

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VLASTNOSTI KOMPOZITU Z POLYMLÉČNÉ KYSELINY A PŘÍRODNÍCH VLÁKEN

CHARACTERISATION OF NATURAL FIBRE REINFORCED POLYLACTIC ACID
COMPOSITE

AUTOR: Tomáš Havránek
STUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Zdeňka Jeníková, Ph.D.

PRAHA 2017

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havránek** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **424653**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vlastnosti kompozitu z polymléčné kyseliny a přírodních vláken

Název bakalářské práce anglicky:

Characterisation of natural fibre reinforced polylactic acid composite

Pokyny pro vypracování:

Cíl:

Charakterizovat kompozit s matricí z PLA a výztuží z přírodních vláken. Vytvořit vzorky pro zkoušky mechanických vlastností.

Postup:

1. Rešerše se zaměřením na polymléčnou kyselinu jako matrice pro kompozity s přírodními vlákny
2. Vytvoření vzorků s celulózovými vlákny
3. Měření vzorků
4. Vyhodnocení experimentů
5. Závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [2] BAREŠ, R. Kompozitní materiály. 1. vyd.1. Praha: SNTL, 1988.
- [3] Odborné články - vyhledání je součástí bakalářské práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Zdeňka Jeníková Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **24.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

28/4/17
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....
Podpis

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá charakteristikou kompozitních materiálů z polymléčné kyseliny a přírodních vláken. V teoretické části jsou popsány vlastnosti a druhy vybraných kompozitních materiálů a je charakterizován tzv. biokompozit. Experimentální část je zaměřena na výrobu a testování materiálu s matricí z polymléčné kyseliny a výztuží z papírových vláken. Měřené vlastnosti tohoto materiálu jsou srovnávány s vlastnostmi čisté matrice polymléčné kyseliny.

Klíčová slova

Kompozity, přírodní vlákna, polymléčná kyselina, biokompozit

Annotation

This bachelor thesis deals with the characterization of natural fiber reinforced polylactic acid composite. Properties and varieties of selected composites and the term bio-composite are described in the theoretical part. The experimental part concentrates on the design, manufacturing and testing of paper-fiber reinforced polylactic acid specimens. Obtained characteristics of this composite are compared to characteristics of a pure polylactic acid matrix.

Keywords

Composites, natural fibers, polylactic acid, bio-composite

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval především vedoucí této práce Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D., za bezmeznou trpělivost, péči a všechny cenné rady. Dále také děkuji firmě Renoplastic, jmenovitě Ing. Jiřímu Němečkovi a Stanislavu Havránkovi, za spolupráci, motivaci a odbornou pomoc, a firmě CIUR a.s., jmenovitě Ing. Františkovi Buráňovi a Ing. Janu Kühnelovi, za rady a poskytnutí vzorků papírových vláken. Nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině a všem blízkým za podporu a důvěru.

Obsah

I.	Úvod	1
II.	Teoretická část	2
1.	Kompozitní materiály	2
1.1.	Matrice	3
1.1.1.	Polymerní matrice	4
1.1.1.1.	Reaktoplastové matrice	5
1.1.1.2.	Termoplastové matrice	6
1.2.	Výztuž	7
1.2.1.	Částicová	8
1.2.2.	Vláknová	8
1.3.	Adheze mezi fázemi	13
2.	Biokompozity.....	16
2.1.	Biodegradabilní polymery	17
2.1.1.	Přírodní biodegradabilní polymery	20
2.2.	Přírodní vlákna	24
2.2.1.	Živočišná vlákna.....	25
2.2.2.	Rostlinná vlákna	25
2.3.	Kompozit PLA a přírodní vlákna	28
III.	Experimentální část.....	30
1.	Popis a cíl experimentální části	30
2.	Materiály	30
2.1.	Matrice	30
2.2.	Výztuž	31
2.3.	Aditiva	33
3.	Návrh a výroba vzorků	33
3.1.	Příprava směsi	33
3.2.	Výroba vzorků	35
4.	Testování vzorků	37
4.1.	Tahová zkouška	37
4.1.1.	Průběh zkoušky	37
4.1.2.	Výsledky.....	38
4.2.	Zkouška rázem v ohybu.....	40
4.2.1.	Průběh zkoušky	41
4.2.2.	Výsledky.....	42

4.3. Měření nasákavosti	43
4.3.1. Průběh zkoušky	44
4.3.2. Výsledky zkoušky	44
III Závěr a diskuze	46
Seznam použité literatury	48
Seznam použitých symbolů a zkratk	51
Seznam zkratk	51
Seznam veličin	52
Přílohy	54
Tahová zkouška	54
Zkouška rázem v ohybu	55
Zkouška nasákavosti	56

I. Úvod

Znečištění životního prostředí a jeho prokazatelné nevratné dopady na naši civilizaci se stávají v posledních letech hlavním tématem nejen ve vyspělých zemích. Přírodní procesy fungující v rovnováze po miliony let, zajišťující lidstvu obyvatelné podmínky na většině místech naší planety, byly během posledních sta let přivedeny lidským přičiněním téměř do bodu, ze kterého již tuto rovnováhu nebude možno v dohledné době nastolit. Vedle emisního znečištění ovzduší a mnohých ekologických katastrof je hlavní výzvou naší doby také zpracování pevného odpadu. Ačkoliv plasty nepředstavují svojí produkcí velkou ekologickou zátěž (plasty vyráběné z ropy tvoří pouze zlomek skutečné spotřeby ropy) a naopak díky snížení hmotnosti v mnoha svých aplikacích vedou ke snížení spotřeby energie, představují velké riziko jako odpady. Nově objevenou problematikou se stal plastový mikro odpad, který, nezachytitelný konvenčními filtračními systémy, způsobuje velké škody v ekosystému. Tyto poznatky vedou k rozvíjejícímu se zájmu v oblasti tzv. biodegradabilních plastů. Tyto plasty, často vyráběny z přírodních obnovitelných zdrojů, jsou ve vhodných podmínkách biologicky rozložitelné a mohou být považovány za budoucí náhradu dnešních tradičních plastů.

Tato práce se zabývá popisem těchto materiálů v závislosti na jejich použití v kompozitních materiálech. Kompozitní materiály využívající synergetické vlastnosti svých různých složek mohou vést k razantnímu vylepšení vlastností těchto plastů v mnoha aplikacích. Pro zlepšení především mechanických vlastností těchto plastů, při zachování ekologického přínosu celého materiálu, jsou vhodnou výztuží přírodní vlákna. Tato vlákna získávaná z přírodních zdrojů již dnes nahrazují tradiční kompozitní vlákna (například skleněná) v mnoha aplikacích. Také jejich popisem se zabývá tato práce.

II. Teoretická část

1. Kompozitní materiály

Výrobou kompozitních materiálů se výzkum a průmysl intenzivněji zabývá přibližně od druhé poloviny dvacátého století, především díky vyvinutí fenolických pryskyřic a skleněných vláken, které našly uplatnění v mnoha oblastech průmyslu. Známý jsou ale i aplikace kompozitů mající více než tisíciletou historii. Například materiály použité v tradičních mongolských lucích, japonských mečích, nebo stavbách z vepřovic, lze také považovat za kompozitní. [1]

Kompozity jsou obecně nazývány materiály, které se skládají ze dvou a více fází s rozdílnými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi s jasně rozlišitelnou hranicí. Výsledný heterogenní systém má zpravidla lepší mechanické vlastnosti než jeho individuální složky. Nejčastěji se jedná o pevné složky typu matrice – výztuž, ve kterých je matrice souvislým pojivem podporujícím a rozdělujícím nespojitou výztuž. Výztuž je především hlavním nositelem pevnosti a tuhosti materiálu. Z hlediska mechanických vlastností výsledného kompozitního materiálu je klíčová struktura, rozmístění a orientace výztuže v matrici a také adheze, a tedy celková soudržnost jednotlivých složek.

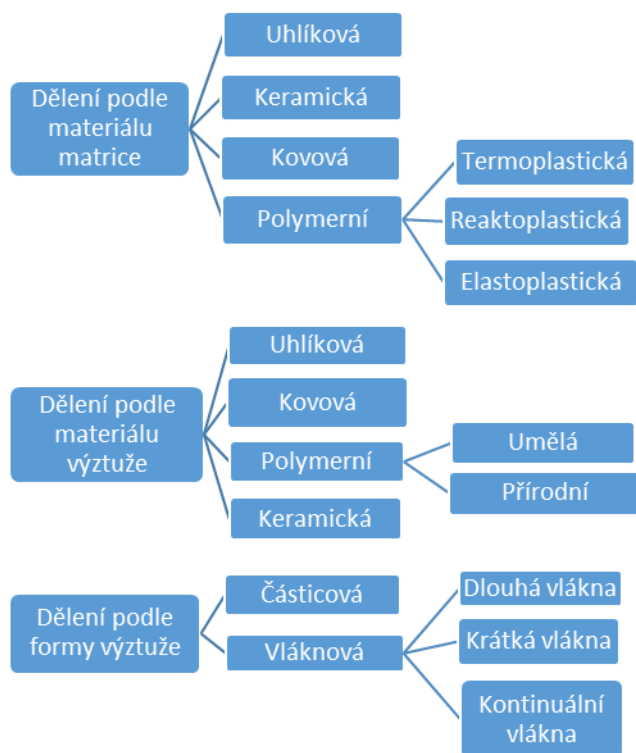
Současný průmysl zaměřený na výrobu kompozitních materiálů je inovativním odvětvím s rostoucím objemem výroby. Např. v roce 2012 byl celkový světový objem trhu s kompozity s uhlíkovými vlákny 14,6 miliard dolarů s ročním přírůstkem 13 %. Ačkoliv díky efektivnější výrobě cena materiálu za 1 kg klesá, odhaduje se, že do roku 2020 bude roční světový objem trhu až 36 miliard dolarů. [2]

Hlavní výhodou většiny kompozitních materiálů je jejich vysoká pevnost, tuhost a nízká hmotnost. Vláknové kompozity mohou být navíc vyráběny s ohledem na předpokládaný směr jejich namáhání, čímž se výrazně zlepšuje poměr pevnosti a hmotnosti. Kompozity také zpravidla vykazují vysokou odolnost proti stárnutí a korozi a nízkou teplotní délkovou roztažnost. Využitím různých matic a výztuží různých forem může být dosaženo specifických vlastností tzv. „na míru“ daným aplikacím.

Mezi hlavní nevýhody kompozitních materiálů patří komplexnost jejich fází, a tedy složité odvozování vlastností pro jejich danou kombinaci a technologie výroby kompozitu. Kompozitní materiály (především vláknové) mají také anizotropní vlastnosti pro různé

směry namáhání. Další nevýhodou je obtížná oprava místních poškození a často nemožná recyklace celého systému.

Nejčastější charakterizace kompozitů probíhá podle materiálů jejich jednotlivých složek a podle formy a orientace výztuže (obrázek 1). [3]



Obrázek 1: Základní rozdělení kompozitních materiálů [3]

1.1. Matrice

Matrice je obvykle pevný materiál, který je v průběhu výroby kompozitu ve viskózním stavu, při kterém je smíchán s výztuží. Po ztvrdnutí matrice do požadovaného tvaru je její hlavní funkcí zajištění geometrické stálosti výrobku, rozdělení a podpora výztuže a její ochrana před vnějším prostředím. Matrice také slouží k rovnoměrnému přenášení zatížení mezi všechny části výztuže. Při poruše segmentu výztuže by měla matrice být schopna přenést zatížení na jiné segmenty bez vytvoření trhlin.

Ve strojírenském průmyslu jsou nejrozšířenější matrice polymerní, kovové a keramické.

1.1.1. Polymerní matrice

Polymerní matrice kompozitních materiálů se mohou dále dělit na termoplastové, reaktoplastové (termosetové) a elastomerové. Jejich hlavní předností je nízká hustota, dobrá korozivzdornost a nízká teplota zpracování, při které zpravidla nehrozí teplotní poškození výztuže. Z těchto důvodů mohou být kombinovány se sklem, uhlíkovými vlákny, kovovými částicemi nebo přírodními vlákny. Jejich hlavní nevýhodou je nízká teplotní odolnost, limitující aplikační možnosti celého kompozitu.

Struktura polymerů může nabývat amorfní, nebo semikrystalické struktury. Amorfní struktura vykazuje nahodilé uspořádání makromolekul. Semikrystalická struktura je tvořena amorfní fází a krystalickou fází. V krystalické fázi jsou makromolekuly polymeru prostorově uspořádány například do lamel (krystalitů), sférolitů, nebo dalších krystalických útvarů.

Hlavními charakteristikami polymerních matric jsou molární hmotnost M_m , stupeň krystalinity a přechodové teploty (teplota tání, teplota skelného přechodu, a další).

Molární hmotnost

Molární hmotnost udává hmotnost jednotkového látkového množství 1 mol. Tato hmotnost je u polymerů dána molární hmotností monomeru M_0 a polymerizačním stupněm n . Výsledná molární hmotnost je pak dána jako:

$$M_m = M_0 * n \quad [kg * mol^{-1}] \quad (1)$$

Pro polymery skládající se z mnoha makromolekul s různými molárními hmotnostmi je zpravidla stanovena takzvaná distribuční křivka vyjadřující relativní podíl makromolekul určité molární hmotnosti v polymeru. Z distribuční křivky může být určena střední molární hmotnost \overline{M}_m udávající nejčtenější molární hmotnost.

Molární hmotnost ovlivňuje teplotu tání polymeru, tekutost jeho taveniny a také mechanické vlastnosti polymeru. S vyšší molární hmotností se zpravidla zvyšuje jeho pevnost, modul pružnosti a naopak se snižuje jeho tažnost.

Stupeň krystalinity

Semikrystalické polymery dosahují obvykle určitého podílu krystalické fáze v závislosti na jejich druhu, molekulární hmotnosti a dalších charakteristikách. Tento podíl je označován jako stupeň krystalinity a je udáván v procentech jako podíl objemu krystalické fáze na objemu polymeru. S vyšším stupněm krystalinity polymeru zpravidla roste jeho hustota, pevnost, modul pružnosti a tvrdost. Zároveň však klesá jeho schopnost deformace.

Přechodové teploty

Přechodové teploty udávají oblasti teplot, ve kterých polymery výrazně mění své vlastnosti (stavy). Jelikož polymery nevykazují plynné stavy a mimo pevného a kapalného stavu vykazují také takzvaný viskoelastický stav, jsou hlavními přechodovými teplotami teplota skelného přechodu T_g , teplota tání T_m a teplota viskózního toku T_f .

Teplota skelného přechodu T_g vyjadřuje teplotu (teplotní oblast) při které se stav polymeru při zahřívání mění ze sklovitého na viskoelastický. Tento přechod je způsoben poklesem mezimolekulárních sil omezujících relativní pohyb makromolekul polymeru. Při tomto přechodu výrazně klesá modul pružnosti polymeru a stoupá jeho tekutost.

Teplota tání T_m udává přechodovou teplotu pro semikrystalické polymery, při kterých dochází k tání krystalitů, a tedy rozpadu krystalické struktury. Při této teplotě přechází polymer z pevného do tekutého stavu.

Teplota viskózního toku T_f vyjadřuje přechodovou teplotu amorfních oblastí polymeru, při které polymery ztrácí elastické vlastnosti a přecházejí do tekutého stavu. [4]

1.1.1.1. Reaktoplastové matrice

Nejčastěji používané reaktoplastové matrice pro výrobu kompozitů jsou epoxidové pryskyřice, nenasycené polyesterové pryskyřice, polyimidy, fenolické pryskyřice a další. Jejich hlavní charakteristikou je nevratný chemický proces vytvrzování, který znemožňuje plastické přetvoření matrice po vytvrzení. V procesu výroby kompozitu je reaktoplastová matrice nejprve ve viskózní fázi, do které je zavedena výztuž. Poté je celý kompozit vytvrzen iniciací katalyzátoru a urychlovače díky dodání energie (teplo, záření) a následným vytvořením trojrozměrného zesíťování polymeru. Zahřívání matrice po jejím

vytvrzení vede pouze ke snížení tuhosti materiálu a k následné teplotní degradaci. Reaktoplastové polymery se vyznačují oproti jiným polymerům vysokou pevností a tuhostí. Jejich nevýhodou je ale jejich malá schopnost deformace a křehkost. V tabulce 1 jsou uvedeny hlavní charakteristiky nejpoužívanějších reaktoplastových matric.

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti reaktoplastových pryskyřic [3]

Materiál pryskyřice	Mez pevnosti [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Hustota [g/cm ³]
Epoxid	60 - 90	2,4 - 4,2	1,2 - 1,3
Polyester	30 - 70	2,8 - 3,8	1,2 - 1,35
Fenol-formaldehyd	40 - 70	7 - 11	1,2 - 1,3
Polyimid	55 - 110	3,2	1,3 - 1,43

V praxi nejčastěji využívané epoxidové pryskyřice jsou A bisfenol diglycidylether (DGEBA) a butandiol diglycidylether (DGEBD) vytvrzované zpravidla aminy.

Velmi rozšířená kombinace těchto matric s výztuží je ve formě kompozitů s nepravidelně rozdělenými krátkými vlákny vhodnými pro lisování nebo vstřikování (např. materiál BMC (*Bulk Moulding Compound*) – polyesterová pryskyřice vyztužená 6 – 12 mm dlouhými skleněnými vlákny). Dále jsou, především pro malosériovou výrobu a velkoplošné výrobky, často využívány pryskyřicemi prosycené tkaniny a rohože,. [3]

1.1.1.2. Termoplastové matrice

Termoplastové matrice se od reaktoplastových liší zpracovatelskými a uživatelskými vlastnostmi. Termoplasty jsou vysokomolekulární látky tvořené dlouhými lineárními řetězci monomerů uspořádaných buď do amorfních, nebo semikrystalických struktur. Dle této struktury můžeme termoplastové polymery dělit na amorfní a semikrystalické s určitým stupněm krystalinity.

Termoplasty jsou zpravidla při pokojových teplotách v pevném stavu. Teprve po zahřátí na zpracovatelskou teplotu nebo chemickém rozpuštění (standardně pouze u amorfních termoplastů) dosahují dostatečné viskozity pro možné zpracování a smáčení výztuže.

Veliké množství různých druhů termoplastů nabízí širokou škálu kompozitních matic s různými vlastnostmi. Nejběžněji používaným termoplastem pro běžné aplikace v kompozitech je polypropylen (PP). Teplota skelného přechodu T_g polypropylenu je v rozmezí -20° až -10°C . Díky standardně vysokému stupni krystalinity je však možné PP používat i pro provozní teploty až do 80°C . Polypropylen je možné také kopolymerovat polyethylenem (PE). Kopolymerace znamená vytvoření kopolymeru ve kterém se v lineárním řetězci střídají skupiny monomerů propylenu a ethylenu. Kopolymer PP a PE má vyšší houževnatost než homopolymer PP.

Pro náročnější aplikace s vyšším mechanickým namáháním jsou jako matrice nejčastěji používány polyamidy (PA), také označované komerčním názvem nylony. Tyto termoplasty jsou charakterizovány přítomností aminoskupin v uhlíkovém řetězci. Podle druhu uhlíkového řetězce jsou polyamidy označovány čísly (PA6, PA66, PA12, ...). Polyamidy mají standardně vyšší teplotu skelného přechodu a vyšší teplotu tání než polypropyleny.

Pro teplotně a mechanicky nejnáročnější aplikace jsou použitelné termoplasty s vyššími teplotami skelného přechodu a teplotami tání, jakými jsou například termoplastický polyester polyethylentereftalát (PET), polyfenilensulfid (PPS), nebo polyetheretherketon (PEEK). [5]

1.2. Výztuž

Výztuž kompozitu je z pravidla pevná nesouvislá fáze, zajišťující pevnost a tuhost celého systému. Hlavními charakteristikami výztuže ovlivňující výsledné vlastnosti kompozitu jsou její materiál, tvar, velikost, zastoupení v kompozitu (koncentrace), orientace, homogennost rozdělení v matrici (koncentrační distribuce) a adheze s matricí. Výztuže se nejčastěji dělí na částicové a vláknové.

1.2.1. Částicová

Částicové kompozity, někdy označované jako partikulové, jsou kompozity vyztužené pevným materiálem ve formě částic s přibližně stejnými rozměry ve všech směrech, bez jednoho výrazně převažujícího směru (např. kulovitý, elipsoidní, destičkový, tyčinkový tvar, nebo jiný nepravidelný tvar). Částice jsou obvykle do kompozitů přidávány za účelem zvýšení pevnosti, tvrdosti, tuhosti a také snížení ceny nebo zlepšení tepelné, případně elektrické vodivosti. Oproti kompozitům vyztuženými vlákny mají kompozity s částicovou výztuží většinou menší efektivitu ve smyslu zpevnění při zachování houževnatosti, neboť výrazně nerozkládají napětí v systému. S vyšším obsahem částicové výztuže v matrici obvykle stoupá křehkost materiálu. Z tohoto důvodu mají částicové kompozity z pravidla menší objemový obsah částic (10-50 %). Například studie vstříkovaných kompozitů nízkohustotního polyethylenu (LDPE) a písku ukazují malé zvýšení pevnosti základní matrice při přidání písku o hmotnostním obsahu 20 % a průměru částic do 0,5 mm. Písek v matrici LDPE však zároveň snížil houževnatost a tažnost výsledného materiálu v porovnání s matricí LDPE [6]. [7]

1.2.2. Vlákenná

Vlákenné kompozity hrají v současném průmyslu s kompozity největší roli. Zvýšení pevnosti základních matric po vyztužení vlákny je dáno charakteristikou vláken jako takových. Reálné pevnosti materiálů bývají z důvodu nedokonalostí a vad v materiálu zpravidla řádově nižší než jejich teoretické pevnosti. Zpevnění materiálu je možné docílit eliminací vad, které zpravidla vedou k rozvoji trhlin. Vlákna mají při zatížení ve směru délky vláken díky malým průřezovým rozměrům menší pravděpodobnost výskytu vad, a tedy rozvoje trhlin. Svazek vláken bude mít při zatížení menší pravděpodobnost rozvoje trhlin a tím větší pevnost než kompaktní materiál o stejných rozměrech.

Stejně jako u částicových kompozitů jsou hlavními vlastnostmi vláken ovlivňující výsledné vlastnosti celého systému jejich materiál a koncentrace. Pro vlákenné kompozity je však klíčová také orientace vláken a poměr os rozměrů vláken (*aspect ratio*). Vlákna v kompozitu mohou být buď orientovaná, nebo neorientovaná.

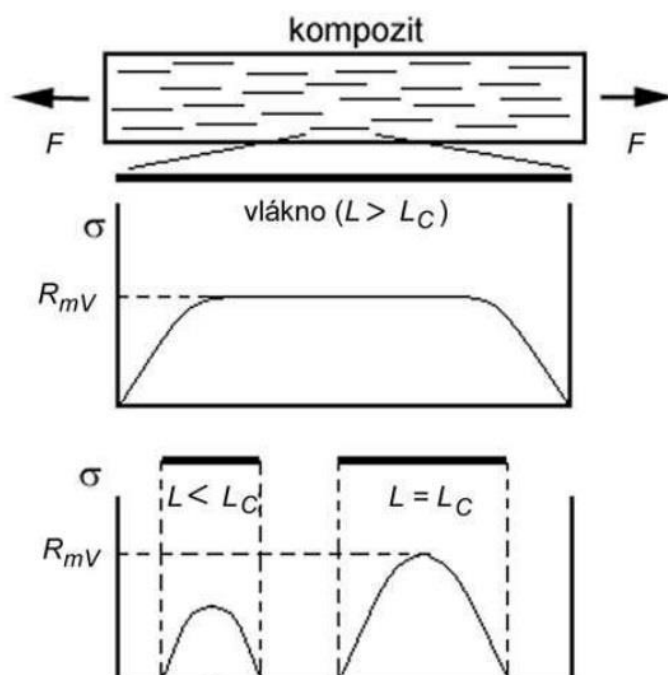
Kompozity s orientovanými vlákny zpravidla vykazují velmi anizotropní vlastnosti. To umožňuje při řízené orientaci vláken při výrobě docílit různých poměrů vlastností kompozitu v různých směrech. Například při optimalizaci poměru podélné pevnosti a

příčné pevnosti u jedno-směrných kompozitů může být dosaženo vyšších pevností pro předpokládané namáhání výrobku.

Pro technické aplikace se nejčastěji používají vlákna s kruhovým průřezem. Známe jsou ale i aplikace vláken ve formě tkaných pásků (např. tkané karbonové pásy TeXtreme® švédské firmy Oxeon AB [8]). Nejčastější produkty z vláken používané pro výrobu kompozitů jsou [7]:

- Příze – vznikající zkrucováním a splétáním pramenů vláken. Používají se pro výrobu tkanin. Jejich délková hustota je vyjadřována jednotkou tex [g/km].
- Roving – svazek nekonečných vláken bez zákrutu.
- Sekané a mleté prameny – krátká vlákna získaná dělením pramenů. Jsou využívána především pro výrobu vstřikováním a lisováním.
- Tkaniny – jednovrstvé propojení vláken nebo pramenů s více konstantními orientacemi
- Rohože – netkané jednovrstvé propojení s náhodnou orientací vláken nebo pramenů.
- Prepregy – nejčastěji jednovrstvé tkaniny, příp. rohože naimpregnované matricí kompozitu.

Při zatížení kompozitu je žádoucí, aby vlákna přenášela maximální podíl zatěžující síly. Jelikož se konce vláken nepodílejí na přenosu zatížení, roste napětí ve vlákně směrem ke středu vlákna až k maximálnímu napětí R_{mV} . Toto rozložení ilustruje obrázek 2.



Obrázek 2: Rozložení napětí σ ve vláknech s délkou L kompozitu zatíženém silou F [8]

Z tohoto rozložení je patrné, že délka vlákna má kritickou minimální hodnotu L_c potřebnou pro přenos napětí, rovnající se vlastní pevnosti. Tato délka, vyjádřená vztahem (2), je závislá na průměru vlákna d a jeho mezi pevnosti v tahu R_{mV} .

$$L_c = \frac{R_{mV} * d}{2\tau_m} \quad (2)$$

Veličina τ_m představuje buď mez kluzu matrice ve smyku, nebo pevnost rozhraní mezi matricí a vlákny ve smyku (pro výpočet je použita nižší z hodnot). [9]

Nejrozšířenější materiály vláken aplikovaných v kompozitech jsou sklo, uhlík, kovy, keramika a přírodní a syntetické polymery. Jako výztuž polymerních matric jsou nejrozšířenější skleněná, uhlíková, aramidová a přírodní vlákna (charakteristika přírodních vláken je popsána v kapitole 2 - Biokompozity).

Skleněná vlákna

Největší podíl objemu trhu vláken pro kompozity mají skleněná vlákna. Sklo je amorfní keramický materiál na bázi silikátu SiO_2 s příměsí oxidů Mg, Al, Ca, Pb, B a dalšími. Silné kovalentní vazby v základní trojrozměrné síti jsou příčinou vysoké hodnoty pevnosti a E modulu skla. Tato amorfní struktura také zajišťuje izotropní vlastnosti vláken. Výroba vláken probíhá tažením taveniny z trysek. Po natavení základních příměsí při teplotách až

1400 °C a následném číření se sklo v tekuté fázi vede soustavou trysek (200 až 4000 trysek) o průměru kolem 2 mm do chladícího média (například vodní emulze, která slouží zároveň jako lubrikace zajišťující ochranu vláken a zlepšující adhezní vlastnosti povrchu vláken), ze kterého se při pozvolném tuhnutí rychle navíjejí a protahují až na výsledný průměr (např. 10–14 μm).

Nejčastěji používanou sklovinou na výrobu vláken je takzvaná E-sklovina (bezalkalické vápenato-hlinito-křemičité sklo). Její předností je nízká cena a dobré mechanické vlastnosti.

Sklovina s vyšším obsahem SiO₂, MgO a Al₂O₃ má až o 70 % vyšší pevnost než E-sklo a je pro své výborné mechanické vlastnosti označováno jako S-sklo (*S- strenght*), příp. jako R-sklo (*R- resistance*).

Dalšími sklovinami vyznačujícími se především vysokou odolností proti kyselinám a chemicky agresivním látkám jsou tzv. C-skloviny a ECR-skloviny (C – chemická odolnost, E – elektrická odolnost).

Chemické složení a základní mechanické vlastnosti komerčních sklovin, používaných pro kompozity jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 2: Složení a mechanické vlastnosti neupravených skleněných vláken [3]

Sklovina	E	S (R)	C	ERC
Složení [%]				
SiO ₂	54	60	60-65	54-62
Al ₂ O ₃	14-15	25	2-6	12-13
CaO	-	14	14	21
MgO	20-24	3	1-3	4,5
Vlastnosti				
Hustota [g/cm ³]	2,60	2,53	2,52	2,72
Mez pevnosti v tahu [MPa]	3 400	4 400	2 400	3 440
E – Modul [MPa]	73 000	86 000	70 000	73 000
Poměrné prodloužení při přetržení [%]	<4,8	<4,6	<4,8	<4,8

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna jsou vlákna tvořená převážně atomy uhlíku, který je vázán v mikroskopických krystalech orientovaných paralelně k ose vlákna. Toto uspořádání zaručuje vysokou pevnost vláken v poměru k jejich průměru. Obvyklé průměry uhlíkových vláken se pohybují v rozmezí 5-10 μm . Jednotlivá vlákna jsou kroucena do příze obsahující až několik tisíc vláken a dosahující průměru až 0,5 mm. Z této příze mohou být posléze připravovány tkaniny nebo rohože, které po naimpregnování matricí kompozitu můžou ve formě prepegu sloužit k výrobě součástí z uhlíkových kompozitů.

Výroba uhlíkových vláken probíhá metodou řízené oxidace, karbonizace a grafitizace organických látek. Ty jsou ve formě tzv. prekurzorů stabilizovány do forem jemných vláken, která jsou následně „pálena“ za vysokých teplot v inertních atmosférách. V těchto podmínkách jsou z vláken vylučovány nežádoucí atomy a celá struktura je poté z 80-90 % tvořena uhlíkem. Při použití vyšších teplot může docházet i ke grafitizaci vláken, u kterých je dosaženo až 99,9% obsahu uhlíku.

Uhlíková vlákna jsou značena a dělena podle jejich pevnosti a modulu pružnosti (AS – *average strenght* (průměrná pevnost), HS – *high strenght* (vysoká pevnost), VHM – *very high modulus* (velmi vysoký modul pružnosti), a další).

Hlavní využití nacházejí uhlíková vlákna v kompozitech. Matrice těchto kompozitů je nejčastěji tvořena nenasycenými polyesterovými, vinylovými, nebo epoxidovými pryskyřicemi. Tyto materiály se vyznačují velmi vysokou pevností a odolností v poměru k nízké hmotnosti. Nacházejí uplatnění v leteckých a kosmických aplikacích, součástech závodních aut a v různém sportovním vybavení.

Aramidová vlákna

Jako aramidová jsou označována vlákna z aromatických para-amidů (p-fenylen-tereftalamidy, zkráceně PPTA), která disponují vysokou pevností a modulem pružnosti v tahu. Tato vlákna mají také nízkou měrnou hmotnost a jsou žáruvzdorná. Jejich nevýhodou je vysoká citlivost na UV záření a vlhkost.

Výroba aramidových vláken je založena na zvláknování para-amidů z roztoku za pomoci iontové složky reakční směsi, která se váže na vodíkové můstky amidové skupiny.

Obchodní název těchto vláken je Kevlar. Tato vlákna nacházejí uplatnění v leteckém a kosmickém průmyslu, ale také ve vojenských aplikacích (především v neprůstřelných materiálech).

1.3. Adheze mezi fázemi

Pro přenos zatížení systému na zpravidla pevnější výztuž je klíčová silná adheze na rozhraní fáze matrice a výztuže. Tato adheze je závislá na obsahu stykové plochy mezi maticí a výztuží a na vazbách na rozhraní obou fází.

Obsah stykové plochy

Styková plocha mezi fázemi závisí na ploše povrchu jednotlivých segmentů výztuže a na smáčivosti matrice. Plocha povrchu segmentů výztuže je dána jejich tvarem. Pro charakterizování obsahu stykových ploch v kompozitu můžeme součet ploch povrchů výztuže vyjádřit jako podíl k jednotkovému objemu kompozitu.

Pro vlákna platí, že poměr plochy povrchu vláken a objemu vláken je nepřímo úměrný průměru vláken r . Tento vztah popisuje rovnice 3 (plocha na koncích vláken je zanedbána).

$$\frac{S}{V} = \frac{2\pi r l}{\pi r^2 l} = \frac{2}{r} \quad (3)$$

Kde l je délka vlákna.

Z rovnice vyplývá, že při stejném objemovém obsahu vláken v kompozitu dosahují vlákna s menším průměrem větší plochy povrchu a tím větší stykové plochy.

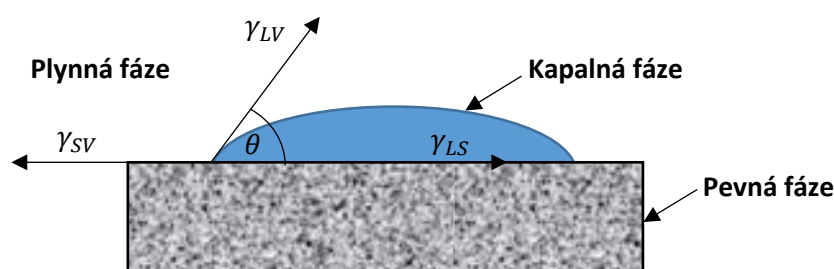
Plocha rozhraní mezi fázemi matrice a výztuže je dále také závislá na drsnosti povrchu výztuže. S vyšší drsností povrchu výztuže stoupá styková plocha na rozhraní fází. Tato plocha může být redukována při nehomogenním rozdělení výztuže a výskytu stykových ploch mezi jednotlivými segmenty výztuže.

Smáčivost

Smáčivost je schopnost kapaliny přilnout k povrchu pevných těles. Tato schopnost je mimo jiné závislá na povrchovém napětí a tekutosti kapaliny a je definovaná úhlem smáčení θ (úhel, který svírá tečna k povrchu kapky, vedená v bodě styku kapky kapaliny s rozhraním pevného tělesa a vzduchu). S klesajícím úhlem smáčení θ stoupá smáčivost kapaliny ($\theta = 0^\circ$ odpovídá maximální (ideální) smáčivosti). Tento úhel je možno vyjádřit z Youngovo rovnice:

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cdot \cos \theta \quad (4)$$

Kde γ_{SV} je povrchové napětí pro rozmezí pevné a plynné fáze, γ_{SL} povrchové napětí pro rozmezí pevné a kapalně fáze a γ_{LV} povrchové napětí mezi kapalnou a plynnou fází (obrázek 3).

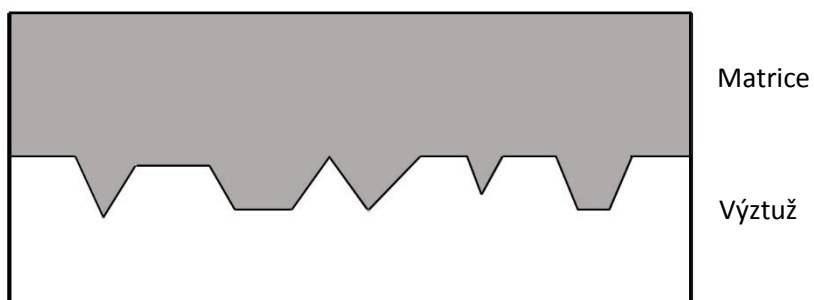


Obrázek 3: Úhel smáčení θ kapky v plynném prostředí na pevném povrchu [8]

Pro vyšší adhezi mezi fázemi kompozitu je nezbytná dobrá smáčivost matrice, a tedy nízké povrchové napětí matrice na kontaktu s výztuží, a vysoká tekutost matrice. Tekutost matrice musí být dostatečně vysoká pro proniknutí mezi segmenty výztuže, ale zároveň dostatečná pro udržení homogenního rozmístění výztuže v celém systému v procesu výroby.

Vazby na rozhraní obou fází

Vazby na rozhraní obou fází můžeme dělit na mechanické a fyzikálně-chemické. Mechanické vazby vznikají díky tření na stykových plochách a díky mechanickému zaklínění vlivem drsnosti povrchu výztuže (obrázek 4).



Obrázek 4: Mechanické zaklínění na rozhraní matrice a výztuže [8]

Fyzikálně-chemické vazby vznikají na stykových plochách mezi molekulami jednotlivých fází. Tyto vazby jsou způsobeny mezi-atomárními vazbami (van der Waalsovými silami, vodíkovými můstky a dalšími), anebo difuzním spojením na rozhraní obou materiálů. [4]

2. Biokompozity

Díky vrůstajícímu zájmu spotřebitelů o ekologicky šetrné produkty, především o ty určené k jednorázové spotřebě, roste také rozsah výzkumu v oblasti materiálů s nízkou uhlíkovou stopou. Tyto ekologicky šetrné materiály můžeme definovat pomocí požadavků, které jsou na ně kladeny. Jsou to především: nízká energetická náročnost v procesu výroby, obnovitelnost jejich zdrojů a recyklovatelnost. Ačkoliv výsledný ekologický dopad jednotlivých produktů je velmi komplexním problémem, který může především spotřebitele svést k nepodloženým řešením díky marketingovým kampaním, znamená tento trend významný rozvoj v oblasti biokompozitů.

Biokompozity nemají jako materiál obecně ustálenou definici. Požadavky na tento materiál, stejně jako u bioplastů, mohou být dvojího druhu: biodegradabilita všech částí kompozitu a původ všech částí v obnovitelných zdrojích. Díky těmto požadavkům vznikají tři skupiny biokompozitů:

- a) biodegradabilní, vyráběné z obnovitelných zdrojů;
- b) nebiodegradabilní, vyráběné z obnovitelných zdrojů;
- c) biodegradabilní, vyráběné z fosilních zdrojů.

Tato práce je zaměřena především na skupinu první, tedy kompletně biodegradabilní kompozity vyráběné z přírodních zdrojů. Tyto materiály mají teoreticky nejméně negativní ekologický dopad.

Pro většinu aplikací můžeme jako nejatraktivnější biokompozit považovat matici biodegradabilního bioplastu vyztuženou přírodními vlákny. Tento materiál spadající do první skupiny může najít uplatnění v produktech, pro které samotné bioplasty nemají dostatečné mechanické vlastnosti.

Přírodní vlákna v tomto materiálu mohou zastávat několik funkcí. Hlavní funkci přírodních vláken v biokompozitu, tedy zvýšení pevnosti a houževnatosti systému, ovlivňují především mechanické vlastnosti vláken, jejich obsah, rozměry, rozložení v systému a jejich adheze k matici. Přírodní vlákna mohou mít pro biokompozit i další pozitivní přínosy, např. snížení hustoty celého systému (za předpokladu nižší hustoty vláken k hustotě matrice), snížení ceny a zvýšení navlhavosti a tím zlepšení jejich biodegradability.

Ke snížení ceny matrice po přidání přírodních vláken dochází pouze v případě, ve kterém cena za kilo vláken p_{vl} je nižší než cena za kilo čisté matrice p_{mat} a kdy náklady na výrobu jednoho kila kompozitu N_{kom} nepřesáhnou cenu p_{mat} . Tento vztah můžeme vyjádřit jako:

$$p_{vl} * q_{hm} + p_{mat} * (1 - q_{hm}) + N_{kom} < p_{mat} \quad (5)$$

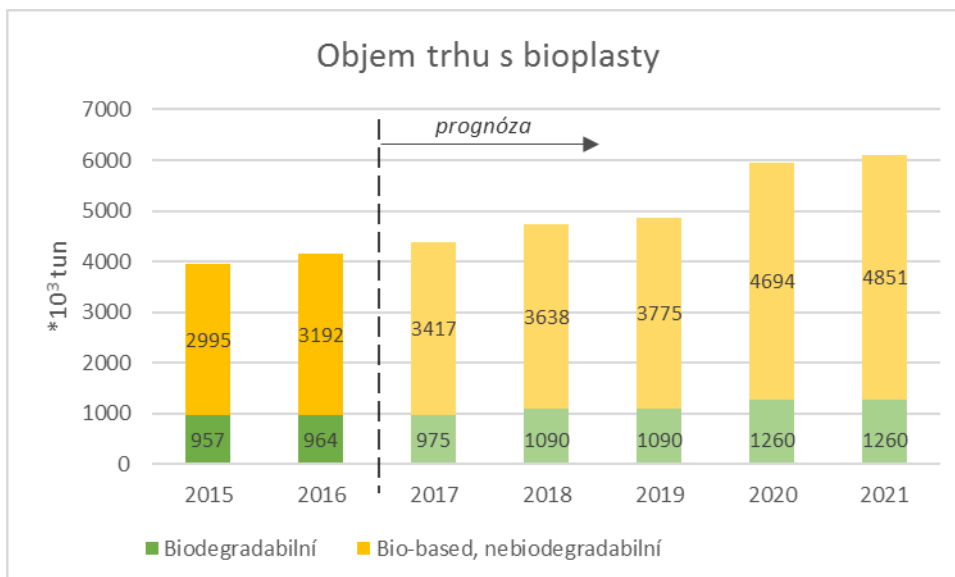
Kde q_{hm} [–] je hmotnostní podíl obsahu vláken v kompozitu.

2.1. Biodegradabilní polymery

V průmyslu jsou již dlouhou dobu známy plasty, které jsou vyráběny z obnovitelných zdrojů a jejich spotřeba tedy teoreticky není závislá na ropném průmyslu. Tyto plasty označované jako bioplasty, nebo *bio-based* plasty nejsou zaměnitelné s biodegradabilními plasty. Jejich jedinou charakterizací je původ uhlíkových řetězců, které musí být derivovány z přírodních obnovitelných zdrojů. [10]

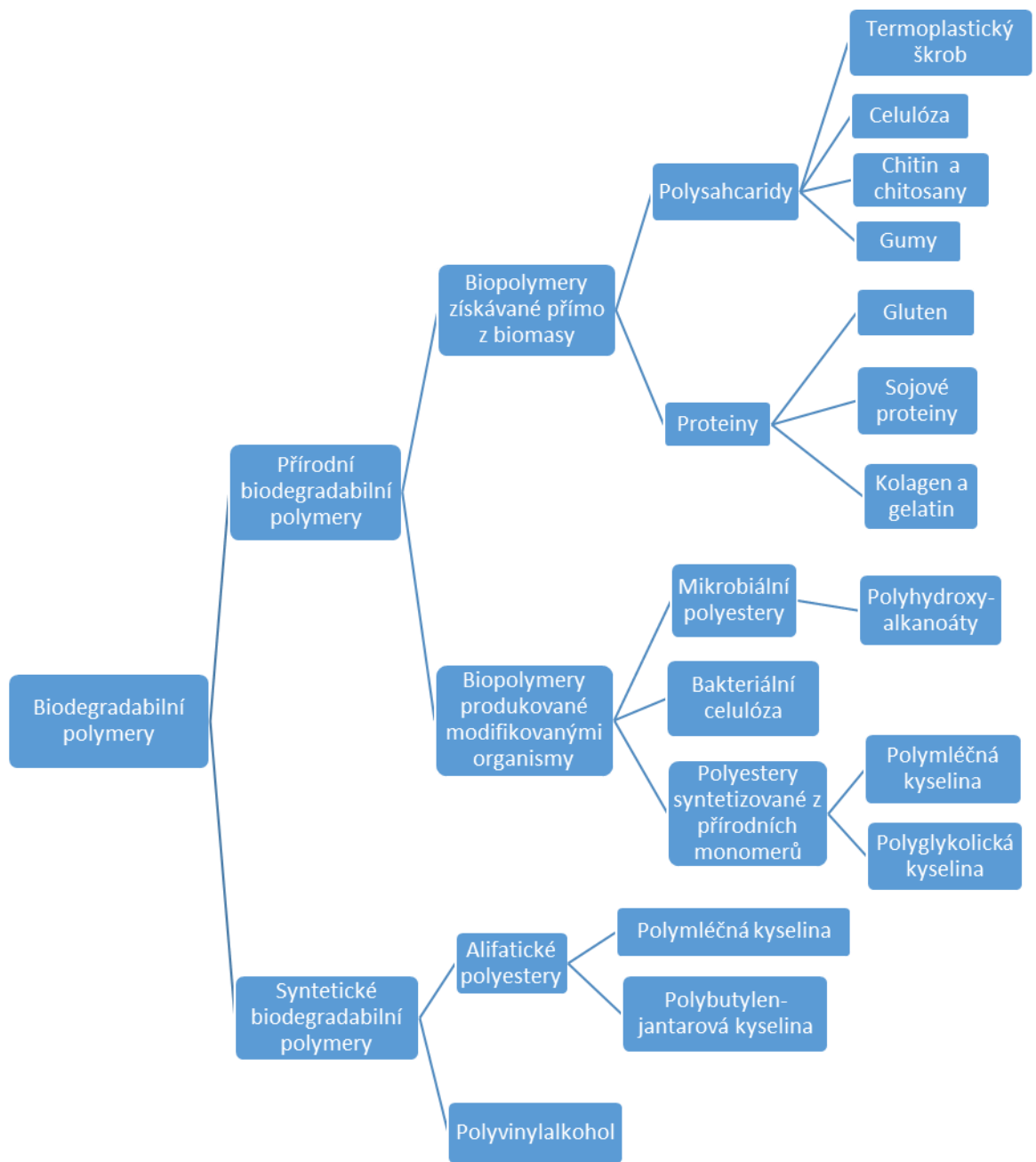
Biodegradabilní plasty mohou být získávány jak z přírodních zdrojů, tak výrobou v petrochemickém průmyslu. Jejich jedinou nutnou vlastností je jejich úplná biodegradabilita, definovaná mezinárodní normou ČSN EN 13432: „Obaly – Požadavky na obaly využitelné ke kompostování a biodegradaci“ jako: „*dosažený stupeň biologické rozložitelnosti, jestliže je zkušební materiál zužitkován mikroorganismy na konečné produkty oxid uhličitý, vodu, minerální látky a nové mikrobiální buněčné složky (biomasu)*“ [11].

Vlivem rostoucí poptávky po ekologičtějších produktech roste i trh s biodegradabilními plasty a s bioplasty. Asociace European Bioplastics odhaduje vzrůst objemu trhu s bioplasty o 54 % v letech 2015-2021, zatímco objem trhu s biodegradabilními plasty, tvořící v roce 2016 až 30 % objemu trhu s bioplasty, má v těchto letech vzrůst pouze o 30% (digram na obrázku 5). [12]



Obrázek 5: Objem trhu s bioplasty a biodegradabilními plasty v letech 2015 – 2021 [12]

Biodegradabilní polymery můžeme dělit například dle chemického složení, původu a výrobního postupu. Dle původu dělíme biodegradabilní polymery na přírodní polymery získané z přírodních zdrojů a syntetické polymery získané z ropy. Detail tohoto dělení je zobrazen na obr. 6. [13]



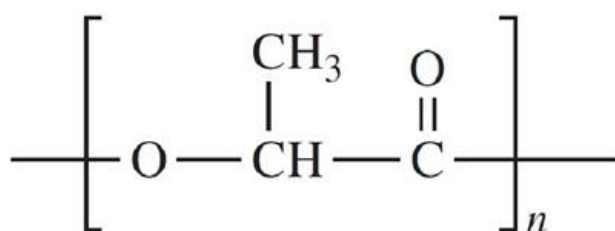
Obrázek 6: Dělení biodegradabilních polymerů dle jejich původu [13]

2.1.1. Přírodní biodegradabilní polymery

Přírodní polymery můžeme rozdělit na polymery získávané přímo z biomasy (tzv. biopolymery), které jsou vytvářeny biochemickými reakcemi přímo v organismech, a na syntetické biopolymery získávané syntézou z biomolekul. Nejčastějšími zdroji biopolymerů jsou rostliny (celulóza, škrob, proteiny, ...), živočichové (chitin, chitosan, proteiny, tuky, ...) a mikroorganismy (např. polyhydroxyalkanoáty). Z těchto polymerů jsou pro materiálové aplikace nejdůležitější rostlinná a živočišná vlákna a syntetické biopolymery.

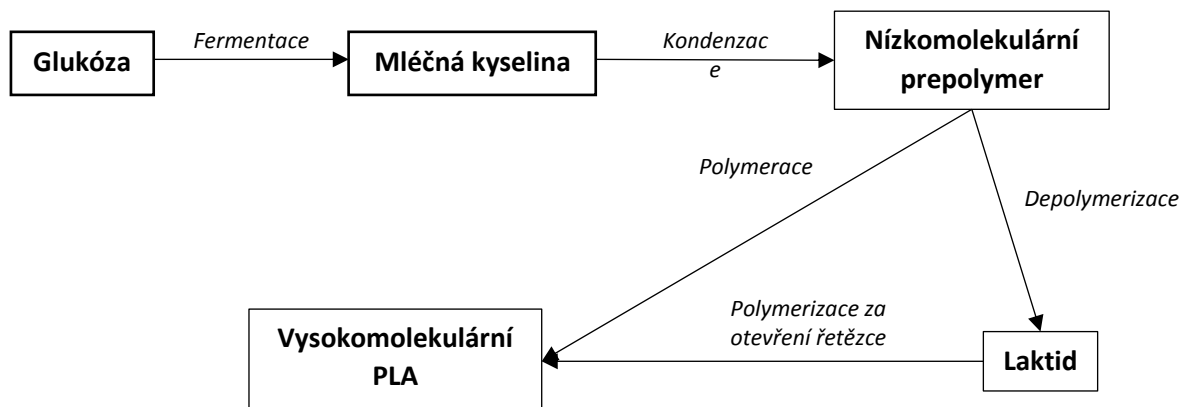
Polymléčná kyselina

Polymléčná kyselina (zkráceně PLA z anglického *polylactic acid*) je lineární polyester kyseliny mléčné. Tento polymer je biodegradabilní a lze jej získat z obnovitelných zdrojů. PLA má mechanické vlastnosti a technologii zpracování srovnatelnou s ostatními komerčními plasty. Tyto vlastnosti jsou hlavními důvody intenzivního výzkumu PLA v mnoha komerčních aplikacích. Strukturální vzorec PLA je zobrazen na obrázku 7.



Obrázek 7: Strukturální vzorec polymléčné kyseliny [13]

Výroba tohoto materiálu probíhá tradičně buď syntézou acetaldehydu (petrochemická cesta) nebo fermentací glukózy ze škrobů z přírodních zdrojů (cesta z obnovitelných zdrojů) za vzniku mléčné kyseliny. Z této kyseliny je pomocí její kondenzace získán nízkomolekulární prepolymer, který může být rovnou polymerován za přítomnosti katalyzátorů na vysokomolekulární PLA, nebo depolymerizován na cyklický laktidu a následně polymerizován tzv. „za otevření kruhu“, čímž rovněž vzniká lineární řetězec PLA. Schematizace tohoto procesu je znázorněna na obrázku 8. [14]



Obrázek 8: Způsoby výroby polymléčné kyseliny [14]

Objevení tohoto materiálu se datuje do roku 1932. Jednalo se však o nízkomolekulární polymer se slabými mechanickými vlastnostmi. Vyššího stupně polymerace a tím i lepších mechanických vlastností bylo dosaženo až v padesátých letech. Pro vysoké výrobní náklady se však výzkum tohoto materiálu nerozvíjel až do let devadesátých kdy se začalo velkoprodukčně využívat fermentace glukózy z přírodních zdrojů jako vstupního procesu výroby mléčné kyseliny.

Nejčastějšími přírodními zdroji používanými pro výrobu PLA jsou zemědělské produkty jako kukuřice, cukrová řepa nebo cukrová třtina.

Mléčné kyseliny dělíme na dva stereoizomery: L- kyselinu a D – kyselinu, podle jejich prostorové konfigurace měřené ovlivněním polarizovaného světla monomerem. Z kyseliny typu L může vznikat za určitých podmínek (teplota a čas trvání polymerizace, podíl katalyzátorů, ...) takzvaná meso forma, která je opticky neaktivní. Mléčné kyseliny získané fermentací jsou téměř výhradně typu L (také nazývané *poly (L-lactide) acid – PLLA*), s určitým podílem meso formy. Podíl meso formy a D - kyseliny v polymeru zpravidla výrazně snižuje teplotu tvorby a tání krystalů. Vyšší teplota tání krystalů polymeru pozitivně ovlivňuje teplotní a chemickou odolnost, pevnost a tuhost polymeru. Nižší teplota krystalizace naproti tomu dovoluje nižší procesní teploty při zpracování polymeru a tím vede k nižší degradaci materiálu v průběhu zpracování.

Vliv podílu L -kyseliny a D – kyseliny na teplotě skelného přechodu a teplotě tání pro vybraný polymer PLA ukazuje tabulka 3.

Tabulka 3: Přechodové teploty vybraných PLA kopolymerů [15]

Podíl kyselin [L/D]	Teplota skelného přechodu [°C]	Teplota tání [°C]
100/0	63	178
95/5	59	164
90/10	56	150
85/10	56	140
80/20	56	125

Tento trend je však nově vyvrácen vývojem tzv. PLA stereokomplexů (sc-PLA). Tento materiál je kopolymerem polymléčných kyselin L (PLLA) a D (PDLA). Strukturovaná kombinace těchto polymerů využívá silnou vazbu mezi L – kyselinou a D – kyselinou, která jinak v chaoticky uspořádaných kopolymerech výrazně nezvyšuje teplotní odolnost. PLA stereokomplexy vykazují až o 10°C vyšší teplotu skelného přechodu a teplotu tání až 230°C [16].

Na trhu s PLA plasty je k dostání mnoho modifikací PLA polymeru různých forem. Forma dodávaného materiálu a jeho složení závisí na způsobu zpracování a požadavcích na konečný produkt. Například švýcarský velkovýrobce Sulzer vyrábí více než deset druhů PLA ve formě granulí, prášku a vláken. Tyto druhy se liší svým stupněm krystalinity, složením aditiv a různou teplotou tání. [17]

Zpracovávání PLA může být zpravidla prováděno na stejných zařízeních a za podobných podmínek jako pro jiné tradiční polymery. Největší americký výrobce PLA firma NatureWorks LLC vyrábí PLA v modifikacích pro různé způsoby výroby (v sériích: 2000 (extruze a lisování); 3000 (vstřikování); 4000 (výroba fólií a filmů); 6000 (výroba vláken); 7000 (vyfukovací tváření); 8000 (výroba pěn)). [18]

Hlavními současnými aplikacemi PLA jsou jednorázové výrobky, jako například obaly, nádoby, tašky a sanitární výrobky. PLA je považováno za bezpečné pro kontakt s potravinami evropskou regulací EC No 1272/2008 [19]. Polymléčná kyselina se rozpadá vlivem hydrolytické degradace na kyselinu mléčnou, která je přirozeným vedlejším produktem lidského organismu. Kyselinu mléčnou dále rozkládají mikroorganismy v příhodných podmínkách na vodu a oxid uhličitý. [14] [13].

Termoplastický škrob

Mezi další komerčně využívané biodegradabilní polymery patří termoplastický škrob (TPS – *thermoplastic starch*). Škrob je polysacharid syntetizovaný fotosyntetickými reakcemi v rostlinách. Složení a vlastnosti škrobu velmi závisí na jeho původu. Největší obsah této látky vykazují především brambory, rýže, luštěniny a obiloviny. Jeho hlavními složkami jsou vysokomolekulární polysacharidy amyulóza a amylopektin. Tento polymer je ve své přirozené formě bílý prášek se strukturou obsahující různý podíl krystalických a amorfních složek.

Při výrobě termoplastického škrobu se vlivem teplotní a mechanické degradace eliminuje krystalická složka struktury. Tento proces je nejčastěji prováděn v extruderu bez přítomnosti vody promícháním škrobového prášku s různými aditivami (především plasticizéry, ale i plnivy, nadouvadly ...) a následné extruzí při teplotě 120 – 220 °C. V těchto podmínkách dochází ke snížení podílu krystalické složky jednak depolymerizací jednotlivých řetězců a dále narušením vodíkových vazeb mezi jednotlivými molekulami plasticizérem a vlivem fermentace škrobu.

Termoplastický škrob vykazuje dobrou biodegradabilitu a je kompostovatelný dle normy ČSN EN 13432. Jeho nevýhodou je jeho nízká pevnost, nízká tvrdost, nízká teplotní odolnost a především rozpustnost ve vodě. Výrobky z tohoto škrobu ale vykazují vysokou paropropustnost. Především díky kompostovatelnosti a paropropustnosti je termoplastický škrob často používán jako materiál pro potravinové obaly. Škrob může také podporovat biodegradabilitu ve směsi s jiným polymerem, kde po rozložení škrobu zůstávají póry podporující další degradaci původního polymeru. Další uplatnění nachází v kosmetice a v lékařských aplikacích. [13] [20]

Poly(3 - hydroxybutan)

Dalším přírodním polymerem využívaným v průmyslu pro svou podobnost s tradičními polymery je polyhydroxyalkanoát označovaný jako PHB. Tento materiál je získáván z kyseliny 3-hydroxybutanové, která je odpadním produktem některých bakterií. Dnes nejčastěji používanou bakterií pro výrobu PHB je *Alcaligenes eutrophus*. Tato bakterie je v tzv. fermentorech ponechána za přístupu živin při dané teplotě a vlhkosti. Kyselina HB je poté extrahována, čištěna a polymerizována. Tento polymer je ve své amorfní fázi

extruzí transformován na semikrystalickou látku. Ta je svými vlastnostmi (teplota tání, teplota skelného přechodu, ...) srovnatelná například s polypropylenem. Hlavní nevýhodou tohoto materiálu je však jeho nízká pevnost, křehkost, vysoká teplotní degradace, znemožňující mechanické zpracovávání za vyšších teplot a vysoká výrobní cena.

Nadnárodní americká firma Monsanto vyvinula geneticky modifikované plodiny (sóju, řepku, ...), které jsou schopny produkce kyseliny HB, čímž se razantně snižují výrobní náklady PHB. S nižšími výrobními náklady můžeme očekávat rozvoj výzkumu v oblasti využití PHB a jeho kompozitů. [20]

2.2. Přírodní vlákna

Přírodní vlákna jsou surovinou využívanou lidstvem po tisíce let. Ačkoliv jejich uplatnění je v současnosti nahrazováno vlákny umělými (plastovými, skleněnými, kovovými, ...) lze široké spektrum přírodních vláken najít především v textilním průmyslu a v posledních letech i v průmyslu s kompozity. Přírodní vlákna jako výztuž v kompozitech jsou v úspěšně využívána například v automobilovém průmyslu. Jejich vlastnosti jsou srovnatelné s vlastnostmi skleněných vláken. Hlavní atraktivitou pro moderní průmysl je jejich nízká enviromentální zátěž, nízké pořizovací náklady, nízká hustota a široká dostupnost. Živočišná i rostlinná vlákna rostou díky přirozeným procesům a tím efektivně přeměňují dostupnou energii a živiny. Tato vlákna jsou zpravidla biodegradabilní a jejich rozložením může vznikat biomasa vhodná pro hnojení.

Hlavní nevýhodou přírodních vláken pro aplikace v kompozitech je jejich hydrofilie a nízká teplotní odolnost. Hydrofilie přírodních vláken je způsobená velkým množstvím hydroxylových skupin molekul na povrchu vláken. Tato vlastnost snižuje adhezi k hydrofobním polymerům (jakým je například PLA) a vede k degradaci matrice vlivem zvýšené nasákavosti výsledného kompozitu. Pro zlepšení těchto vlastností jsou povrchy vláken často fyzikálně a chemicky upravovány. Fyzikální úprava může být prováděna hlazením, tepelnou úpravou, nebo úpravou plazmovým výbojem. Chemické modifikace probíhají nejčastěji za přítomnosti alkalických roztoků, acetylů, silanů, permanganátu a dalších.

Přírodní vlákna můžeme rozdělit podle jejich původu na rostlinná, živočišná a minerální. Jejich struktura obsahující organické i anorganické látky se může razantně lišit jak mezi různými druhy, tak, vlivem přírodních vlivů, u stejných druhů získávaných ze stejné oblasti.

2.2.1. Živočišná vlákna

Živočišná vlákna jsou složena z různých proteinových struktur a zpravidla jsou získávána buď ze zvířecí srsti (např. ovčí vlna), hmyzích produktů (hedvábí, pavoučí vlákna), nebo z ptačího peří. Tato vlákna jsou většinou velmi ekonomicky náročná na výrobu.

Kompozitní materiály s živočišnými vlákny zatím nenacházejí stálé uplatnění a jsou především předmětem vědeckého výzkumu. Zlepšení mechanických vlastností a zlepšení nehořlavosti matrice PP bylo například docíleno vytvořením kompozitu PP a ovčí vlny (30% hm.) [21].

Současný laboratorní výzkum je také zaměřen na velkoobjemovou produkci proteinů z pavoučích vláken, použitelných jako vysokopevnostní výztuž [22].

2.2.2. Rostlinná vlákna

Rostlinná vlákna se skládají z molekul celulózy, které se nachází v matrici tvořené ligninem a dalšími polysacharidy. Vysoce uspořádané molekuly celulózy držené matricí z ligninu a ostatních polysacharidů v buněčné stěně tvoří strukturu známou jako mikrofibrily.

Vláknitou strukturu vytvářejí rostliny ve svých listech, stoncích nebo semenech. Vlákna se liší svými vlastnostmi a strukturou, která vyplývá z funkce vláken v různých částech rostliny. Rostlina může také produkovat vlákna s různými vlastnostmi v závislosti na době sklizně vláken (tedy stáří rostliny) a na přírodních podmínkách růstu rostliny. K oddělení svazků vláken z rostlin se používají mechanické procesy, k získání vláken samotných je zapotřebí procesů chemických nebo enzymatických.

Pěstování rostlinných vláken, jejich získávání a zpracování, jsou jedněmi z nejstarších a nejrozšířenějších technologií lidstva. Rostliny vhodné pro produkci vláken byly v historii šlechtěny tak, aby se maximalizoval jejich výnos. Pro textilní průmysl nejrozšířenějšími rostlinnými vlákny jsou vlákna bavlněná a lněná. Průmyslové využití jednotlivých vláken

je především závislé na dostupnosti zdrojů. Cena a dostupnost vláken se zpravidla liší v různých oblastech, dle rozšířenosti plodin produkujících vlákna. Pro charakterizaci výtěžnosti vláken se používá podíl hmotnosti získaných vláken z rostlin rostoucích na jednom hektaru (hektarový výnos).

Pro výztuž kompozitních materiálů jsou nejrozšířenější tzv. vlákna lýková jako například vlákna konopná, jutová, sisalová a další. Známé jsou i aplikace vláken bambusových, kokosových, nebo ananasových. Základní mechanické vlastnosti těchto vláken jsou uvedeny v tabulce 4. [16]

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti rostlinných vláken [16]

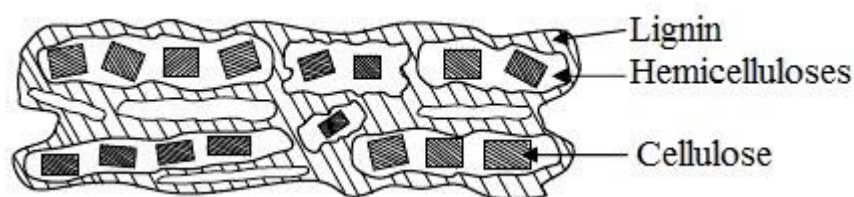
Vlákno	Pevnost v tahu [MPa]	Youngův model pružnosti [GPa]	Deformace při přetržení [%]	Hustota [g/cm ³]
Len	345-2000	27,5-85	1-4	1,54
Konopí	368-800	17-70	1,6	1,47
Juta	393-773	10-30	1,5-1,8	1,44
Sisal	350-700	9-22	2-7	1,45-1,5
Kokos	287-597	4-6	15-40	1,15
Bavlna	287-597	5,5-12,5	7-8	1,5-1,6
Bambus	140-230	11-17	<i>chybí</i>	0,6-1,1
Kenaf	240-930	14-53	1,6	1,2

Negativem pěstování rostlin pro vlákna, je suplementace jiných zemědělských rostlin používaných jako potraviny a krmiva. Tato suplementace, ačkoli pro objem spotřeby kompozitů nevýrazná, může vést k negativnímu ekonomickému dopadu na potravinářský průmysl (podobně jako suplementace pšenice a jiných rostlin řepkou olejkou používanou pro biopaliva). Řešením tohoto problému může být využívání odpadních zemědělských surovin jako například rýžových slupek [23] nebo odpadní celulózy z papíru [24].

Celulózová vlákna

Celulóza je polysacharid rostlinného původu, tvoří 30-50 % rostlinné biomasy. Celulózové fibrily jsou vázány na hemicelulózové molekuly a spolu tvoří základní materiál přírodních vláken. Lignin a pektin jsou další látky rostlinné biomasy a zajišťují

adhezi mezi molekulami vláken. Struktura jednotlivých složek v průřezu vláknem je zobrazena na obrázku 9.



Obrázek 9: Struktura celulózy, ligninu a hemicelulózy v buněčné stěně rostlinného vlákna [13]

Čistá celulóza může být tkána do viskózních vláken, která nacházejí uplatnění v textilním průmyslu. Tato jemná vlákna mají výborné mechanické vlastnosti, vhodné pro uplatnění v kompozitních materiálech.

Celulóza bývá nejčastěji získávána z rostlinných surovin jako bavlna, nebo dřevo. Po rozdrcení rostlinné buničiny je celulóza rozpuštěna v roztoku (např. NMMO - *N-metylmorfolin-N-oxid*) a separována od dalších látek buničiny (lignin, hemicelulóza). Takto získaná celulóza může být zvlákňována při průchodu tryskou a sušena (roztok NMMO je téměř 100 % recyklován). Výsledným produktem je celulózové vlákno s daným průměrem a délkou.

Využitím statického náboje může být celulóza navíjena až do forem nanovláken. Tato vlákna v průměru 250 nm mohou zlepšit mechanické vlastnosti například epoxidových pryskyřic už při hmotnostním obsahu do 0,5% [25]. [13]

Lněná vlákna

Lněná vlákna se získají ze stonků Lnu setého (*Linum usitatissimum*). Historicky patří lněná vlákna k nejstarším využívaným vláknům. Jejich délka a mechanické vlastnosti závisí na stupni zpracování. Jednotlivá vlákna jsou zpravidla 20 – 150 mm dlouhá a mají průměr 12-16 μm . Svazky vláken získávané rozmělněním stonků rostliny jsou dále zpracovávány předěním do přízí.

Lněná vlákna mají zpravidla vysokou pevnost. Jejich výhodou je široká dostupnost i v naší zeměpisné šířce. Nevýhodou lněných vláken je jejich vyšší hustota a nižší tažnost v porovnání s jinými rostlinnými vlákny. Výsledné mechanické vlastnosti výrazně ovlivňuje především způsob a podmínky pěstování rostlinné suroviny a následné zpracování vláken. [26]

Kenafová vlákna

Kenaf je materiál vláken získávaných z ibišku konopovitého (*Hibiscus cannabinus*), který je původem ze střední Afriky a běžně volně rostoucí v tropických a subtropických oblastech Afriky a Asie. Jednotlivá vlákna mají délku až 3 cm a v různě dlouhých svazcích tvoří až 20% hmoty stonku. Stonek byliny se tradičně rozmáčí a rozmělnuje na jednotlivé svazky. Nejpevnější vlákna bývají spíše ve spodních částech rostliny.

Kenafová vlákna se používají jako alternace ke skleněným vláknům v kompozitech polypropylenu (PP), polyethylenu (PE), polymléčné kyseliny (PLA) a dalších. Mají výborné mechanické vlastnosti a výrazně zlepšují teplotní odolnost matrice. Díky svým hydrofilním vlastnostem výrazně napomáhá k biodegradaci kompozitu PLA. [27]

Sisalová vlákna

Sisalová vlákna jsou získávána z rostlin rodu agáve. Ačkoliv tyto rostliny nejsou v našich zeměpisných šířkách příliš rozšířeny, mají sisalová vlákna široké uplatnění v kompozitních materiálech.

Sisalová vlákna jsou získávána z listů agáve, kde tvoří hmotnostní podíl 4 – 7 %. Tato vlákna můžeme dělit do kategorií dle jejich délky a kvality. Vlákna třídy 1 jsou zpravidla nejdelší (nejméně 910 mm) a mají nejvyšší pevnost. Další třídy jsou třídy 2, 3 a UG – *undergrade* (nižší třída). [28]

2.3. Kompozit PLA a přírodní vlákna

Polymléčná kyselina je díky svým vlastnostem nejrozšířenější maticí biokompozitů. Díky své univerzálnosti může být výroba kompozitů PLA zpravidla prováděna podobnými

způsoby, jako výroba kompozitů jiných termoplastů. Systém kompozitu PLA a přírodní vlákna lze popsat jako termoplast vyztužený dlouhými, nebo krátkými vlákny.

Výroba těchto kompozitních materiálů je komplexní záležitostí odvíjející se od vlastností jednotlivých fází výsledného systému. Zavedení výtzuže, která je obvykle ve své pevné fázi, do matrice lze trojím způsobem:

- a) zavedení výtzuže do tekuté matrice;
- b) zavedení výtzuže mezi pevné částice materiálu matrice a následné zpracování systému (zkapalnění matrice, zesíťování matrice);
- c) syntéza matrice na roztroušené částice výtzuže.

Nejrozšířenějšími metodami výroby kompozitů PLA a přírodních vláken jsou metody lisování a vstřikovacího lisování. Při klasickém lisování dochází k natavení matrice PLA vlivem vysokých teplot a tlaků až ve výsledné formě. Vstupem do této formy jsou přírodní vlákna, orientovaná nebo neorientovaná, která jsou zavedena mezi pevné segmenty matrice (fólie, granulát, vlákna, prášek, ...). Při procesu vstřikovacího lisování dochází k natavení a promíchání matrice s výtzuží díky vysoké teplotě, tlaku a stříhu ve šneku extrudovacího zařízení (jednoduchého, nebo dvojitého). Tuhnutí systému probíhá až ve formě výrobku. Při této metodě zpravidla nelze použít vlákna delší než 10 mm a není možné docílit orientace vláken. Vlákna mohou být v procesu výroby poškozena, ale díky lepšímu promísení s matricí vykazují zpravidla vyšší adhezi k matrici než u vláken zpracovaných lisováním. [15]

Metoda syntézy matrice PLA na přírodních vláknech se také nazývá reaktivní kompatibilizace. Při tomto procesu jsou vlákna zavedena do laktidu mléčné kyseliny. Tato kyselina má ideální viskozitu i při pokojové teplotě a zavedení a následné rozdělení vláken v této matrici je méně náročné než zavádění do polymerů při vysokých teplotách. Následná polymerizace laktidu je iniciována především hydroxylovými skupinami celulózy vláken, čímž dochází k dobré chemické vazbě mezi vlákny a výsledným polymerem. Dobrá adheze obou fází vede k lepším mechanickým vlastnostem materiálu než u kompozitu získávaného při natavení polymeru PLA. Nevýhodou této metody je však náročnost na vybavení při výrobě. [29]

III. Experimentální část

1. Popis a cíl experimentální části

Experimentální část je zaměřena na výrobu kompozitního materiálu z PLA a přírodních vláken a následné srovnání mechanických vlastností tohoto materiálu s původní čistou matricí PLA. Dalším nezávazným kritériem pro tento experiment bylo navržení produktu a technologie výroby pro rozšíření sortimentu firmy Renoplastic, který by splňoval následující podmínky: byl ekonomicky rentabilní, byl biodegradabilní, byl vyráběn z obnovitelných zdrojů a dosahoval mechanických vlastností dostatečných pro základní aplikace ve spotřebním průmyslu.

Po nalezení materiálu pro výztuž matrice PLA byly navrženy receptury výroby vzorků materiálů. Po vybrání nejlépe zpracovatelného materiálu byly vzorky tohoto materiálu podrobeny spolu se vzorky z čistého PLA zkoušce mechanických vlastností a následně vzájemně srovnány. Pro doplnění charakteristik kompozitního materiálu byla na obou materiálech také provedena zkouška nasákavosti.

2. Materiály

2.1. Matrice

Pro matici biokompozitu z polymléčné kyseliny byl použit prášek z recyklovaného PLA firmy Sulzer určené pro zpracování vstřikováním a schválený dle FDA 21 CFR pro bezpečný kontakt s potravinami. Tento prášek zpracovaný firmou Renoplastic je recyklátem vtokových soustav a odpadního materiálu při výrobě jednorázových příborů. Mletí prášku probíhalo na talířovém mlýnu Amis. Vlastnosti původního materiálu uvedené v tabulce 5, jsou převzaté z katalogu firmy Sulzer a jsou pouze orientační. Opakované zpracování materiálu vede ke změně jeho mechanických i fyzikálních vlastností. Základní vlastnosti byly změřeny v rámci této experimentální části až na vzorcích PLA sloužící ke srovnání s biokompozitem a jsou uvedeny níže.

Tabulka 5: Materiálový list PLA L99-L [17]

Fyzikální vlastnost	Hodnota	Jednotka	Metoda testování
Hustota polymeru	1,25 ± 10 %	g/ml	ISO 1183
Teplota skelného přechodu	60 ± 5	°C	DSC
Index toku taveniny MFI 2,15kg/190 °C	30 ± 10	g/10 min	ISO 1133-1
Obsah D-isomeru	1	%	Chiral CG
Krystalinita	40-45	%	DSC
Teplota tání	173	°C	DSC

Prášek byl skladován před každým použitím dle normy ČSN EN ISO 291 nejméně 24 hodin při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 10 %.

2.2. Výztuž

Pro výrobu biokompozitu byl hledán ideální materiál výztuže, potažmo plniva matrice. Tato výztuž, jejíž podmíněným požadavkem byla forma vláken a přírodní původ, musela pro vytvoření produktu splňovat další podmínky. Mezi tyto hlavní podmínky patří biodegradabilita a nízká cena. Efektivní řešení, na které se firma Renoplastic, pro kterou byl produkt navrhován, tradičně zaměřuje, je využití recyklovaných surovin. Ty zpravidla zajišťují nízkou až nulovou pořizovací cenu a výsledky často srovnatelné s produkty používající nové suroviny.

Po prozkoumání nabídky na trhu byla nakonec nalezena surovina ve formě krátkých celulóзовých vláken firmy CIUR a. s. pocházejících z recyklovaného papíru. Papír obsahující celulóзовá vlákna vhodná pro výztuž kompozitů, je jednou z nejdostupnějších recyklovaných komodit na trhu. Spotřeba papíru a využití sběrového papíru rok od roku roste. Sběrného papíru bylo dle asociace papírenského průmyslu v roce 2014 získáno 887 tisíc tun [30].

Česká firma CIUR a. s. se specializuje na výrobu celulóзовých vláken ze sběrného papíru již téměř 30 let a patří mezi světové špičky v tomto oboru. Její sortiment zahrnuje širokou škálu celulóзовých vláken pro využití především v tepelných a zvukových izolacích, ale i v jiných průmyslových odvětvích.

Pro vyztužení polymerní matrice byly ze sortimentu firmy vybrány 3 druhy vláken. Všechna tato vlákna pochází ze směsi sběrného papíru a liší se především svou hrubostí. Hrubostí vláken je rozuměna velikost svazků jednotlivých celulózových vláken, které spolu se zbytkovými látkami papíru (inkoust, plnidla, ...) tvoří papírová vlákna výsledného materiálu. Tato vlákna jsou značena firemními názvy F500, F3000 a F 8000 (obrázek 10).



Obrázek 10: Druhy papírových vláken s označením F500, F3000 a F8000

2.3. Aditiva

Jako jediné aditivum do směsi PLA a papírových vláken byl přidán modifikátor tekutosti polyamidů SCONA TPPE 2400 GAHD od výrobce BYK. Toto aditivum bylo přidáno, na základě dřívějších zkušeností, do směsi kvůli snížení viskozity tekutého PLA v procesu zpracování extruderem, které vede k lepší adhezi mezi vlákny a matricí. Doporučený obsah aditiva SCONA ve směsi je 1-5 %. Tento modifikátor funguje na bázi kyseliny akrylové vázané na vysokohustotní polyethylen a je dodáván ve formě granulátu. Výskyt polyethylenu ve směsi biokompozitu může zapříčinit výrazné snížení biodegradability materiálu. Pro současný produkt bylo však nezbytné podpořit vazbu mezi dvěma složkami kompozitu, a tím vylepšit jeho mechanické vlastnosti. Použití biodegradabilních aditiv (např. ligninu) zastupující modifikátor SCONA bude předmětem dalších experimentů.

3. Návrh a výroba vzorků

Pro vytvoření výsledného produktu bylo třeba vybrat z řady vláken vhodná vlákna, určit jejich obsah v matrici a navrhnout technologii výroby. Výběr složení se zakládá na rešerši studií problematiky kompozitů PLA a přírodních vláken a na dřívějších zkušenostech a doporučeních zaměstnanců firmy Renoplastic, kde byla výroba provedena.

3.1. Příprava směsi

Pro maximální vyztužující efekt vláken z papíru bylo zapotřebí vybrat vlákna s ideálním průměrem a ideální délkou. Studie popisující vliv průměru a délky celulóзовých vláken na mez pevnosti a prodloužení při přetržení pro kompozit s PLA [15] ukazuje zvyšující se pevnost a pružnost pro snižující se průměr vláken a zvětšující se délku. Z technologických důvodů je však obtížné zpracovávání vláken s malým průměrem z důvodu shlukování se vláken a jejich obtížné rozptýlení v prášku materiálu matrice.

Ze tří různých druhů vláken od firmy CIUR byli určeny dva, které budou nejvhodnější pro výrobu kompozitu. Materiál F8000 nebyl vybrán pro vysokou hrubost jednotlivých vláken, nezaručující dobré mechanické vlastnosti kompozitu.

Hmotnostní obsah vláken potřebný pro dosažení maximálních synergických účinků jednotlivých složek závisí na použité technologii výroby kompozitu. Kompozity vyráběné

lisováním směsi pevných složek matrice a výztuže dosahují lepších vlastností při vyšších koncentracích než kompozity vyráběné vstřikováním. Během vstřikování směsi vláken a tekuté matrice dochází k míšení a shlukování vláken a jejich poškozování. Studie kompozitu PLA a celulózových vláken vykazují dosažení nejvyšších pevností kompozitu vyráběného vstřikováním při hmotnostním obsahu 20-40 % [15].

Jelikož jsou papírová vlákna cenově výrazně levnější za 1 kg než polymer PLA, platí, že s vyšší koncentrací vláken klesá cena za kompozit.

Pro výrobu vzorků kompozitního materiálu byly vybrány tyto směsi (tabulka 6):

Tabulka 6: Označení a složení vybraných směsí

Označení	Koncentrace [hm. %]		
	PLA	F3000	F500
PLA 20 F3000	80	20	0
PLA 50 F3000	50	50	0
PLA 30 F500	70	0	30

Do každé směsi bylo zamícháno také aditivum SCONNA, které bylo z granulátu nejprve rozemleto na laboratorním mlýnku. Hmotnost přidaného aditivu v každé směsi tvoří 5 % celkové hmotnosti směsi. Celková hmotnost každé směsi byla 400 g.

Každá ze složek směsi byla před smícháním vložena do horkovzdušné pece a sušena při teplotě 80 °C po dobu 2 hodin. Celková hmotnost každé směsi byla 400 g.

Po vysušení proběhlo míchaní složek směsí tzv. „na sucho“ ve vysokootáčkovém stolním mixéru Vital Blend značky ETA za použití standardního mixovacího nože a otáček 28 000 za minutu.

Spolu se směsmi pro výrobu kompozitu bylo stejně připraveno i 400 g čistého PLA (bez aditiva).

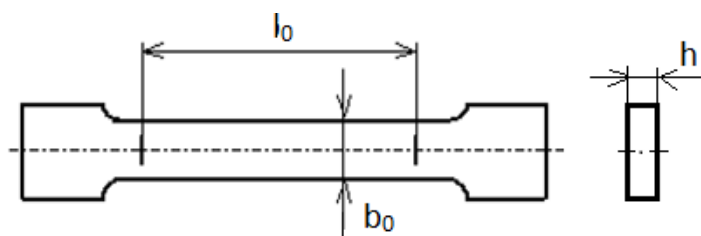
3.2. Výroba vzorků

Výroba vzorků probíhala přímo po vysušení složek směsi a jejich smíchání. Pro výrobu polymerních a kompozitních vzorků je velmi důležitá nízká vlhkost směsi. Jakákoliv vlhkost zpracovávaného materiálu v průběhu výroby negativně ovlivňuje výslednou strukturu výlisku. Výroba vzorků byla prováděna na vstřikovacím lisu ENGEL EC 100 s průměrem šneku 22 mm (obrázek 11).



Obrázek 11: Vstřikovací lis ENGEL EC 100

Směsi v práškové formě byly nejprve extrudovány do tvaru struny, která byla posléze nasekána na granulát, který byl použit pro druhé plnění lisu. Tato dvojitá extruze byla provedena z důvodu lepšího promísení složek směsi. Vzorky byly vstřikovány do tvaru zkušební tělíska dle ČSN EN ISO 527 (obr. 12). Z každého materiálu bylo vytvořeno 15 kusů. Parametry vstřikování jsou uvedeny v tabulce 7.



b_0 [mm]	l_0 [mm]	h [mm]
$10 \pm 0,2$	$115 \pm 0,5$	$4 \pm 0,2$

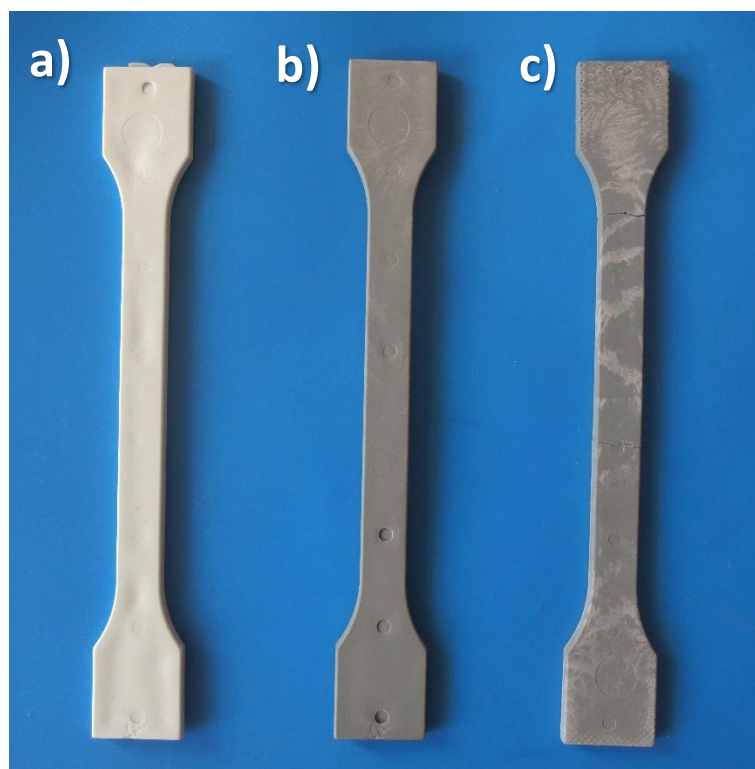
Obrázek 12: Zkušební tělísko pro zkoušení polymerů a jeho rozměry

Materiál PLA 50 F3000 s obsahem vláken 50 % způsoboval v průběhu extruze zadírání šneku zařízení a výsledné vylisky nebyly kompletně vylisovány. Obsah vláken 50 % byl pro tuto technologii výroby příliš vysoký a znemožňoval promíchání směsi a výztuže.

Tabulka 7: Parametry vstřikování jednotlivých materiálů

Materiál	Teplotní zóny [°C]					Teplota formy [°C]	Objem dávky [cm ³]	Tlak vstřikování [kPa]	Dotlak [kPa]	Doba chlazení [s]
	1	2	3	4	tryska					
PLA	170	172	175	177	180	25	43	600	480/10	30
PLA20F3000	165	167	170	172	175	25	43	600	480/10	30
PLA50F3000 (nedolisované)	160	165	167	170	172	25	43	600	480/10	30
PLA30F500	165	167	170	172	175	25	43	600	480/10	30

Výsledné vylisky materiálu PLA (a), PLA 20 F3000 (b) a PLA 30 F500 (c) jsou zobrazeny na obrázku 13.



Obrázek 13: Vylisky materiálu: a) PLA, b) PLA20F3000, c) PLA30F500

4. Testování vzorků

Po výrobě vzorků byly všechny vzorky nejprve opticky zkontrolovány. Vzorky materiálu PLA 50 F3000 byly rovnou vyřazeny a jejich výroba nedokončena. Materiál PLA 30 F500 vykazoval nehomogenní promísení obou fází. Tento materiál měl oproti ostatním materiálům znatelně nižší pevnost a houževnatost, a proto nebyl použit pro další testování.

Vzorky čistého PLA a materiálu PLA 20 F3000 byly podrobeny tahové zkoušce a zkoušce rázem v ohybu pro zjištění jejich mechanických vlastností. Na obou vzorcích byla také provedena zkouška nasákavosti pro zjištění vlivu obsahu vláken na navlhavosti materiálu.

Před každou zkouškou byly vzorky skladovány dle normy ČSN EN ISO 291 nejméně 24 hodin při teplotě 23 ± 2 °C a relativní vlhkosti 50 ± 10 %.

4.1. Tahová zkouška

Tahová zkouška je statická zkouška, která vyhodnocuje závislost zatížení vzorku na jeho prodloužení. Pro plasty je tato zkouška definována normou ČSN EN ISO 527. Během této zkoušky je zkušební těleso upnuté v čelistech zkušebního stroje a je na něj aplikováno tahové zatížení ve směru jeho podélné osy. Rychlost zatížení je konstantní a je určena před provedením zkoušky, nejčastěji dle normou doporučených hodnot. Různé rychlosti zatížení mohou vést k různým výsledným hodnotám zkoušky. Zatížení a posuv čelistí (prodloužení vzorku) je měřeno a vyhodnocováno. Nejčastěji určovanou charakteristikou materiálu je mez kluzu, mez pevnosti, modul pružnosti a prodloužení při přetržení.

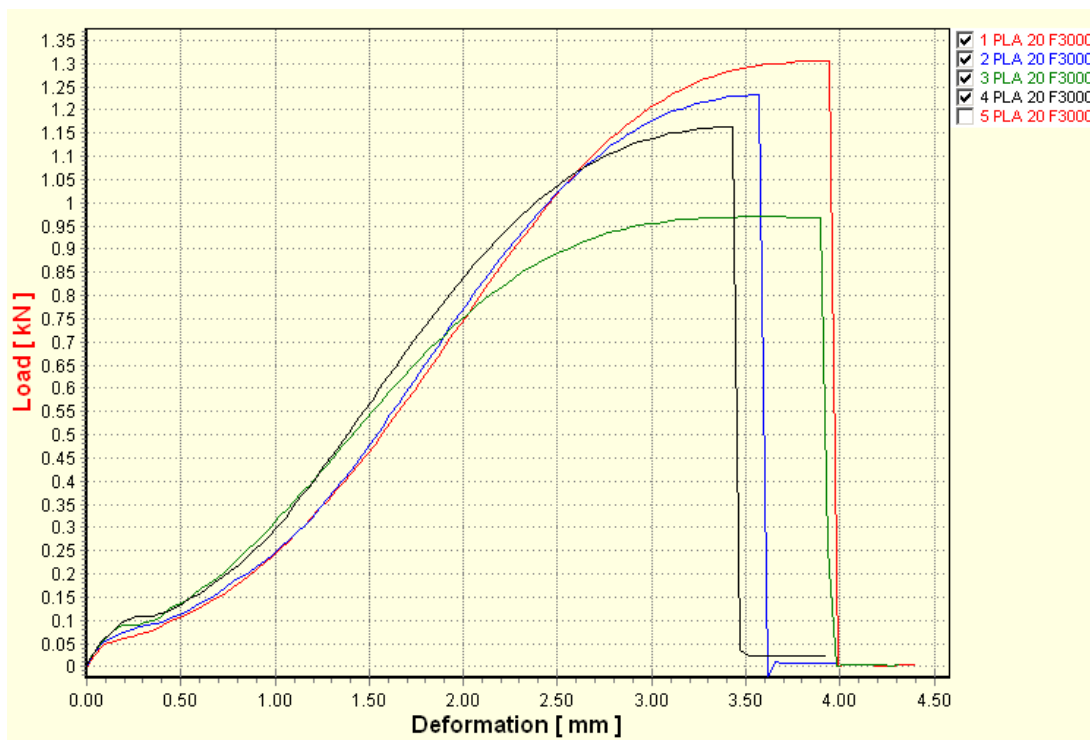
4.1.1. Průběh zkoušky

Tahová zkouška byla provedena na pěti vzorcích čistého PLA a pěti vzorcích kompozitu PLA 20 F3000. Před zkouškou byly změřeny rozměry vzorků a zkontrolováno, zda odpovídají normovaným rozměrům. Zkouška proběhla na stroji ZD 10/90 Walter + Balag při laboratorní teplotě 23 °C. Vzdálenost čelistí na počátku zkoušky byla stanovena pro všechny vzorky 115 mm. Vzorky byly do čelistí vkládány podélně k ose zatížení. Zkouška proběhla při rychlosti polohování 50 mm/min.

4.1.2. Výsledky

Strojově zaznamenávané hodnoty byly zatěžující síla F a posuv čelistí ΔL . Tyto hodnoty byly zpracovávány počítačovým programem, který vyhodnocoval maximální zatížení F_m [kN] dosažené při přetržení vzorku a dosaženou maximální podélnou deformaci vzorku L_m [mm]. Získané hodnoty včetně zaznamenaných tahových diagramů a výpočtů jsou uvedeny v příloze.

Obrázek 14 zobrazuje získaný tahový diagram pěti vzorků kompozitu PLA 20 F3000.



Obrázek 14: Tahový diagram vzorků PLA 20 F3000

Pro charakteristiku mechanických vlastností materiálů byla pomocí rovnice (6) ze získaných dat určena mez pevnosti σ_m každého vzorku.

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A} \text{ [MPa]} \quad (6)$$

Kde A představuje počáteční plochu průřezu v mm^2 .

Dále bylo dle rovnice (7) vypočteno prodloužení při přetržení a jmenovité poměrné prodloužení při přetržení ε_{tb} .

$$\varepsilon_{tb} = \frac{\Delta L}{L} * 100 \text{ [%]} \quad (7)$$

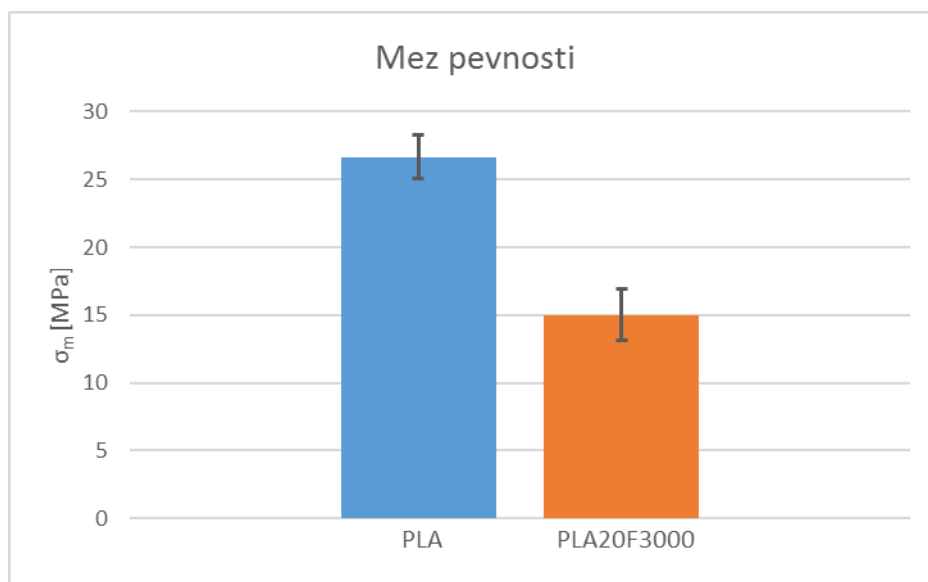
Kde ΔL představuje přírůstek deformace v *mm* a L počáteční délku mezi čelistmi ($L = 115 \text{ mm}$).

Z výsledných hodnot byl pro oba materiály vypočten aritmetický průměr získaných charakteristik a směrodatná odchylka získaných dat.

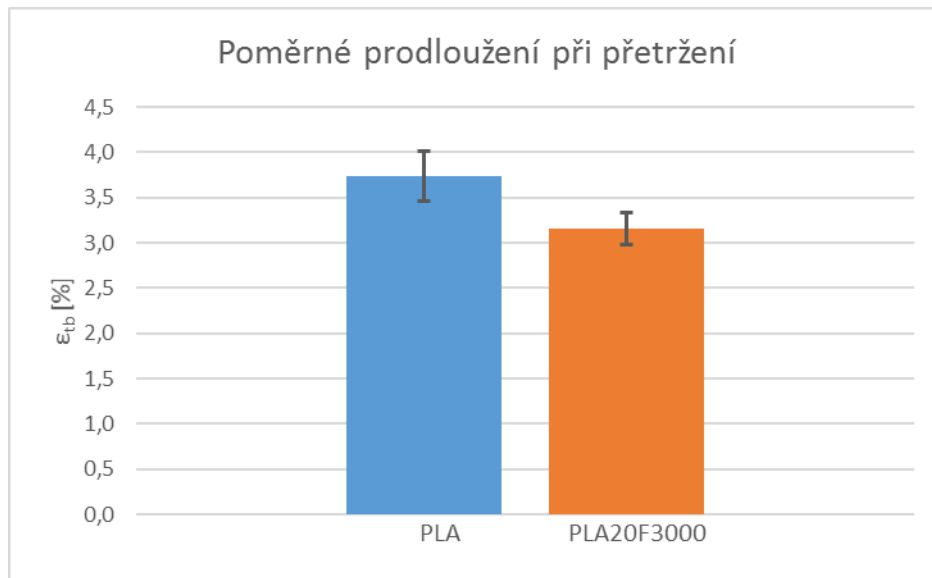
Výsledné hodnoty pro oba materiály jsou uvedeny v tabulce 8 a graficky znázorněny v grafech na obrázcích 15 a 16.

Tabulka 8: Získané hodnoty jednotlivých materiálů

Materiál	σ_m [MPa]	ε_{tb} [%]
PLA	26,6 ± 1,88	3,74 ± 0,28
PLA20F3000	15,0 ± 1,62	3,16 ± 0,17



Obrázek 15: Grafické znázornění meze pevnosti obou materiálů



Obrázek 16: Grafické znázornění poměrného prodloužení obou materiálů při přetržení

Mez kluzu, která je také častou charakteristikou kompozitních a polymerních materiálů se u těchto vzorků nevyskytovala.

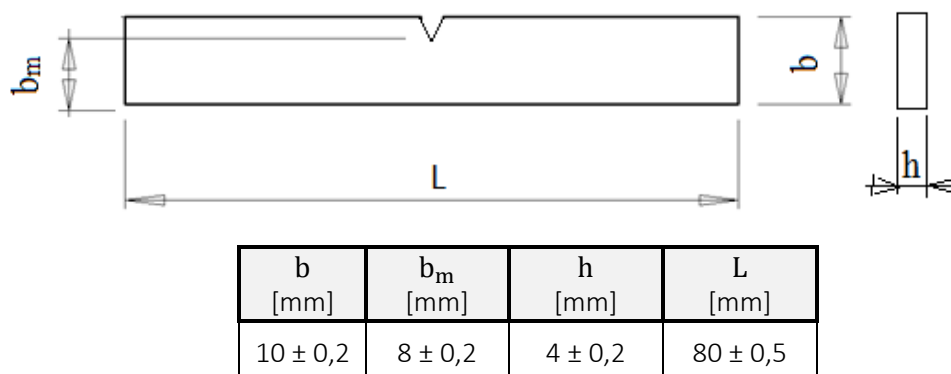
Ze srovnání obou charakteristik materiálu vyplývá, že smícháním základní matrice PLA s papírovými vlákny nebylo dosaženo vyztužujícího efektu. Pevnost kompozitního materiálu je o 44 % nižší než pevnost základní matrice PLA. Poměrné prodloužení při přetržení je pro kompozitní materiál o 16 % nižší.

4.2. Zkouška rázem v ohybu

Podstatou této zkoušky je stanovení energie, která je absorbována při přeražení zkušebního tělesa rázem Charpyho kladiva za předem stanovených podmínek. Zkouška a zkušební těleso je pro plasty definována normou ČSN EN ISO 179 „Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška“. Uprostřed zkušebního tělesa umístěného rovnoměrně mezi čelisti zkušebního zařízení se na straně protilehlé k místu úderu nachází vrub s definovanou geometrií. Rozměry zkušebního vzorku jsou uvedeny na obrázku 17. Vrub má definovaný poloměr R 0,25mm a úhel 45°. Kyvadlové kladivo zařízení má definovanou hmotnost a rychlost při nárazu do vzorku.

Zkouška je závislá na teplotě vzorku a je možné ji pro srovnání mechanických vlastností materiálu provádět pro různé teploty vzorku.

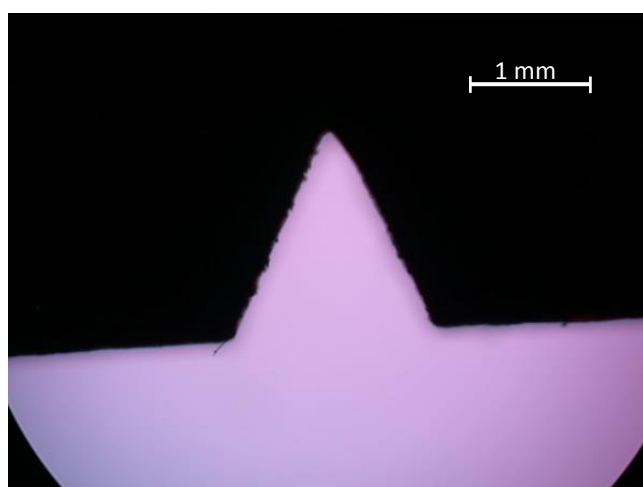
Nejčastěji získávanou charakteristikou materiálu získávanou touto zkouškou je vrubová houževnatost, pro kterou je nutné znát plochu průřezu zkušebního tělesa v místě lomu.



Obrázek 17: Rozměry zkušebního tělesa pro zkoušku rázem v ohybu

4.2.1. Průběh zkoušky

Zkouška rázem v ohybu byla provedena na pěti vzorcích čistého PLA a pěti vzorcích kompozitu PLA 20 F3000. Pro vzorky byla z technických důvodů zvolena délka $L = 55$ mm, která však byla postačující pro umístění vzorku do zkušebního zařízení a neměla tak vliv na průběh zkoušky. Vrub byl do jednotlivých vzorků vyroben na ručním obrážecím zařízení E Leitz Wetzlar. Kvalita, hloubka a poloměr vrubu byly změřeny na světelném mikroskopu (obrázek 18). Rozměry vzorků b_m a h byly zkontrolovány mikrometrem a nepřesahovaly toleranci 0,2 mm.



Obrázek 18: Snímek vrubu vzorku ze světelného mikroskopu

Vzorky byly jednotlivě vloženy do zkušebního zařízení, tak, aby vrub ležel v místě nárazu kladiva na protilehlé straně nárazu. Na zařízení byla zvolena stupnice odpovídající předpokládaným výsledkům. Energie kladiva byla 0,1 kpm (kilopondmetr). Teplota v laboratoři byla 23 °C.

4.2.2. Výsledky

Ze stupnice zařízení byla odečtena hodnota, která odpovídá energii potřebné k přeražení zkušebního tělíška E_C . Vrubová houževnatost A_{cN} jednotlivých vzorků byla získána pomocí rovnice (8). Získané hodnoty jsou uvedeny v příloze.

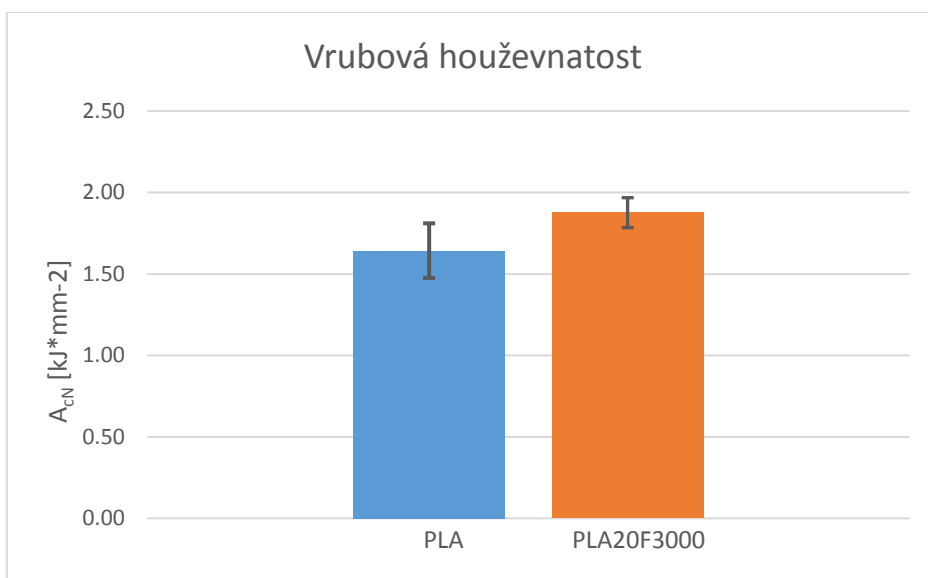
$$A_{cN} = \frac{E_C}{b_{m.h}} \cdot 10^3 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (8)$$

Ze získaných hodnot byl pro oba materiály vypočten aritmetický průměr získaných charakteristik a směrodatná odchylka dat.

Výsledná vrubová houževnatost pro oba materiály je uvedena v tabulce 9 a graficky znázorněna v grafu na obrázku 19.

Tabulka 9: Získané hodnoty vrubové houževnatosti jednotlivých materiálů

Materiál	A_{cN} [kJ · m ⁻²]
PLA	1,64 ± 0,17
PLA20F3000	1,88 ± 0,09



Obrázek 19: Grafické znázornění vrubové houževnatosti obou materiálů

Ze srovnání obou charakteristik materiálu vyplývá, že papírová vlákna ve vzorcích testovaných kompozitů zvyšují vrubovou houževnatost základní matrice PLA o necelých 15 %.

4.3. Měření nasákavosti

Nasákavost materiálu je schopnost materiálu absorbovat vodu ze svého okolí (vzdušného, vodního). Tento proces je především významný pro většinu polárních plastů, které tuto schopnost vykazují. Kovové a keramické materiály tento charakter výrazně nevykazují. Nasákavost je měřena jako poměr mezi hmotností suchého vzorku a hmotností absorbované vody. Tento děj závisí především na typu materiálu, teplotě a době po kterou je vzorek exponován. Jelikož se materiály ve svých aplikacích často nacházejí v prostředí se zvýšenou vlhkostí, je třeba brát tento proces v potaz při všech aplikacích. Zpravidla platí, že polymery po absorbování vody vykazují zhoršené mechanické vlastnosti. Obsah vody také výrazně ovlivňuje rozměry, teplotní a elektrickou vodivost materiálu.

Celulóza v přírodních vláknech má vysoce hydrofilní charakter a lze tedy očekávat, že přítomnost vláken v jakékoliv matici povede ke zvýšené nasákavosti celého materiálu.

Zkouška je definovaná normou ČSN EN ISO 62. Tato norma definuje tvar zkušebního tělesa a průběh zkoušky. Výslednou hodnotou zkoušky je poté buď navlhavost na vzduchu, nebo nasákavost ve vodě.

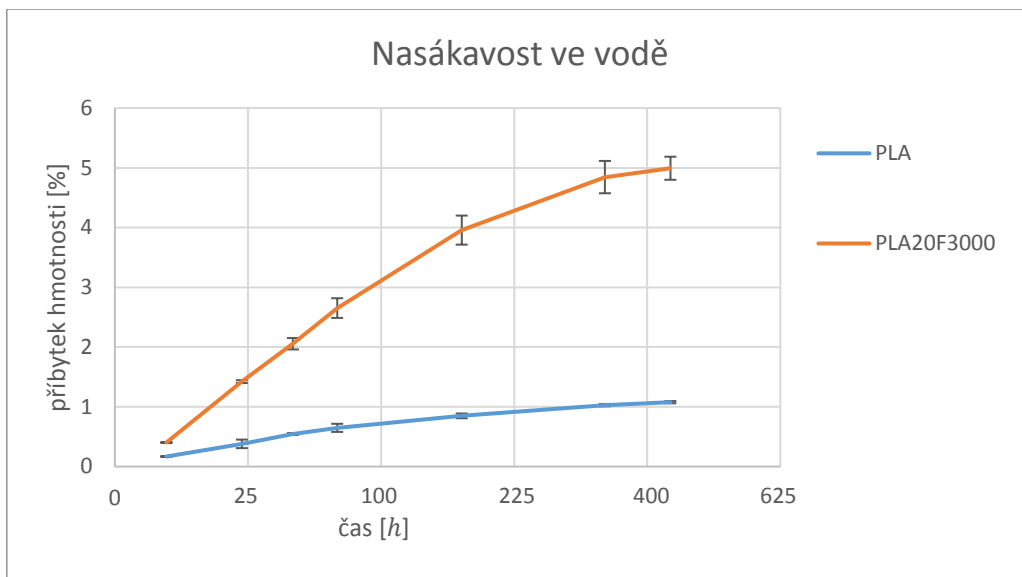
Nasákavost ve vodě se provádí vložení zkušebních tělísek o známé hmotnosti do destilované vody o teplotě $23 \pm 1^\circ$ tak, aby voda pokrývala celý povrch vzorku. Následné měření je provedeno v závislosti na charakteru materiálu buď po prvních dvou hodinách zkoušky, po prvním dnu zkoušky anebo opakovaně, dokud se změna hmotnosti absorbované vody neustálí (změna menší než 5mg nebo méně než 1 % přírůstku hmotnosti). Před každým měřením musí být každý vzorek důkladně osušen filtračním papírem.

4.3.1. Průběh zkoušky

Pro zkoušku nasákavosti bylo připraveno pět vzorků materiálu PLA a pět vzorků materiálu PLA 20 F3000. Vzorky byly připraveny ze zbytku materiálu, a proto neodpovídají geometrii stanovené normou. Každé z tělísek bylo připraveno tak, aby neobsahovalo drsné povrchy, kde by se mohla držet povrchová voda ovlivňující výslednou hmotnost vzorku, ale neovlivňující vlastnosti materiálu. Všechny vzorky byly po zvážení na digitální analytické váze KERN 700 s přesností 0,1mg uloženy do nádoby s destilovanou vodou tak, aby se výrazně nedotýkaly stěn nádoby a mezi sebou. Následná měření probíhala po osušení vzorků filtračním papírem a ponechání na vzduchu po dobu 5-ti minut. První měření bylo provedeno po prvních třech hodinách a následně v intervalech jednoho dne, později jednoho týdne.

4.3.2. Výsledky zkoušky

Z naměřených hmotností jednotlivých vzorků byl pro každý vzorek vypočten hmotnostní přírůstek mezi měřeními a procentuální přírůstek hmotnosti v poměru se suchým vzorkem. Procentuální přírůstek byl dosazen do grafu v závislosti na druhé odmocnině doby, která uběhla od času měření (graf na obrázku 20). Doba pod druhou odmocninou byla zvolena pro přehlednější zobrazení rostoucích intervalů měření. Naměřené hodnoty a výpočty jsou obsaženy v příloze.



Obrázek 20: Graf závislosti nasákavosti materiálů a času

Z grafu byla odečtena přibližná hodnota saturace materiálů n_h odpovídající maximálnímu dosažitelnému hmotnostnímu podílu vody v materiálu. Hodnoty pro oba materiály jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Dosažená nasákavost materiálů

Materiál	n_h [%]
PLA	1,2
PLA 20 F3000	5,1

Přítomnost papírových vláken v matrici PLA výrazně zvýšila nasákavost systému, tak jak bylo předpokládáno. Nasákavost dosažená téměř po třech týdnech vystavení vzorků vodnímu prostředí je pro kompozitní materiál více než 4 krát vyšší, než nasákavost PLA.

III Závěr a diskuze

Cílem této práce bylo charakterizovat kompozitní materiál z PLA a přírodních vláken, navrhnout a provést výrobu vzorků tohoto materiálu a změřit jeho základní mechanické vlastnosti.

Všechny body tohoto zadání byly splněny. Pro charakterizaci tohoto materiálu byly nejprve popsány druhy a vlastnosti kompozitních materiálů obecně, se zaměřením na materiály srovnatelné s polymerem PLA a přírodními vlákny.

Význam polymeru PLA a přírodních vláken byl charakterizován v jejich souvislosti s tzv. biokompozity. Další biodegradabilní polymery jako například TPS a PHB by byly popsány pro jejich případnou suplementaci matrice PLA.

Pro experimentální část byly po rešerši laboratorních studií a trhu nalezeny a získány vlákna od firmy CIUR a.s., u kterých bylo předpokládáno splnění nezávazného cíle stanoveného firmou Renoplastic (tedy ekonomická rentabilita a vyztužení základní matrice).

Navržení výroby bylo provedeno pro vstřikovací lis ENGEL, který byl k dispozici ve firmě Renoplastic. Po výrobě vzorků základní matrice PLA a několika variant kompozitních materiálů byl vybrán materiál PLA 20 F3000, jako vhodný pro provedení laboratorních zkoušek.

Z provedených tahových zkoušek a zkoušek rázem v ohybu vyplývá, že papírová vlákna v matrici PLA nevedla k vyztužujícímu efektu. Mez pevnosti kompozitního materiálu výrazně klesla v porovnání se základní matricí PLA (o 44 %). Tato nízká pevnost výrazně limituje využití tohoto materiálu v praxi a je jeho hlavním. Po zavedení papírových vláken však vzrostla o 15 % vrubová houževnatost matrice PLA, což indikuje vyztužující potenciál papírových vláken.

S obsahem papírové složky v matrici PLA také výrazně klesla cena vstupních materiálů. Výsledné náklady kompozitního materiálu a rentabilita výrobku, započítávající náklady na proces výroby kompozitu, jsou předmětem budoucích propočtů.

Pro splnění požadavků na nový kompozitní produkt bude pro budoucí experimenty navržena buď chemická či fyzikální úprava papírových vláken, nebo jejich nahrazení jiným vhodnějším materiálem.

Předmětem dalšího bádání bude také nahrazení nebiodegradabilního aditiva SCONNA, biologicky odbouratelným materiálem a popsání vlivu tohoto aditiva na mechanické vlastnosti kompozitu.

Seznam použité literatury

- [1] GAY, Daniel, S. HOA a Stephen TSAI. *Composite materials: design and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2003. ISBN 1587160846.
- [2] Carbon Fiber Composites to More than Double to \$36 Billion in 2020. In: *Lux Research inc* [online]. Boston: luxresearchinc, 2012 [cit. 2017-03-30]. Dostupné z: <http://www.luxresearchinc.com/news-and-events/press-releases/read/carbon-fiber-composites-more-double-36-billion-2020>
- [3] EHRENSTEIN, Gottfried. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 9788086960296.
- [4] CHAWLA, Krishan. *Composite materials: science and engineering*. 2nd ed. New York: Springer, 1998. Materials research and engineering (Unnumbered). ISBN 0387984097.
- [5] ÅSTRÖM, B. *Manufacturing of polymer composites*. 1st ed. London: Chapman & Hall, 1997. ISBN 0412819600.
- [6] *Proceedings of the International Conference on Composite Materials and Energy: Enercomp 95, May 8-10, 1995, Montreal Bonaventure Hilton, Montreal, Quebec, Canada*. Lancaster, Pa.: Technomic Pub. Co., 1995. ISBN 1566763134.
- [7] AGARWAL, Bhagwan a Lawrence BROUTMAN. *Vláknové kompozity*. 1. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1987.
- [8] *TeXtreme®: TeXtreme® Spread Tow carbon reinforcements* [online]. Švédsko: Oxeon AB, b.r. [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.textreme.com/technology/>
- [9] VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 8070806001.
- [10] NICOLAIS, Luigi. a Assunta. BORZACCHIELLO. *Wiley encyclopedia of composites*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2012. ISBN 9780470275641.
- [11] ČSN EN 13432: *Obaly - Požadavky na obaly využitelné ke kompostování a biodegradaci*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [12] Bioplastics market data. *European Bioplastics* [online]. Berlin, b.r. [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: <http://www.european-bioplastics.org/market/>
- [13] GHANBARZADEH, Babak a Hadi ALMASI. Biodegradable Polymers. *Biodegradation - Life of Science* [online]. InTech, 2013 [cit. 2017-04-04]. DOI: 10.5772/56230. ISBN 9789535111542. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/biodegradation-life-of-science/biodegradable-polymers>
- [14] LUNT, James. Large-scale production, properties and commercial applications of polylactic acid polymers. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 1998, **59**(1-3), 145-152 [cit. 2017-04-21]. DOI: 10.1016/S0141-3910(97)00148-1. ISSN 01413910. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391097001481>

- [15] GRAUPNER, Nina, Gerhard ZIEGMANN, Fabian WILDE, Felix BECKMANN a Jörg MÜSSIG. Procedural influences on compression and injection moulded cellulose fibre-reinforced polylactide (PLA) composites: Influence of fibre loading, fibre length, fibre orientation and voids. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* [online]. 2016, **81**(5), 158-171 [cit. 2016-11-29]. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.10.040. ISSN 1359835x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X15003966>
- [16] MURARIU, Marius a Philippe DUBOIS. PLA composites: From production to properties. *Advanced Drug Delivery Reviews* [online]. 2016, **107**, 17-46 [cit. 2017-07-13]. DOI: 10.1016/j.addr.2016.04.003. ISSN 0169409x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169409X16301028>
- [17] Sulzer PLA Technology. In: *Sulzer* [online]. b.r. [cit. 2017-07-13]. Dostupné z: http://www.sulzer.com/sr/-/media/Documents/ProductsAndServices/Process_Technology/Polymer_Production_Technology/Brochures/Sulzer_PLA_Technology.pdf
- [18] Nature Works LLC - Products. *Nature Works LLC* [online]. b.r. [cit. 2017-07-27]. Dostupné z: <http://www.natureworkslc.com/Products>
- [19] *REGULATION (EC) No 1272/2008 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006*. In: . Official Journal of the European Union, 2008.
- [20] MALLAPRAGADA, Surya. a Balaji NARASIMHAN. *Handbook of biodegradable polymeric materials and their applications*. Stevenson Ranch, Calif.: American Scientific Publishers, 2006. ISBN 1588830543.
- [21] KIM, N.K., R.J.T. LIN a D. BHATTACHARYYA. Extruded short wool fibre composites: Mechanical and fire retardant properties. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2014, **67**, 472-480 [cit. 2017-06-18]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.08.002. ISSN 13598368. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836814003138>
- [22] SCHEIBEL, Thomas. *Microbial Cell Factories* [online]. b.r., **3**(1), 14- [cit. 2017-06-18]. DOI: 10.1186/1475-2859-3-14. ISSN 14752859. Dostupné z: <http://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/1475-2859-3-14>
- [23] JEARANAISILAWONG, Petch, Shayanin EAHKANONG, Bundit PHUNGSARA a Anchalee MANONUKUL. Determination of in-plane elastic properties of rice husk composite. *Materials & Design* [online]. 2015, **76**, 55-63 [cit. 2017-06-18]. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.03.042. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306915001314>
- [24] HUDA, M., A. MOHANTY, L. DRZAL, E. SCHUT a M. MISRA. "Green" composites from recycled cellulose and poly(lactic acid): Physico-mechanical and morphological properties evaluation. *Journal of Materials Science* [online]. 2005, **40**(16), 4221-4229 [cit. 2017-06-18]. DOI: 10.1007/s10853-005-1998-4. ISSN 00222461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-005-1998-4>
- [25] DAS, Mahuya a Rupa BHATTACHARYYA. Cellulose Nanofibers: Synthesis, Properties and Applications. *Polymer Nanocomposites Based on Inorganic and Organic Nanomaterials*

- [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2015, s. 1 [cit. 2017-06-19]. DOI: 10.1002/9781119179108.ch1. ISBN 9781119179108. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781119179108.ch1>
- [26] VAN DE WEYENBERG, I., J. IVENS, A. DE COSTER, B. KINO, E. BAETENS a I. VERPOEST. Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites. *Composites Science and Technology* [online]. 2003, **63**(9), 1241-1246 [cit. 2017-07-30]. DOI: 10.1016/S0266-3538(03)00093-9. ISSN 02663538. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353803000939>
- [27] OCHI, Shinji. Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites. *Mechanics of Materials* [online]. 2008, **40**(4-5), 446-452 [cit. 2017-06-19]. DOI: 10.1016/j.mechmat.2007.10.006. ISSN 01676636. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167663607001573>
- [28] MÜSSIG, Jörg. *Industrial application of natural fibres: structure, properties, and technical applications*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2010. ISBN 9780470695081.
- [29] BRAUN, Birgit, John DORGAN a Daniel KNAUSS. Reactively Compatibilized Cellulosic Polylactide Microcomposites. *Journal of Polymers and the Environment* [online]. 2006, **14**(1), 49-58 [cit. 2017-07-13]. DOI: 10.1007/s10924-005-8706-y. ISSN 15662543. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10924-005-8706-y>
- [30] Asociace českého papírenského průmyslu (ACPP) - Recyklace papíru. *Asociace českého papírenského průmyslu (ACPP)* [online]. 2015 [cit. 2017-07-29]. Dostupné z: <http://www.acpp.cz/novinky/88-recyklace-papiru/>

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam zkratk

AS	<i>Average Strength</i> – Uhlíková vlákna průměrné pevnosti
BMC	<i>Bulk Molding Compound</i> – Směs krátkých skleněných vláken a epoxidové pryskyřice
DGEBA	A bisfenol diglycidylether
DGEBD	Butandiol diglycidylether
F3000	Středně hrubá papírová vlákna
F500	Jemná papírová vlákna
F8000	Hrubá papírová vlákna
HS	<i>High Strength</i> – Uhlíková vlákna vysoké pevnosti
LDPE	Nízko-hustotní polyethylen
NMMO	N-Metylmorfolin-N-oxid
PA	Polyamid
PDLA	Polymléčná kyselina D
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylentereftalát
PHB	Poly(3 - hydroxybutan)
PLA	Polymléčná kyselina
PLA 20 F3000	Kompozit polymléčné kyseliny a 20 % hmotnostního obsahu papírových vláken F3000
PLA 50 F3000	Kompozit polymléčné kyseliny a 50 % hmotnostního obsahu papírových vláken F3000
PLA 30 F500	Kompozit polymléčné kyseliny a 30 % hmotnostního obsahu papírových vláken F500
PLLA	Polymléčná kyselina L
PP	Polypropylen
PPS	Polyfenylsulfid
TPS	Termoplastický škrob
sc-PLA	Stereokomplexní kopolymer polymléčných kyselin L a D
VHM	<i>Very high modulus</i> – Uhlíková vlákna s vysokým modulem pružnosti

Seznam veličin

M_m [$kg * mol^{-1}$]	Molární hmotnost polymeru
M_0 [$kg * mol^{-1}$]	Molární hmotnost polymeru
n [–]	Polymerizační stupeň
T_g [$^{\circ}C$]	Teplota skelného přechodu
T_m [$^{\circ}C$]	Teplota tání
T_f [$^{\circ}C$]	Teplota viskózního toku
L_c [mm]	Kritická délka vlákna
d [mm]	Průměr vlákna
R_{mv} [MPa]	Mez pevnosti vlákna v tahu
τ_m [MPa]	Mez kluzu matrice ve smyku, nebo rozhraní mezi matricí a vlákny ve smyku
S [mm^2]	Plocha povrchu vlákna
V [mm^3]	Objem vlákna
r [mm]	Poloměr vlákna
l [mm]	Délka vlákna
θ [$^{\circ}$]	Úhel smáčení
γ_{SV} [$J * m^{-2}$]	Povrchová energie na rozhraní tuhý povrch – plyn
γ_{SL} [$J * m^{-2}$]	Povrchová energie na rozhraní tuhý povrch – kapalina
γ_{LV} [$J * m^{-2}$]	Povrchová energie na rozhraní tuhý kapalina – plyn
p_{vl} [$Kč/kg$]	Cena za jedno kilo vláken
p_{mat} [$Kč/kg$]	Cena za jedno kilo matrice
N_{kom} [$Kč/kg$]	Náklady na výrobu jednoho kila kompozitu
q_{hm} [–]	Hmotnostní podíl obsahu vláken v kompozitu
b_o [mm]	Hloubka vzorku

h [mm]	Šířka vzorku
σ_m [MPa]	Mez pevnosti v tahu
F_m [kN]	Maximální zatížení při přetržení
ε_{tb} [%]	Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení
ΔL [mm]	Přírůstek deformace
L [mm]	Počáteční vzdálenost čelistí
A_{cN} [kJ. m ⁻²]	Vrubová houževnatost
E_c [J]	Energie potřebná k přeražení zkušebního tělíska
b_m [mm]	Hloubka vzorku pod vrubem
n_h [%]	Maximální dosažená nasákavost materiálu

Přílohy

Tahová zkouška

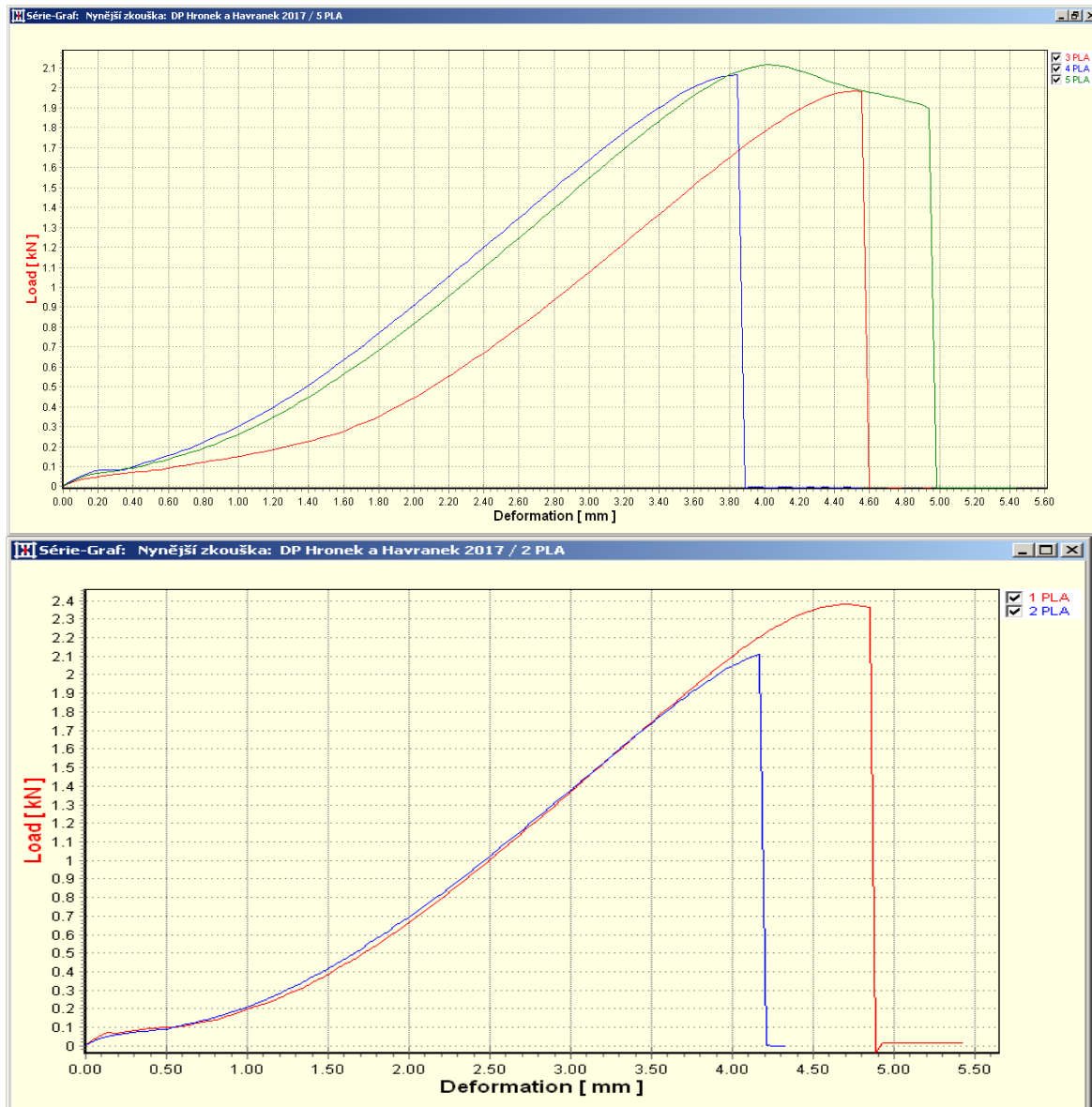
Následující tabulka zobrazuje získané a vypočtené hodnoty tahové zkoušky pro materiály PLA a PLA 20 F 3000.

Tabulka 11: Získané a vypočtené hodnoty z tahové zkoušky pro materiály PLA a PLA2F3000

PLA	Fm [kN]	ΔL [mm]	σ_m [MPa]	Lm [mm]	ϵ_y [%]
1	2,38	4,68	29,75	119,68	4,07
2	2,11	4,17	26,38	119,17	3,63
3	1,98	4,51	24,75	119,51	3,92
4	2,06	3,85	25,75	118,85	3,35
5	2,12	4,02	26,50	119,02	3,50
x'	2,13	4,25	26,66	119,30	3,74
σ	0,15	0,32	1,88	0,32	0,28

PLA20F3000	Fm [kN]	ΔL [mm]	σ_m [MPa]	Lm [mm]	ϵ_y [%]
1	1,31	3,91	16,38	118,91	3,40
2	1,23	3,57	15,38	118,57	3,10
3	0,97	3,48	12,13	118,48	3,03
4	1,16	3,39	14,50	118,39	2,95
5	1,33	3,80	16,63	118,80	3,30
x'	1,20	3,63	15,00	118,63	3,16
σ	0,13	0,20	1,62	0,20	0,17

Diagramy na následujících obrázcích zobrazují průběh tahových zkoušek vzorků materiálu PLA tak, jak byly zaznamenány počítačem.



Obrázek 21: Průběh tahových zkoušek vzorků PLA

Zkouška rázem v ohybu

V následující tabulce jsou uvedeny získané a vypočtené hodnoty zkoušky rázem v ohybu.

Tabulka 12: Vypočtené a naměřené hodnoty zkoušky rázem v ohybu

PLA	*Ec [kpm]	Ec [Nm]	Ac [kJ*mm-2]	PLA20F3000	*Ec [kpm]	Ec [Nm]	Ac [kJ*mm-2]
1	0,00450	0,04415	1,37953	1	0,00640	0,06278	1,96200
2	0,00600	0,05886	1,83938	2	0,00620	0,06082	1,90069
3	0,00580	0,05690	1,77806	3	0,00600	0,05886	1,83938
4	0,00500	0,04905	1,53281	4	0,00640	0,06278	1,96200
5	0,00550	0,05396	1,68609	5	0,00560	0,05494	1,71675
x'	0,00536	0,05258	1,64318	x'	0,00612	0,06004	1,87616
σ	0,00055	0,00536	0,16746	σ	0,00030	0,00294	0,09176

Zkouška nasákavosti.

Naměřené hodnoty jednotlivých vzorků pro zkoušku nasákavosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 13: Naměřené hodnoty pro zkoušku nasákavosti

Datum	t [15min]	PLA [g]				
		1	2	3	4	5
26/6-11:30	0	3,355	3,06	2,9192	3,0591	3,2533
26/6-15:15	15	3,3592	3,0651	2,9228	3,0685	3,2572
27/6-10:15	91	3,3683	3,0722	2,9303	3,0704	3,2649
28/6-8:15	179	3,3719	3,0758	2,9345	3,0799	3,2696
29/6-9:15	279	3,3761	3,0822	2,938	3,0782	3,2734
3/7-13:15	679	3,383	3,0859	2,9439	3,0862	3,2803
10/7-14:30	1356	3,3893	3,0926	2,9489	3,0903	3,2864
14/7-15:00	1742	3,3913	3,0938	2,9503	3,0923	3,2875
Datum	t [15min]	PLA20F3000 [g]				
		1	2	3	4	5
26/6-11:30	0	3,5234	3,2111	2,9286	3,0813	3,7764
26/6-15:15	15	3,5366	3,2254	2,9404	3,0937	3,7911
27/6-10:15	91	3,5678	3,2599	2,9704	3,128	3,8288
28/6-8:15	179	3,5858	3,2792	2,9894	3,1515	3,8532
29/6-9:15	279	3,6034	3,297	3,0064	3,1749	3,8755
3/7-13:15	679	3,6452	3,3394	3,0454	3,2129	3,9304
10/7-14:30	1356	3,6872	3,3726	3,0743	3,2222	3,9651
14/7-15:00	1742	3,6938	3,3785	3,0788	3,2254	3,9694