

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin**



**Česká zemědělská  
univerzita v Praze**

**Změny fyzikálních a chemických parametrů během  
kompostování čistírenských kalů**

**Diplomová práce**

**Bc. Barbora Picková**

**Ochrana a využívání přírodních zdrojů**

**doc. Ing. Aleš Hanč, Ph.D.**

© 2021 ČZU v Praze

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Změny fyzikálních a chemických parametrů během kompostování čistírenských kalů" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14. 4. 2021

---

## **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala panu doc. Ing. Aleši Hančovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a cenné rady při vypracovávání této práce. Dále děkuji své rodině a přátelům za podporu při studiu a psaní diplomové práce. Diplomová práce byla vytvořena v rámci projektu NAZV č. QK1910095 s názvem „Využití vermikompostování k eliminaci mikropolutantů za účelem bezpečné aplikace čistírenského kalu na zemědělskou půdu.“

# Změny fyzikálních a chemických parametrů během kompostování čistírenských kalů

## Souhrn

Změny fyzikálních a chemických parametrů byly zkoumány při kompostování kalu z čistírny odpadních vod. Byly vytvořeny směsi čistírenského kalu s přídavkem slaměných pelet v 5 různých poměrech. Vytvořené směsi byly kompostovány v aerobních fermentorech, každá směs ve dvojím provedení. Experiment probíhal po dobu 4 měsíců na pokusné stanici FAPPZ v Červeném Újezdu.

Každý měsíc experimentu byly odebírány vzorky jednotlivých směsí, ze kterých se následně prováděly analýzy (měrná vodivost, pH, obsah sušiny, obsah C a N, poměr C:N, celkový a přístupný obsah prvků K, Mg a P). Objemová hmotnost směsi se vypočítala z výšky materiálu ve fermentoru. Dále se v průběhu procesu zaznamenávala teplota z jednotlivých aerobních fermentorů pomocí zavedené teplotní sondy.

Na základě výsledků bylo zjištěno, že v průběhu prvního měsíce nedošlo u všech parametrů k výraznějším změnám hodnot než v každém následujícím měsíci. Tato hypotéza se plně potvrdila u teploty a měrné vodivosti. K částečnému potvrzení tohoto předpokladu došlo u obsahu sušiny, pH, obsahu N, poměru C:N, celkového obsahu K a přístupného obsahu P. Ostatní parametry tento předpoklad spíše nepotvrdily, či přímo vyvrátily.

Dalším předpokládaným aspektem bylo, že přídavek slaměných pelet bude mít pozitivní vliv na efektivitu kompostování. Tento předpoklad se nám potvrdil téměř ve všech sledovaných parametrech. Jedinými parametry, které tuto myšlenku nepotvrdily, byl celkový obsah Mg a celkový a přístupný obsah P. Pro kompostování čistírenských kalů bylo doporučeno kompostovat kaly v kombinaci se slaměnými peletami, a to nejlépe v poměru kal 25 % + pelety 75 %.

**Klíčová slova:** kompostování; čistírenský kal; slaměné pelety; fyzikální a chemické parametry

# Changes of physical and chemical parameters during composting of sewage sludge

## Summary

Changes in physical and chemical parameters were investigated during the composting of sewage sludge from a wastewater treatment facility. Mixtures of sewage sludge were formed with the addition of straw pellets in 5 different ratios. The formed mixtures were composted in aerobic fermenters, each mixture in duplicate. The experiment took place for 4 months at the FAPPZ experimental station in Červený Újezd.

Each month of the experiment, samples of individual mixtures were taken, from which analyzes were subsequently performed (electrical conductivity, pH, dry matter content, C and N content, C:N ratio, total and available content of elements K, Mg and P). The bulk density of the mixture was calculated from the height of the material in the fermenter. During the process, the temperature from the individual aerobic fermenters was recorded using an established temperature probe.

Based on the achieved results, it was found that during the first month there were no significant changes in the values of all parameters than in each subsequent month. This hypothesis was fully confirmed in temperature and electrical conductivity. This assumption was partially confirmed for dry matter content, pH, N content, C:N ratio, total K content and available P content. Other parameters rather did not confirm or directly refute this assumption.

Another expected aspect was that the addition of straw pellets would have a positive effect on the efficiency of composting. This assumption was confirmed in most of the monitored parameters. The only parameters that did not confirm this idea were the total Mg content and the total and available P content. It was recommended to compost sewage sludge in combination with straw pellets, preferably in a ration sewage sludge 25 % + straw pellets 75 %.

**Keywords:** composting, sewage sludge, straw pellets, physical and chemical parameters

# Obsah

<b>1 Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Vědecká hypotéza a cíle práce .....</b>	<b>9</b>
<b>3 Literární rešerše .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 Vstupní materiály pro kompostování.....</b>	<b>10</b>
3.1.1 Čistírenské kaly .....	10
3.1.1.1 Problematika zpracování kalů v Evropě a ČR.....	12
3.1.2 Pelety .....	14
<b>3.2 Kompostování.....</b>	<b>15</b>
3.2.1 Podstata fermentace (zrání) kompostu.....	16
3.2.2 Fáze kompostovacího procesu .....	16
3.2.2.1 Fáze 1 .....	17
3.2.2.2 Fáze 2 .....	17
3.2.2.3 Fáze 3 .....	18
3.2.3 Kompostovací technologie .....	18
3.2.4 Chemické a fyzikální vlastnosti.....	18
3.2.4.1 Vlhkost .....	19
3.2.4.2 Teplota.....	19
3.2.4.3 Obsah živin a poměr C:N .....	21
3.2.4.4 Hodnota pH .....	22
3.2.4.5 Obsah kyslíku .....	22
3.2.4.6 Pórovitost.....	23
3.2.4.7 Velikost částic .....	23
3.2.5 Kompostování čistírenských kalů.....	23
3.2.6 Zralost a stabilita kompostu.....	25
<b>4 Metodika .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Vstupní suroviny .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Průběh pokusu kompostování .....</b>	<b>27</b>
<b>4.3 Analýzy.....</b>	<b>29</b>
4.3.1 Stanovení pH a měrné vodivosti.....	29
4.3.2 Elementární analýza.....	30
4.3.3 Stanovení celkového obsahu prvků metodou suchého rozkladu .....	30
4.3.4 Stanovení přístupného obsahu prvků metodou CAT.....	31
<b>4.4 Statistika .....</b>	<b>31</b>
<b>5 Výsledky.....</b>	<b>32</b>

<b>5.1</b>	<b>Vstupní suroviny .....</b>	<b>32</b>
<b>5.2</b>	<b>Fyzikální a chemické parametry v průběhu kompostování.....</b>	<b>33</b>
5.2.1	Teplota .....	33
5.2.2	Objemová hmotnost.....	34
5.2.3	Obsah sušiny .....	35
5.2.4	Měrná vodivost .....	36
5.2.5	pH.....	37
5.2.6	Obsah C a N, poměr C:N.....	37
5.2.7	Obsah prvků K, Mg, P a jejich přístupnost.....	39
5.2.7.1	Obsah K.....	39
5.2.7.2	Obsah Mg .....	42
5.2.7.3	Obsah P.....	45
<b>6</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>49</b>
<b>6.1</b>	<b>Teplota.....</b>	<b>49</b>
<b>6.2</b>	<b>Objemová hmotnost .....</b>	<b>49</b>
<b>6.3</b>	<b>Obsah sušiny .....</b>	<b>50</b>
<b>6.4</b>	<b>Měrná vodivost.....</b>	<b>51</b>
<b>6.5</b>	<b>pH .....</b>	<b>52</b>
<b>6.6</b>	<b>Obsah C a N, poměr C:N.....</b>	<b>52</b>
<b>6.7</b>	<b>Obsah K, Mg a P .....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>Literatura.....</b>	<b>57</b>
<b>9</b>	<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>65</b>
<b>10</b>	<b>Samostatné přílohy .....</b>	<b>I</b>

# 1 Úvod

Z důvodu nových výstaveb čistíren odpadních vod dochází ke zvyšující se produkci čistírenského kalu. Kaly z čistírny odpadních vod vznikají při mechanickém, chemickém a biologickém zpracování odpadních vod. Ve většině případů obsah kalu nepřesahuje 2 % objemu odpadních vod. Složení čistírenského kalu je velmi komplikované. Kal je bohatý na obsah organické hmoty, dusík, fosfor, vápník, hořčík, síru a mikroelementy, ale také může obsahovat toxické sloučeniny (pesticidy, těžké kovy) a patogenní organismy (bakterie). Česká republika v letech 2007 až 2019 vyprodukovala ročně v rozmezí 196-263 tisíc tun kalu v sušině. S kaly lze nakládat skládkováním, zemědělským využitím, spalováním či metodou kompostování. V roce 2019 byla v České republice pro využití kalů využita metoda kompostování z 32 % z celkového využití kalů (Kosobucki et al. 2000; European Commission 2020; Český statistický úřad 2020).

V průběhu kompostování je organická hmota přeměněna na produkt, který je bohatý na humus, působením mikroorganismů a jejich enzymů. Kompostování je nejen proces využití kalu, ale také během procesu dochází k přeměně na produkt, který je esteticky přijatelnější, ze zdravotního hlediska bezpečnější a užitečný v praktických aplikacích, jako je úprava půdy prospěšná pro růst rostlin. Při procesu kompostování dochází k hygienizaci kalu a vzniklý produkt je poté možné aplikovat do půdy jako půdní kondicionér či hnojivo (Khalil et al. 2011).

Vzhledem k tomu, že se do budoucna bude množství vzniklého kalu navyšovat, je důležité studovat proces kompostování a faktory, které tento proces ovlivňují. Je nutné optimalizovat podmínky procesu, aby se získal dobrý produkt pro použití. Důležitá je však i kontrola procesu, aby byly zajištěné minimální dopady na životní prostředí (Guardia et al. 2008; Khalil et al. 2011). Kompostování kalů se jeví jako atraktivní technologie využití kalů, v níž lze zdroje v odpadech znovu použít a zajistit bezpečné využití (Rihani et al. 2010).

Během procesu kompostování se sledují fyzikální, chemické a mikrobiologické faktory. Jedná se např. o vliv teploty, aerace, vlhkosti, obsahu sušiny, objemové hmotnosti, pórovitosti, pH, měrné vodivosti, obsahu prvků C a N a jejich vzájemný poměr, či o obsah živin K, Mg a P. Tyto parametry a několik dalších ovlivňují průběh procesu a výsledný produkt – kompost.

Tato práce se zabývá změnami vybraných fyzikálních a chemických parametrů v průběhu kompostování čistírenských kalů s přídavkem slaměných pelet.



## **2 Vědecká hypotéza a cíle práce**

Cílem práce je zhodnotit změny vlastností během kompostování čistírenského kalu společně se slaměnými peletami.

Hypotézy:

- 1) Během prvního měsíce dojde k výraznějším změnám fyzikálních a chemických vlastností než během každého následujícího měsíce.
- 2) Přídavek slaměných pelet bude mít pozitivní vliv na efektivitu kompostování.

## 3 Literární rešerše

### 3.1 Vstupní materiály pro kompostování

Biologicky rozložitelné organické odpady, které lze zpracovat kompostováním, vznikají v různých výrobních odvětvích, včetně systémů primární produkce, průmyslových odvětvích a služeb (viz. Tab. 1). Všechny organické odpady mají určité vlastnosti, které mohou ovlivnit proces kompostování a v konečném důsledku i kvalitu kompostu. Nejvýznamnějšími faktory suroviny, které ovlivňují kompostování, jsou jejich chemické parametry (obsah živin, poměr C:N, pH), fyzikální parametry (obsah vlhkosti, pórovitost a velikost částic) a biologické složení (patogenní mikroorganismy, viry, bakterie a houby). Rovněž by měly být ze suroviny vyloučeny nerozložitelné materiály (sklo, plasty, kameny, kovy). Pokud jsou přítomny, jejich koncentrace se během procesu kompostování zvýší, což má za následek nekvalitní kompost. Stručně řečeno, vlastnosti materiálů pro kompostování by měly splňovat potřeby mikroorganismů pro vysokou rychlost rozkladu organického materiálu.

Tab. 1. Biologicky rozložitelné organické odpady vznikající v různých odvětvích

Komunální organický odpad	Biologicky odbouratelný podíl odpadů zahrnuje odpady z domácnosti a podobné odpady z jiných zařízení
Komerční potravinový odpad	Odpad z trhů, stravování
Lesnictví	Kůra, zbytky dřeva, listy
Zemědělství	Hnůj hospodářských zvířat, zbytky slámy, cukrová řepa, zbytky plodin z fazolí, hrášku, lnu a zeleniny
Potravinářský a nápojový průmysl	Odpad z pivovarů a sladoven, vinařství, produkce ovoce a zeleniny, zbytky z jatek, syrovátka
Kaly z odpadních vod	Kal z biologického čištění komunálních odpadních vod

(Bernal et al. 2017)

#### 3.1.1 Čistírenské kaly

Čistírenské kaly jsou nevyhnutelným produktem procesu čištění odpadních vod. Odpadní voda přitéká na ČOV (čistírna odpadních vod) a je během procesu čištěna. Na odtoku je obsah znečišťujících látek snížen. Nežádoucí složky se zkoncentrují do odpadního kalu. Likvidace kalů je z ekonomického a ekologického hlediska obtížná (Bruce & Davis 1988; Lyčková et al. 2009). Neustále dochází ke zvyšování tendence budovat nové čistírny odpadních vod, nebo rozvíjet již existující. To způsobuje velkého množství kalů a zpracování kalů se stává problémem (Kosobucki et al. 2000).

Kaly představují okolo 2 % objemu čištěných vod (Ammari et al. 2012). Je zde však zkoncentrováno 50-80 % původního znečištění. To obsahuje především patogenní organismy, chemické toxické látky (PCB, NEL, AOX) a těžké kovy (Cr, Cd, Cu, Pb, Hg, Zn) (Lyčková et al. 2009). Při studii, která se zabývala koncentrací těchto těžkých kovů při aplikaci čistírenského kalu na nedotčenou půdu, docházelo ke zvyšování koncentrace těžkých kovů v půdách. Při aplikaci kalu na již zasaženou půdu došlo ke zvýšení koncentrace Cu a Zn, ale k poklesu koncentrace As, Cd, Cr a Pb, jelikož koncentrace těchto prvků v kalech byla

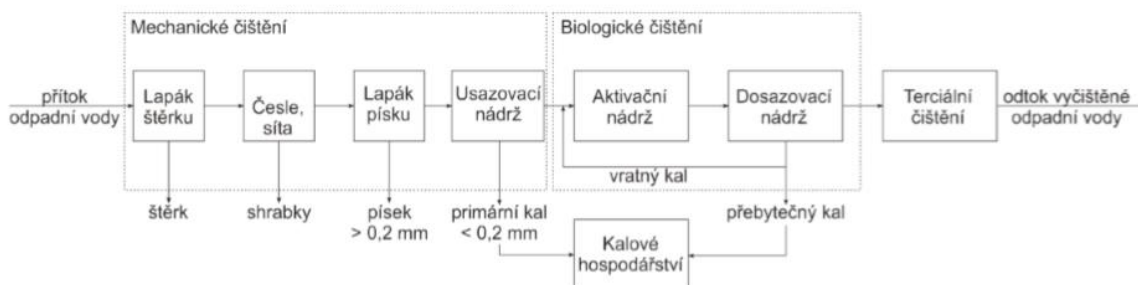
mnohem nižší než koncentrace v půdě. Proto by mělo být použití kalů na půdu přizpůsobeno místním podmínkám (Liquan & Wei 2021).

Vysoké hladiny těžkých kovů však mohou snížit účinnost, či zcela potlačit biologickou aktivitu mikroorganismů. Pravidelné zemědělské užívání kalů z ČOV může vést k postupnému hromadění těžkých kovů v půdě a plodinách (Božym & Siemiątkowski 2018). Tam, kde se využívá čistírenský kal, je potřeba, aby docházelo k průběžnému monitorování obsahu těžkých kovů (a jiných potenciálních znečišťujících látek) v čistírenských kalech. Rovněž je nutno sledovat tyto hodnoty i v zemědělských půdách, aby bylo možné zohlednit synergické účinky. Hodnota pH čistírenského kalu musí být vyšší než 6,0, aby nedocházelo ke zvýšené mobilitě těžkých kovů v kalu. To by vedlo ke kontaminaci rostlin těžkými kovy. Používáním kalů snižujeme využívání chemických hnojiv, která by zajišťovala růst rostlin (Iticescu et al. 2018).

Druh a počty patogenů podléhají geologickým, demografickým a klimatickým faktorům. Hlavním zdrojem patogenů jsou exkrementy infikovaných zvířat a lidí. Mezi patogeny vyskytující se v odpadních vodách jsou především bakterie (*E. coli*, *Salmonella*), viry (hepatitida A), parazitičtí červi a protozoa (Lyčková et al. 2009).

Podstatnou vlastností čistírenského kalu je jeho konzistence. Ta úzce souvisí se souhrnnou koncentrací tuhých látek v kapalině, též vyjadřovanou jako obsah sušiny v kalu (Lyčková et al. 2009). Obsah sušiny v kalu vyjádříme buďto v % nebo g/l. Obsah a složení sušiny kalu závisí zejména na charakteru znečištění odpadních vod a na čistírenských procesech, kterými odpadní voda prošla (biologické čištění, mechanické čištění nebo jejich kombinace, fyzikálně-chemické čištění, dočištění atd.) (Pošta 2005).

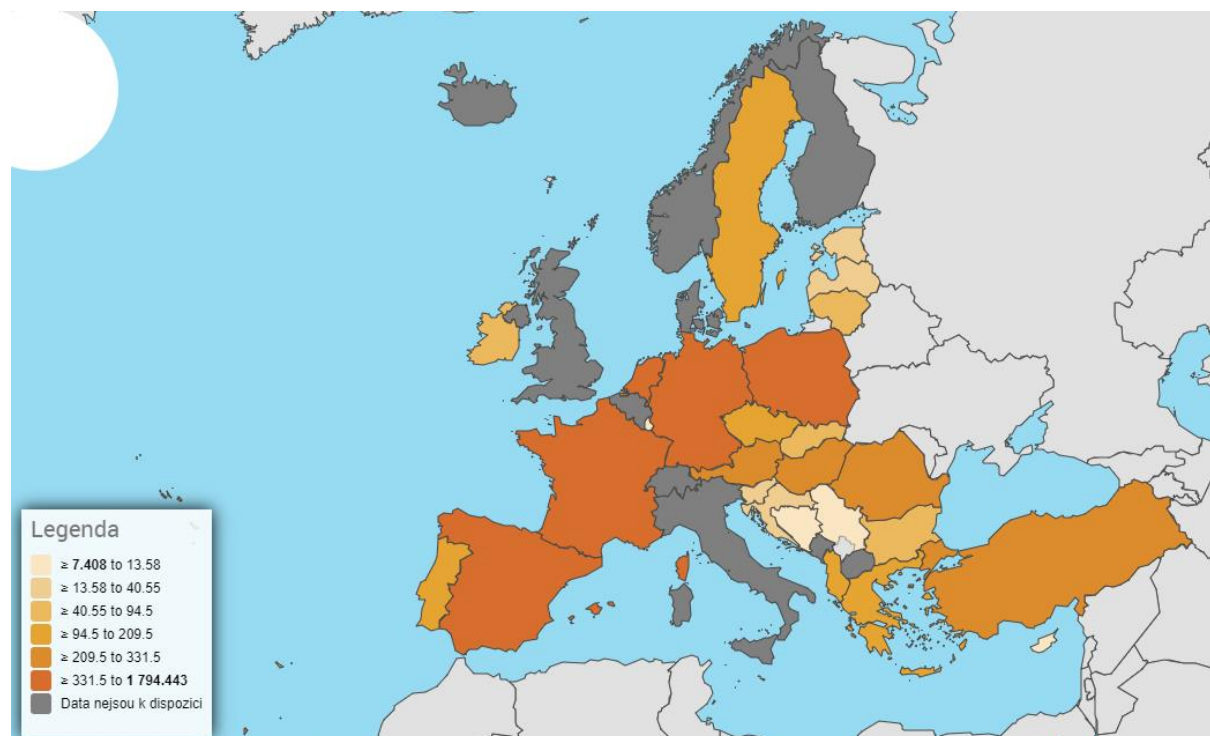
Kaly se v čistírnách odpadních vod usazují ve formě primárního a sekundárního kalu. Primární kal oddělujeme ze surové vody sedimentací v usazovacích nádržích. Tento kal je tvořen nerozpuštěnými látkami, které prošly lapákem písku a česlem, a má obvykle zrnitou strukturu. Sekundární (aktivovaný) kal má vločkovitou strukturu. Vzniká v biologickém stupni čištění a oddělujeme ho od vyčištěné vody v dosazovacích nádržích. Oba typy kalů se spojují a separátně, nebo společně se zahušťují před následujícím zpracováním. Takto spojený kal nazýváme surový kal (Lyčková et al. 2009). Na Obr. 1 můžeme vidět technologickou linku ČOV.



Obr. 1. Schéma standardní technologické linky ČOV (Junga et al. 2015)

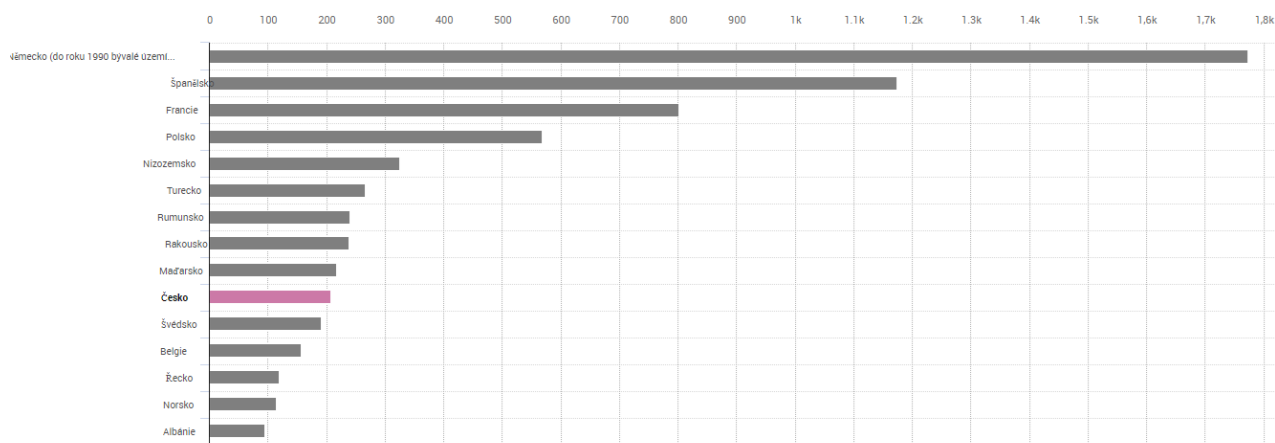
### 3.1.1.1 Problematika zpracování kalů v Evropě a ČR

Pokud jde o konečné využití kalu, zdá se, že opětovné použití kalu (včetně přímé zemědělské aplikace a kompostování) je převládající volbou pro nakládání s kaly v Evropě. Na Obr. 2 je mapka z roku 2016, kde se nachází barevné zobrazení jednotlivých evropských států. Lze zde vidět, kolik tisíc tun kalů v sušině jednotlivé státy ročně vyprodukovaly.



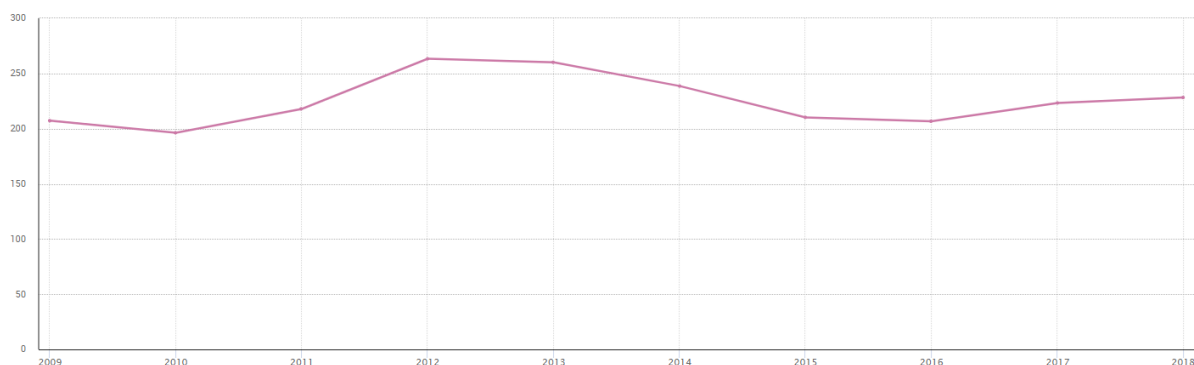
Obr. 2. Mapa produkce kalů 2016 v řádech tisíc tun v sušině

U některých států však nejsou dostupné informace ohledně produkce a využití kalů. Ačkoliv jsou známy statistické hodnoty i z roku 2018, nejsou zde známy hodnoty států s velkou produkcí kalů (např. Německo a Španělsko), a proto je zde vyobrazena mapka z roku 2016, kdy bylo zapojeno do statistiky větší zastoupení států. Na Obr. 3 lze vidět grafické znázornění celkové produkce kalů v roce 2016 a lze vidět, jak si vede ČR (růžové zobrazení) v porovnání s ostatními státy s vyšší produkcí kalů. Výsledky vycházejí opět v řádech tisíc tun v sušině.



Obr. 3. Grafické znázornění produkce kašů v rádech tisíc tun v sušině v roce 2016

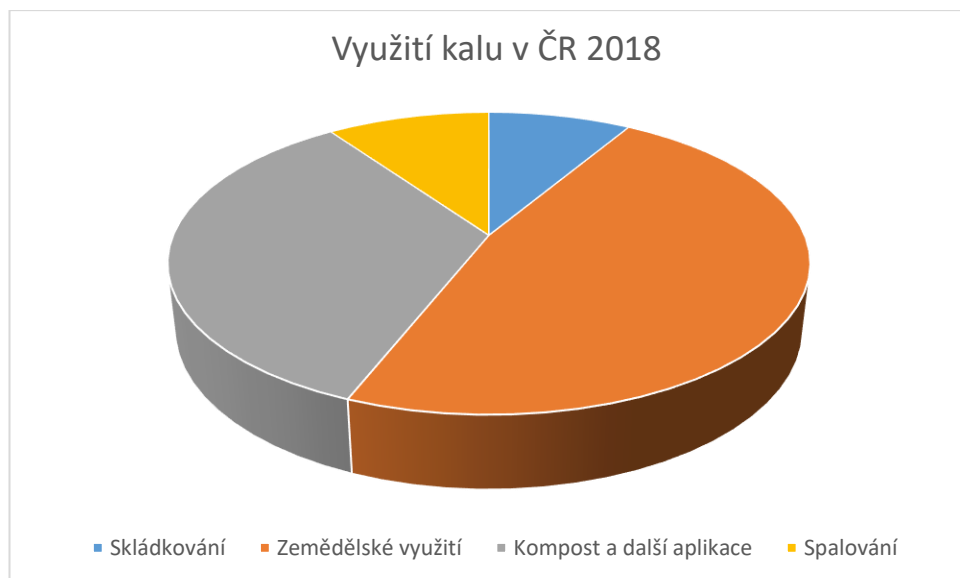
V ČR v průběhu let dochází k mírnému kolísání v produkci kašů, což naznačuje křivka na Obr. 4. Průměrná hodnota produkovaných kašů mezi lety 2009 a 2018 je 225,183 tisíc tun v sušině za rok.



Obr. 4. Grafické znázornění produkce kašů v ČR od roku 2009 do roku 2018. Jednotky v rádech tisíc tun v sušině

Vyhodnocení, v jakém poměru se využívají metody odstraňování kašů v evropských státech nejsou dle statistik jednoznačné, protože u velkého procenta zpracování kašů není deklarovaný žádný způsob využití. Tato nejistota pramení především z Polska, kde více jak polovina kašů nemá jasný způsob zpracování.

Česká republika má známy všechny statistické hodnoty až do roku 2018. V případě využití kašů v roce 2018 je nejvíce zastoupeno zemědělské využití (47,46 %). Následuje kompostování (34,18 %), poté spalování (9,79 %) a nejméně se využívá skládkování (8,57 %). Vyobrazení využití kašů v ČR za rok 2018 je na Obr. 5.



Obr. 5. Využití kalu v ČR v roce 2018  
(Kelessidis & Stasinakis 2012; European Commission 2020)

### 3.1.2 Pelety

Pelety jsou většinou granule s kruhovým průřezem o průměru 6-8 mm. Jsou vyrobené zejména z biomasy (dřevní odpad, dřevo, stébelniny, piliny). Peletizace je metoda zvýšení objemové hustoty biomasy mechanickým tlakem. Pelety mají nízký obsah vlhkosti (asi 8 %) pro bezpečné skladování a vysokou objemovou hustotu (více než 600 kg/m<sup>3</sup>) pro účinnou přepravu a skladování (Mani et al. 2006). Pokud je vlhkost při lisování vyšší než 20 %, tak nedojde ke zhutnění biomasy v lisovací komoře do požadovaného rozměru a peleta se rozpadne. Doporučená vlhkost pro kvalitní zhutnění je do 15 % (Malat'ák et al. 2010). Při výzkumu účinků obsahu vlhkosti, tlakové síly a velikosti částic na mechanické vlastnosti pelet z biomasy bylo zjištěno, že všechny tyto proměnné významně ovlivnily hustotu pelet (Mani et al. 2006).

Pelety jsou vhodnou surovinou pro spalování a získání energie. Vyčerpání životního prostředí způsobené intenzivním využíváním fosilních paliv k výrobě elektřiny k uspokojení rostoucích požadavků motivovalo hledání alternativních zdrojů energie. V této souvislosti byla za alternativu považována zbytková biomasa z různých plodin. S tímto zdrojem energie jsou však spojeny významné problémy, které souvisejí především s nízkou hustotou a vysokými náklady na dopravu. Proto se využívá odpadních pelet z biomasy v elektrárnách pro výrobu elektrické energie (Martínez-Guido et al. 2019).

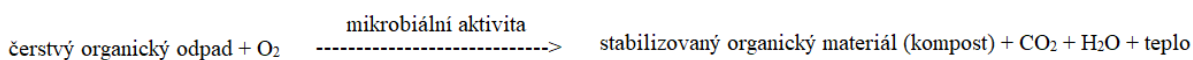
Řepkové slámové pelety představují vhodná alternativní spalovací paliva díky své dostupnosti, relativně vysoké výhřevnosti a nízkému obsahu vlhkosti. Peletizace umožnila zlepšit objemovou hustotu řepkové slámy a zvýšit její potenciál jako alternativního spalovacího paliva. Cílem výzkumu bylo studovat změny kvalitativních vlastností (tj. odolnost proti oděru, pevnost v oděru, hustota částic a rozměry pelet) řepkových slámových pelet během skladování po dobu 48 týdnů. Skladování řepkových slámových pelet neovlivnilo odolnost pelet proti oděru. Zatímco hustota částic a pevnost v tlakové síle se lišily s délkou skladování pelet, nebyl pozorován žádný trend v těchto změnách. Délka pelet se během

skladování snížila v důsledku rozbití, zatímco průměr se během skladování neměnil (Santamarta et al. 2012).

Mezi další využití pelet patří metoda kompostování. Při kompostování se často používají strukturální materiály obsahující celulózu (dřevěné hobliny, piliny, sláma, kůra, podestýlka). Proto jsou pelety vhodným přídatným materiálem při kompostování (Kosobucki et al. 2000).

## 3.2 Kompostování

Kompostování je metoda zpracování odpadu, která se stává populární díky svým přínosům (Qian et al. 2014). Kompostování zahrnuje přeměnu organických zbytků rostlinného a živočišného původu na užitečný produkt, tzv. kompost (Giglotti et al. 2005; Pergola et al. 2018). Jedná se do značné míry o mikrobiologický proces založený na činnostech několika bakterií, aktinomycetů a hub. Hlavní produkt je bohatý na humus a rostlinné živiny, dalšími produkty jsou oxid uhličitý, voda a teplo. Na Obr. 6 lze vidět rovnici reakce procesu kompostování.



Obr. 6. Vstupní látky a produkty při procesu kompostování

V procesu kompostování používají aerobní mikroorganismy organickou hmotu jako substrát. Mikroorganismy rozkládají substrát, rozkládají ho ze složitějšího na střední, a poté na jednodušší sloučeniny. Během kompostování se sloučeniny obsahující uhlík a dusík transformují postupnými činnostmi mikrobů na stabilnější organickou hmotu, která chemicky a biologicky připomíná huminové látky (Gajalakshmi & Abbasi 2008). Při transformaci organického odpadu na kompost dochází k recyklaci živin N, P a K, které jsou vhodné pro zemědělské účely (Wang et al. 2015). Z tohoto důvodu se stává kompost velkým konkurentem na trhu hnojiv (Proietti et al. 2016). V průběhu kompostování dochází k termofilním podmínkám, při kterých dochází k hygienizaci kompostu zničením patogenních organismů, které jsou přítomny v odpadu (Kulikowska 2016; Pandey et al. 2016).

Současnými metodami nakládání s pevným odpadem jsou např. spalování, skládkování, recyklace či opětovné použití. Skládkování i spalování jsou charakterizovány jako likvidace odpadu, což jsou nejméně preferované možnosti v hierarchii nakládání s odpady. V mnoha částech světa zůstává skládkování dominantní metodou likvidace odpadu, protože je nejlevnější z hlediska kapitálových nákladů. Opětovné použití je další strategií nakládání s odpady, které nelze recyklovat. Příklady opětovného použití organického pevného odpadu jsou procesy kompostovací a vermikompostovací. Komposty a vermikomposty vyrobené z organického odpadu lze znovu použít jako organická hnojiva bohatá na živiny nebo pro aplikaci na půdu. Tyto dva procesy jsou také velmi oblíbené pro nakládání s pevným odpadem kvůli vysokému procentu organického odpadu ve složení odpadu (Wu et al. 2014; Lim et al. 2016).

Použitím kompostu se zvyšuje cenný obsah organických látek v půdě a dochází k procesu obnovy úrodnosti půdy, což je velmi zajímavé v zemích, kde jsou půdy již vyčerpané. Nemělo by se však přehlížet, že v surových bioodpadech lze nalézt různé těžké kovy a patogeny. Celkový obsah těžkých kovů v odpadech určených pro zemědělské použití má prvořadý význam. Obavy týkající se znečištění těžkými kovy v zemědělských půdách souvisejí především s kvalitou plodin a lidským zdravím. Množství těchto prvků by nemělo dosáhnout prahových hodnot, které mohou poškodit buď úrodnost půdy nebo potravinový řetězec (Hassen et al. 2001). Metodu kompostování lze využít i jako způsob bioremediace, kde hraje významnou roli jako stabilizátor (imobilizuje kov v půdě) (Kulikowska et al. 2015).

Nejstarší známý písemný odkaz na kompostování se nachází v hliněných tabulkách datovaných k Akkadské říši, asi před 4300 lety, ale předpokládá se, že hodnota hnojiv aerobně degradované organické hmoty, kterou nyní nazýváme kompost, byla rozpoznána mnohem dříve. Existují důkazy, že Římané, Řekové a Bani Israel věděli o kompostu. Zmínka o kompostu se vyskytuje v arabských spisech z 10. a 12. století, ve středověkých církevních textech a v renesanční literatuře (Smith et al. 2007).

Bez pochopení chemických a biologických pochodů by nebylo možné rozvíjet kompostovací technologie. Materiály, jež se dříve považovaly za odpady, jsou nyní brány jako zdroje živin. V západní Evropě a USA na počátku 80. let nastal prudký nárůst kompostování. V tomto období se začala ve velké míře využívat speciální technika, jako jsou drtiče, bioreaktory, samojízdné překopávače apod. (Zemánek 2001).

### **3.2.1 Podstata fermentace (zrání) kompostu**

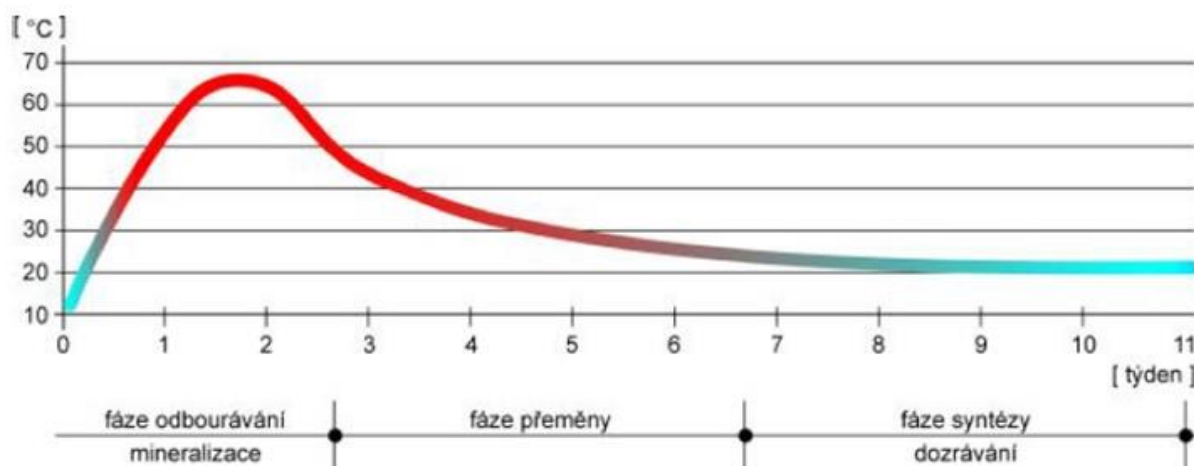
Fermentací rozumíme kvašení látek živočišného nebo rostlinného původu, kdy účinkem enzymů dochází k současnému uvolňování tepla. V průběhu fermentace dochází za pomoci makro a mikroorganismů k činnostem rozkladným, dále dochází k syntetickým přeměnám organických látek, imobilizaci minerálních živin a také k odbourávání škodlivin ze vstupních surovin, a tím i k hygienizaci vyrobeného kompostu (Filip 2002).

Účelem kompostování není rozložit všechny složky, ale aby proces proběhl jen v takové míře, aby byl materiál biologicky stabilizovaný. Poté materiál nepodléhá prudké biodegradaci a nemohou v něm začít patogenní procesy (např. hniloba). Takto stabilizovaný materiál již neohrožuje vodu, půdu a ovzduší, a lze jej zapravit do půdy (Zemánek 2001).

### **3.2.2 Fáze kompostovacího procesu**

Kompostovací proces rozdělujeme na 3 fáze: na fázi rozkladnou (mineralizaci), přeměnou (termofilní, přechodná) a fázi zrání. Na Obr. 7 lze vidět orientační vývoj teploty v jednotlivých fázích kompostovacího procesu (Zemánek 2001; Bernal et al. 2009).





Obr. 7. Orientační vývoj teploty v jednotlivých fázích kompostovacího procesu (Plíva 2006)

O tom, jak dlouho budou probíhat jednotlivé fáze, rozhoduje surovinová skladba, technologie, či podmínky při kompostování (Zemánek 2001).

### 3.2.2.1 Fáze 1

V této fázi dochází k prudkému nárůstu teploty (teplota se zvýší až na 60-70 °C) a k následnému poměrně rychlému poklesu teplot. Složitější organické sloučeniny jsou rozkládány mikroorganismy na jednodušší sloučeniny anorganického charakteru. Z počátku procesu se rozkládají škroby, cukry a bílkoviny, v pozdější části procesu také celulóza, hemicelulóza a lignin. Závěrečnými produkty těchto rozkladů jsou oxid uhličitý, voda a jiné látky. Pokud dochází k přebytku dusíku ve směsi, vzniká amoniak. Organické kyseliny nejsou mikroorganismy schopny odbourat, a v tom důsledku roste množství těchto kyselin a klesá hodnota pH.

Ze začátku fáze se rozvíjí mezofilní mikroorganismy, které jsou nejaktivnější při teplotách 20-30 °C. Rozkládají organickou hmotu, která je snadno odbouratelná. Svoji činností zvyšují teplotu, a při teplotě 45 °C nastupují mikroorganismy termofilní, které dokážou zvýšit teplotu až k 80 °C. Zvýšení teploty nad 70 °C je nutno redukovat, protože při této teplotě mikroorganismy hynou, a tím se prodlužuje doba zrání kompostu. V této fázi dochází ke zničení patogenů a semen. Při tomto procesu dochází k velkému objemovému snížení substrátu. První fáze kompostování může trvat při intenzivním provzdušňování 2-3 týdny, ale u kompostů, kde je velký obsah dřevní štěpky, může doba trvat i 2 měsíce (Zemánek 2001; Váňa et al. 2005; Bernal et al. 2017).

### 3.2.2.2 Fáze 2

Fáze přeměnná je též nazývána jako fáze přechodná. Dochází k poklesu teplot na 40-45 °C. Při této fázi dochází ke změně vzhledu kompostu, již nerozpoznáme původní hmotu. Vzniká kompost drobtovité struktury, má hnědou barvu a voní slabě po lesní zemině. V této

fázi je nutné dodržovat aerobní podmínky (kompost by zkysl), avšak nemusí být aerace tolik intenzivní, jako v počáteční fázi (Váňa et al. 2005).

Při této fázi dochází k odbourání přibližně 10 % směsi. Na rozklad špatně přístupných složek nastupují aktinomycety. Dochází k vymizení fytotoxicity a výluhy jsou hygienicky nezávadné (Zemánek 2001).

### 3.2.2.3 Fáze 3

Poslední fázi je fáze dozrávání. Teplota kompostu odráží teplotu okolí. V této fázi je obsah rozložitelných organických složek nízký a mikrobiální aktivita je nízká. Dochází ke stabilizaci kompostu a většina mineralizovaného dusíku je nitrátována na dusičnan. Ideální obsah vlhkosti během zrání je 45-50 %. Délka této fáze je obvykle nejméně 4 týdny, ale čím déle trvá, tím vyšší je stupeň humifikace organických látek (Chen 2003; Castaldi et al. 2005; Tang et al. 2006; Bernal et al. 2009).

## 3.2.3 Kompostovací technologie

Existuje několik druhů kompostovacích technologií, které lze rozdělit do těchto skupin:

- Kompostování v pásových zakládkách (krechťové zakládky)
- Kompostování v plošných zakládkách
- Intenzivní kompostovací technologie
  - Kompostování v boxech
  - Kompostování v biofermentorech
- Kompostování ve vacích (Ag Bag kompostování)
- Vermikompostování

(Plíva 2006)

## 3.2.4 Chemické a fyzikální vlastnosti

I když ke kompostování dochází přirozeně, účinné kompostování vyžaduje kontrolu nad několika faktory, aby se zabránilo nepříjemným problémům, jako je např. zápach, a také aby se získal kvalitní zemědělský produkt.

V posledních desetiletích byl výzkum zaměřen na studium komplexní interakce mezi fyzikálními, chemickými a biologickými faktory, ke kterým dochází v průběhu kompostování. Proto se kontrola parametrů, jako je pórovitost, obsah živin, velikost částic, poměr C:N, teplota, pH, vlhkost a přísun kyslíku, ukázala jako klíčová pro optimalizaci kompostování, protože určují optimální podmínky pro mikrobiální vývoj a degradaci organické hmoty.

Faktory ovlivňující proces kompostování lze rozdělit do dvou skupin: ty, které závisí na složení kompostovací směsi, jako je např. obsah živin, pH, velikost částic, pórovitost a vlhkost; a ty, které jsou závislé na řízení procesu, jako je např. koncentrace O<sub>2</sub>, teplota a

obsah vody (Bertoldi et al. 1983; Richard et al. 2002; Agnew & Leonard 2003; Bernal et al. 2009; Juárez et al. 2015; Onwosi et al. 2017).

Fyzikální a chemické vlastnosti, které významně ovlivňují celý průběh kompostování:

- Vlhkost
- Teplota
- Obsah živin a poměr C:N
- pH
- Obsah kyslíku
- Pórovitost
- Velikost částic

#### 3.2.4.1 Vlhkost

Zásadním fyzikálním faktorem, který je potřebný k udržování vhodných podmínek během procesu kompostování je vlhkost. Voda obsažená v kompostu je důležitá pro přenos živin, pracuje jako medium chemických reakcí a umožňuje pohyb mikroorganismů. Mikroorganismy nebudou aktivní, pokud je obsah vlhkosti příliš nízký a pokud je obsah vlhkosti příliš vysoký, voda může vytlačovat vzduch z pórů, což vede k anaerobnímu prostředí v kompostovaném materiálu. Ideální hodnota vlhkosti kompostu se nachází mezi 50 až 60 %. V případě, že vlhkost poklesne pod 30 %, tak se začíná zpomalovat mikrobiální aktivita (Agnew & Leonard 2003; Bernal et al. 2009; Gajalakshmi & Abbasi 2018; Azim et al. 2018).

Při nevhodné vlhkosti mohou vznikat nežádoucí chemické reakce. Při uvolňování reakčního tepla se směs dokáže zahřát tak, že proběhne pyrolýza a suchá destilace materiálu. Ve výjimečných případech (uzavřený bioreaktor) může dojít k zahřátí až na 80 °C a může se stát, že začnou vznikat jedovaté sloučeniny – chlor a stopové prvky těžkých kovů ze zakládky (Zemánek 2001).

Vlhkost má úzkou souvislost s hojností dodávaného vzduchu. K největším ztrátám vody dochází, když je dodáváno vysoké množství vzduchu (Plíva 2006).

Neexistuje univerzálně použitelná optimální vlhkost pro kompostovací materiály. Je tomu tak proto, že každý materiál má své jedinečné fyzikální, chemické a biologické vlastnosti, které ovlivňují vztah mezi vlhkostí a jejími faktory, které jsou důsledkem dostupnosti vody, velikosti částic, či pórovitosti (Makan et al. 2013).

#### 3.2.4.2 Teplota

Velkou roli v procesu kompostování má teplota. Ovlivňuje aktivitu a rozvoj mikroflóry, čímž stanovuje rychlost rozkladu organického materiálu. Majoritní množství mikroorganismů v organickém odpadu je mezofilního charakteru (ideální teplota rozvoje je 20 až 30 °C). V průběhu zvyšování teplot v čerstvé kompostové zakládce se začínají dostávat do převahy termofilní mikroorganismy, u kterých je ideální teplotou pro vývoj 45 až 65 °C. Na tyto

hodnoty by se měl kompost zahřát během 24-48 hodin. Pokud tomu tak není, tak je kompost příliš vlhký, příliš suchý, nebo je zde nedostatek dusíku. Při teplotě 55 °C po dobu 3-4 dnů dochází k úplné eliminaci patogenů. Teplotu měříme ve středu výšky zakládky v 1,5m úsecích. V případě, že dojde ke zvýšení teploty nad 68 až 70 °C, je potřeba zakládku zavlažit, protože za takto vysokých teplot již hynou vhodné mikroorganismy a prodlužuje se tím doba zrání (Zemánek 2001; Raut et al. 2008; Li et al. 2013; Chen et al. 2015; Zhao et al. 2016; Gajalakshmi & Abbasi 2018).

Když dochází ke zvyšování teploty po promíchání veškerých součástí čerstvého kompostu, tak se jedná o dobré podmínky pro vývoj mikroflóry. Nepříznivé podmínky se poznají podle toho, že se teplota nezvyšuje, či po zvýšení teploty nastává rychlý pokles teplot. Nejčastěji se jedná o špatné surovinové složení, zahlcení substrátu CO<sub>2</sub>, spotřebování kyslíku, či o nadměrnou vlhkost, která redukuje obsah vzduchu v kompostovaném materiálu. Při provádění studií se zjistilo, že snaha o urychlení procesu externím zahříváním nepřinesla uspokojivé výsledky. Rychlé navýšení teploty není prospěšné pro růst mikroorganismů.

V případě, že teplota neklesne na teplotu okolního prostředí, tak stále probíhají chemické a mikrobiologické přeměny, a proto by neměl být kompost použitý na hnojení. Pokud je kompostovaný materiál teplý, tak je fytotoxický a obsahuje velké kvantum organických kyselin (Zemánek 2001; Li et al. 2013).

Teplota kompostu se měří pomocí teploměrů. Rozdělujeme dva typy teploměrů – bezkontaktní a kontaktní.

#### 3.2.4.2.1 Bezkontaktní měření teploty

Tato metoda je velmi rychlá pro orientační zjištění teploty např. hromady. S velkou pravděpodobností lze určit teplotu uvnitř hromady. Pro bezkontaktní teploměry je potřebná taková optika, která dokáže snímat teplotu povrchu z dálky několika metrů na ploše o vhodném průměru.

Pro měření teploty u hromad se doporučuje používat bezkontaktní teploměr v kombinaci s teploměrem kontaktním, čímž získáme jak velmi rychlé měření, tak velmi přesné měření teploty.

#### 3.2.4.2.2 Kontaktní měření teploty

Měření kontaktním typem teploměru je předepsáno ve skladech obilovin, či na kompostárnách. Teploměr má zapichovací bodec, a proto se teploměry nazývají zapichovací. Hodnoty je potřeba zapisovat ručně do tabulek. Měření proto bývá zdlouhavé.

Existují však i speciální teploměry se záznamníkem, který je napojený na zapichovací sondu a ukládá naměřená data. Pomocí softwaru tyto data převedeme, zpracujeme, či zanalyzujeme. Teploměry oplývají velkou pamětí, zapamatují si až 16 000 měření.

Pro měření kompostu je kontaktní teploměr vhodnější. Musí být vybaven tyčovou zapichovací sondou, která dosáhne při propíchnutí hromady alespoň do 1 m pod povrch hromady, čímž se zjistí teplota v celém profilu hromady (Plíva 2006).

### 3.2.4.3 Obsah živin a poměr C:N

Základní živiny, které jsou obsaženy v kompostu jsou C (uhlík), N (dusík), K (draslík) a P (fosfor). Uhlík slouží jako nepostradatelná část pro vznik organické hmoty pro mikroorganismy. Společně s dusíkem se podílí na syntetizaci proteinů a na stavbě buněk a jejich reprodukci. Závěrečnou hodnotu kompostu ovlivňuje draslík, fosfor a dusík, protože se řadí mezi základní živiny pro rostliny. Draslík společně s fosforem mají důležitý úkol při rozmnožování buněk a při látkové výměně. Pro metabolickou činnost mikroorganismů je třeba mít minimální obsah fosforu ve výši 0,2 % oxidu fosforečného v sušině. Mikroorganismy, které žijí v kompostu, potřebují i přiměřený počet stopových prvků, kterými jsou např. vápník, sodík, kobalt, měď, bór, molybden, hořčík, zinek, selen, či mangan. Ačkoliv záleží na všech živinách v kompostu, nejvíce závisí kvalita hotového kompostu na vzájemném poměru C:N (Plíva 2006).

Poměr uhlíku a dusíku je jedním z důležitých faktorů ovlivňujících proces kompostování. Uhlík slouží především jako zdroj energie pro mikroorganismy. Dusík je rozhodující pro růst mikrobiální populace. Optimální poměry C:N při kompostování většiny materiálů se pohybují od 25 do 30. Rychlost rozkladu závisí na různých poměrech C:N.

Substráty s úzkým poměrem C:N v čerstvém kompostu pod 20:1 mají nadměrné množství dusíku, čímž dochází k nadměrné mineralizaci a dusík uniká ve formě amoniaku. Tím se prodlužuje doba zrání kompostu a produktivnost tvorby humusových látek klesá. Substráty, které mají široký poměr C:N nad 50:1 se rozkládají velice pomalu (Zemánek 2001; Gajalakshmi & Abbasi 2008; Bernal et al. 2009; Kumar et al. 2010; Azim et al. 2018).

Požadovaného výsledného poměru C:N dosáhneme tím, že budeme mísit jednotlivé materiály v surovinové skladbě. Materiály se širokým poměrem jsou např. sláma, piliny, kůra, listí. Materiály s úzkým poměrem jsou např. drůbeží trus, kejda, čistírenský kal, či chlévská mrva. Čistírenský kal dosahuje hodnot C:N přibližně od 6:1 do 16:1. V mezním případě lze přidat dusík ve formě průmyslových hnojiv (močovina, síran amonný) (Zemánek 2001; Plíva 2006). V Tab. 2 lze vidět příklady materiálů a jejich poměr C:N.

Tab. 2. Ukázky příkladů včetně jejich poměru C:N

<b>Materiál</b>	<b>C:N</b>
Kůra	120:1
Piliny	500:1
Odpad ze zahrad	40:1
Listí	50:1
Posečená tráva	20:1
Seno	35:1
Drůbeží trus	10:1
Močůvka	2:1
Kejda skotu	10:1
Hnůj skotu	25:1
Sláma (žito, oves)	60:1
Sláma (pšenice, ječmen)	100:1

(Valentová 2013)

#### 3.2.4.4 Hodnota pH

Za optimální hodnotu pH se považuje pH mezi 6,5 až 8. Pokud hodnota pH klesne pod 6, začne docházet k úhynu většiny mikroorganismů, především bakterií, a tím se zpomalí proces rozkladu organických látek. Jestliže hodnota pH vzroste nad 8,5, začne docházet k transformaci dusíkatých látek na amoniak. Amoniak uniká z kompostu v plynné formě a tím se navyšuje ztráta dusíku. Zvýšením pH se zvyšuje kompostovací výkon (Smårs et al. 2002; Sasaki et al. 2003; Komilis et al. 2004; Plíva 2006; Yu & Huang 2009; Li et al. 2013).

V počáteční fázi kompostování je hodnota pH nízká (okolo hodnoty 5). Nízké hodnoty jsou způsobené tvorbou organických kyselin (zejména kyseliny mléčné). V této fázi dominují plísně a houby, které jsou odolné vůči kyselému prostředí. Následovně mikroorganismy rozkládají kyseliny, to je doprovázeno změnou hodnoty pH. Ta se mění směrem k neutrálnímu prostředí, nebo dokonce k vyšším hodnotám okolo 8,5. Při tomto přechodu do neutrálního prostředí, či do slabě zásaditého prostředí, přichází do hlavní role bakterie, které rozkládají organické látky. Při experimentech bylo zjištěno, že fáze s nízkým pH byla prodloužena, pokud byl materiál kompostován za podmínek s nízkým obsahem kyslíku (Beck-Friis et al. 2001; Smårs et al. 2002; Plíva 2006; Azim et al. 2018).

Nejjednodušší stanovení hodnoty pH je pomocí indikátorových papírků. Do kádinky připravíme 10 g vzorku kompostu a přidáme 50 ml destilované vody. Důkladně protřepáváme po dobu 10 minut. Když se usadí částice, vezmeme indikátorový papírek a změříme hodnotu pH. Přesnost tohoto stanovení je okolo 0,5 pH (Plíva 2006).

#### 3.2.4.5 Obsah kyslíku

Dodávání vzduchu do kompostovaného materiálu je důležité ze tří hlavních aspektů.

První aspekt dodávání vzduchu je důležitý pro regulaci teplot během procesu kompostování. Pokud jsou delší dobu vysoké teploty, dochází k neblahému vlivu na život a činnost mikroorganismů.

Druhým aspektem je dodávání vzduchu se záměrem snižování vlhkosti. Dodaný vzduch se v kompostu ohřeje, napomáhá evaporaci vody, což je účelné při zpracování vlhkých surovin.

Poslední a nejdůležitějším aspektem je dodávání kyslíku se záměrem k vytvoření aerobních podmínek v kompostu, který následovně umožňuje aktivitu mikrobů. Při nedostatku vzduchu dochází k anaerobním podmínkám. Dochází k problémům s hygienou kompostu a se silným zápachem. Vznikají nežádoucí látky jako methan, sirovodík, či organické látky (kyselina octová, máselná, mléčná). Nejjednodušším ukazatelem nedostatečné aerace je tedy zápach. Není to však jednoznačný ukazatel, protože prvotní suroviny, které silně zapáchají, jsou taktéž v průběhu kompostování zapáchající. Zápach však v případě dostatečné aerace rychleji ztratí na intenzitě (Plíva 2006; Bernal et al. 2017).

Je několik způsobů, jak zajistit dodání vzduchu do kompostu. Záleží na tom, jaká je zvolená výrobní technologie. K aeraci může docházet přirozenou difúzí okolního vzduchu do porézní matrice v hromadě, ale tento způsob není dostatečný. Proto se často užívají mechanické prostředky provzdušňování pomocí překopávače kompostu (překopáním

v hromadách se množství vzdušného kyslíku může více než zdvojnásobit). Další běžnou metodou je využití ventilátorů. Obsah kyslíku ve vzdušných pórech zrajícího kompostu by neměl být nižší než 6 %. Optimální hodnotou koncentrace kyslíku je 15 až 20 % (Plíva 2006; Gajalakshmi & Abbasi 2008; Bernal et al. 2009; Bernal et al. 2017).

Obvyklé sondy sloužící k měření kyslíku nejsou běžně netečné proti přítomnosti dalších plynů, které se v průběhu kompostování mohou objevit. Při nákupu přístroje na měření kyslíku (respektive kyslíkové sondy) je nezbytné ověřit, že je sonda odolná proti výskytu sulfanu a amoniaku (Plíva 2006).

#### 3.2.4.6 Pórovitost

Pórovitost má velký vliv na proces kompostování, protože během procesu musí být udržovány vhodné podmínky pro distribuci vzduchu. Pórovitost větší než 50 % způsobí, že hromada zůstane na nízké teplotě, protože ztráta energie převyšuje vyrobené teplo. Příliš malá pórovitost vede k anaerobním podmínkám a tvorbě zápachu. Procentní prostor pórů vyplněný vzduchem kompostovacích hromádek by měl být v rozmezí 35-50 %. Hodnoty pórovitosti naznačují strukturu matrice, nikoliv však dostupnost kyslíku v matrici, protože póry mohou být vyplněny vodou (Agnew & Leonard 2003; Bernal et al. 2009).

Pórovitost je určena jako poměr objemu dutin ku celkovému objemu kompostovaného materiálu. Čím více se objevují větší a homogenní částice, tím je pórovitost vyšší. Struktura vypovídá o odolnosti proti ztuhnutí, tedy o pevnosti částic. Pokud máme dobrou strukturu, tak dochází k zabránění snížení pórovitosti ve vlhkém prostředí (Plíva 2006).

#### 3.2.4.7 Velikost částic

Důležitou roli hraje velikost částic vstupních surovin. Menší částice urychlují proces rozkladu, a tím je rychlejší i celý průběh kompostování. V porovnání s jejich objemem mají větší povrchovou plochu. Proto jsou vystaveny výraznějšímu působení mikroorganismů. Kompost s obsahem velkých částic má obtížný přístup pro mikroorganismy, protože vnitřek částic je pro přístup mikroorganismům obtížný. Čím je lepší homogenita vstupního materiálu, tím jsou částice menší. Malé částice však mohou hmotu ztuhnout, čímž způsobují problémy ohledně nízké pórovitosti, a poté nedochází k dostatečnému provzdušnění (Bernal et al. 2009).

### 3.2.5 Kompostování čistírenských kalů

Kaly z odpadních vod jsou hospodářsky významným zdrojem biomasy, který lze v mnoha ohledech znovu použít. Jedním z nejefektivnějších přístupů je zpracování kalů z odpadních vod během procesu kompostování, kde může být konečný produkt použit jako dobré hnojivo pro zemědělství (Kwarciak-Kozłowska 2019). Čistírenský kal má chemické složení srovnatelné s hnojivem, a proto může prospět jak úrodnosti půdy, tak růstu rostlin (Matichenkov & Bocharnikova 2016). Kompostování čistírenských kalů je proces, při kterém dochází za aerobních podmínek k biologickému rozkladu organických látek obsažených v kalu. Vzniká stabilizovaný materiál, tzv. kompost. Ten lze použít ke kondicionaci půdy a již

není nebezpečný pro životní prostředí (Kızılkaya & Bayraklı 2005; Pošta 2005). Další výhodou kompostování kalů je zpeněžení kalu. Mezi nevýhody kompostování kalů patří nutnost velké plochy, nutnost přídatného materiálu, či že je to potenciální zdroj bioaerosolů a zápachu (Pošta 2005).

Metoda kompostování má nejvyšší nároky na kvalitu kalu. Kal musí splňovat chemické, fyzikální i mikrobiologické vlastnosti. Musí být bez nepříjemného zápachu a vizuálně přijatelný (žádný obsah plastů apod.). Kaly můžeme kompostovat, pokud obsahují dostatek organické složky a pokud mají relevantní obsah vody. Požadujeme u kalu dostatečný obsah živin (fosfor, dusík), schopnost aerace, vlhkost a příhodné podmínky pro existenci mikroorganismů (Lyčková et al. 2009). Mnoho studií však naznačuje, že kompostování kalů z odpadních vod samo o sobě produkuje nekvalitní kompost kvůli vysoké vlhkosti, nízké propustnosti vzduchu a vysokému obsahu dusíku. Aby se získal vhodný poměr C:N, měl by být nejprve dehydratovaný kal smíchán s dalším organickým zdrojem uhlíku (Kwarcia-Kozłowska 2019). Kaly, které obsahují velké množství vody, nejsou příhodné pro růst mikroorganismů. Můžeme je kompostovat, pokud je použijeme ve vhodné směsi, kde se nachází jiný, vysoce fermentovaný, organický odpad s malým obsahem vody. Kaly, jenž obsahují více než 15 % vody, jsou snadno kompostovatelné ve směsi s porézním materiálem. Ten tvoří vhodnou strukturu kompostovaného materiálu (Lyčková et al. 2009). V praxi se nejčastěji používají strukturální materiály obsahující celulózu (dřevěné hobliny, piliny, sláma, kůra, podestýlka) (Kosobucki et al. 2000).

Při zkoumání organických mikropolutantů v kompostu bylo zjištěno, že obsahy pesticidů, PAU, PCB, PCDD/PCDF nemají zákonné restriktivní omezení v legislativě EU. Obsahy zmiňovaných látek jsou velice nízké. Naopak obsah těžkých kovů může být klíčovým parametrem pro následné využití kompostu (Lyčková et al. 2009). K. Gondek et al. (2018) studovali mobilitu těžkých kovů v písčité půdě po aplikaci kompostů, které byly vyrobeny z kalu z odpadních vod, biocharu a kukuřičné slámy. Zjistili, že tento kompost má imobilizující účinek na mobilní formy Pb, Zn, Cd a Cu.

Kompostování probíhá za teploty, při které dochází k dostatečné likvidaci patogenů. Je ovšem obtížné dosáhnout a udržovat po přiměřenou dobu hygienickou teplotu v celém objemu kompostu. Nedodržení minimální požadované teploty po minimální požadovaný čas má za následek, že dochází pouze k částečné hygienizaci (Dumontet et al. 1999).

Yañez et al. (2009) prováděli experiment, kdy zjišťovali vliv poměru činidla na proces kompostování kalů z odpadních vod. Vytvořili 4 druhy kompostu, které se skládaly ze směsi z akácie sivozelené (A) s kalem z odpadních vod (SS) v poměrech A/SS 1/0, 1:1, 1:2 a 1:3. Po vyhodnocení experimentu dospěli k tomu, že optimální množství čistírenského kalu pro společné kompostování s akácií sivozelenou je poměr A:S 1:1.

Ammari et al. (2012) kompostovali kaly z odpadních vod s pilinami a s organickými odpady z bramborového průmyslu. Vytvořili 4 varianty kompostu. První varianta je směs jemných pilin s kalem a vysokým poměrem C:N. Druhá varianta je směs jemných pilin s kalem a nízkým poměrem C:N. Třetí variantou je směs hrubých pilin s kalem a vysokým poměrem C:N a poslední varianta je směs hrubých pilin s kalem a nízkým poměrem C:N. Vhodnými variantami kompostovacího materiálu pro použití na půdu vyšly varianty s jemnými pilinami. Nejvhodnější variantou je varianta s vysokým poměrem C:N.



### 3.2.6 Zralost a stabilita kompostu

Hlavním požadavkem kompostu pro jeho bezpečné použití v půdě je vysoký stupeň stability nebo zralosti, což znamená stabilní obsah organických látek, nepřítomnost fytotoxických sloučenin a rostlinných nebo živočišných patogenů. Zralost je spojena s růstovým potenciálem rostlin nebo fytotoxicitou, zatímco stabilita často souvisí s mikrobiální aktivitou kompostu a obsahem organických látek. Stabilita i zralost však obvykle jdou ruku v ruce, protože fytotoxické sloučeniny jsou produkovány mikroorganismy v nestabilních kompostech. Zralost je stupeň úplnosti kompostování.

Některé nezralé komposty mohou obsahovat vysoké množství volného amoniaku, některých organických kyselin nebo jiných sloučenin rozpustných ve vodě, které mohou omezit klíčení semen, vývoj kořenů a mohou potlačit růst rostlin. Všechna použití kompostu vyžadují zralý kompost bez těchto potenciálně fytotoxických složek (Gajalakshmi & Abbasi 2008; Bernal et al. 2017).

Zralost a stabilita kompostu by měla být hodnocena měřením dvou a více parametrů kompostu. Barva, zápach a teplota poskytují pouze obecnou představu o stupni rozkladu. Mezi tyto parametry patří např. spotřeba kyslíku, kationtová výměnná kapacita, biochemické parametry mikrobiálních aktivit, testy fytotoxicity, obsah živin v organické hmotě, nebo poměr C:N (Gajalakshmi & Abbasi 2008; Antil et al. 2013).

Antil et al. (2013) došli k závěru, že parametry pro zralost zemědělsko-průmyslových odpadů jsou ztráta organické hmoty, poměr C:N, poměr  $C_w:N_{org}$  (vodou rozpustný uhlík:organický dusík), HA:FA (poměr huminové kyseliny:fulvové kyseliny), GI (index klíčení), HI (humifikační index), a CEC/TOC (poměr kationtové výměnné kapacity/celkového organického uhlíku). Ke každému parametru stanovili optimální hodnotu, viz. Tab. 3.

Tab. 3. Optimální hodnoty parametrů

Parametry	Hodnoty
Ztráta org. hmoty	> 42 %
CEC/TOC	> 1,7
HI	> 30 %
HA:FA	> 1,9
C:N	< 15
$C_w:N_{org}$	< 0,55
GI	>70 %

(Antil et al. 2013)

V Tab. 4 nalezneme Gajalakshmi (2008) seříděné hodnoty různých parametrů, které jsou považované za vhodné pro kompostovací systémy.

Tab. 4. Optimální hodnoty parametrů seříděné Gajalakshmi

<b>Parametry</b>	<b>Hodnoty</b>	<b>Reference</b>
<b>CEC</b>	min. 0,6 mol/kg	Harada and Inoko (1980)
	min. 0,67 mol/kg	Jimenez and Garcia (1992)
<b>CEC/TOC</b>	min. 1,7 mmol/g	Roig et al. (1988)
	min. 1,9 mmol/g	Jimenez and Garcia (1992)
<b>HA:FA</b>	1,9	Jimenez and Garcia (1992)
<b>C:N</b>	pod 20	Poincelot (1974)
	méně než 18	De Baere et al. (1986)
	méně než 12	Jimenez and Garcia (1992)
	15-25	Mathur et al. (1993), Canet and Pomares (1995)
<b>C<sub>w</sub>:N<sub>org</sub></b>	0,55	Bernal et al. (1998)
	<0,7	Hue and Liu (1995)
<b>GI</b>	>50 %	Zucconi et al. (1981)

(Gajalakshmi & Abbasi 2008)

## 4 Metodika

Tato práce se zabývala změnami fyzikálních a chemických parametrů v průběhu kompostování čistírenských kalů. Čistírenský kal se smíchal v různých poměrech s navlhčenými slaměnými peletami a sledovaly se změny jednotlivých parametrů. Pokus probíhal na pokusné stanici FAPPZ v Červeném Újezdu.

### 4.1 Vstupní suroviny

První vstupní surovinou pro pokus se využil kal z čistírny odpadních vod menšího města s počtem ekvivalentních obyvatel EO 3500. Druhou použitou vstupní surovinou byly slaměné pelety. Pelety byly nejdříve navlhčeny, aby se rozpadly.

Odebraly se vzorky kalu a pelet ve 3 opakováních. Z těchto surovin bylo stanoveno pH, měrná vodivost, obsah C a N, z čehož se vypočítal poměr C:N. Dále byl stanoven obsah prvků (K, Mg, P) a stanovovala se objemová hmotnost surovin.

### 4.2 Průběh pokusu kompostování

Pokus probíhal v 5 různých poměrech vstupních surovin. Každá varianta byla připravena ve dvojím provedení (viz. Tab. 5).

Tab. 5. Varianty poměrů v aerobních fermentorech (AEF)

číslo AEF	poměr surovin
1	kal 100 % hm. (45 kg)
2	kal 100 % hm. (45 kg)
3	kal 75 % hm. (33,75 kg) + pelety 25 % hm. (6,75 kg + se doplní 2,25 l vody)
4	kal 75 % hm. (33,75 kg) + pelety 25 % hm. (6,75 kg + se doplní 2,25 l vody)
5	kal 50 % hm. (22,5 kg) + pelety 50 % hm. (13,5 kg + se doplní 4,5 l vody)
6	kal 50 % hm. (22,5 kg) + pelety 50 % hm. (13,5 kg + se doplní 4,5 l vody)
7	kal 25 % hm. (11,25 kg) + pelety 75 % hm. (20,25 kg + se doplní 6,75 l vody)
8	kal 25 % hm. (11,25 kg) + pelety 75 % hm. (20,25 kg + se doplní 6,75 l vody)
9	pelety 100 % hm. (27 kg) + se doplní 9 l vody
10	pelety 100 % hm. (27 kg) + se doplní 9 l vody

Varianty s vyšším zastoupením pelet vykazovaly po měsíci kompostování známky relativně suchého materiálu (po stlačení se materiál rozpadal). U těchto variant nebyl na dně fermentoru v tomto období zjištěn žádný výluh. Kvůli udržení hmotnostního poměru kalu a pelet musela být voda přidána i do fermentorů s nižším podílem pelet.

Suroviny a jejich směsi byly kompostovány po dobu 4 měsíců v deseti aerobních fermentorech o pracovním objemu 70 l a poloměru 23 cm. Foto aerobního fermentoru lze vidět na Obr. 8 a sestavu aerobních fermentorů lze vidět na Obr. 9.



Obr. 8. Aerobní fermentor



Obr. 9. Sestava aerobních fermentorů

Nejprve se připravila směs surovin a ta se následovně vložila do jednotlivých aerobních fermentorů. Fermentor s jednotlivými směsmi se ponechal na místě pro vyrovnání teplot a pro tvorbu případného výluhu. Následující den se slily výluhy z aerobních fermentorů zpět do kompostovaného materiálu a umístily se do připravené místnosti.

Shora fermentoru byla zavedena teplotní sonda tak, aby dosahovala přibližně do poloviny výšky materiálu. Teplota byla zaznamenávána každou hodinu a hodnoty byly shromažďovány v datové ústředně. Záznamovou ústřednu teplot lze vidět na Obr. 10.



Obr. 10. Záznamová ústředna teplot

Dále byla do fermentoru zavedená hadička, která byla napojena do analyzátoru plynů, kde se zjišťovala přítomnost  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$ . Zespod fermentoru bylo zajištěno kompresorem provzdušňování. Prvních 14 dní byl nastaven průtok vzduchu 4 l/min po dobu 5 minut každou půlhodinu, a následovně po dobu 3 minut každou půlhodinu.

Před odběrem vzorku se nalil případně vzniklý výluh zpět do kompostovaného materiálu, aby se dosáhlo uzavřeného cyklu látek. Změřila se výška vrstvy materiálu, a jelikož byl znám i poloměr fermentoru, tak se následovně z těchto hodnot vypočítal objem materiálu. Následně se obsah fermentoru vysypal do lavoru a stanovila se hmotnost. Ze zjištěného objemu a hmotnosti se spočítala objemová hmotnost. Poté se jednorázově doplnila voda (která se nepřidala na začátku pokusu) a směs se zamíchala. Jedenkrát měsíčně před odběrem vzorku se kompostovaný materiál řádně promíchal, čímž se zlepšila provzdušněnost. Následovně se odebral vzorek 1200 g, ze kterého se každý měsíc odebírali vzorky ve 3 opakováních. Do lednice se odebralo 3 x 30 g, na sušení 3 x 200 g a do mrazáku 3 x 150 g. Poté už se jen směs vrátila zpátky do příslušného aerobního fermentoru.

## 4.3 Analýzy

### 4.3.1 Stanovení pH a měrné vodivosti

Hodnoty pH a hodnoty měrné vodivosti se stanovovaly ve vodném výluhu o poměru 1:5 w/v. Hodnoty pH se měřily v suspenzi, hodnoty měrné vodivosti se měřily ve filtrátu.

Nejprve se do zkumavky navážilo 5 g čerstvého (chlazeného) vzorku a následně se přidalo 25 ml demineralizované vody. Zkumavky se uzavřely a umístily do třepacího zařízení

na 10 minut. Poté byly vzorky připraveny na měření pH pomocí kalibrovaného pH metru WTW 340i.

Následně se zkumavky opět uzavřely a vložily se do odstředivky. Tam byly po dobu pěti minut při nastavení 5000 otáček za minutu. Ve vzorcích docházelo odstředivou silou k oddělení materiálu od kapaliny. Ta se přefiltrovala přes filtrační papír, a následně se v tomto roztoku měřila měrná vodivost pomocí konduktometru WTW cond 730.

### 4.3.2 Elementární analýza

Abychom mohli stanovit poměr C:N, bylo nejprve zapotřebí určit celkový obsah prvků C a N. Nadrčený suchý vzorek o přibližné hmotnosti 20 mg se navažoval do hliníkových kalíšků, které byly určeny ke spalování. Vzorky byly analyzovány v přístroji Vario MACRO cube, ve kterém docházelo ke spalování materiálu ( $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) za aerobních podmínek. V průběhu spalování se analyzovala oxidující směs, která obsahovala oxidy dusíku,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$ . Následně docházelo v redukční peci k převedení oxidů dusíku na plynný dusík. Dále se stanovovalo složení vznikajících spalin. V závěru procesu se uskutečnila kvantifikace za pomoci tepelně vodivostního detektoru.

### 4.3.3 Stanovení celkového obsahu prvků metodou suchého rozkladu

Metoda suchého rozkladu spočívala z procesů sušení, zuhelnatění, zpopelnění a následně z loužení popela, ke kterému se přidalo pomocné činidlo. Ve variantách, které obsahovaly kal, se navíc opakoval proces zpopelnění a loužení.

Nejprve se navážily vzorky o hmotnosti  $0,50\text{ g} \pm 0,03\text{ g}$  do kádinek, které byly odolné vůči vysokým teplotám. Na kádinky se vzorky se položila hodinová sklíčka a kádinky se položily na plotýnku. Nejprve byla nastavena teplota na plotýnce na  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Poté se s hodinovými rozestupy zvyšovala na  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$  a nakonec na  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Celkové setrvání kádinek na plotýnce trvalo 4 hodiny.

Následně se sundala hodinová sklíčka z kádinek. Pec se nastavila na program určený k suchému rozkladu. Kádinky se vložily do pece, kde docházelo k postupnému zahřívání. Časové rozmezí tohoto procesu bylo 10-16 hodin.

Po doběhnutí procesu se nechaly vzorky vychladnout. Do každé kádinky se aplikoval 1 ml  $\text{HNO}_3$ . Následně se kádinky vložily na plotýnku, která byla umístěna v digestoři. K odpaření kyseliny se nastavila teplota plotýnky na  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  a tento proces trval zhruba hodinu. Poté se kádinky přesunuly zpět do pece, kde při teplotě  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  byly 1 hodinu.

Pro vzorky, které neobsahovaly kal, se připravil roztok  $\text{HNO}_3$  s demineralizovanou vodou. Roztok se připravoval do kádinky o objemu 1 l. Roztok v kádince obsahoval 15,5 ml  $\text{HNO}_3$  a byl doplněn demineralizovanou vodou po rysku. Výsledný roztok se aplikoval do stříčky. Pomocí stříčky se roztok aplikoval do kádinek obsahujících popel, a pomocí ultrazvuku byly kádinky vymývané. Následně se obsah kádinky přelil do zkumavky, která měla objem 25 ml a doplnila se po rysku. Hrdlo zkumavky se utěsnilo.

Vzorky, které obsahovaly kal, se po následujícím setrvání v peci nechaly zchladnout. Následně bylo do kádinek naaplikováno 6 ml směsi  $\text{HCl}$  a  $\text{HNO}_3$  v poměru 1:3, tzv. lučavka

královská. Poté se kádinky přesunuly na plotýnku v digestoři, kde docházelo k odpařování lučavky královské při teplotě 160 °C. Po následném vychladnutí vzorků se kádinky pomocí stříčky, která obsahovala demineralizovanou vodu, a ultrazvuku vymývaly. Popel byl převeden do roztoku a následně byl přelit do zkumavky, která měla objem 25 ml. Následně byla zkumavka doplněna demineralizovanou vodou po rysku. Hrdlo zkumavky se utěsnilo.

Draslík byl stanoven pomocí plamenového atomového absorpčního spektrometru. Hořčík a fosfor byly stanoveny pomocí emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem.

#### **4.3.4 Stanovení přístupného obsahu prvků metodou CAT**

Přístupný obsah prvků se stanovoval ve vyluhovacím činidle CAT. Pro toto stanovení bylo potřeba vytvořit zásobní roztok. Ten se připravil postupným ohříváním 800 ml demineralizované vody na teplotu 80 °C. Poté se přimíchalo 11,2 g CaCl<sub>2</sub> a 7,88 g kyseliny diethylentriaminpentaoctové (DTPA). Přidané látky se pozvolna rozpouštěly přibližně dvě hodiny za stálého míchání. Po vychladnutí roztoku byl roztok doplněn demineralizovanou vodou do objemu 1 l.

Usušené vzorky se nadrtily a do každé zkumavky se navážily 3,0 g vzorku. Aby nám vznikl koncentrát, který by byl aplikovatelný na suchý vzorek, bylo potřeba zásobní roztok rozředit v poměru 1:9 demineralizovanou vodou. Do zkumavky se vzorkem se přidal výsledný roztok a zkumavky se utěsnily. Poté byly zkumavky přeneseny do třepacího zařízení, kde setrvaly 1 hodinu. Následovně byly vzorky odstředovány 15 minut odstředivkou, která byla nastavena na 6000 otáček za minutu. Odstředěné vzorky se pomocí filtračního papíru přefiltrovaly do plastových zkumavek. Stanovení přístupných obsahů prvků bylo provedeno metodou emisní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem.

## **4.4 Statistika**

Statistická analýza byla prováděna v programech Microsoft Excel 365 a v programu TIBCO Statistica.

## 5 Výsledky

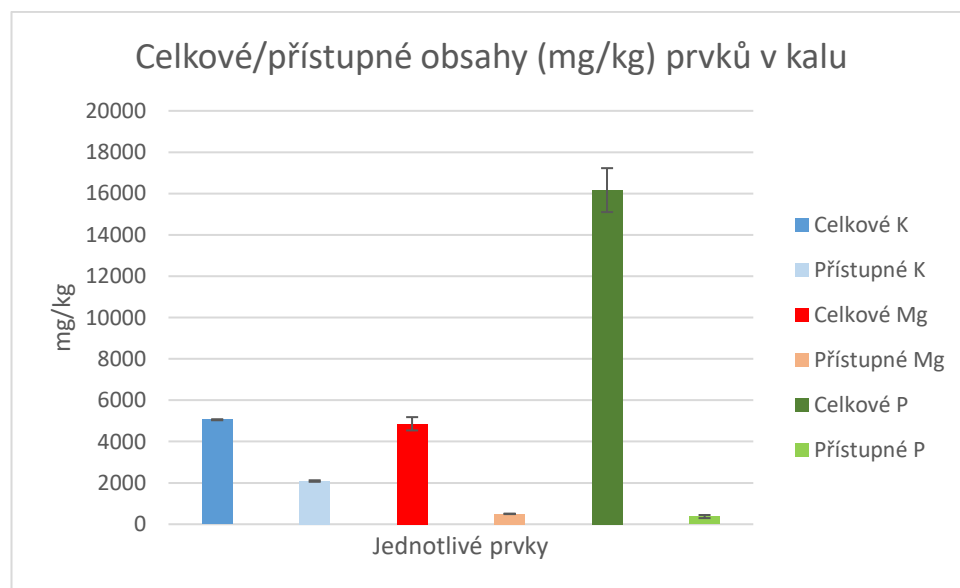
### 5.1 Vstupní suroviny

V Tab. 6 jsou uvedeny hodnoty veličin pro čistírenský kal a slaměné pelety. Čistírenský kal měl nižší obsah sušiny – 13,3 %. Oproti tomu již navlhčené slaměné pelety obsahovaly 21,2 % sušiny. Čistírenský kal vykazoval nižší hodnotu pH než je tomu u slaměných pelet. Hodnota měrné vodivosti vyšla přibližně stejně. Velký rozdíl hodnot byl u poměru C:N. Pro čistírenský kal byla stanovena hodnota 6,14 z důvodu vysokého obsahu dusíku. Slaměné pelety obsahovaly nižší obsah dusíku, a proto poměr C:N byl vyšší – 53,67.

Tab. 6. Průměrné hodnoty se směrodatnou odchylkou (n = 6) jednotlivých veličin pro čistírenský kal a slaměné pelety

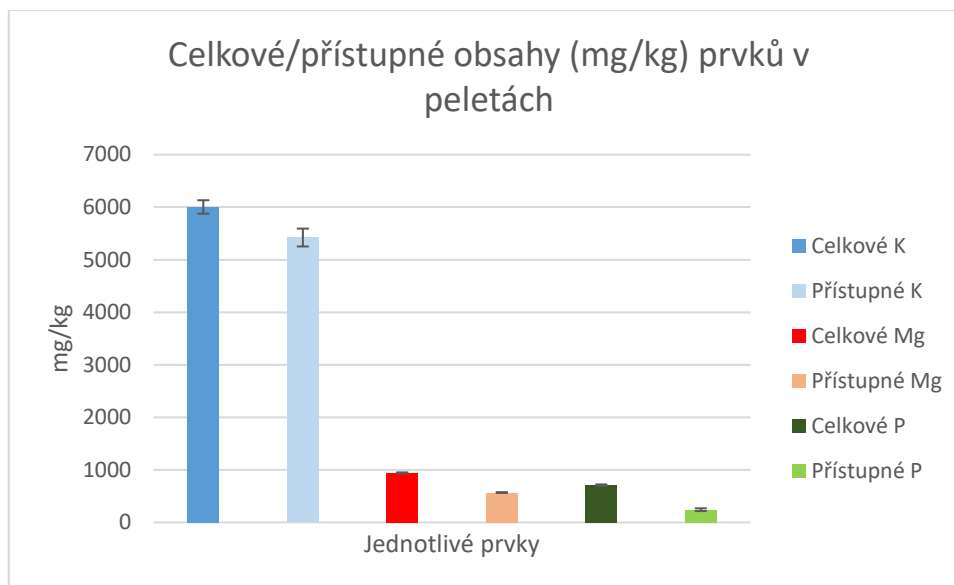
	sušina (%)	měrná vodivost ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	C:N
čistírenský kal	13,3 $\pm$ 0,2	680 $\pm$ 1,25	6,99 $\pm$ 0,02	6,14 $\pm$ 0,03
slaměné pelety	21,2 $\pm$ 0,5	680 $\pm$ 55,29	8,30 $\pm$ 0,43	53,67 $\pm$ 6,21

U vstupních surovin byl sledován celkový obsah prvků K, Mg a P. Hodnoty celkového obsahu K nejsou u kalu a pelet tolik rozdílné. Naopak celkové obsahy Mg a P jsou u těchto surovin výrazně odlišné. Na Obr. 11 a Obr. 12 lze vidět grafická znázornění celkových a přístupných obsahů prvků u kalu a pelet.



Obr. 11. Celkové/přístupné obsahy (mg/kg) prvků v kalu





Obr. 12. Celkové/přístupné obsahy (mg/kg) prvků v peletách

Procentuální poměry přístupných prvků oproti celkovým prvkům u čistírenského kalu a slaměných pelet znázorňuje Tab. 7.

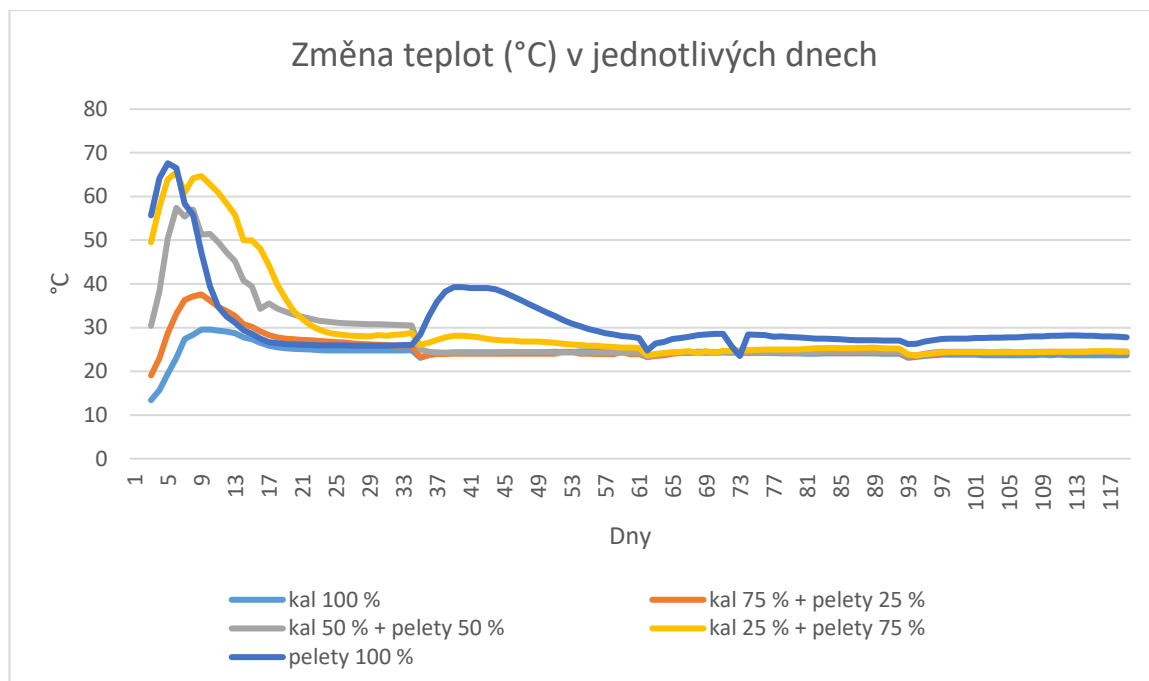
Tab. 7: Forma přístupných obsahů prvků v procentuálním poměru oproti celkovým obsahům prvků

	K (%)	Mg (%)	P (%)
čistírenský kal	41	10	2
slaměné pelety	90	60	34

## 5.2 Fyzikální a chemické parametry v průběhu kompostování

### 5.2.1 Teplota

K nejvyšším změnám teplot docházelo hned na začátku procesu kompostování. Nejprve došlo k prudkému nárůstu teplot, největší změna teploty byla u varianty pelety 100 % a nejnižší nárůst teploty byl u varianty kal 100 %. Nejvyšších teplot dosahovaly směsi v prvních 10 dnech, a poté následoval pokles hodnot. Po tomto poklesu už byly varianty poměrně konstantní kromě varianty pelety 100 %. U varianty pelety 100 % došlo po přibližně 1 měsíci k nárůstu hodnot až ke 40 °C. Tato teplota se udržela 5 dní, a poté následoval pozvolný pokles teplot a následně byly teploty téměř konstantní. Na Obr. 13 lze vidět grafické znázornění změny teplot v jednotlivých dnech a v Příloze 1 jsou zaznamenané hodnoty teplot v průběhu termofilní fáze.



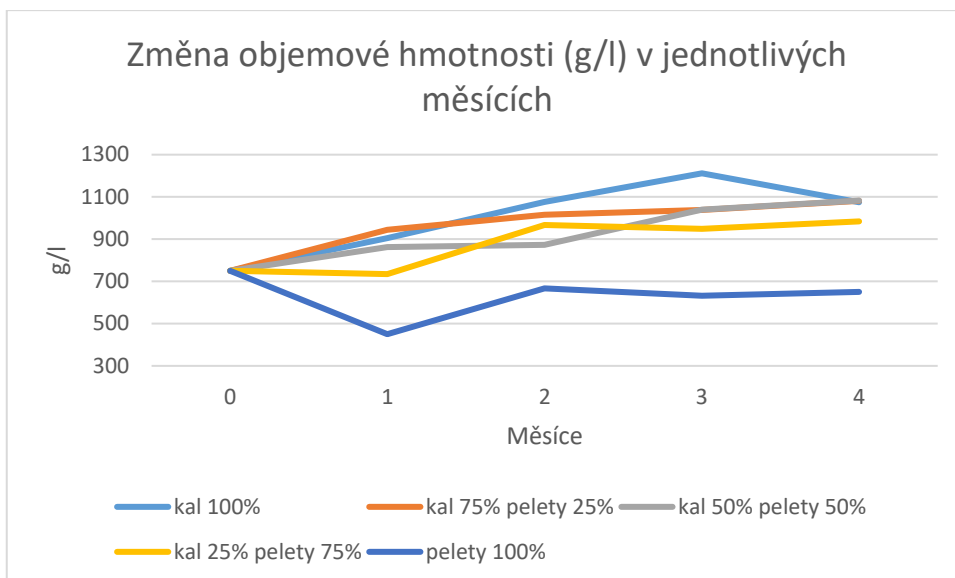
Obr. 13. Změna teplot (°C) v jednotlivých dnech

### 5.2.2 Objemová hmotnost

Změna objemové hmotnosti se u všech variant na konci kompostování navýšila oproti počátečním hodnotám vyjma varianty pelety 100 %. Počáteční hodnota u všech variant byla stejná – 750 g/l. Nejnižších hodnot objemové hmotnosti v průběhu kompostování dosahovala varianta pelety 100 %. Nejvyššího navýšení během 1. měsíce dosáhla varianta kal 75 % + pelety 25 % s dosaženou hodnotou 945 g/l. V závěru procesu dosáhly 3 varianty téměř stejných hodnot, jedná se o varianty kal 100 %, kal 75 % + pelety 25 % a kal 50 % + pelety 50 %. Hodnoty se pohybovaly kolem 1080 g/l. Nejnižší hodnoty dosáhla varianta pelety 100 % s hodnotou 650 g/l. Varianta kal 25 % + pelety 75 % dosáhla konečné hodnoty 984 g/l.

Nejvyššího nárůstu objemové hmotnosti dosáhla varianta kal 50 % + pelety 50 %. Objemová hmotnost narostla během procesu o 332 g/l. Poklesu objemové hmotnosti dosáhla varianta pelety 100 %, kde došlo ke snížení o 100 g/l.

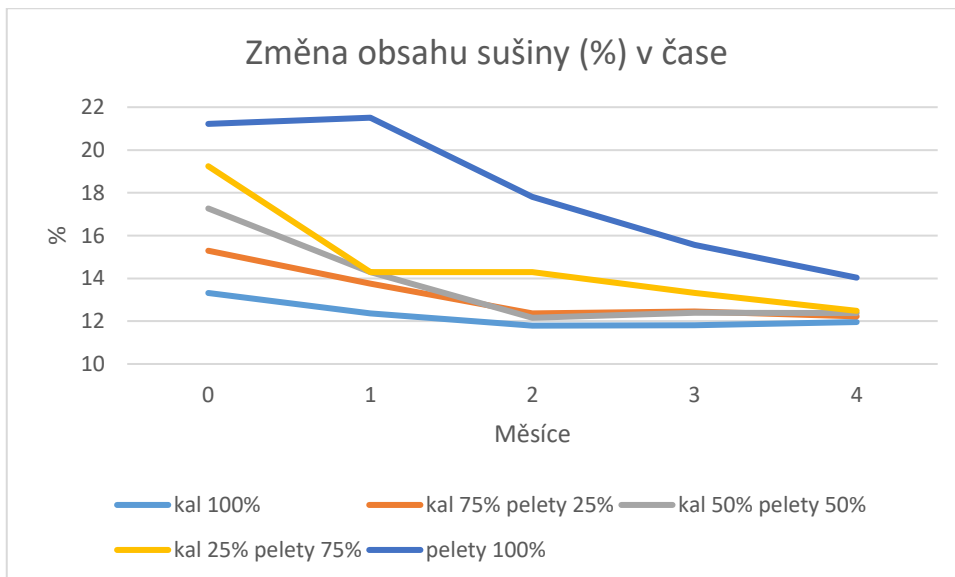
Na Obr. 14 lze vidět grafické znázornění vývoje objemové hmotnosti v čase a v Příloze 2 lze vidět vypočtené hodnoty objemové hmotnosti pro jednotlivé fermentory.



Obr. 14. Změna objemové hmotnosti (g/l) v průběhu kompostování

### 5.2.3 Obsah sušiny

Změna obsahu sušiny byla nejvýraznější během prvního měsíce, kromě varianty pelety 100 %. Tam došlo k prudkému poklesu obsahu sušiny v čase až o měsíc déle. Grafické znázornění průběhu jednotlivých variant lze vidět na Obr. 15.



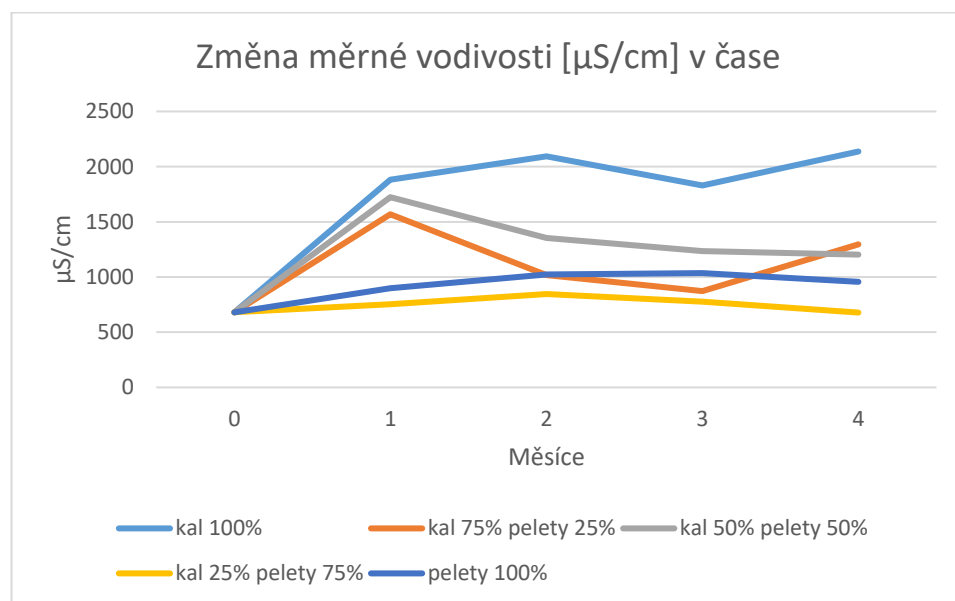
Obr. 15. Změna obsahu sušiny (%) v průběhu kompostování (po doplnění případně vzniklého výluhu ze dna fermentoru)

Nejvíce konstantní variantou byla varianta kal 100 %, kde nedocházelo v průběhu času k žádným výrazným změnám. U variant kal 75 % + pelety 25 % a kal 50 % + pelety 50 % došlo nejprve k poklesu obsahu sušiny, ale následovně byly změny hodnot nevýrazné. Ve variantě kal 25 % + pelety 75 % došlo z počátku k velkému poklesu hodnot, ale poté

docházelo již k mírným poklesům obsahu sušiny. Zaznamenané hodnoty pro jednotlivé aerobní fermentory lze vidět v Příloze 3.

#### 5.2.4 Měrná vodivost

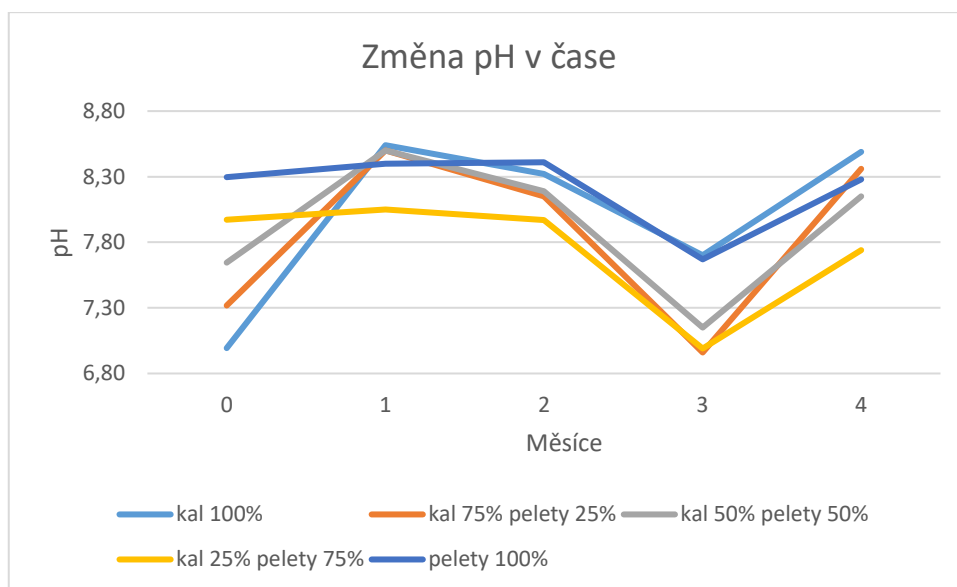
Změna měrné vodivosti u jednotlivých směsí neměla v průběhu času stejný trend. Nejprve však došlo k navýšení vodivosti u všech variant. Nejvíce konstantní průběh měla varianta kal 25 % + pelety 75 %. U varianty kal 100 % byl z počátku nejvyšší nárůst vodivosti. Poté docházelo v průběhu měsíců střídavě k nárůstům a poklesům hodnot. Měrná vodivost u varianty kal 75 % + pelety 25 % stoupala po dobu 1 měsíce. V následujících 2 měsících následoval pokles hodnot a v posledním měsíci kompostování hodnoty vzrostly. Varianta kal 50 % + pelety 50 % měla v prvním měsíci vzrůstající trend. Poté již docházelo k mírnému poklesu měrné vodivosti až do konce procesu kompostování. Varianta pelety 100 % byla příliš neměnného charakteru. V průběhu procesu docházelo k mírnému vzrůstu měrné vodivosti a v posledním měsíci k mírnému poklesu. Změnu měrné vodivosti v průběhu kompostování lze vidět na Obr. 16. Naměřené hodnoty měrné vodivosti pro jednotlivé aerobní fermentory lze vidět v Příloze 4.



Obr. 16. Změna měrné vodivosti v průběhu kompostování

### 5.2.5 pH

Změny hodnot pH v průběhu času znázorňuje Obr. 17.

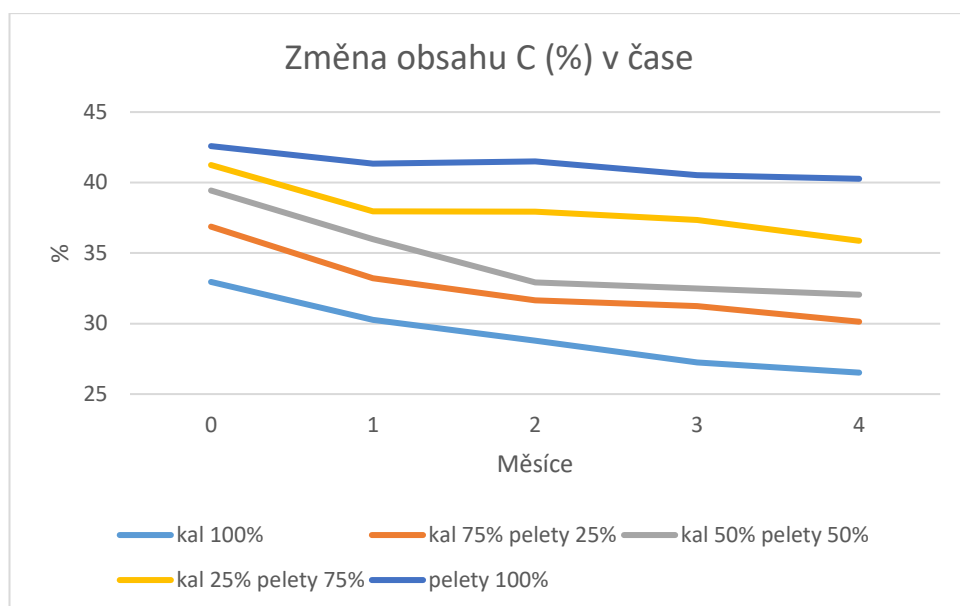


Obr. 17. Změna pH v průběhu kompostování

Na počátku procesu dosahovala nejvyšších hodnot pH varianta pelety 100 %. Se zmenšujícím se podílem pelet a narůstajícím podílem kalů klesaly hodnoty pH. V průběhu mezi počátkem procesu a prvním měsícem u variant pelety 100 % a kal 25 % + pelety 75 % nedošlo k výrazným změnám. U ostatních variant však došlo ke strmému nárůstu hodnot. Mezi prvním a druhým měsícem nedocházelo k výrazným změnám pH. Docházelo buďto k mírnému poklesu, nebo byla hodnota konstantní. K velké změně pH došlo mezi 2. a 3. měsícem, kde došlo k výraznému poklesu u všech vzorků. V poslední fázi pokusu, tj. mezi 3. a 4. měsícem došlo k prudkému nárůstu pH. Jednotlivé hodnoty pH lze vidět v Příloze 5.

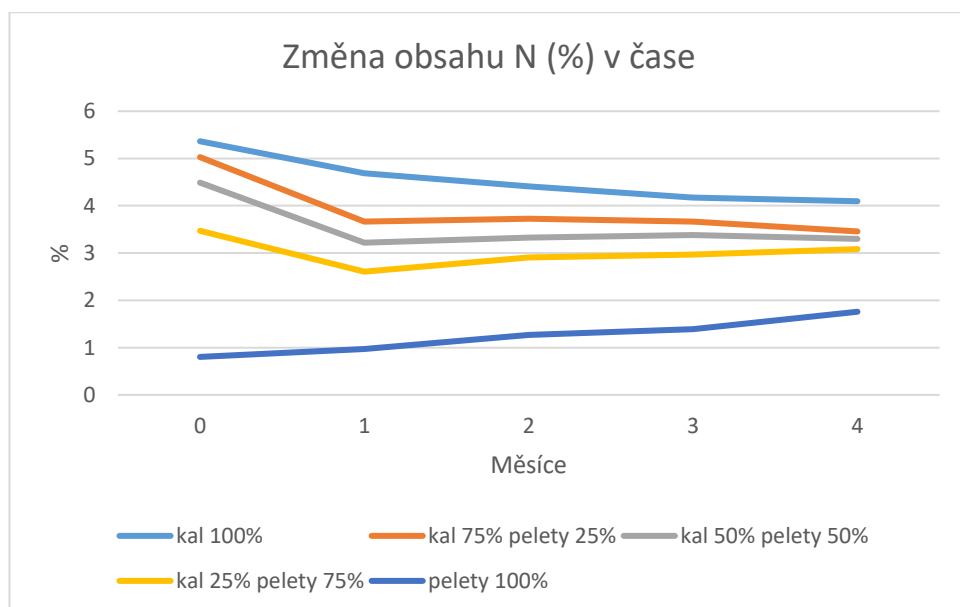
### 5.2.6 Obsah C a N, poměr C:N

Procentuální obsah C byl nejvyšší ve variantě pelety 100 % a naopak nejnižší ve variantě kal 100 %. U varianty pelety 100 % byla průměrná počáteční hodnota okolo 43 %, zatímco u kalu 100 % byla tato hodnota okolo 33 %. V průběhu procesu docházelo ke snižování obsahu C. Změny počátečních a konečných hodnot se lišily maximálně o 7,5 % C. Jednotlivé změny obsahu C lze vidět na Obr. 18. Procentuální obsahy C v jednotlivých měsících lze vidět v Příloze 6.



Obr. 18. Změna obsahu C (%) v průběhu kompostování

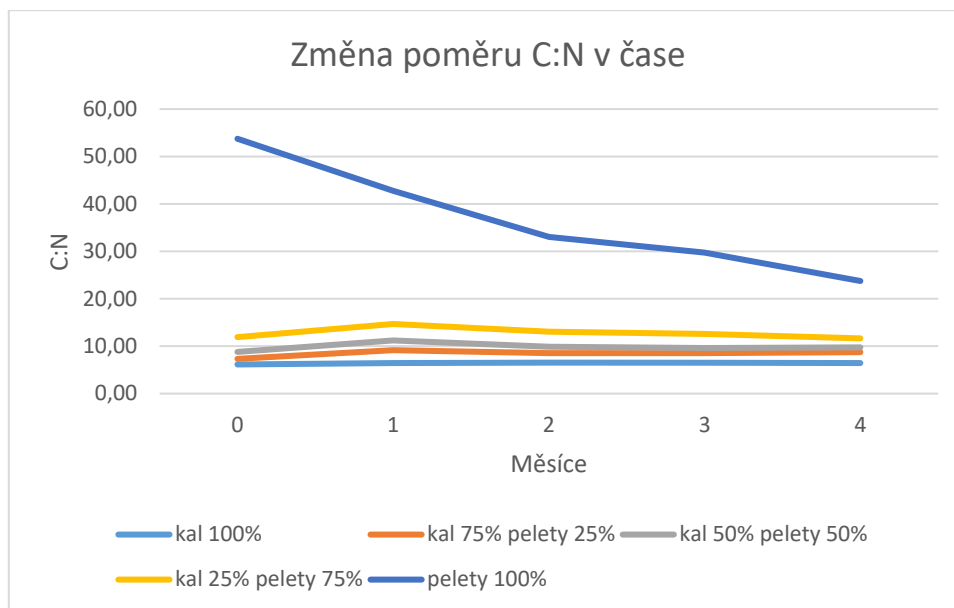
Přesně naopak bylo tomu u obsahu N. Pelety 100 % dosahovaly nejnižších hodnot obsahu N (počáteční hodnota okolo 0,8 %) a kal 100 % dosahoval hodnot nejvyšších (okolo 5,4 %). V počátku procesu kompostování došlo u všech variant kromě varianty pelety 100 % ke snížení obsahu N. Poté byl průběh pouze s mírnými nárůsty či mírnými poklesy hodnot. Mezi počátečními a konečnými hodnotami docházelo ke změně maximálně o 1,6 % N. Jednotlivé změny obsahu N lze vidět na Obr. 19. Procentuální obsahy N v jednotlivých měsících lze vidět v Příloze 7.



Obr. 19. Změna obsahu N (%) v průběhu kompostování

Nejvyšší počáteční poměr C:N měla varianta pelety 100 %, jelikož pelety obsahují menší obsah dusíku než je tomu u čistírenských kalů. Poměr C:N se snižoval se snižujícím

podílem pelet a narůstajícím podílem kalů. Nejnižší hodnotu poměru C:N měla varianta kal 100 %. Grafické vyhodnocení lze vidět na Obr. 20.



Obr. 20. Změna poměru C:N v průběhu kompostování

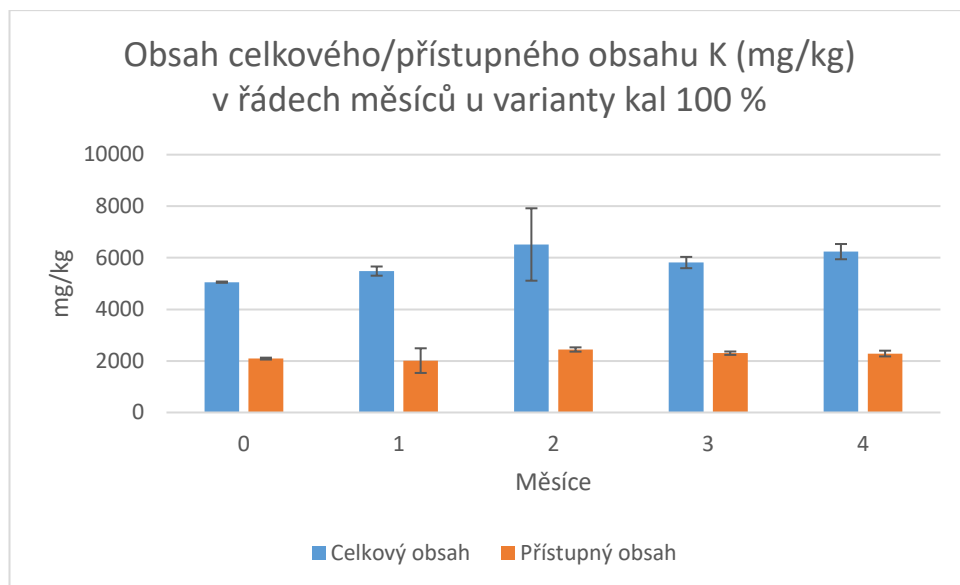
Největší změna byla zaznamenána u varianty pelety 100 %, kdy docházelo k významnému snížení poměru C:N. U variant kal 75 % + pelety 25 %, kal 50 % + pelety 25 % a kal 25 % + pelety 75 % došlo z počátku k mírnému nárůstu hodnot, ale ve zbytku času procesu docházelo již pouze k mírným změnám. Pouze u varianty kal 100 % nedošlo k téměř žádné změně a poměr C:N byl v čase konstantní. Hodnoty poměrů C:N lze vidět v Příloze 8.

## 5.2.7 Obsah prvků K, Mg, P a jejich přístupnost

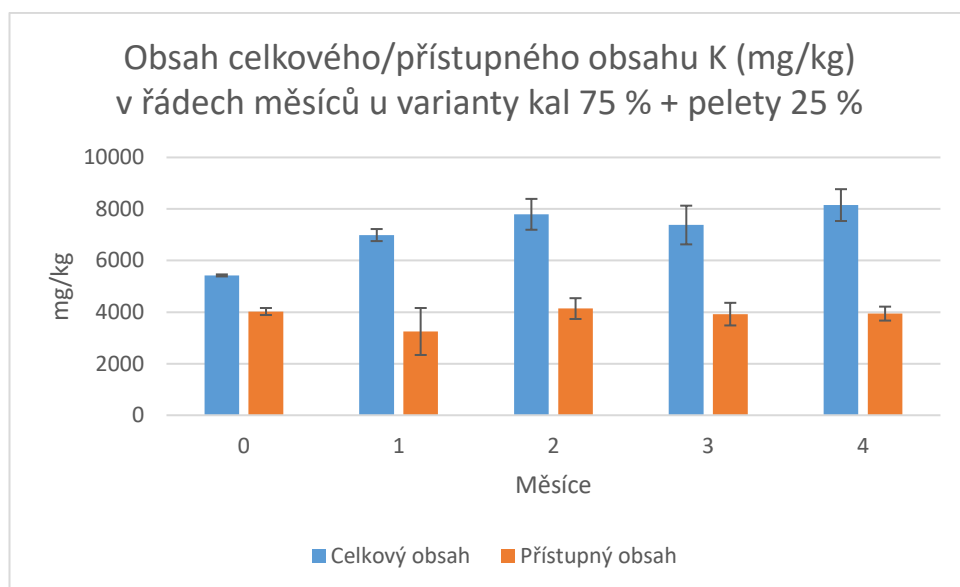
### 5.2.7.1 Obsah K

Celkový obsah draslíku měl počáteční obsah nižší, než bylo tomu u obsahu na konci procesu. Obsah celkového draslíku tedy v průběhu kompostování stoupal. Nejnižší hodnoty celkového draslíku měla varianta kal 100 %. Varianty s ubývajícím podílem kalu a rostoucím podílem pelet dosahovaly vyšších hodnot celkového obsahu K.

Stejně tomu tak bylo i u přístupného obsahu K. Lišil se pouze ve variantě kal 75 % + pelety 25 %, kdy konečná hodnota byla mírně nižší než hodnota počáteční. Na Obr. 21, Obr. 22, Obr. 23, Obr. 24 a Obr. 25. Lze vidět vedle sebe grafické porovnání variant celkového obsahu a přístupného obsahu K. Formy přístupného prvku v procentuálním poměru oproti celkovému prvku jsou vidět v Tab. 8. Naměřené hodnoty celkového a přístupného obsahu K lze vidět v Příloze 9 a Příloze 10.

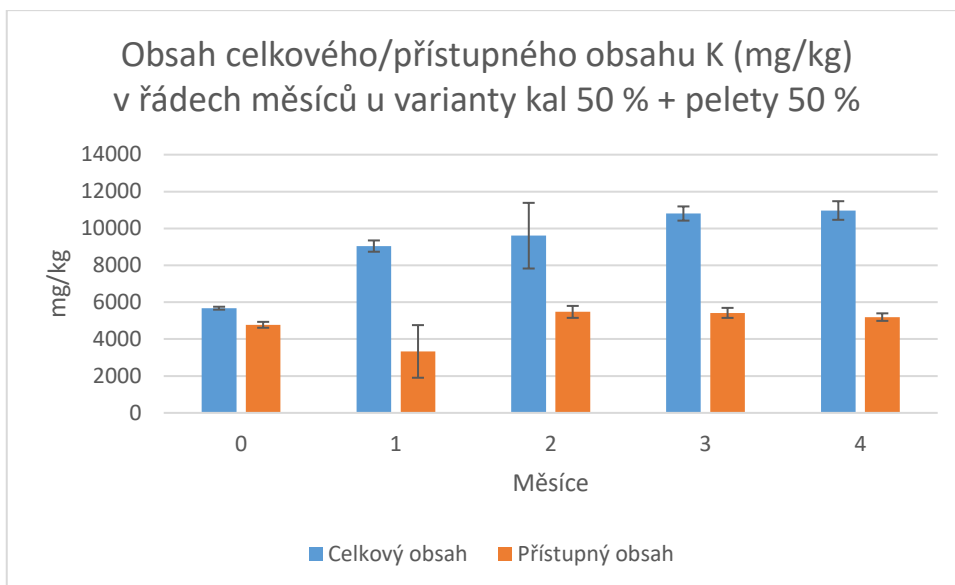


Obr. 21. Obsah celkového/přístupného obsahu K (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 100 %

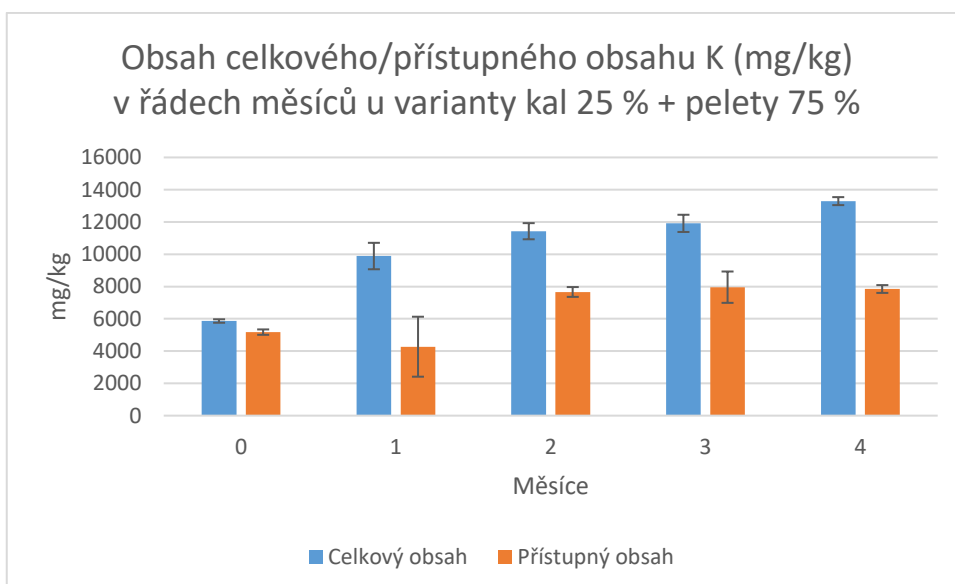


Obr. 22. Obsah celkového/přístupného obsahu K (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 75 % + pelety 25%

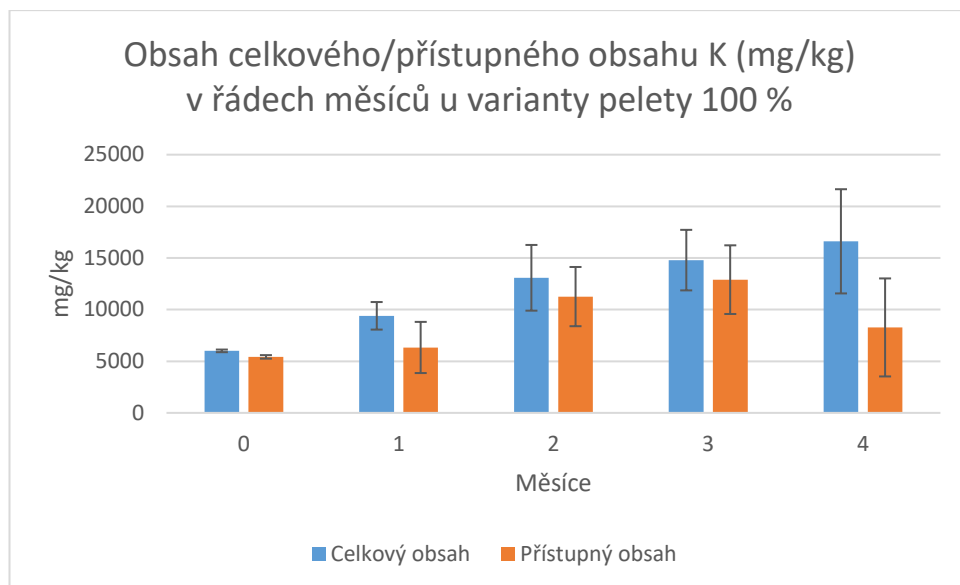




Obr. 23. Obsah celkového/přístupného obsahu K (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 50 % + pelety 50 %



Obr. 24. Obsah celkového/přístupného obsahu K (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 25 % + pelety 75 %



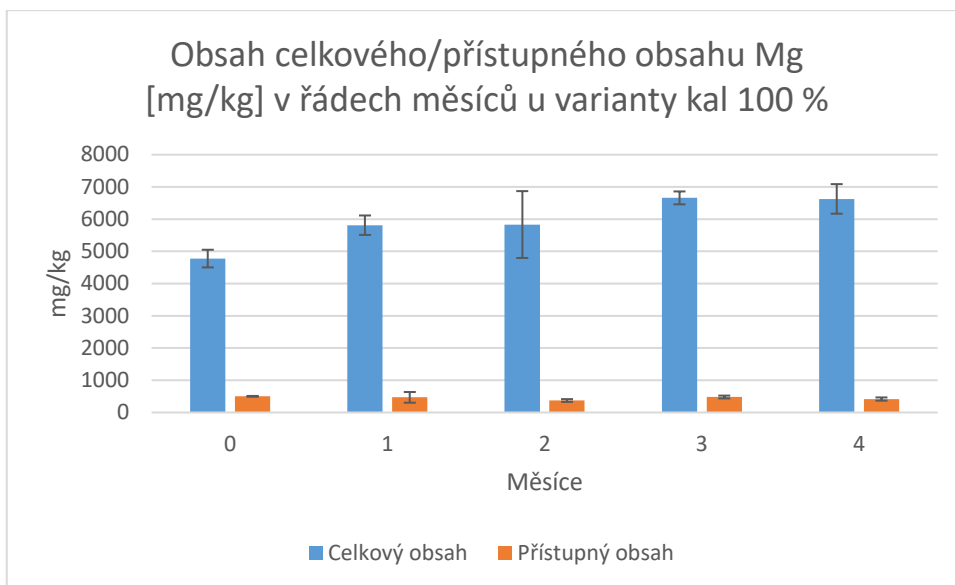
Obr. 25. Obsah celkového/přístupného obsahu K (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty pelety 100 %

Tab. 8. Forma přístupného K v procentuálním poměru oproti celkovému obsahu K

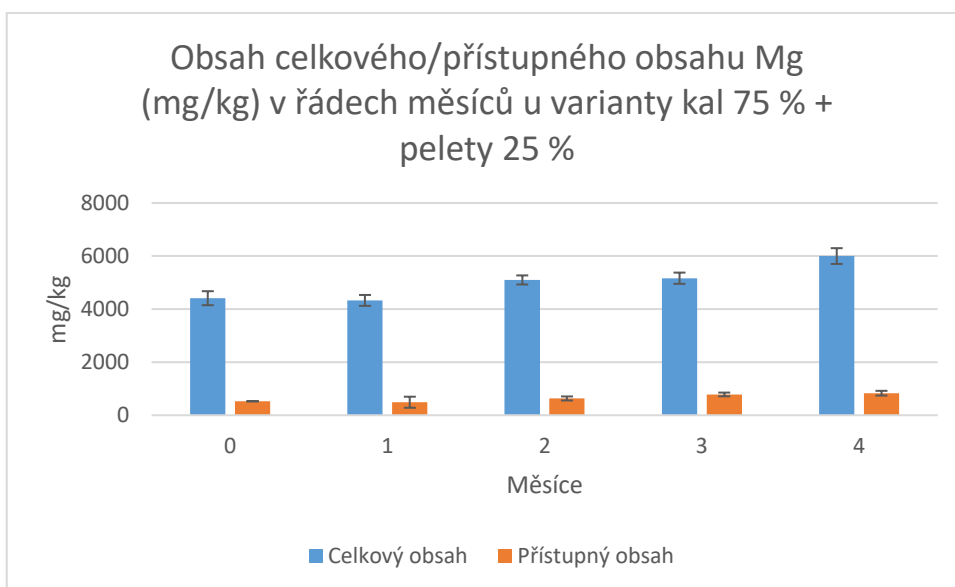
	0. měsíc (%)	1. měsíc (%)	2. měsíc (%)	3. měsíc (%)	4. měsíc (%)
<b>kal 100 %</b>	41	40	37	40	37
<b>kal 75 % + pelety 25 %</b>	74	46	53	53	48
<b>kal 50 % + pelety 50 %</b>	84	37	57	50	47
<b>kal 25 % + pelety 75 %</b>	88	43	67	67	59
<b>pelety 100 %</b>	90	67	86	87	50

#### 5.2.7.2 Obsah Mg

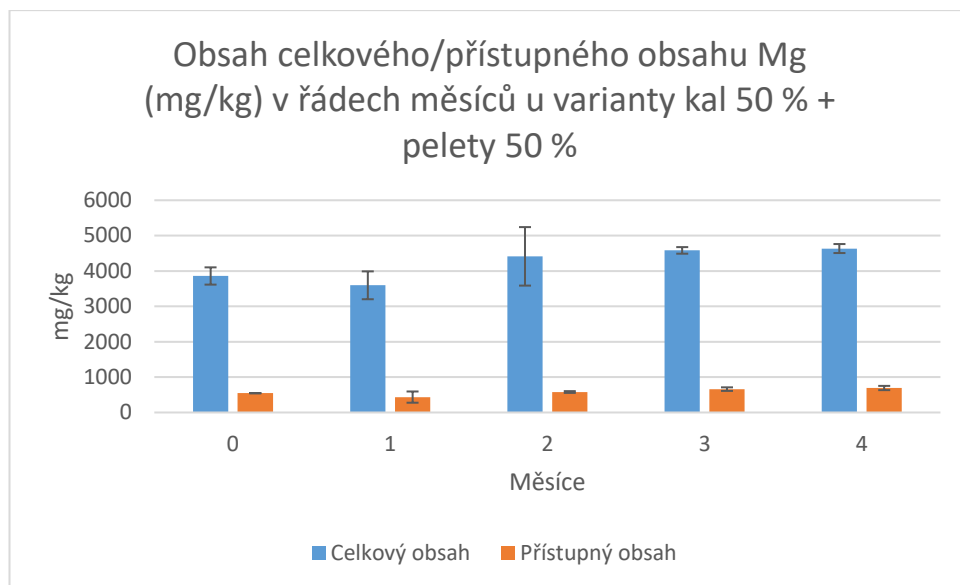
Opačně tomu bylo u celkového obsahu Mg. Tam nejnižších hodnot dosahovala varianta pelety 100 %. S ubývajícím podílem pelet a narůstajícím podílem kalů docházelo k navýšování obsahu. Nejvyšší hodnoty tedy měla varianta kal 100 %. Všechny varianty měly konečné hodnoty vyšší než hodnoty počáteční, takže docházelo k nárůstu obsahu Mg v průběhu procesu kompostování. V případě přístupného obsahu Mg došlo ke snížení konečných hodnot oproti počátečním u variant kal 100 % a pelety 100 %. V ostatních směsích došlo v průběhu kompostování k navýšení hodnot. Na Obr. 26, Obr. 27, Obr. 28, Obr. 29 a Obr. 30 lze vidět vedle sebe grafické porovnání variant celkového obsahu a přístupného obsahu Mg. Formy přístupného prvku v procentuálním poměru oproti celkovému prvku jsou vidět v Tab. 9. Naměřené hodnoty celkového a přístupného obsahu Mg lze vidět v Příloze 11 a Příloze 12.



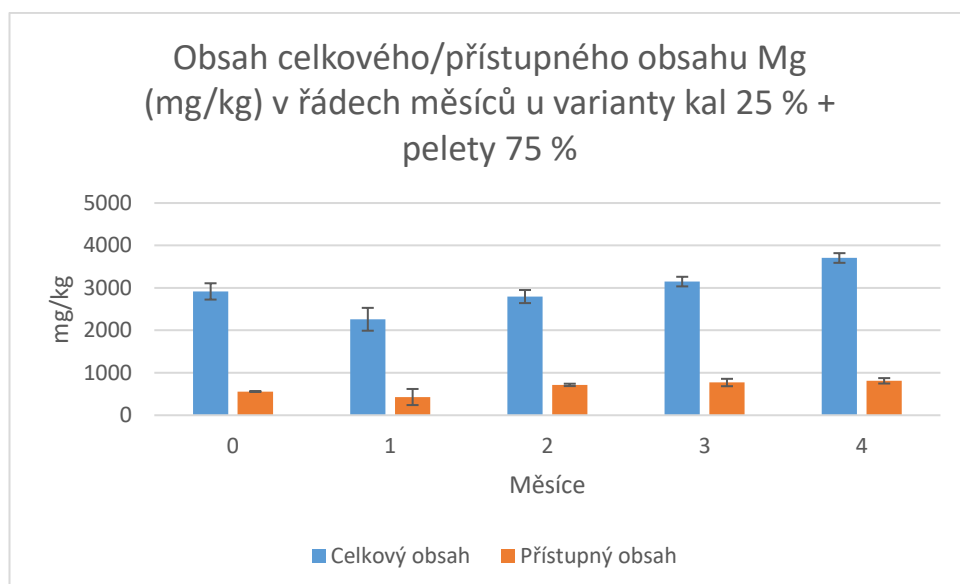
Obr. 26. Obsah celkového/přístupného obsahu Mg (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 100 %



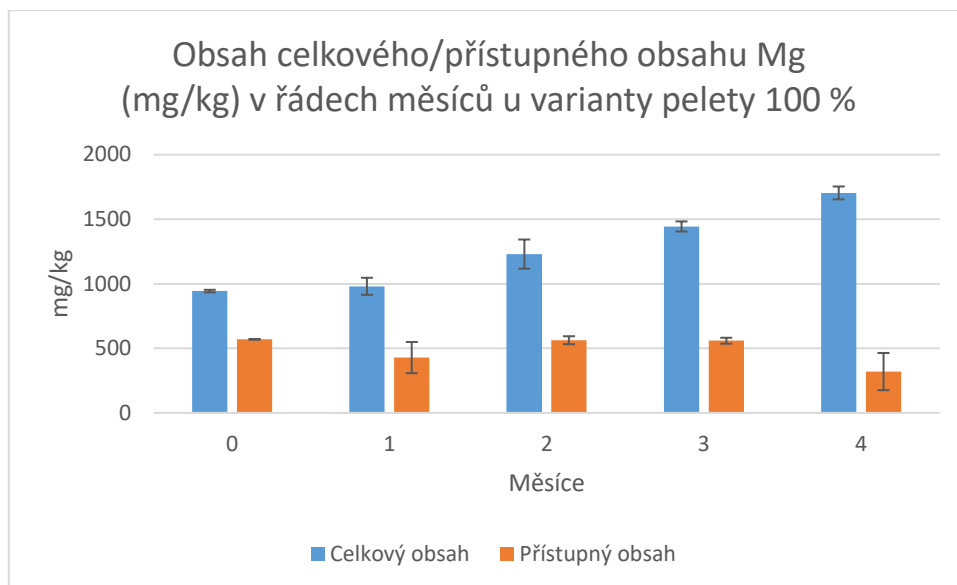
Obr. 27. Obsah celkového/přístupného obsahu Mg (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 75 % + pelety 25 %



Obr. 28. Obsah celkového/přístupného obsahu Mg (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 50 % + pelety 50 %



Obr. 29. Obsah celkového/přístupného obsahu Mg (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 25 % + pelety 75 %



Obr. 30. Obsah celkového/přístupného obsahu Mg (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal pelety 100 %

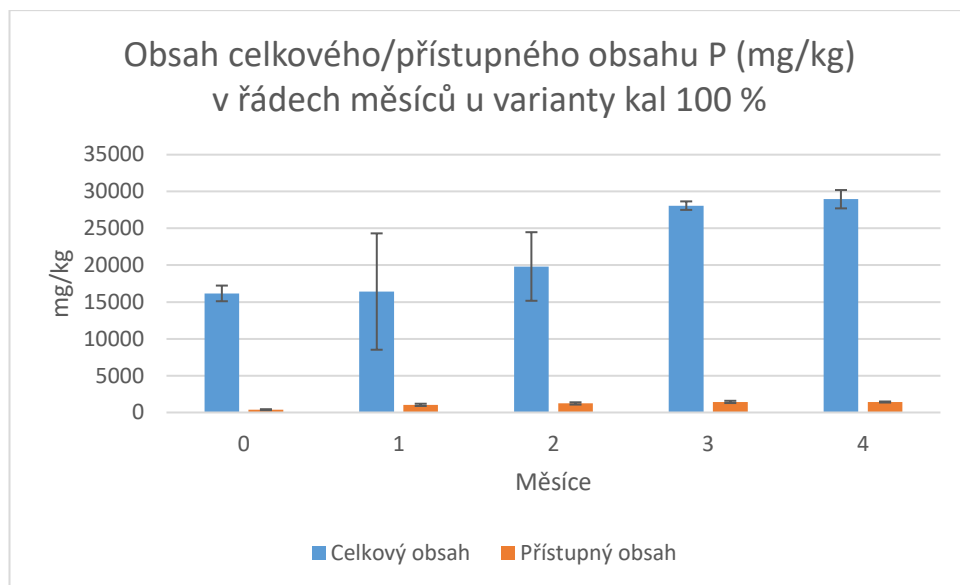
Tab. 9. Forma přístupného Mg v procentuálním poměru oproti celkovému obsahu Mg

	0. měsíc (%)	1. měsíc (%)	2. měsíc (%)	3. měsíc (%)	4. měsíc (%)
<b>kal 100 %</b>	11	8	6	7	6
<b>kal 75 % + pelety 25 %</b>	12	13	12	15	14
<b>kal 50 % + pelety 50 %</b>	14	12	13	14	15
<b>kal 25 % + pelety 75 %</b>	19	19	26	24	22
<b>pelety 100 %</b>	60	44	46	39	19

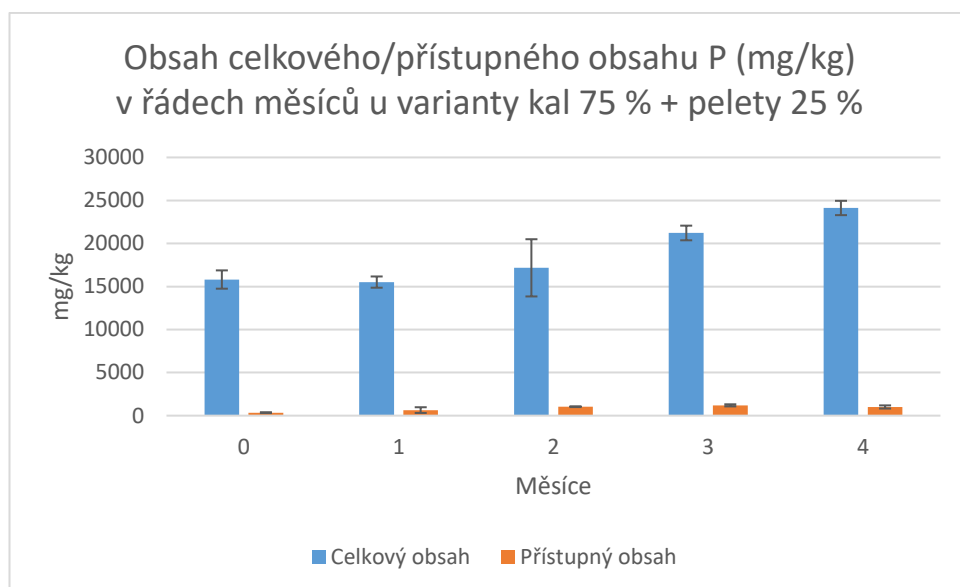
### 5.2.7.3 Obsah P

U celkového obsahu P byl průběh změn hodnot různorodý. Ve variantě kal 100 % docházelo k trvalému nárůstu hodnot. U varianty pelety 100 % docházelo v průběhu procesu pouze k nepatrným nárůstům hodnot. U variant kal 75 % + pelety 25 % a kal 25 % + pelety 75 % došlo v průběhu prvního měsíce ke snížení celkového obsahu P, ale poté hodnoty už jen vzrůstaly. U varianty kal 50 % + pelety 50 % došlo nejprve k poklesu hodnot, poté k nárůstu a následovně zase k poklesu hodnot.

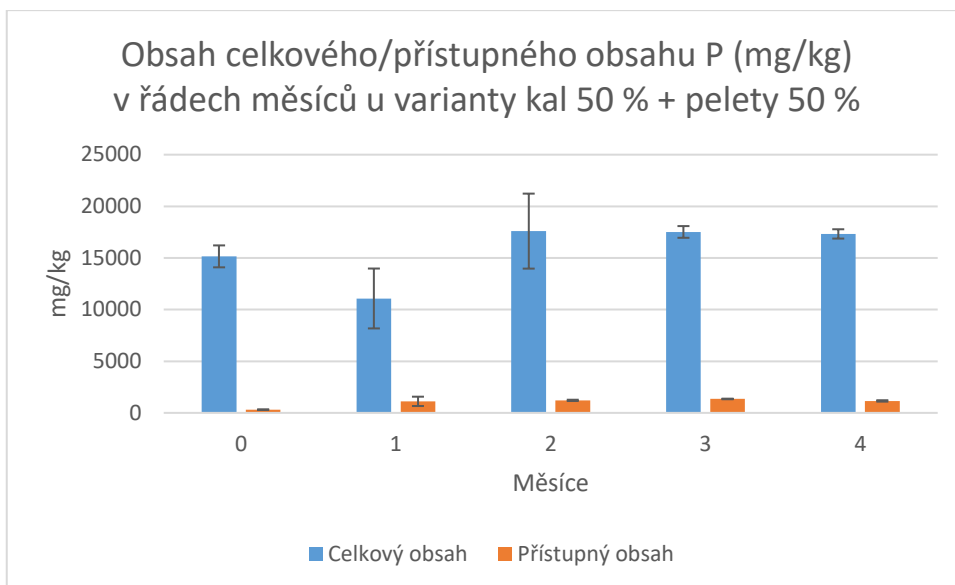
Nejnižší obsah celkového P měla varianta pelety 100 %. Nejvyšších hodnot dosahovala varianta kal 100 %. S narůstajícím podílem pelet a klesajícím podílem kalu se hodnoty celkového P snižovaly. Tak tomu bylo i v přístupném obsahu P, kde byla výjimkou pouze varianta kal 50 % + pelety 50 %. Ta dosáhla vyšších hodnot, než tomu bylo u varianty kal 75 % + pelety 25 %. Na Obr. 31, Obr. 32, Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35 lze vidět vedle sebe grafické porovnání variant celkového obsahu a přístupného obsahu P. Formy přístupného prvku v procentuálním poměru oproti celkovému prvku jsou vidět v Tab. 10. Naměřené hodnoty celkového a přístupného obsahu P lze vidět v Příloze 13 a Příloze 14.



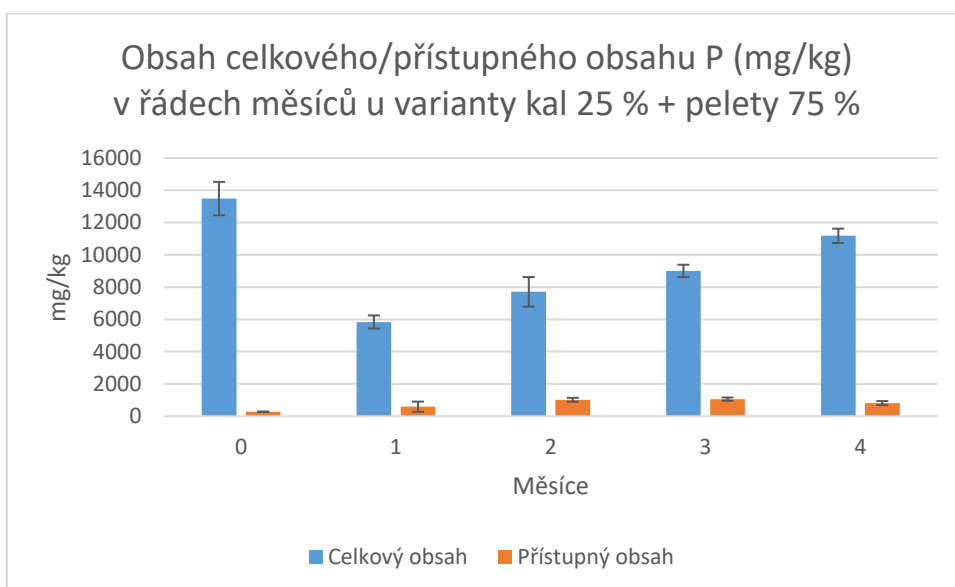
Obr. 31. Obsah celkového/přístupného obsahu P (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 100 %



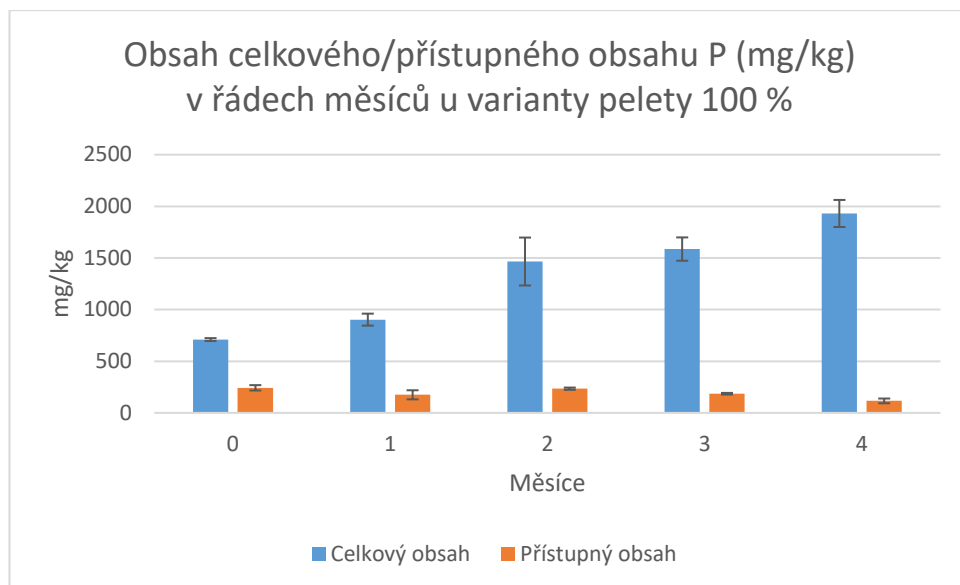
Obr. 32. Obsah celkového/přístupného obsahu P (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 75 % + pelety 25 %



Obr. 33. Obsah celkového/přístupného obsahu P (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 50 % + pelety 50 %



Obr. 34. Obsah celkového/přístupného obsahu P (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty kal 25 % + pelety 75 %



Obr. 35. Obsah celkového/přístupného obsahu P (mg/kg) v průběhu kompostování u varianty pelety 100 %

Tab. 10. Forma přístupného P v procentuálním poměru oproti celkovému obsahu P

	0. měsíc (%)	1. měsíc (%)	2. měsíc (%)	3. měsíc (%)	4. měsíc (%)
<b>kal 100 %</b>	2	6	6	5	5
<b>kal 75 % + pelety 25 %</b>	2	5	6	6	4
<b>kal 50 % + pelety 50 %</b>	2	10	7	8	7
<b>kal 25 % + pelety 75 %</b>	2	10	13	12	7
<b>pelety 100 %</b>	34	19	16	12	6



## 6 Diskuze

### 6.1 Teplota

Ze statistického vyhodnocení parametrů změny teplot vyplývá, že docházelo k nejvyššímu nárůstu teplot během počáteční fáze kompostování. Následoval pokles teplot a teploty začaly dosahovat konstantních hodnot. Lazcano et al. (2008) rozdělili průběh teplot do dvou fází. První je termofilní fáze, při které dochází k intenzivnějšímu rozkladu, a proto představuje aktivní fázi kompostování. Druhou fází je fáze zrání. Ta se vyznačuje poklesem teplot. Zbývající organické sloučeniny jsou zde degradovány pomaleji.

Hodnoty teplot jsou zaznamenávány až od 3. dne, a z toho důvodu nejsou počáteční hodnoty zaznamenány v grafickém zobrazení. Nejprve se fermentory nedaly do místnosti a nenapojily na teploměry z toho důvodu, že se případně vytvořené výluhy nalévaly zpět do kompostovaného materiálu.

U varianty s vyšším obsahem pelet, především u varianty pelety 100 %, došlo k nárůstu teploty přibližně po 1 měsíci kompostování. Při odběru vzorku po 1 měsíci bylo zjištěno, že u fermentorů s vysokým obsahem pelet nebyl žádný výluh. Naopak varianta kal 75 % + pelety 25 % obsahovala ve fermentorech vysokou vlhkost. Proto se dodala pouze polovina předpokládaného množství vody. Z toho důvodu došlo po doplnění vody u varianty s vysokým obsahem pelet k opětovnému nárůstu teplot.

Nejvyšších hodnot dosahovala varianta pelety 100 % a s odpovídajícími podíly postupně teploty klesaly až k nejnižším hodnotám, které dosáhla varianta kal 100 %. Czekala et al. (2016) kompostovali drůbeží hnůj s pšeničnou slámou a přidávali biochar. Vytvořili 3 směsi, 1. byla směs pouze drůbežního hnoje s pšeničnou slámou, ve 2. směsi bylo přidáno oproti 1. směsi 5 % biocharu a ve 3. směsi bylo přidáno 10 % biocharu. Kompostovací systém se skládal ze 3 izolovaných kompostujících reaktorů o objemu 165 l vybavených provzdušňovacím systémem, měřicími senzory teploty a analyzátozem plynů. Tento systém uzavřených nádob byl navržen tak, aby napodoboval proces kompostování v hromadách v laboratorním měřítku. Zjistili, že čím větší přídavek biocharu, jakožto porézního materiálu přidali, tím dosáhli vyšší teploty v termofilní fázi v procesu kompostování. Tak to vyšlo i v našem případě, kdy čím větší přídavek porézního materiálu (pelet) byl přidán, tím docházelo k vyšším teplotním hodnotám. Varianty s obsahem biocharu dosáhly hodnot nad 70 °C, přičemž varianta bez obsahu biocharu dosáhla hodnoty okolo 69 °C. Oproti tomu v našem pokusu dosáhla nejvyšší hodnoty 68 °C varianta pelety 100 %, ale nejnižší hodnoty 30 °C dosáhla v termofilní fázi varianta kal 100 %.

### 6.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost kompostu je měřítkem hmotnosti materiálu v daném objemu. Významně ovlivňuje pevnost, pórovitost a stlačitelnost. Určuje optimální podmínky pro mikrobiální vývoj a degradaci organické hmoty (Richard et al. 2002; Mohee & Mudhoo 2005; Bernal et al. 2009). Pórovitost a objemová hmotnost indikují odpor proudění vzduchu v kompostové matici (Agnew & Leonard 2003).

Různé studie ukazují zvyšující se trend objemové hmotnosti v průběhu kompostování. Ke zvyšování objemové hmotnosti dochází v důsledku snížení velikosti částic daného materiálu (Zhao et al. 2011). Menší přírůstek objemové hmotnosti může indikovat vyšší provzdušňování substrátu a nepřímo i pokles dostupné vodní frakce (Jain et al. 2018a).

V našem případě došlo v průběhu procesu kompostování k navýšení objemové hmotnosti ve všech variantách vyjma varianty pelety 100 %. Pelety 100 % dosahovaly v průběhu procesu menší objemové hmotnosti než kaly 100 %. Jain et al. (2018b) při studii přidali do kompostované směsi přeslenice vodní s kravským hnojem piliny. Nadměrná vlhkost substrátu měla za následek významnou tvorbu výluhů a zhroucení kompostovací směsi, což vedlo ke snížení pórovitosti. Pilinami se zabraňovala tvorba výluhů. Čím byla pórovitost kompostu nižší, tím rostla objemová hmotnost. Z toho důvodu objemová hmotnost kalů dosahovala vyšších hodnot než objemová hmotnost pelet.

Mohee & Mudhoo (2005) sledovali změnu objemové hmotnosti u dřevní štěpky s hnojem a míchanou zeleninou. Vytvořená směs obsahovala 5 kg dřevní štěpky, 10 kg drůbežního hnoje a 25 kg zeleniny. Směs byla naplněna do rotačního kompostéru vyrobeného z plastu o objemu 200 l. Byly odebrány vzorky z různých míst kompostéru, jak ze středu kompostéru, tak z jeho krajů. Objemová hustota byla stanovena vydělením celkové hmotnosti vzorku jeho objemem. V průběhu 32 dní došlo k navýšení objemové hmotnosti z 255 g/l na 628 g/l. V našem případě byla počáteční objemová hmotnost u všech variant 750 g/l. Ve variantách s obsahem kalu nad 50 % došlo po 1. měsíci k navýšení objemové hmotnosti (nejvyšší navýšení ve variantě kal 75 % + pelety 25 % na hodnotu 945 g/l). Ve variantě pelety 100 % a kal 25 % + pelety 75 % došlo po 1. měsíci ke snížení hodnoty objemové hmotnosti (u varianty pelety 100 % snížení až na 450 g/l).

Jain et al. (2019a) kompostovali kaly z odpadních vod s kravským hnojem a pilinami. Použili rotační bubnový kompostér o objemu 550 l. Pro dosažení homogenního promíchání se buben otáčel ručně pomocí páky jednou denně. Směs byla smíchána v poměru 87 kg kalu z odpadních vod, 45 kg kravského hnoje a 18 kg pilin. Objemová hustota byla vypočítána z hmotnosti a objemu směsi. Došlo k navýšení objemové hmotnosti z počáteční hodnoty 643 g/l na konečnou hodnotu 707 g/l.

Dále Jain et al. (2019b) studovali vodní hyacint s biocharu, kravským hnojem a pilinami. Vytvořili 2 směsi, 1. směs obsahovala 60 kg vodního hyacintu, 30 kg kravského hnoje, 10 kg pilin a 2. směs tvořila navíc 2,5 % hm. biocharu. Taktéž byl použit rotační bubnový kompostér o objemu 550 l. Ve variantě bez obsahu biocharu došlo po 20 dnech k nárůstu hodnot z 308 g/l na 438 g/l a ve variantě s obsahem biocharu došlo k nárůstu z 292 g/l na 434 g/l.

### 6.3 Obsah sušiny

Obsah sušiny na počátku procesu kompostování dosahoval vyšších hodnot než ke konci procesu. Uçaroğlu & Ufuk (2015) studovali kompostování kalu z čištění odpadních vod s různými směsnými činidly. Ke kompostování využily 4 aerobní reaktory z nerezové oceli o objemu 30 l. Každá směs obsahovala 60 % kalů z odpadních vod a 40 % směsného činidla. Ve všech variantách došlo ke snížení obsahu sušiny. Nejvyšší ztráty obsahu sušiny

byly zaznamenány u varianty kalu s kukuřičným klasem (29,6 %), následovně se slunečnicovými stonky (26,0 %), pšeničnou slámou (14,5 %) a nejnižší pokles obsahu sušiny byl ve variantě kalu s listy platanu (10,3 %).

V našem případě došlo k nejvýraznější změně ve variantě pelety 100 % (pokles o 7,2 %), a naopak k nejméně výrazné změně došlo ve variantě kal 100 % (pokles o 1,4 %).

Nízké hodnoty obsahu sušiny jsou způsobené tím, že vzorky potřebné k analýze byly odebrány těsně po vrácení výluhu do kompostovaného materiálu. Tím došlo k výraznému zvýšení vlhkosti, a tím se snížilo procento obsahu sušiny. Předpokládá se, že mezi jednotlivými odběry byl obsah sušiny v kompostovaném materiálu vyšší. Při odběru po 2 měsících bylo zjištěno, že došlo k rozkladu slaměného materiálu, čímž se uvolnila dříve absorbovaná voda.

## 6.4 Měrná vodivost

Hodnota měrné vodivosti kompostu odráží rozpustný obsah solí v kompostu. Má velký význam v zemědělství, protože může být preventivním parametrem pro klíčení semen a růst rostlin. Hodnota měrné vodivosti může záviset zejména na stupni rozkladu organických sloučenin, což vede k akumulaci různých solí rozpustných ve vodě (Manios 2004; Nafez et al. 2015). Banegas et al. (2007) uvedli, že měrná vodivost, která je vyšší než 8 mS/cm má negativní vliv na půdní mikrobiální populace a jejich aktivitu.

Počáteční hodnota EC byla u všech variant totožná. Nejvyššího nárůstu dosáhla varianta kal 100 %, kde z počáteční hodnoty 680  $\mu\text{S/cm}$  stoupla hodnota EC na konečnou hodnotu 2137  $\mu\text{S/cm}$ . Nejnižší hodnoty EC dosáhla varianta kal 25 % + pelety 75 %. Tato varianta byla nejvíce konstantní a počáteční a konečná hodnota vodivosti se nezměnila. Další variantou s nevýraznou změnou byla varianta pelety 100 %. Tam došlo k nárůstu z 680  $\mu\text{S/cm}$  na 958  $\mu\text{S/cm}$ . Varianty kal 75 % + pelety 25 % a kal 50 % + pelety 50 % měly počáteční hodnoty 680  $\mu\text{S/cm}$  a konečné hodnoty se též moc nelišily – 1296 a 1202  $\mu\text{S/cm}$ . Rozdílný byl však průběh změn.

Banegas et al. (2007) kompostovali kal s pilinami. Kompostování probíhalo v hromadách o objemu 3  $\text{m}^3$ . Použili dva objemové poměry kal:piliny 1:1 a kal:piliny 1:3. Pro měření měrné vodivosti byl připraven výluh v poměru 1:5 w/v. Nižší počáteční hodnoty dosáhla varianta s poměrem 1:3 – 1,23 S/m. Během procesu kompostování došlo k nárůstu hodnoty na 2,22 S/m. Také u varianty 1:1 došlo k nárůstu EC. Z počáteční hodnoty 2,02 S/m vzrostla hodnota na 3,20 S/m. U varianty 1:1 tedy došlo k vyššímu nárůstu než u varianty 1:3. V našem případě byla u všech variant počáteční měrná vodivost výrazně nižší, dosahovala hodnoty 0,068 S/m. U našeho pokusu však nedošlo vždy k navýšení měrné vodivosti v průběhu procesu.

Nafez et al. (2015) kompostovali kaly z odpadních vod (SS) se zeleným rostlinným odpadem (GW) a suché listy s odpady z prořezávání (PW). Kompostování probíhalo na hromadách. Použili objemové poměry SS:GW 1:2 a 1:3. Stejně poměry použili i pro variantu SS:PW. Pro měření měrné vodivosti byl připraven výluh v poměru 1:5 w/v. V této studii docházelo naopak u všech variant ke snížení měrné vodivosti. Největší pokles EC zaznamenala varianta SS:PW 1:2, kdy počáteční hodnota 9,35 mS/cm klesla na hodnotu 2,78

mS/cm. Varianta SS:PW 1:3 poklesla z hodnoty 5,31 mS/cm na 1,2 mS/cm; SS:GW 1:2 poklesla z 8,14 mS/cm na 3,86 mS/cm a varianta SS:GW 1:3 poklesla z hodnoty 6,16 mS/cm na 2,19 mS/cm. Počáteční obsah rozpustné soli ve směsích byl velmi vysoký, zejména u kalu z odpadních vod. V našem případě byly počáteční hodnoty výrazně nižší. Výsledné hodnoty však nebyly již tolik rozdílné, blížily se našim konečným hodnotám s vysokým poměrem kalu ve směsi.

## 6.5 pH

Hodnoty pH kompostovaného materiálu se pohybovaly v rozmezí od 6,99 do 8,54. Podle Riche & Bhartiho (2015) pH 6,70-9,00 podporuje dobrou mikrobiální aktivitu v průběhu procesu kompostování.

Nejvyšších hodnot pH dosáhla varianta kal 100 %. Počáteční hodnota pH byla 8,54 a konečná 8,49. Nejnižší hodnoty pH byly ve variantě kal 25 % + pelety 75 %. Počáteční hodnota byla 8,05 a konečná hodnota byla 7,74.

Z počátku bylo pH zásaditého charakteru, postupně se ale hodnoty snižovaly k neutrálním hodnotám. V závěru procesu došlo k nárůstu opět do zásaditého prostředí. Dle Ilyasse et al. (2020) dochází ke snížení pH z důvodu akumulace organických kyselin. Podle Nolana et al. (2011) může uvolňování  $H^+$  během nitrifikace organických látek také způsobit okyselení během kompostování. Rychlý nárůst hodnot je pravděpodobně způsoben rozkladem organických kyselin (Hachicha et al. 2009).

Himanen & Hänninen (2011) sledovali měnící se hodnoty pH při kompostování čistírenských kalů, jak aerobních, tak anaerobních. Hodnoty během prvního týdne dosahovaly hodnot kolem 7,5. Tyto hodnoty byly 6 týdnů konstantní, a poté začalo docházet k poklesu pH k hodnotám 3,5 až do 16. týdne. Následně začalo docházet k nárůstu pH k hodnotám okolo 5-6. Takto nízké hodnoty pH v průběhu celé studie přisuzují tomu, že byla použita rašelina jako směsné činidlo (kal 50 % obj. + rašelina 50 % obj.), které je kyselé povahy a má vysokou pufrovací schopnost zabránit zvýšení pH. Slaměné pelety mají oproti rašelině vyšší pH, a proto jsou mezi těmito dvěma studiemi rozdílné hodnoty pH.

## 6.6 Obsah C a N, poměr C:N

Poměr C:N je jedním z důležitých parametrů ovlivňujících proces kompostování, jakož i vlastnosti koncového produktu (Zhu 2007; Chang & Hsu 2008) Optimální poměr pro kompostování je obvykle považován poměr mezi 25-30. Nedávná studie však ukázala, že lze provádět účinně kompostování i při poměrech nižších, než je 15. Při porovnání kompostování prasečího hnoje s pilinami v počátečním poměru C:N 30 a C:N 15 se došlo k závěru, že kompost s vyšším počátečním C:N dozrál dříve, než tomu bylo u varianty C:N 15. Kompostování směsi s C:N 15 tedy vyžaduje delší čas, aby vznikl zralý kompost. Při kompostování s nízkými poměry C:N je poté snížen požadavek směsného činidla pro úpravu počátečního poměru C:N směsi (Huang et al. 2004; Zhu 2007).

Slaměné pelety obsahovaly vyšší obsah C a nižší obsah N, než tomu bylo u čistírenského kalu. Proto byl poměr C:N u kalu velmi nízký, dosáhl hodnoty 6,14. Poměr C:N u pelet byl naopak vysoký, dosáhl hodnoty 53,67. Z toho důvodu byly tyto suroviny smíchány, aby se dosáhlo vhodnějšího poměru C:N pro kompostování. Huang et al. (2004) vybrali ze stejného důvodu, jako je vysoký obsah C a struktura, která poskytuje dostatečnou pórovitost, jako směsné činidlo piliny. Vytvořili dvě směsi prasečího hnoje s pilinami, první směs měla počáteční hodnotu C:N 30 (hnůj:piliny 3:2 w/w) a druhá směs měla počáteční hodnotu C:N 15 (hnůj:piliny 4:1 w/w). Proces kompostování probíhal 63 dní. V průběhu těchto 63 dní došlo k poklesu počátečních poměrů C:N u první varianty z 30 na 17 a u druhé varianty z 15 na 9.

Nejvyšších hodnot C:N dosáhla varianta pelety 100 %, a naopak nejnižších hodnot dosáhla varianta kal 100 %. Během prvního měsíce došlo ve všech variantách kromě pelety 100 % k nárůstu hodnot C:N. Poté už poměr C:N pouze lehce klesal, nebo byl konstantní. Největší změnu zaznamenala varianta pelety 100 %, kde v průběhu procesu docházelo pouze ke snižování hodnot. Z počáteční hodnoty C:N 53,74 klesla hodnota ke konci procesu kompostování na hodnotu 23,75. To bylo způsobeno tím, že v jediné této variantě došlo v průběhu procesu k navýšení obsahu N, čímž se významně snížil poměr C:N. V ostatních směsích došlo ke ztrátám N, patrně volatilizací. U všech směsí docházelo v průběhu procesu ke snižování obsahu C.

Yañez et al. (2009) kompostovali čistírenský kal s akácií. Samotná akácie měla stejně jako v našem případě vyšší poměr C:N než měl kal. Došlo taktéž k nejvyššímu poklesu u varianty akácie 100 %. Po 60 dnech kompostování klesl poměr C:N z hodnoty 41,7 na hodnotu 35,0. Ve směsích s kalem již nebyly změny tak markantní. Po 60 dnech došlo ve variantě akácie:kal 1:1 k poklesu poměru C:N z 14,7 na 10,7. U poměru akácie:kal 1:2 došlo k poklesu z 12,3 na hodnotu 10,0 a u varianty akácie:kal 1:3 poklesla hodnota poměru C:N z 10,0 na 8,0. Po 30 dnech kompostování bylo dosaženo konstantních hodnot poměru C:N pro všechny směsi, což značí stabilitu kompostu.

Ševik et al. (2018) kompostovali kaly z odpadních vod, kravský hnůj a rajčatové stonky. Vytvořili několik směsí s různými poměry surovin. V jednom případě došlo k navýšení poměru C:N a to ve variantě s nejnižším počátečním poměrem C:N (počáteční hodnota 12, konečná hodnota 17), kde byl zastoupen pouze kal z odpadních vod s rajčatovými stonky, protože došlo k vyšší ztrátě dusíku než byla ztráta uhlíku. V ostatních variantách došlo ke snížení poměru (počáteční hodnoty C:N 18-22, konečné hodnoty C:N 14-21).

Ačkoliv je snížení poměru C:N považováno za ukazatel stability, není tento parametr dobrým ukazatelem, protože suroviny kompostu jsou značně variabilní (Chowdhury et al. 2013).

## 6.7 Obsah K, Mg a P

Khalil et al. (2011) kompostovali surový kal z ČOV s kompostem z kalu v poměru 3:1 v/v. Směs připravili do 4 hromad. Podmínky byly pro všechny hromady stejné, vyjma faktoru provzdušňování. To probíhalo po 7 (W1), 10 (W2), 15 (W3) dnech a poslední hromada (W4) byla provzdušňována podle dosažené teploty, která musela být v rozmezí 55-65 °C. Teploty u

W4 dosahovaly požadovaných hodnot častěji než 1x za týden, takže provzdušňování u této varianty bylo nejčastější. Vzorky byly odebírány z hromad každý týden. Odebraly se z deseti různých míst hromady v hloubce 70-80 cm a následně se promíchaly. Takto se odebral vzorek v každé hromadě. Kompostování probíhalo 16 týdnů. Po 16 týdnech zaznamenali procentuální změnu celkových obsahů prvků K a P. Všechny konečné hodnoty celkového obsahu K a P se oproti počátečním hodnotám navýšily. Nejnižší procentuální nárůsty měla varianta W1, kde došlo k navýšení K o 14 % a P o 30 %. Následovala varianta W2, kde hodnoty K narostly o 15 % a P o 37 %. U varianty W3 došlo k nárůstu celkového obsahu K o 18 % a P o 40 %. Nejvyšších nárůstů dosáhla varianta W4, kde se zvýšil obsah K o 20 % a P o 42 %. I v našem případě došlo téměř ve všech případech (vyjma celkového obsahu P ve variantě kal 25 % + pelety 75 %) o navýšení hodnot. Ve variantě kal 100 % se navýšil celkový obsah K o 23 % a P o 79 %. U varianty kal 75 % + pelety 25 % se navýšil obsah K o 50 % a P o 53 %. Varianta kal 50 % + pelety 50 % dosáhla nárůstu obsahu K o 93 % a P o 14 %. Ve variantě kal 25 % + pelety 75 % se navýšil obsah K o 127 % a obsah P poklesl o 17 %. V poslední variantě pelety 100 % došlo k navýšení obsahu K o 177 % a P o 172 %.

Charest & Beauchamp (2002) kompostovali odbarvený papírový kal (DPS) s drůbežím hnojem (PM) a podestýlkou od kuřat (CFL) ve 3 různých provedeních obsahu dusíku. Vytvořili 3 hromady, první (W1) a druhá hromada (W2) měly stejné složení – 80 % DPS + 10 % PM + 10 % CFL a třetí hromada (W3) obsahovala 60 % DFS + 20 % PM + 20 % CFL. Proces kompostování probíhal po dobu 24 týdnů. Hromady byly provzdušňovány každé 4 týdny a ihned po provzdušnění směsí se odebíraly vzorky. Ačkoliv by hromady W1 a W2 měly dosahovat stejných hodnot, nebylo tomu tak. Bylo předpokládáno, že celkový obsah dusíku bude v jednotlivých hromadách W1, W2, W3 0,6 %, 0,6 % a 1 %, ale nebylo tomu tak. Ve skutečnosti byly hodnoty v hromadách 0,6 %, 0,7 % a 0,7 %. Tím bylo dokázáno, že přísady PM a CFL nejsou v obsahu dusíku konstantní. Celkový obsah N v hromadě W3 byl v 8. a 16. týdnu kompostování záměrně navýšen přidáním močoviny na 0,9 % obsahu dusíku. U jednotlivých hromad sledovali změny počátečních a konečných hodnot celkových obsahů K, Mg a P. U hromady W1 došlo k navýšení obsahu K z 3500 na 3800 mg/kg, Mg z 1300 na 1700 mg/kg a P z 2400 na 3300 mg/kg. Naopak tomu bylo u hromady W2, kde k navyšování hodnot nedocházelo. Celkový obsah K se snížil z 4000 na 3000 mg/kg, obsah Mg zůstal konstantní na hodnotě 1600 mg/kg a obsah P poklesl z hodnoty 3700 na 2600 mg/kg. V hromadě W3 došlo k nárůstům hodnot. Obsah K se navýšil z 3100 na 4000 mg/kg, obsah Mg z 1000 na 1900 mg/kg a obsah P z 1600 na 3700 mg/kg. V našem případě došlo k navýšení celkových obsahů K, Mg i P, výjimkou byla pouze varianta kal 25 % + pelety 75 % u celkového obsahu P. Naše počáteční hodnoty dosahovaly vyšších hodnot, především celkového obsahu P (vyjma celkových obsahů Mg a P u varianty pelety 100 %). Rozdílné hodnoty obsahů jsou výsledkem odlišných kompostovaných směsí, které mají výrazně odlišné hodnoty vstupních surovin.

## 7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zhodnotit změny vlastností během kompostování čistírenského kalu společně se slaměnými peletami.

**Hypotéza 1:** Během prvního měsíce dojde k výraznějším změnám fyzikálních a chemických vlastností než během každého následujícího měsíce.

- Tato hypotéza byla potvrzena u změny teplot. Během prvního měsíce došlo k nejvýraznějším změnám, jelikož probíhala termofilní fáze kompostování.
- U změny objemové hmotnosti se tato hypotéza nepotvrdila. Změny hodnot nebyly během prvního měsíce kompostování nikterak odlišné od ostatních měsíců.
- V případě změny obsahu sušiny došlo k částečnému potvrzení hypotézy. Ve všech variantách vyjma varianty pelety 100 % došlo k nejvýraznějším změnám v průběhu prvního měsíce.
- Hypotéza byla potvrzena u měrné vodivosti. U všech variant došlo během prvního měsíce k nejvyšším změnám hodnot.
- U parametru pH došlo pouze k částečnému potvrzení hypotézy. U variant s vysokým obsahem kalu došlo k výraznému nárůstu hodnot během prvního měsíce. U variant s převládajícím obsahem pelet však nikoliv. Během 3. měsíce došlo k výraznému poklesu u všech variant, což je pravděpodobně zapříčiněno akumulací organických kyselin.
- Hypotéza u změny obsahu C se nepotvrdila. U všech variant nedocházelo v průběhu měsíců k výraznějším změnám.
- Výrazné změny během prvního měsíce byly zaznamenány při změně obsahu N. Tam došlo vyjma varianty pelety 100 % během prvního měsíce k výraznému poklesu hodnot. Varianta pelety 100 % v průběhu měsíců stoupala konstantně.
- Výrazná změna obsahu N souvisela s výraznou změnou poměru C:N. Pokles poměru C:N byl během prvního měsíce nejvýraznější ve všech variantách vyjma varianty pelety 100 %.
- Hypotéza u celkového obsahu K se potvrdila pouze částečně. U variant kal 75 % + pelety 25 %, kal 50 % + pelety 50 % a kal 25 % + pelety 75 % došlo k nejvýraznější změně během prvního měsíce. U zbytku variant však nikoliv.
- Tato hypotéza byla vyvrácena u obsahu přístupné formy K. Tam u žádné varianty nedošlo během prvního měsíce k výrazné změně.
- Hypotéza u celkového obsahu Mg se spíše nepotvrdila. K výrazným změnám došlo pouze ve variantách kal 100 % a kal 25 % + pelety 75 %.
- U přístupného obsahu Mg byla hypotéza zamítnuta. Nedošlo zde k žádné výrazné změně hodnot.
- I u celkového obsahu P byla hypotéza zamítnuta, zde došlo k nejvýraznější změně pouze u jedné varianty – kal 25 % + pelety 75 %.

- Hypotéza u přístupného obsahu P byla částečně potvrzena. U variant kal 100 %, kal 75 % + pelety 25 % a kal 50 % + pelety 50 % došlo k nejméně výrazným změnám během prvního měsíce, u zbylých dvou variant však nikoliv.

**Hypotéza 2:** Přídavek slaměných pelet bude mít pozitivní vliv na efektivitu kompostování.

- Tato hypotéza byla potvrzena u změny teplot. S narůstajícím poměrem pelet docházelo během termofilní fáze k vyšším hodnotám teplot, což má za následek eliminaci patogenů.
- Nejvyšších nárůstů objemové hmotnosti dosáhly varianty kal 50 % + pelety 50 % a kal 75 % + pelety 25 %, z čehož vycházelo, že přídavek slaměných pelet do 50 % obsahu směsi měl pozitivní vliv na efektivitu kompostování.
- Obsah sušiny dosahoval vyšších hodnot u variant s rostoucím poměrem pelet a tím se tato hypotéza potvrdila.
- Měrná vodivost dosahovala nižších konečných hodnot s vyšším poměrem pelet, čímž docházelo k nižšímu obsahu solí v kompostu, tudíž došlo taktéž k potvrzení hypotézy.
- V případě pH měly slaměné pelety pozitivní vliv na efektivitu kompostování. Ve variantě kal 25 % + pelety 75 % dosáhly hodnoty neoptimálnějších hodnot pH.
- Hypotéza se taktéž potvrdila u obsahu C a N a jejich vzájemném poměru. S vyšším přídavkem slaměných pelet docházelo k navýšení poměru C:N a k přiblížení se k ideálnímu počátečnímu poměru pro kompostování.
- Slaměné pelety dosahovaly vyšších hodnot celkového obsahu draslíku a tím dosáhly pozitivního vlivu na kompost. U obsahu hořčíku a fosforu však nikoliv.
- Pozitivní vliv měl přídavek slaměných pelet na přístupný obsah K a Mg. U fosforu tomu tak nebylo.



## 8 Literatura

- Agnew J. M., Leonard J. J. 2003. The Physical Properties of Compost. *Compost Science and Utilization* **11**: 238-264.
- Ammari T. G., Al-Omari Q., Abbassi B. E. 2012. Composting sewage sludge amended with different sawdust proportions and textures and organic waste of food industry: assessment of quality. *Environmental Technology* **33**: 1641-1649.
- Antil R. S., Raj D., Narwal R. P. 2013. Evaluation of Maturity and Stability Parameters of Composts Prepared from Organic Wastes and Their Response to Wheat. *Waste Biomass* **4**: 95-104.
- Azim K., Soudi B., Boukhari S. 2018. Composting parameters and compost quality: a literature review, *Organic Agriculture* **8**: 141–158.
- Banegas V., Moreno J. L., Moreno J. I., García C., León G., Hernández T. 2007. Composting anaerobic and aerobic sewage sludges using two proportions of sawdust. *Waste Management* **27**: 1317-1327.
- Beck-Friis B., Smårs S., Jönsson H., Kirchmann H. 2001. SE—Structures and Environment: Gaseous Emissions of Carbon Dioxide, Ammonia and Nitrous Oxide from Organic Household Waste in a Compost Reactor under Different Temperature Regimes. *Journal of Agricultural Engineering Research* **78**: 423-430.
- Bernal M. P., Sommer S. G., Chadwick D., Qing C., Guoxue L., Michel F. C. 2017. Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits, *Advances in Agronomy*. Academic Press **144**: 143-233.
- Bernal M. P., Alburquerque J. A., Moral R. 2009. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. *Bioresource Technology* **100**: 5444-5453.
- Bertoldi M., Vallini G., Pera A. 1983. The biology of composting: A review. *Waste Management and Research* **1**: 157-176.
- Bożym, M., Siemiątkowski, G. 2018. Characterization of composted sewage sludge during the maturation process: a pilot scale study. *Environmental Science and Pollution Research* **25**: 34332-34342.
- Bruce A. M., Davis R. D. 1988. Sewage sludge disposal: current and future options. *Water Science and Technology*. **21**: 1113-1128.

Castaldi P., Alberti G., Merella R., Melis P. 2005. Study of the organic matter evolution during municipal solid waste composting aimed at identifying suitable parameters for the evaluation of compost maturity. *Waste Management* **25**: 209-213.

Czekala W., Malińska K., Cáceres R., Janczak D., Dach J., Lewicki A. 2016. Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar – The effect of biochar on temperature and C-CO<sub>2</sub> emission. *Bioresource Technology* **200**: 921-927.

Český statistický úřad. 2020. Vodovody, kanalizace a vodní toky - 2019. Available from: <https://www.czso.cz/csu/czso/vodovody-kanalizace-a-vodni-toky-2019> (accessed March 2021).

Dumontet S., Dinel H., Baloda S. 1999. Pathogen Reduction in Sewage Sludge by Composting and Other Biological Treatments: A Review. *Biological Agriculture and Horticulture* **16**: 409-430.

European Commission. 2020. Výroba a likvidace kalů z odpadních vod. Available from: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV\\_WW\\_SPD/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WW_SPD/default/table?lang=en) (accessed January 2021).

Filip J. 2002. Odpadové hospodářství. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno.

Gajalakshmi S., Abbasi S. A. 2008. Solid Waste Management by Composting: State of the Art. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **38**: 311-400.

Giglotti G., Valentini F., Erriquens F. G., Said-Pullicino D. 2005. Evaluating the efficiency of the composting process: a comparison of different parameters. *Geophysical Research Abstracts* **7**: article 09606.

Gondek K., Mierzwa-Hersztek M., Kopeć M. 2018. Mobility of heavy metals in sandy soil after application of composts produced from maize straw, sewage sludge and biochar. *Journal of Environmental Management* **210**: 87-95.

Guardia A., Petiot C., Rogeau D. 2008. Influence of aeration rate and biodegradability fractionation on composting kinetics. *Waste Management* **28**: 73-84.

Hachicha S., Sellami F., Cegarra J., Hachicha R., Drira N., Medhioub K., Ammar E. 2009. Biological activity during co-composting of sludge issued from the OMW evaporation ponds with poultry manure—Physico-chemical characterization of the processed organic matter. *Journal of Hazardous Materials* **162**: 402-409.

Hassen A., Belguith K., Jedidi N., Cherif A., Cherif M., Boudabous A. 2001. Microbial characterization during composting of municipal solid waste. *Bioresource Technology* **80**: 217-225.

- Himanen M., Hänninen K. 2011. Composting of bio-waste, aerobic and anaerobic sludges – Effect of feedstock on the process and quality of compost. *Bioresource Technology* **102**: 2842-2852.
- Huang G. F., Wong J. W. C., Wu Q. T., Nagar B. B. 2004. Effect of C/N on composting of pig manure with sawdust. *Waste Management* **24**: 805-813.
- Chang J. I., Hsu T. E. 2008. Effects of compositions on food waste composting. *Bioresource Technology* **99**: 8068-8074.
- Charest M. H., Beauchamp C. J. 2002. Composting of de-inking paper sludge with poultry manure at three nitrogen levels using mechanical turning: behavior of physico-chemical parameters. *Bioresource Technology* **81**: 7-17.
- Chen Y. 2003. Nuclear Magnetic Resonance, Infra-Red and Pyrolysis: Application of Spectroscopic Methodologies to Maturity Determination of Composts. *Compost Science and Utilization* **11**: 152-168.
- Chen R., Wang Y., Wang W., Wei S., Jing Z., Lin X. 2015. N<sub>2</sub>O emissions and nitrogen transformation during windrow composting of dairy manure. *Journal of Environmental Management* **160**: 121-127.
- Chowdhury A. K. M. M. B., Akrotos Ch. S., Vayenas D. V., Pavlou S. 2013. Olive mill waste composting: A review. *International Biodeterioration and Biodegradation* **85**: 108-119.
- Ilyass T., Azim K., Mayad E. H., Zaafrani M., Souidi B. 2020. Composting of tomato plant residues: improvement of composting process and compost quality by integration of sheep manure. *Organic Agriculture* **10**: 229-242.
- Iticescu C., Georgescu L., Murariu G., Circiumaru A., Mihaela T. 2018. The characteristics of sewage sludge used on agricultural lands. *AIP Conference Proceedings* **2022**.
- Jain M. S., Daga M., Kalamdhad A.S. 2018a. Composting physics: A degradation process-determining tool for industrial sludge. *Ecological Engineering* **116**: 14-20.
- Jain M. S., Daga M., Kalamdhad A. S. 2018b. Physical parameters evaluation during production of soil conditioner from aquatic waste: *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle. *Environmental Technology and Innovation* **11**: 64-73.
- Jain M. S., Paul S., Kalamdhad A. S. 2019a. Interplay of physical and chemical properties during in-vessel degradation of sewage sludge. *Waste Management* **98**: 58-68.
- Jain M. S., Paul S., Kalamdhad A. S. 2019b. Utilization of Biochar as an amendment during lignocellulose waste composting: Impact on composting physics and Realization (probability) amongst physical properties. *Process Safety and Environmental Protection* **121**: 229-238.

- Juárez M. F. D., Prähauser B., Walter A., Insam H., Franke-Whittle I. H. 2015. Co-composting of biowaste and wood ash, influence on a microbially driven-process. *Waste Management* **46**: 155-164.
- Junga, P., Vítěz T., Trávníček P. 2015. Technika pro zpracování odpadů. Mendelova univerzita, Brno. Available from: [https://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty/files/23/23-technika\\_pro\\_zpracovani\\_odpadu\\_2\\_junga\\_b.pdf](https://web2.mendelu.cz/af_291_projekty/files/23/23-technika_pro_zpracovani_odpadu_2_junga_b.pdf) (accessed January 2021).
- Kelessidis A., Stasinakis A. S. 2012. Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management* **32**: 1186-1195.
- Kızılkaya R., Bayraklı B. 2005. Effects of N-enriched sewage sludge on soil enzyme activities. *Applied Soil Ecology* **30**: 192-202.
- Khalil, A. I., Hassouna, M. S., El-Ashqar, H. M. A. 2011. Changes in physical, chemical and microbial parameters during the composting of municipal sewage sludge. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* **27**: 2359-2369.
- Komilis D. P., Ham R. K., Park J. K. 2004. Emission of volatile organic compounds during composting of municipal solid wastes. *Water Research* **38**: 1707-1714.
- Kosobucki P., Chmarzyński A., Buszewski B. 2000. Sewage Sludge Composting. *Polish Journal of Environmental Studies* **9**: 243-248.
- Kulikowska D. 2016. Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting. *Waste Management* **49**: 196-203.
- Kulikowska D., Gusiatin Z. M., Bułkowska K., Kierklo K. 2015. Humic substances from sewage sludge compost as washing agent effectively remove Cu and Cd from soil. *Chemosphere* **136**: 42-49.
- Kumar M., Ou Y., Lin J. 2010. Co-composting of green waste and food waste at low C/N ratio. *Waste Management* **30**: 602-609.
- Kwarciak-Kozłowska A. 2019. Co-composting of sewage sludge and wetland plant material from a constructed wetland treating domestic wastewater. *Industrial and Municipal Sludge* **15**: 337-360.
- Lazcano C., Gómez-Brandón M., Domínguez J. 2008. Comparison of the effectiveness of composting and vermicomposting for the biological stabilization of cattle manure. *Chemosphere* **72**: 1013-1019.
- Li Z., Lu H., Ren L., He L. 2013. Experimental and modeling approaches for food waste composting: A review. *Chemosphere* **93**: 1247-1257.

- Lim S. L., Lee L. H., Wu T. Y. 2016. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production* **111**: 262-278.
- Liquan C., Wei H. 2021. Toxic metals in soil due to the land application of sewage sludge in China: Spatiotemporal variations and influencing factors. *Science of The Total Environment* **757**: article 143813.
- Lyčková B., Fečko P., Kučerová R. 2009. *Zpracování kalů*. VŠB – Technická univerzita, Ostrava.
- Makan A., Assobhei O., Mountadar M. 2013. Effect of initial moisture content on the in-vessel composting under air pressure of organic fraction of municipal solid waste in Morocco. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. **10**: article 3.
- Malat'ák J., Jevič P., Vaculík P. 2010. Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek: vědecká monografie. Powerprint, Praha.
- Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. 2006. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy* **30**: 648-654.
- Manios T. 2004. The composting potential of different organic solid wastes: experience from the island of Crete. *Environment International* **29**: 1079-1089.
- Martínez-Guido S. I., Ríos-Badrán I. M., Gutiérrez-Antonio C., Ponce-Ortega J. M. 2019. Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable Energy* **130**: 622-632.
- Matichenkov V., Bocharnikova E. 2016. Utilization of Sludge as Manure, *Environmental Materials and Waste*, Academic Press **9**: 213-220.
- Mohee R., Mudhoo A. 2005. Analysis of the physical properties of an in-vessel composting matrix. *Powder Technology* **155**: 92-99.
- Nafez A. H., Nikaeen M., Kadkhodaie S. 2015. Sewage sludge composting: quality assessment for agricultural application. *Environmental Monitoring Assessment* **187**: article 709.
- Nolan T., Troy S. M., Healy M. G., Kwapinski W., Leahy J. J., Lawlor P. G. 2011. Characterization of compost produced from separated pig manure and a variety of bulking agents at low initial C/N ratios. *Bioresource Technology* **102**: 7131-7138.

Onwosi C. O., Igbokwe V. C., Odimba J. N., Eke I. E., Nwankwoala M. O., Iroh I. N., Ezeogu L. I. 2017. Composting technology in waste stabilization: On the methods, challenges and future prospects. *Journal of Environmental Management* **190**: 140-157.

Pandey P. K., Cao W., Biswas S., Vaddella V. 2016. A new closed loop heating system for composting of green and food wastes. *Journal of Cleaner Production* **133**: 1252-1259.

Pergola M., Persiani A., Palese A. M., Meo V. D., Pastore V., D'Adamo C., Celano G. 2018. Composting: The way for a sustainable agriculture. *Applied Soil Ecology* **123**: 744-750.

Plíva P. 2006. Zakládání, průběh a řízení kompostovacího procesu. Výzkumný ústav zemědělské techniky, Praha.

Pošta J. 2005. Čistírny odpadních vod. Česká zemědělská univerzita, Praha.

Proietti P., Calisti R., Gigliotti G., Nasini L., Regni L., Marchini A. 2016. Composting optimization: Integrating cost analysis with the physical-chemical properties of materials to be composted. *Journal of Cleaner Production* **137**: 1086-1099.

Qian X., Shen G., Wang Z., Guo C., Liu Y., Lei Z., Zhang Z. 2014. Co-composting of livestock manure with rice straw: Characterization and establishment of maturity evaluation system. *Waste Management* **34**: 530-535.

Raut M. P., Prince William S. P. M., Bhattacharyya J. K., Chakrabarti T., Devotta S. 2008. Microbial dynamics and enzyme activities during rapid composting of municipal solid waste – A compost maturity analysis perspective. *Bioresource Technology* **99**: 6512-6519.

Rihani M., Malamis D., Bihaoui B., Etahiri S., Loizidou M., Assobhei O. 2010. In-vessel treatment of urban primary sludge by aerobic composting. *Bioresource Technology* **101**: 5988-5995.

Rich N., Bharti A. 2015. Assessment of different types of in-vessel composters and its effect on stabilization of MSW compost. *International Research Journal of Engineering and Technology* **2**: 1-6.

Richard T. L., Hamelers H. V. M., Veeken A., Silva T. 2002. Moisture Relationships in Composting Processes. *Compost Science and Utilization* **10**: 286-302.

Santamarta L. C., Chaney K., Godwin R. J., White D. R., Humphries A. C. 2012. Physical quality changes during the storage of canola (*Brassica napus* L.) straw pellets. *Applied Energy* **95**: 220-226.

- Sasaki N., Suehara K.I., Kohda J., Nakano Y., Yang T. 2003. Effects of CN ratio and pH of raw materials on oil degradation efficiency in a compost fermentation process. *Journal of Bioscience and Bioengineering* **96**: 47-52.
- Şevik F., Tosun I., Ekinçi K. 2018. The effect of FAS and C/N ratios on co-composting of sewage sludge, dairy manure and tomato stalks. *Waste Management* **80**: 450-456.
- Smårs S., Gustafsson L., Beck-Friis B., Jönsson H. 2002. Improvement of the composting time for household waste during an initial low pH phase by mesophilic temperature control. *Bioresource Technology* **84**: 237-241.
- Smith M., Friend D., Johnson H. 2007. *Composting for the homeowner*, University of Illinois, Illinois.
- Tang J. C., Maie N., Tada Y., Katayama A. 2006. Characterization of the maturing process of cattle manure compost. *Process Biochemistry* **41**: 380-389.
- Uçaroğlu S., Ufuk A. 2016. Composting of wastewater treatment sludge with different bulking agents. *Journal of the Air and Waste Management Association* **66**: 288-295.
- Valentová L. 2013. Správná kompostářská praxe. Available from: <https://docplayer.cz/34488852-Decentralizovane-kompostovani.html> (accessed January 2021).
- Váňa J., Balík J., Tlustoš P. 2005. *Pevné odpady*. Česká zemědělská univerzita, Praha.
- Wang K., He C., You S., Liu W., Wang W., Zhang R., Qi H., Ren N. 2015. Transformation of organic matters in animal wastes during composting. *Journal of Hazardous Materials* **300**: 745-753.
- Wu T. Y., Lim S. L., Lim P. N., Shak K. P. Y. 2014. Biotransformation of biodegradable solid wastes into organic fertilizers using composting or/and vermicomposting. *Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction (PRES2014)* **39**: 1579-1584.
- Yañez R., Alonso J. L., Díaz M. J. 2009. Influence of bulking agent on sewage sludge composting process. *Bioresource Technology* **100**: 5827-5833.
- Yu H., Huang G. H. 2009. Effects of sodium acetate as a pH control amendment on the composting of food waste. *Bioresource Technology* **100**: 2005-2011.
- Zemánek P. 2001. *Speciální mechanizace: mechanizační prostředky pro kompostování*. V Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno.
- Zhao S., Lian F., Duo L. 2011. EDTA-assisted phytoextraction of heavy metals by turfgrass from municipal solid waste compost using permeable barriers and associated potential leaching risk. *Bioresource Technology* **102**: 621-626.

Zhao X., Li B., Ni J., Xie D. 2016. Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting. *Journal of Integrative Agriculture* **15**: 232-240.

Zhu N. 2007. Effect of low initial C/N ratio on aerobic composting of swine manure with rice straw. *Bioresource Technology* **98**: 9-13.



## 9 Seznam použitých zkratek a symbolů

A	akácie sivozelená
AEF	aerobní fermentor
AOX	halogenované organické sloučeniny
CAT	vyluhovací činidlo pro stanovení přístupných obsahů prvků
CEC	kationtová výměnná kapacita
CFL	podestýlka od kuřat
ČOV	čistírna odpadních vod
DPS	odbarvený papírový kal
DTPA	kyselina diethylentriaminpentaoctová
EO	ekvivalentní obyvatel
FA	fulvokyseliny
GI	index klíčení
GW	zelený rostlinný odpad
HA	huminové kyseliny
HI	humifikační index
NEL	nepolární extrahovatelné látky
PAU	polyaromatické uhlovodíky
PCB	polychlorované bifenyly
PCDD	polychlorované dibenzodioxiny
PCDF	polychlorované dibenzofurany
PM	drůbeží hnůj
PW	suché listy s odpady z prořezávání
SS	kal z odpadních vod
TOC	celkový organický uhlík



## 10 Samostatné přílohy

Statistické analýzy z průběhu kompostování v jednotlivých přílohách vyjadřují průměry se směrodatnou odchylkou. Písmena udávají statistický rozdíl (Tukeyův HSD test,  $p < 0,05$ ).

### Příloha 1. Naměřené hodnoty teplot (°C) v AEF v průběhu termofilní fáze

Teplota °C

Den	kal 100 %	kal 75 % + pelety 25 %	kal 50 % + pelety 50 %	kal 25 % + pelety 75 %	pelety 100 %
3	13,4	19,1	30,4	49,5	55,7
4	15,7	23,0	38,4	57,7	64,2
5	19,5	28,8	50,4	64,0	67,6
6	23,1	33,2	57,4	65,5	66,6
7	27,4	36,4	55,4	61,0	58,3
8	28,4	37,2	57,0	64,2	55,9
9	29,6	37,6	51,3	64,7	47,2
10	29,6	36,2	51,4	62,8	39,5
11	29,3	34,8	49,5	60,9	34,7
12	29,1	33,8	47,2	58,4	32,6
13	28,8	32,7	45,2	55,8	31,2
14	27,8	30,8	40,8	50,0	29,4
15	27,3	30,2	39,5	50,0	28,6
16	26,5	29,2	34,3	48,1	27,5

### Příloha 2. Hodnoty objemové hmotnosti (g/l) v AEF v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

	AEF	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1	863	1062	1229	1051
	2	945	1089	1195	1098
Statistická analýza		904 ± 41b	1075 ± 13a	1212 ± 17a	1075 ± 23a
kal 75 % + pelety 25 %	3	874	1016	979	1042
	4	1016	1015	1097	1120
Statistická analýza		945 ± 71a	1015 ± 1a	1038 ± 59a	1081 ± 39a
kal 50 % + pelety 50 %	5	846	815	1074	1038
	6	879	931	1006	1127
Statistická analýza		863 ± 17a	873 ± 58a	1040 ± 34a	1083 ± 45a
kal 25 % + pelety 75 %	7	730	967	998	947
	8	739	966	899	1021
Statistická analýza		734 ± 5b	967 ± 1a	949 ± 50a	984 ± 37a
pelety 100 %	9	460	643	682	648
	10	440	691	582	653
Statistická analýza		450 ± 10b	667 ± 24a	632 ± 50a	651 ± 3a

**Příloha 3.** Hodnoty obsahu sušiny (%) v AEF v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

Obsah sušiny %	AEF	Duben			Květen			Červen			Červenec		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
kal 100 %	1	12,7	12,3	12,0	12,3	12,3	12,1	11,4	11,5	11,7	12,3	12,2	12,2
	2	12,4	12,7	12,2	12,5	9,4	12,4	12,6	12,0	11,9	11,6	11,6	12,2
Statistická analýza		12,4 ± 0,3a			11,8 ± 1,1a			11,8 ± 0,4a			12 ± 0,3a		
kal 75 % + pelety 25 %	3	14,0	13,9	14,0	12,8	12,8	9,6	12,1	12,2	12,1	12,4	12,4	12,2
	4	13,7	13,5	13,6	13,6	12,9	12,6	13,1	12,6	12,8	12,9	11,5	12,2
Statistická analýza		13,8 ± 0,2b			12,4 ± 1,3a			12,5 ± 0,4a			12,2 ± 0,4a		
kal 50 % + pelety 50 %	5	14,6	14,4	13,8	13,1	13,3	13,2	13,0	13,6	13,0	13,0	12,8	12,2
	6	14,6	14,5	13,9	12,6	8,7	12,1	11,7	11,4	11,9	12,4	11,9	12,2
Statistická analýza		14,3 ± 0,3b			12,2 ± 1,6a			12,4 ± 0,8a			12,4 ± 0,4a		
kal 25 % + pelety 75 %	7	14,7	14,9	14,2	14,9	14,7	15,0	12,9	13,2	13,1	12,2	13,1	12,2
	8	14,0	14,2	13,9	14,0	13,8	13,6	13,7	13,4	13,7	12,5	12,9	12,2
Statistická analýza		14,3 ± 0,3a			14,3 ± 0,5a			13,3 ± 0,3c			12,5 ± 0,4b		
pelety 100 %	9	20,7	20,8	20,5	16,0	15,8	15,0	14,4	14,5	14,4	12,8	13,7	12,2
	10	22,5	22,0	22,7	20,8	20,1	19,4	16,7	16,7	16,9	16,1	17,4	12,2
Statistická analýza		21,5 ± 0,9c			17,8 ± 2,3b			15,6 ± 1,2a			14,0 ± 2,0a		

**Příloha 4.** Hodnoty měrné vodivosti ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

EC  $\mu\text{S}/\text{cm}$

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100%	1A	2350	2170	1490	2250
	1B	1625	1995	1372	2600
	1C	2230	1920	1836	1734
	2A	1703	1487	2220	1898
	2B	1260	2500	2190	1870
	2C	2120	2490	1861	2470
	Statistická analýza		1881 $\pm$ 383a	2094 $\pm$ 350a	1828 $\pm$ 318a
kal 75 % + pelety 25 %	3A	1135	664	833	1177
	3B	1821	887	773	1518
	3C	1050	823	860	1147
	4A	1906	1350	826	1483
	4B	1558	1166	950	1223
	4C	1941	1213	986	1225
	Statistická analýza		1569 $\pm$ 359c	1017 $\pm$ 242ab	871 $\pm$ 74a
kal 50 % + pelety 50 %	5A	1642	1634	1079	1486
	5B	1869	1506	1021	1401
	5C	1996	1320	956	1300
	6A	1747	2010	868	999
	6B	1857	1145	2370	968
	6C	1229	502	1119	1056
	Statistická analýza		1723 $\pm$ 247a	1353 $\pm$ 480a	1236 $\pm$ 514a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	736	860	589	493
	7B	500	768	632	772
	7C	763	882	566	741
	8A	996	1140	1160	625
	8B	786	1026	948	718
	8C	743	399	764	720
	Statistická analýza		754 $\pm$ 144a	846 $\pm$ 233a	777 $\pm$ 215a
pelety 100 %	9A	1145	1570	1229	1329
	9B	1192	1151	1374	1237
	9C	817	1170	1348	1286
	10A	639	750	580	672
	10B	833	694	903	555
	10C	764	805	780	666
	Statistická analýza		898 $\pm$ 201a	1023 $\pm$ 308a	1036 $\pm$ 304a

**Příloha 5.** Hodnoty pH ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

pH

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	8,5	8,5	7,4	8,59
	1B	8,4	8,7	7,0	8,5
	1C	8,5	8,5	7,3	8,5
	2A	8,5	7,2	8,1	8,73
	2B	8,8	8,5	8,2	8,64
	2C	8,6	8,5	8,2	8,5
	Statistická analýza		8,5 ± 0,1a	8,3 ± 0,5ab	7,7 ± 0,5b
kal 75 % + pelety 25 %	3A	8,5	7,6	6,9	8,1
	3B	8,4	7,8	6,9	8,5
	3C	8,6	8,1	7,0	8,5
	4A	8,4	8,4	6,8	8,57
	4B	8,5	8,6	6,9	8,4
	4C	8,6	8,4	7,3	8,40
	Statistická analýza		8,5 ± 0,1a	8,2 ± 0,3a	7,0 ± 0,2b
kal 50 % + pelety 50 %	5A	8,3	8,0	6,9	8,3
	5B	8,4	8,3	7,1	8,2
	5C	8,5	8,7	6,5	8,40
	6A	8,7	8,6	7,6	8,1
	6B	8,6	8,0	7,0	8,1
	6C	8,6	7,5	7,8	8,1
	Statistická analýza		8,5 ± 0,1a	8,2 ± 0,4a	7,2 ± 0,4b
kal 25 % + pelety 75 %	7A	7,9	8,0	7,2	7,7
	7B	8,1	8,0	7,0	7,6
	7C	8,1	8,1	7,3	7,8
	8A	7,9	8,1	6,6	7,6
	8B	8,1	8,2	7,0	7,9
	8C	8,1	7,5	6,9	7,85
	Statistická analýza		8,1 ± 0,1b	8,0 ± 0,2a	7,0 ± 0,2b
pelety 100 %	9A	8,5	8,8	7,9	7,7
	9B	8,4	8,3	7,7	8,3
	9C	8,0	8,3	7,7	8,0
	10A	8,8	8,3	7,5	8,54
	10B	8,3	8,5	7,6	9,0
	10C	8,4	8,3		8,5
	Statistická analýza		8,4 ± 0,2a	8,4 ± 0,2a	7,7 ± 0,1b

**Příloha 6.** Hodnoty obsahu C (%) ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

C %

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	30,8	28,3	27,5	27,3
	1B	30,1	29,8	27,2	27,0
	1C	31,0	28,7	27,3	27,8
	2A	29,6	28,4	27,0	26,5
	2B	29,9	29,0	27,3	27,1
	2C	30,2	28,6	27,2	23,4
	Statistická analýza		30,3 ± 0,5c	28,8 ± 0,5b	27,2 ± 0,2a
kal 75 % + pelety 25 %	3A	34,1	32,4	33,2	30,9
	3B	34,8	30,9	31,1	30,2
	3C	34,1	32,3	31,0	30,2
	4A	32,1	31,3	31,0	29,8
	4B	32,0	31,1	30,8	29,8
	4C	32,4	32,0	30,4	29,9
	Statistická analýza		33,2 ± 1,1c	31,7 ± 0,6b	31,2 ± 0,9ab
kal 50 % + pelety 50 %	5A	34,4	34,1	32,4	31,9
	5B	42,8	33,8	33,3	32,3
	5C	37,1	33,2	33,0	32,9
	6A	32,6	29,8	32,2	31,2
	6B	35,3	34,3	32,2	32,0
	6C	33,7	32,4	31,8	32,1
	Statistická analýza		36,0 ± 3,3b	32,9 ± 1,5ab	32,5 ± 0,5a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	38,7	37,6	36,3	36,6
	7B	39,5	39,5	37,2	36,6
	7C	39,1	37,0	37,4	36,3
	8A	37,9	37,8	37,3	35,9
	8B	35,9	37,4	37,9	34,0
	8C	36,8	38,3	38,1	35,8
	Statistická analýza		38,0 ± 1,3a	37,9 ± 0,8a	37,4 ± 0,6ab
pelety 100 %	9A	41,7	42,3	40,7	39,0
	9B	41,6	42,2	40,6	40,3
	9C	41,4	41,2	40,4	40,7
	10A	41,4	41,3	40,4	40,9
	10B	41,2	41,0	40,1	40,1
	10C	40,8	41,0	40,9	40,7
	Statistická analýza		41,3 ± 0,3b	41,5 ± 0,5b	40,5 ± 0,3a

**Příloha 7.** Hodnoty obsahu N (%) ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

N %

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	4,9	4,4	4,1	4,2
	1B	4,7	4,6	4,2	4,1
	1C	4,7	4,5	4,3	4,5
	2A	4,6	4,2	4,1	4,1
	2B	4,6	4,5	4,2	4,1
	2C	4,6	4,4	4,2	3,7
	Statistická analýza		4,7 ± 0,1c	4,4 ± 0,1b	4,2 ± 0,1ab
kal 75 % + pelety 25 %	3A	3,2	3,6	3,8	3,4
	3B	3,5	3,5	3,6	3,4
	3C	3,4	3,5	3,6	3,4
	4A	4,0	3,8	3,6	3,5
	4B	4,0	3,9	3,6	3,5
	4C	4,0	4,0	3,7	3,6
	Statistická analýza		3,7 ± 0,3a	3,7 ± 0,2a	3,7 ± 0,1a
kal 50 % + pelety 50 %	5A	3,0	3,2	3,3	3,2
	5B	3,6	3,3	3,2	3,3
	5C	2,9	3,2	3,4	3,2
	6A	3,5	3,1	3,5	3,4
	6B	3,1	3,6	3,5	3,4
	6C	3,3	3,5	3,6	3,3
	Statistická analýza		3,2 ± 0,2a	3,3 ± 0,2a	3,4 ± 0,1a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	2,3	2,9	3,0	3,1
	7B	2,5	2,8	3,0	3,2
	7C	2,4	2,8	2,9	3,1
	8A	2,9	3,1	2,9	3,1
	8B	2,7	3,0	2,9	3,0
	8C	2,8	2,9	3,0	3,1
	Statistická analýza		2,6 ± 0,2b	2,9 ± 0,1a	3,0 ± 0,0a
pelety 100 %	9A	1,0	1,4	1,5	2,1
	9B	1,0	1,5	1,5	2,2
	9C	1,0	1,4	1,7	1,9
	10A	0,9	1,1	1,3	1,4
	10B	1,0	1,1	1,1	1,5
	10C	1,0	1,2	1,2	1,5
	Statistická analýza		1,0 ± 0,1a	1,3 ± 0,1ab	1,4 ± 0,2b



**Příloha 8.** Hodnoty C:N ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

C:N

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	6,3	6,4	6,7	6,6
	1B	6,4	6,5	6,4	6,7
	1C	6,6	6,4	6,4	6,2
	2A	6,4	6,8	6,6	6,4
	2B	6,4	6,5	6,6	6,6
	2C	6,6	6,6	6,5	6,3
	Statistická analýza		6,5 ± 0,1a	6,5 ± 0,1a	6,5 ± 0,1a
kal 75 % + pelety 25 %	3A	10,5	8,9	8,7	9,1
	3B	10,0	8,8	8,6	8,8
	3C	10,1	9,1	8,7	8,9
	4A	8,1	8,3	8,6	8,6
	4B	8,1	8,0	8,5	8,6
	4C	8,2	8,0	8,1	8,4
	Statistická analýza		9,2 ± 1,1a	8,5 ± 0,4a	8,5 ± 0,2a
kal 50 % + pelety 50 %	5A	11,6	10,7	9,9	10,0
	5B	11,9	10,2	10,5	9,9
	5C	12,6	10,3	9,8	10,4
	6A	9,4	9,7	9,3	9,2
	6B	11,5	9,5	9,3	9,3
	6C	10,2	9,2	8,9	9,6
	Statistická analýza		11,2 ± 1,1b	9,9 ± 0,5a	9,6 ± 0,5a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	16,5	13,0	12,0	12,0
	7B	15,6	14,1	12,5	11,5
	7C	16,5	13,2	12,8	11,7
	8A	13,1	12,2	12,7	11,6
	8B	13,1	12,6	13,0	11,5
	8C	13,3	13,4	12,6	11,4
	Statistická analýza		14,7 ± 1,5b	13,1 ± 0,6a	12,6 ± 0,3a
pelety 100 %	9A	41,6	30,4	26,4	18,4
	9B	42,1	28,3	26,6	18,5
	9C	42,3	30,6	24,3	21,2
	10A	46,3	36,5	30,9	29,7
	10B	41,7	38,0	36,5	26,8
	10C	42,6	34,6	33,5	27,8
	Statistická analýza		42,8 ± 1,6c	33,1 ± 3,5b	29,7 ± 4,3ab

**Příloha 9.** Hodnoty celkového obsahu K (mg/kg) ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

Celkový obsah K mg/kg

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	5671	5948	6003	6074
	1B	5566	5888	5970	6119
	1C	5730	9651	6104	5899
	2A	5336	6016	5652	6076
	2B	5319	5768	5652	6515
	2C	5285	5827	5514	6751
	Statistická analýza		5485 ± 178a	6516 ± 1404a	5816 ± 219a
kal 75 % + pelety 25 %	3A	7111	8090	7638	8689
	3B	7314	8251	8536	8900
	3C	6955	8682	7858	8583
	4A	7157	6960	6228	7355
	4B	6638	7239	6737	7999
	4C	6756	7535	7272	7382
	Statistická analýza		6988 ± 234a	7793 ± 599ab	7378 ± 751ab
kal 50 % + pelety 50 %	5A	9346	5952	10336	11100
	5B	9200	9639	10581	10221
	5C	8494	9218	10383	10344
	6A	9305	10659	11147	11473
	6B	9136	11054	11249	11444
	6C	8783	11125	11161	11253
	Statistická analýza		9044 ± 306b	9608 ± 1780ab	10809 ± 385a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	8853	11493	12614	13746
	7B	8730	11064	12214	13104
	7C	10122	11891	12473	13037
	8A	10871	11778	11427	13299
	8B	10149	11837	11332	13457
	8C	10611	10500	11426	13114
	Statistická analýza		9889 ± 819b	11427 ± 500a	11914 ± 533a
pelety 100 %	9A	10422	17237	18038	22034
	9B	10274	15346	17471	21498
	9C	11363	16050	17643	21418
	10A	7973	9777	11860	11323
	10B	8122	9958	11986	11607
	10C	8243	10109	11752	11785
	Statistická analýza		9399 ± 1334a	13080 ± 3181ab	14792 ± 2931ab

**Příloha 10.** Hodnoty přístupného obsahu K (mg/kg) ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

Přístupný obsah K mg/kg

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	2130	2550	2370	2150
	1B	1940	2370	2310	2210
	1C	2290	2480	2370	2180
	2A	3120	2480	2260	2420
	2B	2040	2480	2310	2420
	2C	1550	2300	2180	2340
	Statistická analýza		2178 ± 478a	2443 ± 83a	2300 ± 66a
kal 75 % + pelety 25 %	3A	3520	4530	4230	4290
	3B	2490	4300	4500	4230
	3C	4700	4720	4320	4080
	4A	3140	3630	3400	3670
	4B	3780	3830	3600	3780
	4C	1860	3810	3480	3600
	Statistická analýza		3248 ± 911a	4137 ± 404a	3922 ± 439a
kal 50 % + pelety 50 %	5A	1310	5450	5190	5030
	5B	1390	4980	5350	5140
	5C	3970	5130	4980	5220
	6A	4020	5680	5680	5010
	6B	4710	5800	5650	5140
	6C	4590	5820	5680	5620
	Statistická analýza		3332 ± 1427b	5477 ± 324a	5422 ± 271a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	6130	7570	10040	7450
	7B	3850	7230	7940	8000
	7C	1820	8000	7840	8000
	8A	3520	7700	7520	8180
	8B	7270	7400	7210	7680
	8C	3040	8080	7210	7770
	Statistická analýza		4272 ± 1858b	7663 ± 304a	7960 ± 971a
pelety 100 %	9A	6250	14080	15810	15890
	9B	9810	13750	16060	11430
	9C	8440	14520	15540	10710
	10A	7100	8320	6780	2490
	10B	3400	8450	11700	4370
	10C	3000	8430	11500	4750
	Statistická analýza		6333 ± 2478a	11258 ± 2867ab	12898 ± 3324ab

**Příloha 11.** Hodnoty celkového obsahu Mg (mg/kg) ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

Celkový obsah Mg mg/kg

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	6265	5932	6762	6773
	1B	5548	5744	6375	5877
	1C	5835	3869	7000	7037
	2A	6125	5653	6556	6938
	2B	5421	7266	6527	7020
	2C	5675	6530	6733	6118
	Statistická analýza		5812 ± 302a	5832 ± 1037a	6659 ± 200a
kal 75 % + pelety 25 %	3A	4019	4975	5129	5762
	3B	4641	4820	5429	5685
	3C	4197	5123	4884	5856
	4A	4218	5146	4914	6166
	4B	4457	5162	5386	6572
	4C	4444	5372	5247	5962
	Statistická analýza		4329 ± 205b	5100 ± 171a	5165 ± 212a
kal 50 % + pelety 50 %	5A	4038	6169	4524	4591
	5B	4225	4073	4501	4582
	5C	3300	3848	4529	4516
	6A	3304	4006	4637	4519
	6B	3512	3794	4535	4865
	6C	3197	4597	4768	4739
	Statistická analýza		3596 ± 394b	4414 ± 827ab	4582 ± 93a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	2226	2778	3131	3627
	7B	1875	2500	3033	3630
	7C	2028	2842	3033	3569
	8A	2720	3019	3356	3775
	8B	2334	2842	3223	3912
	8C	2382	2794	3114	3716
	Statistická analýza		2261 ± 269a	2796 ± 154b	3149 ± 113c
pelety 100 %	9A	886	1259	1459	1781
	9B	941	1278	1490	1733
	9C	961	1229	1419	1741
	10A	963	1341	1407	1648
	10B	1057	1284	1395	1658
	10C	1074	989	1494	1660
	Statistická analýza		980 ± 66a	1230 ± 113b	1444 ± 39c

**Příloha 12.** Hodnoty přístupného obsahu Mg (mg/kg) ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

Přístupný obsah Mg mg/kg

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	348	323	475	481
	1B	379	370	511	490
	1C	458	384	522	361
	2A	732	331	526	384
	2B	640	451	428	409
	2C	257	371	418	379
	Statistická analýza		469 ± 166a	372 ± 42a	480 ± 44a
kal 75 % + pelety 25 %	3A	534	666	837	920
	3B	300	699	903	894
	3C	772	746	799	901
	4A	753	589	729	828
	4B	775	541	724	775
	4C	308	554	708	665
	Statistická analýza		490 ± 208a	633 ± 76ab	783 ± 70ab
kal 50 % + pelety 50 %	5A	248	597	685	678
	5B	183	582	591	665
	5C	606	555	603	709
	6A	500	539	726	620
	6B	536	616	654	668
	6C	537	582	703	812
	Statistická analýza		435 ± 159b	579 ± 25ab	660 ± 50a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	651	711	943	725
	7B	398	705	807	902
	7C	214	775	761	784
	8A	309	700	683	881
	8B	720	687	700	819
	8C	282	710	730	755
	Statistická analýza		429 ± 190b	715 ± 28a	771 ± 87a
pelety 100 %	9A	390	593	567	568
	9B	557	583	569	400
	9C	530	603	578	371
	10A	542	534	510	131
	10B	264	526	561	216
	10C	287	537	570	233
	Statistická analýza		428 ± 121ab	563 ± 31a	559 ± 23a

**Příloha 13.** Hodnoty celkového obsahu P (mg/kg) ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

Celkový obsah P mg/kg

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	25307	18584	28226	29433
	1B	22169	24625	27938	26358
	1C	11200	15000	29125	28951
	2A	22063	27550	28309	29875
	2B	15470	17426	27525	30172
	2C	2300	15734	27369	28931
	Statistická analýza		16418 ± 7868a	19820 ± 4655a	28082 ± 577b
kal 75 % + pelety 25 %	3A	14691	19926	21253	23587
	3B	15876	19789	21752	23166
	3C	15135	20259	20049	23697
	4A	15509	12195	20123	24690
	4B	16728	17830	22059	25676
	4C	15159	13027	22099	23945
	Statistická analýza		15516 ± 652a	17171 ± 3325a	21223 ± 850b
kal 50 % + pelety 50 %	5A	12438	25563	17203	17184
	5B	13923	15610	16933	17506
	5C	9063	15012	16809	16544
	6A	5605	15625	18103	17160
	6B	13457	16667	17787	18015
	6C	11980	17115	18276	17556
	Statistická analýza		11077 ± 2899b	17599 ± 3325a	17519 ± 568a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	5835	8230	9282	10591
	7B	5297	7134	8623	10988
	7C	5656	5989	8561	10749
	8A	6159	8313	9677	11443
	8B	5565	8769	8853	11878
	8C	6530	7813	9029	11425
	Statistická analýza		5840 ± 405a	7708 ± 918b	9004 ± 386c
pelety 100 %	9A	929	1537	1712	2125
	9B	954	1654	1714	2045
	9C	973	1597	1628	1990
	10A	815	1638	1486	1759
	10B	840	1378	1568	1849
	10C	907	989	1407	1816
	Statistická analýza		903 ± 58b	1466 ± 232a	1586 ± 113a

**Příloha 14.** Hodnoty přístupného obsahu P (mg/kg) ve vzorcích v jednotlivých měsících v průběhu kompostování

Přístupný obsah P mg/kg

	Vz.	Duben	Květen	Červen	Červenec
kal 100 %	1A	1320	976	1270	1460
	1B	868	1200	1460	1520
	1C	1100	1310	1520	1330
	2A	935	1160	1700	1340
	2B	1070	1490	1260	1400
	2C	911	1240	1400	1480
	Statistická analýza		1034 ± 153b	1229 ± 155ab	1435 ± 151a
kal 75 % + pelety 25 %	3A	1070	995	1120	801
	3B	363	1070	1110	826
	3C	516	1080	1010	878
	4A	614	1040	1330	1090
	4B	1280	966	1330	1280
	4C	519	1080	1270	1170
	Statistická analýza		727 ± 331a	1039 ± 44ab	1195 ± 122b
kal 50 % + pelety 50 %	5A	615	1250	1370	1170
	5B	501	1330	1360	1180
	5C	1450	1200	1300	1280
	6A	948	1140	1390	1070
	6B	1520	1170	1330	1100
	6C	1660	1180	1340	1150
	Statistická analýza		1116 ± 452a	1212 ± 63a	1348 ± 29a
kal 25 % + pelety 75 %	7A	1110	1170	1170	729
	7B	582	1110	1160	992
	7C	253	1140	1150	876
	8A	398	896	997	925
	8B	900	867	961	714
	8C	293	918	931	660
	Statistická analýza		589 ± 318b	1017 ± 125a	1062 ± 100a
pelety 100 %	9A	176	223	175	131
	9B	178	220	187	128
	9C	234	232	178	109
	10A	222	254	189	71
	10B	123	239	199	116
	10C	117	237	185	141
	Statistická analýza		175 ± 44a	234 ± 11c	186 ± 8a