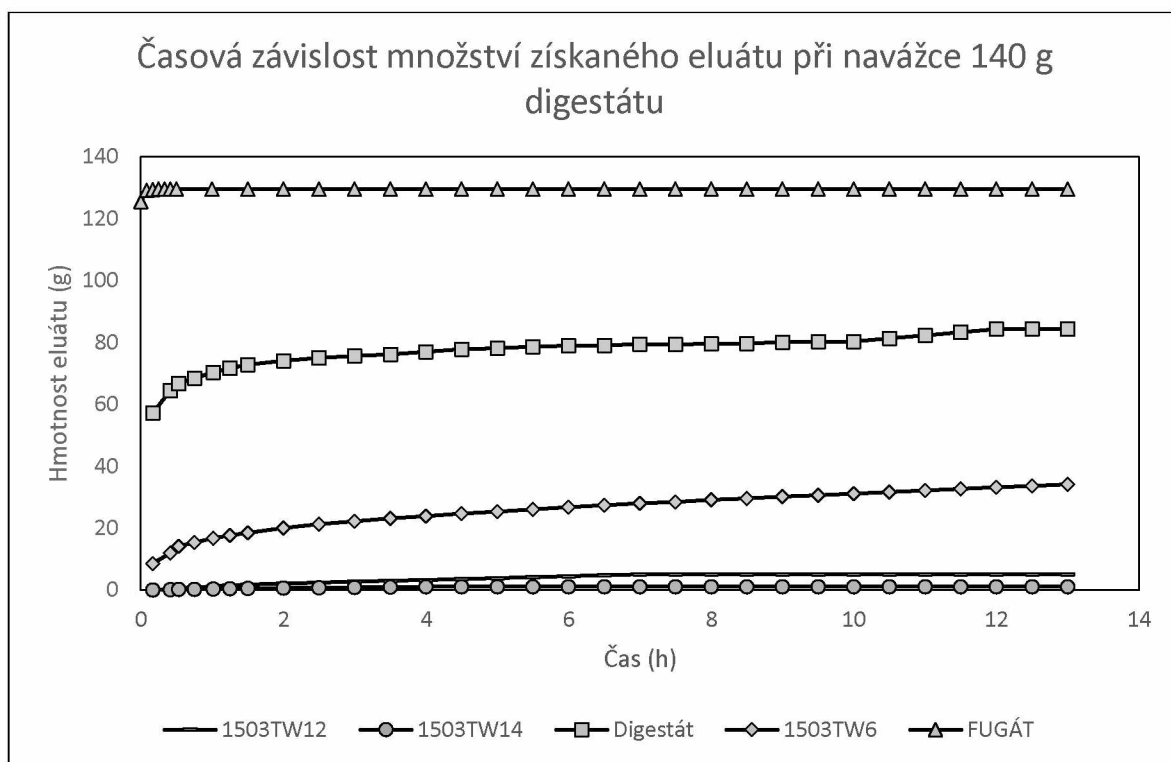
V této kapitole byla studována závislost množství získaného eluátu na čase. Experiment byl prováděn po dobu 13 hodin. Pro experiment s 140 gramovou navážkou byli namíchány 3 vzorky. Jejich složení je v tabulce 9. Objemy eluátu byly první hodinu a půl měřeny po přibližně 15 minutách (přesný čas byl vždy zaznamenán). Po hodině a půl byly hodnoty zaznamenávány každých 30 minut.

Graf 1 zaznamenává průběh vzniku eluátu pro digestát, fugát o navážce 140 g a pro solidifikáty vytvořené z navážky 140 g (tab.11). Vzorek s názvem 1503TWD12 má identické složení jako 1503TWD11 a 1503TWD14 má identické složení s 1503TWD7.

Tabulka 11 Složení vzorků pro měření kinetiky pro 140 g

	Násada (g)	Složka A (g)	Složka B (g)
Fugát	140,1	0	0
Digestát	140,0	0	0
1503TW12	140,2	16,1	9,8
1503TW6	140,3	4,5	3,2
1503TW14	139,5	20,7	9,3

V grafu 7 je patrné, že Solidifikace digestátu výrazně snižuje vznikající množství eluátu. Přibližně po 7 hodinách jímání eluátu již další nepřibýval. Jedinou výjimkou je vzorek 1503TWD6, který se začal ustalovat až při posledním měření v experimentu.



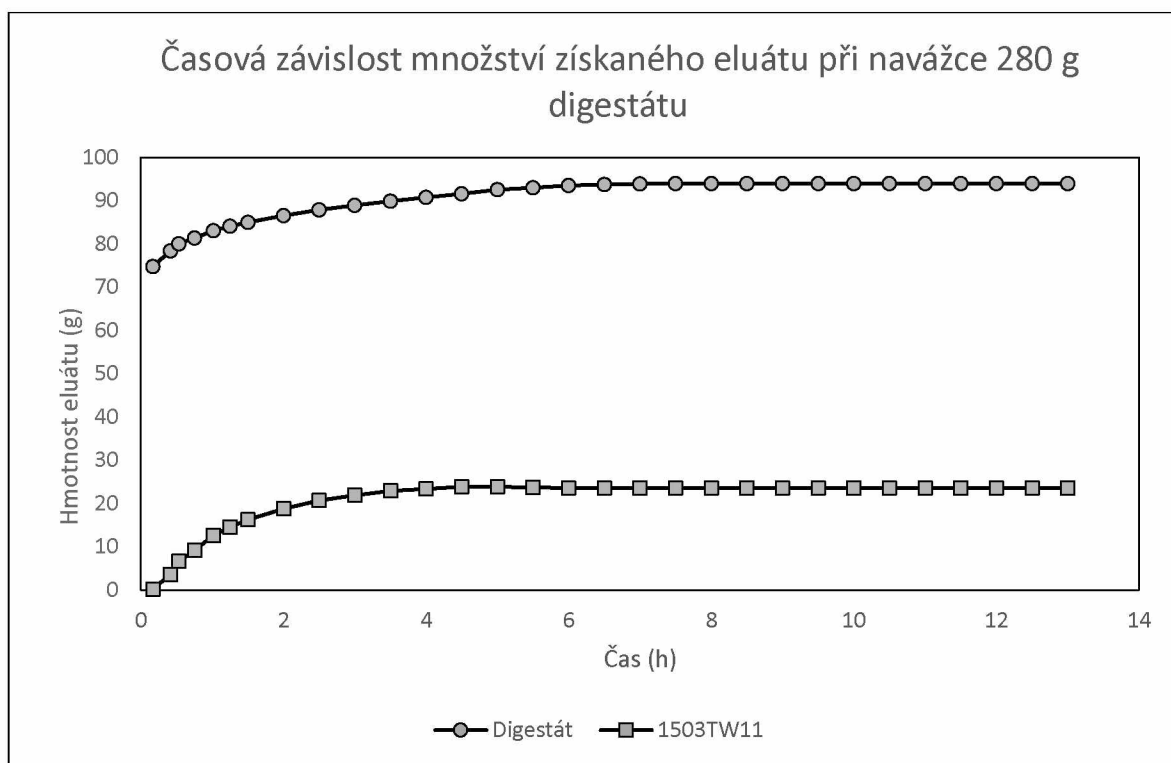
Graf 7 Časová závislost množství získaného eluátu při navážce 140 g digestátu

Experiment s 280 g byl proveden na aparatuře pro vyšší navážky (obrázek 7). V grafu 8 je zaznamenán průběh vzniku eluátu pro digestát o navážce 280 g a pro solidifikát vytvořený z navážky 280 g. Složení solidifikátů je napsané v tabulce 10. 1503TWD11 má identické složení jako 1503TWD12.

Tabulka 12 Složení vzorků pro měření kinetiky pro 280 g

	Násada (g)	Složka A (g)	Složka B (g)
Digestát	260,7	0	0
1503TW11	279,4	32,1	19,6

Z grafu dva je patrné, že přibližně po 4 hodinách přestává eluát intenzivně přibývat a přibližně po 7 hodinách je separace eluátu dokončena. Při porovnání obou grafů je patrné, že při zvětšení nevzniká dle předpokladu dvojnásobné množství, ale téměř pětinasobný. Pro experiment 1503TWD12 byl eluát na konci experimentu 5,1 g a pro 1503TWD11 byl 23,6 g.



Graf 8 Časová závislost množství získaného eluátu při navážce 280 g digestátu

3.2. Solidifikace eluátů pomocí vybraných sorbentů

V této kapitole byly otestovány pouze 3 směsi eluátů. Důvodem k tomu je, že i po sloučení eluátů z několika vzorků je jejich množství poměrně malé, a proto není možné provést více než jeden pokus. Z tohoto malého množství se zhruba polovina odebírá na další stanovení.

Na začátku kapitoly 2. v experimentální části je uvedeno vznik jednotlivých solidifikátů. Objem separované tekutiny zde nebyl zaznamenávám, protože byl nulový anebo neměřitelný. V tabulce 13 jsou jednotlivé násady a matrice pro experimenty s eluáty.

Tabulka 13 Složení vzorků připravovaných ze směsných matic a různých sorbentů

Číslo experimentu	Matrice	Násada eluátu (g)	Násada složky A (g)	Násada složky B (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)
1702TWU15	Směs 1	27,1	3,4	2,1	22,3	5,1
2703TWU1	Směs 2	40,5	11,2	8,3	55,2	0
1804TWU6	Směs 3	35,3	11,0	8,8	53,1	0

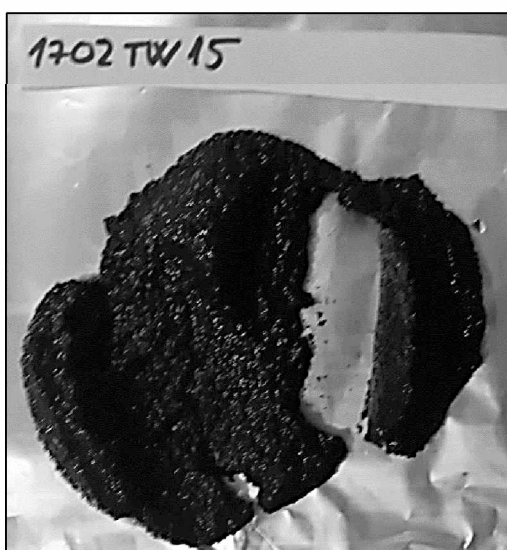
U vzorku 1702TWU15 (obrázek 47) sice byla úspěšná, ale bylo nutné přidat velké množství sorbentu. Aby to šlo porovnat s předchozími pokusy na navážku 140 g by bylo třeba použít 17,8g 1702TWA a 10,7 g 1702TWB. Což vysoce převyšuje nejúčinnější poměry u pokusu s fugátem. Po odkapání přes síto kapalina zbyla, ale objem nebylo možné změřit. Tekutina v odkapávací nádobě měla velkou hustotu. Při přelívání ji nebylo možné kvantitativně dostat do odměrného válečku.

Vzorek 2703TWU1 (obrázek 46) měl výsledek lepší. Tekutiny neunikla již žádná, strukturou se velmi podobal hlině. Bohužel zde byla násada sorbentu ještě vyšší než u předchozího pokusu. Složky 2703TWA bylo 38,5 g a složky 2703TWB 28,7g při solidifikaci 140 g eluátů.

Vzorek 1804TWU6 (obrázek 48) měl podobnou navážku sorbentu, ale na nižší navážku solidifikátu. Vznikl pevný koláč bez eluátů. Násada v přepočtu na 140 g byla 43,7 g sorbentu 1804TWA a 35,0 g sorbentu 1804TWB.



Obrázek 46 2703TWU1S



Obrázek 47 1702TWU15S



Obrázek 48 1804TWU1S

3.3. Podvojná solidifikace

V tomto experimentu je eluát po úplném odvodnění solidifikátu okamžitě zasorbován a zpracován do odvodněného solidifikátu.

Pro tento experiment byl použit sorbent 2610TW, který je identický se sorbentem 1503TW. Byly vybrány dvě nejúspěšnější navážky z předchozích experimentů, a ještě jedna vyšší navážka, která byla navýšena. U všech byl eluát jímám 12 h. V tabulce 14 jsou zaznamenána data k první separaci eluátu od solidifikátu. Podle hmotnosti eluátu byla vypočtena nová navážka sorbentu (tabulka 15). Solidifikát, který vznikl ze zasolidifikováním eluátu byl zamíchán zpátky do již odstátého solidifikátu. Směs byla nasypána na síto a 5 hodin byl sledován vznik eluátu. K dalšímu vzniku již nedošlo.

Tabulka 14 Data po první separaci

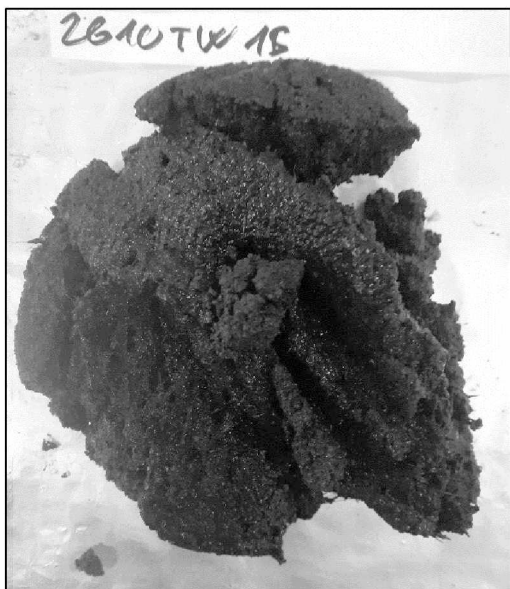
Číslo experimentu	Násada digestátu (g)	Násada složky 2610TWA (g)	Násada složky 2610TWB (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
2610TWD1	139,4	8	4,8	38,6	30
2610TWD3	140,5	9	5,4	35,7	34
2610TWD4	140,1	11	6,6	33,7	30
2610TWD5	140,5	11	6,6	36,2	35

Tabulka 15 Data po druhé separaci

Číslo experimentu	Násada eluátu (g)	g	Násada složky 2610TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)
2610TWD1	38,6	15,2	8,7	170,5	0
2610TWD3	35,7	15,7	9,8	170,0	0
2610TWD4	33,7	14,7	8,7	174,7	0
2610TWD5	36,2	16,2	9,8	178,6	0

Tento postup nebude ideální, nejen že na 100 g digestátu je zapotřebí okolo 29 g sorbentu (složka A a B dohromady), ale jsou tu i další problémy. Jedním z nich je celková pracnost a dvojitá manipulace s jedním vzorkem. To by komplikovalo potenciální průmyslové zpracování nejen z ekonomického hlediska, ale i technologického.

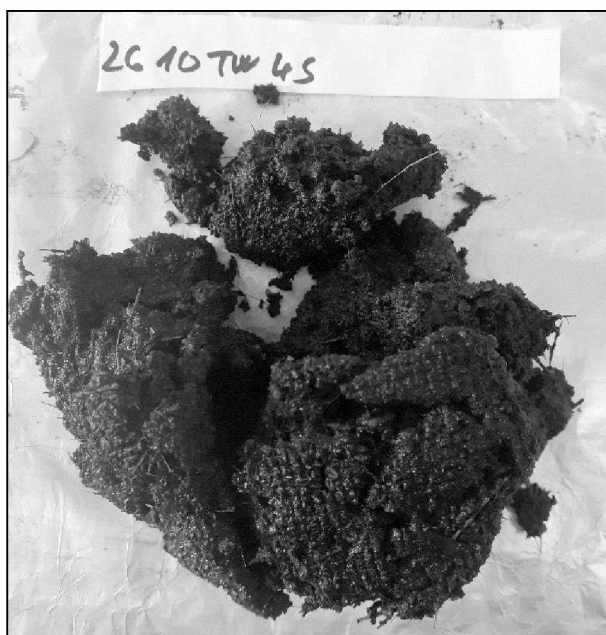
Všeobecně se solidifikace podařila. Vzorky, z tabulky 14 a 15 jsou na obrázcích 49, 50, 51 a 52. Jsou pevné, nezapáchají po digestátu a připomínají vlhkou hlínu.



Obrázek 49 2610TWD1S



Obrázek 50 2610TWD3S



Obrázek 51 2610TWD4S



Obrázek 52 2610TWD5S

3.4. Mísení eluátů s digestátem

Předchozí varianty zpracování eluátů neposkytly dostatečně uspokojivý výsledek. Jako poslední možnost dalšího zpracování nežádoucího produktu solidifikace je vrácení na začátek celého procesu. Tedy přidavek eluátu do digestátu před celým procesem solidifikace.

3.4.1. Solidifikace z násad sorbentů z 1503TWD12

V dalším experimentu bylo přidáno k navážce 140 g digestátu 10 % eluátu. Experiment nese číslo 1503TWDU13. Jako násada bylo použito 141,9 g digestátu a 14,4 g eluátu z experimentu 1503TWD4. O deset procent byla zvýšená i navážka sorbentů.

Jako výchozí srovnávací experiment byl použit 1503TWD12. Data rozdělení hmotností v experimentu 1503TWD12 a 1503TWD13 jsou v tabulce 16. Eluát byl pro tento experiment nově vytvořen dle postupu pro vzorek 1503TWD4.

Tabulka 16 Tabulka množství sorbentů, násady pro experiment 1503TWD12 a 1503TWD13

Číslo experimentu	Násada (g)	Násada složky 1503TWA (g)	Násada složky 1503TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
1503TWD12	140,8	16,0	9,80	157,3	5,4	5
1503TWDU13	156,3	17,6	10,78	168,0	9,6	10

Po řádném odvodnění koláče byl eluát dvojnásobný u experimentu s 10 % přidavkem eluátu oproti čistému digestátu. I přes zvýšenou navážku sorbentů je koláč daleko vlhčí než v experimentu bez úkapů. Vzorek 1503TWD13S oproti 1503TWD12S drží hůře tvar a na folii zanechává vlhké otisky. Rozdíl je vidět na obrázku 54.



Obrázek 54 Porovnání vzorku 1503TWDU13S a 1503TWD12

3.4.2. Solidifikace z násad sorbentů z 1503TWD7

Experiment jsem zopakovala pro poměr, který má ještě vyšší navážku než experiment 1503TWD12. Jedná se o vzorek 1503TWD7, který vznikl při pokusech zvětšování měřítka. Zde nese název 1503TWD14 (obrázek 55), protože byl proveden na standartní násadě 140 ± 1 g.

Vzorek 1503TWDU16 a 1703TWDU17 vznikl z digestátu a eluát 2610TWD2L. K navážce digestátu bylo přidáno 10 % úkapu. Vzorek 1503TWDU16 byl sorbován s navážkou sorbentů o 1,1násobek větší a vzorek 1503TWDU17 s navážkou větší o 1,2násobek. Data rozdělení hmotnosti jsou v tabulce 17.

Tabulka 17 Rozdělení hmotnosti u experimentu přidávání eluátu

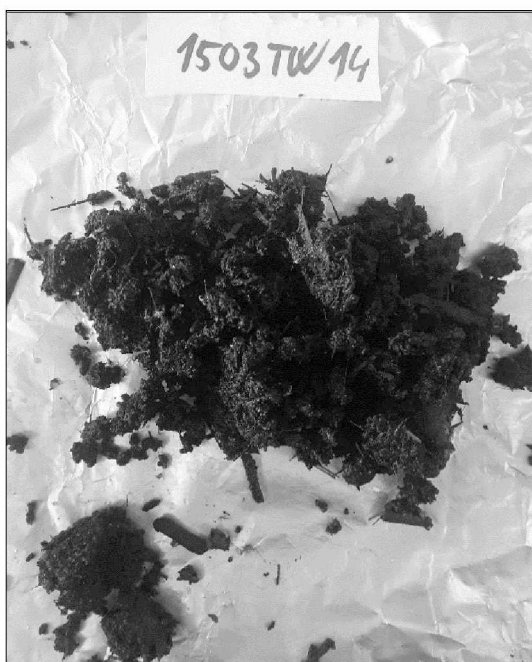
Číslo experimentu	Násada (g)	Násada složky 1503TWA (g)	Násada složky 1503TWB (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
1503TWD14	140,5	20,7	9,4	164,0	1,9	1
1503TWDU16	153,6	22,8	10,3	168,1	15,6	15
1503TWDU17	154,5	24,8	11,3	174,2	9,9	8

Pokud porovnáme experiment z kapitoly 3.3.1 tak v obou vzorcích výrazně přibýlo množství odseparovaných eluátů. I vůči vzorku bez přídatku eluátu množství eluátu vzrostlo

neúměrně. Vzorek 1503TW16S byl velmi mazlavý až bahnivý (obrázek 56). Nechával na folii vlhké otisky. Oproti vzorku 1503TW13S (obrázek 54) byl více soudržnější a tužší.

Z těchto dvou experimentů vyšel nejlépe vzorek 1503TWDU17. I tento vzorek byl mazlavý oproti vzorku bez přídavku eluátu, ale ze všech tří vzorků eluátů nejméně. Měl podstatně lepší konzistenci a dobře držel tvar (obrázek 57).

Přidávání eluátů zpět do digestátu se jeví, jako nepraktické. Eluát zvyšuje obsah vody ve zředěvaném digestátu a tím neúměrně zvyšuje následnou spotřebu sorbentů.



Obrázek 55 1503TWD14S



Obrázek 56 1503TWD16S



Obrázek 57
1503TWD17S

4. Zvětšování měřítka procesu solidifikace

V další fázi mého výzkumu jsem se rozhodla otestovat funkci násad na zvětšení měřítka. Původní hmotnost digestátu (tedy 140 g) jsem zdvojnásobila množství na 280 g digestátu. Pro tuto větší navážku byla i přizpůsobena aparatura. Popis aparatury je v kapitole 1.1. a na obrázku 7 je sestavená.

Experiment 2610TWD2 a 1503TWD11 byl proveden standartním postupem, kdy se provedla solidifikace digestátu a po 12h jímání eluátu byl experiment ukončen. Oproti tomu eluáty z pokusu 1503TWD7 a 1503TWD8 byly opět zasorbovány a zamíchány do vzniklých solidifikátů 1503TWD7S a 1503TWD8S. Směs byla vrácena do síťky a 5 hodin byl sledován vznik eluátu. K dalšímu vzniku již nedošlo. V tabulce 18 jsou zaznamenány hodnoty první sorbce a v tabulce 19 hodnoty pro druhou solidifikaci.

Tabulka 18 Data z první solidifikace

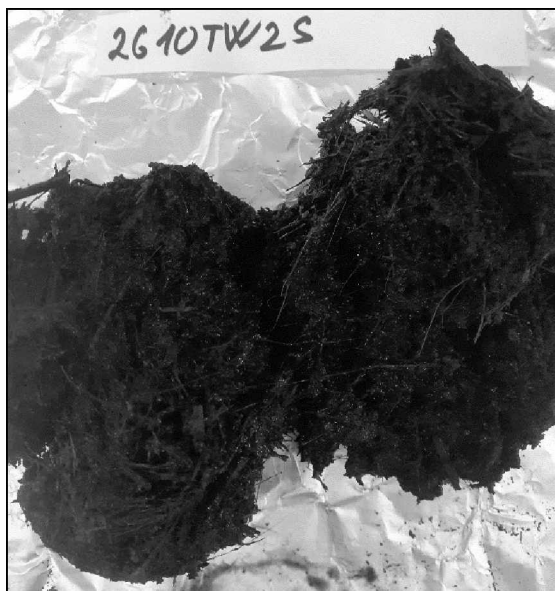
Číslo experimentu	Násada digestátu (g)	Násada složky A (g)	Násada složky B (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)	Objem separované tekutiny L (ml)
2610TWD2	280,9	18	10,8	194,9	86,2	85
1503TWD11	279,4	32,1	19,6	303,3	23,6	20
1503TWD7	281,2	34,6	14,5	X	40,2	39
1503TWD8	280,9	32,2	19,8	X	28,3	27

Tabulka 19 Data po druhé solidifikaci

Číslo experimentu	Násada eluátu (g)	Násada složky A (g)	Násada složky B (g)	Hmotnost solidifikátu S (g)	Hmotnost separované tekutiny L (g)
1503TWD7	40,2	6,9	4,3	299,0	0
1503TWD8	28,3	6,3	3,8	299,6	0

Síťka díky většímu povrchu lépe odvodnila koláče, takže všechny vzorky byly pevné, nemazlavé a připomínaly hlínu. O lepším odvodnění svědčí i pokus, který byl proveden v obou navážkách, tedy 1503TWD11 a 1503TWD12. V případě experimentu 1503TWD11 vzniklo 20ml eluátu a v případě 1503TWD12 pouze 5ml eluátu. To může naznačovat, že při dalším zvětšování bude potřeba poměrově víc sorbentu než na tyto laboratorní pokusy. Ovšem pokus 1503TWD7 byl také proveden na obou navážkách a v případě 140g varianty vznikl pouze 1 ml eluátu. Z toho je zřejmé, že při dobrém poměru lze eluát minimalizovat.

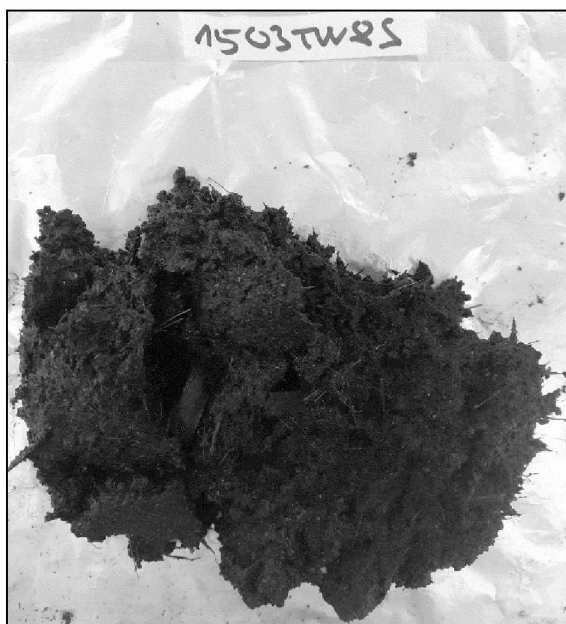
Při experimentech se sítkou bylo zaznamenáno větší množství odparů. U experimentu 2610TWD2 (obrázek 58) to bylo 9,3 % a u experimentů 1503TWD7 (obrázek 59) a 1503TWD8 (obrázek 60) byl odpar nižší 6 %. Tento odpar není ideální, protože se při něm může uvolňovat se nežádoucí látky a ztrácet cenný dusík.



Obrázek 58 2610TWD2S



Obrázek 59 1503TWD7S



Obrázek 60 1503TWD8S

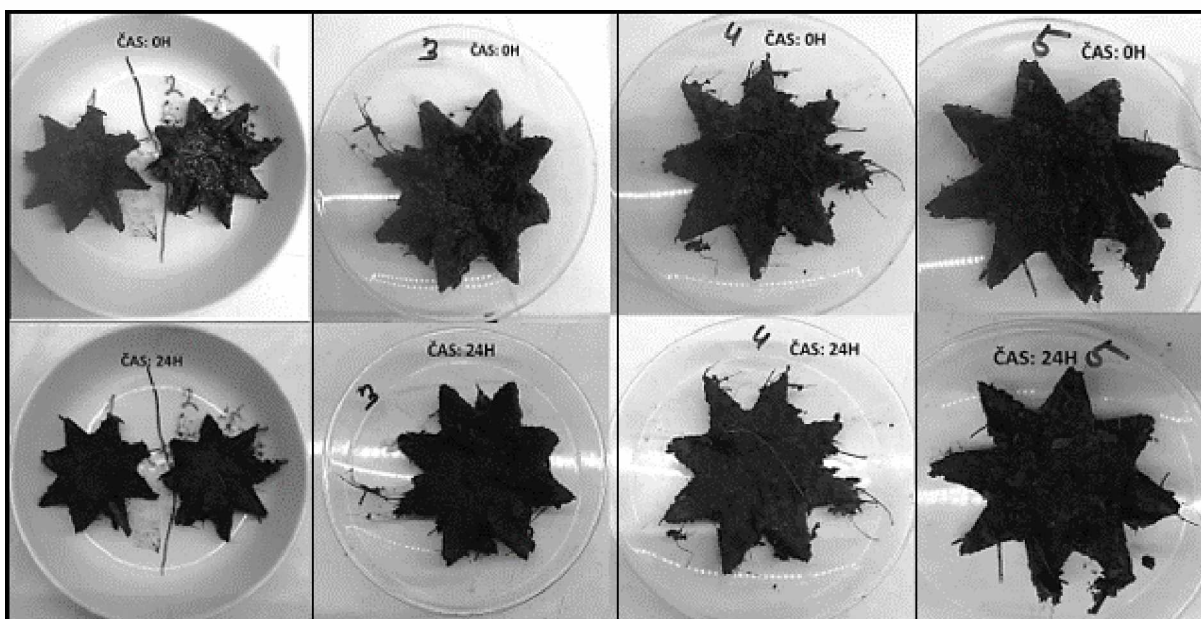
5. Chování solidifikátů z dlouhodobého hlediska

V této kapitole jsem zkoumala několik vlastností solidifikátů. Prvním experimentem bylo zjištění tvarové a hmotnostní stálosti. Po těchto experimentech jsem začala testovat možnost peletování. Vzhledem k lepivosti solidifikátů jsem dále zvolila variantu Obalování a tím zlepšení jejich pevnosti.

5.1. Tvarová stálost

Z pokusu 2610TWD byli pomocí nerezového vykrajovátko o velikosti 6 cm vykrojen tvar hvězdy. Hvězdičky byly následně přeneseny na hodinová sklíčka s popiskem. Sklíčka byla umístěna na temné dobře odvětrávané místo. Celý experiment je znázorněn na obrázku 61. Čísla 1-5 označují poslední číslo z celého kódového označení (2610TWD1 apod.). Popis vzniku těchto solidifikátů je v kapitole 3.2. a 4.

První fotka byla pořízena těsně po vykrojení tvaru a druhá po dvaceti čtyřech hodinách. Tvary na druhé fotce nejeví žádné změny tvaru. Vykrojené tvary jeví jedinou změnu, a to změnu ve vlhkosti.



Obrázek 61 Test tvarové stálosti

Další tvarový test byl proveden na stejné sérii vzorků, ale testoval se tvar pelety. Byly testovány dva rozměry. Jeden typ pelet měl průměr 1,1 cm a délku $3 \pm 0,1$ cm a druhý typ pelet měl průměr 1,1 cm a délku $1 \pm 0,1$ cm. Většina pelet vzorků měla tendenci k vzájemnému slepování. Pelety o délce 3 cm se často při manipulaci lámaly a byly velmi křehké. Zato pelety o délce 1 cm držely pevně svůj tvar.

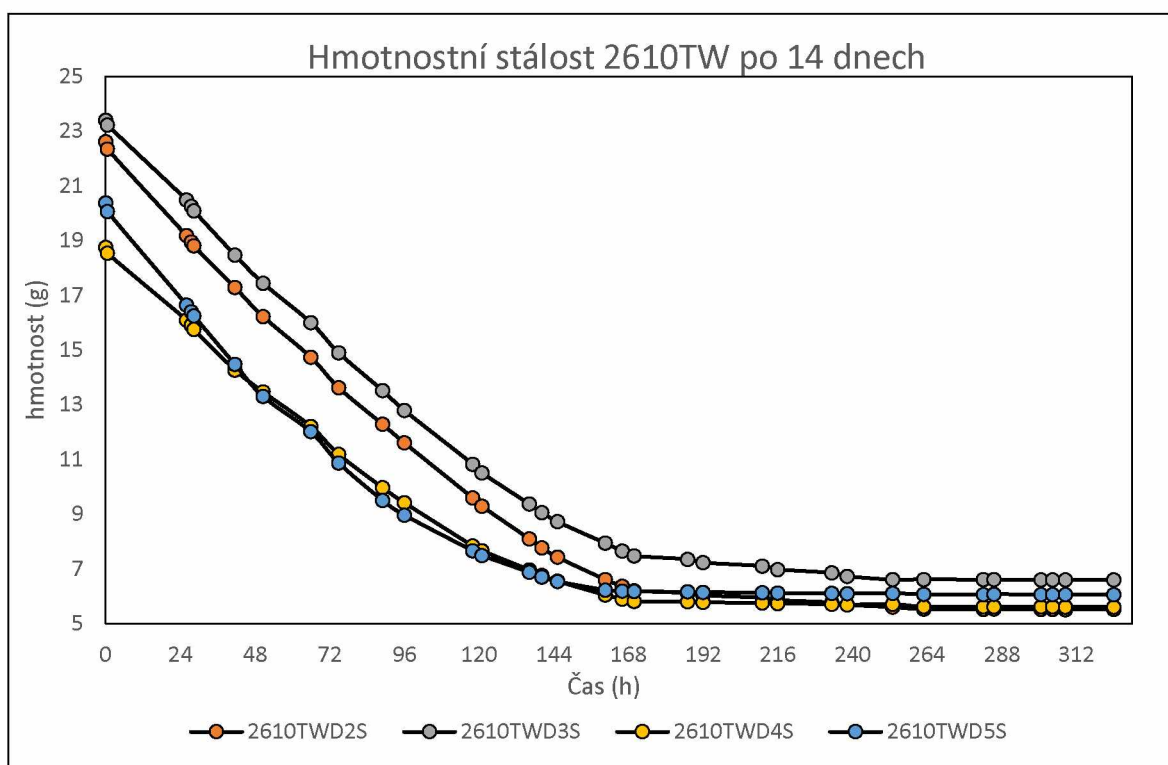
5.2. Hmotnostní stálost

Hmotnostní stálost byla zjišťována u tří řad vzorků. Tyto vzorky byly ze sorbentů 2610TW, 1503TW a 1804TW. Aby byl zajištěn stejný povrch, tak z vzorků bylo kruhovým nerezovým vykrajovátkem o průměru 5 cm vykrojena kolečka.

Hmotnost byla zvážena na počátku experimentu, a pak byla váha koleček zaznamenána přibližně po 12 ±2 hodinách po dobu 14 dnů.

5.2.1. Série solidifikátů ze sorbentu 2610TW

Z grafu 9 lze pozorovat, že neohledně na množství sorbentu mají všechny solidifikáty stejný průběh. Během 168 h (tedy 7 dnů) ztratí solidifikáty svou podstatnou část vody.



Graf 9 Hmotnostní stálost 2610TW za 14 dnů volného stání na vzduchu

I z tabulky 20 je patrné, že množství sorbentu významně neovlivnilo procento odpařené tekutiny. Určité množství sorbentu tu ovšem roli hraje. U vzorků 2610TW3, 2610TW4 a 2610TW5 bylo použito na 100 g digestátu 18 ± 1 g sorbentu A a 10 ± 1 g sorbentu B, zatímco u 2610TW2 bylo použito pouze množství třetinové a to 6,4 g sorbentu A a 3,8 g sorbentu B.

Tabulka 20 Procenta odpařené vody v jednotlivých vzorcích experimentu 2610TW

Vzorek	2610TWD2S	2610TWD3S	2610TWD4S	2610TWD5S
Odpařená voda (%)	75,6	71,8	70,1	70,2
Sušina (%)	91,4	91,3	91,4	91,5

Kolečka se během 14 dnů zmenšila a vytvořila pevné tablety. Sušina dle očekávání vzrostla, z původních 22–27 % na $91 \pm 0,5$ %.

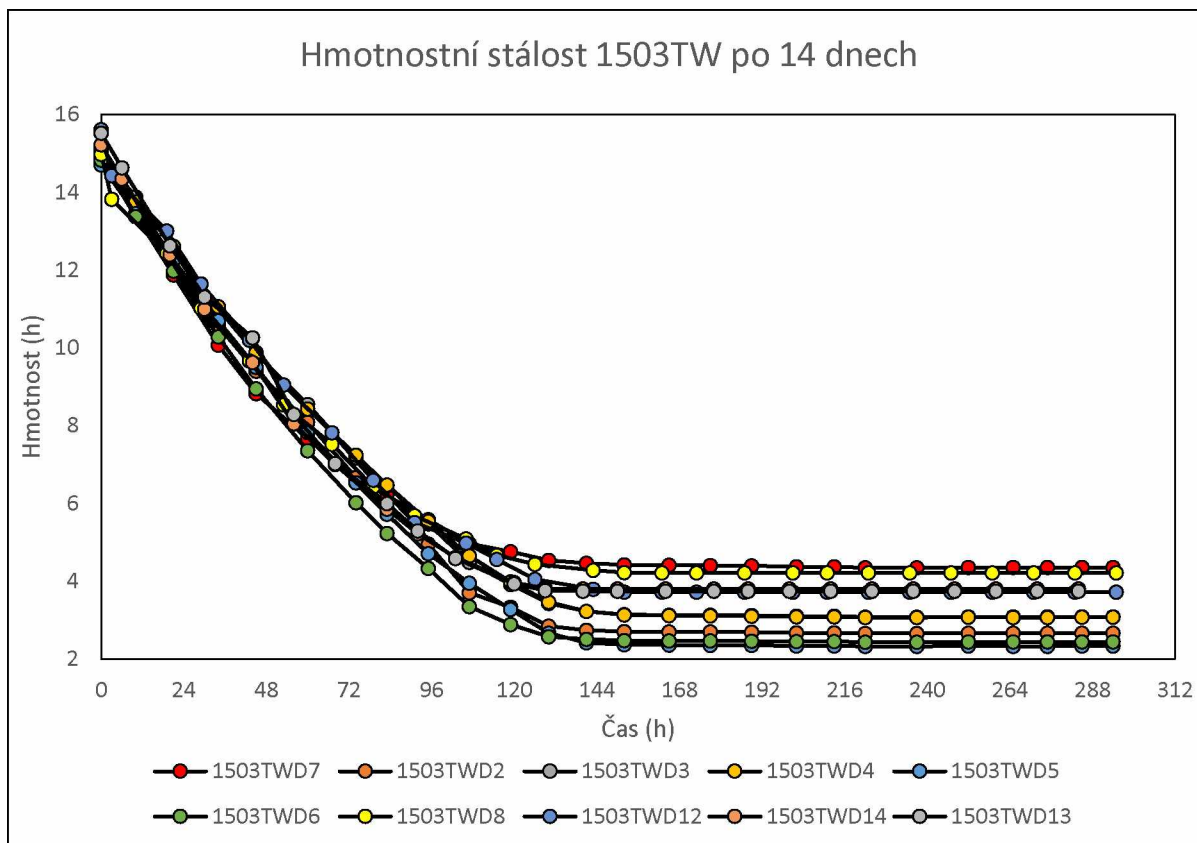
5.2.1. Série solidifikátů ze sorbentu 1503TW

Jako další vzorek byl na hmotnostní stálost měřen i sorbent 1503TW. Zde byly výsledky lepší (tab. 21). Vzorek 1503TWD7 A 1503TWD8 si zachoval nejvíce vody, jak je vidět v tabulce 21 a grafu 10. Oproti předchozímu experimentu je to stejné procento, avšak sušina zde byla průměrně o 3% nižší než u předchozího sorbentu.

Tabulka 21 Sušina a procenta odpařené tekutiny

Vzorek	1503TWD2	1503TWD3	1503TWD4	1503TWD5	1503TWD6
Sušina (%)	87,9	87,5	87,8	88,6	87,8
Odpařená voda (%)	82,0	79,3	79,5	84,1	83,5
Vzorek	1503TWD7	1503TWD8	1503TWD12	1503TWD14	1503TWD13
Sušina (%)	87,8	86,5	86,9	87,3	86,9
Odpařená voda (%)	71,2	71,8	76,2	75,0	75,9

Ačkoli kolečka po 14 dnech ztratila jiná procenta vody vypadala prakticky identicky jako v minulém experimentu.



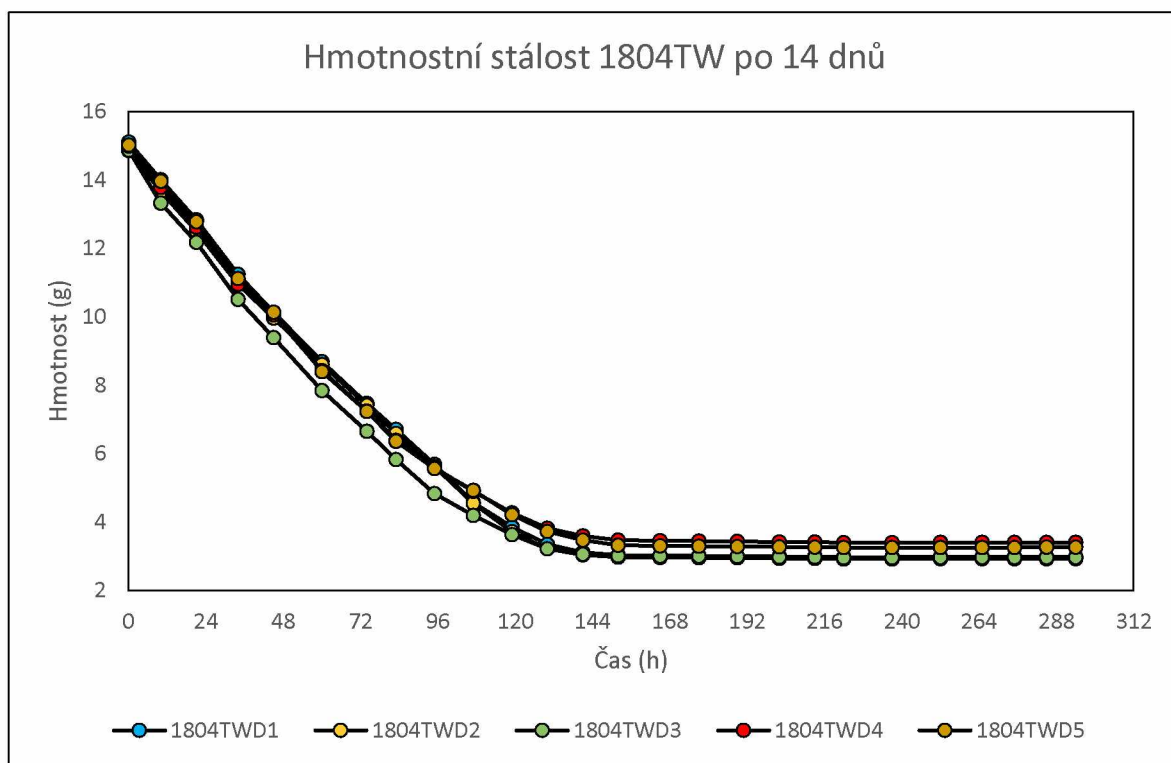
Graf 10 Hmotnostní stálost za 14 dnů volného stání na vzduchu

5.2.2. Série solidifikátů ze sorbentu 1804TW

Poslední měření hmotnostní stálosti bylo provedeno na vzorcích 1804TW. Podobně jako u sorbentu 2610TW se všechny vzorky chovaly identicky, a i odpařená voda a sušina si byly velmi podobné. Větší odchylku v odpařené vodě činí vzorky 1804TWD4 a 1804TWD5. Tento fakt odpovídá tomu, že tyto dva vzorky měly nejvyšší navážku sorbentů v celé sérii (tabulka 8). Hodnoty sušiny a odpařené vody jsou v tabulce 22. Graf, ze kterého lze pozorovat stejné chování všech vzorků nese číslo 11.

Tabulka 22 Sušina a odpařená voda u série 1804TW

Vzorek	1804TWD1	1804TWD2	1804TWD3	1804TWD4	1804TWD5
Sušina (%)	88,2	88,5	88,4	87,8	88,2
Odpařená voda	80,2	80,3	80,0	77,3	78,3



Graf 11 Hmotnostní stálost 1804TW za 14 dnů volného stání na vzduchu

5.3. Obalování pelet

Předchozí experimenty prokázaly, že jsou pelety poměrně křehké a mají tendenci se k sobě lepit. Pro zvýšení pevnosti a zamezení slepování byly použity obalovací látky. Pro tento účel byly vybírané materiály, které jsou hojně a levně dostupné ve větším množství. Navíc by tyto látky dodávaly další potřebné látky do půdy tím by zlepšily hnojivé vlastnosti solidifikátů. Bylo testováno 5 obalovacích látek, a to elementární síra, pálené vápno (CaO), hašené vápno (Ca(OH)₂), periklas (MgO) a dolomit. Všechny materiály vyjma dolomitu jsem obdržela od prof. Ing. Tomáše Weidliche, Ph.D. Dolomit byl zakoupen v prodejně OBI od výrobce Agro v 5kg balení

V jednotlivém experimentu bylo vždy naváženo 15 ± 1 g pelet o rozměrech 1,1 cm x 1 cm, které byly následně obaleny v jednotlivých obalovacích látkách. Na rozdíl od experimentu na hmotnostní stálost byly pelety umístěny v 150 ml kádinkách, kvůli lepší manipulovatelnosti.

V tabulce 23 jsou zprůměrovaná data z obalování tří různých solidifikátů. Z dat jasně vyplývá, že nejnižší spotřeba je u MgO. Naopak nejvyšší spotřeba u dolomitu. Tato skutečnost bude výrazně ovlivněna hmotností jednotlivých obalovacích materiálů. Již na při manipulaci bylo zřejmé, že stejný objem MgO je daleko lehčí než dolomit.

Tabulka 23 Hmotnost potřebná pro obalení 100 g solidifikátu

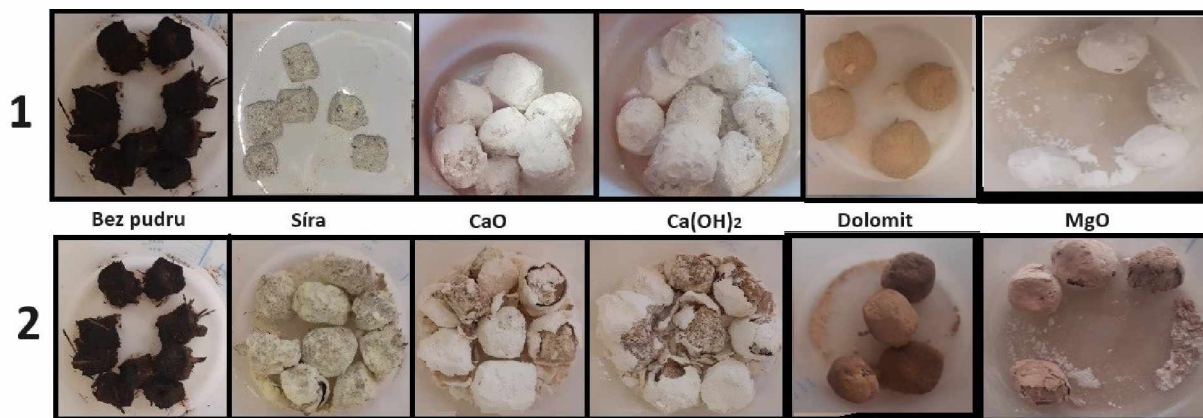
Obalovací materiál	g materiálu na 100 g solidifikátu
Síra	17,5
CaO	27,7
Ca(OH) ₂	29,3
MgO	10,7
Dolomit	69,7

5.3.1. Obalování pelet z experimentu 1503TWD4S

Ze solidifikátu 1503TWD4S bylo vytvořeno 6 pelet. První pelety byly ponechány bez obalovacího materiálu. Tyto pelety měly dobrou soudržnost a měly menší tendenci se lepit. Druhé byly obaleny v síře. Po obalení se pelety k sobě nelepí, ale jejich mechanická stability se nezlepšila. Mají tendenci k deformaci. Třetí pelety byly obaleny v páleném vápnu, tedy v CaO. Pelety se k sobě opět nelepí, ale vápno tvoří velkou vrstvu okolo pelety. Po vytvoření vrstvičky je tato vrstva velmi křehká a citlivá na náraz. Při jakékoliv manipulaci se z ní kousky oddělují. Čtvrté pelety byly obalovány v Ca(OH)₂. Zde byl velmi podobný efekt jako v případě páleného vápna. Vrstvička byla dokonce křehčí než u hašeného vápna. Předposlední test byl na jemně mletém dolomitu. Ten vytvořil relativně malou vrstvičku obalovacího materiálu kolem pelety. Pelety byly díky dolomitu celkově pevnější a oproti síře se méně deformovaly. Poslední testovaným obalovacím materiálem byl oxid hořečnatý (MgO). Tento obalovací materiál držel na peletě v poměrně malé vrstvě. Na rozdíl od vápenných práškových materiálů, tak nebyl vůbec náchylný vůči nárazu.

Pelety byli ponechány čtrnáct dní na temném, ale dobře větraném místě. Na obrázku 61 v řadě označené číslem jedna jsou fotky pelet na začátku testu. V druhé řadě jsou pelety po 14 dnech ležení. Kádinky s peletami byli po dobu experimentu pouze přenášeny k vahám.

Pelety, které byli bez obalovacího materiálu tak na konci experimentu byli seschlé a tvrdé. Ty, které byli obaleny sírou ztratily méně vlhkosti. Jenže během 14 dnů začal obal u některých pelet praskat. U páleného a hašeného vápna se sice odpařilo nejméně vody, ale krusta praskla a odloupala se (obrázek 62 v řadě 2). Krusta tak vytvořila spousta malých kousků. Dolomitové pelety nejevili větší známku změny. Poslední pelety obalené v oxidu hořečnatém začali pomalu hnědnout. Tento jev navenek působil ošklivě. I tyto pelety se začaly drolit i když o poznání méně než vápenné krusty.



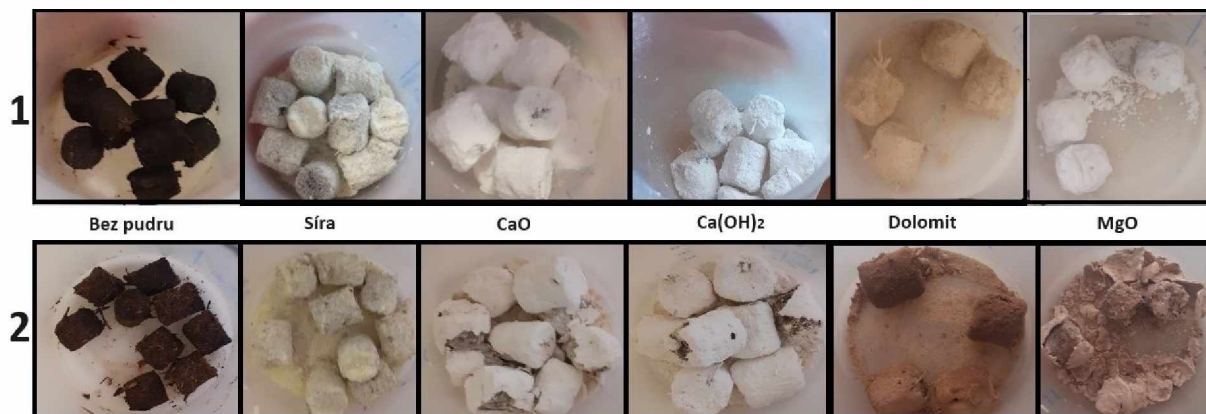
Obrázek 62 Pelety ze solidifikátu 1503TW4S obalené v jednotlivých práškových materiálech. Řada 1 den 0 a řada 2 den 14.

5.3.2. Obalování pelet z experimentu 1503TWD8S

Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S drželi velmi dobře svůj tvar, a i bez obalovacího materiálu jejich lepivost nebyla vysoká. Při obalování sírou se k sobě nelepili vůbec a na rozdíl u pokusu se solidifikátem 1503TWD4S krusta ze síry nepopraskala. Pevnost pelet to významně nepodpořilo. Pálené a hašené vápno i v tomto případě též tvořilo velké vrstvy obalovacího materiálu. Tato vrstva byla také velmi náchylná k mechanickému poškození. Dolomit se nalepil ve velmi tenké vrstvě. Stejně jako v předchozím experimentu i zde se dolomit podpořil pevnost pelet. Oxid hořečnatý kolem pelet vytvořil pevnou krutu a fungoval podobně jako dolomit.

Tyto pelety byly také ponechány na temném dobře větraném místě po dobu čtrnácti dnů. Na obrázku 63 jsou v prvním řádku pelety na počátku experimentu a v druhém řádku pelety po 14 dnech.

Podobně jako v předchozím experimentu pelety bez obalovací materiálů byli tvrdé a vyschlé. Na rozdíl od předchozího solidifikátu zde obal ze síry nepopraskal. Pelety z páleného a hašeného vápna neměli tolik popraskanou krustu jako u solidifikátu 1503TW4S. I přes to větší část pelet měla krusty poničené. Dolomitové pelety nejevily po čtrnácti dnech stání výraznější změny. Pelety obalené v MgO měly poměrně velkou krustu, která působila pevně. Podobně jako u vápenných obalů tak i u MgO se krusta z pelety odloupala a rozdrolila.



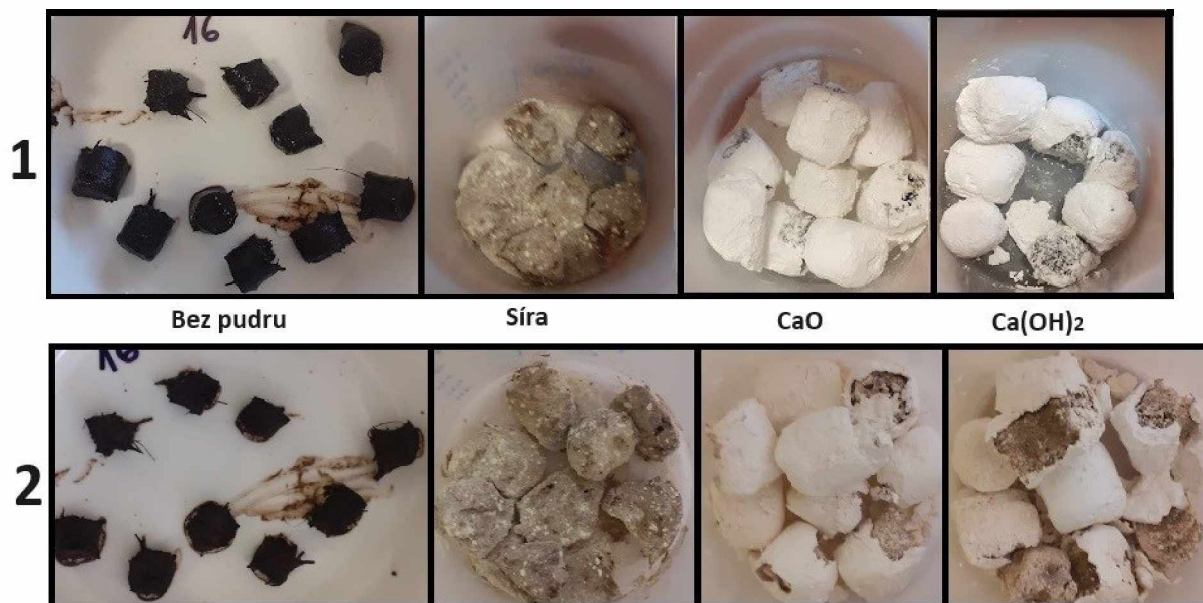
Obrázek 63 Pelety ze solidifikátu 1503TW8S obalené v jednotlivých práškových materiálech. Řada 1 den 0 a řada 2 den 14.

5.3.3. Obalování pelet z experimentu 1804TWD5S

Solidifikát 1804TWD5S měl nejméně pevnou konzistenci ze tří vybraných pelet. Pelety bez obalovacího materiálu zanechávali vlhké stopy na misce a velmi snadno se deformovali. Ani síra nezlepšila jejich mechanickou pevnost. Po obalení v tomto práškovém materiálu a přemístěním do kádinky se velmi rychle zdeformovaly. Hašené a pálené vápno pomohlo peletám udržet si svůj tvar, ale krusta se loupala téměř okamžitě po obalení pelety. Na dolomit a oxid hořečnatý mi bohužel nezbyl solidifikát ani sorbent, takže tyto experimenty nebyly provedeny.

Stejně jako předchozí dva typy pelet i tyto byly ponechány na temném dobře odvětraném místě a jejich proměna po 14 dnech je zaznamenána na obrázku 64 v druhém řádku.

Pelety bez obalovacího materiálu vyschly a bylo velmi těžké je odstranit z misky. Pelety měly takovou vlhkost, že prosákly skrz sírovou krustu a vznikl slepenec. Krusty u hašeného a páleného vápna se již po obalení začaly odlupovat. Po čtrnácti dnech odpadly téměř úplně.



Obrázek 64 Pelety ze solidifikátu 1804TWD4S obalené v jednotlivých práškových materiálech. Řada 1 den 0 a řada 2 den 14.

6. Odolnost pelet vůči mechanickému poškození

Odolnost pelet vůči mechanickému poškození bylo testováno na třepačkách v Laboratoři Písek. Zde byly třepačky staršího typu, takže frekvence jejich pohybu byla odhadována za pomoci stopek.

6.1. Porovnání křehkosti pelet 1x1cm a 3x1 cm

Nejprve bylo vyzkoušeno chování pelet na třepačce při třech frekvencích třepání. První frekvence byla změřena 80 kmitů za minutu, druhá 120 kmitů za minutu a třetí 140 kmitů za minutu.

Nejprve byly měřeny pelety 3x1cm a 1x1 cm, které byly vystaveny všem třem úrovním třepáním. Ani při jedné úrovni se pelety nepohnuly. Není jisté, jestli je to z důvodu nesprávné funkce horizontální třepačky, nebo příliš velké přilnavosti pelet ke kádince.

Po horizontální třepačce byly pelety přemístěny na rotační třepačku. Tato třepačka má nenastavitelné otáčky. Dle měření se otáčí rychlostí 8 otáček za minutu. Pelety o velikosti 3 cm ze solidifikátu 1503TWD7S se po 20minutách třepání rozpadly na několik částí. Pelety o velikosti jeden centimetr se pro oba solidifikáty chovaly stejně. Vytvořily stabilní kuličku. Navzájem se k sobě nepřilepily a nevytvořily jednu kompaktní kouli. Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S o délce 3 cm se také zakulatily a vytvořily zakulacené válečky.

6.2. Porovnání účinků obalovacích materiálů na mechanickou odolnost pelet

Pro porovnání účinků práškových materiálů na mechanické vlastnosti bylo porovnáváno na dvou solidifikátech, které působily nejlépe. Byl vybrán 1503TWD7S a 1503TWD8S. Tyto solidifikáty byly minimálně vlhké a struktura byla podobná hlíně, která vzniká z kompostu.

Z těchto solidifikátů bylo vytvarováno 24 kusů pelet. Vždy 4 pelety byly obaleny v jednotlivých práškových materiálech, které jsou zmíněny v kapitole 5.3.

Pelety obalené v práškových materiálech byly uzavřeny do 150ml krabičky se závitem. Tyto krabičky byly nejprve 10 minut třepány na horizontální třepačce při kmitech 140 kmitů za minutu. Výsledek byl zdokumentován (viz. Kapitoly 6.2.1. a 6.2.2.). Následně byla krabička přemístěna do rotační třepačky a proběhlo další třepání po dobu 30 minut a frekvencí 8 otáček za minutu.

6.2.1. Experimenty s 1503TWD7S

Pelety, které byly obalovány Ca(OH)_2 vytvořily jako v předchozím experimentu vysokou pevnou, ale křehkou krustu (obrázek 65 vlevo). Po třepání na horizontální třepačce byly vidět malé trhliny v obalu. (obrázek 65 uprostřed). Další test byl proveden na rotační třepačce. Krusta se po dokončení třepání úplně rozpadla (obrázek 65 vpravo). Ve zbytku z krusty Ca(OH)_2 byli nalezeny i odlomené kousky solidifikátu.



Obrázek 65 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v Ca(OH)_2 . Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce

Dalším testovaným obalovacím materiálem byl CaO. Podobně jako v předchozím testu vytvořil kolem pelet pevnou křehkou krustu, jako $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (obrázek 66 vlevo). Na obrázku 66 uprostřed jsou vidět trhliny které vznikly po horizontálním třepání. Tyto trhliny nebyly tak rozsáhlé, jako u pokusu s $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Lepší soudržnost krusty je vidět na obrázku 66 vpravo. Na rozdíl od hašeného vápna se krusta páleného vápna rozpadla méně. Při rozpadu sebou nevzala tolik materiálu ze solidifikátu jako hašené vápno.



Obrázek 66 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v CaO. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepáče, vpravo po rotační třepáče

Dolomit v těchto testech měl vynikající vlastnosti. Pelety v něm obalené byly na začátku testu pokryty tenkou vrstvou materiálu (obrázek 67 vlevo). Po horizontálním třepání (obrázek 67 uprostřed) nedošlo k žádným změnám. V rotační třepáče se pelety obalené v dolomitu zakulatily, ale dolomitový obal zůstal nepoškozen. Kromě zakulacení k žádné jiné deformaci nedošlo (obrázek 67 vpravo).



Obrázek 67 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v dolomitu. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepáče, vpravo po rotační třepáče

Předposledním testovaným práškovým materiálem byla elementární síra. Ta vytváří na peletě velmi tenkou krustu, skrze kterou prosvítá povrch pelety (obrázek 68 vlevo). Po horizontální třepačce se pelety trochu zakulatily, ale jinak nedošlo k dalším změnám (obrázek 68 uprostřed). Po rotační třepačce byly pelety zakulacené jako v případě dolomitu. Krusta se upěchovala a již tolik neprosvítal povrch pelety (obrázek 68 vpravo).



Obrázek 68 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v elementární síře. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce

Poslední testovaný práškový materiál je oxid hořečnatý někdy také nazývaný jako periklas. Na začátku testu vytvořil tento práškový materiál vrstvu podobnou pálenému a hašenému vápnu (obrázek 69 vlevo). Oproti vápenným materiálům tvoří hořečnatý na povrchu pelety hrudky, a tedy povrch není tak rovný a hladký jako u vápenných. Po horizontální třepačce nedošlo k trhlinám v krustě, ale vytvořily se tam výraznější hnědé plochy. To může být vlhkost z pelet, která pohlcuje krustu (obrázek 69 uprostřed). Po rotační třepačce opět došlo k zakulacení pelet a zapracování práškového materiálu do povrchu. Na obrázku 69 vpravo si lze všimnout, že hnědých ploch na peletě přibylo. Místy prosvítá i povrch pelety.



Obrázek 69 Pelety ze solidifikátu 1503TWD7S obalené v MgO. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce

6.2.2. Experimenty s 1503TWD8S

Druhý testovaný solidifikát byl 1503TWD8S. Tento solidifikát je podobně pevný jako předchozí 1503TWD7S, ale obsahuje méně vody. Po obalení v $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vznikla opět tlustá pevná vrstva (obrázek 70 vlevo). Po přenesení na horizontální třepačku jsou vidět drobné trhliny v krustě, ale oproti solidifikátu 1503TWD7S jsou téměř neznatelné (obrázek 70 uprostřed). Test na rotační třepačce také dopadl lépe než při testu na 1503TWD7S. Krusta z hašeného vápna se téměř nerozpadla. Vniklo několik větších trhlin, ale peleta zůstala z větší části zabalená v práškovém materiálu. Ve zbytcích, které z pelet opadaly byly vidět minimální známky fragmentů z pelet (obrázek 70 vpravo).



Obrázek 70 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce

I pro solidifikát 1503TW7S se vlastnosti dolomitu moc nezměnily. Vytvořil pevnou tenkou krustu (obrázek 71 vlevo). Po horizontální třepačce došlo pouze k zpevnění povrchu pelety (obrázek 71 uprostřed). Rotační třepačka pelety zakulatila a zapracovala krustu dolomitu do povrchu pelety. Na obrázku 71 vpravo je vidět kousek slámy. Tyto částice mohou být pro stabilitu pelet rizikové.



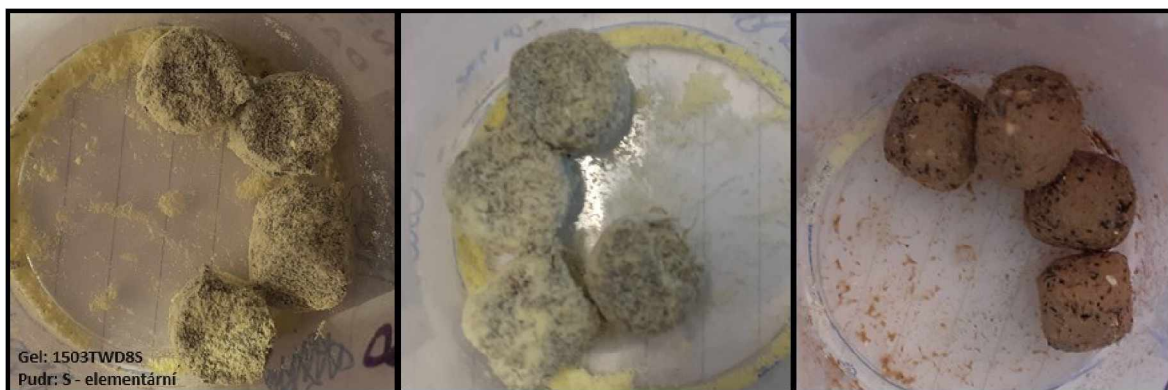
Obrázek 71 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v dolomitu. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce

Pálené vápno i na tomto solidifikátu vytvořilo souvislou tlustou pevnou vrstvu (obrázek 72 vlevo). Třepání na horizontální třepače nezpůsobilo žádné poškození obalu, což oproti předchozím pokusům na vápenných materiálech je velmi překvapivé (Obrázek 72 uprostřed). Poslední zátěžový test, který je pro většinu pelet destruktivní byla rotační třepačka. I zde pálené vápno dobře odolalo. Krusta se zapracovala do povrchu pelety a na některých místech se odloupla (obrázek 72 vpravo). V těchto místech se většinou jednalo o velké kusy materiálu, na které práškový materiál neúplně přilnul. Ovšem na dně krabičky nebyly nalezen žádné zbytky krust. To znamená, že se zapracovaly do povrchu pelety.



Obrázek 72 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v CaO. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepače, vpravo po rotační třepače

Předposledním testovaným materiálem byla elementární síra. Ta vytvořila na povrchu tenkou vrstvu, přes kterou prosvítal povrch pelety jako v minulém případě (obrázek 73 vlevo). Horizontální třepačka neměla na pelety žádný vliv a zůstaly nepoškozené (obrázek 73 uprostřed). Na rotační třepače došlo k zakulacení pelet a zapracování síry do povrchu. Pelety jsou hodně vlhké a prosáklly vrstvou síry. Zanechaly na dně misky vlhké zbytky síry (obrázek 73 vpravo).



Obrázek 73 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v elementární síře. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepače, vpravo po rotační třepače

Poslední testovaný práškový materiál byl MgO. Na peletě vytvořil souvislou a poměrně tlustou krustu. Díky vlhkosti se na ní tvořily hrudky materiálu. Kvůli vysoké vlhkosti se ještě před třepáním objevila tmavá místa (obrázek 74 vlevo). Horizontální třepačka krustu udusala. Tmavé plochy byly víc zřejmé a občas se objevila trhlinka v krustě (obrázek 74 uprostřed). Na obrázku 74 vpravo jsou pelety po rotační třepačce. Krusta splynula s povrchem pelety a až na drobná nezakrytá místa tvořila ucelený povrch.



Obrázek 74 Pelety ze solidifikátu 1503TWD8S obalené v MgO. Vlevo před třepáním, uprostřed po horizontální třepačce, vpravo po rotační třepačce

6.3. Vliv planetárního pohybu na pelety a jejich destrukci

Posledním z pokusů je namáhání pelet na planetární třepačce až do bodu destrukce nebo maximálního výkonu třepačky. Bylo připraveno vždy 8 pelet od každého typu obalovacího materiálu a solidifikátu. Pro napodobení reálné manipulace byly tyto pelety dva dny před experimentem skladovány při 3,5°C. Po této době byly sledovány změny na obalových materiálech.

Dle očekávání u dolomitu a síry nenastala žádná změna. Pelety obalené MgO celé zešedly a jejich povrch se stal celistvější. Toto nelze tvrdit o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ jenž vytvořil zvláštní kaši, která se přichytávala k stěnám nádoby a na peletě vůbec nedržela. Krusta z CaO se chovala podobně jako MgO. Vytvořila jednoduší povlak, který na rozdíl od MgO měl mírné tendence k zachytávání se na nádobě.

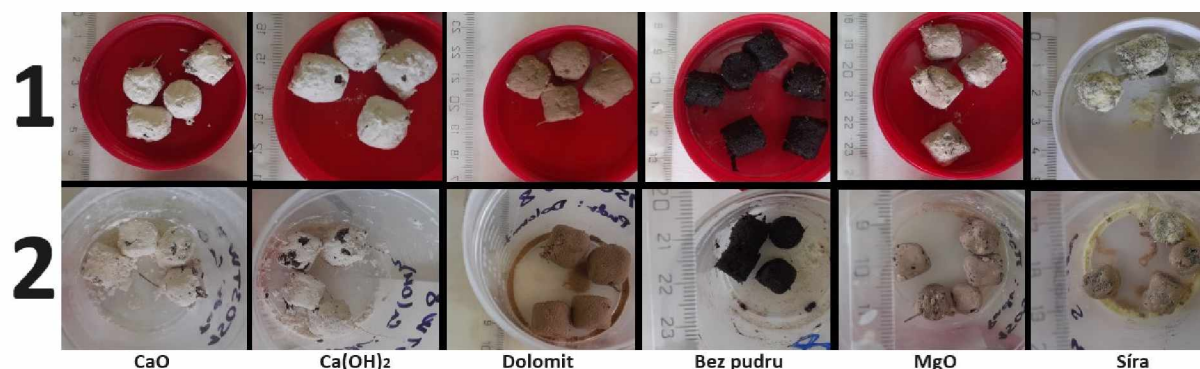
Tyto pelety byly umístěny na třepačku Heidolph Unimax 1010. Při 170 ot/min u žádné z pelet nedošlo ke změně. Většina z nich se ani neuvadla do pohybu. Při těchto otáčkách byly pelety ponechány 5 minut.

Další zvýšení otáček na 230 ot/min uvedlo některé pelety do pohybu, ale jejich krusty se nikterak nedeformovaly. Jediná peleta z 1503TWD7S obalená v $\text{Ca}(\text{OH})_2$ se silně přilepila k měřicí nádobce a zanechávala na ní stopy (obrázek 75). Tyto otáčky byly drženy po dobu 5 minut.



Obrázek 75 Pelety z 1503TWD7S. Řádek označený s číslem 1 pelety před třepání a řádek číslo 2 pelety po třepání.

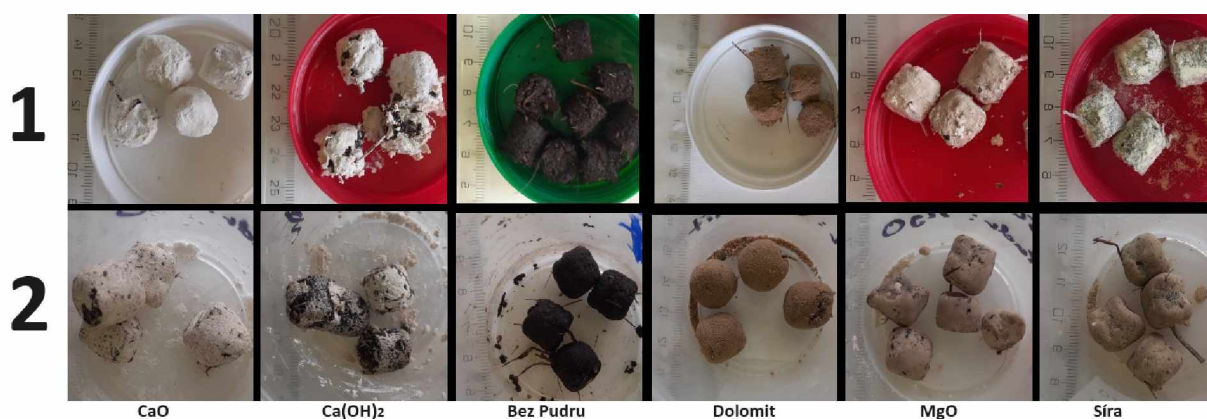
Další zvýšení otáček na 300 ot/min rozpohybovalo všechny pelety. Pelety obalené hašeným vápnem se přilepily k měřicím nádobkám a již se dále nepohybovaly. Pokud došlo k pohybu tak se z pelet odtrhávaly kusy materiálu. Síra, dolomit a MgO se zachovali podobně jako v předchozím experimentu. Díky planetárnímu pohybu se jejich krusty zapracovaly do povrchu a vytvořily kuličky. Totéž se stalo i u pelet, které nebyly obaleny žádným materiálem.



Obrázek 76 Pelety z 1503TWD8S. Řádek označený s číslem 1 pelety před třepání a řádek číslo 2 pelety po třepání.

Po těchto otáčkách byl hledán bod, kdy dojde k destrukci. Pelety odolávaly až do maximálních otáček třepačky což je 498 ot/min. Při těchto otáčkách byly pelety ponechány 10 minut. Dolomitové pelety se nepovedlo přivést k destrukci. Krusta z dolomitu se pouze zapracovala do povrchu pelety a vznikly pevné kuličky, které nezanechaly nečistoty na kádince. Podobně, ač ne tak odolně, se chovala síra, u které také nedošlo k porušení krusty. Pelety

se nezakulatily tak dokonale jako u dolomitu a zanechaly nepatrné množství vlhkosti a materiálu na stěnách kádinky. Další testované byly pelety bez pudrů. Ty zanechali poměrně hodně své vlhkosti na stěnách kádinky, ale k jejich rozpadu nedošlo. Zakulatily se do téměř perfektních kuliček. Podobně na tom byly i pelety obalené z MgO. Krusta se zde nezpracovala do povrchu, ale udusala a vytvořila obal, který obsahoval několik trhlin. Podobně jako u síry i tady se část materiálu pelety přemístila na kádinku. Předposledním obalovacím materiálem je CaO. Většina krusty se odřela o stěny kádinky a začala se velmi lepit. I přes to část krusty zůstala na peletách. Nejdramatičtější destrukci krusty byla u hašeného vápna. Již při manipulaci se krusta lepila a odtrhávala. Při nejvyšším třepání se krusta pelet nalepila na stěny kádinky. U některých kusů došlo k zbavení téměř celé krusty. Výsledek před a po třepání vedoucím k destrukci jsou pro vzorek 1503TWD7S na obrázku 77 a 1503TWD8S na obrázku 78.



Obrázek 77 Pelety z 1503TWD7S. Řádek označený s číslem 1 pelety před destrukcí a řádek číslo 2 pelety po destrukci.



Obrázek 78 Pelety z 1503TWD8S. Řádek označený s číslem 1 pelety před destrukcí a řádek číslo 2 pelety po destrukci.

DISKUSE

V rámci této práce bylo testováno sedm receptur sorbentů, přičemž sorbent 1503TW prokázal nejlepší účinnost. Druhým úspěšným sorbentem byl 1804TW. Další testy byly prováděny s využitím sorbentu 1503TW. Kromě optimalizace množství sorbentů na navážku digestátu byl zkoumán i ideální poměr sorbentu A ku sorbentu B.

Bylo zjištěno, že ačkoliv poměr 14:10 (A:B) měl sice nejnižší množství eluátů, ale poměr 13:10 vytvářel pevnější solidifikát. To může být způsobeno tím, že u poměru 13:10 došlo k nejvyššímu vzniku eluátů ze všech poměrů. Díky vysokému odstranění vody z koláče je výsledek pevný solidifikát.

Během experimentů bylo zjištěno, že eluát tvoří 18,5 % z původní navážky digestátu. To je nemalá část a je nutné uvažovat o dalším zpracování tohoto produktu. Solidifikace eluátů se jeví jako nepraktická kvůli potřebě vysokého množství sorbentu a dalšího vybavení pro zahušťování eluátů. To by znamenalo zvýšení složitosti technologie a nákladů na ni.

Alternativou bylo vrácení eluátu zpět do násady digestátu. Tento postup však čelil podobným obtížím jako solidifikace eluátů, neboť docházelo k zředění digestátu. Úměrné zvětšení navážky sorbentu nestačí k dobrému výsledku. Ani po dalším zvýšení násady sorbentu se nedostavil kýžený výsledek.

Poslední variantou byla podvojná solidifikace. Zde byl do solidifikátu zamíchán solidifikovaný eluát. Tato varianta se ukázala účinnější než samotná sorpce eluátu, ale je to velmi pracné a podobně jako předešlá varianta by mohla celou technologii prodražit.

Dále bylo věnována pozornost možnostem zvětšování navážky. Z kapacitních důvodů bylo provedeno pouze dvojnásobné měřítko. Zde byla také testována podvojná solidifikace. Díky tomu byla nalezena optimální navážka sorbentů, s kterou se dále pracuje. Jedná se o vzorek 1503TWD7 (charakterizace v kapitole 4) u kterého byla násada 280 g digestátu a 14,8 g sorbentu 1503TWA a 6,7 g sorbentu 1503TWB.

Z kinetických testů vzniku eluátů bylo zjištěno, že u většiny vyhovujících solidifikátů je doba odvodnění přibližně 3-4 hodiny. Po této době bylo množství eluátu konstantní nebo přibývá po desetínách gramů. Při použití tlaku by mohlo být odvodnění dokonalejší a rychlejší.

Vzniklý solidifikát je z dlouhodobého hlediska tvarově stabilní. Jediný problém vidím v poměrně rychlé ztrátě vody ze solidifikátu. Během prvních čtyř dnů se ztratí 63-70% vlhkosti obsažené v solidifikátech (data pro sorbent 1503TW). Vzniklý solidifikát by se tedy musel skladovat v uzavřených nádobách a po otevření okamžitě spotřebovat. Po 14 dnech stání vznikají ze solidifikátu velmi pevné kusy, které je velmi obtížné rozlomit. To by zhoršilo další manipulaci s tímto materiálem.

Skýtá se tu možnost vyschlý solidifikát nadrtit v drtičce. V laboratorním měřtku bylo docíleno namletí pomocí nožového elektrického mlýnku. S vzniklým prachem nebo drtí by se lépe manipulovalo. Na rozdíl od konvenčního sušení digestátu je solidifikovaný digestát již částečně vody zbaven a jeho sušení by mohlo být rychlejší a spotřebovat méně energie.

Kvůli své vysoké vlhkosti by solidifikát nebylo vhodné balit hned po solidifikaci, ale vytvořit z něj pelety. Při tvorbě pelet se objevily nečekané problémy v podobě velkých částic (např. stébla), které narušovaly soudržnost pelet. U digestátu s vysokým obsahem těchto částic by tvorba stabilních pelet mohla být problém.

Byly otestovány dva tvary 3x1 cm a 1x1 cm. Ačkoli pelety 3x1 odolaly některým třepacím pokusům, při standartní manipulaci (přenášení z vah do kádinky apod.) se velmi často lámaly. Naopak pelety 1x1 cm držely svůj tvar a při třepání se pouze zakulatily.

Během testů s peletami se objevila mírná lepivost solidifikátu. Pelety se přilepovaly převážně k dnu kádinky a zanechávaly nepatrné stopy materiálu na dnu a stěnách. Z tohoto důvodu jsem pelety obalila do práškových obalovacích materiálů (kapitola 5.3.). Jednalo se o levné a snadno dostupné látky. Tyto látky můžou zvýšit hnojivý účinek pelet dodáním minerálů jako je vápník, hořčík a síra.

Po obalení ve všech práškových materiálech pelety ztratily svou lepivost. Při obalování vznikly problémy především s práškovou sírou, která byla velmi najemno namletá. Již sama od sebe tvořila hrudky a tím pádem v ní bylo obtížné pelety obalit. Naopak MgO byl velmi lehký prášek a na peletách se vytvořila rychle velká křusta. Nejlépe se při obalování pracovalo s dolomit. Ačkoliv dolomitový prášek byl velmi těžký, kolem pelety udělal perfektní obal.

Pelety stejně jako solidifikáty byly nechány čtrnáct dní stát. Všechny pelety ztratily podobné množství vody jako neobalené. Ztrátou vody se seschly a křusty, které se změně objemu nepřizpůsobily (hašené a pálené vápno a MgO), popraskaly a rozdrolily se. Naopak materiály jako je síra a dolomit zůstaly na peletě bez závažnějších defektů.

Díky velkému obsahu vody v peletách dochází poměrně snadno k jejich deformaci. Obalové materiály této deformaci částečně zabraňují, ale pořád jsou tyto pelety náchylné k poškození při kontaktu s ostrým nebo hranatým předměty.

Ze všech testů odolnosti po obalení v testovaných práškových materiálech vychází jako nejodolnější dolomit. Dolomit je z testovaných materiálů nejlevnější a zároveň lehce dostupný. Ani při maximálních otáčkách na planetární třepačce nedošlo k prolomení krusty. Naopak peleta se zakulatila do kuličky. Ani její vlhkost neprosákla skrz krustu. Při dlouhodobém stání se dolomitová krusta neoloupala, ale udělala pelety ještě tvrdší

Naopak jako nevhodné obalové materiály se projeví pálené a hašené vápno. Ačkoli na začátku tvoří tlusté pevně vypadající vrstvy tak jsou tyto vrstvy nesmírně křehké. Při delším skladování jsou náchylné na vlhkost. Například krusta z hašeného vápna se po navlhnutí stává velmi lepivou a kašovitou a vlastnosti pelet naopak zhoršuje. Při dlouhodobém stání na vzduchu se po vyschnutí krusty obal z větší části rozpadne anebo sloupá. Krusta se už při nižším mechanickém zatížení začíná trhat. Při extrémní zátěži se doslova rozsype i s částí pelety.

Materiály jako je síra a MgO jsou jen částečně vhodné. Velmi jemně mletá síra je na obalování poměrně problematická, protože tvoří hrudky, kvůli kterým obalení pelet není souvislé. Pro souvislé obalení je třeba zvýšeného úsilí. Oproti síře se v MgO obaluje velmi dobře. Peleta ovšem začíná již po několika hodinách měnit barvu ze zářivě bílé na šedavou. To sice nemá vliv na vlastnosti, ale peleta vypadá nevhodně. Jak pelety se sírou, tak pelety s MgO podlehly určité destrukci krusty při planetárním třepání. Deformace nebyla tak rozsáhlá jako u vápenných obalů. Vznikly pouze praskliny a malé množství materiálu zůstalo na nádobě.

ZÁVĚR

Ideou této práce bylo najít alternativní možnost solidifikace digestátu, která by zhodnotila část jinak obtížně využitelného digestátu. Cílem bylo najít ideální recepturu sorbentu a vytvořit tak pevné solidifikáty (z hydrofilních sorbentů a digestátu) za účelem zpracování digestátu. Dále se práce zaměřila na hodnocení celkové pevnosti a stability vzniklých solidifikátů. Tyto parametry jsou důležité pro komerční využití.

Z dosavadních výsledků výzkumu vyplynulo, že ze sedmi testovaných receptur byla pouze jedna, označená jako 1503TW, obzvláště úspěšná. Tato receptura přinesla výrazné zlepšení v pevnosti solidifikátů a vedla k výraznému snížení množství vznikajícího eluátu. Důkladnými testy se podařilo nalézt optimální složení, které vytvořilo stabilní a odolné pevné solidifikáty.

Po zátěžových testech na peletách obalených v práškových materiálech bylo zjištěno, že nejvhodnější obalový materiál je dolomit. Tento materiál vydržel všechny zátěžové testy. Díky němu se pelety staly nelepivými a odolnými vůči vnějším vlivům. Celkově tato zjištění přinášejí důležité poznatky pro praktické využití v oblasti zpracování digestátu.

Tato nová alternativa zpracování solidifikátu si zaslouží další výzkum zejména v oblasti škálování. Další důležitou otázkou pro budoucí výzkumy je změna potřebného množství sorbentů v závislosti na typu digestátu. Díky tomu bude možné udělat tuto metodu obecně použitelnou. Budoucí výzkumy by se měly zaměřit i na možnost zpracovávat eluáty jako závlahové vody.

Vidím obrovský potenciál v použití hydrofilních sorbentů pro zahušťování digestátu a věřím, že tato technologie může přinést velké výhody. Díky ní by bylo možné vytvořit materiál, který je snadno manipulovatelný. Hydrofilní sorbenty umožňují solidifikátu neztrácet všechnu vlhkost, což je značný pokrok oproti konvenčním metodám. Tímto způsobem lze také dodat tolik potřebnou vláhu do půdy.

Digestát je komplexní směs s vysokým obsahem živin, což představuje jak výzvu, tak i příležitost. I když zpracování tohoto materiálu může být obtížné kvůli jeho složitosti, stále existuje mnoho nevyužitých možností pro jeho využití. Je důležité zkoumat nové metody a technologie, které umožní efektivněji využít obsažené živiny a minimalizovat odpad.

LITERATURA

- [1] DEENA, Santhana; VICKRAM, A.S.; MANIKANDAN, S.; SUBBAIYA, R.; KARMEGAM, N. et al. Enhanced biogas production from food waste and activated sludge using advanced techniques – A review. *Bioresource Technology*. 2022, roč. 355, s. 127234. ISSN 0960-8524. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127234>.
- [2] GERŽOVÁ, Vendula. *Solidifikace digestátu s použitím alternativních sorbentů*. Bakalářská práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2021.
- [3] TLUSTOŠ, Pavel a ČERNÝ, Jindřich. Produkce a využití digestátu a jeho separovaných složek. online. s. 42. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiAx6zL-dv1AhWTHuwKHQJ6A-QQFnoECAUQAQ&url=https%3A%2F%2Fkatedry.czu.cz%2Fstorage%2F214%2F0519f851-produkce-a-vyuziti-digestatu.pdf&usg=AOvVaw3_wgIDdVERjh1YKjzeQEhc. [cit. 2022-01-31].
- [4] ČESKÁ BIOPLYNOVÁ ASOCIACE. *Česká bioplynová asociace*. online. Dostupné z: <https://www.czba.cz/>. [cit. 2024-04-13].
- [5] *Biom časopis o energii, co roste: Digestát pokaždé jinak*. online. 2015. ISSN 1801-2655. [cit. 2024-05-02].
- [6] VAN MIDDEN, Christina; HARRIS, Jim; SHAW, Liz; SIZMUR, Tom a PAWLETT, Mark. The impact of anaerobic digestate on soil life: A review: A review. *Applied Soil Ecology*. 2023, roč. 191, s. 105066. ISSN 0929-1393. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105066>.
- [7] ABUBAKER, J.; RISBERG, K. a PELL, M. Biogas residues as fertilisers – Effects on wheat growth and soil microbial activities: Table 2. Chemical and physical characteristics of fertilisers used for cultivating spring wheat in the pot experiment. online. In: *Applied Energy*. 2012, s. 126-134. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.04.050>. [cit. 2024-05-02].
- [8] MIKLAS, Václav. *Integrace technologie pro zahušťování digestátu v bioplynové stanici*. online, Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjKkJqj9dn0AhU2QvEDHS5qBQMqFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.vutbr.cz%2Fwww_base%2Fzav_prace_soubor_verejne.php%3Ffile_id%3D173708&usg=AOvVaw0BN3sbzj59lfTBkUoYWq-m. [cit. 2021-12-10].
- [9] ROY, Amitava; JELÍNEK, Antonín; KARBAN, Martin a PETRÁČKOVÁ, Barbara. *ÚPRAVA FUGÁTU Z DIGESTÁTU BIOPLYNOVÝCH STANIC PRO ZÁVLAHY KUKUŘICE URČENÉ PRO VÝROBU SILÁŽE VYUŽITELNÉ*. online. Praha:

Výzkumný ústav zemědělské techniky. Dostupné z:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjW9_2smu72AhVOtKQKHZlAD8kQFnoECAMQAQ&url=http%3A%2F%2Fvuzt.vm.cesnet.cz%2Fpublikace%2F2016%2F030.pdf&usg=AOvVaw1OZtBP0BcrYzsLLFaY-EEN. [cit. 2022-03-30].

- [10] DOMINÍKOVÁ, Petra. Využití moderní technologie výroby separátu pro zlepšení kvality ustájení dojníc a snížení emisí stájových plynů. online. Dostupné z: <https://naschov.cz/vyuziti-moderni-technologie-vyroby-separatu-pro-zlepseni-kvality-ustajeni-dojnic-a-snizeni-emisi-stajovych-plynu/>. [cit. 2021-12-15].
- [11] ČESKO. Vyhláška č. 474/2000 Sb.: Vyhláška Ministerstva zemědělství o stanovení požadavků na hnojiva. In: *Zákony pro lidi [online]*. Zlín: AION CS. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-474>.
- [12] Schéma dekantace. online. In: HAITL, Martin, Ph.D. *Mikrop*. 2022. Dostupné z: https://www.mikrop.cz/Obr%C3%A1zky/Magazin/2021-02/14-zpracovani-digestatu/image-thumb__1403__w360/Zpracovani_digestatu_-_schemata1.webp. [cit. 2024-04-25].
- [13] AQUINO, Marco; SANTORO, Sergio; DI PROFIO, Gianluca; LA RUSSA, Mauro; LIMONTI, Carlo et al. Membrane distillation for separation and recovery of valuable compounds from anaerobic digestates. *Separation and Purification Technology*. 2023, roč. 315, s. 123687. ISSN 1383-5866. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123687>.
- [14] ROMÁN, Franz; ADOLPH, Jan a HENSEL, Oliver. Hydrothermal treatment of biogas digestate as a pretreatment to reduce fouling in membrane filtration. *Bioresource Technology Reports*. 2021, roč. 13, s. 100638. ISSN 2589-014X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100638>.
- [15] O'SHEA, Richard; LIN, Richen; WALL, David; BROWNE, James a MURPHY, Jerry. A comparison of digestate management options at a large anaerobic digestion plant. *Journal of Environmental Management*. 2022, roč. 317, s. 115312. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115312>.
- [16] CARRARO, Giacomo; TONDERSKI, Karin a ENRICH-PRAST, Alex. Solid-liquid separation of digestate from biogas plants: A systematic review of the techniques' performance: A systematic review of the techniques' performance. *Journal of Environmental Management*. 2024, roč. 356, s. 120585. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120585>.
- [17] CHUDA, Aleksandra a ZIEMIŃSKI, Krzysztof. Digestate mechanical separation in industrial conditions: Efficiency profiles and fertilising potential: Efficiency profiles and fertilising potential. *Waste Management*. 2021, roč. 128, s. 167-178. ISSN 0956-053X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.049>.

- [18] DHAR BHOWMICK, Gourav; MADHAO GHANGREKAR, Makarand; ZEKKER, Ivar; KIBENA-PöLDSEPP, Elo; TAMMEVESKI, Kaido et al. Ultrafiltration membrane bio-fuel cell as an energy-efficient advanced wastewater treatment system. online. *International Journal of Energy Research*. roč. 46, č. 14, s. 20216-20227. ISSN 0363-907X. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/er.8300>. [cit. 2023-01-29].
- [19] FERNANDES, Fleuriane; SILKINA, Alla; FUENTES-GRÜNEWALD, Claudio; WOOD, Eleanor; NDOVELA, Vanessa et al. Valorising nutrient-rich digestate: Dilution, settlement and membrane filtration processing for optimisation as a waste-based media for microalgal cultivation: Dilution, settlement and membrane filtration processing for optimisation as a waste-based media for microalgal cultivation. *Waste Management*. 2020, roč. 118, s. 197-208. ISSN 0956-053X. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.037>.
- [20] PAPPALARDO, Gioacchino; TRIMARCHI, Ettore a SELVAGGI, Roberta. Assessment of economic viability and production costs for the innovative microfiltered digestate. *Journal of Environmental Management*. 2023, roč. 332, s. 117360. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117360>.
- [21] LI, Yun; XU, Zhicheng; XIE, Ming; ZHANG, Bangxi; LI, Guoxue et al. Resource recovery from digested manure centrate: Comparison between conventional and aquaporin thin-film composite forward osmosis membranes: Comparison between conventional and aquaporin thin-film composite forward osmosis membranes. *Journal of Membrane Science*. 2020, roč. 593, s. 117436. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117436>.
- [22] JOHNSON, Daniel; LUN, Ang; MOHAMMED, Abdul a HILAL, Nidal. Dewatering of POME digestate using lignosulfonate driven forward osmosis. *Separation and Purification Technology*. 2020, roč. 235, s. 116151. ISSN 1383-5866. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116151>.
- [23] KAHIRIZI, Mohammad; GONZALES, Ralph; KONG, Lingxue; MATSUYAMA, Hideto; LU, Peng et al. Significant roles of substrate properties in forward osmosis membrane performance: A review: A review. *Desalination*. 2022, roč. 528, s. 115615. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115615>.
- [24] VERKMAN, A.S. Aquaporins. *Current Biology*. 2013, roč. 23, č. 2, s. 52-55. ISSN 0960-9822. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.11.025>.
- [25] CAMILLERI-RUMBAU, Maria; SOLER-CABEZAS, Jose; CHRISTENSEN, Knud; NORDDAHL, Birgir; MENDOZA-ROCA, Jose et al. Application of aquaporin-based forward osmosis membranes for processing of digestate liquid fractions. *Chemical Engineering Journal*. 2019, roč. 371, s. 583-592. ISSN 1385-8947. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.029>.

- [26] CAMILLERI-RUMBAU, Maria; SOLER-CABEZAS, Jose; CHRISTENSEN, Knud; NORDDAHL, Birgir; MENDOZA-ROCA, Jose et al. Application of aquaporin-based forward osmosis membranes for processing of digestate liquid fractions: Fig. 1. Laboratory scale plant for forward osmosis experiments. online. In: *Chemical Engineering Journal*. 2019, s. 583-592. ISSN 1385-8947. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.029>. [cit. 2024-05-02].
- [27] TETTEH, Emmanuel; ASANTE-SACKEY, Dennis; ARMAH, Edward a RATHILAL, Sudesh. Chapter 6 - Tapping wastewater resource: why and how?: why and how?. In: . Academic Press, 2022, s. 125-146. ISBN 978-0-12-822810-4. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822810-4.00006-3>.
- [28] KHAN, Ershad; NORDBERG, Åke a MALMROS, Peter. Waste Heat Driven Integrated Membrane Distillation for Concentrating Nutrients and Process Water Recovery at a Thermophilic Biogas Plant. online. *Sustainability*. 2022, roč. 14, č. 20. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su142013535>. [cit. 2024-03-04].
- [29] AVCI, Ahmet; SANTORO, Sergio; POLITANO, Antonio; PROPATO, Matteo; MICIELI, Massimo et al. Photothermal Sweeping Gas Membrane Distillation and Reverse Electrodialysis for light-to-heat-to-power conversion. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 2021, roč. 164, s. 108382. ISSN 0255-2701. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108382>.
- [30] NOVAK PINTARIC, Z; BOGATAJ, M; PAHOR, B a SIMONIC, M. PRELIMINARY DESIGN OF OPTIMIZED HEAT INTEGRATED TWO-STAGE VACUUM EVAPORATION FOR PROCESSING DIGESTATE FROM BIOGAS PLANT. *THERMAL SCIENCE*. 2020, roč. 24, č. 6, s. 3637-3648. ISSN 0354-9836. Dostupné z: <https://doi.org/10.2298/TSCI200401283N>.
- [31] MOREY, L.; FERNÁNDEZ, B.; TEY, L.; BIEL, C.; ROBLES-AGUILAR, A. et al. Acidification and solar drying of manure-based digestate to produce improved fertilizing products. *Journal of Environmental Management*. 2023, roč. 336, s. 117664. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117664>.
- [32] WANG, Panpan; XU, Chao; ZHANG, Xin a YUAN, Qiaoxia. Performance evaluation of a solar evaporation system for liquid digestate concentration. *Water Research*. 2022, roč. 211, s. 118056. ISSN 0043-1354. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118056>.
- [33] MOREY, L.; FERNÁNDEZ, B.; TEY, L.; BIEL, C.; ROBLES-AGUILAR, A. et al. Acidification and solar drying of manure-based digestate to produce improved fertilizing products: Fig. 2. Greenhouse solar dryer and turning machine in the semi-industrial installation. online. In: *Journal of Environmental Management*. 2023, s. 117664. ISSN 0301-4797. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117664>. [cit. 2024-05-02].

- [34] CONTRIBUTORS, Wikipedia. Compost. online. In: CONTRIBUTORS, Wikipedia. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Compost>. [cit. 2024-03-25].
- [35] CASINI, David; BARSALI, Tommaso; RIZZO, Andrea a CHIARAMONTI, David. Production and characterization of co-composted biochar and digestate from biomass anaerobic digestion. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2021, roč. 11, č. 6, s. 2271-2279. ISSN 2190-6823. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00482-6>.
- [36] NOROUZI, Omid; TAGHAVI, Somayeh; ARKU, Precious; JAFARIAN, Sajedeh; SIGNORETTO, Michela et al. What is the best catalyst for biomass pyrolysis?. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021, roč. 158, s. 105280. ISSN 0165-2370. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105280>.
- [37] FU, Jiawei; LIU, Jingyong; XU, Weijie; CHEN, Zhibin; EVRENDILEK, Fatih et al. Torrefaction, temperature, and heating rate dependencies of pyrolysis of coffee grounds: Its performances, bio-oils, and emissions: Its performances, bio-oils, and emissions. *Bioresource Technology*. 2022, roč. 345, s. 126346. ISSN 0960-8524. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126346>.
- [38] SHI, Ziyi; LIU, Sirui; WANG, Shule; NIEDZWIECKI, Lukasz; BARANOWSKI, Marcin et al. Hydrothermal carbonization coupled with pyrolysis: An innovative approach to digestate management: An innovative approach to digestate management. *Green Energy and Resources*. 2023, roč. 1, č. 3, s. 100034. ISSN 2949-7205. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100034>.
- [39] WANG, Shule; WEN, Yuming; SHI, Ziyi; NIEDZWIECKI, Lukasz; BARANOWSKI, Marcin et al. Effect of hydrothermal carbonization pretreatment on the pyrolysis behavior of the digestate of agricultural waste: A view on kinetics and thermodynamics: A view on kinetics and thermodynamics. *Chemical Engineering Journal*. 2022, roč. 431, s. 133881. ISSN 1385-8947. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133881>.
- [40] VÁVROVÁ, Jaroslava. *Kapilární izotachografie*. online. In: . Dostupné z: <https://www.dastacr.cz/dasta/hypertext/AJALO.htm>. [cit. 2022-04-21].
- [41] *Ionosep*. online. Ostrava: RECMAN – laboratorní technika, c1991-2022. Dostupné z: <http://www.recman.cz/ionosep/>. [cit. 2022-04-21].
- [42] *Stanovení amoniaku, draslíku, sodíku, vápníku a hořčíku v kapalných vzorcích*. online. In: Recman. Ostrava: RECMAN – laboratorní technika, c1991-2022. Dostupné z: <http://www.recman.cz/aplikacni-listy/>. [cit. 2022-04-21].
- [43] ČSN 46 7092-4. *Metody zkoušení krmiv - Část 4: Stanovení dusíkatých látek*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

- [44] Metody mineralizace. In: JAVORSKÝ, Petr a KREČMER, František. *Chemické rozbory v zemědělských laboratořích*. 2. díl 2. část. Praha: Ministerstvo zemědělství a výživy České socialistické republiky, 1987, 37-43.
- [45] ČSN 46 7092-11. *Metody zkoušení krmiv - Část 11: Stanovení obsahu celkového fosforu*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [46] ČSN EN 12880. *Charakterizace kalů - Stanovení veškerých látek a obsahu vody*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [47] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ UŘÁD. *Informace o provozovně Úslava Bioenergie a.s.* online. In: . Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/web_generator/plants/CZ032/735250083_CZ.html. [cit. 2024-04-23].
- [48] BIOM. *Bioplynová stanice Písek*. online. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/produkty-a-sluzby/bioplynovy-stance/bioplynova-stance-pisek-3>. [cit. 2024-04-23].
- [49] Soil Conditioner. online. In: *ScienceDirect*. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/soil-conditioner>. [cit. 2023-10-24].
- [50] WANG, Panpan; XU, Chao; ZHANG, Xin a YUAN, Qiaoxia. Performance evaluation of a solar evaporation system for liquid digestate concentration: Grafický abstrakt. online. In: *Water Research*. 2022, s. 118056. ISSN 0043-1354. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118056>. [cit. 2024-05-02].

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Koncentrace živin v solidifikátu a separované tekutině ze sorbentu 1503TW

Příloha 2 – Koncentrace živin v solidifikátu a separované tekutině ze sorbentu 1804TW

Příloha 1: Koncentrace živin v solidifikátu a separované tekutině ze sorbentu 1503TW

Číslo	NH ₄ ⁺ (%)	N (%)	P (%)	K (%)
1503TWD1S	0,38	0,57	0,14	0,24
1503TWD2S	0,30	0,56	0,15	0,34
1503TWD3S	0,30	0,53	0,12	0,35
1503TWD4S	0,36	0,56	0,11	0,35
1503TWD5S	0,34	0,57	0,11	0,34
1503TWD6S	0,41	0,56	0,12	0,44
1503TWD12S	0,35	0,49	0,11	0,41
1503TWD1L	0,33	0,41	0,03	0,42
1503TWD2L	0,31	0,35	0,02	0,34
1503TWD3L	0,33	0,30	0,01	0,31
1503TWD4L	0,31	0,30	0,02	0,31
1503TWD5L	0,30	0,30	0,02	0,32
1503TWD6L	0,32	0,33	0,02	0,43
DIGESTAT	0,45	0,52	0,12	0,40
1503TWA	0,00	0,12	0,08	0,22
1503TWB	0,00	0,48	0,04	0,09

PŘÍLOHA 2: Koncentrace živin v solidifikátu a separované tekutině ze sorbentu 1804TW

Číslo	NH4+ (%)	N (%)	P (%)	K (%)
1804TWD1S	0,35	0,55	0,11	0,43
1804TWD2S	0,37	0,53	0,11	0,43
1804TWD3S	0,38	0,54	0,10	0,41
1804TWD4S	0,38	0,53	0,10	0,40
1804TWD5S	0,33	0,53	0,09	0,42
1804TWD1L	0,41	0,53	0,11	0,43
1804TWD2L	0,37	0,54	0,10	0,41
1804TWD3L	0,32	0,53	0,10	0,40
1804TWD4L	0,33	0,53	0,09	0,42
1804TWD5L	0,29	0,25	0,02	0,33
DIGESTAT	0,45	0,52	0,12	0,40
1804TWA	0,02	0,13	0,05	0,25
1804TWB	0,04	0,52	0,08	0,21