



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE A TECHNOLOGIE OCHRANY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

INSTITUTE OF CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

INTENZIVNÍ KOMPOSTOVACÍ TECHNOLOGIE A JEJICH VYUŽITÍ

INTENSIVE COMPOSTING TECHNOLOGIES AND THEIR APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Petr Kuba

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Veronika Řezáčová, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1885/2022 Akademický rok: 2022/23
Ústav: Ústav chemie a technologie ochrany
životního prostředí
Student: **Petr Kuba**
Studijní program: Environmentální chemie, bezpečnost
a management
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Veronika Řezáčová, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Intenzivní kompostovací technologie a jejich využití

Zadání bakalářské práce:

1. Literární rešerše na téma kompostovacích technologií, jejich zintenzivnění a využití.
2. Experimenty intenzivní kompostace v zařízení Multiferm.
3. Přehledné zpracování a zhodnocení získaných výsledků

Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2023:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu.
Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Petr Kuba
student

Ing. Veronika Řezáčová, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Jiří Kučerík, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá intenzivním kompostováním. Teoretická část práce shrnuje informace o průběhu kompostovacího procesu a možnosti hygienizace. Schopnost hygienizace je nezbytná při zpracování potenciálně nebezpečných biologicky rozložitelných odpadů. Součástí teorie jsou také informace o přípravě zakládky, vhodné skladbě materiálů a vlivu dalších faktorů – teploty, míry provzdušňování a překopávání. Jsou zde také objasněny rozdíly mezi manuálními a intenzivními kompostovacími technologiemi, uvedeny příklady technologií a objasněny jejich principy. V neposlední řadě jsou zmíněny výhody aplikace kompostu na půdu. Experimentální část se věnuje zařízení Multiferm a testům procesu kompostování prováděným na tomto zařízení. Testy mají za cíl nalézt optimální parametry celého kompostovacího procesu a zajištění procesu hygienizace. I když parametry ovlivňuje řada faktorů, je procesu hygienizace kompostu v jednom z provedených testech dosaženo.

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with intensive composting. The theoretical part of the thesis summarizes information about the composting process and the possibilities of sanitation. The ability to sanitize is essential in the treatment of potentially hazardous biodegradable wastes. The theory also includes information on the preparation of the stockpile, the appropriate composition of materials and the influence of other factors - temperature, aeration rate and turning. It also explains the differences between manual and intensive composting technologies, gives examples of technologies and explains their principles. Last but not least, the advantages of applying compost to the soil are mentioned. The experimental part is devoted to the Multiferm device and the tests of the composting process carried out on this unit. The tests aim to find the optimal parameters for the whole composting process and to ensure the sanitation process. Although the parameters are influenced by several factors, the compost sanitation process is achieved in one of the tests.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kompost, kompostovací proces, intenzivní kompostování, proces hygienizace, zařízení Multiferm

KEYWORDS

Compost, composting process, intensive composting, sanitation process, Multiferm device

KUBA, Petr. *Intenzivní kompostovací technologie a jejich využití*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/147631>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie a technologie ochrany životního prostředí. Vedoucí práce Veronika Řezáčová.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
Petr Kuba

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucí mojí bakalářské práce Ing. Veronice Řezáčové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a ochotu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. et. Ing. Tomáši Ondračkovi, Ph.D. a firmě VIA ALTA a.s. za možnost realizace cílů mojí práce a spolupráci při ní.

OBSAH

1. ÚVOD	7
2. TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1. Úvod ke kompostování	8
2.1.1. Legislativa a dotace	9
2.2. Proces kompostování	9
2.2.1. Úvod k procesu	9
2.2.2. Průběh kompostování	9
2.2.3. Fáze rozkladu	10
2.2.4. Fáze přeměny	10
2.2.5. Fáze zrání	10
2.2.6. Proces hygienizace	11
2.3. Vhodná skladba základky	12
2.3.1. Poměr C:N	12
2.3.2. Fosfor, draslík a síra	13
2.3.3. Vhodné suroviny	13
2.3.4. Struktura, velikost částic a objemová hmotnost základky	14
2.4. Faktory ovlivňující proces kompostování	15
2.4.1. Kyslík	15
2.4.2. Provdušňování	16
2.4.3. Vlhkost	16
2.4.4. pH	16
2.4.5. Teplota	17
2.4.6. Překopávání	17
2.5. Mikrobiologie procesu	17
2.6. Technologie kompostování	18
2.6.1. Manuální technologie	18
2.6.2. Kompostování v řádku	18
2.6.3. Kompostování v nádobě	19
2.6.4. Kompostování ve válci	20
2.6.5. Vermikompostování	20
2.6.6. Technologie intenzivního kompostování	20
2.6.7. Kompostování v řádku s řízenou aerací	21
2.6.8. Polouzavřené technologie intenzivního kompostování	22
2.6.9. Uzavřené technologie intenzivního kompostování	23
2.7. Výhody využití kompostu	25

2.7.1.	Živiny obsažené v kompostu	26
2.7.2.	Výhody aplikace kompostu na půdu	26
2.7.3.	Vliv aplikace kompostu na fyzikální vlastnosti půdy	27
2.7.4.	Vliv aplikace kompostu na chemické vlastnosti půdy	27
2.7.5.	Vliv aplikace kompostu na rostlinné patogeny a choroby	28
2.8.	Požadavky na kvalitu kompostu podle normy ČSN	28
2.9.	Investiční náklady kompostáren	29
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	30
3.1.	Zařízení Multiferm	30
3.2.	Cíl práce	31
3.2.1.	Testování zařízení	31
4.	VÝSLEDKY A DISKUZE	33
4.1.1.	Test č.1	33
4.1.2.	Test č.2	33
4.1.3.	Test č.3	33
4.1.4.	Test č.4	34
4.1.5.	Test č.5	35
4.1.6.	Test č.6	37
5.	ZÁVĚR	38
6.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39
7.	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	42
8.	SEZNAM TABULEK A PŘÍLOH	43

1. ÚVOD

Kompostování je velmi stará metoda využívání biologicky rozložitelného odpadu. Procesem kompostování se zabývá také tato práce. Její náplní je nejen objasnit, jak funguje proces kompostování, ale také jaké jsou možnosti jeho zintenzivnění a možnosti využití. Jsou zde také uvedeny poznatky související se zvýšením využití kompostování díky možnosti procesu hygienizovat potenciálně nebezpečné odpady, což je možné zejména u technologií intenzivního kompostování.

Zvýšení zájmu o využití kompostování je jedním z důsledků nařízení Evropské unie, kdy se zvyšuje apelace na svoz a zpracování biologicky rozložitelných odpadů. Ruku v ruce s tímto existuje i možnost získání finanční podpory pro zajištění tohoto procesu nakládání s biologicky rozložitelnými odpady.

Proces kompostování, i přes jeho dlouholeté využívání, je složitý a často laiky neúplně a nesprávně pochopený. Tato práce přináší poměrně detailní popis procesu kompostování, jednotlivých jeho fází, vhodnosti materiálů a podmínek pro zajištění optimálního průběhu, včetně hygienizace. Dále přináší i popis technologií kompostování a výhod aplikace kompostu na půdu a její vlastnosti.

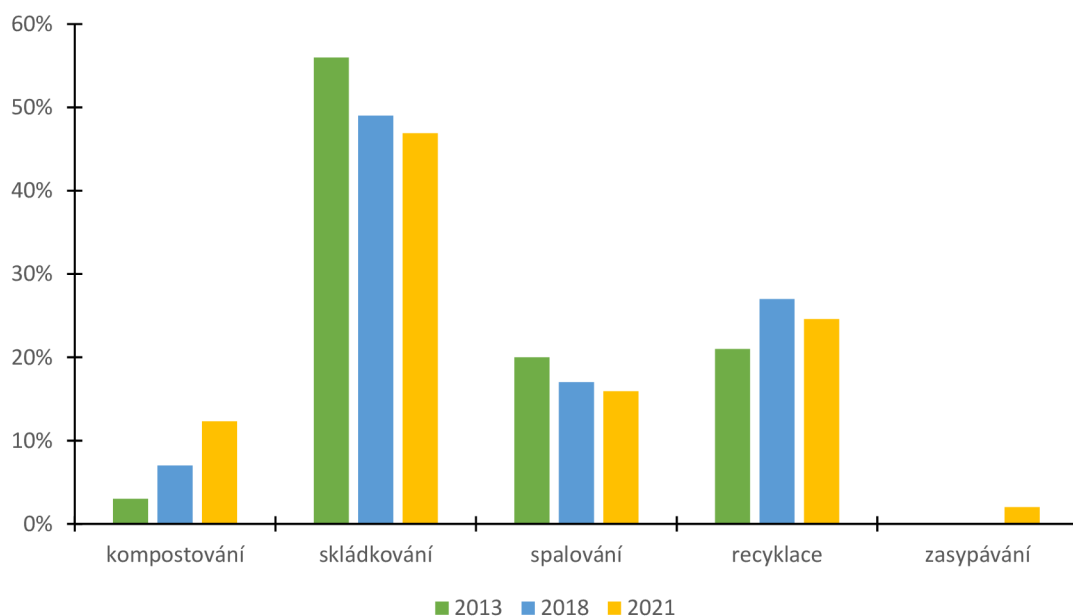
Experimentální část se věnuje testům intenzivního kompostování na zařízení Multiferm u firmy VIA ALTA a.s., Okříšky. Vysvětluje princip technologie Multiferm a seznamuje s prováděnými testy, jejichž cílem bylo zlepšení kompostovacího procesu a přípravy procesu a zařízení na kompostování odpadních kalů z čistíren odpadních vod. Během práce byly na zařízení prováděny úpravy za účelem zlepšení fungování zařízení jako celku. Ve všech sedmi ukončených testech bylo dosaženo uspokojivých výsledků, výsledkem jednoho z testů bylo získání hygienizovaného kompostu.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Úvod ke kompostování

Kompostování je metoda využití biologicky rozložitelného odpadu, při které, navíc ve srovnání s ostatními metodami zpracování odpadů, dochází k přeměně odpadu na využitelnou komoditu. Získanou komoditou je kompost. Kompost je produkt určený pro úpravu půdy, který zlepšuje fyzikální, chemické a biologické vlastnosti půdy, což vede k lepšímu zdraví rostlin a kvalitě životního prostředí. Používá se jako hnojivo v zemědělství a zahradničení. Samotný proces kompostování může být také využit pro hygienizaci potenciálně nebezpečných odpadů jako je gastro odpad nebo čistírenské kaly. Díky vzniku kompostu a jeho využití je metoda kompostování biologicky rozložitelných odpadů považována za udržitelnou a ekologickou.

V roce 2013 bylo v České republice vyprodukováno 3 228 232 kg komunálního odpadu, z čehož bylo 1 518 784 kg biologicky rozložitelného. Pouze 3 % těchto odpadů byla zpracována metodou kompostování. V roce 2018 bylo celkově vyprodukováno 3 732 219 kg komunálního odpadu, a z toho 1 906 549 kg biologicky rozložitelného odpadu. Z dat je evidentní růst množství tvořeného odpadu. Proto je důležité, aby co nejvíce tohoto odpadu bylo zpětně využito. V roce 2018 bylo kompostováno 7 % komunálního odpadu. Data z roku 2021 ukazují, že v tomto roce bylo kompostováno již 12,3 % komunálních odpadů. Za poslední roky dochází k růstu využití kompostování, recyklace a energetického využití pro nakládání s komunálními odpady na úkor skládkování. Rozdíly mezi roky 2013, 2018 a 2021 jsou k vidění v Obr. 1 [1], [2], [3].



Obr. 1: Způsoby nakládání s odpady v České republice

2.1.1. Legislativa a dotace

Zásadní vliv na další růst využití kompostování mají novely zákonů a nové směrnice. Nejnovější pozměňující směrnice Evropské unie 2018/851 mimo jiné nařizuje členským státům, aby do 31. prosince 2023 zajistily tříděný sběr biologického odpadu a aby byl tento odpad zpracováván přímo u zdroje, právě například kompostováním. Tuto Směrnici převzal český Zákon o odpadech č. 541/2020 Sb. Zákon podporuje předcházení vzniku biologicky rozložitelného odpadu. Odpad proto musí být zpracován přímo u zdroje. Zdrojem jsou obce, města a různé výroby. Dále také stanovuje nové cíle pro recyklaci biologicky rozložitelného komunálního odpadu, kdy do roku 2025 bude muset být recyklováno nejméně 55 % odpadů, které jsou určené ke skládkování [4], [5], [6].

Další vliv na popularizaci kompostování mají dotace Evropské unie. Jedná se o operační program Životního prostředí (dle <https://opzp.cz/>), přesněji o výzvu číslo 24, ve které se jedná o prevenci vzniku odpadů. Tato výzva podporuje zřizování kompostáren a nákup kompostérů společně s výstavbou a modernizací sběrných dvorů. Evropská unie podporuje Českou republiku dotací o hodnotě 500 milionů korun. Výzva probíhá po dobu roku 2023 a je bez výběrového řízení [7], [8].

2.2. Proces kompostování

2.2.1. Úvod k procesu

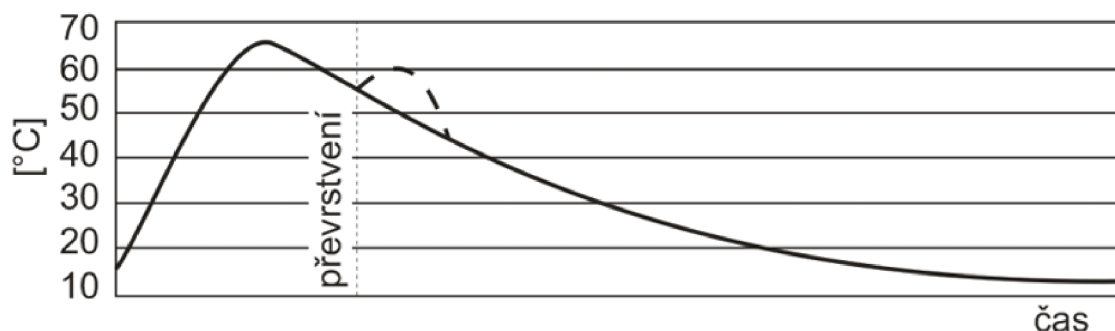
Kompostování je aerobní neboli kyslík vyžadující proces rozkladu organických materiálů pomocí mikroorganismů za kontrolovaných podmínek. Během procesu mikroorganismy spotřebovávají kyslík a organickou hmotu v původním stavu a vytvářejí teplo, oxid uhličitý a kompost. Ztráta organické hmoty a vody za dobu procesu se pohybuje kolem 45 %. Výslednou komoditou je kompost, který je bohatý na humus, a jedná se o cenné půdní hnojivo. Průběh procesu ovlivňuje hned několik faktorů. Těmi nejdůležitějšími jsou teplota, které materiál dosáhne, vhodná vlhkost kompostovaného materiálu, zajištění dostatečného provzdušnění a skladba zakládky. Je ale důležité dodat, že proces probíhá za širokého rozsahu podmínek a za využití mnoha organických surovin. Při intenzivním kompostování mohou být zmíněné faktory ovlivňovány ve prospěch rychlosti kompostování a kvality vzniklého kompostu [9], [10].

2.2.2. Průběh kompostování

Proces kompostování má několik fází, jejichž návaznost je vždy stejná. Směs optimálních surovin pro kompostování bývá označována pojmem zakládka, pro kterou lze jednotlivé fáze dobře popsat. V praxi se pak vyskytují během procesu odchylky od ideálního průběhu a konkrétní technologie ovlivňují dobu procesu kompostování dané zakládky.

Začátek procesu je většinou spontánní. Biodegradace zakládky mikroorganismy začíná za dosažení vhodných podmínek. Jsou to podmínky, při kterých se mikroorganismy začínají množit, v ideálním případě exponenciálně. Za 24 hodin by mělo vzniknout $5,62 \cdot 10^{14}$ nových mikroorganismů. Kompostovací proces je následně složen ze tří základních fází, které jsou díky určitým faktorům snadno rozeznatelné. Rozeznáváme je podle průběhu teploty (viz Obr. 2),

objemu a pachu zakládky. Fáze jsou pojmenovány podle dění v zakládce, první je fáze rozkladu, druhá je fáze přeměny a třetí je fáze zrání (viz Obr. 3) [9], [10], [11], [12].



Obr. 2: Teplotní průběh procesu kompostování, převzato z [11]

2.2.3. Fáze rozkladu

Po aktivaci mikroorganismů a začátku jejich množení začne prudce vzrůstat teplota, jádro zakládky dosahuje teplot mezi 60 a 70 °C. Díky tomu jsou v této fázi nejvíce aktivní termofilní mikroorganismy. Probíhá proces biodegradace. Při něm mikroorganismy, zejména termofilní, rozkládají složité organické sloučeniny na jednodušší. Dále probíhají chemické degradační reakce, odbourávají se hlavně cukry, škroby, bílkoviny a například i dřevní hmota. Chemické reakce a biodegradace vytváří vodu, nitrátový iont NO_3^- a oxid uhličitý. Pokud není v zakládce správný poměr C:N a přebývá dusík, může se přebytečný dusík uvolňovat ve formě amoniaku. Nejdůležitější proces této fáze je termická hygienizace, kdy díky vysokým teplotám dochází k zbavení zakládky patogenů a částečně také semen plevelů. Během první fáze ztratí zakládka v průměru 30 % své hmotnosti a objemu. Objem se snižuje z důvodu hutnění materiálu. Proces postupně zpomaluje a ztrácí teplotu, a to až na hranici 40 °C, kdy je považována první fáze za dokončenou. Ztráta teploty je způsobena nedostatkem dusíku a snadno rozložitelných látek pro termofilní organismy. Produktem této fáze není kompost, výsledný produkt neobsahuje humus a není vhodný pro aplikaci do půdy. Může být i fytotoxický. Stále je rozeznatelné složení původní zakládky, a také produkt zapáchá, zejména kvůli amoniaku [9], [10], [11], [13].

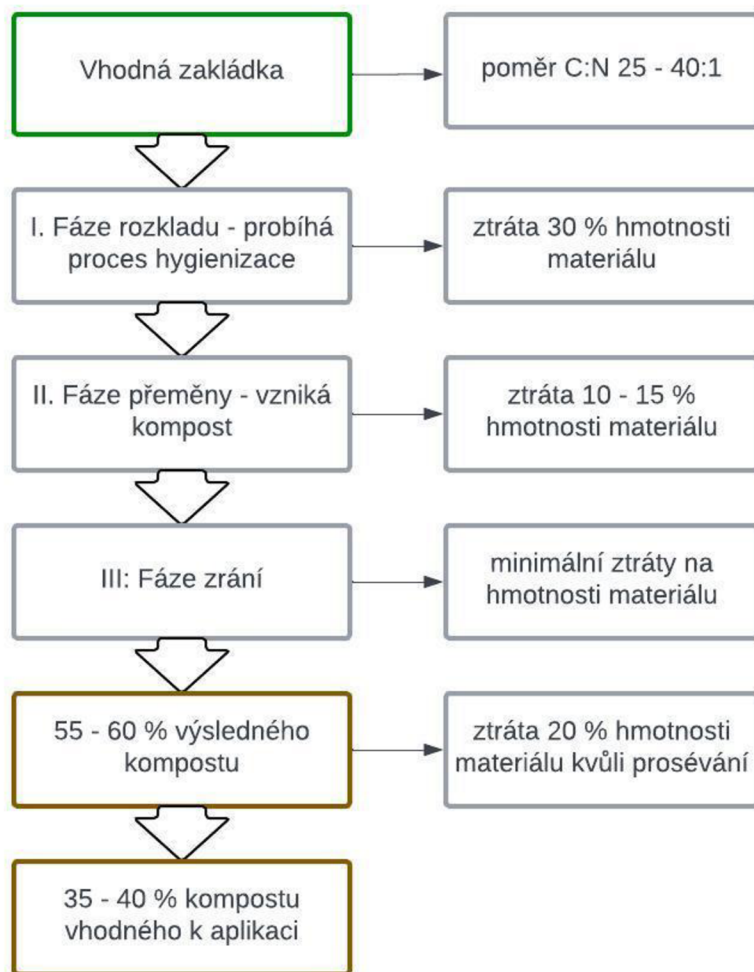
2.2.4. Fáze přeměny

V této fázi dochází k pozvolnému snižování teploty ze 40 °C na 25 °C. Termofilní mikroorganismy přestávají být aktivní kvůli nízké teplotě. Aktivní se stávají mezofilní mikroorganismy a plísňe. Zakládka dále ztrácí objem a hmotnost, a to 10 až 15 %. Původní skladba zakládky se rozkládá, vzniká kompost. Kompost dostává hnědou barvu a ztrácí zápach. Na konci této fáze již může být kompost použit jako hnojivo, již není fytotoxický a není hygienicky závadný [9], [10], [11], [13].

2.2.5. Fáze zrání

Ve fázi zrání nedochází v kompostu k další biodegradaci, vytvářejí se vazby mezi organickými a anorganickými látkami a vzniká humus. Teplota klesá až na hodnoty teploty okolí. Mikroorganismy přestávají být aktivní, místo toho se v kompostu objevují malí živočichové

a hmyz. Zakládka ztrácí objem a hmotnost jen velmi nepatrně. Výsledkem je kompost s vysokým obsahem kvalitního humusu. Před použitím nebo prodejem je potřeba kompost zbavit nežádoucích částic. Nežádoucí částice jsou například kusy dřeva, ale také plastu a kovu. Kompost se pomocí různých prosévacích a separačních zařízení zbavuje těchto nechtěných příměsí, a zároveň dochází k rozdělení na různé frakce podle velikosti částic. Proséváním dochází k ztrátě 20 % hmotnosti zakládky. Výsledný kompost je připraven na využití [9], [10], [11], [13].



Obr. 3: Schéma procesu kompostování

2.2.6. Proces hygienizace

Proces kompostování dokáže také eliminovat různé typy polutantů, například patogeny, hormony, antibiotika, pesticidy, ale i některá semena plevelů. Tento proces se nazývá hygienizace. Hygienizace probíhá za teplot 60–70 °C. K odstraňování polutantů dochází díky dosažené teplotě a velké mikrobiální aktivitě v materiálu. Mikrobiální aktivita není schopna zničit toxické prvky. Stopové toxické prvky se touto cestou neodstraní, ale vazbou na cheláty

mohou ztrácet účinnost, a tedy i toxicitu. Jako ligandy v chelátech se v materiálu nachází zejména huminové kyseliny [10], [14].

Patogeny

V odpadech, jako jsou například kaly z čistíren odpadních nebo gastro odpad, se vyskytují patogeny nebezpečné pro lidi, zvířata i rostliny. Přímou aplikací na půdu bez jakékoliv úpravy se patogeny mohou šířit a akumulovat v prostředí. Tento typ odpadů je pro možnost využití potřeba hygienizovat a kompostování může být jedno z řešení tohoto problému. Hygienizace pomocí procesu kompostování je z hlediska likvidace patogenů stále studovaná problematika. Je dokázáno, že dochází například k hygienizaci patogenních virů, jako (*ptačí chřipka*), bakterií (*salmonela, e-coli*), hub a prvoků (*Lamblie střevní, kryptosporidíóza*). U rostlinných patogenů nedochází k úplnému odstranění (např. *virus tabákové mozaiky*). Tyto patogeny sice proces přežívají, ale v mnohem menším množství. Poslední infekční částice, které je schopen proces ničit, jsou priony [10].

Hormony, antibiotika a pesticidy

V současné době je známým a významně diskutovaným problémem přítomnost antibiotik, hormonálních látek a pesticidů v životním prostředí. Jedná se o syntetické organické sloučeniny, xenobiotika. Antibiotika a hormonální látky se používají ve zdravotnictví a dostávají se do odpadní vody. Pesticidy se používají v zemědělství, přebytečné množství zůstává v půdě nebo je splavováno do vodních toků. Proces kompostování rozkládá velkou část pesticidů na jednodušší a méně stabilní sloučeniny. Jediné látky, které proces nedokáže rozložit, jsou perzistentní látky. Mezi ně spadají i perzistentní pesticidy. Používání těchto látek je ve velké míře zakázáno, nebo alespoň omezeno, mezinárodní Stockholmskou úmluvou [10], [14].

2.3. Vhodná skladba zakládky

Skladba zakládky velmi ovlivňuje rychlost a průběh procesu. Složení zakládky musí splňovat několik pravidel a řídí se následujícími faktory. Základním a nejdůležitějším faktorem je poměr C:N. Dále se nově u intenzivního kompostování sleduje obsah fosforu, draslíku a síry. Důležitá je také kombinace vhodných, a hlavně v dané době dostupných surovin. Suroviny by měly být upraveny. Upravuje se zejména jejich velikost a struktura. V neposlední řadě se sleduje objemová hmotnost zakládky, která přibližně určuje vlhkost celé zakládky.

2.3.1. Poměr C:N

Uhlík je základní stavební kámen všech organických sloučenin. Mikroorganismy využívají uhlík k získávání energie a reprodukci. Organické sloučeniny obsahují také dusík, ale v mnohem menším množství. Mikroorganismy zpracovávají při metabolismu dusík na enzymy, které slouží k syntéze bílkovin. Proces kompostování vyžaduje ideální poměr C:N pro optimální průběh. Pokud má proces nedostatek dusíku, tak se výrazně zpomaluje. Při přebytku dusíku dochází k mineralizaci a k uvolňování amoniaku. Amoniak narušuje ideální prostředí zvyšováním pH materiálu. Příliš vysoké pH (nad hodnotu 8) není příznivé pro mikroorganismy, přestane probíhat biodegradace a zastaví se celý proces. Proto je velmi důležité dodržet ideální poměr C:N. Ten se pohybuje v rozmezí od 25:1 do 40:1. S přibývajícím poměrem, až 60:1,

kompostovací proces stále probíhá, ale pomaleji, a to kvůli nedostatku dusíku, který vyžadují mikroorganismy pro biodegradaci. Optimálního poměru C:N lze dosáhnout kombinací různých biologicky rozložitelných odpadů. Látky bohaté na dusík jsou například tráva, listí a exkrementy. Látky, které obsahují malé množství dusíku, jsou například sláma, kůra, jehličí a dřevo. V materiálech připadá průměrně 10 až 15 hmotnostních jednotek uhlíku na 1 hmotnostní jednotku dusíku. V extrémních případech, kdy má zakládka velký nedostatek dusíku, je možnost aplikace močoviny do zakládky pro zlepšení poměru [11], [14], [15], [16].

Materiály a jejich poměr C:N

Materiály se obecně rozdělují na dvě skupiny, a to na materiály bohaté na uhlík a materiály bohaté na dusík. Uhlíkaté materiály jsou spíše starší, již hnijící materiály. Často je lze identifikovat podle hnědé barvy. Příkladem jsou dřeviny a opadané listí.

Na druhé straně materiály s vyšším obsahem dusíku jsou spíše zelené a čerstvé. Příkladem je čerstvě posečená tráva, ostříhané větvičky z keřů a různé druhy hnoje. Přibližné hodnoty poměru C:N u vybraných materiálů jsou uvedené v Tab. 1 [17], [18].

Tab. 1: Poměr C:N u vybraných materiálů

Uhlíkatý materiál	Poměr C:N	Dusíkatý materiál	Poměr C:N
Dřevní štěpka	500:1	Posečená tráva	15-20:1
Odřezky z keřů	226:1	Odpad ze zeleniny	15-37:1
Sláma z obilovin	50-60:1	Bioodpad z domácnosti	10-15:1
Opadané listí	37-47:1	Ovčí hnůj	17:1
Znečištěný papír	54-129:1	Drůbeží trus	6-10:1

2.3.2. Fosfor, draslík a síra

Tyto tři prvky ovlivňují kompostovací proces minimálně. Řešeny jsou stejně jako dusík v poměru k uhlíku. Mohou napomáhat lepšímu průběhu procesu, tvorbě humusu nebo odstranění zápachu. V dnešní době ale existuje relativně málo doporučení, jak těmito prvky ovlivňovat proces.

Doporučovaný poměr uhlíku k fosforu je od 120:1 až do 240:1. Fosfor se nachází zejména v odpadech dřevin (piliny, kůra, štěpka). Důležitý je pro tvorbu humusu. Draslík nijak zvlášť neovlivňuje proces. Pro ideální průběh se ale doporučuje udržet poměr uhlíku k draslíku v rozmezí od 100:1 do 150:1. Přebytek síry může způsobit zapáchání zakládky, protože stejně jako u dusíku může přebytek síry vést k vytváření těkavých zapáchajících sloučenin síry. Doporučuje se poměr uhlíku k síře 100:1 a více [14], [15].

2.3.3. Vhodné suroviny

Kompostovat lze jakýkoliv biologicky rozložitelný materiál. Nejčastěji se jedná o posečenou trávu, spadané listí, seno, slámu, piliny a hnůj. Kompostováním mohou být zpracovávány také potenciálně rizikové odpady, a to zejména gastro odpad a čistírenské kaly.

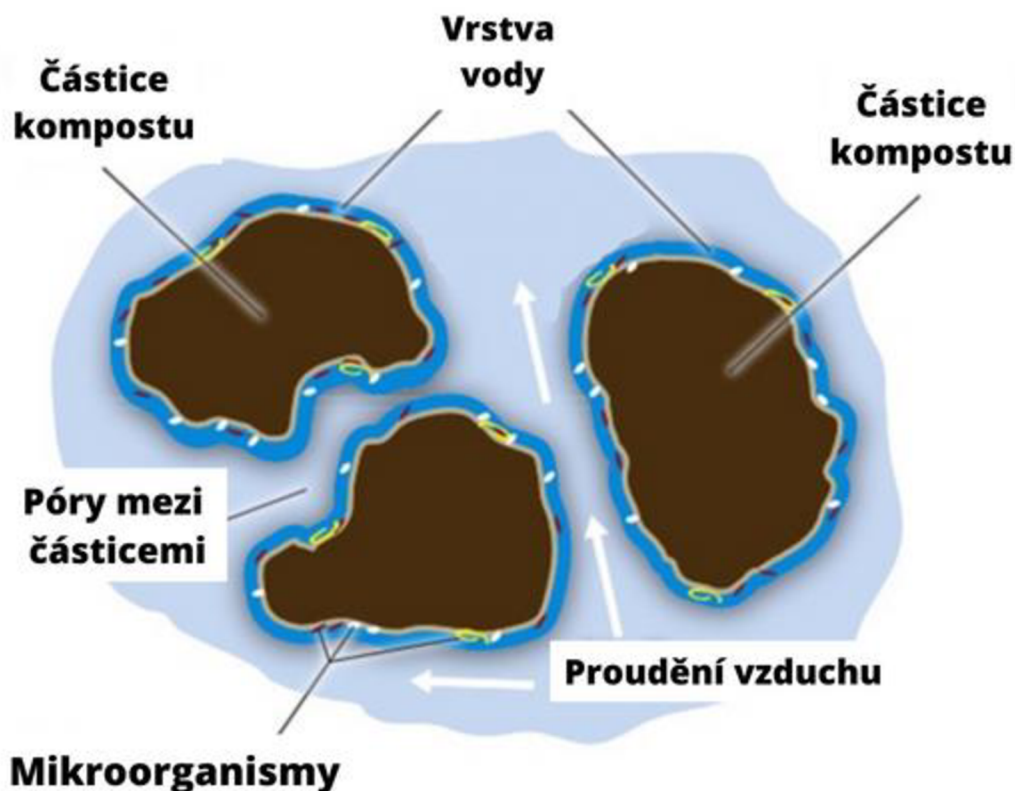
I přesto, že by šlo kompostovat pouze jednu složku, tak se nejčastěji vytváří zakládky, které jsou pestřejší. Je to zejména kvůli tomu, že si nelze plně vybírat materiály. Kompostárny často musí pracovat pouze s dostupnými materiály. Ty se odvíjí hlavně podle ročního období. Z dostupných materiálů je nejvýhodnější vytvořit pestrou skupinu, čímž se zvyšuje kvalita kompostu. Pro co nejlepší homogenitu výsledného kompostu je ideální míchat materiály se stejnou dobou rozkladu.

Z hlediska chemického složení je důležitý i poměr organického materiálu k anorganickému. Organický materiál musí obsahovat dostatek látek, které jsou rychle odbouratelné, například cukry a bílkoviny. Díky tomu se kompostovací proces rychle rozbíhá, a tím se narušují i velmi stabilní organické sloučeniny. Pokud zakládka tyto rychloodbouratelné materiály neobsahuje, probíhá proces velmi pomalu a stabilní látky se nedaří degradovat. Anorganický materiál nijak nepodporuje kompostovací proces, pokud je ho ale příliš, celý kompostovací proces se zpomaluje [11], [14].

2.3.4. Struktura, velikost částic a objemová hmotnost zakládky

Vybrané suroviny je vhodné před začátkem kompostování podrtit na menší části a dobře promísit s ostatními složkami. Cílem je dosáhnout co největší homogenity. Materiál se drtí kvůli zvětšení výsledného povrchu zakládky, což napomáhá rychlosti procesu. Velikost částic nesmí být příliš malá, aby zakládka neměla příliš velkou hustotu a vlhkost a dala se dobře provzdušnit. Pokud je materiál příliš nadrcený, lze situaci zlepšit přidáním drcené slámy. Ideální zakládka je složená z částic od malých o velikosti kolem 5 mm až po velké částice o velikosti 50 mm.

Faktorem, kterým lze alespoň částečně kontrolovat vlhkost, strukturu a velikost částic, je objemová hmotnost. Ideální objemová hmotnost je 600 kg/m^3 . Zakládka by neměla přesáhnout 700 kg/m^3 , poté už je aerace v zakládce velmi složitá až nemožná. Na druhé straně hustota pod 400 kg/m^3 také neprospívá kompostovacímu procesu. Je to z důvodu příliš velkých pórů v materiálu, které nezadržují dostatek kyslíku a uniká přes ně spousta energie v podobě tepla (viz Obr. 4). Objemovou hmotnost ovlivňuje také celková velikost zakládky, čím je zakládka větší, tím je větší i objemová hmotnost ve spodní části hromady. Volba velikosti zakládky záleží na používané technologii a dostupné technice. Obecně platí, že čím je zakládka větší, tím náročnější je její aerace a také její překopávání [14], [15], [16].



Obr. 4: Schéma pórů mezi částicemi materiálu, převzato a upraveno [10]

2.4. Faktory ovlivňující proces kompostování

Kompostovací proces ovlivňuje několik různých faktorů. Kompostovací zakládka je složená z pevných částic, které mezi sebou mají póry. Tyto póry jsou vyplněny hlavně vzduchem, přítomné jsou ale i další plyny. Každá částice má kolem sebe kapalnou vrstvu. V tomto filmu se nachází aerobní mikroorganismy, které využívají kyslík. Kyslík proudí póry, mikroorganismy ho spotřebovávají a rozkládají tak organickou hmotu. Ve stejnou chvíli probíhá proces i uvnitř organické částice. Zde probíhá proces anaerobní. V intenzivních kompostovacích technologiích dochází k ovlivňování těchto procesů, a to hlavně mírou provzdušňování a překopávání.

2.4.1. Kyslík

Kyslík je pro proces kompostování důležitý element. Díky kyslíku probíhají aerobní procesy na úkor anaerobních procesů. Aerobní procesy jsou efektivnější a účinnější než anaerobní. Proto je klíčové zajistit dostatečnou aeraci zakládky. Dostatečná aerace je sledována pomocí uvolňovaného plynu ze zakládky. Plyn ze zakládky by měl stále obsahovat určitou koncentraci kyslíku. U manuálních technologií by měl být obsah kyslíku okolo 5 %. U intenzivních procesů by měla být koncentrace vyšší, a to od 10 do 18 %. Tyto hodnoty jsou ale pouze přibližné, záleží nejen na stavu zakládky, ale i na použité technologii a požadavku na rychlost procesu [10], [11].

Největší potřeba kyslíku je na začátku procesu. Spotřeba kyslíku se postupem procesu pozvolna snižuje. Nelze určit přesné hodnoty spotřeby kyslíku, ani přesný graf postupu spotřeby, záleží totiž na skladbě zakládky, její vlhkosti a dalších faktorech. Obecně platí, že proces kompostování probíhá důkladně při dostatečné aerace zakládky. Nedostatek kyslíku pro aerobní procesy vyústí v převládající anaerobní procesy. Ty vytváří sloučeniny jako například metan, organické kyseliny a sulfan. Tyto sloučeniny mají velmi výrazný zápach, díky čemuž je možné odhalit nedostatečnou aeraci zakládky [10], [11].

2.4.2. Provdzušňování

Za účelem dostatečného přívodu kyslíku je vhodné zakládku provzdušňovat. Proces provzdušňování neboli aerace může být pasivní nebo aktivní. Pasivní provzdušňování je velmi jednoduché. Zakládka je uložena a množství provzdušňování záleží čistě na okolních podmínkách. Aktivní provzdušňování je forma nucená, kdy pomocí ventilátorů a dmychadel je vzduch vtlačěn do zakládky. Aktivní aerace je využívána hlavně u intenzivních kompostovacích procesů. Aerace ovlivňuje teplotu a vlhkost. Aeraci tedy kontrolujeme teplotu procesu. Provdzušňování snižuje teplotu zakládky a zároveň podporuje probíhající procesy. Díky tomu může provzdušňování krátkodobě snížit teplotu, ale ve výsledku napomáhá teplotu udržovat [10], [11], [16].

2.4.3. Vlhkost

Vlhkost je dalším významným faktorem pro kompostovací proces. Vlhkost je důležitá kvůli mikrobiálním procesům. Okolo každé částice v zakládce se nachází vodní film, jehož tloušťku ovlivňuje právě vlhkost. Čím silnější tento film je, tím hůř se k mikroorganismům dostává kyslík potřebný pro průběh aerobních procesů. Obecně u kompostování je doporučená míra vlhkosti 40 až 65 %. U intenzivních kompostovacích procesů je lepší mít vlhkost víc jak 50 %, maximálně 65 %. Přesné hodnoty nelze určit, záleží na skladbě zakládky a na velikosti částic, kolem kterých se bude tvořit vodní film. Postupem kompostovacího procesu ubývá na vlhkosti materiálu. Pokud ale nehrozí narušení procesu, není potřeba vlhkost ovlivňovat [10], [11], [13], [16].

2.4.4. pH

Hodnota pH ovlivňuje kompostovací proces z hlediska rychlosti a životaschopnosti mikroorganismů. Ideálně by se pH mělo pohybovat v hodnotách od 6,5 do 8. Kompostovací proces ale dokáže fungovat s hodnotami od 5-9. Pokud je pH nižší než 5,5, prostředí je pro mikroorganismy příliš kyselé a může je i ničit. Takto kyselé prostředí vzniká často na začátku procesu kvůli tvorbě organických kyselin (octová, propionová, butanová). V takovém prostředí jsou dominantní houby a plísně. Organické kyseliny se rozkládají pomocí mezofilních organismů anebo oxidací. Důležitá je tedy dostatečná aerace a teplota do 40 °C. Po rozkladu organických kyselin začíná pH postupně stoupat do neutrálních až mírně zásaditých hodnot. V takovém prostředí jsou aktivní termofilní mikroorganismy a bakterie. Čím zásaditější je prostředí, tím pomaleji kompostovací proces probíhá. pH v zakládce zvyšují amonné ionty vznikající rozkladem bílkovin a močoviny. Průběhem procesu se hodnoty pH postupně mění, záleží ale na použité technologii [10], [16], [19].

2.4.5. Teplota

Teplota popisuje dění v zakládce a ovlivňuje fungování kompostovacího procesu. Tento faktor významně ovlivňuje mikroorganismy, které se účastní procesu, a rychlost biochemických procesů. Zároveň je to ukazatel mikrobiální aktivity, při které je produkováno teplo. Teplo je produkováno hlavně v první fázi procesu a je důležité pro proces hygienizace. Čím větší je produkováno teplo, tím rychleji proces probíhá. Zároveň také stoupá spotřeba kyslíku a množství vypařované vody. Teplota je ovlivňována zejména intenzitou aerace a mírou překopávání, proto se zmíněné faktory upravují pro dosažení co nejvyšších teplot. Díky tomuto může být teplota považována za jeden z hlavních ukazatelů průběhu kompostovacího procesu [10], [13], [16].

2.4.6. Překopávání

Překopávání je důležitou součástí kompostovacího procesu. Proces kompostování neprobíhá po celém objemu zakládky, ve většině případů jsou to okraje zakládky, kde proces neprobíhá. Proto je důležité zakládku překopat. Tím se promíchají místa, kde probíhá proces a je vyšší teplota, s místy, kde proces neprobíhá. Díky tomu je zakládka více homogenní, je jednotnější ve vlhkosti a struktuře. Překopávání zakládky napomáhá také její hygienizaci, neboť proces probíhá v co největším objemu, a tak dochází ke zničení většiny patogenů. Dále má překopávání kladný vliv na biodegradaci organických látek a objemovou hmotnost kompostu. Biodegradace se zlepšuje kvůli mělnění částic na menší, a to zrychluje celý proces. Překopávání také slouží k provzdušnění zakládky, čehož využívají manuální kompostovací technologie.

Složitě je ale najít ideální frekvenci překopávání. U manuálních kompostovacích technologií stačí zakládku překopat každé dva měsíce, u intenzivního kompostování záleží na technologii, ale nejčastěji se překopává v řádech dnů. Pokud je zakládka překopávána příliš často, proces je narušován a neprobíhá stabilně, nedosahuje potřebných teplot a nemusí vůbec docházet k hygienizaci. Časté překopávání může také mělnit částice na příliš malé, čímž se celá zakládka vysušuje. Narušením struktury zakládky také dochází k uvolnění amoniaku, kvůli čemuž se může zhoršovat poměr uhlíku k dusíku v zakládce. Musí se brát také v potaz, že překopávání nesnižuje teplotu zakládky celkově, ale jen nárazově, než se proces znovu rozběhne.

Jak často by se měla zakládka překopávat nelze obecně určit, záleží na technologii kompostování, technologii překopávání a také na případném zvlhčování zakládky [10], [16].

2.5. Mikrobiologie procesu

Kompostování probíhá pomocí aktivity mikrobiální komunity. Nejdůležitějším komponentem při biodegradaci a rozkladu jsou mikroorganismy zastoupené hlavně bakteriemi a houbami. Může se jednat o aerobní i anaerobní organismy. Důležitější jsou aerobní organismy, které jsou zastoupené ve větším počtu a více se podílejí na procesu biodegradace a rozkladu [14].

Aerobní organismy se rozdělují do dvou podskupin podle teplot, ve kterých jsou aktivní. První skupinou jsou mezofilní organismy. Mezofilní organismy jsou aktivní od 20 do 40 °C. Nejvíce aktivní jsou na začátku první fáze a poté ve třetí fázi. Ve třetí fázi zajišťují mezofilní organismy dozrání kompostu. Druhou skupinou jsou termofilní organismy, ty jsou aktivní v teplotách

od 40 do 70 °C. V termofilní části procesu dochází k aktivnímu rozkladu materiálu. V průběhu termofilní fáze jsou mezofilní organismy ničeny nebo přechází do neaktivního stavu. Termofilní organismy jsou zastoupeny zejména bakteriemi, aktinomycety, plísněmi a kvasinkami [14].

Schopnost organismů degradovat organickou hmotu závisí na jejich schopnosti produkovat enzymy, které jsou potřebné k degradaci složek substrátu (celulózy, hemicelulózy a ligninu). Čím složitější je substrát, tím složitější musí být enzym potřebný k jeho rozkladu. Například aktinomycety jsou významným kmenem bakterií, které produkují širokou škálu extracelulárních enzymů, a hrají tak důležitou roli v biodegradaci organické hmoty [14].

2.6. Technologie kompostování

Kompostovací technologie můžeme rozdělit podle různých hledisek, například podle úrovně využití anebo podle použité technologie. Rozdělení podle úrovně je spíše orientační. První úroveň je domácí kompostování. Jde o zpracování odpadu ze zahrady a kuchyňského odpadu. Ve většině případů se jedná o malé manuální kompostárny. Další úroveň jsou komunitní kompostárny. Jedná se o střediska s roční výrobou kompostu okolo 10–20 tun. Kompostárny jsou zřizovány zahradními spolky a ekologickými organizacemi. Používají manuální technologie, nejčastěji s pomocí různých nakladačů a překopávačů. Poslední úrovní jsou průmyslové kompostárny. Ty jsou zřizovány obcemi a městy, respektive jejich technickými službami. V dnešní době lze čím dál častěji nalézt i soukromé podniky a firmy. Proto bývá tato úroveň označována jako podnikové kompostárny. Roční produkce kompostu se pohybuje mezi 50–500 tunami. V České republice se ročně vyrobí přibližně 700 000 tun kompostu. Jedná se o komplexní činnost, často využívající automatizované technologie a také technologie intenzivního kompostování [11], [19], [20].

2.6.1. Manuální technologie

Proces manuálního kompostování je obhospodařován člověkem. Překopávání je zajištěno ručně nebo mechanicky, provzdušňování není aktivní, ale pouze pasivní. Manuální kompostovací technologie se využívají zejména u domácího a komunitního kompostování. Tyto technologie jsou levné, ale náročné na prostor. Průběh procesu kompostování je u manuálního kompostování velmi dlouhý, přibližně 3 měsíce a více. Nevýhodou je možnost vzniku zápachu při nedostatečném překopávání. Manuální kompostování má pět základních technologií, řádková a pasivně provzdušňovaná řádková technologie, kompostování v nádobě nebo ve válci a vermikompostování [11], [19].

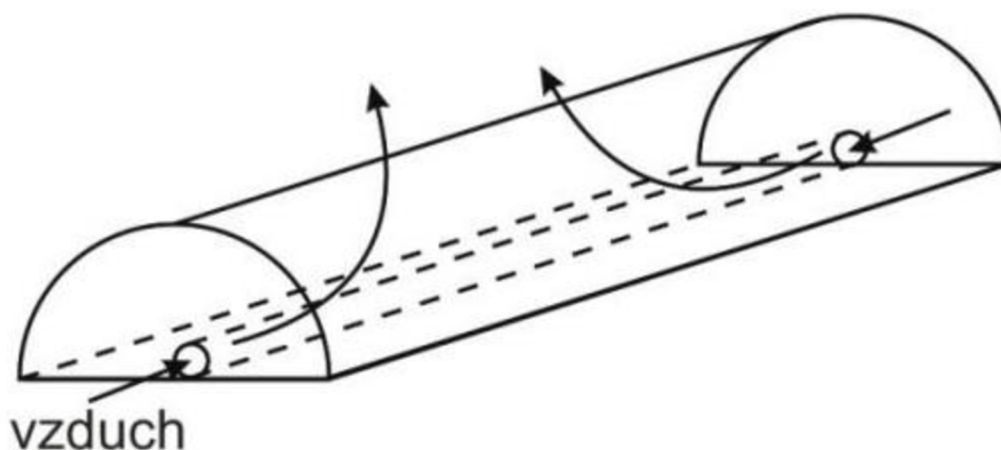
2.6.2. Kompostování v řádku

Kompostování v řádku, nebo také na hromadě, je jeden z nejrozšířenějších způsobů kompostování. Používá se na všech úrovních, od domácích kompostáren až po podnikové. U této technologie je nejsložitější udržet dostatečnou aeraci a velikost pórů v materiálu. Porozita je problémem zejména ve větších zakládkách. Zde vinou tlaku nevznikají dostatečně velké póry mezi materiálem a kvůli tomu vzniká i problém s aerací. Jedním z řešení tohoto problému je přimíchávání materiálů, které dodávají strukturu zakládce, například dřevěná

štěpka. Přidání takového materiálu zlepšuje pohyb kyslíku materiálem a částečně také aeraci. Pro celkové zlepšení procesu je důležité kompost překopávat. Při překopání dojde k celkové aeraci zakládky. Dále je při překopání také zlepšena homogenita zakládky. U této technologie probíhá proces hlavně ve středu zakládky, na okrajích totiž dochází k přílišnému ochlazení, proto je důležité zajistit dostatečné překopávání materiálu. Mikroorganismy mají díky tomu dostatek živin pro udržení první fáze procesu, a ta tak proběhne v celém objemu. Výhodou této technologie kompostování je nízká cena a nenáročnost na údržbu. Nevýhodami je potřebný prostor a také pomalost procesu, neboť trvá velmi dlouho než vznikne kompost jako finální produkt. Také je potřeba práce při překopávání zakládky a její přípravě [11], [19], [21].

Pasivně provzdušňovaná řádková technologie

Oproti klasické řádkové technologii jsou zakládkou provedené perforované trubky, které mají zajistit dostatečnou aeraci zakládky (viz Obr. 5). Používají se různé verze trubek a jejich různé množství. Tyto parametry závisí na velikosti a skladbě zakládky. Zakládku není potřeba tak často překopávat, v některých případech se nepřekopává vůbec. O to důležitější je ale příprava a skladba zakládky. Je důležité zajistit dostatečnou porozitu a promíchání materiálu. Kvůli zavedeným trubkám skrz zakládku dochází k jejímu ochlazení. V některých případech jsou proto zakládky izolovány, například již hotovým kompostem. Zakládka si pak lépe drží termofilní teploty a je zajištěno, že proces proběhne i na krajích hromady. Díky pasivní aeraci probíhá proces o něco rychleji, a pokud je zakládka správně připravena, je i méně náročnější na obhospodaření [11], [19], [21].



Obr. 5: Schéma pasivně provzdušňované řádkové technologie, převzato z [11]

2.6.3. Kompostování v nádobě

Kompostování v nádobě slouží zejména ke kompostování v malém množství. Jedná se o nádobu, nebo také bednu, s plněním z vrchní části a perforovanými bočními stěnami pro lepší aeraci. V nádobě není prováděno překopávání. Určité modely této technologie využívají

různé míchací mechanismy. Hotový kompost se odebírá zespod nádoby. Délka procesu je delší než u kompostování v řádku, doba se pohybuje okolo šesti měsíců a více. Proces probíhá déle kvůli umístění v nádobě a absenci překopávání. Výhodou je ale menší potřebný prostor a nenáročnost na promíchávání. Nejčastěji se tato technologie využívá pro domácí kompostéry, které mají malý objem a slouží ke zpracování odpadu ze zahrady a kuchyně. Využití pro velké objemy je velmi málo, a to hlavně kvůli délce procesu. Náklady na tuto technologii jsou v porovnání s ostatními manuálními technologiemi malé [19], [22].

2.6.4. Kompostování ve válci

Kompostování ve válci je typ technologie, kdy zakládka je uzavřena v otočném válci. Velikost válce, jeho vybavení a způsob aerace se u jednotlivých výrobců liší. Nejdražší technologie jsou vybaveny senzory váhy, vlhkosti a teploty. Všechny modely ale mají shodné základní vlastnosti, a to je zejména lepší kontrola, aerace a překopávání. Válec je různě perforovaný, aby při otáčení docházelo k dostatečné aeraci a také aby z válce mohla unikat přebytečná vlhkost. Překopávání je prováděno manuálně pomocí otáčení válce. Na začátku procesu je doporučeno častější překopávání pro rychlejší průběh procesu. Proces v této technologii neprobíhá celý, ale pouze první dvě fáze, třetí fáze dozrávání je prováděna v řádku nebo na hromadě. První dvě fáze probíhají od 3 do 4 týdnů. Záleží na skladbě zakládky a frekvenci otáčení válce s materiálem. Tato Technologie může být využita i pro velké objemy a nezabírá tolik místa jako předchozí technologie. Na druhou stranu je náročnější na počáteční investici, provoz, údržbu a kontrolu [19], [22].

2.6.5. Vermikompostování

Jedná se o speciální a velmi odlišnou technologii oproti výše uvedeným technologiím. U této technologie jsou do připravené zakládky přidány další makroorganismy, které napomáhají s biodegradací. Nejčastěji jsou to žížaly, konkrétně kalifornské (*Eisenia andrei*) nebo hnojní (*Eisenia fetida*). Kvůli tomu, že jsou do procesu vnášeny jiné makroorganismy, musíme přizpůsobit samotný proces kompostování. Makroorganismy potřebují větší vlhkost a podestýlku. Proces nesmí dosáhnout vysokých teplot, protože příliš vysoká teplota po delší dobu začne hubit přidané organismy. Kvůli přítomnosti žížal se zakládka nikdy nepřekopává. Kompostování probíhá v uzavřené nádobě s perforováním. Pro přidané organismy je ideální omezení přístupu světla. Délka procesu závisí na množství zakládky a její vlhkosti a také na teplotě procesu. I tento typ procesu hubí patogeny v zakládce, ale mnohem méně než u standardního procesu. Menší hygienizace je způsobena nízkou teplotou. Výsledný produkt, vermikompost, je oproti standardnímu kompostu obohacen o výkaly červů. Ty jsou velmi bohaté na živiny. Vermikompostování je nenáročné na čas, prostor a je levné. Největší investicí jsou žížaly, o které je také potřeba se patřičně starat. Vermikompostování je využíváno zejména pro domácí kompostování [14], [19].

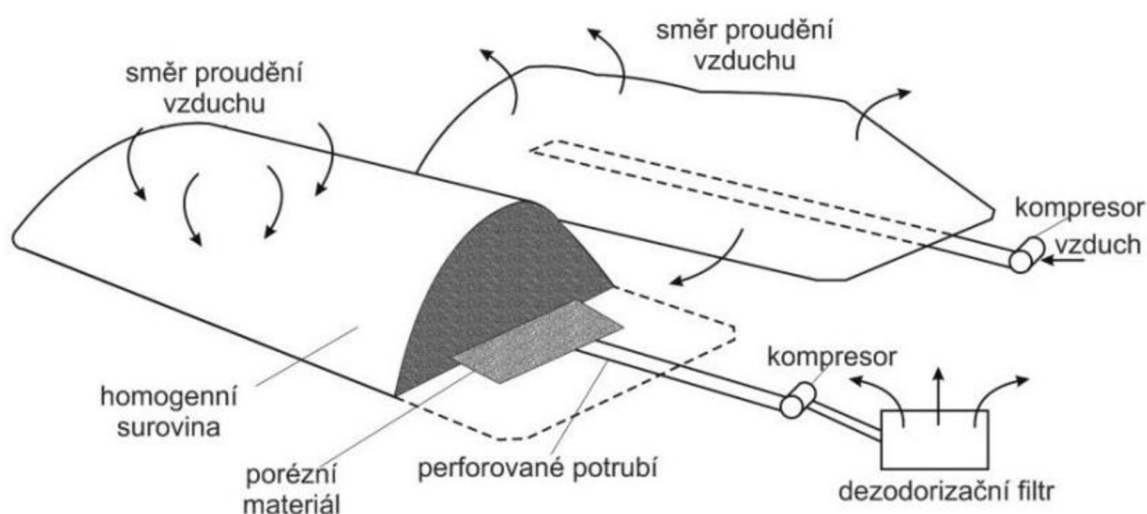
2.6.6. Technologie intenzivního kompostování

Intenzivní kompostování je na rozdíl od manuálního kompostování využíváno zejména na průmyslové, podnikové a komunitní úrovni. Jedná se o drahé a náročné technologie. Zařízení jsou vybavena systémy automatického překopávání a provzdušňování. Aerace je ve většině

případů aktivní. Technologie jsou navrženy pro zpracovávání velkých objemů biologicky rozložitelného odpadu. Jejich největší výhodou je zkrácení doby potřebné ke kompostování. V těchto technologiích probíhá první a začíná druhá fáze kompostování. Dokončení druhé fáze a dozrávání je prováděno odděleně. Díky zintenzivnění procesu probíhá lépe proces hygienizace, dochází k eliminaci patogenních a hnilobných částic a k inaktivaci semen plevelů. Díky tomu by se tyto technologie mohly využívat pro zpracování například gastroodpadů nebo čistírenských kalů. Proces probíhá v uzavřených nebo polouzavřených prostorech. Samotné prostory musí být vybaveny pro odvod kontaminované vody, aby nedošlo k průsaku do spodních vod [19], [20].

2.6.7. Kompostování v řádku s řízenou aerací

Kompostování v řádku je nejjednodušší technologie intenzivního kompostování. Jedná se o stejnou technologii jako v případě manuálního kompostování s jediným rozdílem. Tím je zavedení potrubí zakládkou nebo kanálu pod zakládkou pro řízenou aeraci. Potrubí nebo kanály jsou připojeny na dmychadla, která vhání vzduch do zakládky (viz Obr. 6). Mohou pracovat i na opačném principu, to znamená že dmychadla odsávají vzduch ze zakládky, a tím dochází k obměně kyslíku v materiálu. Kolem perforovaného potrubí nebo speciálního kanálu se nachází porézní materiál, který zabraňuje zanesení potrubí kompostovaným materiálem. Nejběžněji se používá štěpka nebo sláma. Řízená aerace urychluje kompostovací proces a dovoluje zvětšit řádky, ve kterých se kompostuje. Doporučované maximální velikosti řádku jsou 300–490 cm na šířku a 150–245 cm na výšku, ale samozřejmě závisí přímo na použité technologii. Pro tuto technologii je nutné pečlivě připravit zakládku. Kvůli tomu, že se zakládka nepřekopává, je potřeba ji připravit kvalitně homogenizovanou, aby došlo k správnému průběhu procesu a co nejlepší hygienizaci skrze celou zakládku. Zakládky mohou být různě zakryté, aby byly odolnější vůči vnějším vlivům a lépe se kontroloval probíhající proces. Pro zakrývání se využívá například půda, ale také různé perforované folie [11], [19], [23].



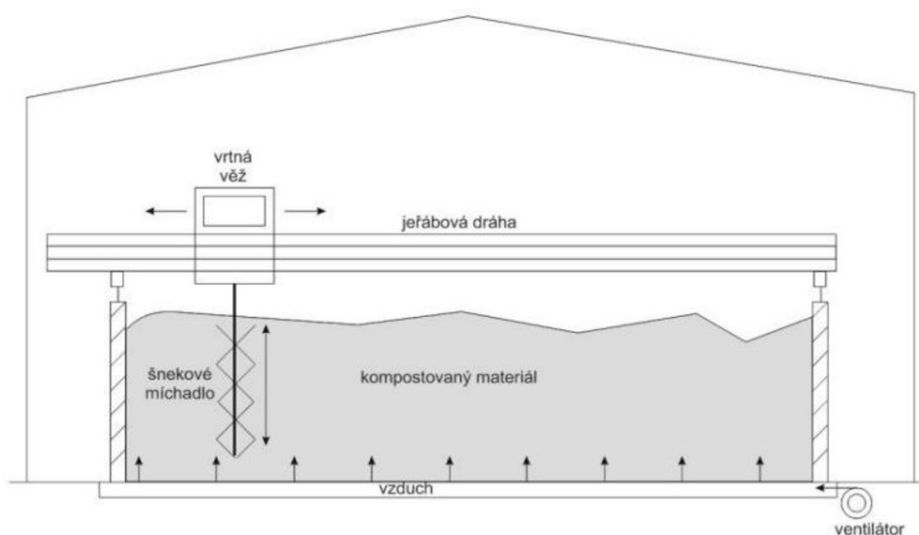
Obr. 6: Schéma kompostování v řádku s řízenou aerací, převzato z [11]

2.6.8. Polouzavřené technologie intenzivního kompostování

Kompostovací technologie s vrtnou věží

Jedná se o polouzavřenou plně automatizovanou vsázkovou technologii. Speciální komora je pomocí dopravníků plněna předpřipravenou zakládkou. Komora je vybavena řízenou aerací, provzdušňování je prováděno skrze systém drážek v podlaze. Překopávání je řešeno pomocí šnekového míchadla, které je umístěno ve věži (viz Obr. 7). Jeho pohyb záleží na naprogramování. Ve věži je také umístěn systém zavlažování, pokud je materiál příliš suchý. Nejnovějším vylepšením této technologie je systém biofiltrů, které zachytávají vzniklý zápach. Jedná se o technologii intenzivního kompostování s urychlením procesu. Čerstvý kompost vzniká v technologii přibližně po 4–5 týdnech, vyžrálý kompost po 10–12 týdnech [11].

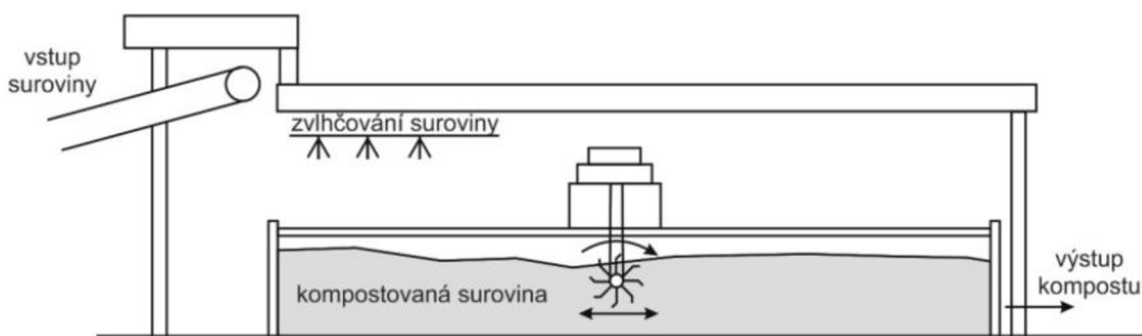
Celá technologie byla navržena a je vyráběna švýcarskou firmou COMPAG. Technologie vznikla koncem 80. let 20. století a dodnes je stále vyvíjena. Nejvýhodnější využití je pro zpracovávání 5000 až 10 000 tun bioodpadu ročně. Je nejvyužívanější technologií ve Švýcarsku [24], [25].



Obr. 7: Schéma kompostovací technologie s vrtnou věží, převzato z [11]

Kompostovací žlaby

Jedná se o polouzavřenou plně automatizovanou kontinuální technologii, ve které slouží jako prostor ke kompostování podlouhlý žlab (viz Obr. 8). Materiál je na jednom začátku plněn do žlabu pomocí dopravníku. Materiál je ve žlabu překopáván pomocí rotačního válce, který je zavěšen na kolejnicích po stranách žlabu a pohybuje se tak po celé délce žlabu. Válec je osazen hroty, zajišťuje překopávání a zároveň posouvá materiál k druhému konci žlabu. Díky tomuto stylu překopávání dochází k dobré homogenizaci materiálu. Na druhém konci je přibližně po 4 týdnech odebírán materiál, který prošel první a začal druhou fázi kompostovacího procesu. Takto zpracovaný materiál dozrává volně ložený na ploše [11].



Obr. 8: Schéma kompostovacího žlabu, převzato z [11]

2.6.9. Uzavřené technologie intenzivního kompostování

Jde o zcela uzavřené technologie ve tvaru válce nebo kvádrů. Může se jednat o kontinuální i diskontinuální technologie. Často jsou válce nebo kvádry tepelně izolovány, aby došlo ještě k zintenzivnění probíhaného procesu. Dále se proces urychluje díky intenzivní aeraci. Průběh první fáze většinou zabere přibližně 7–10 dnů, záleží na složení a přípravě zakládky a naprogramování řízení procesu [11].

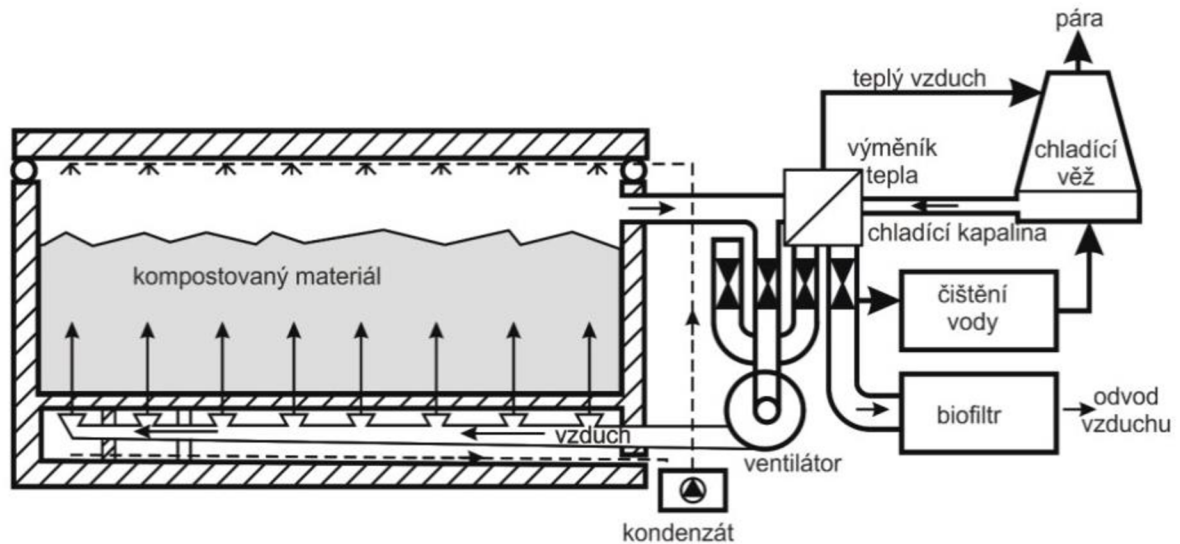
Rotační bioreaktory

Rotační bioreaktory představují kontinuální válcovou technologii, kdy se válcový buben, který je horizontálně uložený, pomalu otáčí. Uložení je na ložiskách a otáčení je prováděno elektromechanicky. Provozdušňování zakládky je zabezpečeno dmychadly, kdy je aerace prováděna směrem od konce na začátek technologie. Provozdušňování je řešeno tímto způsobem, aby se vzduch ohřál na konci, a teplý vzduch poté ohřival zbytek procesu, a hlavně čerstvě vložený materiál. Po průchodu technologií je vzduch odváděn na biofiltry, aby byl zbaven zápachu a různých dalších těkavých látek. Proces kompostování probíhá velmi rychle. Mikroorganismy mají díky provozdušňování dostatek kyslíku a zároveň i teplo. Rychle rozložitelný bioodpad je zpracován v rámci dnů. K dokončení druhé fáze procesu a dozrávání dochází na volné ploše, bez jakéhokoliv ovlivňování [11].

Kompostovací boxy

Kompostovací boxy jsou diskontinuální technologie. Technologie se skládá ze dvou hlavních částí. První částí jsou samotné boxy a druhou část tvoří technologie provozdušňování a zvlhčování (viz Obr. 9). Existují boxy různých velikostí a jsou vyrobeny z kovu nebo plastu. Podle velikosti rozdělujeme boxy na malé a velké. Malé boxy nejsou permanentně přidělané ke zbytku technologie, ale jejich naskladnění a vyskladnění probíhá na volné ploše. Naskladněné boxy jsou připojeny na vzduchotechniku a zavlažování. Velké boxy jsou uloženy a napojeny na technologii stále. Provozdušňování je zajištěno pomocí dmychadel a plyny vzniklé při procesu jsou odváděny přes biofiltry zpět do ovzduší [11], [20].

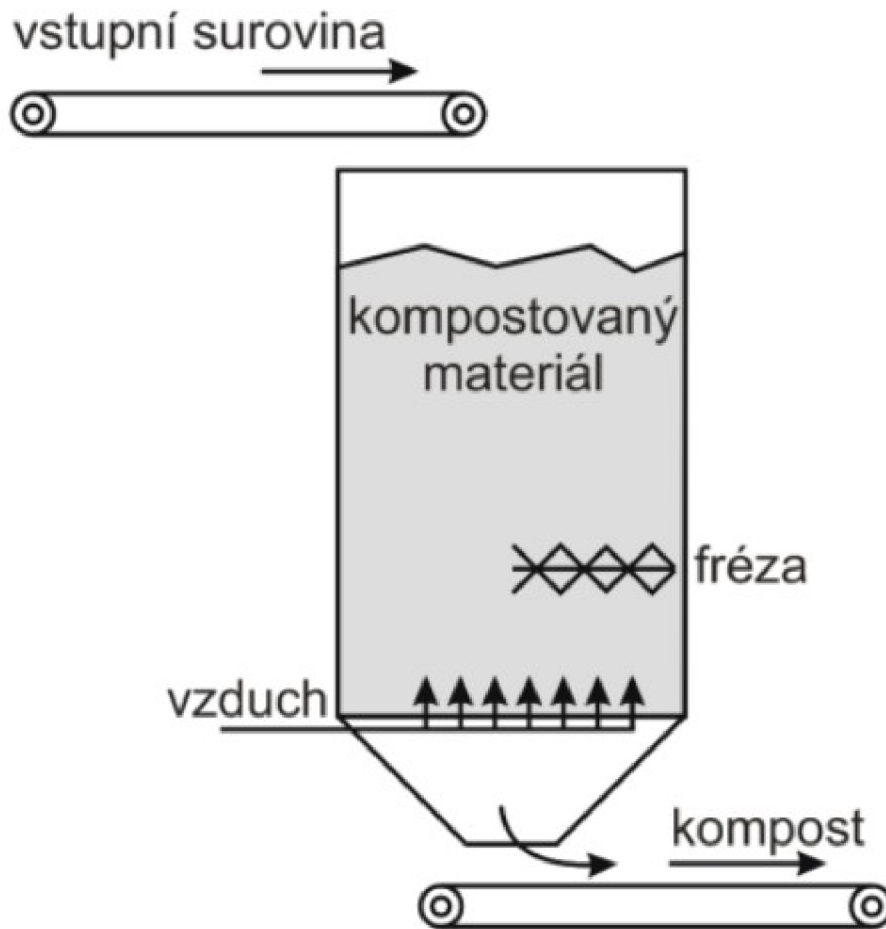
Jedná se o velmi jednoduchou technologii, která avšak vyžaduje speciální mechanizaci pro obsluhu. Prostorové nároky jsou vyšší a ideální je, aby byly boxy zastřešené. Velkou nevýhodou technologie je absence překopávání. Provzdušňování je prováděno skrze podlahu boxu. Vzduch ale může vytvořit zkratové kanály, kdy nebude docházet k dostatečné aeraci zakládky [11], [20].



Obr. 9: Schéma kompostovacího boxu, převzato z [11]

Věžové bioreaktory

Jedná se o vertikálně postavený válec (viz Obr. 10). Válec je nejčastěji o výšce 7 m a šířce 8-10 m. Na dně válce se nachází provzdušňovací technologie a fréza, která slouží k vyprazdňování slehlého materiálu. Technologie je kontinuální. Ve vrchní části válce je plněna pásovým dopravníkem a ve spodní části je zmíněnou frézou kompost vyprazdňován na další dopravník. Nevýhodou této technologie je její složitost. Pokud dojde k poškození systému provzdušňování nebo vyskladňovací frézy, je oprava velmi složitá a nákladná. Kvůli tomuto se tato technologie nevyužívá často [11].



Obr. 10: Schéma věžového bioreaktoru, převzato z [11]

Tunelové bioreaktory

Tyto bioreaktory jsou také kontinuální technologií kompostování. Jsou založeny na obdobném principu jako věžové reaktory, ale jsou zbaveny většiny jejich neduhů. Jde o horizontální kvádr, který je opatřen posuvným dnem nebo písem pro posuv materiálu. Dno kvádru je vybaveno provzdušňovacími kanálky. Překopávání je zajištěno posuvem materiálu. Díky tomu se také narušují zkratové kanály, které vznikají v materiálu provzdušňováním. Doba zdržení materiálu je okolo 14 dní. Tunely mohou mít různé velikosti, ta se odvíjí od předpokládané roční vytíženosti zařízení. Menší jsou vyráběny z kovu, větší jsou betonové. Systém posuvu je zajišťován mechanicky nebo hydraulicky. Všechny mechanické části jsou přístupné, jejich oprava je díky tomu velmi jednoduchá [11], [20].

2.7. Výhody využití kompostu

Kompost, jako výsledný produkt kompostovacího procesu, má spoustu výhod při využití. Kompost lze popsat jako organický materiál obsahující organické látky a živiny získané řízeným biologickým rozkladem biologického odpadu. Využívá se jako prostředek pro zlepšení půdy a hnojivo pro rostliny. Kvůli intenzitě dnešního zemědělství je dnes čím dál větší problém,

aby si půda udržela své vlastnosti a výnosnost. Eroze půdy způsobuje, že půda ztrácí úrodnost, strukturu, schopnost zadržovat vodu a další důležité vlastnosti. Jedním z řešení je aplikace kompostu. Kompost celkově zlepšuje vlastnosti půdy a napomáhá s ochranou rostlin.

Dále, díky velkému obsahu dostupných živin, jeho aplikace pomáhá se snižováním potřebného množství syntetických hnojiv, při zachování podobného výnosu. Na rozdíl od anorganických syntetických hnojiv u aplikace kompostu nedochází k uvolňování přebytečných látek do okolního prostředí a podzemních vod. U kompostu dochází k pomalému uvolňování živin do půdy, například v roce aplikace kompostu je dostupných pouze 5 až 15 procent dusíku obsaženého v kompostu. Pomalé uvolňování živin je zajištěno mikrobiální aktivitou, která je potřebná k přetvoření materiálu na živiny [9], [14], [26].

2.7.1. Živiny obsažené v kompostu

Kompost obsahuje velké množství živin pro rostliny a půdu, z nichž je nejdůležitější humus. Humus zlepšuje zejména fyzikální vlastnosti půdy. Dále obsahuje velké množství dusíku, který je velmi důležitý pro rostliny. Dusík je v kompostu obsažen jak v organické, tak v anorganické formě. Organická forma dusíku je vázána na organickou hmotu a je obtížněji dostupná pro rostliny. Organický dusík je dostupný pro rostliny až po uvolnění mikrobiální aktivitou v půdě. Anorganická forma dusíku se v kompostu nachází ve formě amonné (NH_4^+) a nitrátové (NO_3^-). Amonné ionty jsou ukazatelem malé vyžralosti kompostu, protože v první fázi kompostování je organický dusík převeden na NH_4^+ , ale kvůli vysokým teplotám nedochází k nitrifikaci. Po poklesu teplot pod $35\text{ }^\circ\text{C}$ probíhá přeměna NH_4^+ na NO_3^- . U vyžralého kompostu je anorganický dusík zastoupen zejména ve formě NO_3^- [9], [26], [27].

Další důležité prvky zastoupené v kompostu jsou fosfor a draslík. Fosfor je obsažen ve formě oxidu fosforečného (P_2O_5). Nejméně zastoupené, ale stále důležité pro rostliny, jsou mikroprvky. Ty jsou zastoupeny vápníkem, hořčíkem, sírou, zinkem, manganem a železem [9], [27].

2.7.2. Výhody aplikace kompostu na půdu

Vliv aplikace kompostu na biologické vlastnosti půdy

Kompost by mohl být ideální hnojivo, neboť má pozitivní dopad na mikrobiální aktivitu v půdě a je zdrojem živin pro rostliny. Klíčovým faktorem pro dosažení kvalitní a zdravé půdy je mikrobiální diverzita. Mikrobiální aktivita působí na koloběh živin a další biologické procesy. Enzymatické procesy zajišťují půdní biochemické procesy a reakce. Aplikací kompostu dochází k navýšení enzymatických aktivit v půdě. Kompost obsahuje bakterie a houby, které jsou schopné rozkládat materiál na živiny pro rostliny, ale jsou také schopny určité míry degradace polutantů. Souhrnně, bakterie a houby obsažené v kompostu zlepšují vlastnosti půdy a poskytují dostatek uhlíku pro mikro i makro faunu v půdě. Další výhodou využití kompostu je dlouhá doba uvolňování živin pro rostliny. Díky mikrobiální aktivitě dochází k postupnému uvolňování živin [9].

2.7.3. Vliv aplikace kompostu na fyzikální vlastnosti půdy

Půdní stabilita, struktura a objemová hmotnost

Kompost je možné považovat za organické hnojivo. Díky obsahu humusu má kompost při aplikaci do půdy pozitivní vliv na fyzikální vlastnosti půdy. Kompost má půdotvorné vlastnosti a podporuje mikrobiální půdní aktivitu v půdě. Tyto faktory se projeví ve zvýšení úrodnosti půdy, zlepšení její stability a půdní struktury. Po zapravení kompostu do půdy se díky tvorbě vazeb zlepšuje půdní struktura a stabilita. Ideální je aplikace kompostu na hlinité nebo jílovité půdy, kde dochází k nejlepším výsledkům ve zlepšení stability a půdní struktury [9], [14].

Příliš vysoká objemová hmotnost půdy narušuje hned několik důležitých faktorů. Například zamezuje průtoku vody a dostatečné aeraci půdy. Kvůli tomu dochází k negativnímu ovlivnění růstu rostlin. Pro rostliny je těžší zakořenit, protože vysoká objemová hmotnost znamená i větší sílu potřebnou pro překonání sil mezi částmi půdy. Aplikace kompostu prokazatelně snižuje objemovou hmotnost kompostu, a tím zlepšuje prostředí pro růst rostlin [9].

Zlepšení půdní struktury a stability je závislé na míře a intervalech aplikace, a také na zralosti a kvalitě aplikovaného kompostu. Studie prokázaly, že po aplikaci kompostu do půdy, dochází z 29-63 % zlepšení půdní stability a struktury [9], [14].

Schopnost zadržovat vodu

Klíčovou schopností kompostu je schopnost zadržet vodu. Nejdůležitějším faktorem pro zadržení vody je přítomnost organické hmoty, která vede také ke snížení náchylnosti odplavení sedimentů a živin vodou. Aplikace kompostu je velmi jednoduchou a spolehlivou metodou, jak zlepšit poměr organické hmoty v půdě. Kompost také zlepšuje pórovitost půdy, díky čemuž se těžké půdy nezahlcují vodou, a nedochází k zatopení polí. Voda je díky větším pórům v půdě odváděna hlouběji. Díky schopnosti půdy zadržet více vody je méně náchylná na vysychání a díky větším pórům je odolnější při přivalových deštích. Rostliny jsou tak lépe chráněny a mají dostatek vody v celém průběhu jejich růstu. Výhodou aplikace kompostu je menší průsak látek do podzemních vod, neboť dochází k lepšímu zadržení např. přebytečných syntetických hnojiv [9], [14].

2.7.4. Vliv aplikace kompostu na chemické vlastnosti půdy

Schopnost výměny kationtů a hodnota pH

Schopnost a kapacita výměny kationtů je důležitým faktorem charakterizující kvalitu půdy. Velikost kapacity výměny kationtů u půdy určuje schopnost půdy zadržovat živiny, tím zabraňuje únikům živin do spodních vod. Je dokázáno, že aplikace kompostu, jakožto organické hmoty, zvyšuje výměnnou půdní kapacitu. Pro zvýšení iontově-výměnné kapacity půdy se doporučuje aplikace vyzrálého kompostu [9].

Aplikace kompostu do půdy přímo ovlivňuje pH půdy. Záleží na hodnotě pH aplikovaného kompostu, která závisí na míře zralosti kompostu. Nedostatečně vyzrálý kompost má vyšší pH. Po jeho aplikaci pak vyšší pH půdy způsobuje menší dostupnost živin v půdě pro rostliny.

U kyselých půd se obecně nedoporučuje aplikace kompostu, především ne zcela vyzrálého. Po aplikaci může dojít k dalšímu okyselení půdy [9].

2.7.5. Vliv aplikace kompostu na rostlinné patogeny a choroby

V důsledku přítomnosti mikroorganismů a organické hmoty obsažené v kompostu má potlačující efekt na rozvoj velkého množství rostlinných patogenů a nemocí. Fyzikální a chemické vlastnosti tedy hrají důležitou roli v supresivním účinku, a to nejen proto, že jsou odpovědné za typ a množství usazených mikroorganismů, ale také díky jejich účinkům na patogeny, zdraví kořenů rostlin a stav živin listů. Supresivní účinky kompostu proti patogenním mikroorganismům jsou ovlivněny hladinou živin a podmínkami prostředí během zrání [9], [14].

2.8. Požadavky na kvalitu kompostu podle normy ČSN

Vyzrálý kompost musí před prodejem nebo aplikací vyhovovat určitým požadavkům. Tyto požadavky určuje norma ČSN 46 5735 o průmyslových kompostech. Požadavky určují limitní parametry, které se vztahují na kvalitativní parametry a rizikové prvky. Povinné kvalitativní parametry jsou uvedené v Tab. 2 a limitní hodnoty vybraných rizikových prvků jsou uvedené v Tab. 3 [28].

Tab. 2: Limitní hodnoty pro kvalitativní parametry

Parametr	Jednotka	Hodnota
Vlhkost	% hm.	30–65
Spalitelné látky	% hm. v sušině	min. 20
Celkový dusík	% hm. v sušině	min. 0,6
Poměr C:N	max.	30
pH	-	6-9
Nerozložitelné příměsi > 20 mm	% hm. ve vzorku	< 3,0
Nežádoucí příměsi > 5 mm	% hm. ve vzorku	< 0,5
Klíčivá semena v 1 l kompostu	ks	≤ 3

Tab. 3: Limitní hodnoty rizikových prvků

Parametr	Jednotky	Nejvyšší přístupné množství
As	mg/kg	30
Cd	mg/kg	2
Cr	mg/kg	100
Cu	mg/kg	150
Hg	mg/kg	1
Ni	mg/kg	50
Pb	mg/kg	100
Zn	mg/kg	600

Dále se u kompostů může provádět mikrobiologická kontrola. Tento typ kontroly se provádí v případě, že při výrobě kompostu byly použity kaly z čistíren odpadních vod nebo vstupní suroviny s podezřením na obsah patogenních organismů. Limitní hodnoty mikrobiologické kontroly jsou uvedené v Tab. 4[28].

Tab. 4: Limitní hodnoty mikrobiologické kontroly

Indikátorový mikroorganismus	Jednotky	Nález
<i>Salmonella sp.</i>	nález v 50 gramech 5 zkoušených vzorků	negativní
<i>Escherichia coli</i>	kolonie tvořící jednotku v 1 gramu 5 zkoušených vzorků	$< 5 \cdot 10^3$
Geohelmini	nález ve 150 gramech 5 zkoušených vzorků	negativní

2.9. Investiční náklady kompostáren

Tato kapitola se věnuje odhadu investice na vybudování průmyslové kompostárny, která zpracuje minimálně 150 tun odpadu za rok, bez investice do samotné technologie intenzivního kompostování. Ceny jsou pouze orientační, závisí na velikosti dané kompostárny.

Investiční náklady se rozdělují do tří skupin. První skupinou jsou náklady na výstavbu. Tato skupina zahrnuje náklady na výstavbu vodohospodářsky zabezpečené plochy, jímku, váhu a budovu. Investice do vodohospodářsky zabezpečené plochy je minimálně 1,2 milionu korun. Tato plocha musí být zřízena, a to kvůli Zákonu 254/2001 Sb., takzvanému vodnímu zákonu. Jímka vyžaduje investici přibližně 350 000 Kč a váha zhruba 300 000 Kč. Administrativní budova se sociálním zázemím pro pracovníky (sanitární buňka) se pohybuje okolo 350 000 Kč [29], [30], [31], [32].

Další skupinou jsou náklady na strojní vybavení. Do této skupiny spadá nakladač s cenou okolo 2 milionů korun. Štěpkovač, u kterého ceny pohybují od 350 000 Kč. Poslední je prosévací zařízení na hotový kompost, s cenou začínající na 800 000 Kč [29], [30].

Poslední skupinou je drobné vybavení. Jedná se o investici do různých měřících zařízení a nástrojů k odběru vzorků, počítače aj. Zde se počítá s investicí nejméně 100 000 Kč. Investiční náklady na vybudování kompostárny, bez vlastní technologie, jsou dohromady 5 450 000 Kč. Náklady na jednu tunu kompostu se pohybují od 200 do 2000 Kč, v závislosti na technologii, zpracovávaných materiálech a dalších aspektech [29], [30].

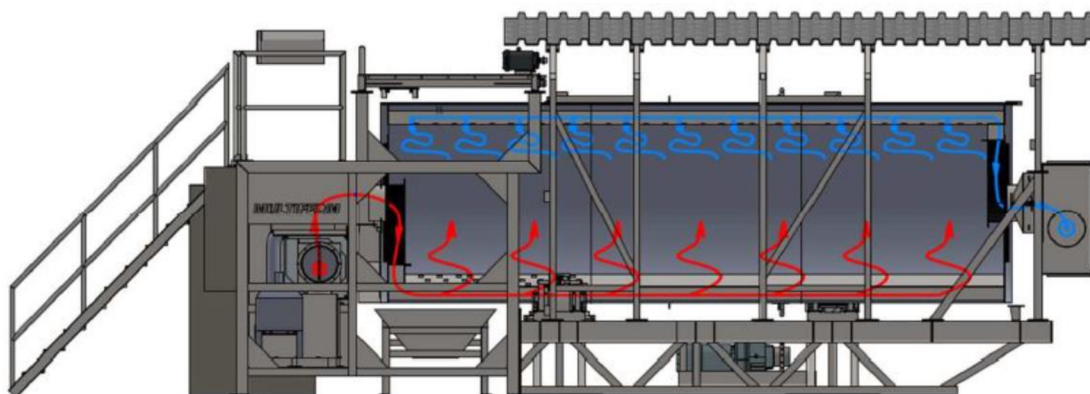
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Praktická část se týká zařízení Multiferm a jeho testování. Cílem testů je zdokonalit průběh kompostovacího procesu tak, aby při něm proběhla úspěšná hygienizace čistírenských kalů.

3.1. Zařízení Multiferm

Zařízení Multiferm bylo vyvinuto a vyrobeno firmou VIA ALTA, a.s. Jedná se o prototypní zařízení sloužící pro výzkum a vývoj kompostovacího procesu. Zařízení je vsázkový izolovaný bubnový reaktor bez vnitřních pohyblivých částí se systémem ventilace. Objem válce je přibližně 16 m³ a ventilátor pro provzdušňování má výkon 1 m³ vzduchu za sekundu.

V první verzi zařízení se jednalo o utilizační sušárnu pro různé druhy materiálů (viz Obr. 11). V poslední iteraci se jedná o zařízení pro zpracování biologicky rozložitelných odpadů, gastro odpadů a čistírenských kalů pomocí intenzivního kompostování (viz Obr. 12). Kompostovací proces je ovlivňován mírou provzdušňování a překopávání. Zařízení muselo být pro využití při kompostování upraveno. Byl změněn systém provzdušňování. V předešlých verzích docházelo k provzdušňování skrze kanálky ve válci. Nově probíhá provzdušňování centrálním otvorem v čelní stěně válce. Pro lepší homogenizaci zakládky při promíchání bylo zařízení vybaveno hroty uvnitř válce. V plánu jsou další vylepšení. V zařízení probíhá pouze první fáze kompostovacího procesu, a to fáze rozkladu. Zbylé dvě fáze probíhají se zakládkou volně loženou na ploše [33].



Obr. 11: Schéma první verze zařízení Multiferm, převzato z [33]



Obr. 12: Zařízení Multiferm na komunitní kompostárně v Okříškách

3.2. Cíl práce

Cílem prováděných testů byla optimalizace kompostovacího procesu pro hygienizaci čistírenských kalů. Optimalizace byla prováděna pomocí upravování míry překopávání a provzdušňování. Cílem je co nejdéle udržet teploty přesahující 60 °C a zajistit co největší homogenitu zakládky. Cílem testů je získání kvalitního kompostu, který splní podmínky získání certifikátu. Součástí testů je i nalezení slabých míst a chyb na zařízení, aby mohly být odstraněny před případným prodejem technologií postavených na základech zařízení Multiferm.

3.2.1. Testování zařízení

Zařízení je umístěno v Okříškách na komunitní kompostárně. Jako materiál pro testy byl využíván komunálním biologicky rozložitelný odpad z Okříšek a okolí (viz Obr. 13). Materiál se nejprve promíchá v mixéru (viz Obr. 14), který je u zařízení, a až poté je naskladněn pomocí pásového dopravníku do zařízení.



Obr. 13: Skladba materiálu dostupného v jarním období na komunitní kompostárně v Okříškách



Obr. 14: Mixér sloužící k přípravě zakládky

4. VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1.1. Test č.1

První test probíhal od 7. do 13. září 2022. Zařízení bylo naskladněno materiálem o objemu 6 m³. Materiál byl velmi vlhký kvůli deštivému počasí. Metodika byla stanovena na provzdušňování jednou denně po dobu sedmi sekund na plný výkon ventilátoru, což odpovídá 7 m³ vzduchu, a překopávání také jednou denně, pět otáček válcem na jednu a poté na druhou stranu. Metodika byla v půlce testu změněna na provzdušňování a promíchávání dvakrát denně, a to dopoledne a odpoledne. Teploty se měřily z prostoru dveří pomocí tyčového teploměru, vždy u přední stěny reaktoru, v zadní části a u boční stěny. Na zařízení ještě nebyl zřízen systém automatického provzdušňování, kvůli tomu bylo provzdušňování prováděno ručně v nedostatečné míře, což negativně ovlivnilo výsledek zkoušky.

Test byl po sedmi dnech ukončen. Test byl neúspěšný, a to zejména kvůli nedostatečnému provzdušňování a příliš velké vlhkosti zakládky. Vyskladněný materiál byl velmi vlhký a zapáchal, což indikuje špatný průběh procesu.

4.1.2. Test č.2

Druhý test probíhal od 27. září do 5. října 2022. Tentokrát bylo zařízení naskladněné 9 m³ materiálu. Materiál měl stále vyšší vlhkost než by bylo ideální. Teploty byly stále měřeny tyčovým teploměrem jako v předešlé zkoušce. Bohužel nebyl zprovozněn automat na provzdušňování, proto byla metodika nastavena na míchání a provzdušnění 2krát denně. Provzdušnění 14 sekund na plný výkon ventilátoru, promíchání na jednu stranu, provzdušnění 14 sekund a promíchání na druhou stranu. Provzdušnění materiálu bylo navýšeno s cílem potlačit zápach oproti minulým testům. Pokud nebyla možnost dorazit k zařízení dvakrát denně, provzdušňovalo se 30 sekund. Tato metodika byla dodržena do 3. října. Poté byl totiž zprovozněn automat. Přešlo se na novou metodiku. Nová metodika spočívala v automatickém provzdušňování, které probíhalo automaticky každou hodinu po dobu 10 sekund na plný výkon ventilátoru. Materiál nebyl míchán.

Nová metodika s automatickým provzdušňováním výrazně pomohla kompostovacímu procesu, teploty začaly výrazně stoupat. Je to z důvodů dostatku kyslíku pro mikroorganismy. Je evidentní, že provzdušňování v tomto testu bylo dostatečné, byl podpořen kompostovací proces a zakládka nezapáchala.

4.1.3. Test č.3

Test probíhal od 10. do 14. října 2022, tomto testu byly nainstalována teplotní čidla. Zařízení bylo naskladněno suchým materiálem o přibližném objemu 7 m³. Metodika byla zachována jako u předešlého testu, a to provzdušňování každou hodinu po dobu 10 sekund s ventilátorem na plný výkon. Materiál nebyl nijak překopáván. Po zjištění, že jsou nově instalovaná teplotní čidla nefunkční, byly teploty dále měřeny tyčovým teploměrem. Díky narůstajícím teplotám byl proces dále podpořen větším množstvím provzdušňováním. Metodika byla změněna na provzdušňování každých 30 minut po dobu 10 sekund, ventilátor stále na plný výkon. U této

zkoušky došlo 13. října k zaseknutí dveří v otevřené poloze a následnému poklesu teplot. Tato zkouška byla zkrácena kvůli problémům s dveřmi a teplotními čidly, a s nutností jejich opravy.

Montáž teplotních čidel do zařízení

Zařízení bylo doplněno o teplotní čidla, dohromady tři. Jednalo se o bezdrátová čidla, a pro sběr dat bylo nezbytné se k nim připojit síťovým adaptérem v jejich blízkosti. Díry v plášti po montáži byly znovu zatepleny. Čidla se zdála být funkční, ale po naskladnění a uzavření technologie bylo zjištěno, že se teploty nahrávané do programu nemění. Byla snaha o kontrolu čidel z venkovního prostoru, ale bez výsledku, stále se nenahrávala nová data. Dále bylo vyzkoušeno otevření dveří do zařízení. V tu chvíli se připojilo pouze čidlo, které je nejbližší dveřím. Bylo zjištěno, že kovová konstrukce válce ruší signál z teplotních čidel a bude muset být provedena změna.

4.1.4. Test č.4

Test probíhal od 18. do 25. října 2022. Smluvní firma obstarala úpravu instalovaných teplotních čidel. Multiferm byl naskladněn materiálem o přibližném objemu 7,2 m³. Materiál byl v tomto případě velmi suchý, z velké části tvořený spadeným listím a posečenou trávou. Metodika byla nastavena na provzdušňování každých 30 minut po dobu 10 sekund na plný výkon ventilátoru a míchání každé dva dny. Po naskladnění bylo opět zjištěno, že teplotní čidla jsou nefunkční a teploty byly stále měřeny tyčovým teploměrem. Častější provzdušňování pomohlo dosáhnout vyšších teplot a zdálo se, že promíchání nemá negativní vliv na teplotu v zakládce. Bohužel 21.10. došlo k velké poruše na mechanismu dveří, které zůstaly otevřené. Mechanismus se podařilo opravit 24.10, avšak 26.10. došlo k fatální poruše mechanismu dveří, byla potřeba velká oprava a úprava.

Oprava teplotních čidel

V průběhu 4. testu byla zprovozněna teplotní čidla. Začala zkouška měření teploty nově instalovanými čidly, kdy pro porovnání byly teploty také měřeny tyčovým teploměrem a teplotním článkem u ocelového pláště zařízení, na kterém byla čidla instalovaná.

Při porovnání hodnot naměřených teplotním článkem z venkovní strany válce a čidlem uvnitř, bylo zjištěno, že u sensoru#1 byla teplota okolo 24 °C, u sensoru#2 byla teplota okolo 34 °C a u sensoru#3 bylo naměřeno 28 °C. Teploty, které naměřily teplotní čidla, byly 29 °C senzorem#1, 32 °C senzorem#2 a 30 °C senzorem#3. Teploty naměřené tyčovým teploměrem ve stejnou dobu se však pohybovaly okolo 50 °C.

Pro ověření bylo provedeno další srovnávací měření, teploty naměřené tyčovým teploměrem se pohybovaly okolo 60 °C, ale teplotní čidla stále uváděla teploty okolo 30 °C. Stejně teploty byly naměřené i teplotní článkem. Po promíchání materiálu došlo k růstu teploty na 40 °C na sensoru#2.

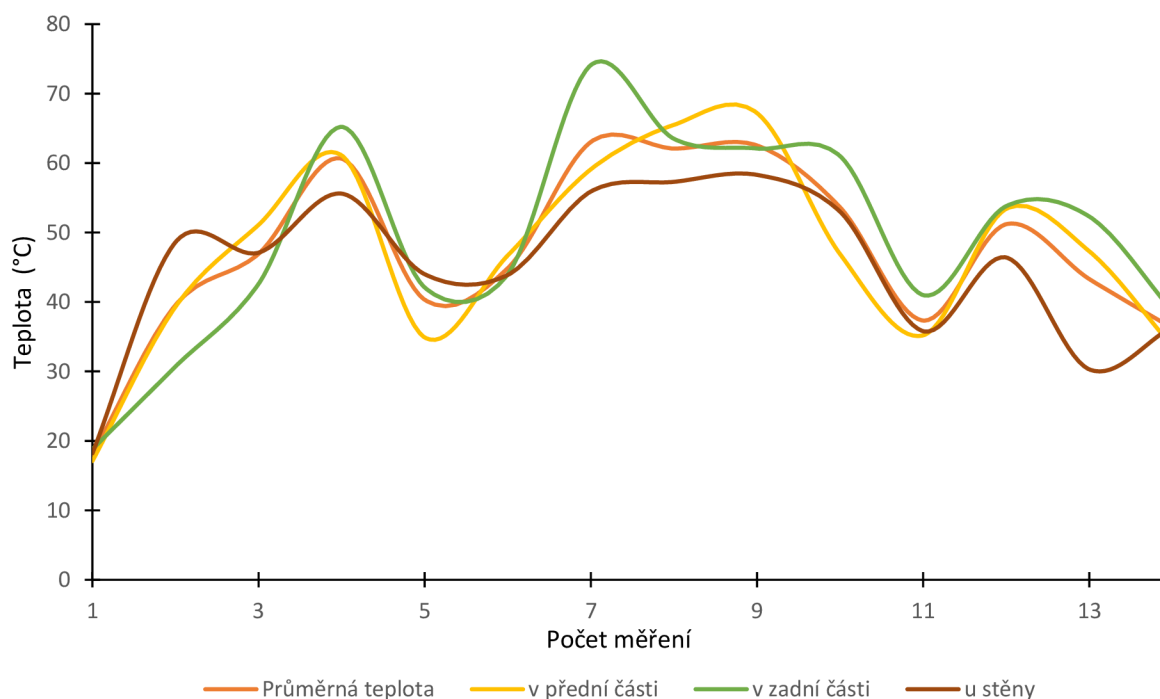
Výsledky těchto měření potvrdily obavy, že teploty naměřené teplotními čidly korelují spíše s teplotou pláště zařízení než se skutečnou teplotou v materiálu.

4.1.5. Test č.5

Zařízení bylo naskladněno 29. listopadu 2022 materiálem o přibližném objemu 7,2 m³. Zakládka měla skladbu suchého listí, trávy kořenů a také hlíny. Obecně byla zakládka dost vlhká. Venkovní teplota v době testu se pohybovala od 5 do -5 °C. Metodika byla změněna na provzdušňování každých 15 minut po dobu 10 sekund s ventilátorem na plný výkon, aby došlo k nasycení zakládky dostatkem kyslíku na začátku procesu. Míchání bylo prováděno každé dva dny pro lepší homogenizaci. Průběh testu byl sledován a podle vývoje teplot byla metodika průběžně upravována.

V grafu na Obr. 15 je znázorněn teplotní průběh procesu. Proces proběhl podle představ, teplota prudce vzrostla, po překopání došlo k ochlazení. Poté začala teplota znovu stoupat. Stejný průběh byl i u druhého překopání materiálu. Po posledním růstu teploty došlo k pozvolnému klesání teploty až na hranici 40 °C. Pokles teploty určuje konec první fáze kompostovacího procesu, test byl proto ukončen a materiál vyskladněn ze zařízení.

V Tab. 5 jsou uvedeny dosažené teploty. Jak ve výše uvedené tabulce, tak v níže uvedeném grafu je k vidění pokles teploty při překopání, ale také její následný růst, což potvrzuje teorii. Díky tomu, že se podařilo udržet teploty po dobu tří dní v oblasti přes 60 °C, měl by v materiálu proběhnout proces hygienizace. Optimalizovanými parametry této metodiky bylo dosaženo požadovaného průběhu 1. fáze kompostování a tato metodika by byla vhodná pro následné použití při hygienizaci čistírenských kalů.



Obr. 15: Průběh teplot u testu č.5

Tab. 5: Teploty naměřené u testu č.5

Datum	Čas	Průměrná teplota (°C)
29.11	8:55	18,03
30.11	8:34	39,53
	13:50	46,93
1.12	8:52	60,63
	9:35	40,33
	14:17	44,87
2.12	8:25	63,03
	14:00	62,10
3.12	11:10	62,53
5.12	8:25	53,63
	14:27	37,33
6.12	8:26	51,20
	14:28	43,30
7.12	7:27	36,23

Vyskladněný materiál měl dobrou a homogenizovanou strukturu (viz Obr. 16). Teplota vyskladněného materiálu byla 36 °C. Vyskladněný materiál byl ponechán volně ložený na ploše a byla v něm sledována teplota. I přes venkovní teploty pod bodem mrazu měl dva dny po vyskladnění materiál teplotu 39 °C. Teploty mezi 25 a 40 °C značily průběh druhé fáze procesu.



Obr. 16: Materiál vyskladněný po pátém testu

4.1.6. Test č.6

Další test byl prováděn od 7. do 12. prosince 2022 za zjištěním, jestli je zařízení možno provozovat i za teplot pod bodem mrazu. Zkoumala se tedy schopnost kompostovacího procesu probíhat efektivně i v zimních měsících. Teploty v průběhu testu se pohybovaly ve dne kolem -5 až 0 °C a v noci od -8 až -12 °C.

Materiál připravený na naskladnění byl velmi vlhký. Proto byla do zakládky přimíchána dřevěná štěpka z důvodu snížení celkové objemové hmotnosti a vlhkosti. Přítomnost štěpky ale může negativně ovlivnit průběh a teplotu procesu. Zařízení bylo naskladněno 8 m³ materiálu. Metodika byla změněna na provzdušňování každých 15 minut po dobu 20 sekund s ventilátorem na plný výkon. Překopávání bylo prováděno dle potřeby.

Teploty dosažené v materiálu se pohybovaly okolo 50 °C, nejvyšší dosažené byly 65 °C. I za nízkých venkovních teplot kompostovací proces probíhal. Hygienizace zakládky je však diskutabilní, neboť bylo jen na krátkou dobu dosaženo teploty 65 °C.

Test byl ale předběžně ukončen, a to z důvodu zamrznutí mechanismu dveří vinou vysoké vlhkosti materiálu. Materiál přimrzl ke dveřím, které se kvůli tomu zasekly a musely být rozmrazeny. Zařízení bylo vyskladněno kvůli obavám z poškození.

5. ZÁVĚR

Na prototypovém zařízení Multiferm umístěném na komunitní kompostárně v Okříškách byly provedeny experimentální testy s cílem optimalizovat parametry ovlivňující proces kompostování. Konkrétně se jednalo o procesy provzdušňování a překopávání, kterými je ovlivněna první fáze kompostovacího procesu a které mají zásadní vliv na proces hygienizace kompostu. Při testech byla zjišťována i funkčnost zařízení za různých podnebných podmínek a byla prováděna další inovace na zařízení.

V průběhu testů se bylo potřeba často vypořádat s řadou reálných problémů. Z výše uvedených okomentovaných výsledků testů vyplývá, že je nezbytné navrhované zařízení upravovat a metodiku pro kompostování testovat. Je pozitivní, že metodika použitá u testu č. 5 splňovala podmínky pro získání kvalitního hygienizovaného kompostu.

Parametry metodiky použité v tomto testu jsou provzdušňování každých 15 minut po dobu 10 sekund na plný výkon ventilátoru, což odpovídá 10 m³ vzduchu, a překopávání každé dva dny. Uvedené parametry jsou následně měněny podle vývoje teploty zakládky.

Zařízení Multiferm je dle získaných výsledků možno využít pro hygienizaci kalů z čistíren odpadních vod. Samotný městys Okříšky právě takovou technologii potřebuje. Pro reálné využití je ale ještě nezbytné, aby optimální podmínky kompostovacího procesu pro hygienizaci byly dosaženy vždy a zařízení prošlo zkouškou od Státního zdravotního ústavu.

Výsledky této bakalářské práce jsou přínosem z hlediska inovací zařízení Multiferm, a přispívají k využití tohoto zařízení za účelem hygienizace při kompostování čistírenských kalů.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Český statistický úřad: Produkce, využití a odstranění odpadů - 2013* [online]. 2014 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2013-tywmw59yke>
- [2] *Český statistický úřad: Produkce, využití a odstranění odpadů - 2021* [online]. 2022 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-mgyqmwjyr8#>
- [3] Produkce, využití a odstranění odpadů - 2018. In: *Český statistický úřad* [online]. [cit. 2023-02-28]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/produkce-vyuziti-a-odstraneni-odpadu-2018>
- [4] *Zákony pro lidi: Zákon č. 541/2020* [online]. 2022 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-541>
- [5] EUR-Lex: Právní předpisy EU v oblasti nakládání s odpadem. In: *EUR-Lex* [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/CS/legal-content/summary/eu-waste-management-law.html>
- [6] Kompostárny a biologicky rozložitelné odpady: Bioodpady a kalý optikou nového zákona o odpadech i připravované prováděcí vyhlášky. *Odpady* [online]. 2021 [cit. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.inisoft.cz/poradenstvi-a-skoleni/odborne-clanky/casopis-odpady/kompostarny-a-biologicky-rozlozitelne-odpady>
- [7] *Operační program Životní prostředí: 24. Výzva - Prevence vzniku odpadů* [online]. [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://opzp.cz/dotace/24-vyzva/>
- [8] *Odpadová poradenská: Dotace z OPŽP* [online]. 2022 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://www.odpavaporadenska.cz/dotace-z-opzp/>
- [9] SAYARA, Tahseen, Rezaq BASHEER-SALIMIA, Fatima HAWAMDE a Antoni SÁNCHEZ. Recycling of Organic Wastes through Composting: Process Performance and Compost Application in Agriculture. *Agronomy* [online]. 2020, **10**(11) [cit. 2023-03-19]. ISSN 2073-4395. Dostupné z: doi:10.3390/agronomy10111838
- [10] OSHINS, Cary, Frederick MICHEL, Pierce LOUIS, Tom RICHARD, Robert RYNK, Mary SCHWARZ, Ronda SHERMAN a Sally BROWN. The composting process. In: *The Composting Handbook* [online]. Elsevier, 2022, s. 51-101 [cit. 2023-03-21]. ISBN 9780323856027. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-85602-7.00008-X

- [11] JUNGA, Petr, Tomáš VÍTEŽ, Monika VÍTEŽOVÁ a Milan GERŠL. *TECHNIKA PRO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ II*. Brno, 2015. ISBN 978-80-7509-208-3.
- [12] SCHAUB, S.M. a J.J. LEONARD. *Composting: An alternative waste management option for food processing industries*. 1996, 7(8), 263-268. ISSN 09242244. Dostupné z: doi:10.1016/0924-2244(96)10029-7
- [13] KÁRA, Jaroslav, Zdeněk PASTOREK a Antonín JELÍNEK. Kompostování zbytkové biomasy. *Biom.cz* [online]. 2002 [cit. 2022-12-09]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/kompostovani-zbytkove-biomasy>
- [14] AYILARA, Modupe, Oluwaseyi OLANREWAJU, Olubukola BABALOLA a Olu ODEYEMI. Waste Management through Composting: Challenges and Potentials. *Sustainability*. 2020, 12(11). ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su12114456
- [15] RYNK, Robert, Mary SCHWARZ, Tom RICHARD, Matthew COTTON, Thomas HALBACH a Stefanie SIEBERT. Compost feedstocks. In: *The Composting Handbook* [online]. Elsevier, 2022, s. 103-157 [cit. 2023-03-21]. ISBN 9780323856027. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-85602-7.00005-4
- [16] ONWOSI, Chukwudi, Victor IGBOKWE, Joyce ODIMBA, Ifeanyichukwu EKE, Mary NWANKWOALA, Ikemdinachi IROH a Lewis EZEUGU. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management* [online]. 2017, 190, 140-157 [cit. 2023-03-21]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2016.12.051
- [17] ZEMÁNEK, Pavel. *Biologicky rozložitelné odpady a kompostování*. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2010. ISBN 978-80-86884-52-3.
- [18] KUČERÍK, Jiří. *Odpadové hospodářství a technologie* [online prezentace]. [cit. 2023-05-04]. Dostupné z: <https://moodle.vut.cz/course/view.php?id=241089>
- [19] AZIS, Fatin, Masrur RIJAL, Hazwani SUHAIMI a Pg ABAS. Patent Landscape of Composting Technology: A Review. *Inventions* [online]. 2022, 7(2) [cit. 2023-03-07]. ISSN 2411-5134. Dostupné z: doi:10.3390/inventions7020038
- [20] VÁŇA, Jaroslav. Možnosti intenzifikace zrání kompostu. *Biom.cz* [online]. 2002 [cit. 2023-03-19]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-intenzifikace-zrani-kompostu>
- [21] MICHEL, Frederick, Tim O'NEILL, Robert RYNK, Jane GILBERT, Steven WISBAUM a Thomas HALBACH. Passively aerated composting methods, including turned windrows. In: *The Composting Handbook* [online]. Elsevier, 2022, s. 159-196 [cit. 2023-03-21]. ISBN 9780323856027. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-85602-7.00002-9

- [22] MICHEL, Frederick, Tim O'NEILL, Robert RYNK, Michael BRYANT-BROWN, Van CALVEZ, Ji LI a John PAUL. Contained and in-vessel composting methods and methods summary. In: *The Composting Handbook* [online]. Elsevier, 2022, s. 271-305 [cit. 2023-03-21]. ISBN 9780323856027. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-85602-7.00009-1
- [23] MICHEL, Frederick, Tim O'NEILL, Robert RYNK, Jane GILBERT, Matthew SMITH, John ABER a Harold KEENER. Forced aeration composting, aerated static pile, and similar methods. In: *The Composting Handbook* [online]. Elsevier, 2022, s. 197-269 [cit. 2023-03-21]. ISBN 9780323856027. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-85602-7.00007-8
- [24] BEFFA, Trello. THE COMPOSTING BIOTECHNOLOGY : A MICROBIAL AEROBIC SOLID SUBSTRATE FERMENTATION COMPLEX PROCESS. *The composting process and management*. 2002.
- [25] Composting facilities. In: *COMPAG* [online]. [cit. 2023-03-07]. Dostupné z: <https://www.compag.ch/index.php/en/produkte-en/kompostiranlagen-en>
- [26] SÁNCHEZ, Óscar, Diego OSPINA a Sandra MONTOYA. Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. *Waste Management* [online]. 2017, **69**, 136-153 [cit. 2023-03-19]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2017.08.012
- [27] HEJTÁKOVÁ, Květuše. Živiny v kompostu. In: *Zeraagency.eu* [online]. [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <http://www.zeraagency.eu/file/669/z-i-v.pdf>
- [28] ČSN 46 5735: *Kompostování*. 2020. Dostupné také z: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/Detail.aspx?k=511443>
- [29] HABART, Ing., Ing. HRČKA, Ing. HUMPLÍK a Mgr. MAREŠOVÁ. *Příprava a výstavba kompostáren využívajících biologicky rozložitelné odpady z domácností a údržby městské zeleně* [online]. In: . Praha, 2009 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/kompostarny.pdf>
- [30] VÁŇA, Jaroslav. Kompostování odpadů. *Biom.cz* [online]. 2002 [cit. 2023-03-15]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/kompostovani-odpadu>
- [31] AB-CONT sanitární buňka SB4. In: *AB-CONT* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.ab-cont.cz/prodej/sanitarni-bunky/sanitarni-bunka-sb4.html>
- [32] Zákon č. 254/2001 Sb. In: *Zákony pro lidi* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-254#cast1>
- [33] *Multiferm* [online]. [cit. 2022-12-09]. Dostupné z: <https://www.via-alta.cz/multiferm/>

7. SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1: Způsoby nakládání s odpady v České republice	8
Obr. 2: Teplotní průběh procesu kompostování, převzato z [11].....	10
Obr. 3: Schéma procesu kompostování	11
Obr. 4: Schéma pórů mezi částicemi materiálu, převzato a upraveno [10].....	15
Obr. 5: Schéma pasivně provzdušňované řádkové technologie, převzato z [11].....	19
Obr. 6: Schéma kompostování v řádku s řízenou aerací, převzato z [11].....	21
Obr. 7: Schéma kompostovací technologie s vrtnou věží, převzato z [11].....	22
Obr. 8: Schéma kompostovacího žlabu, převzato z [11].....	23
Obr. 9: Schéma kompostovacího boxu, převzato z [11]	24
Obr. 10: Schéma věžového bioreaktoru, převzato z [11]	25
Obr. 11: Schéma první verze zařízení Multiferm, převzato z [33]	30
Obr. 12: Zařízení Multiferm na komunitní kompostárně v Okříškách	31
Obr. 13: Skladba materiálu dostupného v jarním období na komunitní kompostárně v Okříškách	32
Obr. 14: Mixér sloužící k přípravě zakládky	32
Obr. 15: Průběh teplot u testu č.5	35
Obr. 16: Materiál vyskladněný po pátém testu	37

8. SEZNAM TABULEK A PŘÍLOH

Tab. 1: Poměr C:N u vybraných materiálů	13
Tab. 2: Limitní hodnoty pro kvalitativní parametry	28
Tab. 3: Limitní rizikových prvků	28
Tab. 4: Limitní hodnoty mikrobiologické kontroly	29
Tab. 5: Teploty naměřené u testu č.5	36