

Biologicky rozložitelná polymerní kompozice využívající odpadní produkty z průmyslu

Bc. Simona Dočkalová

Diplomová práce
2022



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav inženýrství polymerů

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Simona Dočkalová
Osobní číslo: T19483
Studijní program: N0722A130001 Inženýrství polymerů
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Biologicky rozložitelná polymerní kompozice využívající odpadní produkty z průmyslu

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši pokrývající trendy ve využití biodegradabilních materiálů a jejich kompozitů se zaměřením na agro-aplikace.
2. Připravte sérii kompozitních směsí na bázi degradabilního polymeru, plniva přírodního původu a celulózového odpadu.
3. V praktické části aplikujte získané informace na připravené vzorky s důrazem na charakterizaci jejich chemického složení a schopnosti degradability.
4. Získaná naměřená a vypočtená data přehledně zpracujte a kriticky zhodnotte.

Forma zpracování diplomové práce: **tiskřená/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. BERLIN, Aleksandr Aleksandrovitř, Svetlana Zacharovna ROGOVINA a Gennadij Jefremovič ZAIKOV. Additives in polymers: analysis and applications. Toronto: Apple Academic Press, 2016, 340 s. ISBN 978-1-77188-128-9.
2. FAKIROV, Stoyko. Biodegradable polyesters. Weinheim: Wiley, 2015, 347 s. ISBN 978-3-527-33086-7.
3. CHU, Chin-Chang. Biodegradable polymers, New biomaterial advancements and challenges. New York: Nova Science Publishers, 2015, 474 s. ISBN 978-1-63483-633-3.
4. COVAS, J. A. a Ant3nio GASPARGUNHA. Optimization in Polymer Processing. New York: Nova Science Publishers, 2011, 229 s. ISBN 9781611228182.
5. ČSN EN ISO 20200 Plasty – Stanovení stupně rozkladu plastů za simulovaných podmínek kompostování v laboratorním měřítku. Genova: The International Organization for Standardization, 2016, 8 s.
6. SCHETTINI, velia, Gabriella SANTAGATA, Mario MALINCONICO, Barbara IMMIRZI, Giacomo SCARASCIA MUGNOZZA a Giuliano Vox. Recycled wastes of tomato and hemp fibres for biodegradable pots: Physico-chemical characterization and field performance. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013, vol. 70, 10 s. ISSN 0921-3449.
7. Časopisecké a knižní zdroje dostupné prostřednictvím knihovny UTB ve Zlině.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martina Pummerová, PhD.**
Centrum polymerních systémů

Datum zadání diplomové práce: **1. února 2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Jana Navrátilová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlině dne 1. dubna 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta: Simona Dočkalová

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá přípravou biologicky odbouratelných polymerních kompozic z recyklovaných materiálů pro výrobu sadbovačů a následnou charakterizací vlastností těchto připravených vzorků. Teoretická část je zaměřena na hlavní typy biologicky odbouratelných polymerů, dále uvádí průzkum aplikací biologicky odbouratelných polymerů v zemědělství se zaměřením na biologicky odbouratelné pěstební obaly dostupné na trhu a řeší odborných studií zabývajících se výzkumem jejich alternativ. V praktické části byla nejprve připravena v laboratorním měřítku série kompozic obsahující plevy (odpad rostlinné zemědělské produkce), kraftový papír a polybutylen sukcinát v různém poměru. Připravené vzorky kompozitních směsí byly podrobeny rázové zkoušce dle Charpyho, zhodnocení hydrofility a testu nasákavosti vody dle ČSN EN ISO 62(640112). Následně bylo provedeno stanovení stupně dezintegrace vzorků za simulovaných podmínek kompostování v laboratorním měřítku (ČSN EN ISO 20200) a jejich charakterizace po skončení procesu kompostování pomocí infračervené spektroskopie. Vliv degradace připravených polymerních kompozitů na jakost výsledného kompostu byl zhodnocen tzv. řehčovým testem fytotoxicity. V rámci praktické části byla jako nejoptimálnější receptura vyhodnocena směs obsahující 30 hm. % polybutylen sukcinátu a 70 hm. % plev. Nicméně z hlediska kompozice využívající odpad z papírenského průmyslu byla směs obsahující 30 hm. % polybutylen sukcinátu, 10 hm. % kraftového papíru a 60 hm. % plev vyhodnocena také za vyhovující.

Klíčová slova: sadbovače, biologická odbouratelnost, polybutylen sukcinát, plevy, kraftový papír, kompozitní materiál

ABSTRACT

The thesis deals with the preparation of biodegradable polymer mixtures from recycled materials for the production of seedling flowerpots and the subsequent characterization of the properties of these prepared samples. The theoretical part focuses on the main types of biodegradable polymers, used in the industry for biodegradable growing packaging and research studying their alternatives. In the practical part, a series of samples of various compositions containing husks (waste from agricultural production), kraft paper, and polybutylene succinate in various proportions were first prepared on a laboratory scale. The important properties of prepared composite mixtures were tested. Performed test were Charpy's impact test, hydrophilicity determination, and a water absorption test according to the ČSN EN ISO 62 (640112) standard. Subsequently, the disintegration grade of samples under simulated composting conditions on a laboratory scale (ČSN EN ISO 20200) and their characterization after the composting process using infrared spectroscopy methods were determined. The degradation effect of prepared polymer composites on the quality of the final compost was evaluated by the so-called watercress phytotoxicity test. In the practical part, the mixture containing 30 wt. % of polybutylene succinate and 70 wt. % of husks, was evaluated as the most optimal one. However, in terms of use of the waste from the paper industry as well, the mixture containing 30 wt. % of polybutylene succinate, 10 wt. % of kraft paper and 60 wt. % of husks, was evaluated as suitable too.

Keywords: seedling pots, biodegradability, polybutylene succinate, agriculture waste, kraft paper, composite material

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucí práce Ing. Martině Pummerové, PhD. za cenné rady a pomoc při zpracování této práce. Rovněž bych ráda poděkovala Ing. Petře Dróhsler a Ing. Dominice Hanušové za jejich ochotu a pomoc při práci v laboratoři.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 BIOLOGICKY ROZLOŽITELNÉ POLYMERY	12
1.1 POLYHYDROXYALKANOÁTY	12
1.1.1 Poly-3-hydroxybutyrát	14
1.2 KYSELINA POLYMLÉČNÁ	15
1.3 POLYBUTYLENSUKCINÁT	16
2 APLIKACE BIOLOGICKY ODBOURATELNÝCH POLYMERŮ V ZEMĚDELSTVÍ	20
2.1 MULČOVACÍ FÓLIE	20
2.2 OCHRANA STROMŮ	20
2.3 SADBOVAČE PŘÍRODNÍHO PŮVODU DOSTUPNÉ NA TRHU	21
2.3.1 Sadbovače z kravského hnoje	21
2.3.2 Sadbovače z dřevěných vláken	21
2.3.3 Sadbovače z rašeliny	22
2.3.4 Sadbovače z kokosových vláken.....	23
2.3.5 Sadbovače z bambusových vláken.....	23
2.3.6 Sadbovače z recyklovaného korku.....	24
2.3.7 Sadbovače z recyklovaného papíru	25
2.4 VÝZKUM ALTERNATIVNÍCH SADBOVAČŮ	25
2.4.1 Recyklace rostlinného odpadu z rajčat a konopných vláken	25
2.4.2 Kompozit na bázi slámy a kukuřičného škrobu	26
2.4.3 Biologicky rozložitelné nádoby z různých zemědělských odpadů a vedlejších produktů	26
2.4.4 Biologicky odbouratelné sadbovače z odpadů kožedělného průmyslu.....	27
3 METODY CHARAKTERIZACE DEGRADABILNÍCH POLYMERŮ	28
3.1 KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ	28
3.1.1 Měření úhlu smáčení na přisedlé kapce	28
3.1.2 Povrchová energie	29
3.2 NASÁKAVOST PLASTŮ VE VODĚ	29
3.3 RÁZOVÁ ZKOUŠKA – CHARPYHO KLADIVO	30
3.4 STANOVENÍ BIODEGRADABILITY POLYMERŮ	30
3.4.1 Definice kompostování	31
3.4.2 Metoda dle ISO 20200:2015	31
3.5 INFRAČERVENÁ SPEKTROSKOPIE	32
3.6 TEST FYTOTOXICITY (ŘEŘICHOVÝ TEST).....	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	34

4	CÍL PRÁCE	35
5	MATERIÁL A METODIKA	36
5.1	MATERIÁL	36
5.1.1	Předúprava materiálu	36
5.1.2	Kompozice	37
5.1.3	Příprava vzorků	38
5.1.4	Vizuální hodnocení vzorků	38
5.2	METODIKA	39
5.2.1	Kontaktní úhel smáčení	39
5.2.2	Test absorpce vody	40
5.2.3	Rázová zkouška dle metody Charpy	41
5.2.4	Stanovení rozpadu vzorků za simulovaných podmínek kompostování	41
5.2.5	Infračervená spektroskopie	44
5.2.6	Stanovení fytotoxicity (řeřichový test).....	44
6	VÝSLEDKY A DISKUZE	46
6.1	KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ	46
6.2	TEST ABSORPCE VODY	49
6.3	RÁZOVÁ ZKOUŠKA DLE METODY CHARPY	50
6.4	STANOVENÍ ROZPADU VZORKŮ.....	51
6.4.1	Stanovení stupně rozpadu vzorků při simulaci aplikace na poli za laboratorních podmínek	51
6.4.2	Stanovení stupně rozpadu při simulaci kompostovacího procesu za laboratorních podmínek	56
6.4.3	Infračervená spektroskopie	60
6.4.4	Stanovení fytotoxicity (řeřichový test).....	62
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	67
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	78
	SEZNAM OBRÁZKŮ	80
	SEZNAM TABULEK.....	81

ÚVOD

Dnešní konzumerismus a obrovský ekonomický růst zapříčinily neudržitelné množství odpadu, ať už se jedná o papírenský, zemědělský, plastový či komunální odpad, který v současné době končí převážně na skládkách. Vyřazený papírenský a zemědělský odpad je znovuobnovitelným zdrojem, který lze potenciálně využít pro výrobu biologicky odbouratelných produktů pro sadební aplikace jako náhradu za dnes nejvíce rozšířené plastové sadbovače. Tyto plastové sadbovače jsou nejčastěji vyrobeny z polypropylenu, polyetylenu a polystyrenu. Ve většině případů se jedná o jednorázové biologicky neodbouratelné sadbovače vzhledem k jejich vysoké odolnosti vůči mikrobiálnímu rozkladu. [1] Z tohoto důvodu musí být odstraněny před přesazením rostliny do půdy. V důsledku toho vzniká během školkařských a skleníkových činností nadbytek použitých a vyřazených sadbovačů. Likvidace těchto produktů představuje vážný ekologický problém. Jejich recyklace je energeticky náročná z důvodu přítomnosti organických zbytků, mastnoty, vegetace, vlhkosti a pesticidů, které je třeba předem odstranit. Dále také vztah mezi náklady na čištění a konečnou cenou recyklovaného materiálu pak činí tuto alternativu neefektivní. Kromě toho jsou sadbovače ve školkách a sklenících vystaveny extrémním teplotám a světelným podmínkám, které mohou vyvolat degradaci UV zářením, čímž dojde k poklesu mechanických vlastností a recyklovatelnosti. Ekologicky uvědomělou alternativou je navrhnout sadbovače, které jsou biologicky odbouratelné. V případě biologicky odbouratelných sadbovačů odpadá potřeba rostlinku při přesazení do půdy vyjímat ze sadebního obalu, čímž dojde k eliminaci poškození kořenů a únavě rostlinky [2, 3].

K těmto plastovým sadbovačům již dnes existují rozložitelné náhrady, ať už jsou z celulózy, kokosových vláken, či kravské mrvy. Tyto alternativy ovšem nejsou vyrobeny na delší dobu použitelnosti a k jejich rozpadu dochází dříve, než je žádoucí, případně při nevhodném skladování (např. vlivem vlhkosti) může docházet i k mikrobiálnímu osídlení. Z hlediska ceny tyto náhrady nejsou též pro běžného spotřebitele příznivé. Navíc často bývají dováženy ze zahraničí, což také jejich cenu navyšuje [1].

Doposud nebyla provedena studie z hlediska využití papírenského a zemědělského odpadu a druhotné suroviny vznikající při výrobě biodegradabilních obalů na výrobu biologicky rozložitelných sadbovačů. Tato práce si klade za cíl najít vhodný poměr vstupních složek pro výrobu biologicky rozložitelných sadbovačů a následně charakterizovat vlastnosti těchto kompozitních materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

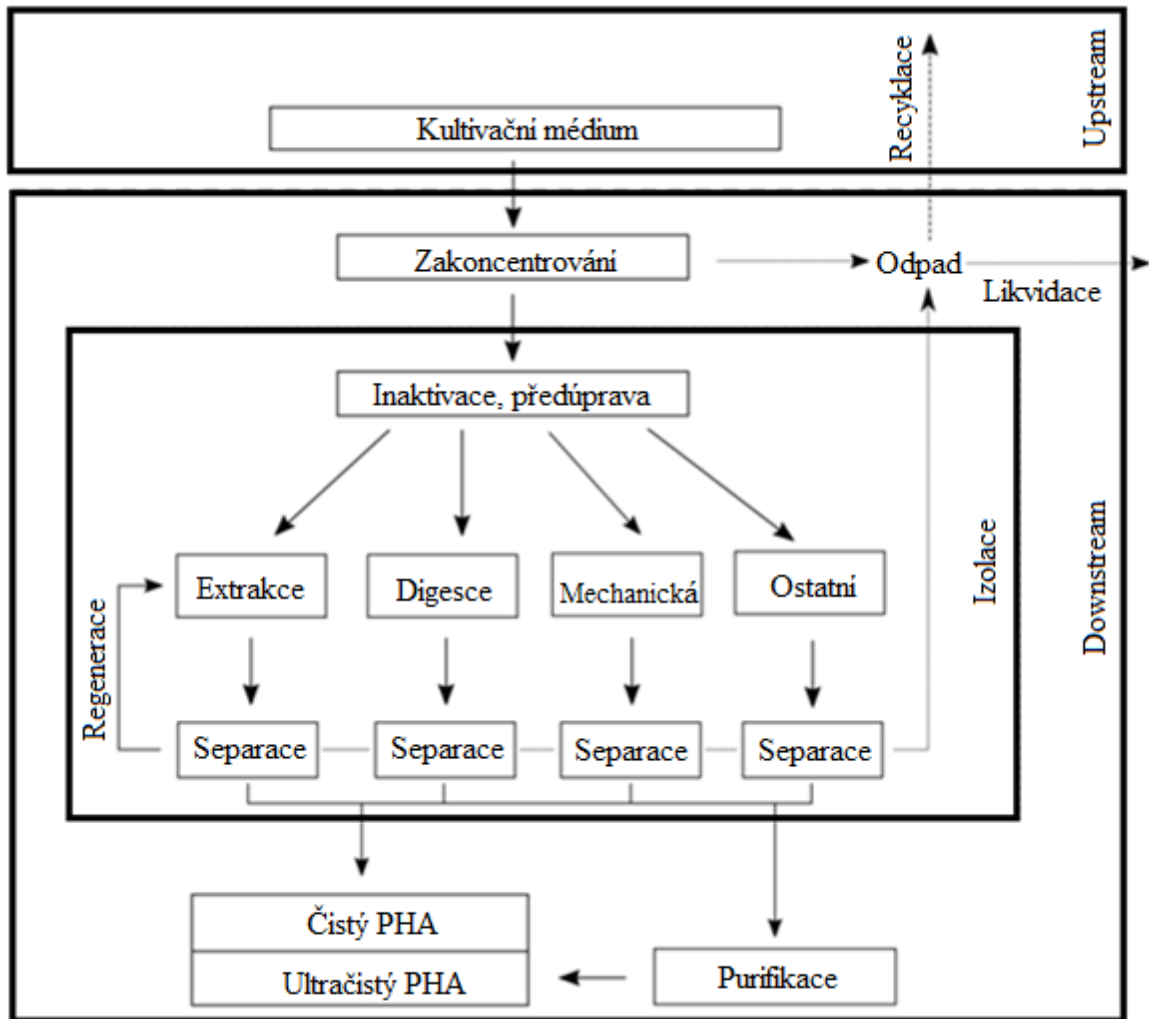
1 BIOLOGICKY ROZLOŽITELNÉ POLYMERY

První generace degradabilních polymerů stavěla na úspoře místa na skládkách, kdy u nich docházelo pouze k dezintegraci na menší části (až na mikroplasty) v důsledku biologického rozpadu přírodního plniva (např. škrobové složky) či katalyzované fotodegradace polyolefinů. Později byly vyvinuty syntetické polymery na bázi fosilních paliv, které jsou biologicky rozložitelné. Tyto biologicky rozložitelné polymery obsahují hlavně alifatické polyestery, alifatické kopolyestery a alifaticko-aromatické kopolyestery. Na trhu se také vyskytují biologicky rozložitelné polymery z obnovitelných zdrojů, jako jsou škrob, sójový protein, celulóza a rostlinný olej [4].

Tato oblast polymerů v současné době tedy zahrnuje širokou škálu materiálů, které jsou definovány např. Mezinárodní organizací pro normalizaci (ISO), Americkou společností pro testování a materiály (ASTM), Evropským výborem pro normalizaci (CEN), a nebo japonskou asociací bioplastů (JBPA) [5]. Proto se diplomová práce bude dále zaměřovat na syntetické plně biologicky odbouratelné, aktuálně v průmyslu využívané polymery, a tedy lze u nich i v budoucnu předpokládat vznik druhotné suroviny, u které často zpracovatelé řeší funkční využití ideálně s přidanou hodnotou.

1.1 Polyhydroxyalkanoáty

Polyhydroxyalkanoáty (PHA) jsou biologicky rozložitelné alifatické polyestery syntetizované bakteriální fermentací. Jejich teplota tání se pohybuje v rozmezí 40 až 180 °C a teplota skelného přechodu v rozmezí -50 až 7 °C. Obecně výroba PHA sestává ze dvou částí, tj. upstreamu, tedy kultivační části a downstreamu, tedy izolace a purifikace produktu. Syntéza PHA během fermentačního procesu (upstream) probíhá působením řady bakteriálních kmenů. Bakterie produkující PHA lze rozdělit do dvou skupin dle kultivačních podmínek požadovaných pro syntézu. První skupina vyžaduje omezení živin pro produkci PHA. Do této skupiny se řadí *Cupriavidus necator* *Rhodopseudomonas palustris* a *Methylobacterium organophilum*. Druhá skupina syntetizuje PHA při růstu v kultivačním médiu a patří sem *Alcaligeneslatus* a rekombinantní *Escherichia coli* obsahující biosyntetické geny PHA. Downstream lze rozdělit do tří částí: 1) zakoncentrování biomasy z upstreamu, 2) izolace PHA a 3) přečištění získaného produktu. Obecné schéma variant řešení downstreamu je uvedeno na Obr. 1 Obecné schéma variant downstreamu [7]Obr. 1 [6, 7].

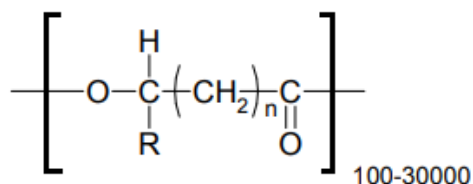


Obr. 1 Obecné schéma variant downstreamu [7]

PHA (viz Obr. 2) se vyznačují velkou variací fyzikálních vlastností od krystalických a křehkých až po měkké a lepkavé materiály. Tyto vlastnosti závisí na délce bočního alifatického řetězce. Mezi hlavní rysy patří nerozpustnost ve vodním prostředí spolu s relativní hydrolytickou odolností vůči degradaci či zvýšená odolnost vůči UV záření. Vyznačují se také špatnou odolností proti kyselému a zásaditému prostředí [8]. Ve srovnání s konvenčními syntetickými plasty jsou prozatím aplikace přírodních PHA omezeny z důvodu nízké tažnosti, náchylnosti k tepelné degradaci a vysokým výrobním nákladům [9].

Kromě přírodních PHA se vyrábí také syntetické PHA, které se vyznačují vlastnostmi šitými na míru pro biologicky rozložitelné materiály používané ve specifických odvětvích. Přírodní i syntetické PHA mají vysoký potenciál v nahrazení polymerních materiálů na bázi fosilních

paliv. Tyto bioplasty představují obnovitelný a udržitelný zdroj pro snížení požadavků na skládkování, aniž by byly perzistentní nebo způsobovaly znečištění [8].

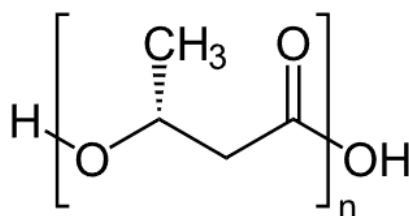


Obr. 2 Obecná struktura PHA [9]

1.1.1 Poly-3-hydroxybutyrát

Poly-3-hydroxybutyrát (PHB) (viz Obr. 3) je semikrystalický polymer charakterizovaný polymorfní krystalizací. Je schopný krystalizovat do dvou forem α a β [10]. Teplota skelného přechodu PHB je v rozmezí 4 až 7 °C a teplota tání 175 až 180 °C. Zpracovatelské okno PHB je velmi úzké, jelikož PHB degraduje na kyselinu krotonovou při teplotě o něco málo vyšší než je teplota tání. Kromě toho izotaktické a lineární řetězce vedou k tvorbě velkých sférolitů během krystalizace, což může vést k vysoké krystalinitě a následně ke vzniku křehkého materiálu [11, 12]. Mnoho PHB polymerů má vlastnosti podobné polypropylenu (PP) a polyetyleny (PE). [13]

Suroviny pro jeho výrobu zahrnují obnovitelné a udržitelné zdroje, jako je např. potravinový odpad. Tento faktor, společně s jeho mechanickými vlastnostmi, biokompatibilitou a predispozicí k biologickému rozkladu při vystavení určitému aktivnímu biologickému prostředí, z něj činí předního kandidáta na alternativu k syntetickým polymerům PP a PE. PHB navíc vykazuje dobré bariérové vlastnosti ve srovnání s polyetylentereftalátem (PET) a polyvinylchloridem (PVC) [13].



Obr. 3 Chemická struktura PHB [13]

PHB je produkován v buňkách mikroorganismů, jako produkt mikrobiálního sekundárního metabolismu obvykle v podmínkách, kdy jsou buňky vystaveny nutričnímu stresu nebo v nepříznivém prostředí, např. při nadbytku uhlíku s omezenými živinami. Stejně jako

u jiných polyesterů, k degradaci PHB může docházet několika způsoby: hydrolyza, chemický rozklad, tepelný rozklad nebo enzymatická hydrolyza [12, 14].

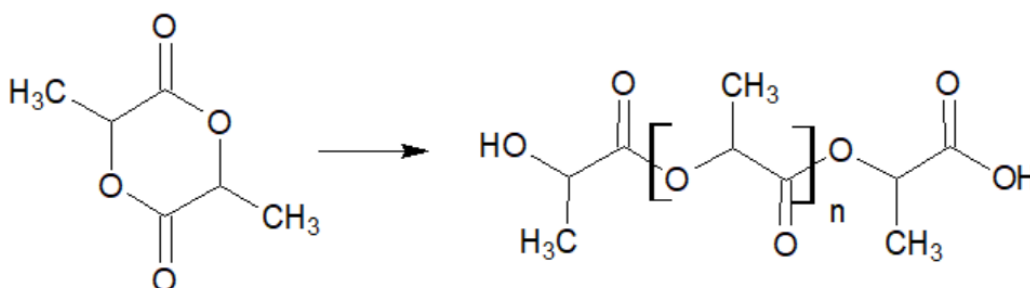
PHB mají pokročilé aplikace v lékařství, obalovém průmyslu a v zemědělství, kde se používají jako mulčovací fólie a nosiče herbicidů, fungicidů a insekticidů s dlouhodobým uvolňováním [15].

1.2 Kyselina polymléčná

První zmínka o izolaci kyseliny mléčné pochází z roku 1780. V roce 1932 Carothers a spol. [16] popsali dimerizaci monomerů kyseliny mléčné na laktid následovanou polymerizací za otevření kruhu. V 60. letech byla zjištěna její biologická rozložitelnost a netoxičita při použití v lékařství. V posledních dvou desetiletích bylo zaznamenáno rozsáhlé využití v mnoha dalších oblastech [17].

Surovina pro produkci kyseliny mléčné se získává fermentací glukózy nebo škrobu. Jako zdroj sacharidů může být využita kukuřice, pšenice, sladké brambory nebo rýže [17].

Nejběžnější cestou pro výrobu kyseliny polymléčné (PLA) je polymerace laktidu s otevřením kruhu (viz Obr. 4) a polykondenzace kyseliny mléčné.



Obr. 4 Syntéza PLA otevřením kruhu [18]

Vzhledem k chiralitě kyseliny mléčné existují různé formy PLA, jako jsou poly-L-laktid (PLLA), poly-D-laktid (PDLA), poly-D,L-laktid (PDLLA) a poly-(L-laktid-ko-D,L-laktid) neboli PLDLLA [19].

PLA je netoxický biologicky rozložitelný termoplastický lineární polyester pro své vlastnosti podobný polystyrenu. Dle odborných studií polymer ani jeho produkty degradace nejsou zadržovány v žádném z životně důležitých orgánů zvířat. Při použití v obalovém průmyslu má výbornou propustnost pro vodní páru, která se rychle odpařuje a zamezuje se tím porušení obalu. Nevýhodami PLA jsou nízká teplota skelného přechodu (cca 60 °C),

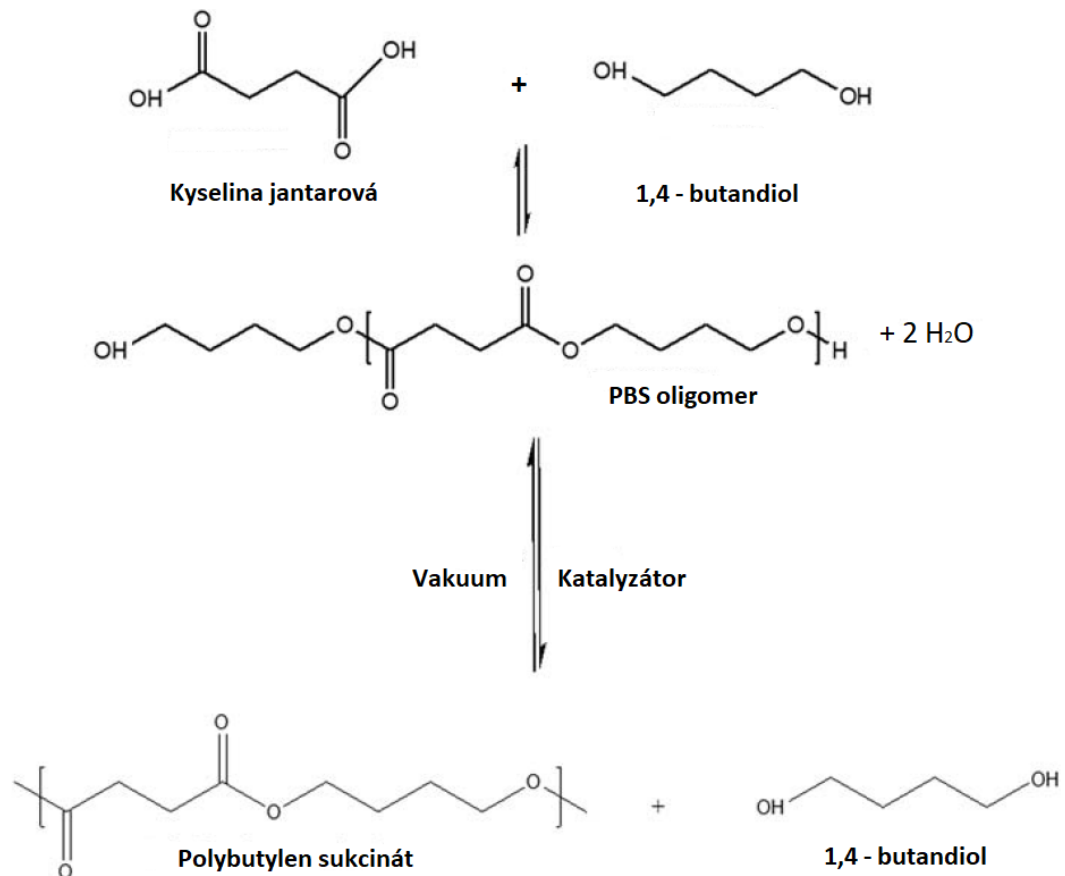
nízká viskozita taveniny, nízká houževnatost a hydrofilní povaha, která omezuje použití v komerčních aplikacích. PLA se momentálně využívá na mulčovací fólie, čajové a kávové sáčky, obaly na potraviny, v textilním průmyslu či v biomedicině. Je vhodný i pro 3D tisk [18–20].

Degradace PLA probíhá ve dvou krocích, kdy nejprve dochází k hydrolyze a následuje bakteriální atak na fragmentované zbytky. Zpočátku jsou polyesterové řetězce s vysokou molekulovou hmotností hydrolyzovány tak, aby tvořily oligomery kyseliny mléčné s nízkou molekulovou hmotností. Ve chvíli, kdy průměrná molekulová hmotnost dosáhne přibližně 10 000 Da, mikroorganismy obsažené v půdě začnou spotřebovávat oligomery s nízkou molekulovou hmotností, čímž produkují CO₂ a H₂O [18, 19].

1.3 Polybutylensukcinát

Polybutylensukcinát (PBS) je bílý krystalický alifatický polyester s hustotou 1,25 g/cm³, vynikající tažností při pokojové teplotě a prodloužením při přetržení až 300 %. Teplota skelného přechodu PBS je -45 až -10 °C a teplota tání je 90 až 120 °C. Vykazuje dobré mechanické vlastnosti a vynikající zpracovatelnost v textilních vláknech, při vstřikování, vytlačování a vyfukování. Ve skutečnosti má PBS široký teplotní rozsah, konkrétně s ním lze pracovat podobně jako s polyolefiny v rozmezí 160 až 200 °C [21, 22].

Monomery používané při syntéze PBS jsou kyselina jantarová a 1,4-butandiol, které se běžně získávají z fosilních zdrojů. Oba monomery je možné získat taktéž fermentačními procesy. PBS se běžně vyrábí polykondenzací ve dvou krocích. V prvním kroku probíhá esterifikace za vzniku oligomerů a molekul vody, zatímco ve druhém kroku se získává vysokomolekulární PBS, při současném odstraňování 1,4 butandiolu za zvýšené teploty a sníženého tlaku (viz Obr. 5) [23].



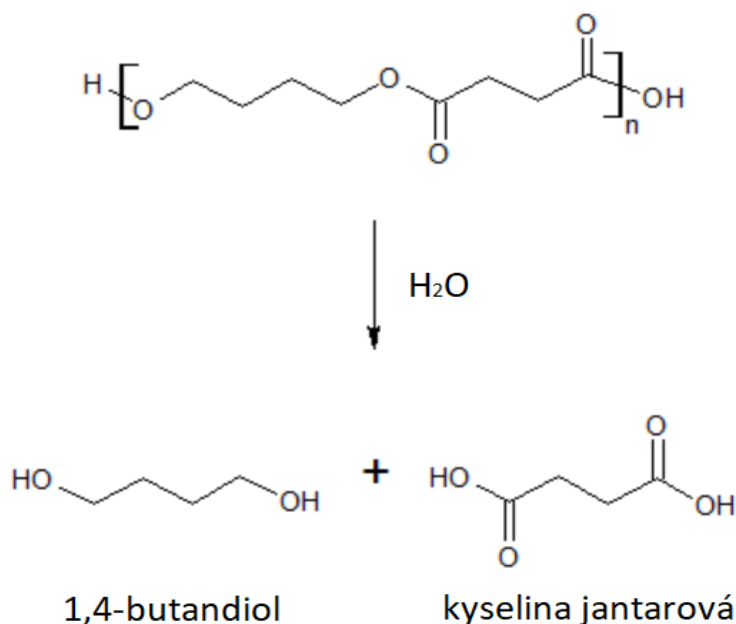
Obr. 5 Reakční schéma polymerace PBS [24]

Mechanické vlastnosti PBS závisí na množství přítomných diisokyanátů, které se používají jako prodlužovače řetězce. Vysoce molekulární PBS bez použití diisokyanátů vykazuje křehké chování s velmi krátkým prodloužením při přetržení. Zatímco použití diisokyanátů výrazně zlepšuje prodloužení až na hodnoty srovnatelné s polyolefiny [23, 24].

PBS je zcela biologicky rozložitelný a bioabsorbovatelný [25, 26]. V kompostovacím prostředí může být zcela degradován během šesti měsíců [27]. Stejně jako plasty na bázi ropy je možné jej recyklovat nebo spálit za účelem získání tepla [21].

Zejména pro účely recyklace je důležitá termomechanická stabilita materiálu, kdy např. v případě PE a PET může během procesu přetavení docházet ke zkracování délky polymerního řetězce. Kanemura a spol. [28] se zabývali mechanickými vlastnostmi a chemickou strukturou PBS po opětovném zpracování. V této studii došli k závěru, že degradovaný PBS při dalším zpracování resyntetizuje a dochází k obnovení molekulové hmotnosti na nepatrně nižší hodnotu než byla původní molekulová hmotnost. Tento jev nelze pozorovat např. u PLA. Mechanické vlastnosti původního PBS materiálu a 3x přepracovaného materiálu byly také téměř shodné. PBS se tedy jeví jako slibný materiál při recyklaci biologicky rozložitelných materiálů a jejich znovuvyužití pro další aplikace.

Existují různé studie degradace PBS, jako je hydrolytická (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), enzymatická a biologická, které korelují s řadou charakteristik polymerů, např. molekulová hmotnost a distribuce molekulových hmotností, krystalinita a tloušťka lamel [25, 26].



Obr. 6 Průběh hydrolytické degradace PBS [29]

Zhao a spol [30] se zabývali degradací PBS v prostředí kompostu, kdy bylo PBS ve formě prášku, granulí a filmu. Test biodegradace provedli dle normy ISO 14855 Stanovení úplné aerobní biodegradability za řízených podmínek kompostování. Po ukončení kompostovacího procesu (90 dní) došlo k největšímu rozpadu u PBS ve formě prášku (71,9 %) z důvodu největšího specifického povrchu dostupného pro napadení mikroorganismy. Pak následovalo PBS ve formě filmu (60,7 %) a nejnižší pokles hmotnosti byl u granulí (14,1 %). Degradace probíhala ve třech fázích, kdy první fáze byla pomalá, druhá fáze se zrychlila (fáze biologického rozkladu) a ve třetí fázi došlo k vyrovnání rychlosti degradace. Třetí fáze poukazovala na konečné procento rozkladu, kdy již nemůže polymer dosáhnout 100 % biologického odbourání z důvodu začlenění malé části polymeru do mikrobiální biomasy, humusu a dalších přírodních produktů. Z kompostu byly izolovány čtyři kmeny mikroorganismů, z nichž vykazoval nejvyšší schopnost odbourávání *Aspergillus versicolor*, který je běžným potravinovým kontaminantem.

Díky své biokompatibilitě, biologické rozložitelnosti, vysoce transparentnímu povrchu a tuhé konstrukci je použití PBS vhodné k široké škále aplikací, včetně mulčovacích fólií, kompostovatelných pytlů, netkaných textilií, cateringového zboží a pěn. PBS se také

vyskytuje v průmyslových odvětvích jako je zemědělství, rybolov, lesnictví a stavebnictví [31]. Značnou nevýhodou PBS je jeho vysoká cena. Dnes již existuje mnoho studií zabývajících se PBS vyztuženým přírodními plnivý. Cílem těchto studií je zvýšit mechanické vlastnosti a snížit cenu konečného výrobku [32, 34, 36, 38].

2 APLIKACE BIOLOGICKY ODBOURATELNÝCH POLYMERŮ V ZEMĚDELSTVÍ

Biologicky odbouratelné materiály se v zemědělství již úspěšně používají jako mulčovací fólie, spony na uchycení rostlin, ochrana stromů proti okousávání zvěří, kompostovací pytle a folie na ochranu před mrazem.

Proto se nabízí výzva k rozšíření portfolia odbouratelných produktů pro zemědělské aplikace také o biologicky rozložitelné sadbovače.

2.1 Mulčovací fólie

Použití plastových fólií pro zemědělské mulčování se celosvětově stále výrazně zvyšuje, jelikož mohou zlepšit výnos plodin, snížit spotřebu pesticidů na poli, stabilizovat vlhkost půdy a tak řešit poptávku po potravinách pro rostoucí světovou populaci. Většina mulčovacích fólií je však na bázi PE, což má za následek intenzivní zatížení zemědělské půdy zbytkovým PE a její kontaminaci. Tento problém ovšem při použití biologicky odbouratelných mulčovacích fólií odpadá [33].

Velkou nevýhodou biologicky odbouratelných fólií je jejich ne příliš dlouhá životnost. Avšak existuje již mnoho studií [35, 37, 39], které uvádí, že i přes časnou degradaci fólií je výnosnost plodin podobná jako při použití mulčovacích fólií z PE [40, 41].

Další nevýhodou je omezené použití ve velkém měřítku z důvodu vysoké pořizovací ceny oproti mulčovací fólii z PE. Z tohoto důvodu se často biologicky odbouratelné fólie vyrábí podstatně tenčí, což má, ale za následek zrychlení procesu rozkladu [42].

2.2 Ochrana stromů

Okousání zvěří vede často k dlouhodobému vegetativnímu poškození mladých rostlin. Ve svých raných letech jsou stromy a rostliny velmi náchylné, a proto vyžadují ochranu. Pro tuto ochranu jsou využívány límce obepínající kmen, které jsou obvykle z PP či jiných běžných syntetických polymerů stabilizovaných vůči UV záření. Tyto obaly nebo jejich odlomené části nejsou sbírány a hromadí se tak v přírodě. Biologicky odbouratelné límce poskytují stromu ochranu a stabilitu v kritické fázi růstu. Po skončení životnosti mohou zůstat v přírodě, protože jsou mikroorganismy zcela přeměněny na CO₂, vodu a biomasu. Znečišťování životního prostředí je tedy eliminováno [43].

2.3 Sadbovače přírodního původu dostupné na trhu

2.3.1 Sadbovače z kravského hnoje

Pod značkou „CowPots“ jsou na trhu dostupné sadbovače vyráběné z kompostovaného kravského hnoje. Odebraný kravský hnůj je nejprve přepraven do reaktoru, kde za nepřítomnosti kyslíku bakterie rozkládají organickou hmotu (tzv. anaerobní proces). Při procesu dochází ke vzniku bio plynu, který je dále spalován. Dalším produktem je digestát, který obsahuje zbývající pevné látky, buněčný materiál, živiny, huminové a fulvonové látky. Na konci procesu jsou pevné látky odděleny od kapalné fáze, která se vrací zpět na pole. Pevná fáze je následně formována do tvaru sadbovačů, viz Obr. 7. Tato americká firma zaručuje rozklad sadbovače v půdě během jednoho vegetačního období. Nicméně při zvýšeném kontaktu s vodou v průběhu již krátké doby dochází k zrychlení procesu rozkladu za přítomnosti vznikající plísně a řas. Předpokládá se, že sadbovače dodávají při svém rozkladu rostlinám živiny, ovšem výrobce doporučuje již při objevení druhotných lístků na sazenici přidání tekutého hnojiva. Sadbovače nejsou prozatím dostupné na Evropském trhu [44, 45].



Obr. 7 Sadbovače „CowPots“ [44]

2.3.2 Sadbovače z dřevěných vláken

Sadbovače „FERTILPOT“ jsou vyráběny z dřevěných vláken, která pocházejí z mezitěžby v lesích Vosges (oblast východní Francie) blízko továrny Fertil. Sadbovače jsou pevné a během kultivačního procesu rozměrově stabilní. Udávaná životnost je více jak rok. Během tří měsíců po přesazení do půdy deklarují 100 % rozklad (viz Obr. 8) na humus a přeměně na minerály využitelné pro rostlinu [46].



Obr. 8 Fáze rozkladu sadbovače FERTILPOT [46]

2.3.3 Sadbovače z rašeliny

Společnost Jiffy Growing Solutions nabízí na trhu sadbovače „JiffyPots“ vyrobené kanadského rašeliníku a dřevěné buničiny (viz Obr. 9). Obsah rašeliny poskytuje optimální poréznost a lepší pronikání kořenů, zatímco dřevěné vláno dodává květináči strukturní pevnost. JiffyPots jsou dle výrobce zcela biologicky odbouratelné [47].

Zde vyvstává otázka, zda je náhrada plastových květináčů za rašelinové ekologičtější. Rašelina se hromadí za anaerobních podmínek po tisíce let z částečně rozpadlého rašeliníku, trav a dalších rostlin. Jedná se o velmi flexibilní materiál, který lze přizpůsobit většině rostlin, jelikož má obecně nízký obsah živin, pH a objemovou hmotnost. Navíc vykazuje příznivou kapacitu výměny kationtů a vzduchem plněnou poréznost. Rašeliníště jsou však důležitými zásobárnami uhlíku a těžba rašeliny má za následek významné emise oxidu uhličitého, metanu a oxidu dusného [48]. Navíc některé státy již nyní těžbu redukují nebo rašeliníště zcela uzavírají.



Obr. 9 Sadbovače „JiffyPots“ [47]

2.3.4 Sadbovače z kokosových vláken

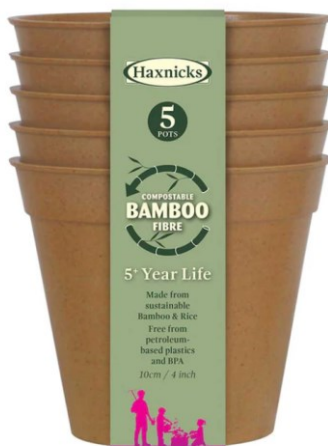
Společnost CoirProducts nabízí na trhu sadbovače vyrobené z přírodního kokosového vlákna v kombinaci s přírodním latexem jako pojivem (viz Obr. 10). Kokosové vlákno umožňuje kořenům sazenice proniknout skrze stěny, aby se mohly dále rozvíjet, čímž je eliminován šok z přesazování. Jsou 100 % přírodní a biologicky odbouratelné. Dobře absorbují vodu a udržují kořeny vlhké, ale zabraňují jejich převlhčení a následné hnilobě. Po přesazení do půdy začnou dle výrobce degradovat přibližně za 4 až 6 týdnů [49].



Obr. 10 Sadbovače z kokosových vláken [49]

2.3.5 Sadbovače z bambusových vláken

Bambusové sadbovače nabízí na trhu společnost Haxnicks. Tyto sadbovače jsou vyrobeny z bambusového vlákna, rýžového škrobu a pryskyřice vyrobené z přirozeně se vyskytujících organických sloučenin (polyresin) a proto jsou biologicky odbouratelné a kompostovatelné (viz Obr. 11). Jsou použitelné v interiéru i exteriéru a jejich životnost je více jak 5 let. Kompostovací proces může trvat 6 až 12 měsíců, ovšem dezintegrace na malé kousky tento proces urychlí. Pokud jsou sadbovače vloženy do půdy, jejich rozklad může trvat po dobu 1 až 3 let. [50]



Obr. 11 Sadbovače z bambusových vláken [50]

2.3.6 Sadbovače z recyklovaného korku

Korek je přírodní, obnovitelná, udržitelná a biologicky odbouratelná surovina získávaná z vnější kůry stromu *Quercus suber*. Chemické složení korku závisí na podmínkách růstu, geografickém a genetickém původu a stáří stromu. Hlavními složkami korku jsou suberin, lignin, celulóza, hemicelulóza, vosky a taniny. Díky své struktuře a chemickému složení má korek jedinečný soubor vlastností, jako je nízká hustota, hydrofobní charakter, chemická a mikrobiologická stabilita a nízká propustnost pro plyny a kapaliny. [51]

Jedním z výrobců korkových sadbovačů (viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**) dostupných na českém trhu je portugalská společnost Life in a bag [52].



Obr. 12 Sadbovače Grow Cork [52]

2.3.7 Sadbovače z recyklovaného papíru

Sadbovače řady „EcoGrow“ společnosti The HC Companies jsou vyráběny z recyklovaného novinového papíru a vlnitých lepenek (viz Obr. 13). Sadbovače umožňují volný pohyb vlhkosti po stěnách nádoby pro optimální odvod vody a zamezení uhnívání kořenů. Sadbovače také umožňují vzdušné prořezávání, což znamená, že při vystavení kořenů vzduchu dochází k odumírání starých kořenů a neustálé produkci nových a zdravých kořenů. Společnost garantuje dobu rozpadu méně než 3 roky [53].



Obr. 13 Sadbovače EcoGrow [53]

2.4 Výzkum alternativních sadbovačů

Tato kapitola se zabývá studii publikovanými v odborných časopisech na téma biologicky rozložitelných sadbovačů.

2.4.1 Recyklace rostlinného odpadu z rajčat a konopných vláken

Schettini a spol [54] použili pro výrobu sadbovačů semena a slupky rajčat, konopná vlákna a jako polymerní matrici zvolili alginát sodný, který je schopný podléhat v přítomnosti přirozeně se vyskytujícího vápníku v půdě spontánnímu iontovému zesílení. Vzniklá alginátová síť má za následek voděodolnost sadbovače. Vzorky byly podrobeny mechanickým zkouškám, zkouškám propustnosti vodní páry a byla také hodnocena nasákavost, morfologie a biologická rozložitelnost v polních podmínkách. Z výsledků bylo zjištěno, že při tvorbě alginátové sítě dochází k silné fyzikální interakci mezi alginátem sodným a vápenatými ionty. Zesíťovaná struktura byla schopná fyzicky zachytit vyztužující vlákna pomocí vodíkových vazeb. Při zkoumání biologické rozložitelnosti, byly vzorky nejprve na dobu 35 dní vystaveny průměrné teplotě ve skleníku 31,6 °C a relativní vlhkosti

53,8 %. Po celou dobu vzorky vydržely neporušené. Sadbovače umožnily rozvoj kořenové struktury rostlinky s dobrou strukturou větvení a rozvoj sekundárního větvení, kterým rostliny přijímají vodu a živiny. Po přesazení do půdy došlo během 16 dní u všech sadbovačů k úplnému rozkladu, což umožnilo přechod kořenů stěnami nádoby a dalšímu růstu rostlin.

2.4.2 Kompozit na bázi slámy a kukuřičného škrobu

Studie z roku 2022 poukazuje na abnormální produkci rostlinných zbytků při pěstování obilí a rýže v Indii. Tyto rostlinné zbytky nepodléhají rychlé biologické degradaci. V některých oblastech Indie je současným trendem spalování těchto rostlinných zbytků přímo na poli, čímž dochází ke snížení půdní mikroflóry, organického C a zamezení recyklace masy. Zároveň dochází ke znečišťování ovzduší v důsledku emisí částic a skleníkových plynů. Z tohoto důvodu byla při této studii použita pro přípravu biologicky rozložitelných sadbovačů sláma (opracovaná a neopracovaná). Sláma měla funkci plniva, kukuřičný škrob byl použit jako matrice a glycerol jako změkčovač. Připravené sadbovače byly shledány jako fyzikálně stabilní po dobu 28 až 30 dní ve skleníkových podmínkách. Proměnné růstu modelových rostlin okurky (*Cucumis sativus*) v připravených sadbovačích byly srovnatelné s rostlinkami pěstovanými v plastových sadbovačích. Po přesazení do půdy došlo k jejich rozpadu během 10 až 20 dní. Během degradace by podle autorů měly mikrobiální enzymy ze slámy (amyláza, celulóza atd.) působit na organickou hmotu sadbovačů a mělo by tak docházet k uvolňování makro a mikroživin do půdy a také ke zvyšování obsahu organického uhlíku v půdě [55].

2.4.3 Biologicky rozložitelné nádoby z různých zemědělských odpadů a vedlejších produktů

Fuentes a spol. [2] zpracovali ve své studii pro přípravu sadbovačů želatinu (produkt masného/kožedělného průmyslu), pšeničnou odpadní mouku, kukuřičnou mouku, použitý celulózový papír, slupky slunečnicových semen, rýžové slupky a odpadní částí cesmíny paraguajské. Z uvedených surovin byly vybrány různé formulace pro přípravu biokompozitů. Cílem studie bylo vytvořit biologicky odbouratelné sadbovače s možnou schopností hnojení. U připravených sadbovačů byla stanovena zdánlivá hustota z důvodu prostupu živin a vlhkosti z okolní půdy. Dále byly podrobeny mechanickým zkouškám, zkoušce rozpustnosti a absorpce vody, biodegradačnímu testu a také byl sledován růst rostlin v těchto sadbovačích. Ze získaných výsledků se jako nejvhodnější jevíly sadbovače na bázi

želatiny. Navzdory skutečnosti, že tyto formulace měly nejvyšší hustotu, vysoká rozpustnost želatiny jim umožnila dosáhnout značných rychlostí rozkladu v půdě. Receptury na bázi pšeničné a kukuřičné mouky a papíru se zdály vhodné pro přípravu kompostovatelných sadbovačů. Tyto materiály sice vykazovaly nízkou hustotu, která umožňuje rozklad v půdě, ovšem vzhledem k jejich nízké rozpustnosti docházelo ke zpomalení rozkladu. Aby se potvrdilo chování těchto biokompozitů v polních podmínkách, byly do všech připravených sadbovačů vloženy sazenice papriky (*Capsicum baccatum*). Tento test navíc umožnil analyzovat hnojící účinek v důsledku rozkladu. Rostliny v sadbovačích na bázi želatiny vykazovaly po čtyřech týdnech zdravý růst, vysoký vývoj a ve srovnání s ostatními rostlinami také vyšší počet listů. Kompozity na bázi pšeničné mouky s obsahem slunečnicových a rýžových semen vykazovaly nižší index rozložitelnosti než želatinové s výjimkou formulace s cesmínou. Rostlinky v těchto sadbovačích vykazovaly zpomalený vývoj. Formulace na bázi kukuřičné mouky vykazovaly podobné chování jako ty z pšeničné mouky. V obou případech došlo po čtyřech týdnech na vzduchu k rozpadu, ovšem část umístěná v půdě nepodléhala dezintegraci. Nejnižší úroveň rozpadu pak vykazovaly sadbovače vyrobené z papíru, ovšem rostlinky vykazovaly abnormální vývoj.

2.4.4 Biologicky odbouratelné sadbovače z odpadů kožedělného průmyslu

Sartore a spol. [56] popsali přípravu biologicky odbouratelných sadbovačů z odpadů kožedělného průmyslu plněných částicemi přírodního původu (dřevní moučkou). Autoři použili protein získaný jako vedlejší produkt kožedělného průmyslu spolu s epoxidovým sójovým olejem a etylendiaminem jako síťovacím činidlem. Po vytvrzení byly sadbovače testovány ponořením do vody, kdy došlo k jejich úplné degradaci již po dvou dnech. Sadbovače vykazovaly taktéž dobrou mechanickou odolnost pro zajištění funkčnosti materiálu po dobu životnosti, tj. od výsevu po přesazení do půdy, kde zcela degradují, což podporuje hnojení rostlin.

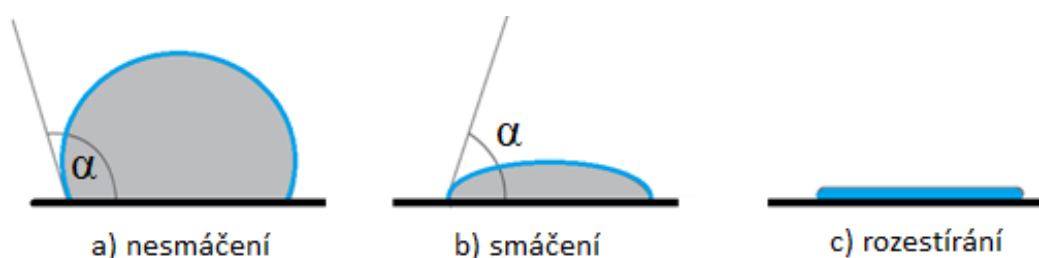
3 METODY CHARAKTERIZACE DEGRADABILNÍCH POLYMERŮ

Vlastnosti jak degradabilních, tak biologicky degradabilních materiálů lze stanovit obdobnými technikami jako u konvenčních plastů. Tato kapitola se zaměřuje na techniky, které byly využity v praktické části diplomové práce.

3.1 Kontaktní úhel smáčení

Toto stanovení se používá pro charakterizaci hydrofobnosti povrchu materiálů. Při nanášení kapky na vzorek v plynném prostředí dochází ke generování tří mezifázových povrchů, plyn - pevný povrch, plyn - kapalina a kapalina - pevný povrch. Úhel smáčení je pak takový úhel, který svírá tečna k povrchu kapky vedená v bodě styku tří fází. Tato metoda je citlivá na chemickou strukturu svrchní vrstvy molekul. Jedná se o levnou a relativně jednoduchou metodu, která je velmi rozšířená pro charakterizaci polymerních povrchů. Měření lze provádět na povrchu materiálů několika různými metodami, např. metoda přisedlých kapek, měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce nebo Wilhelmyho metoda vyvažování destiček [57, 58].

Povrchy smáčené kapalinou vykazující úhel menší jak 90° se nazývají lyofilní, v případě vody pak hydrofilní. Pokud ke smáčení nedojde, je úhel smáčení větší než 90° , povrch je lyofobní, v případě vody hydrofobní. Je-li povrchová energie tuhé látky větší než součet povrchové energie kapaliny a mezifázové energie tuhá látka – kapalina, nemůže dojít k rovnováze a kapka vytvoří na testovaném povrchu souvislou vrstvu, čímž nastává tzv. rozestírání. Toto chování je vyobrazeno na Obr. 14 [59].



Obr. 14 Chování kapky kapaliny v mobilním rozhraní [59]

3.1.1 Měření úhlu smáčení na přisedlé kapce

Jedná se o jednu z nejrozšířenějších metod měření úhlu smáčení, kdy se přímo měří úhel tečny v třífázovém rovnovážném bodě rozhraní přisedlé kapky. Pomocí mikropipety

se nanese na hladký povrch kapka kapaliny a pomocí goniometrického okuláru je snímán tvar kapky. Následně se obkreslí obrysy přisedlé kapky, tj. alespoň tři body kružnice, které charakterizují kapku pomocí metody nejmenších čtverců. Následné vyhodnocení probíhá pomocí počítačového softwaru. Kontaktní úhel je pak vyhodnocen jako tangenta opsané kružnice. Výsledky této metody však mohou být poněkud subjektivní a záleží na přesnosti měření obsluhy [59].

3.1.2 Povrchová energie

Dalším faktorem ovlivňujícím proces smáčení je povrchová energie pevné látky. Jedná se o fyzikální jev způsobený intermolekulárními interakcemi na rozhraní. Obecně se povrchová energie popisuje jako stav kapaliny, kdy zaujímá nejnižší energii. Číselně se rovná povrchovému napětí, udává se ovšem v mJ/m^2 . V případě povrchové energie, avšak vyšší hodnota znamená smáčivý povrch a nižší hodnota nesmáčivý povrch [60].

K měření povrchové energie je možné použít několik metod. V této diplomové práci byl pro výpočet použit Li-Neumannův model. Stanovení se provádí pomocí naměřených hodnot kontaktních úhlů a známého povrchového napětí kapaliny. Povrchové napětí se pak podle tohoto modelu vypočte následovně:

$$\gamma_{sl} = \gamma_{lv} + \gamma_{sv} - 2 \cdot \sqrt{\gamma_{lv} \cdot \gamma_{sv}} \cdot e^{-0,0001247 \cdot (\gamma_{lv} - \gamma_{sv})^2} \quad (1)$$

kde: γ_{sl} - energie na rozhraní kapalina/tuhá fáze

γ_{lv} - povrchové napětí kapaliny

γ_{sv} - povrchové napětí tuhé látky [60]

3.2 Nasákavost plastů ve vodě

Metoda nasákavosti plastů ve vodě se provádí dle normy ČSN EN ISO 62 (640112) Plasty – Stanovení nasákavosti ve vodě [61]. Principem metody je ponoření zkušebních vzorků do destilované vody o teplotě $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo do vroucí destilované vody. Případně mohou být vzorky vystaveny 50% relativní vlhkosti vzduchu při dané teplotě po předepsanou dobu. Množství absorbované vody je stanovenou změnou hmotnosti, tj. rozdíl mezi počáteční hmotností vzorku a hmotností vzorku po expozici vody. Přičemž změna je vyjádřena v procentech původní hmotnosti. V případě potřeby lze také určit množství vody odpařené po vysušení zkušebních vzorků [61].

3.3 Rázová zkouška – Charpyho kladivo

Rázová zkouška Charpyho kladivem je popsána normou ČSN EN ISO 179-1 [62]. Podstatou zkoušky je vodorovné umístění zkušební tělesa ve tvaru hranolu o tloušťce h a šířce b na dvě podpěry, kdy je těleso přeraženo pomocí kinetické energie kladiva se závažím. Rázová houževnatost Charpy zkušebních těles bez vrubu (a_K) vyjádřená v kJ/m^2 se vypočítá dle vzorce:

$$a_K = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (2)$$

kde: E_c – korigovaná energie v joulech spotřebovaná při přeražení zkušební tělesa

h – tloušťka zkušební tělesa v mm

b – šířka zkušební tělesa v mm [62]

3.4 Stanovení biodegradability polymerů

Biologicky odbouratelný plast lze definovat dle ČSN EN ISO 472:2015 [63] jako „plast, který podléhá významnému stupni mineralizace, tedy přeměně na H_2O , CO_2 a/nebo CH_4 za specifických podmínek v důsledku působení přirozeně se vyskytujících mikroorganismů.“ Mezi biodegradací procesy lze zařadit kompostování, hydrolytické štěpení a oxidační štěpení polymerních řetězců [64].

Degradace polymerů zahrnuje změny jak v chemické struktuře, tak ve fyzikálních a mechanických vlastnostech, které mají za následek ztrátu vlastností, jako jsou pevnost v tahu, rázová houževnatost, barva atd. Procesy, kterými mohou polymery podléhat degradaci jsou tepelné, mechanické, hydrolytické, chemické, biologické, radiolytické a fotolytické [65]. Doba potřebná k určitému stupni degradace závisí na typu polymeru, morfologii a podmínkách, kterým je vystaven. Některé plasty ovšem mohou po skončení jejich doby použitelnosti degradovat na malé částice, které nemusí být asimilovány přítomnými mikroorganismy a dochází tak ke znečišťování životního prostředí. V přírodě zcela rozložitelné plasty lze získat pomocí biopolymerů (polymerů odvozených z obnovitelných zdrojů biomasy), kam spadají mimo jiné PHA, celulóza a škrob. K získání degradovatelných plastů lze použít také některé syntetické polymery, jako je polykaprolakton a polyvinylalkohol [66, 67].

V současné době je průmyslové kompostování preferovanou cestou organického zhodnocování biologicky rozložitelných plastů [64].

3.4.1 Definice kompostování

Podle Americké agentury pro ochranu životního prostředí (EPA) kompostování znamená řízený biologický rozklad organického materiálu za přítomnosti vzduchu za vzniku humusu podobného materiálu. Mezi řízení metody kompostování patří mechanické míchání a provzdušňování, ventilace materiálů řadou provzdušňovaných komor nebo umístění kompostu na čerstvém vzduchu a jeho pravidelné promíchávání. Obdobně také normy ASTM D 6400-04 [68] a ASTM D 6002-96 [69] definují kompostování jako řízený proces, který reguluje biologický rozklad a transformaci biologicky rozložitelných materiálů na humusovou látku zvanou kompost.

Dle normy ISO 17088:2021 [70] je kompostování definováno jako autotermní a termofilní biologický rozklad organického odpadu v přítomnosti kyslíku a za řízených podmínek působením mikro a makroorganismů za účelem výroby kompostu. Zde je kompost definován jako organický půdní kondicionér získaný biodegradací směsi sestávající převážně z rostlinných zbytků, příležitostně s jinými organickými látkami a mající omezený obsah minerálních látek [71].

Kompostování je tedy přírodní aerobní proces, při kterém se činností mikroorganismů a makroorganismů přeměňuje využitelný biologicky odbouratelný odpad na stabilizovaný výstup – kompost. Dochází při něm k rozkladu a přeměně organického materiálu na půdu podobný produkt zvaný humus. Kompostovací proces využívá mikroorganismy (jako jsou bakterie, kvasinky a plísně) k rozkladu organického materiálu. Pro správnou funkci tohoto procesu je nezbytný přísun živin, vody a kyslíku pro mikroorganismy. Rovněž je důležité řízení teploty a vhodný poměr uhlíku k dusíku (C/N) ve vztahu k optimální biologické aktivitě v různých fázích procesu. Kompost lze vyrobit z většiny organických vedlejších produktů, např. odpadů ze zpracování potravin, kalů z čistíren odpadních vod, listí, křoviny atd [71, 72].

Při kompostování mikroorganismy rozkládají organickou hmotu za vzniku CO₂, H₂O, tepla a kompostu. Vlastnosti vzniklého kompostu jsou závislé na vstupních surovinách a faktorech ovlivňující průběh procesu [71, 73].

3.4.2 Metoda dle ISO 20200:2015

Jedná se o metodu pro zjištění stupně dezintegrace testovaných materiálů v laboratorním měřítku za podmínek simulujících intenzivní proces aerobního kompostování. Použitá pevná matrice se stává ze syntetického pevného odpadu naočkovaného vyzrálým kompostem

odebraným z komerční kompostárny. S takto připravenou pevnou maticí se kompostují připravené zkušební vzorky. Stupeň rozpadu se stanoví po kompostovacím cyklu proséváním konečné matrice přes 2 mm síto, pro znovuzískání nerozpadlého zkušebního materiálu. Snížení hmotnosti zkušební vzorku se považuje za dezintegrováný materiál a použije se pro výpočet stupně dezintegrace [71]. Nerozložené kousky zkoušených kompozitů byly dále v praktické části podrobeny infračervené spektroskopii pro zjištění chemické struktury.

V průběhu kompostovacího procesu je vhodné a doporučené sledovat změny teploty a pH, aby byla po celou dobu procesu zajištěna kontrola v porovnání s procesem v referenčních reaktorech (tedy syntetického odpadu bez zkušebních těles). Po ukončení testu kompostování norma udává analýzu výsledného kompostu (poměr C/N, obsah pevných těkavých látek) a doporučují se další analýzy, např. stanovení obsahu kovů či test fytotoxicity [74].

Pro stanovení biodegradability existují i další normy, které nebyly v diplomové práci použity, tj. ČSN EN ISO 14855-1 Stanovení úplné aerobní biodegradability za řízených podmínek kompostování – Metoda stanovení uvolněného oxidu uhličitého – Část 1: Obecná metoda [75], ČSN EN ISO 14855-2 Stanovení úplné aerobní biodegradability za řízených podmínek kompostování – Metoda stanovení uvolněného oxidu uhličitého – Část 2: Gravimetrické stanovení uvolněného oxidu uhličitého v laboratorním měřítku [76] a ČSN EN 14806 Obaly předběžné hodnocení rozpadu obalových materiálů v modelových podmínkách kompostování v laboratorním měřítku [77].

3.5 Infračervená spektroskopie

Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací se zeslabeným úplným odrazem (ATR-FTIR) je analytická metoda založená na průchodu a absorpci infračerveného (IR) záření vzorkem. Chemické vazby vibrují na charakteristických frekvencích, a při vystavení IR záření je absorbují na frekvencích, které odpovídají jejich vibračním režimům. Měřením frekvence absorpce záření vzniká spektrum, které lze použít k identifikaci funkčních skupin a sloučenin a také přispívá k porozumění chemických změn během degradačních procesů [78, 79].

3.6 Test fytotoxicity (řeřichový test)

Fytotoxicita je schopnost látky způsobit rostlině dočasné nebo dlouhodobé poškození. Může postihnou celou rostlinu nebo jen její části jako jsou listy, kořeny, plody nebo výhonky. Příznaky se mohou projevit např. řidnutím listů, barevnými změnami, deformací rostliny, či nekrózou [80].

Jedná se o metodu vyhodnocování intenzity rozkladu organických surovin a zralosti výsledného kompostu. Metoda je založená na výpočtu indexu klíčivosti (*IK*) citlivé rostliny (*Lepidium sativum*) v prostředí vodního výluhu kompostu dle Rovnice 3. Hodnota fytotoxicity je přímým ukazatelem obsahu toxických meziproductů vznikajících při aerobním rozkladu organických odpadů. Umožňuje kvalitativní ohodnocení intenzity rozkladu. Je-li *IK* kolem 80 až 100 % je ukazatelem zralého kompostu vhodného pro další použití. V případě, že je *IK* 60 až 80 % je kompost částečně zralý a je možné jej aplikovat, ovšem s rizikem poškození citlivých rostlin. Pokud je hodnota *IK* pod 60 % kompost je nezralý a nepoužitelný k přímé aplikaci [81].

$$IK = \frac{k_v \cdot l_v}{k_k \cdot l_k} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

Kde: k_v – klíčivost vzorku (%)

k_k – klíčivost kontroly (%)

l_v – průměrná délka kořínků vzorku (mm)

l_k – průměrná délka kořínků kontroly (mm)

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 CÍL PRÁCE

Na základě literární rešerše a dosud známých produktů na trhu bylo cílem práce navrhnout několik receptur z nevyužitých zemědělských, papírenských a obalových druhotných surovin vhodných pro výrobu sadbovačů a následně byly definovány dílčí cíle:

- Příprava série vzorků směsí o různých poměrech vstupních surovin;
- Základní charakterizace směsí s cílem selekce nejoptimálnějších receptur;
- Charakterizace fyzikálních, chemických a mechanických vlastností;
- Stanovení rozložitelnosti vzorků.

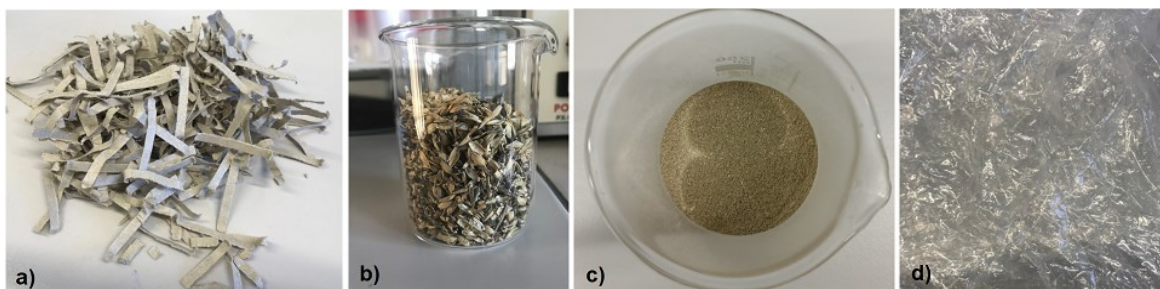
Pro zamýšlené aplikace je důležitým faktorem mechanická odolnost kompozice, která se stanoví rázovou zkouškou Charpyho kladivem. Z hlediska odolnosti proti vlhkosti se porovnávají hodnoty kontaktních úhlů, resp. povrchové energie a nasákavost vzorků. Biologická dezintegrace navržených formulací je posouzena díky procesu kompostování v simulovaných laboratorních podmínkách s následnou charakterizací jak nerozložených částí zkušebních těles, tak výsledného kompostu a jeho vlivu na zástupce vyšších dvouděložných rostlin.

5 MATERIÁL A METODIKA

5.1 Materiál

Pro praktickou část práce byly použity následující materiály (viz Obr. 15):

- PBS folie pro balení ovoce a zeleniny od firmy PEBAL s.r.o. o tloušťce 0,02 mm – nestandardní části vyřazené z dalšího zpracování;
- Plevy od lokálního zemědělce František Čech, Lučice 18, Bělotín – jedná se o suché, šupinaté ochranné obaly z obilného zrna, které jsou pro lidi nestravitelné a jsou tedy při sklizni odstraněny [82];
- Kraftový papír pořízený v papírnictví EPOS spol. s.r.o., (90 g/m²).



Obr. 15 Vstupní suroviny: a) kraftový papír, b) plevy, d) plevy dezintegrované na frakci <0,5 mm, c) PBS folie

5.1.1 Předúprava materiálu

Plevy byly nejprve předsušeny v laboratorní sušárně při teplotě 35 °C po dobu 24 hodin. Po vysušení byly rozemlety na laboratorním mlýnu (POLYMIX PX-MFC 90 D, Kinematica GmbH, Německo, viz Obr. 16) na velikost frakce <2 mm (hrubě namleté plevy) anebo <0,5 mm (jemně namleté plevy). Kraftový papír byl dezintegrován na menší části pomocí kancelářské skartovačky. PBS folie nebyla před zpracováním upravována.



Obr. 16 Laboratorní mlýn
POLYMIX PX-MFC 90 D

5.1.2 Kompozice

Před přípravou vzorků bylo vytipováno procentuální zastoupení jednotlivých složek nejprve s nízkým a vysokým obsahem PBS (tzn. 10 hm. % a 40 hm. %). V průběhu přípravy byly dle zpracovatelnosti a kompaktnosti kompozitu navrženy další poměry jednotlivých složek ve vzorcích. Následující tabulka (Tab. 1) uvádí procentuální zastoupení složek všech navržených vzorků.

Tab. 1 Procentuální zastoupení jednotlivých složek v daných vzorcích

Označení vzorku	PBS [hm. %]	Kraftový papír [hm. %]	Plevy – frakce < 2 mm [hm. %]
10/20/70	10	20	70
20/80	20	-	80
20/10/70	20	10	70
20/20/60	20	20	60
20/40/40	20	40	40
30/70	30	-	70
30/10/60	30	10	60
30/20/50	30	20	50
30/35/35	30	35	35
40/20/40	40	20	40

5.1.3 Příprava vzorků

Vzorky byly připraveny na hnětiči Brabender DSE 20/40 (Plastograph® EC plus, Mixer 50EHT32, Německo, Obr. 17) za podmínek 100 °C, 30 ot./min po celkovou dobu 9 min. Jednotlivé suroviny byly přidávány v intervalech 0 min PBS, 2 min papír a 4 min plevy o dané velikosti frakce. Všechny vzorky byly nejprve připraveny z plev o frakci <2 mm. Dále byly všechny funkční vzorky připraveny stejným postupem, ale z plev o frakci <0,5 mm. Následně byly z připravených vzorků na ručním lisu vylisovány při teplotě 120 °C po dobu 10 min destičky o velikosti 120 x 120 x 4 mm.



Obr. 17 Hnětič použitý pro přípravu vzorků

5.1.4 Vizuální hodnocení vzorků

Vzorek 30/70 obsahující 30 hm. % PBS a 70 hm. % plev vykazoval jak pro frakci <0,5 mm, tak pro frakci <2 mm dobrou soudržnost. Vylisované destičky byly lehce ohebné. Zatímco při použití pouze 20 hm. % PBS a 80 hm. % plev frakce <2 mm už došlo u tohoto vzorku (20/80) k výrazné dezintegraci. Z tohoto důvodu nebyl vzorek připravován při frakci plev <0,5 mm a tato kompozice byla vyřazena. Vzorky 10/20/70, 20/40/40 a 20/20/60 se nepodařilo termoplasticky zpracovat. U vzorků 20/10/70 s oběma typy frakcí došlo k dobré soudržnosti a byla pozorována podobnost se vzorky 30/70. Po vylisování destiček si vzorky zachovaly přirozený nahnědlý odstín od plev o frakci <0,5 mm. Co se týče povrchu, při použití jemných plev byl povrch hladký a voskový. Zatímco v případě hrubých plev byla pozorována nesourodost povrchu, což bylo způsobeno inkorporací zvolené frakce plev do struktury. Vzorky také vykazovaly relativní pevnost, kdy v případě použití malého

obsahu papíru (10 hm. %) došlo k nárůstu pevnosti. Na základě zjištění kompaktnosti a celistvosti těchto kompozitů bylo přistoupeno k přípravě vzorků s vyšším obsahem PBS.

U připravených vzorků 30/10/60, 30/20/50 a 30/35/35 byla velmi dobrá soudržnost. S přibývajícím obsahem kraftového papíru docházelo k tmavnutí odstínu vzorků a klesala kvalita povrchu, tj. hladkost, kdy u vzorku 30/35/35 byl povrch hrubý a nerovnoměrný. Tento jev ovšem nebyl pozorován u vzorků z jemně namletých plev (tzn. frakce <0,5 mm).

Vzorek s nejvyšším obsahem PBS, tj. 40/20/40 vykazoval i v případě hrubě namletých plev voskový povrch. Vzorek vykazoval při manipulaci nejvyšší houževnatost, kdy musela být vynaložena větší manuální síla pro zlomení.

Po porovnání všech vzorků bylo dle předpokladu zjištěno, že ve všech případech vzorky z jemně mletých plev vykazovaly lepší soudržnost a celistvější povrch. Co se týče obsahu PBS, jeví se nejlépe vzorky s obsahem 30 hm. % polymeru. Pokud bylo množství PBS menší, vzorky byly poddajné a měly horší kvalitu povrchu. V případě vyššího obsahu PBS vzorky vykazovaly nejvyšší stupeň houževnatosti a již příliš voskový povrch.

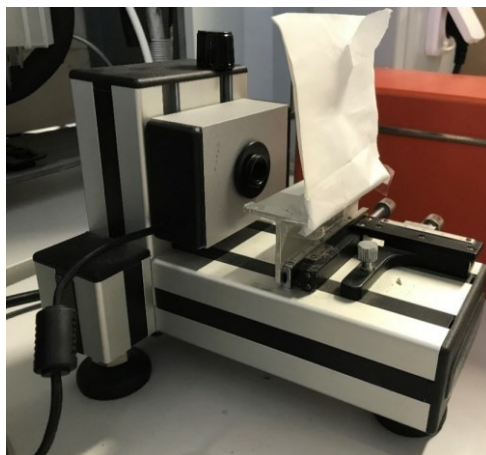
5.2 Metodika

Následující kapitoly uvádí postupy jednotlivých metod použitých při charakterizaci vzorků.

5.2.1 Kontaktní úhel smáčení

Při stanovení úhlu smáčení bylo postupováno dle normy ČSN EN 15802 [83].

Úhel smáčení byl měřen na vzorcích o velikosti frakce zemědělského odpadu <0,5 a <2 mm. Samotné měření bylo provedeno za laboratorní teploty na přístroji Surface Energy Evaluation System (Advex Instruments, Česká Republika, Obr. 18), připojené pomocí USB portu k počítači. Vyhodnocení bylo provedeno v softwaru SeeSystem 7,0. Pro měření byly zvoleny dvě kapaliny s rozdílnou hodnotou povrchového napětí (γ), tj. voda a etylenglykol (Tab. 2 Tab. 2 Hustota a povrchové napětí použitých kapalin [84]). Objem nanášené kapky byl 3,5 μ l. Úhel smáčení byl změřen vždy pětkrát pro každou kapalinu a každý vzorek.



Obr. 18 Přístroj Surface Energy
Evaluation System

Následně byly hodnoty kontaktních úhlů použity pro výpočet povrchové energie pomocí Li-Neumannova modelu, viz kapitola 3.2.3.

Tab. 2 Hustota a povrchové napětí použitých kapalin [84]

Použité kapaliny	Hustota [g/cm ³]	Povrchové napětí [mJ/m ²]
voda	0,997	72,7
etylenglykol	1,113	47,7

5.2.2 Test absorpce vody

Schopnost absorpce vody do hmoty vzorků byla hodnocena měřením v určitých časových intervalech pomocí gravimetrické metody. Nasákavost byla stanovena vážením vzorků před a po ponoření vzorků do destilované vody za laboratorní teploty, tj. 20 až 22 °C, po dobu 24 hodin.

Metoda stanovení byla provedena na vzorcích obsahujících plevy o frakci <2 mm. Nejprve byly vzorky kondicionovány při teplotě 45 °C po dobu 24 hodin. Stanovení byla provedena vždy pro tři vzorky, které byly zváženy a jednotlivě ponořeny bez míchání do 100 ml destilované vody. Po uplynutí 1440 min byly vzorky vyjmuty. Přebytečná voda byla odstraněna pomocí filtračního papíru a vzorky byly ihned zváženy. Stanovení byla provedena celkem 5krát, kdy po každém cyklu byly vzorky vloženy do sušárny na 24 hodin při teplotě 45 °C. Následně byla vypočtena nasákavost vzorků dle rovnice (4).

$$SW = \left(\frac{W_S - W_0}{W_0} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

Kde: SW – nasákavost (%)

W_S – hmotnost vzorku po ponoření do vody (g)

W_0 – hmotnost vysušeného vzorku (g) [85]

5.2.3 Rázová zkouška dle metody Charpy

U sadbovačů je důležitou vlastností houževnatost, aby při manipulaci nedocházelo k praskání a znehodnocení. Z tohoto důvodu byla provedena rázová zkouška.

Rázová houževnatost byla provedena v souladu s normou ČSN EN ISO 179-1 Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška [62].

Rázová zkouška byla provedena pouze na vzorcích s obsahem zemědělského odpadu o velikosti frakce <2 mm. Nejprve byla nařezána zkušební tělíska na pile IsoMet 4000, linear precision saw (Buehler Ltd., Šanghaj) o rozměrech 80 x 10 x 4 mm. Při zkoušce bylo použito kladivo o energii 5 J a vzdálenost podpěr byla 60 mm.

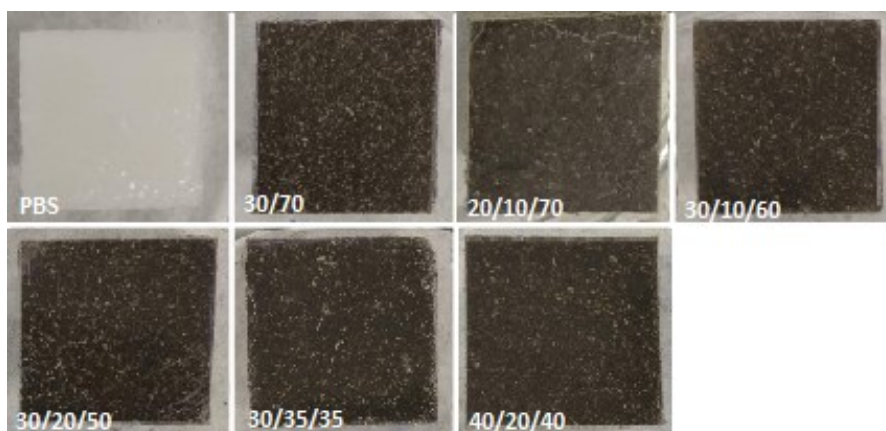
Měření bylo provedeno pro 6 zkušebních tělísek od každého vzorku, kdy jedna sada vzorků byla kondicionována při teplotě 35 °C po dobu 48 hodin (dále jen sada č. 1) a druhá byla ponechána 96 hodin v klimatické komoře při teplotě 23 °C a vlhkosti vzduchu 70 % (dále jen sada č. 2). U všech tělísek došlo k úplnému přeražení. Jednotlivé výsledky rázové energie absorbované tělesem byly zaznamenány v softwaru testXpert III – V1.51.

5.2.4 Stanovení rozpadu vzorků za simulovaných podmínek kompostování

Stanovení biodegradability bylo provedeno v souladu s normou ISO 20200:2015 Plasty – Stanovení stupně rozkladu plastů za simulovaných podmínek kompostování v laboratorním měřítku [74].

Stanovení rozpadu vzorků bylo provedeno na sadě vzorků s plevy o velikosti frakce <0,5 mm. Nejprve byly vylišovány a nařezány vzorky termoplasticky připravených směsí o velikosti 25x25x2 mm a následně sušeny ve vakuové sušárně (Memmert 400, Thermo Fisher Scientific, USA) při teplotě 35 °C do konstantní hmotnosti (Obr. 19). Stanovení rozpadu probíhalo v reaktorech, tj. polypropylenových boxech s víčkem, o velikosti

10,5x30,5x20,0 cm. Do reaktoru byl navážen syntetický odpad (Tab. 3) o celkové hmotnosti 450 g a dále byla přidána destilovaná voda o hmotnosti 550 g.



Obr. 19 Vzorky připravené pro kompostovací proces

Tab. 3 Obsah jednotlivých surovin v syntetickém odpadu

Materiál	Hmotnost v suchém stavu [hm. %]	Specifikace
Dřevěné piliny	40	Lokální stolařství, směs měkkého a tvrdého dřeva
Komerční vojtěškové krmivo pro králíky	30	Versele-Laga Country's Best
Zralý kompost	10	Centrální kompostárna Brno
Kukuřičný škrob	10	Jemný škrob kukuřičný, RUF Lebensmittelwerk KG
Sacharóza	5	Cukr bílý krupice, Tereos TTD, a.s.
Olej	4	Slunečnicový rafinovaný, Bunde Zrt.
Močovina	1	p.a., Ing. Petr Švec – PENTA s.r.o.
Celkem	100	

Parametry vstupního syntetického odpadu jsou uvedeny v Tab. 4, kdy poměr C/N byl vypočítán dle normy ISO 20200:2015 jako obsah těkavých pevných látek podělený faktorem 2. Do každého připraveného reaktoru bylo vloženo 4 až 6 kusů vzorků o celkové hmotnosti 5 až 7 g. Stanovení probíhalo 2x vedle sebe pro každý vzorek za stejných

podmínek. Podmínky kompostovacího procesu byly pro jednu sadu vzorků 23 °C a vlhkosti 70 % (simulující rozpad v polních podmínkách) a pro druhou sadu 58 °C a vlhkosti 90 % (dle normy, simulující průmyslovou kompostárnu).

Tab. 4 Parametry vstupního syntetického odpadu

Podmínky	Poměr C/N	Sušina [hm. %, vztaženo na vlhkou hmotu]	Těkavé pevné látky [hm. %, vztaženo na sušinu]	pH
Polní	46,56	40,47 ± 0,33	93,12 ± 0,26	7
Průmyslová kompostárna	46,37	40,39 ± 1,38	92,73 ± 0,70	6

Kontrola procesu byla provedena dle Tab. 5 a zároveň byly zaznamenány hodnoty pH a teploty pro sledování správného procesu přeměny syntetického odpadu na kompost pro každý reaktor. K reaktorům umístěným v klimatické komoře při 23 °C bylo 90. den přidáno malé množství kompostu (25 g) pro podporu kompostovacího procesu. Tento přídavek byl proveden na základě již zrušené normy ČSN EN 14806 – Obaly – Předběžné hodnocení rozpadu obalových materiálů v modelových podmínkách kompostování v laboratorním měřítku [77]. Po 90, resp. 120 dnech byl test ukončen. Reaktory byly ponechány v sušárně při teplotě 35 °C do konstantní hmotnosti. Následně byly komposty prosety přes 5 mm a následně 2 mm síta, pro získání zbytků vzorků. Takto získané vzorky byly očištěny, vysušeny do konstantní hmotnosti při teplotě 35 °C a zváženy. Nakonec byl vyhodnocen stupeň rozkladu vzorků dle následující rovnice.

$$D = \frac{m_i - m_r}{m_i} \cdot 100 [\%] \quad (5)$$

Kde: D – stupeň rozpadu vzorků (%)

m_i – počáteční hmotnost zkoušeného materiálu v suchém stavu (g)

m_r – hmotnost zbytků materiálu v suchém stavu vytríděných při prosevu (g)

Tab. 5 Postup při kompostování

Dny od počátku měření	Činnost
0	Zaznamenání počáteční hmotnosti reaktoru
1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14	Vážení reaktoru a doplnění vody do původní hmotnosti. Míchání kompostu.
8, 10, 16, 18, 21, 23, 25, 28	Vážení reaktoru a doplnění vody do původní hmotnosti bez míchání kompostu.
30, 45	Vážení reaktoru a doplnění vody do 80 % původní hmotnosti. Míchání kompostu.
Od 30 do 60 dne, 2x týdně	Vážení reaktoru a doplnění vody do 80 % původní hmotnosti. Míchání kompostu
Od 60. dne 2x týdně	Vážení reaktoru a doplnění vody do 70 % původní hmotnosti. Míchání kompostu

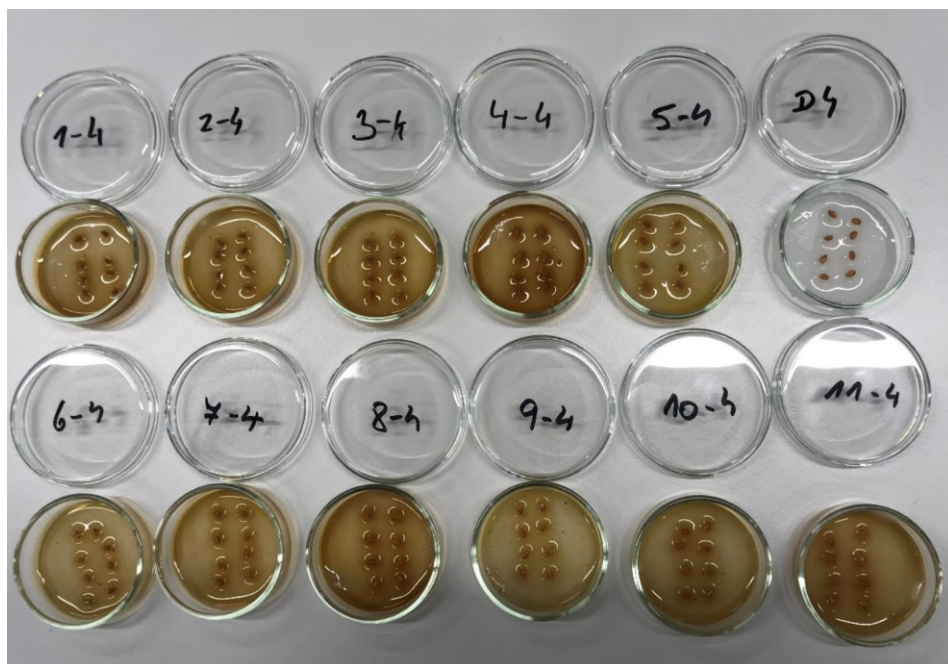
5.2.5 Infračervená spektroskopie

Zbytky vzorků získané po kompostovacím procesu byly podrobeny analýze ATR-FTIR pro identifikaci složení. Pro analýzu byl použit spektrometr Nicolet iS5 s germaniovým krystalem. Rozlišení spektra bylo 4 cm^{-1} a pro určení spektra bylo shromážděno 64 skenů. Spektra byla zaznamenána v rozmezí $4000 - 600\text{ cm}^{-1}$.

5.2.6 Stanovení fytotoxicity (řeřichový test)

Pro tuto metodu byl použit kompost, který vznikl během 90denního, resp. 120denního kompostování připravených vzorků. Z každého kompostu bylo odebráno 10 g do kádinky a zalito 150 ml destilované vody. Kádinky byly uzavřeny parafilmem a vloženy na 2 hodiny do horizontální třepačky. Během macerace kompostů bylo připraveno pro každý vzorek 10 Petriho misek o průměru 5 cm, do kterých byl vložen filtrační papír. Do každého Petriho misky bylo vloženo 8 semen řeřichy seté a opatrně zalito 1 ml výluhu, viz Obr. 20. Připravené a uzavřené Petriho misky byly vloženy do inkubátoru, kde semena klíčila při teplotě $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 72 hodin. Současně se s testovanými výluhy vložil do inkubátoru

kontrolní vzorek s destilovanou vodou. Po uplynutí této doby byly změřeny kořínky pro výpočet indexu klíčivosti dle vzorce 3.



Obr. 20 Vzorčky připravené pro řeřichový test před vložením do inkubátoru

6 VÝSLEDKY A DISKUZE

6.1 Kontaktní úhel smáčení

Pro stanovení kontaktního úhlu smáčení byly použity vzorky s plevy o frakci $<0,5$ i <2 mm. Při měření úhlu smáčení byly použity dvě kapaliny s rozdílnou povrchovou energií, tj. voda a etylenglykol. Výsledky naměřených kontaktních úhlů smáčení jsou uvedeny v Tab. 6. U všech vzorků byl naměřený kontaktní úhel nižší než 90° , a to v případě použití vody i etylenglykolu. Z výsledků je tedy jednoznačné, že všechny vzorky vykazují hydrofilní povahu. Při srovnání úhlů smáčení stejných vzorků s obsahem plev o odlišných frakcích jsou úhly smáčení vodou v rámci směrodatné odchylky stejné, až na vzorek 40/20/40, který má mírně vyšší úhel smáčení při použití plev o frakci $<0,5$ mm. To by mohlo být způsobeno nedostatečným zpracováním plev a kraftového papíru do polymerní struktury. V případě smáčení ethylenglykolem je úhel vyšší u vzorků 20/10/70, 30/70 a 30/10/60, tedy u vzorků s nízkým, či žádným obsahem kraftového papíru. Lze tedy usoudit, že kraftový papír zvyšuje hydrofilní povahu vzorků. Célino a spol. ve své studii uvádí, že přírodní vlákna mají výrazné hydrofilní chování díky obsahu celulózy, což má za následek zvýšení hydrofilní povahy kompozitu a absorpci vody ve vlhkém prostředí [86].

Tab. 6 Hodnoty kontaktních úhlů pro suché vzorky (W - voda, E - ethylenglykol)

Vzorek	Velikost plev [mm]	Θ_W [°]	Θ_E [°]
20/10/70	0,5	84,64 ± 3,37	48,48 ± 3,35
30/70	0,5	75,01 ± 3,69	50,27 ± 3,80
30/10/60	0,5	73,28 ± 3,92	53,39 ± 2,34
30/20/50	0,5	79,22 ± 3,07	51,72 ± 2,45
30/35/35	0,5	77,59 ± 2,14	57,13 ± 1,73
40/20/40	0,5	72,22 ± 2,84	51,80 ± 3,26
20/10/70	2	79,51 ± 4,07	59,80 ± 4,34
30/70	2	72,22 ± 3,85	63,216 ± 3,76
30/10/60	2	82,54 ± 2,26	63,03 ± 4,76
30/20/50	2	79,60 ± 2,76	60,96 ± 3,28
30/35/35	2	78,66 ± 5,46	50,94 ± 6,06
40/20/40	2	64,84 ± 4,36	60,61 ± 3,70

Dále byla pomocí naměřených kontaktních úhlů vypočtena povrchová energie vzorků pomocí Li-Neumannova modelu. Tyto výsledky jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7 Hodnoty povrchových energií pomocí Li-Neumannova modelu

Vzorek	Velikost plev [mm]	$\gamma\theta$ [mJ/m ²]	Sg-	Sg+
20/10/70	0,5	33,63	0,65	0,93
30/70	0,5	36,26	0,83	0,7
30/10/60	0,5	36,08	0,62	0,99
30/20/50	0,5	34,59	0,68	0,48
30/35/35	0,5	33,86	0,42	0,45
40/20/40	0,5	36,77	0,79	0,67
20/10/70	2	32,64	0,93	1,01
30/70	2	34,14	0,68	1,1
30/10/60	2	30,93	0,58	0,85
30/20/50	2	32,34	0,71	0,54
30/35/35	2	34,96	1,5	1,06
40/20/40	2	37,02	0,71	1,21

S výjimkou vzorků 30/35/35 a 40/20/40 je viditelný trend, že v případě použití plev o frakci 0,5 mm vykazují vzorky vyšší povrchovou energii oproti kompozicím s frakcí plev <2 mm. Nejvyšší povrchovou energii vykazuje vzorek 40/20/40, z důvodu vyššího obsahu PBS. Při porovnání hodnoty kontaktního úhlu smáčení a hodnoty povrchové energie je zde patrné, že s klesajícím úhlem roste povrchová energie.

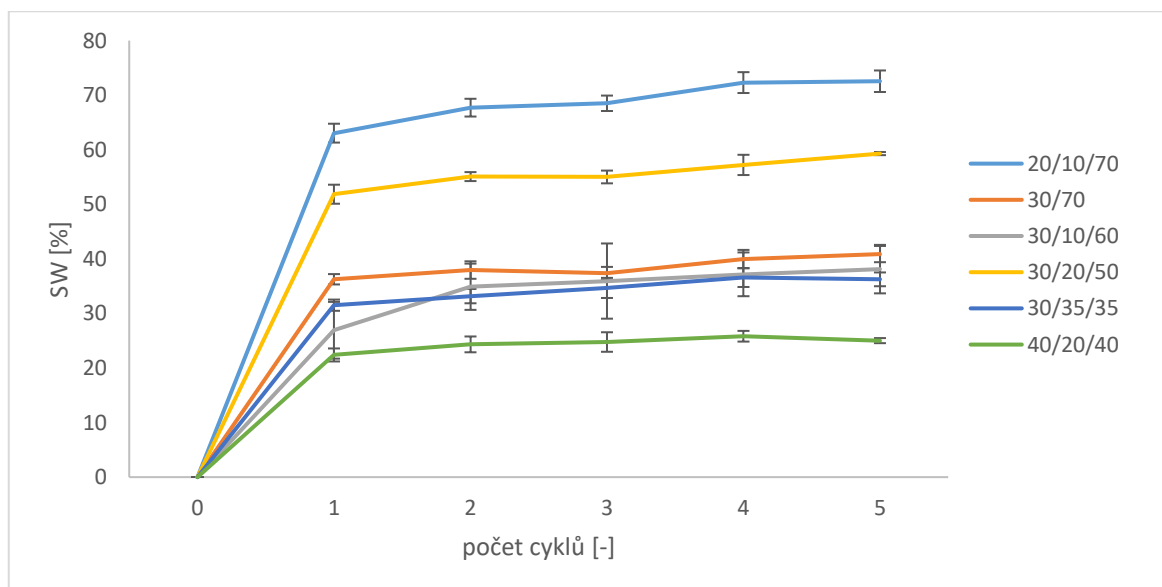
Dhakal a spol. [87] ve své studii o polykaprolaktonu vyztuženým konopnými vlákny uvádí podobný trend, kdy pozorovali, že naměřené kontaktní úhly s glycerolem byly menší než při použití destilované vody a významně nižší než 90°. Z čehož plyne, že glycerol vykazoval vyšší relativní smáčivost, hydrofilitu a adhezní vlastnosti se vzorky. V důsledku toho byla dosažena nižší celková povrchová energie vzorků s vodou.

Naměřená povrchová energie u všech vzorků se nachází v rozmezí 30 až 38 mJ/m². Tyto hodnoty korespondují s publikovanými literárními údaji v rozmezí 35 mJ/m² až 51 mJ/m² pro celulósová vlákna, kdy Heng a spol. naměřili povrchové energie bambusu,

kukuřičných slupek, lnu, konopí a sisalu v rozmezí 32 až 43 mJ/m² [88]. Dále dle studie Xue a spol. [89] bylo naměřené povrchové napětí čistého PBS 46,4 mN/m a je tedy zřejmé, že přídavek plev a kraftového papíru snižuje povrchovou energii kompozitů a zvyšuje jejich hydrofilní povahu.

6.2 Test absorpce vody

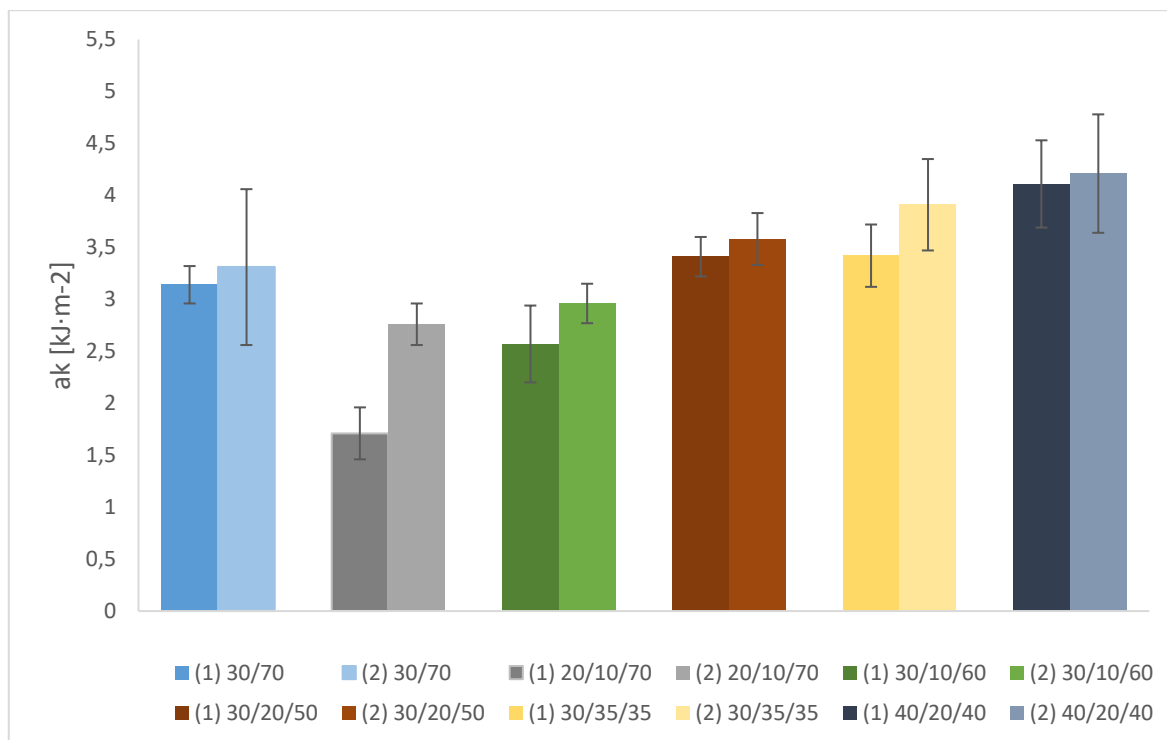
Na Obr. 21 jsou znázorněny hodnoty absorpce jednotlivých vzorků po každém cyklu měření. Nejvyšší hodnotu absorpce, tj. $72,55 \pm 1,97$ % vykazoval vzorek 20/10/70, což je zapříčiněno nejnižším obsahem PBS. Naopak dle očekávání nejnižší absorpci ($25,02 \pm 0,46$ %) vykazoval vzorek 40/20/40 a to z důvodu vysokého obsahu PBS (40 hm. %), který je hydrofobní povahy, jelikož obsahuje acylové skupiny a jeho kapacita absorpce vody je tedy omezená [90]. Vzorky 30/10/60 a 30/35/35 vykazovaly v rámci směrodatné odchylky stejnou hodnotu absorpce. Nepatrně vyšší absorpci vody oproti vzorku 30/35/35 vykazoval vzorek 30/70 a to 40,88 ± 1,49 % po pátém cyklu. Výrazně vyšší absorpci pak vykazoval vzorek 30/20/50, tj. $59,29 \pm 0,28$ %. U vzorků 30/10/60 a 30/20/50 je patrné, že vyšší obsah papíru zapříčinil výrazný nárůst absorpce. Ale v případě, kdy byl obsah papíru a plev shodný, již k nárůstu nedošlo. Dalším důvodem vyšší absorpce vody může být nedostatečná adheze mezi plnivem a matricí, kdy prostory mezi plnivem a matricí vytváří mikropóry, kterými se voda může snadno dostat do materiálu. Tyto póry se mohou v průběhu času zvětšovat a do materiálu se dostane více vody [91].



Obr. 21 Absorpce vody jednotlivých vzorků po pátém cyklu

6.3 Rázová zkouška dle metody Charpy

Naměřené průměrné hodnoty rázové houževnatosti pro sadu vzorků s plevy o frakci <2 mm č. 1 (vysušení zkušebních těles před analýzou při teplotě 35 °C po dobu 48 hodin) a č. 2 (teplota kondicionace zkušebních těles při 23 °C, vlhkosti vzduchu 70 % po dobu 96 hodin) jsou uvedeny na Obr. 22.



Obr. 22 Rázová houževnatost vzorků kompozitů sady č. (1) a (2)

Na Obr. 22 je možné pozorovat, že nejvyšší rázovou houževnatost má vzorek 40/20/40, díky nejvyššímu obsahu PBS. Dále lze vidět u vzorků s obsahem 30 hm. % PBS (30/70 a 30/20/50), nárůst rázové houževnatosti v případě, kdy byl do směsi termoplasticky zpracován kraftový papír. Tento jev by mohl být zapříčiněn obsahem celulózových vláken v papíře, která fungují jako výztuha [92]. V dalším případě, kdy byl obsah papíru pouze 10 hm. %, vzorek vykazoval nižší rázovou houževnatost než vzorek bez papíru. Tento jev může být způsoben špatnou adhezí mezi hydrofobní matricí, tj. PBS, a hydrofilním papírem, což může mít za následek nerovnoměrnou distribuci vláken a snížení mechanických vlastností [93]. Toto potvrzuje studie Mazura a spol. [91], kteří uvádí, že přídavek přírodních plniv vede ke snížení hodnoty rázové houževnatosti. Tento efekt je spojen s křehkostí samotných vláken (vysoký obsah ligninu činí vlákna křehčími) a délkou vlákna. S klesající délkou vlákna klesá potenciál kompozitu k deformaci, čímž se snižuje rázová houževnatost. Z tohoto lze usuzovat, že minimální koncentrace kraftového papíru musí být vyšší

než 10 hm. %, aby došlo k lepší distribuci papírových vláken v matrici. Nejnižší rázovou houževnatost vykazoval dle očekávání vzorek 20/10/70 kvůli nízkému obsahu PBS. V případě vzorků 30/70, 30/20/50 a 40/20/40 nebyl pozorován s přihlédnutím na toleranci směrodatné odchylky rozdíl v rázové houževnatosti mezi vzorky. Z výsledků plyne, že vlhkosti u všech vzorků s výjimkou vzorků 20/10/70 neměla vliv na rázovou houževnatost. U dalších vzorků ovšem tento trend neplatí. Vzorky sady č. 2, tedy vzorky kondicionované při relativní vlhkosti 70 %, vykazovaly vyšší hodnoty rázových houževnatostí.

6.4 Stanovení rozpadu vzorků

Kapitola uvádí výsledky stanovení rozpadu testovaných materiálů při simulaci kompostovacího procesu a při simulaci podmínek aplikace na poli. Kompozice byly srovnány ke vzorku čistého PBS (bez přídavku kraftového papíru či plev).

6.4.1 Stanovení stupně rozpadu vzorků při simulaci aplikace na poli za laboratorních podmínek

Tab. 8 charakterizuje výsledný kompost po ukončení procesu přeměny syntetického odpadu při teplotě 23 °C a relativní vlhkosti 70 %. Celý proces probíhal bez neobvyklých výkyvů (pH, teplota, barva a zápach) v jednotlivých reaktorech.

Tab. 8 Charakterizace kompostu po ukončení testu při 23 °C

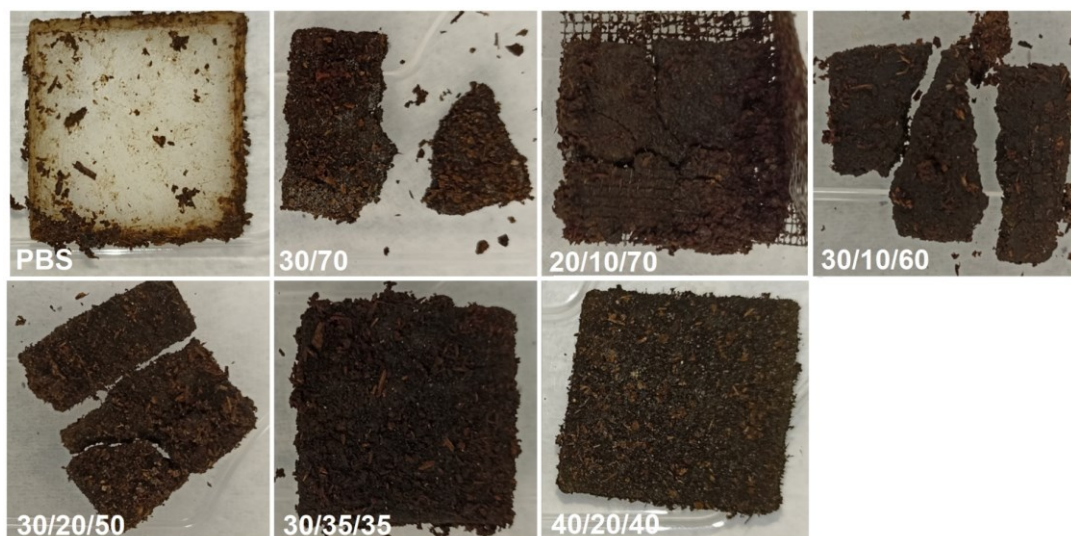
Vzorek	Celková hmotnost [g]	Sušina [% hmot.; vztaženo na celkovou hmotu]	Těkavé pevné látky [% hmot.; vztaženo na sušinu]	Poměr C/N	pH
Slepý pokus – 1	180,25	34,39	79,70 ± 2,27	39,85	6
Slepý pokus – 2	182,94	33,89	78,15 ± 1,42	39,08	6
PBS – 1	204,27	34,59	76,26 ± 3,04	38,13	6
PBS – 2	203,17	34,48	79,40 ± 2,04	39,70	6
20/10/70 – 1	197,35	32,64	75,40 ± 5,50	37,70	6
20/10/70 – 2	196,73	32,20	76,41 ± 2,73	38,21	6
30/70 – 1	199,5	33,75	76,67 ± 3,58	38,34	6
30/70 – 2	173,08	28,72	80,60 ± 1,92	40,30	6
30/10/60 – 1	180,76	28,46	72,47 ± 2,61	36,24	6
30/10/60 – 2	185,3	30,30	78,95 ± 1,36	39,48	6
30/20/50 – 1	187,19	30,88	79,39 ± 2,14	39,70	6
30/20/50 – 2	193,85	32,05	77,90 ± 0,61	38,95	6
30/35/35 – 1	192	31,55	80,04 ± 2,29	40,02	6
30/35/35 – 2	192,3	31,20	77,53 ± 1,99	38,77	6
40/20/40 – 1	188,07	30,93	76,96 ± 1,99	38,48	6
40/20/40 – 2	185,1	28,79	75,97 ± 2,26	37,99	6

Po ukončení testu (120 dní) byly ve všech reaktorech nalezeny fragmenty vzorků o velikosti větší než 2 mm (Tab. 9). Ve všech reaktorech bylo snížení celkového obsahu těkavých látek v rozmezí 57,5 – 65,5, tzn. vyšší než 30 %, a také poměr C/N byl v rozmezí 20:1 až 40:1 a zkoušku lze dle normy považovat za platnou. V případě vzorků čistého PBS bylo dosaženo stupně rozpadu (D) pouze cca 13 %, z čehož lze usoudit, že PBS potřebuje pro svůj rozklad vyšší teplotu. Nejvyššího stupně rozpadu bylo dosaženo u vzorku 30/70, kde nebyl přítomný

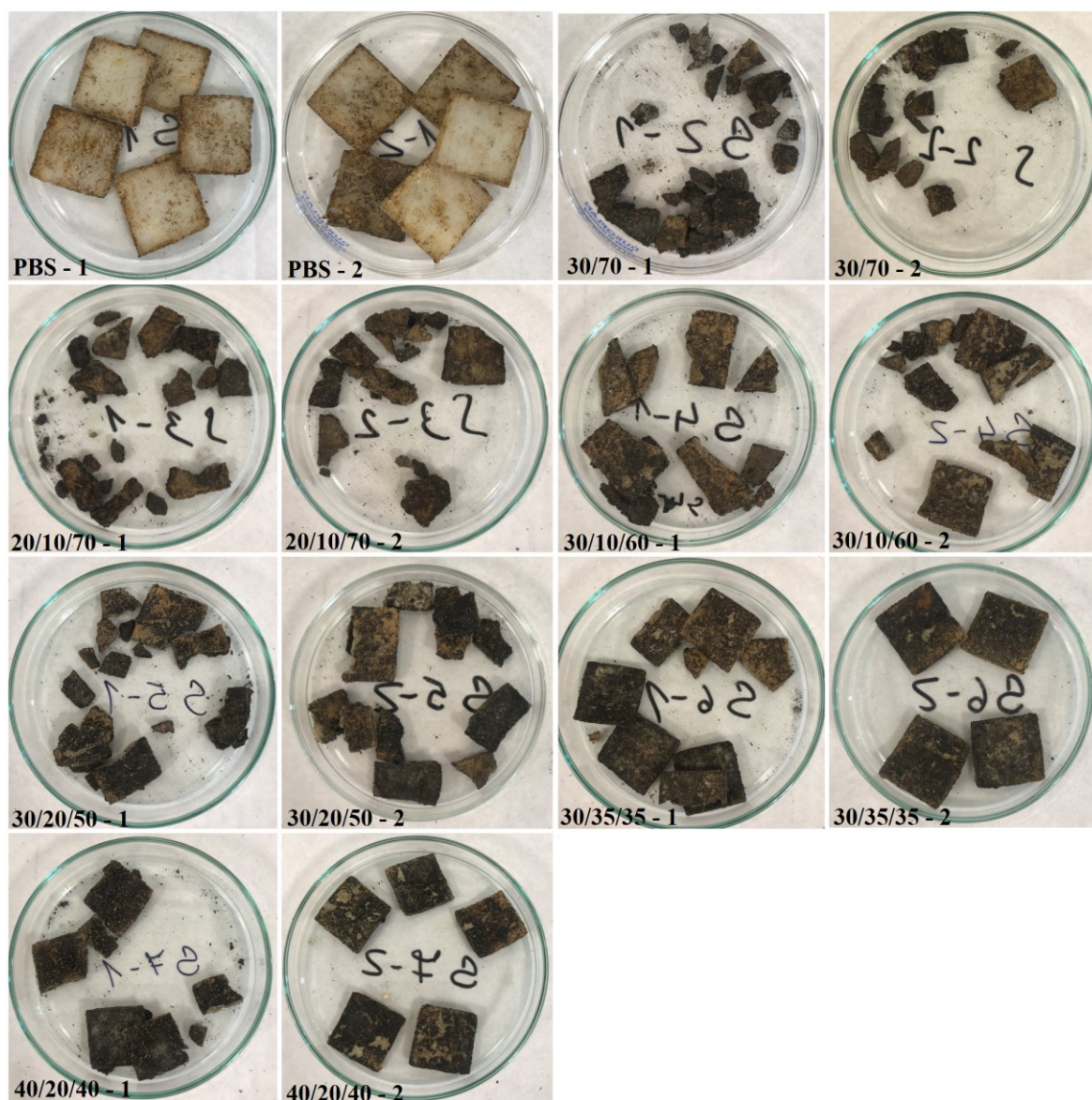
kraftový papír. Vzorčky 20/10/70 dosahovaly mírně nižšího stupně rozpadu než vzorčky 30/70, tj. cca 61 %. Dle předpokladů byl stupeň rozpadu vyšší s nižším obsahem PBS. Tento vzorek také vykazoval nejvyšší hodnotu nasákavosti ($72,55 \pm 1,97$ %) a hydrolýza tedy nastává rychleji, ovšem z důvodu přítomnosti papíru nevykazuje vzorek nejvyšší hodnotu D. V případě vzorků s obsahem 30 hm. % PBS (tj. 30/10/60, 30/20/50 a 30/35/35) došlo k poklesu stupně rozpadu, kdy tento pokles byl pozorován i s rostoucím obsahem kraftového papíru. Vzorek 30/35/35 vykazoval nejnižší hodnotu D v porovnání s ostatními kompozitními vzorky. S rostoucím obsahem kraftového papíru dochází ke zpomalení procesu degradace, což by dle Fuentes a spol. mohlo být zapříčiněno vysokým poměrem C/N v papíru [2]. Obdobné výsledky byly zjištěny také ve studii Alvareza a spol., kde porovnávali chování různých typů papíru při kompostování a dospěli k názoru, že kraftový papír je biologicky neodbouratelný, kdy teoretická odbouratelná frakce tohoto typu papíru je 36 %, ačkoli je při daných podmínkách zapotřebí dosáhnout alespoň hodnoty 45 % [94]. Vzorek 40/20/40 vykazoval stupeň rozpadu 48 % a 56 %, což by mohlo být zapříčiněno vyšším obsahem PBS a kraftového papíru, kdy vzorek vykazoval také nejnižší hodnotu nasákavosti, zatímco hodnota rázové houževnatosti byla v porovnání s ostatními vzorky vysoká. Vzhled zkušebních vzorků na konci kompostovacího procesu je znázorněn na Obr. 23 a také na Obr. 24, který vyobrazuje zbylé fragmenty vzorků po vysušení do konstantní hmotnosti.

Tab. 9 Výsledky procesu rozpadu při 23 °C

Vzorek	Hmotnost vzorků po ukončení testu [g]	D [%]	R [%]
Slepý pokus – 1	-	-	59,44
Slepý pokus – 2	-	-	60,17
PBS – 1	8,31	12,67	58,93
PBS – 2	8,29	12,83	57,53
20/10/70 – 1	3,98	60,91	60,88
20/10/70 – 2	3,93	61,50	60,48
30/70 – 1	2,44	69,79	59,73
30/70 – 2	2,44	67,19	63,27
30/10/60 – 1	4,01	54,75	65,52
30/10/60 – 2	4,05	57,04	61,65
30/20/50 – 1	4,94	52,35	61,12
30/20/50 – 2	3,69	54,52	60,45
30/35/35 – 1	6,09	44,01	59,61
30/35/35 – 2	4,81	45,53	60,76
40/20/40 – 1	3,57	55,79	62,01
40/20/40 – 2	4,76	48,24	63,32



Obr. 23 Vzorky po ukončení kompostovacího procesu při 23 °C



Obr. 24 Zbylé fragmenty vzorků po vysušení

6.4.2 Stanovení stupně rozpadu při simulaci kompostovacího procesu za laboratorních podmínek

Tab. 10 charakterizuje kompost po ukončení testu simulujícího kompostovací proces v laboratorních podmínkách. Během testu se nevyskytly v žádném reaktoru výkyvy pH ani teploty, vizuální i pachové změny probíhaly specificky.

Tab. 10 Charakterizace kompostu po ukončení testu při 58 °C

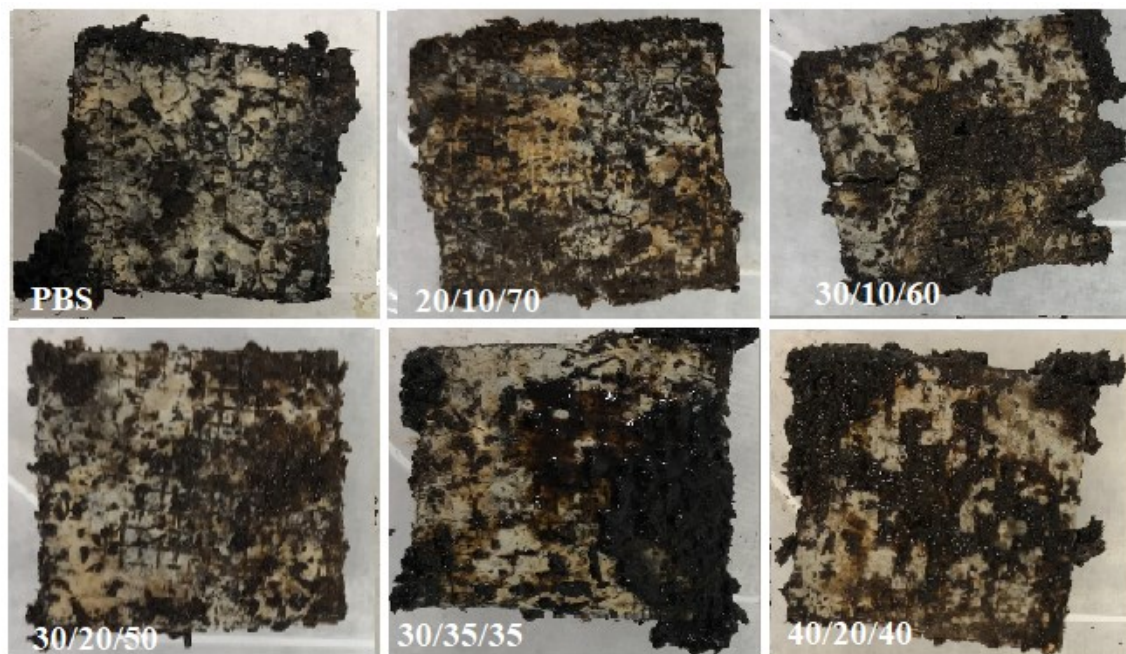
Vzorek	Celková hmotnost [g]	Sušina [% hmot.; vztaženo na celkovou hmotu]	Těkavé pevné látky [% hmot.; vztaženo na sušinu]	Poměr C/N*	pH
Slepý pokus – 1	110,78	20,28	75,80 ± 1,38	37,90	10
Slepý pokus – 2	114,77	22,91	76,48 ± 1,02	38,24	10
PBS – 1	123,98	21,76	74,15 ± 1,08	37,08	8
PBS – 2	125,53	24,87	75,08 ± 0,96	37,54	10
20/10/70 – 1	123,19	24,00	75,83 ± 1,42	37,92	10
20/10/70 – 2	124,41	24,15	75,39 ± 0,87	37,70	10
30/70 – 1	118,14	25,08	75,29 ± 1,38	37,65	10
30/70 – 2	119,63	22,76	75,80 ± 0,50	37,90	10
30/10/60 – 1	119,14	24,34	76,11 ± 0,70	38,06	10
30/10/60 – 2	124,8	22,47	76,09 ± 1,98	38,05	10
30/20/50 – 1	128,24	21,88	77,59 ± 0,83	38,80	10
30/20/50 – 2	124,23	21,73	76,54 ± 0,34	38,27	10
30/35/35 – 1	124,14	21,99	77,05 ± 1,98	38,53	10
30/35/35 – 2	125,58	21,36	75,77 ± 0,50	37,89	10
40/20/40 – 1	120,19	21,86	74,77 ± 0,73	37,39	10
40/20/40 – 2	128,89	21,89	75,85 ± 2,42	37,93	10

Po ukončení testu (90 dní), jak je uvedeno v Tab. 11, byly ve všech reaktorech s výjimkou reaktoru se vzorkem 30/70 nalezeny fragmenty o velikosti větší než 2 mm. Vzorky 30/70, tedy bez obsahu papíru se v průběhu procesu zcela dezintegrovaly na fragmenty menší než 2 mm. Z toho lze vyvodit, že PBS je v určitých podmínkách degradovatelný a přídavek plniva (plev) tomuto procesu napomohl z důvodu rychlejší absorpce vody z kompostovacího média. Podobného výsledku dosáhly i Platnieks a spol. [95]. Tento fakt potvrzuje i srovnání s procesem simulujícím polní aplikaci, kdy došlo při vyšší teplotě a vlhkosti u čistého PBS k nárůstu stupně rozkladu z cca 13 % na 51 % a 58 %. Při srovnání obou kompostovacích procesů je také patrné, že u všech vzorků došlo alespoň k mírnému nárůstu stupně rozpadu. Nejnižšího stupně rozkladu dosahovaly opět vzorky 30/35/35 a 40/20/40. Při vizuální kontrole vykazovaly pozůstatky vzorků kompozitu 30/35/35, stejně jako při druhém procesu rozpadu, přítomnost kraftového papíru. Je zde patrný trend, že s rostoucím obsahem kraftového papíru klesá stupeň rozpadu a stejně tak i s rostoucím obsahem PBS. Pro potvrzení uvedeného tvrzení o přítomnosti papíru byla následně provedena analýza nedezintegrováných částí pomocí ATR-FTIR. Vzorek 40/20/40 vykazoval nízký stupeň rozpadu (cca 56 %), a to z důvodu vysokého obsahu PBS a zároveň obsahu 20 hm. % kraftového papíru. Tento vzorek vykazoval nejnižší absorpci vody, je tedy zřejmé, že hydrolýza nastává pomalu a proces dezintegrace je výrazně pomalejší. K podobnému názoru, tj. že přítomnost papíru zpomaluje proces dezintegrace v půdě potvrzuje i studie Fuentese a spol. [2]. Všechny vzorky včetně těch, které byly podrobeny procesu při 23 °C, vykazovaly křehké chování, což naznačuje, že by se v polních podmínkách po zaorání mohly snadno dezintegrovat a stát se součástí půdy.

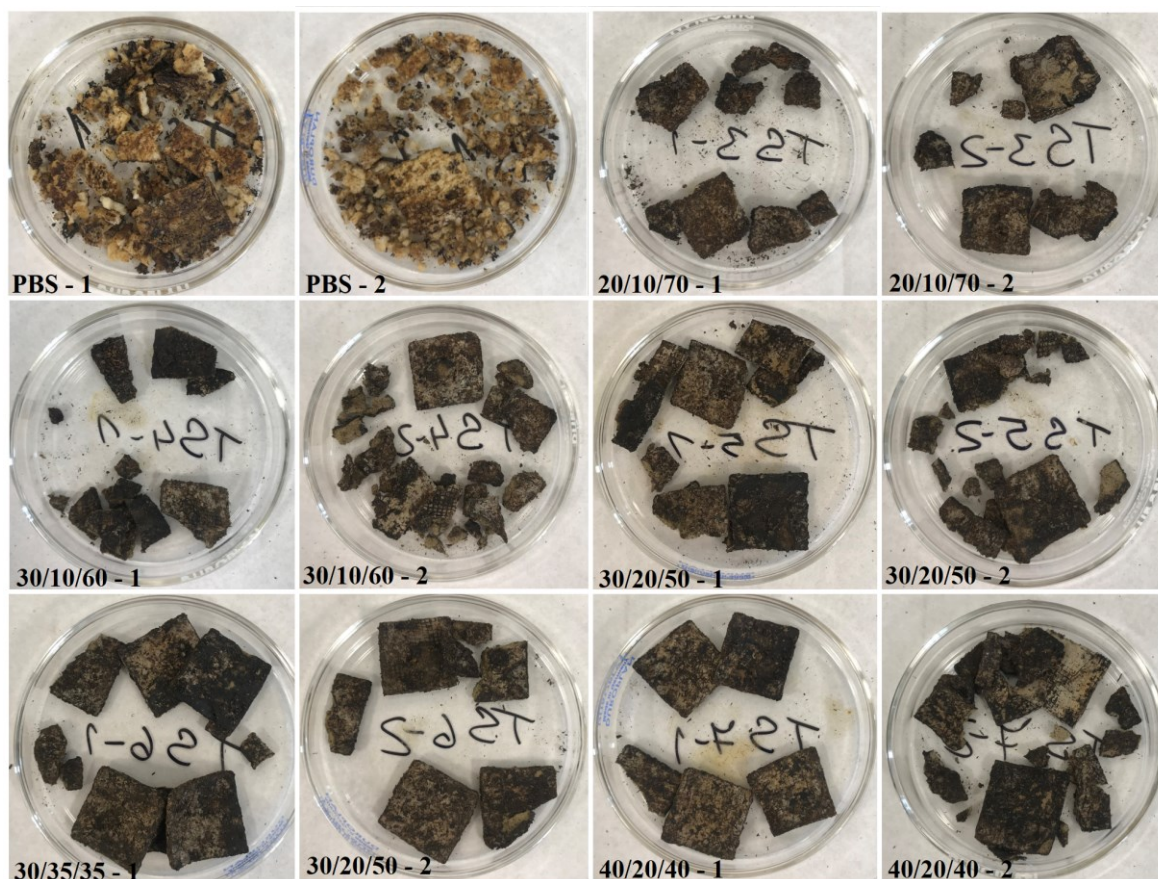
Tab. 11 Výsledky procesu rozpadu při 58 °C

Vzorek	Hmotnost vzorků po ukončení testu [g]	D [%]	R [%]
Slepý pokus – 1	-	-	76,30
Slepý pokus – 2	-	-	75,26
PBS – 1	5,88	51,49	75,67
PBS – 2	4,53	58,57	75,23
20/10/70 – 1	2,19	79,45	75,22
20/10/70 – 2	1,97	77,38	75,06
30/70 – 1	-	100	76,35
30/70 – 2	-	100	75,90
30/10/60 – 1	1,66	80,42	75,92
30/10/60 – 2	2,41	73,78	74,75
30/20/50 – 1	3,35	61,65	73,69
30/20/50 – 2	2,23	70,28	74,68
30/35/35 – 1	4,14	54,17	74,55
30/35/35 – 2	3,55	52,83	74,69
40/20/40 – 1	3,54	56,74	76,01
40/20/40 – 2	3,68	55,22	73,99

Celou zkoušku je možné považovat za platnou, jelikož došlo ve všech reaktorech ke snížení celkového obsahu těkavých látek (R) mezi počátečním syntetickým odpadem a kompostem na konci zkoušky více než o 30 %, kdy se hodnoty R pohybovaly v rozmezí 73,69 – 76,30 %. Také poměr C/N byl ve všech reaktorech v rozmezí 20:1 až 40:1 jak uvádí norma. Na Obr. 25 jsou snímky vzorků po ukončení kompostovacího procesu (90. den) a dále na Obr. 26 jsou vyobrazené zbylé fragmenty vzorků po vysušení do konstantní hmotnosti.



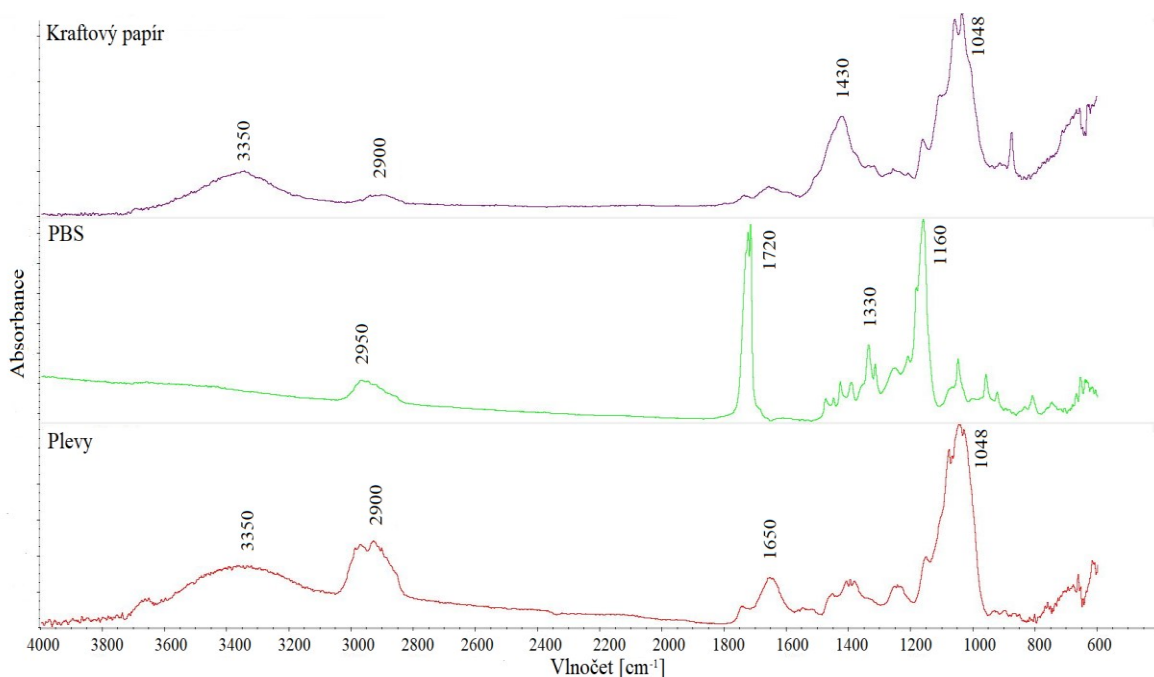
Obr. 25 Vzorčky po ukončení procesu simulující kompostování při 58 °C



Obr. 26 Zbylé fragmenty vzorků po vysušení

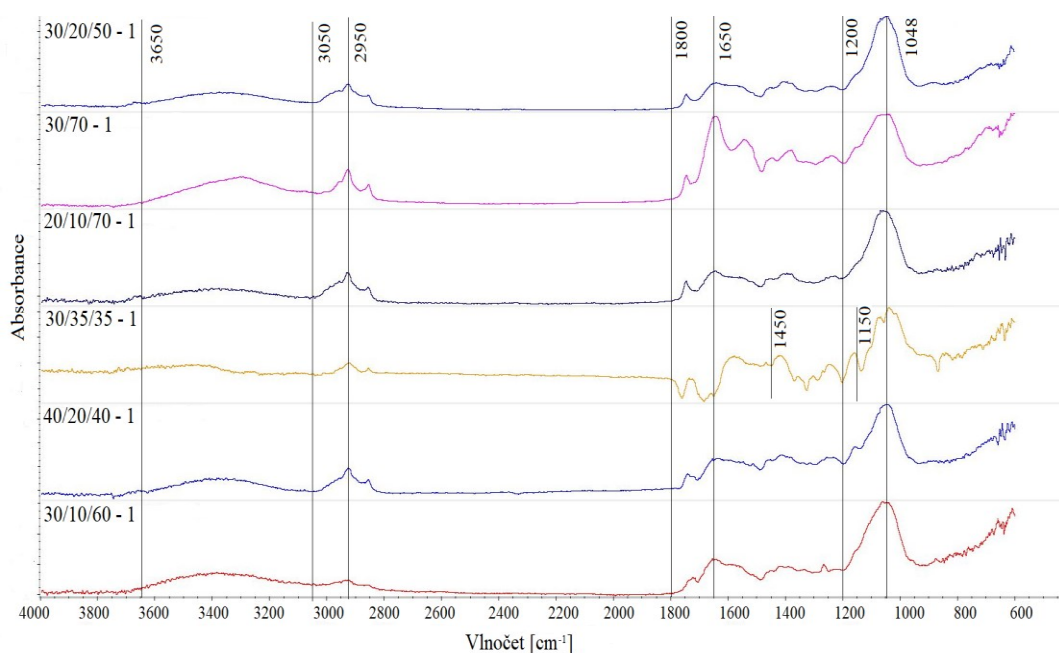
6.4.3 Infračervená spektroskopie

K charakterizaci složení zbytků testovaných materiálů po kompostovacím procesu byla použita metoda ATR-FTIR. Naměřená spektra vzorků byla porovnána se spektry vstupních surovin. Na Obr. 27 jsou znázorněna naměřená spektra pro kraftový papír, PBS a plevy. U kraftového papíru a plev se vyskytuje v oblasti 3600 až 3100 cm^{-1} široký absorpční pás s maximem 3350 cm^{-1} . Tento pás je typický pro -OH skupinu obsaženou v celulóze a inter- a intra-molekulové vodíkové vazby v makromolekule celulózy, které jsou vytvářené hydroxylovými skupinami celulózy. Dále je u plev silnější absorpční pás v oblasti 2900 cm^{-1} , který je projevem valenčních vibrací -CH skupin v celulóze. Tento pík je viditelný i ve spektru kraftového papíru, ovšem je výrazně slabší. Odezva v oblasti 1650 cm^{-1} u plev a kraftového papíru je přičítána naadsorbované vodě. Kraftový papír dále také vykazuje silnější odezvu v oblasti 1430 cm^{-1} , která odpovídá valenčním vibracím -CH₂ skupin. V oblasti 1048 cm^{-1} je nesilnější odezva a to u vzorku kraftového papíru i plev, která odpovídá valenčním vibracím -CO vazeb [96, 97]. Ve spektru PBS je viditelná intenzivní odezva v oblasti 1720 cm^{-1} , která je přisuzována valenčním vibracím C=O skupin a dále také v oblasti 1160 cm^{-1} , určující funkční skupinu -C-O-C- typickou pro PBS. Taktéž jsou zde píky v oblasti 2950 a 1330 cm^{-1} , které souvisejí s asymetrickými a symetrickými vibracemi -CH₂ v hlavním řetězci PBS [98, 99].



Obr. 27 ATR-FTIR spektra vstupních surovin (kraftový papír, PBS, plevy)

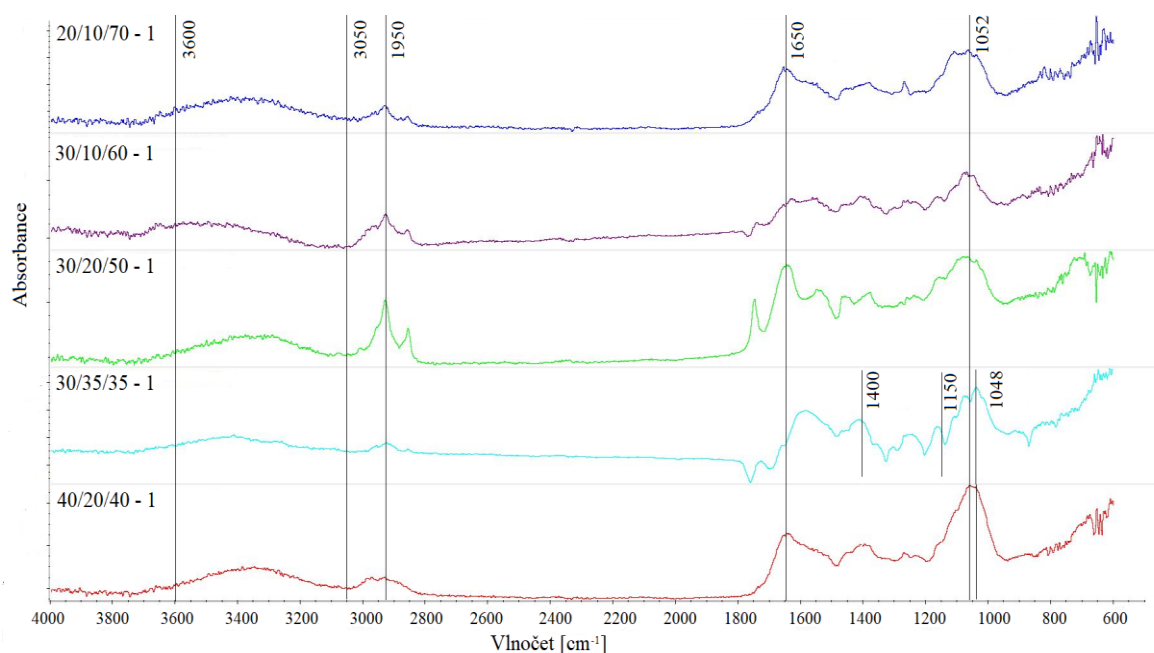
Na Obr. 28 jsou znázorněna spektra všech vzorků po procesu simulace aplikace na poli. U všech vzorků je v oblasti 3650 až 3050 cm^{-1} viditelný široký absorpční pás jako na předešlém Obr. 27 u plev a papíru. U vzorku 30/35/35 je ovšem odezva v této oblasti velmi slabá. U všech vzorků s výjimkou vzorku 30/10/60 je viditelná v oblasti 2950 cm^{-1} odezva pro obsah plev. Taktéž v oblasti 1650 cm^{-1} je odezva typická pro plevy. Pro již zmíněný vzorek 30/10/60 je odezva v této oblasti spíše srovnatelná s odezvou kraftového papíru. V oblasti 1048 cm^{-1} se u všech vzorků vyskytuje nejintenzivnější odezva -CO vazeb v celulóze obsažené v kraftovém papíru a plevách. V oblasti 1800 až 1200 cm^{-1} se vyskytují další pásy srovnatelné s kraftovým papírem a plevami [96, 97]. V žádném ze vzorků nejsou viditelné typické píky pro PBS v oblasti 1720 a 1160 cm^{-1} [98, 99]. Ovšem u vzorku 30/35/35 v oblasti 1450 až 1150 cm^{-1} se vyskytují vrcholy, které by mohly být srovnávány s odezvami v PBS. Lze tedy usoudit, že během procesu simulace aplikace na poli byl po 120 dnech PBS biologicky odbourán ve všech vzorcích s výjimkou vzorku 30/35/35. Výskyt PBS v tomto vzorku může být zapříčiněn vysokým obsahem kraftového papíru, který bránil v průniku mikroorganismů do vzorku. Tuto skutečnost potvrzuje i vizuální kontrola, kdy na lomu byl viditelný pouze kraftový papír a plevy.



Obr. 28 ATR-FTIR spektra zbytků vzorků po simulaci aplikace na poli při 23 °C

Na dalším obrázku (Obr. 29) jsou znázorněna spektra zbytků vzorků po simulaci kompostovacího procesu za laboratorních podmínek. Není zde uvedeno spektrum vzorku 30/70, jelikož během procesu došlo k jeho dostatečné dezintegraci. U všech spekter je opět viditelný široký absorpční pás v oblasti 3600 cm^{-1} až 3050 cm^{-1} a také odezva v oblasti 3000

až 2850 cm^{-1} s maximem 1950 cm^{-1} , typické pro celulózu. Dále jsou zde viditelné odezvy v oblastech 1650 cm^{-1} , 1048 cm^{-1} a mírně posunutá odezva v oblasti 1052 cm^{-1} . Ve spektrech nejsou opět viditelné typické odezvy v 1720 cm^{-1} a 1160 cm^{-1} pro PBS a lze tedy usuzovat, že i v tomto případě došlo k biologickému odbourání PBS [96, 97]. U vzorku 30/35/35 jsou pozorovatelné odezvy v oblasti 1400 až 1150 cm^{-1} , stejně jako při simulaci aplikace na poli, a u tohoto vzorku je tedy možné, že obsahuje malé množství PBS, které ovšem při vizuální kontrole nebylo pozorovatelné [98, 99].



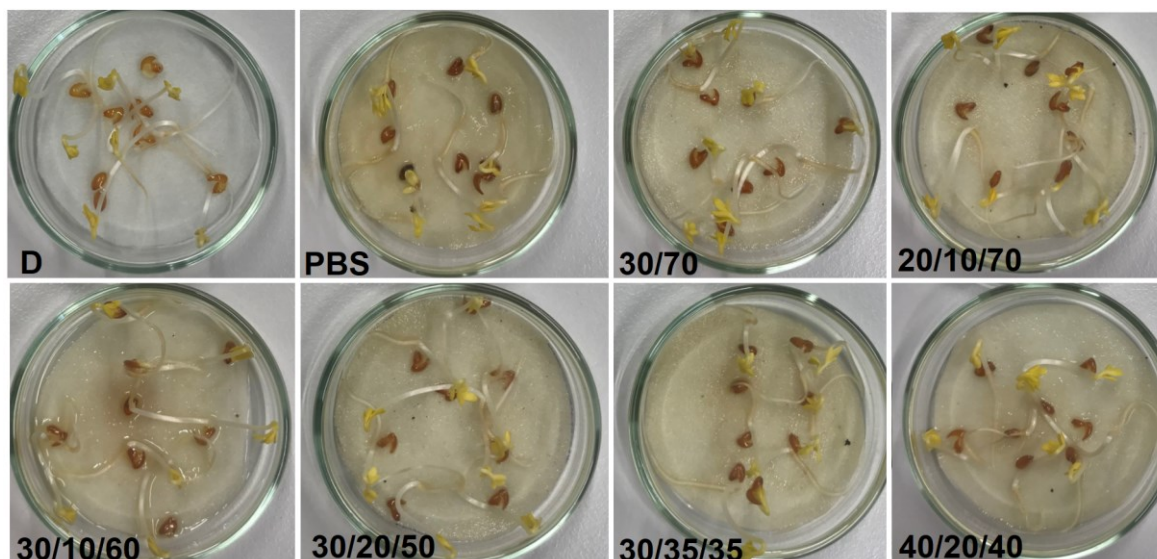
Obr. 29 ATR-FTIR spektra zbytků vzorků po kompostování za laboratorních podmínek při 58 °C

6.4.4 Stanovení fytotoxicity (řeřichový test)

Pro stanovení zralosti výsledného kompostu byl proveden tzv. řeřichový test. Na Obr. 30 jsou zobrazeny klíčky řeřichy seté ve výluzích kompostů po procesu simulace na poli (23 °C) po 72 hodinách. Následující Tab. 12 vyjadřuje indexy klíčivosti pro komposty vzorků při simulaci aplikace na poli za laboratorních podmínek, tj. při 23 °C , a indexy klíčivosti pro komposty po simulaci kompostovacího procesu za laboratorních podmínek, tj. při 58 °C .

Pro komposty po procesu simulace aplikace na poli (23 °C) byly hodnoty indexy klíčivosti (IK), až na výjimku vzorku 20/10/70 pod 50 %, což značí nezralost kompostů. Tento fakt koreluje s výsledky procesu rozkladu, kdy u žádného ze vzorků nedošlo k dostatečné dezintegraci, tj. D vyšší než 90 %. U vzorku 20/10/70 – 1 je IK nad hodnotou 60 % a je tedy možné tento kompost použít, ovšem s rizikem poškození rostlin.

Pro komposty po simulaci kompostovacího procesu při 58 °C jsou hodnoty IK s výjimkou vzorků PBS – 1, 30/10/60 – 2, 30/20/50 – 2 a 40/20/40 – 2 vyšší než 60 %. Tyto komposty jsou částečně zralé, tj. jsou ve fázi přeměny a lze je použít pro aplikaci, ale s rizikem poškození rostlin. Nejvyšší IK vykazují výluhy kompostů vzorku 20/10/70 a to 75 % a 77 %. U tohoto vzorku je riziko poškození rostlin nižší, jelikož se hodnoty IK blíží k hranici 80 %, která značí již dobře zralý kompost. Jak uvádí Plíva a spol. [81], komposty s indexem IK mezi 60 až 80 % jsou vhodné pro předjarní aplikace a rekultivace do pařenišť. K přeměně na dobře zralý kompost došlo pouze v případě Slepého pokusu – 1. Gavilanes-Terán a spol. [100] konstatovali při dosažení IK 86,6 % a 70,3 %, že oba komposty vykazovaly úplnou absenci fytotoxinů, jelikož hodnoty byly hodnoty IK vyšší než 50 % a lze je bezpečně využívat v zemědělství bez fytotoxických účinků.



Obr. 30 Sada vzorků po 72 hodinovém testu klíčivosti včetně reference (D)

Tab. 12 Hodnoty indexů klíčivosti kompostů na řěřichu setou

Vzorek	IK [%]	
	Při 23 °C	Při 58 °C
Slepý pokus – 1	29	82
Slepý pokus – 2	47	62
PBS – 1	34	58
PBS – 2	44	66
20/10/70 – 1	60	75
20/10/70 – 2	53	77
30/70 – 1	21	74
30/70 – 2	33	69
30/10/60 – 1	35	64
30/10/60 – 2	41	59
30/20/50 – 1	41	72
30/20/50 – 2	33	57
30/35/35 – 1	24	76
30/35/35 – 2	32	72
40/20/40 – 1	40	64
40/20/40 – 2	31	46

ZÁVĚR

Z nevyužitých zemědělských, papírenských a obalových druhotných surovin bylo navrženo a připraveno několik receptur pro výrobu kompozitních sadbovačů, z nichž celkem 6 bylo dále zkoumáno. Pro srovnání vybraných vlastností byly vzorky připraveny s plevy o frakci <2 mm a $<0,5$ mm. Z hlediska optických vlastností a celistvosti povrchu se jeví lépe vzorky s plevy o frakci $<0,5$ mm.

Z hlediska skladovatelnosti je důležité znát odolnost sadbovačů vůči okolní vlhkosti a proto byly změřeny kontaktní úhly, resp. povrchové energie všech vzorků. Všechny vzorky vykazovaly úhel menší než 90° , tj. všechny mají hydrofilní povahu. Nejvyšší povrchové napětí vykazovaly vzorky 30/10/60 a 40/20/40. Vzorek 40/20/40 také vykazoval u testu absorpce vody nejnižší hodnotu a to $25,01 \pm 0,46$ %. Dále s přihlédnutím na směrodatné odchylky byla povrchová energie srovnatelná pro vzorky 20/10/70, 30/20/50 a 30/35/35. Vzorky 20/10/70 a 30/20/50 také vykazovaly nejvyšší hodnoty absorpce vody ($72,55 \pm 1,97$ % a $59,29 \pm 0,28$ %). Je tedy zřejmé, že vzorek 20/10/70 by se měl díky rychlejšímu procesu hydrolyzy nejrychleji rozkládat.

Důležitým faktorem pro použitelnost sadbovačů je jejich mechanická odolnost, která byla zkoumána pomocí metody Charpyho kladiva. Při srovnání vzorků 30/10/60, 30/20/50, 30/35/35 a 40/20/40 byl pozorován trend, že s rostoucím obsahem PBS a papíru narůstala rázová houževnatost, popřípadě byla srovnatelná v rámci směrodatné odchylky u vzorků 30/35/35 a 40/20/40, 30/35/35 a 30/20/50. Při obsahu 20 hm. % PBS, tj. vzorek 20/10/70 byla rázová houževnatost nejnižší, z čehož lze usoudit, že došlo ke špatné adhezi mezi maticí a plnivem. V případě vzorku 30/70 byla rázová houževnatost srovnatelná v rámci směrodatné odchylky s ostatními vzorky obsahujícími 30 hm. % PBS, což značí dobrou adhezi mezi maticí a plnivem.

Následně bylo přistoupeno ke stanovení rozpadu vzorků pomocí simulace kompostování za laboratorních podmínek při teplotě 58°C po dobu 90 dní a také pomocí simulace aplikace na poli při teplotě 23°C po dobu 120 dní. V případě vyšší teploty došlo u všech vzorků k nárůstu stupně dezintegrace. K úplné dezintegraci došlo v pouze v případě vzorku 30/70, který neobsahoval kraftový papír. Tento vzorek také dosáhl nejvyššího stupně dezintegrace i při 23°C . Nižší stupeň dezintegrace pak vykazovaly vzorky 20/10/70 a 30/10/60. Ovšem ani při jedné sledované teplotě nebyly hodnoty D vyšší než 90 % a tedy nevyhovovaly podmínkám, jež udává norma ČSN EN ISO 20200:2015. Zbylé části vzorků byly následně

zkoumány pomocí infračervené spektroskopie, která potvrdila tvrzení z vizuální kontroly lomu vzorků, tj. že došlo během simulačních procesů k biologickému odbourání PBS. Na lomu jednotlivých vzorků byl vizuálně pozorován kraftový papír s občasným výskytem plev.

V poslední řadě byl proveden test fytotoxicity na řeřichu setou. Pomocí této metody bylo zjištěno, že při simulaci polních podmínek nedošlo k přeměně kompostu a ten byl tedy nezralý a nepoužitelný pro další aplikace. Komposty po simulaci při 58 °C vykazovaly až na vzorky PBS – 1, 30/10/60 – 2, 30/20/50 – 2 a 40/20/40, indexy klíčivosti nad hranicí 60 %, což značí, že komposty jsou ve fázi přeměny a vykazují nejlepší hnojivý účinek.

Z výše dosažených výsledků se jeví jako nejvíce vhodná receptura 30/70, tj. bez obsahu kraftového papíru, který je v ostatních případech problematický z hlediska biologického odbourávání. Vzorek vykazoval dobrou rázovou houževnatost díky dobré adhezi mezi maticí a plnivem, nejvyšší stupeň biologického rozkladu díky hydrofilní povaze a tomu odpovídající absorpci vody, která napomáhá rychlejší hydrolyze. Index klíčivosti v případě simulace kompostování byl vyšší než 60 % a výsledný kompost vykazoval tedy hnojivý účinek, zatímco v případě simulace aplikace na poli byl index klíčivosti výrazně horší a to 21 % a 33 %.

Nicméně z důvodu využití odpadního papíru se jeví jako přijatelná také receptura 30/10/60. Z důvodu rychlosti dezintegrace je žádoucí co nejnižší obsah kraftového papíru, kdy vzorek 20/10/70 vykazoval výrazně hydrofilní povahu a tomu odpovídající absorpci vody, to by mohlo mít při sadební aplikaci za následek nežádoucí únik vody. Vzorek také vykazoval nízkou rázovou houževnatost, což by mohlo být problematické při manipulaci. Z těchto důvodů se jeví jako přijatelnější vzorek 30/10/60, který vykazoval lepší rázovou houževnatost a nižší absorpci vody.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KUEHNY, J. S., et. al. Greenhouse and Landscape Performance of Bedding Plants in Biocontainers. *HortTechnology*, 2011, Vol. 21 (2), pp. 155–161. DOI:10.21273/HORTTECH.21.2.155
- [2] FUENTES, R. A., et. al. Development of Biodegradable Pots from Different Agroindustrial Wastes and Byproducts. *Sustainable Materials and Technologies*, 2021, Vol. 30, 338. DOI:10.1016/j.susmat.2021.e00338
- [3] JUANGA-LABAYEN, J. P.; YUAN, Q. Making Biodegradable Seedling Pots from Textile and Paper Waste—Part B: Development and Evaluation of Seedling Pots. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, Vol. 18 (14), 7609. DOI:10.3390/ijerph18147609
- [4] JIANG, L.; ZHANG, J. Biodegradable Polymers and Polymer Blends. *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*, 2013, pp. 109–128. DOI: 10.1016/B978-1-4557-2834-3.00006-9
- [5] KRZAN, A., et. al. Standardization and Certification in the area of Environmentally Degradable Plastics. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, Vol. 91 (12), pp. 2819–2833. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2006.04.034
- [6] AKARAONYE, E., et. al. Production of Polyhydroxyalkanoates: The Future Green Materials of Choice. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2010, Vol. 85 (6), pp. 732–743. DOI:10.1002/jctb.2392
- [7] ZAPLETAL, M.; TREJBAL, J. Izolace Polyhydroxyalkanoátů z Mikrobiální Biomasy. *Chemické Listy*, 2016, Vol. 110, pp. 860–867.
- [8] BRIASSOULIS, D., et. al. Alternative Optimization Routes for Improving the Performance of Poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) Based Plastics. *Journal of Cleaner Production*, 2021, Vol. 318, 128555. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.128555
- [9] RAZA, Z. A., et. al. Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, Production, Recent Developments and Applications. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, Vol. 126, pp. 45–56. DOI:10.1016/j.ibiod.2017.10.001
- [10] PEÑA, C., et. al. Biotechnological Strategies to Improve Production of Microbial Poly-(3-hydroxybutyrate): A Review of Recent Research Work. *Microbial Biotechnology*, 2014, Vol. 7 (4), pp. 278–293. DOI:10.1111/1751-7915.12129

- [11] KUČERA, F., et. al. The Structure-Hydrolysis Relationship of Poly(3-hydroxybutyrate). *Polymer Testing*, 2019, Vol. 80, 106095. DOI:10.1016/j.polymertesting.2019.106095
- [12] KE, Y., et. al. Reactive Blends Based on Polyhydroxyalkanoates: Preparation and Biomedical Application. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, Vol. 70, pp. 1107–1119. DOI:10.1016/j.msec.2016.03.114
- [13] ROOHI, et. al. PHB (poly- β -hydroxybutyrate) and Its Enzymatic Degradation. *Polymers for Advanced Technologies*, 2018, Vol. 29 (1), pp. 30–40. DOI:10.1002/pat.4126
- [14] MCADAM, B., et. al. Production of Polyhydroxybutyrate (PHB) and Factors Impacting Its Chemical and Mechanical Characteristics. *Polymers*, 2020, Vol. 12 (12), 2908. DOI:10.3390/polym12122908
- [15] EL-KADI, et. al. Biosynthesis of Poly- β -Hydroxybutyrate (PHB) from Different Bacterial Strains Grown on Alternative Cheap Carbon Sources. *Polymers*, 2021, Vol. 13 (21), 3801. DOI:10.3390/polym13213801
- [16] CAROTHERS, W. H., et. al. Studies of Polymerization and Ring Formation. X. The Reversible Polymerization of Six-Membered Cyclic Esters. *Journal of the American Chemical Society*, 1932, Vol. 54 (2), pp. 761–772. DOI:10.1021/ja01341a046
- [17] IVANKOVIĆ A., et. al. Biodegradable Packaging in the Food Industry. *Archiv für Lebensmittelhygiene*, 2017, Vol. 68, pp. 26–38. DOI:10.2376/0003-925X-68-26
- [18] ZHANG, C. *Biodegradable Polyesters: Synthesis, Properties, Applications*. Biodegradable Polyesters, 2015, pp. 1–24. DOI:10.1002/9783527656950.CH1
- [19] RAJESHKUMAR, G., et. al. Environment Friendly, Renewable and Sustainable Polylactic Acid (PLA) Based Natural Fiber Reinforced Composites – A Comprehensive Review. *Journal of Cleaner Production*, 2021, Vol. 310, 127483. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.127483
- [20] DEL CAMPO, A., et al. Accelerated Disintegration of Compostable Ecovio Polymer by Using ZnO Particles as Filler. *Polymer Degradation and Stability*, 2021, Vol. 185, 109501. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2021.109501

- [21] ALIOTTA, L., et. al. A Brief Review of Poly (Butylene Succinate) (PBS) and Its Main Copolymers: Synthesis, Blends, Composites, Biodegradability, and Applications. *Polymers*, 2022, Vol. 14 (4), 844. DOI:10.3390/polym14040844
- [22] VROMAN, I.; TIGHZERT, L. Biodegradable Polymers. *Materials*, 2009, Vol. 2 (2), pp. 307–344. DOI:10.3390/ma2020307
- [23] GIGLI, M., et. al. Poly(butylene succinate)-Based Polyesters for Biomedical Applications: A Review. *European Polymer Journal*, 2016, Vol. 75, pp. 431–460. DOI:10.1016/j.eurpolymj.2016.01.016
- [24] ALIAS, N. F.; MARSILLA, K.K. Processes and Characterization for Biobased Polymers from Polybutylene Succinate. In: *Processing and Development of Polysaccharide-Based Biopolymers for Packaging Applications*, 2020, pp. 151–170. DOI:10.1016/B978-0-12-818795-1.00006-X
- [25] DEBUISSY, T., et. al. Study on the Structure-properties Relationship of Biodegradable and Biobased Aliphatic Copolyesters Based on 1,3-propanediol, 1,4-butanediol, Succinic and Adipic Acids. *Polymer*, 2017, Vol. 122, pp. 105–116. DOI:10.1016/j.polymer.2017.06.045
- [26] XU, J.; GUO, B.-H. Poly(butylene succinate) and Its Copolymers: Research, Development and Industrialization. *Biotechnology Journal*, 2010, Vol. 5 (11), pp. 1149–1163. DOI:10.1002/biot.201000136
- [27] DING, Y., et. al. Modification of Poly(butylene succinate) with Biodegradable Glycolic Acid: Significantly Improved Hydrolysis Rate Retaining High Toughness Property. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, Vol. 139 (19), 52106. DOI:10.1002/APP.52106
- [28] KANEMURA, C., et. al. Mechanical Properties and Chemical Structures of Biodegradable Poly(butylene-succinate) for Material Reprocessing. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, Vol. 97 (6), pp. 972–980. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2012.03.015
- [29] MUTHURAJ, R., et. al. Hydrolytic Degradation of Biodegradable Polyesters under Simulated Environmental Conditions. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, Vol. 132 (27). DOI:10.1002/app.42189

- [30] ZHAO, J.-H., et. al. Biodegradation of Poly(butylene succinate) in Compost. *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, Vol. 97 (6), pp. 2273–2278. DOI:10.1002/app.22009
- [31] RAFIQA, S. A., et. al. A Review on Properties and Application of Bio-Based Poly(Butylene Succinate). *Polymers*, 2021, Vol. 13 (9). DOI:10.3390/polym13091436
- [32] KETATA, Nihel, Bastien SEANTIER, Noamen GUERMAZI and Yves GROHENS. Processing and properties of flax fibers reinforced PLA/PBS biocomposites. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2022, **53**, 228–236. ISSN 22147853. Available at: doi:10.1016/j.matpr.2022.01.047
- [33] FERREIRA-FILIPPE, D. A., et. al. Are Mulch Biofilms Used in Agriculture an Environmentally Friendly Solution? - An Insight into Their Biodegradability and Ecotoxicity Using Key Organisms in Soil Ecosystems. *Science of The Total Environment*, 2022, Vol. 828, 154269. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.154269
- [34] SHIH, Y.-F., et. al. Pineapple Leaf/Recycled Disposable Chopstick Hybrid Fiber-Reinforced Biodegradable Composites. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, Vol. 45 (4), pp. 2039–2046. DOI:10.1016/j.jtice.2014.02.015
- [35] ANZALONE, A., et. al. Effect of Biodegradable Mulch Materials on Weed Control in Processing Tomatoes. *Weed Technology*, 2010, Vol. 24 (3), pp. 369–377. DOI:10.1614/WT-09-020.1
- [36] FENG, Y.-H., et. al. Effect of Fiber Morphology on Rheological Properties of Plant Fiber Reinforced Poly(butylene succinate) Composites. *Composites Part B: Engineering*, 2013, Vol. 44 (1), pp. 193–199. DOI:10.1016/j.compositesb.2012.05.051
- [37] COSTA, R., et. al. The Use of Biodegradable Mulch Films on Strawberry Crop in Portugal. *Scientia Horticulturae*, 2014, Vol. 173, pp. 65–70. DOI:10.1016/j.scienta.2014.04.020
- [38] FROLLINI, E., et. al. Poly(butylene succinate) Reinforced with Different Lignocellulosic Fibers. *Industrial Crops and Products*, 2013, Vol. 45, pp. 160–169. DOI:10.1016/j.indcrop.2012.12.013

- [39] BILCK, A. P., et. al. Biodegradable Mulch Films for Strawberry Production. *Polymer Testing*, 2010, Vol. 29 (4), pp. 471–476. DOI:10.1016/J.POLYMERTESTING.2010.02.007
- [40] MOSNÁČKOVÁ, K., et. al. Ageing of Plasticized Poly(lactic acid)/Poly(3-hydroxybutyrate)/Carbon Black Mulching Films During One Season of Sweet Pepper Production. *European Polymer Journal*, 2019, Vol. 114, pp. 81–89. DOI:10.1016/j.eurpolymj.2019.02.010
- [41] TOUCHALEAUME, F., et. al. Performance and Environmental Impact of Biodegradable Polymers as Agricultural Mulching Films. *Chemosphere*, 2016, Vol. 144, pp. 433–439. DOI:10.1016/j.chemosphere.2015.09.006
- [42] ZHANG, H., et. al. Plastic Mulch Use in Perennial Fruit Cropping Systems – A Review. *Scientia Horticulturae*, 2021, Vol. 281, 109975. DOI:10.1016/j.scienta.2021.109975
- [43] Bio-Flex [online]. Germany, FKUR, Kunststoff GmbH, 2022. Dostupné z: <https://fkur.com/en/>
- [44] Biodegradable, Natural, and Plastic-Free Seed Starting Pots - CowPots [online]. USA, CowPots, 2022. Dostupné z: <https://cowpots.com/>
- [45] ELLACURIAGA, M., et. al. High-Solid Anaerobic Digestion: Reviewing Strategies for Increasing Reactor Performance. *Environments*, 2021, Vol. 8 (8), 80. DOI:10.3390/environments8080080
- [46] Fertil Pot [online]. France, FERTIL, 2018. Dostupné z: <https://www.fertil.fr/en/>
- [47] JiffyPots [online]. Netherlands, Jiffy Growing Solutions, 2022. Dostupné z: <http://www.jiffypot.com/>
- [48] KRÜGER, C., et. al. Peat and Pots: An Application of Robust Multiobjective Optimization to a Mixing Problem in Agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, Vol. 154, pp. 265–275. ISSN 01681699. DOI:10.1016/j.compag.2018.09.001
- [49] Coir Products [online]. United Kingdom, 2021, CoirProducts. Dostupné z: <https://coirproducts.co.uk/>

- [50] Haxnicks - Practical & Environmentally Friendly Garden Products [online]. United Kingdom, Tildenet Group Ltd, 2022. Dostupné z: <https://www.haxnicks.co.uk/>
- [51] ENGEL, J. B., et. al. Characterization Techniques Comparison Towards a Better Understanding of Different Cork-Based Stoppers Types. *Journal of Food Engineering*, 2022, Vol. 328, 111063. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2022.111063
- [52] Grow Cork [online]. Portugal, Life in a Bag, 2020. Dostupné z: <https://www.lifeinabag.pt/en>
- [53] Wholesale Plant Containers, Planters, Plant Pots [online]. USA, The HC Companies, Inc., 2022. Dostupné z: <https://hc-companies.com/>
- [54] SCHETTINI, E., et. al. Recycled Wastes of Tomato and Hemp Fibres for Biodegradable Pots: Physico-Chemical Characterization and Field Performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, Vol. 70, pp. 9–19. DOI:10.1016/j.resconrec.2012.11.002
- [55] PRATIBHA, S. S.; HARIPRASAD, P. Paddy Straw-Based Biodegradable Horticultural Pots: An Integrated Greener Approach to Reduce Plastic Waste, Valorize Paddy Straw and Improve Plant Health. *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 337, 130588. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.130588
- [56] SARTORE, L., et. al. Biodegradable Plant Nursery Containers from Leather Industry Wastes. *Polymer Composites*, 2018, Vol. 39 (8), pp. 2743–2750. DOI:10.1002/pc.24265
- [57] KHOLODOV, V. A., et. al. Contact Angles of Wetting and Water Stability of Soil Structure. *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48 (6), pp. 600–607. DOI:10.1134/S106422931506006X
- [58] MERRETT, K., et. al. Surface Analysis Methods for Characterizing Polymeric Biomaterials. *Journal of Biomaterials Science, Polymer Edition*, 2002, Vol. 13 (6), pp. 593–621. DOI:10.1163/156856202320269111
- [59] NOVÁK, J., et. al. Fyzikální Chemie - Bakalářský a Magisterský Kurz. VŠCHT, PRAHA, 2008, 148. ISBN: 978-80-7080-675-3
- [60] JIRKOVEC, R. Studium Smáčení Vlákných Struktur Pomocí Biokompatibilních Hydrogelů. Disertační práce. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta Textilní. Dostupné

- z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/161307/Disertace__Jirkovec.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [61] ČSN EN ISO 62 (640112) - Plasty - Stanovení nasákavosti ve vodě. Praha, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví, 2008.
- [62] ČSN EN ISO 179-1 (640612) - Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Praha, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví, 2010.
- [63] ČSN EN ISO 472 (640001) - Plasty – Slovník. Praha, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví, 2015.
- [64] CAZAUDEHORE, G., et. al. Can Anaerobic Digestion Be a Suitable End-of-Life Scenario for Biodegradable Plastics? A Critical Review of the Current Situation, Hurdles, and Challenges. *Biotechnology Advances*, 2022, Vol. 56, 107916. DOI:10.1016/j.biotechadv.2022.107916
- [65] GRIMA, S., et. al. Aerobic Biodegradation of Polymers in Solid-State Conditions: A Review of Environmental and Physicochemical Parameter Settings in Laboratory Simulations. *Journal of Polymers and the Environment*, 2000, Vol. 8 (4), pp. 183–195. DOI:10.1023/A:1015297727244
- [66] DELANGIZ, N., et. al. Can Polymer-Degrading Microorganisms Solve the Bottleneck of Plastics' Environmental Challenges? *Chemosphere*, 2022, Vol. 294, 133709. DOI:10.1016/j.chemosphere.2022.133709
- [67] JASSO-GASTINEL, C.F., et. al. Modifiable Characteristics and Application. *Modification of Polymer Properties*, 2017, pp. 1–21. DOI:10.1016/B978-0-323-44353-1.00001-4
- [68] ASTM D 6400-04 - Standard Specification for Compostable Plastics. USA, American Society for Testing and Materials, 2009.
- [69] ASTM D 6002-96 - Standard Guide for Assessing the Compostability of Environmentally Degradable Plastics. USA, American Society for Testing and Materials, 2002.
- [70] ISO 17088:2021 Plastics – Organic recycling – Specifications for compostable plastics, 2021. Geneva, 2021.

- [71] RUDNIK, E. Compostable polymer materials. Elsevier, 2019, 397. DOI: 10.1016/C2012-0-07075-5
- [72] MORSINK-GEORGALI, P.-Z., et. al. Compost Versus Biogas Treatment of Sewage Sludge Dilemma Assessment Using Life Cycle Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2022, Vol. 350, 131490. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131490
- [73] VAN ROIJEN, E. C.; MILLER, S. A. A Review of Bioplastics at End-of-Life: Linking Experimental Biodegradation Studies and Life Cycle Impact Assessments. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, Vol. 181, 106236. DOI:10.1016/j.resconrec.2022.106236
- [74] ČSN EN ISO 20200:2015 (640873) - Plasty - Stanovení stupně rozkladu plastů za simulovaných podmínek kompostování v laboratorním měřítku. Praha, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví, 2015.
- [75] ČSN EN ISO 14855-1 (640512) - Stanovení úplné aerobní biodegradability za řízených podmínek kompostování - Metoda stanovení uvolněného oxidu uhličitého - Část 1: Obecná metoda. Praha, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví, 2013.
- [76] ČSN EN ISO 14855-2 (640512) - Stanovení úplné aerobní biodegradability za řízených podmínek kompostování - Metoda stanovení uvolněného oxidu uhličitého - Část 2: Gravimetrické stanovení uvolněného oxidu uhličitého v laboratorním měřítku Praha, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví, 2019.
- [77] ČSN EN 14806 (770320) - Obaly - Předběžné hodnocení rozpadu obalových materiálů v modelových podmínkách kompostování v laboratorním měřítku. Praha, Český Normalizační Institut, 2006.
- [78] DUTTA, A. Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization*, 2017, pp. 73–93. DOI:10.1016/B978-0-323-46140-5.00004-2
- [79] SEDNIČKOVÁ, M., et. al. Changes of Physical Properties of PLA-Based Blends During Early Stage of Biodegradation in Compost. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, Vol. 113, pp. 434–442. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.02.078

- [80] EUROPEAN AND MEDITERRANEAN PLANT PROTECTION ORGANIZATION. Phytotoxicity assessment. EPPO Bulletin, 2014, Vol. 44 (3), pp. 265–273. DOI:10.1111/epp.12134
- [81] PLÍVA, P. Zakládání, průběh a řízení. Praha, Výzkumný Ústav Zemědělské Techniky, 2006. ISBN:80-86884-11-2
- [82] KOROL, A. B., et. al. Evolution of Wild Emmer and Wheat Improvement. Berlin, 2002, 364. ISBN:3-540-41750-8
- [83] ČSN EN 15802 (961503) - Ochrana kulturního dědictví - Metody zkoušení - Měření kontaktního úhlu. Praha, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví, 2010.
- [84] KWOK, D. Y., et. al. Contact Angle Measurements and Contact Angle Interpretation. 1. Contact Angle Measurements by Axisymmetric Drop Shape Analysis and a Goniometer Sessile Drop Technique. Langmuir, 1997, Vol. 13 (10), pp. 2880–2894. DOI:10.1021/la9608021
- [85] ČSN EN ISO 62 (640112) - Plasty - Stanovení nasákavosti ve vodě. Praha, Úřad pro Technickou Normalizaci, Metrologii a Státní Zkušebnictví, 2008.
- [86] CÉLINO, A., et. al. The Hygroscopic Behavior of Plant Fibers: A Review. Frontiers in Chemistry, 2014, Vol. 1. DOI:10.3389/fchem.2013.00043
- [87] DHAKAL, H. N., et. al. Characterization of Nano-Mechanical, Surface and Thermal Properties of Hemp Fiber-Reinforced Polycaprolactone (HF/PCL) Biocomposites. Applied Sciences, 2020, Vol. 10 (7), 2636. DOI:10.3390/app10072636
- [88] HENG, J. Y. Y., et. al. Methods to Determine Surface Energies of Natural Fibres: A Review. Composite Interfaces, 2007, Vol. 14 (7–9), pp. 581–604. DOI:10.1163/156855407782106492
- [89] XUE, B., et. al. Fabrication of Super-Tough Ternary Blends by Melt Compounding of Poly(lactic acid) with Poly(Butylene Succinate) and Ethylene-Methyl Acrylate-glycidyl Methacrylate. Composites Part B: Engineering, 2019, Vol. 172, pp. 743–749. DOI:10.1016/j.compositesb.2019.05.098
- [90] YAP, S. Y., et. al. Characterization and Biodegradability of Rice Husk-Filled Polymer Composites. Polymers, 2020, Vol. 13 (1), 104. DOI:10.3390/polym13010104

- [91] MAZUR, K. E., et. al. Mechanical, Thermal and Hydrodegradation Behavior of Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) Composites with Agricultural Fibers as Reinforcing Fillers. *Sustainable Materials and Technologies*, 2022, Vol. 31, 00390. DOI:10.1016/j.susmat.2022.e00390
- [92] VORAWONGSAGUL, S., et. al. Preparation and Foaming Behavior of Poly(Lactic Acid)/Poly (Butylene Succinate)/Cellulose Fiber Composite for Hot Cups Packaging Application. *Food Packaging and Shelf Life*, 2021, Vol. 27, 100608. DOI:10.1016/j.fpsl.2020.100608
- [93] BALLA, V. K., et. al. Additive Manufacturing of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: Processing and Prospects. *Composites Part B: Engineering*, 2019, Vol. 174, 106956. DOI:10.1016/j.compositesb.2019.106956
- [94] ALVAREZ, J.V. L., et. al. Biodegradation of Paper Waste Under Controlled Composting Conditions. *Waste Management*, 2009, Vol. 29 (5), pp. 1514–1519. DOI:10.1016/j.wasman.2008.11.025
- [95] PLATNIEKS, O., et. al. Sustainable Tetra Pak Recycled Cellulose / Poly(Butylene succinate) Based Woody-Like Composites for a Circular Economy. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 270, 122321. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122321
- [96] GONZÁLEZ MORENO, A., et. al. Pectin-Cellulose Nanocrystal Biocomposites: Tuning of Physical Properties and Biodegradability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, Vol. 180, pp. 709–717. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2021.03.126
- [97] KUČEROVÁ, V.; VÝBOHOVÁ, E. Zmeny Celulózy pri Vodnej Hydrolýze Dрева Vřby Bielej. *Chemické Listy*, 2014, Vol. 108, pp. 1084-1089. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_11_1084-1089.pdf
- [98] MOTTIE, A., et. al. Preparation and Characterization of Biodegradable Polybutylene Succinate/Polyurethane Membrane for Harvesting of *Chlorella Sorokiniana* Microalgae. *Algal Research*, 2022, Vol. 63, 102658. DOI:10.1016/j.algal.2022.102658
- [99] PHUA, Y. J., et. al. Reactive Processing of Maleic Anhydride-Grafted Poly(Butylene Succinate) and the Compatibilizing Effect on Poly(Butylene Succinate)

Nanocomposites. *Express Polymer Letters*, 2013, Vol. 7 (4), pp. 340–354.
DOI:10.3144/expresspolymlett.2013.31

- [100] GAVILANES-TERÁN, I., et. al. Windrow Composting as Horticultural Waste Management Strategy – A Case Study in Ecuador. *Waste Management*, 2016, Vol. 48, pp. 127–134. DOI:10.1016/j.wasman.2015.11.026

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

a_K	rázová houževnatost Charpy
ATR-FTIR	infračervená spektroskopie
C	uhlík
CH ₄	metan
CO ₂	oxid uhličitý
D	stupeň rozpadu
EPA	Americká agentura pro ochranu životního prostředí
FTIR	infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
H ₂ O	voda
hm. %	hmotnostní procento
IK	index klíčivosti
IR	infračervené
N	dušík
PBS	polybutylen sukcinát
PHA	polyhydroxyalkanoáty
PHB	poly-3-hydroxybutyrát
PE	polyetylen
PET	polyetylentereftalát
PLA	kyselina polyléčná
PP	polypropylen
PVC	polyvinylchlorid
R	celkový obsah těkavých látek
SW	nasákavost
UV	ultrafialové
γ	povrchová energie

Θ kontaktní úhel

+Sg směrodatná odchylka

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Obecné schéma variant downstreamu [7].....	13
Obr. 2 Obecná struktura PHA [9]	14
Obr. 3 Chemická struktura PHB [13]	14
Obr. 4 Syntéza PLA otevíráním kruhu [18].....	15
Obr. 5 Reakční schéma polymerace PBS [24].....	17
Obr. 6 Průběh hydrolytické degradace PBS [29].....	18
Obr. 7 Sadbovače „CowPots“ [44]	21
Obr. 8 Fáze rozkladu sadbovače FERTILPOT [46]	22
Obr. 9 Sadbovače „JiffyPots“ [47]	22
Obr. 10 Sadbovače z kokosových vláken [49]	23
Obr. 11 Sadbovače z bambusových vláken [50].....	24
Obr. 12 Sadbovače Grow Cork [52]	24
Obr. 13 Sadbovače EcoGrow [53].....	25
Obr. 14 Chování kapky kapaliny v mobilním rozhraní [59].....	28
Obr. 16 Vstupní suroviny: a) kraftový papír, b) plevy, d) plevy dezintegrované na frakci <0,5 mm, c) PBS folie	36
Obr. 17 Laboratorní mlýn POLYMIX PX-MFC 90 D	37
Obr. 18 Hnětič použitý pro přípravu vzorků.....	38
Obr. 19 Přístroj Surface Energy Evaluation System.....	40
Obr. 20 Vzorky připravené pro kompostovací proces	42
Obr. 21 Vzorky připravené pro řeřichový test před vložením do inkubátoru.....	45
Obr. 22 Absorpce vody jednotlivých vzorků po pátém cyklu	49
Obr. 23 Rázová houževnatost vzorků kompozitů sady č. (1) a (2).....	50
Obr. 24 Vzorky po ukončení kompostovacího procesu při 23 °C	55
Obr. 25 Zbylé fragmenty vzorků po vysušení	55
Obr. 26 Vzorky po ukončení procesu simulující kompostování při 58 °C.....	59
Obr. 27 Zbylé fragmenty vzorků po vysušení	59
Obr. 28 ATR-FTIR spektra vstupních surovin (kraftový papír, PBS, plevy).....	60
Obr. 29 ATR-FTIR spektra zbytků vzorků po simulaci aplikace na poli při 23 °C	61
Obr. 30 ATR-FTIR spektra zbytků vzorků po kompostování za laboratorních podmínek při 58 °C.....	62
Obr. 31 Sada vzorků po 72 hodinovém testu klíčivosti včetně reference (D).....	63

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Procentuální zastoupení jednotlivých složek v daných vzorcích	37
Tab. 2 Hustota a povrchové napětí použitých kapalin [84]	40
Tab. 3 Obsah jednotlivých surovin v syntetickém odpadu	42
Tab. 4 Parametry vstupního syntetického odpadu	43
Tab. 5 Postup při kompostování	44
Tab. 6 Hodnoty kontaktních úhlů pro suché vzorky (W - voda, E - ethylenglykol)	47
Tab. 7 Hodnoty povrchových energií pomocí Li-Neumannova modelu	48
Tab. 8 Charakterizace kompostu po ukončení testu při 23 °C.....	52
Tab. 9 Výsledky procesu rozpadu při 23 °C	54
Tab. 10 Charakterizace kompostu po ukončení testu při 58 °C.....	56
Tab. 11 Výsledky procesu rozpadu při 58 °C	58
Tab. 12 Hodnoty indexů klíčivosti kompostů na řeřichu setou	64