

# Vlastnosti kompozitů vyztužených přírodními vlákny

## Bakalářská práce

*Studijní program:*

B3107 Textil

*Studijní obor:*

Textilní technologie, materiály a nanomateriály

*Autor práce:*

**Eldor Nasirov**

*Vedoucí práce:*

Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.  
Katedra materiálového inženýrství





## Zadání bakalářské práce

# Vlastnosti kompozitů vyztužených přírodními vlákny

*Jméno a příjmení:* Eldor Nasirov  
*Osobní číslo:* T17000087  
*Studijní program:* B3107 Textil  
*Studijní obor:* Textilní technologie, materiály a nanomateriály  
*Zadávací katedra:* Katedra technologií a struktur  
*Akademický rok:* 2020/2021

### Zásady pro vypracování:

1. Provedte literární rešerši na téma: kompozitní materiály a možnosti využití přírodních vláken při výrobě kompozitních materiálů.
2. Vyberte 2 druhy přírodních vláken. Z vybraných vláken vyrobte experimentální sadu kompozitních vzorků pro následné testování ve vybraných vlastnostech (mechanických i geometrických).
3. Naměřené hodnoty vlastností vyrobených kompozitních vzorku statisticky vyhodnoťte. Zhodnoťte možnosti praktického využití vámi vyrobených kompozitních materiálů.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

dle potřeby  
cca 40 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] SCHEIRS, J. *Polymer recycling: science, technology, and applications*. Chichester; New York: Wiley, 1998.
- [2] ROGOVINA, S. Z. *Biodegradable Polymer Composites Based on Synthetic and Natural Polymers of Various Classes*, 2016.

*Vedoucí práce:*

Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D.  
Katedra materiálového inženýrství

*Datum zadání práce:*

18. září 2020

*Předpokládaný termín odevzdání:*

28. května 2021

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.  
děkan

L.S.

Ing. Brigita Kolčavová Sirková, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

17. srpna 2021

Eldor Nasirov

## **Poděkování**

Velice rád bych poděkoval vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslava Pechočiaková, Ph.D. za pomoc, ochotu, trpělivost a rady, které mi poskytla při psaní této bakalářské práce. Také velice děkuji své rodině a přátelům za podporu.

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá výrobou kompozitních materiálů založených na biodegradabilních polymerních maticích vyztužených přírodními vlákny různých druhů. V rešeršní části jsou uvedeny charakteristiky hlavních přírodních vláken rostlinného a živočišného původu, používaných k vytváření polymerních kompozitů, a také jsou popsány vlastnosti samotných kompozitů. Diskutovány jsou výhody a nevýhody použití přírodních vláken pro více polymerních kompozitních materiálů pro různé účely.

V experimentální části jsou vyrobeny dva druhy PLA fólií s využitím plniva (mletých částic) z bavlněných a vlněných vláken. Tyto fólie se dále liší přidavkem změkčovadla a jsou porovnány s fóliemi bez výplně. Mechanické vlastnosti vyrobených vzorků jsou porovnané s vlastnostmi běžně používaných polymerních materiálů, používaných například k výrobě plastových kelímků.

## **Klíčová slova**

Polymerní biokompozity, biologicky odbouratelné pojiva, přírodní vlákna.

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the production of composite materials based on biodegradable polymer matrices reinforced with natural fibers of various types. The research section presents the characteristics of the main natural fibers of the plant and of animal origin used to form polymer composites, and the properties of the composites themselves are also described. The advantages and disadvantages of using natural fibres for multiple polymeric composite materials for various purposes are discussed.

In the experimental part, two types of PLA foils are made using a filler (ground particles) from cotton and wool fibres. These films are further distinguished by the addition of a plasticizer and are compared with foils without filling. The mechanical properties of the produced samples are compared with the properties of commonly used polymeric materials, used for example for the production of plastic cups.

## **Keywords**

Polymer biocomposites, biodegradable binders, natural fibers.

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Literární rešerše .....	11
2.1	Obecné představy o kompozitních materiálech .....	11
2.1.1	Rozdělení kompozitů .....	11
2.1.2	Matrice .....	12
2.1.3	Využití kompozitů .....	13
2.2	Polymerní kompozity .....	14
2.2.1	Recyklace polymerních a kompozitních materiálů.....	16
2.2.2	Biodegradace .....	18
2.3	Přírodní vlákna .....	19
2.3.1	Použití přírodních vláken.....	20
2.3.2	Polymerní kompozity vyztužené přírodními vlákny .....	21
2.3.3	Chemické modifikace kompozitů s přírodními vlákny.....	22
2.3.4	Druhy rostlinných vláken.....	26
2.3.5	Vlákna ze surovin živočišného původu .....	30
2.4	Extruze .....	33
3	Experimentální část.....	34
3.1	Výběr a příprava materiálů.....	34
3.1.1	Výběr matrice .....	34
3.1.2	Výběr plniva .....	34
3.1.3	Mletí přírodních vláken .....	35
3.2	Výroba fólií vyztužených přírodními vlákny .....	37
3.2.1	Příprava a výroba kompozitů .....	37
3.3	Zkušební metody .....	40
3.3.1	Stanovení tahových vlastností .....	40

3.3.2	Zkouška tuhosti .....	44
3.3.3	Zjišťování tepelných vlastností na DSC .....	47
3.3.4	SEM analýza mletých vláken .....	51
3.3.5	Měření velikosti částic mletého vlákna .....	53
4	Diskuze .....	54
4.1	Mechanické vlastnosti .....	55
4.2	Tepelné vlastnosti .....	55
5	Závěr .....	57



## Seznam symbolů a zkratk

ATBC	Aciteltributylcitrát	
$b$	Šířka	[cm]
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie	
Et	Modul pružnosti	[MPa]
$F$	Síla	[N]
$K$	Konstanta při výpočtu tuhosti dle ČSN 80 0858	
$l$	Délka	[km], [m], [cm]
LDPE	Polyethylen s nízkou hustotou	
$m$	Hmotnost	[kg]
$M_o$	Ohybový moment	[mN.cm]
$\rho$	Měrná hmotnost, hustota	[g/cm <sup>3</sup> ]
PE	Polyethylen	
PET	Polyethylentereftalát	
PLA	Polylakdit	
PMMA	Polymethylmethakrylát	
PVC	Polyvinylchlorid	
SEM	Skenovací elektronový mikroskop	
$T$	Jemnost	[tex]
$t$	Tloušťka	[cm]
$T_{cc}$	Teplota krystalizace	°C
$T_g$	Teplota skleného přechodu	°C
$T_m$	Teplota tání	°C
$\Delta H$	Změna entalpie	[J.g <sup>-1</sup> ]

# 1 Úvod

Aktuálnost vytvoření biologicky rozložitelných polymerních kompozitů, které se mohou rozpadat vlivem životního prostředí, souvisí na jedné straně s nutností recyklace polymerních výrobků po skončení načasování použití a na druhé straně souvisí v dlouhodobém horizontu s upuštěním od ropy coby zdroje uhlovodíků k výrobě polymerů. V důsledku toho je vytvoření biologicky rozložitelných polymerů a kompozitů považováno v současné době za důležitou součást globálního úsilí o překonání závažných problémů životního prostředí. Postupné nahrazení syntetických vláken přírodními vlákny jak rostlinného, tak i živočišného původu jako výtzuže či plniva biodegradabilních matric by mělo vést ke snížení nákladů na syntézu polymerů pocházejících z ropné suroviny, a tím ke snížení ropné závislosti. A v neposlední řadě ke snížení ekologické zátěže.

V této bakalářské práci je zachycen popis stávajících způsobů recyklace a analýza problematiky souvisejících výhod a nevýhod.

Bakalářská práce se zabývá zodpovězením zásadních otázek týkajících se struktury a klasifikace polymerních kompozitů, způsoby jejich recyklace a obsahuje podrobné srovnávací analýzy polymerních kompozitů vyztužených přírodními vlákny.

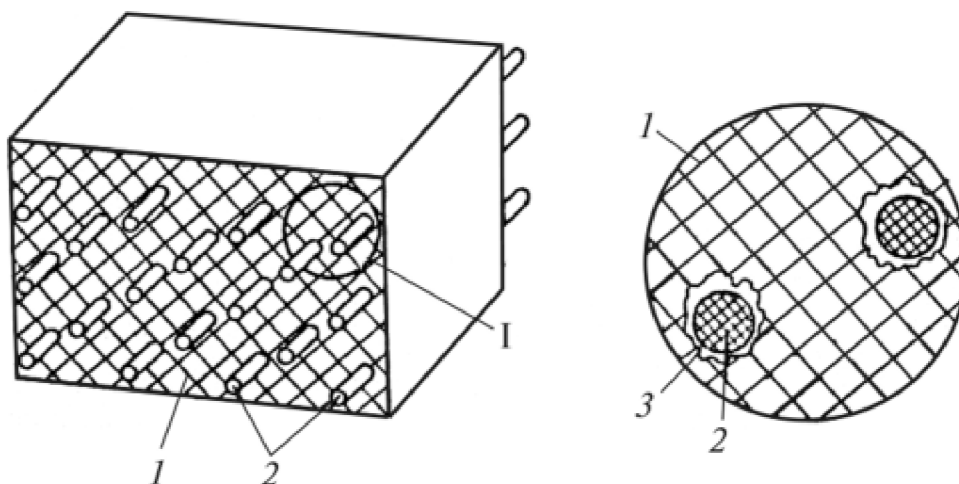
Je třeba poznamenat, že se poměrně nedávno objevily zásadní projekty zaměřené na vývoj biologicky rozložitelných kompozitních materiálů vyztužených přírodními vlákny, což přispívá ke zpomalení vyčerpávání přírodních zdrojů. Předpokládá se, že otázka využití vláken přírodního původu bude v nadcházejícím století klíčová.

## 2 Literární rešerše

### 2.1 Obecné představy o kompozitních materiálech

Pod označením kompozitní materiál chápeme materiál skládající se ze dvou nebo více složek, které mají rozdílné vlastnosti či chemické složení. Jsou spojeny do jednotné monolitické struktury. Odlišné vlastnosti a poměr složek mohou mít vliv na komplex fyzikálně-chemických a mechanických vlastností. Vzniká tedy materiál s novými vlastnostmi a zcela novým charakterem, odlišným od vlastností původních komponent. [1]

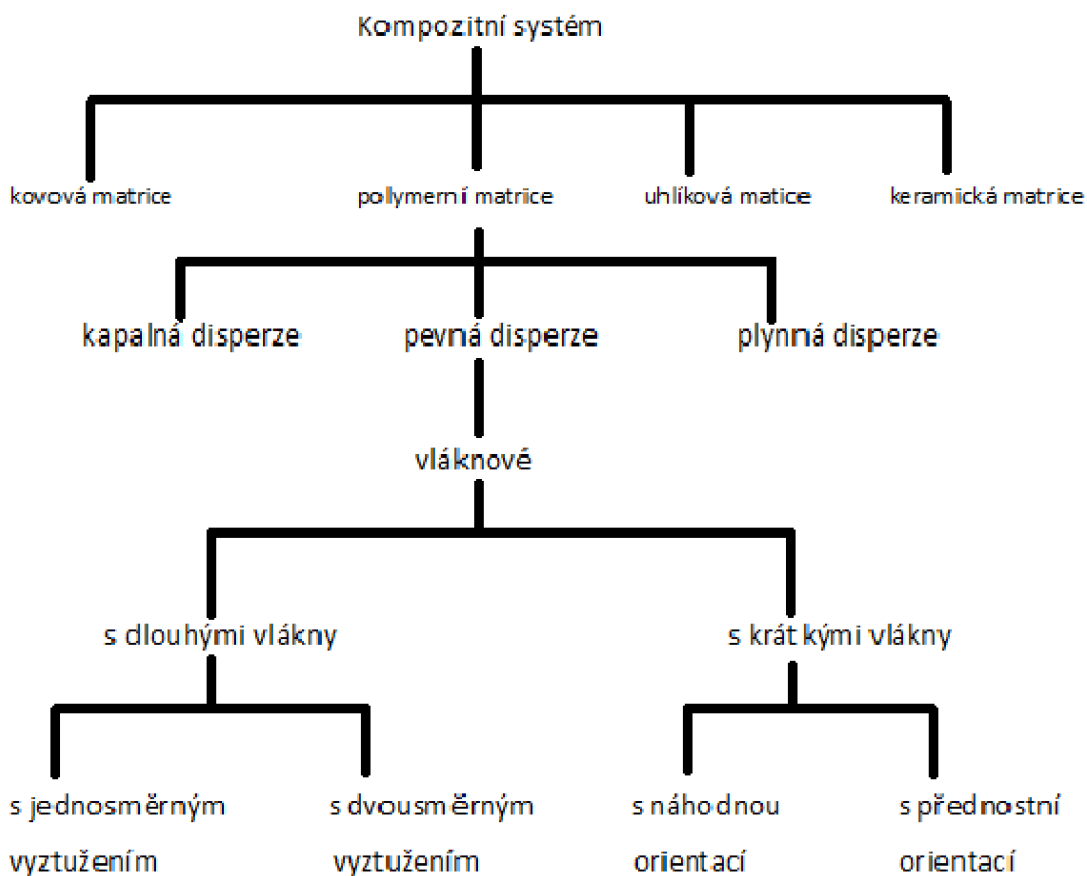
Jednou ze složek kompozitu je matrice. Je umístěna soustavně v celém objemu materiálu a také slouží jako pojivo. Druhá složka, která se nazývá výztuž (výplň), se dělí v objemu kompozice a mění vlastnosti kompozitu.



Obrázek č. 2.1.1 - Schéma obecného kompozitního materiálu: 1 – matrice; 2 – výztužné prvky; 3 – hraniční (tzv rozhraní) [2]

#### 2.1.1 Rozdělení kompozitů

Kompozitní systémy se klasifikují podle různých parametrů a vlastností. Většinou se rozdělují podle skladby systému, typu matrice a konstrukce výztuže. Vlákenné kompozity jsou vyztuženy vlákny nebo vláknitými krystaly. Vyznačují se nízkým obsahem plniva. V kompozitech tohoto typu dochází ke vzniku kvalitativně nových mechanických vlastností materiálu, široce mění jejich vlastnosti a umožňuje také změny orientace velikosti a koncentrace vláken. Kromě toho vyztužení vlákny dává materiálu anizotropní vlastnosti (rozdíl vlastností v různých směrech). Výztužné komponenty se používají ve formě monopolů, drátů, svazků, sítí, tkanin, stuh a pláten. [1]



Obrázek č. 2.1.2 - Klasické rozdělení kompozitních systémů [3]

## 2.1.2 Matrice

Polymerní matrice (pojivo) je nejdůležitější složkou kompozitního materiálu, která určuje jeho technologické a provozní vlastnosti. Při výrobě kompozitních konstrukčních materiálů mají největší význam právě matrice. Působením vnějších vlivů je možné je vytvrzovat, tj. dosahovat přeměny na polymerní vzory vystavováním tepelnému záření, UV záření, tvrdidlům, katalyzátorům nebo iniciátorům. Při vytvrzení pojiva v procesu tvarování je forma výrobku nevratně fixována. Proto typ pojiva a procesy, které probíhají při jeho vytvrzování, určují podmínky pro výrobu plastů, pro tvarování výrobků a jejich vlastností. [4]

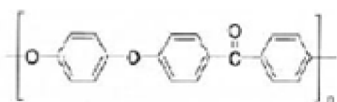
Polymerní matice jsou rozděleny do dvou hlavních tříd:

- Termoreaktivní – polymerní materiály, které jsou pod vlivem teploty, katalyzátorů nebo tužidel. Dochází zde k reakci síťování polymerních molekul, což vede k tvorbě trojrozměrné struktury. Polymery tohoto typu ztuhnou a stávají se nerozpustnými. [4]

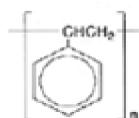
Tabulka č. 2.1.1 - Termoreaktivní polymery [5]

Polyesterové	
Fenolformaldehyd	
Epoxidové	
Polyvinylové	

- Termoplastické - polymerní materiály schopné reverzibilního přechodu při zahřátí ve vysoce viskózní stav (vytvrzování při chlazení). [6]



Polykarbonát



Polystyrol

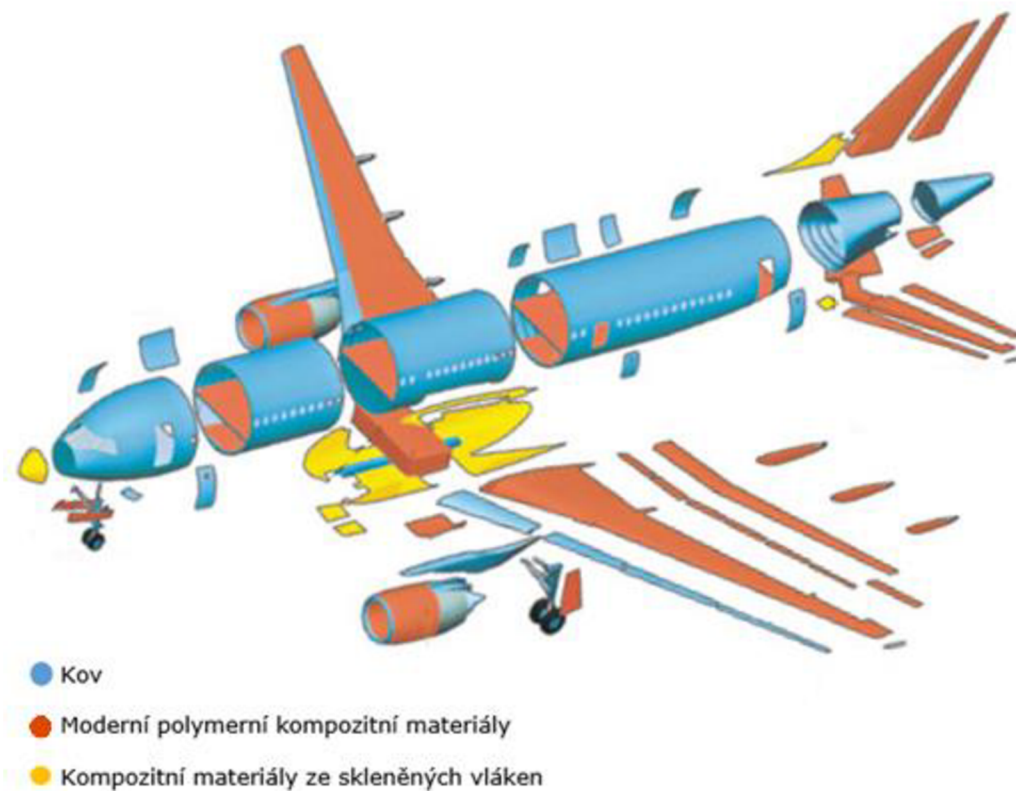


Polyamidy

Obrázek č. 2.1.3 - Termoplasty [6]

### 2.1.3 Využití kompozitů

Kompozitní materiály se nyní používají téměř ve všech oblastech výroby. Kompozitní materiály založené na různých výplních se používají při vystavování vysokému zatížení, tedy v technologicky nejvyspělejších průmyslových odvětvích jako je letectví, kosmonautika, strojírenství či stavebnictví. Kompozitní materiály na bázi přírodních vláken jsou široce používány v exponovaných konstrukcích, ve strojírenství, letectví, průmyslových oblastech, zdravotnictví, ve stavbách atd. [7]



Obrázek č. 2.1.4 - Kompozitní materiály v letadle MS-21 [8]

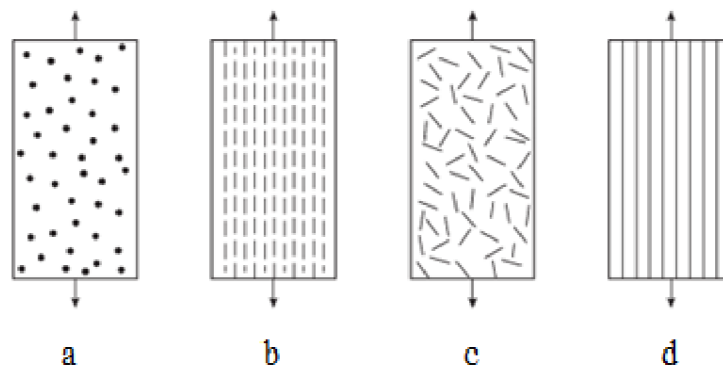
## 2.2 Polymerní kompozity

Vytvoření techniky nové generace s vysokými provozními vlastnostmi a vysokou spolehlivostí a životností je neoddělitelně spjato s použitím nových kompozitních polymerních materiálů.

Matrice kompozitu je komponenta spojitá v celém objemu kompozitního materiálu. Diskrétní prvky, které jsou v objemu matrice, jsou výztužné součásti nebo plniva, které do značné míry určují vlastnosti kompozitu. Všechny kompozitní polymerní materiály mohou být konvenčně zařazeny podle následujících atributů: podle přidavných vyztužujících materiálů a jejich orientace v kompozitu a také podle množství přidávaných komponentů. Vyztužené komponenty nebo výplně se nejčastěji liší tvarem, rozlišujeme dva typy výplní: subtilní minerální plniva ve formě částic nebo desek (slída, kaolin) a vlákna různého charakteru (například skleněné, uhlíkové, aramidové a borové) s podstatně vyššími mechanickými vlastnostmi než matrice. Jedinou výhodou těchto vláken je velká specifická pevnost a vysoká houževnatost. [9]

V současnosti, v důsledku zhoršení životního prostředí, se naléhavějším problémem stává použití kompozitních materiálů se syntetickými vlákny. Obecně platí,

že mechanické vlastnosti přírodních vláken jsou nižší než mechanické vlastnosti syntetických, ale díky své schopnosti se biologicky rozložit se často využívají v běžné praxi. V závislosti na druhu výztuže lze kompozity rozdělit na dva základní typy: disperzně plněné a vláknité (kontinuální nebo rozptýlená vlákna). Tyto kompozity se liší mechanismem výroby, strukturou a trvanlivostí. Příklady kompozitních materiálů různých typů jsou uvedeny na obrázku č. 2.2.1. [10]



Obrázek č. 2.2.1 - Struktura kompozitů různého typu: a – kompozit s náhodně rozptýlenými částicemi; b – kompozit s jednosměrně orientovanými rozptýlenými vlákny; c – kompozit s náhodně orientovanými rozptýlenými vlákny; d – kompozit s jednosměrně orientovanými kontinuálními vlákny [10]

Kompozity vyztužené skleněnými vlákny jsou díky nízkým nákladům a poměrně vysoké a dlouhodobé pevnosti nejčastěji používány při vytváření kompozitních materiálů. Jejich použití však způsobuje závažné ekologické problémy, kterým v současné době čelí většina zemí.

Je třeba poznamenat, že při vytváření polymerních kompozitních materiálů se řídíme především praktickými ohledy a empirické vyhledávání předbíhá vývoj teorie. Existuje však vědecky odůvodněný přístup k výběru složení kompozitů a ke zjištění pravidelnosti změn makroskopických vlastností materiálů v závislosti na jejich uspořádání. Polymerní kompozity tak mohou získat předem stanovené vlastnosti. [11]

Plněné polymery (kompozity) mají unikátní fyzikálně-mechanické vlastnosti, díky kterým jsou široce používány v různých oblastech strojírenství, stavebnictví a dalších průmyslových odvětvích. Jsou široce poptávaným typem polymerních kompozitních materiálů (obr č. 2.2.1 4a, 4c). S cílem vytvořit nové polymerní materiály s komplexem hodnotných provozních vlastností přináší plniva do polymerů nejen zlepšení jejich technologických parametrů a recyklovatelnost, ale i schopnost rozkladu, a

tím zároveň řešení ekologických problémů. Vysoké pevnostní charakteristiky, odolnost a široký sortiment zboží nám umožní vybrat materiál, který splňuje moderní technické požadavky prakticky ve všech oblastech jejich potenciálního využití. [12]

Zvláštností struktury vláknitých kompozitů je rovnoměrné rozložení vysoce pevných vysokomodulových vláken v polymerní matici a anizotropie vlastností způsobených orientací vláken (obr č. 2.2.1 4b a 4d). Mechanické vlastnosti vláknitých kompozitů jsou proto definovány vysokou pevností výztužných vláken, vlastnostmi matrice a pevností vazby na rozhraní. Poměr těchto parametrů závisí na komplexu mechanických vlastností materiálu a mechanismu jeho zničení. Vlákná jako skleněná, uhlíková, aramidová, supermolekulární PE a borová jsou široce používána při získávání materiálů pro automobilový a letecký průmysl. [13]

U většiny kompozitů vyztužených vlákny se specifická pevnost zlepšuje při začlenění tvrdých, ale křehkých vláken do měkčí plastové matice. Materiál matice zajišťuje přenos napětí v polymerním kompozitu z matrice na vlákna, která nesou většinu aplikovaného zatížení. V tomto případě matice také poskytuje ochranu vláken před vnějším zatížením a povětrnostními vlivy. Délka vláken, jejich orientace, objemový podíl a směr vnějšího zatížení určují mechanické vlastnosti kompozitů. Mechanické vlastnosti kompozitů vyztužených vlákny jsou také do značné míry závislé na mechanismu přenosu napětí v polymerním kompozitu z matrice na vlákna. [14]

### **2.2.1 Recyklace polymerních a kompozitních materiálů**

Obecně je recyklace polymerů a polymerních kompozitů náročný úkol kvůli velkému množství polymerních materiálů různého typu. Většina odpadu je tvořena směsí různých vzájemně neslučitelných polymerů, které nepodléhají separaci. V tomto případě některé polymery při zpracování směsí způsobují destrukci jiných složek, například PVC není kompatibilní s PET, což způsobuje jeho rozklad. Zároveň propojené polymery nelze roztavit a recyklovat sekundárně. [15] Dalším problémem jsou vícebarevné výrobky, jejichž společná recyklace by mohla znehodnotit a ovlivnit výsledný produkt. V současné době se likvidace výrobků po ukončení životnosti provádí několika způsoby, mezi hlavní z nich patří zakopání do země, spalování v pecích, pyrolýza a recyklace.

#### **2.2.1.1 Zakopání do země**

Je široce používaný způsob likvidace - některé výrobky však nejsou, vzhledem ke svým vlastnostem, pro tento způsob vhodné. Zejména polymerní materiály



jsou při vstupu do země odolné vůči působení mikroorganismů a nerozkládají se pod vlivem okolního prostředí, což vede k výraznému zhoršení životního prostředí. [16]

#### *2.2.1.2 Spalování*

Světové zkušenosti ukazují, že nejčastějším způsobem likvidace odpadů je jejich spalování doprovázené energetickým výdejem. Současně se také uvolňují různé jedovaté těkavé látky a vytvářejí se pevné zbytky, jejichž čištění a neutralizace ve většině případů činí proces spalování ekonomicky nevýhodným. Největší nebezpečí představuje tvorba plynů obsahujících síru, oxidů dusíku, dioxinu a furanů; z těžkých kovů jsou nejvíce škodlivé kadmium a olovo. Náklady na čištění uvolněných plynů, oddělení kapalných produktů a zneškodnění pevných zbytků činí všechny navrhované procesy nerentabilní. Srovnávací jednoduchost spalovacího procesu však určuje jeho poměrně široké rozšíření v praxi. V Evropě se objem spalovaného plastového odpadu s produkcí energie pohybuje kolem 14 % z celkového objemu zničeného odpadu. [17]

#### *2.2.1.3 Pyrolýza*

Je vysokoteplotní rozklad organických sloučenin při ohřevu, který se provádí za různých podmínek. Při pyrolýze polymerních odpadů se tvoří produkty, které mají praktické využití (petrolej, kapalné uhlovodíky atd.). Pyrolýza je vysoce efektivní metoda recyklace plastů heterogenních materiálů (jako je směs odpadu nebo drcené zbytky kompozitů). Nízkoteplotní pyrolýza (pod 200 °C) umožňuje obnovit vlákna z kompozitů bez rozpadu samotných vláken - z polymerní matrice kompozitu se odděluje pouze malé množství různých uhlovodíků. Při vysokoteplotní pyrolýze (nad 700 °C) probíhá tvorba komplikované směsi produktů. [18]

Nicméně, spalování a pyrolýza nejsou vždy racionální a nákladově efektivní způsoby likvidace, protože uvedené procesy jsou provázány uvolňováním škodlivých produktů oxidace do atmosféry a pronikáním jedovatých solí těžkých kovů do země a vodního prostředí.

Polymerní kompozity mají významný podíl na celkovém objemu vyrobených polymerních materiálů. Oblast použití kompozitních materiálů se neustále rozšiřuje. Stimuluje produkci materiálů na jejich bázi, zároveň však nevyhnutelně zvyšuje množství odpadu, který vzniká ve fázi výroby a po skončení životnosti hotových výrobků.

- **Primární recyklace** zahrnuje obnovu odpadu do původního materiálu nebo se snaží přiblížit původním vlastnostem materiálu. Při recyklaci se materiál používá v oblastech, které nevyžadují vlastnosti původního materiálu.
- **Sekundární recyklace** je proces extrakce, spočívá v získání nového materiálu s novými vlastnostmi, které se výrazně liší od vlastností původního materiálu nebo výrobku.
- **Terciární recyklace** spočívá v rozdělení materiálu na chemické bloky s následným odděleným zpracováním vedlejších produktů.
- **Kvartérní recyklace** zpětně získává energii uvolněnou při spalování odpadů nebo jiných recyklačních produktů. [19]

### **Mechanické metody**

Metody zpracování vyztužených kompozitů závisí na povaze polymerní matice a vyztužné složky. Tyto metody zahrnují drcení, broušení, řezání, otěr ad.

**Chemické metody** zahrnují rozklad a oxidaci v pseudo-zkapalněné vrstvě. Termoreaktivní polymery dávají materiálům na jejich základě vysokou tepelnou a chemickou odolnost, což však výrazně komplikuje jejich recyklaci. Vzhledem k přítomnosti upevnění matrice nelze kompozity na bázi termoreaktivních matric recyklovat tavením nebo rozpuštěním. Proto jsou tyto materiály předběžně rozdrceny a pak se granulované termoreaktivní kompozity používají jako plniva v termoreaktivních a termoplastických matricích. Při likvidaci vláknitých termoreaktivních kompozitů se vlákna regenerují ve formě krátkých vláken v důsledku drcení. Podobná krátká vlákna mohou být použita pouze při výrobě kompozitů určitého typu. [20]

Výše popsané metody likvidace polymerů a polymerních kompozitů neumožňují úplné zničení výrobků. Každá z metod má určitý nedostatek. Radikálním řešením problému recyklace komunálního odpadu je vytvoření biologicky odbouratelných polymerních materiálů na bázi přírodních surovin, které jsou schopné rozkladu při vhodných podmínkách. [21]

V současné době existují tři hlavní oblasti vytváření biologicky rozložitelných polymerních materiálů:

- Syntéza biologicky rozložitelných polyester hydroxykarbonových kyselin.

- Přidávání do struktury polymerů fragmentů molekul, které obsahují funkční skupiny, (přispívá k urychlené foto degradaci polymerů);
- Vývoj kompozice na základě obnovitelných syntetických polymerů a polymerů přírodního původu. [22]

### 2.2.2 Biodegradace

Podle stávajících představ probíhá biodegradace kompozitů na bázi syntetických matic a přírodních složek díky faktorům vnějšího prostředí (slunce, voda atd.). Oxidace přispívá k degradaci přírodních polymerů (zejména celulózy, hlavní složky přírodních vláken). Degradace probíhá za vzniku volných radikálů, které vedou k destrukci povrchu kompozitu, což iniciuje rozpad syntetické matrice. Degradaci materiálu způsobují také mimo jiné mikroorganismy v zemině. V důsledku toho probíhá fragmentace a degradace polymerních matrice a výsledek je šetrnější pro přírodu (oxid uhličitý a voda). [23]

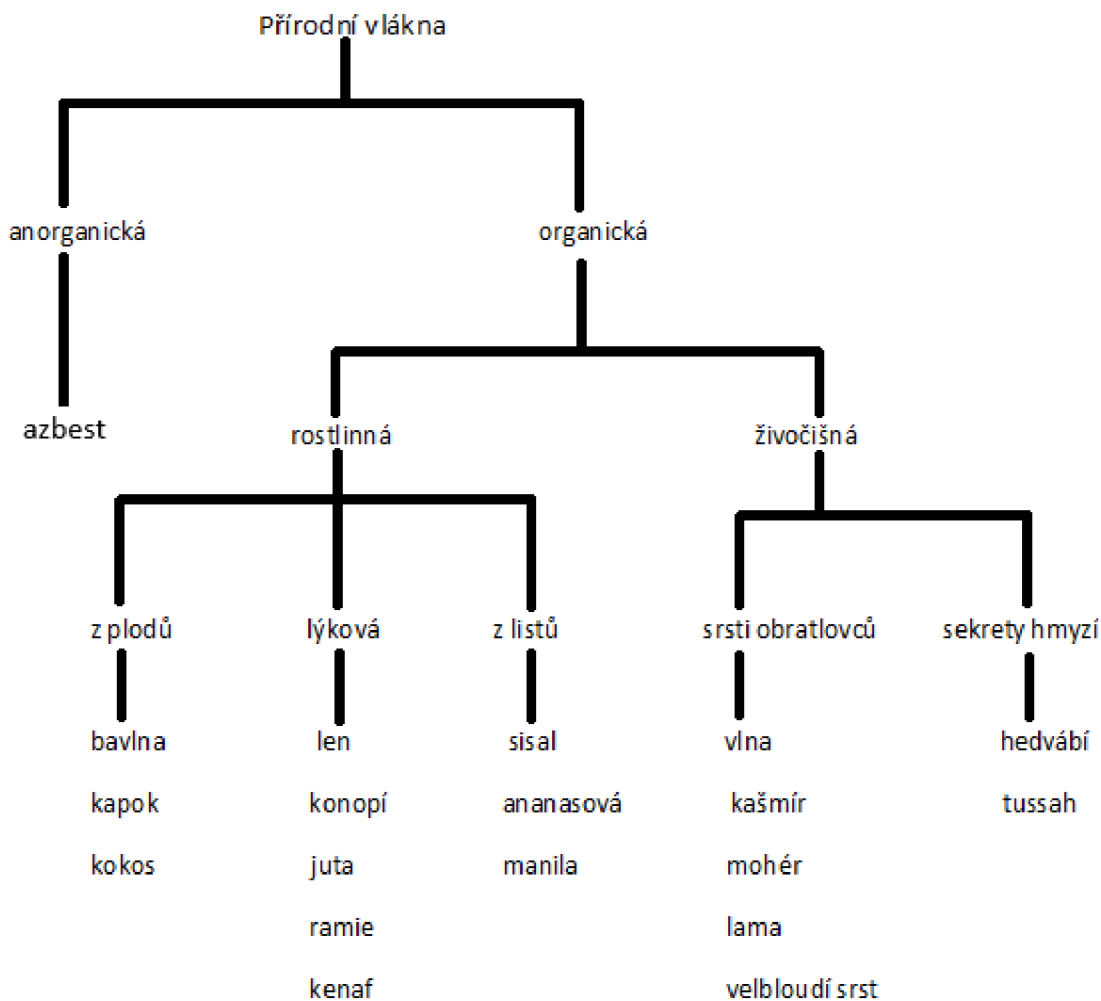
Příkladem "zelených" kompozitů, v nichž jsou obě složky získané z přírodních surovin, mohou být kompozity na bázi polylaktidu nebo polyoxyalkanoáty vyztužené přírodními vlákny. Vzhledem k vysoké ceně těchto polymerů je v současné době jejich využití pro průmyslovou výrobu velmi omezené.

Kompozitní materiály na bázi přírodních vláken, získané mícháním polylaktidů a polysacharidů, jsou široce používány při výrobě produktů různého určení (folie, výrobky pro jednorázové použití). Přidání polysacharidů výrazně zvyšuje biologickou rozložitelnost polylaktidů, nicméně tyto materiály nepatří mezi vyztužené kompozity. Kromě toho jsou polylaktidy a polyoxyalkanoáty často používány při vytváření kompozitů s jinými polymery přírodního původu (obvykle s chitosany, molekulami celulózy a dalšími). [24]

### 2.3 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna existují v přírodě v hotové podobě a vznikají bez přímé účasti člověka.

Přírodní vlákna mají významné ekologické výhody a mají poměrně vysoké fyzikálně-mechanické vlastnosti. Taková vlákna neobsahují toxické látky, mohou být rychle pěstována v potřebném množství a mají přijatelnou cenu. Jako vyztužné složky lze použít uspořádané a neuspořádané technické a elementární vlákno, netkané textilie, příze a tkaniny. Přírodní rostlinná vlákna jako je len, bavlna, konopí, juta, sisal, kokos ad. jsou vynikajícím materiálem pro vyztužení polymerních kompozitů. [25]



Obrázek č. 2.3.1 - Schématické rozdělení přírodních vláken podle původu [26]

Kompozity z přírodních vláken, neboli biokompozity, tvoří přírodní vlákna v matici syntetických polymerů. Biokompozity mají nízkou hustotu, tzn. že jsou lehčí než kompozity se skleněnými vlákny a uhlíkovými vlákny. Mají poměrně vysokou pevnost v tahu, vyznačují se také vysokou odolností vůči nárazu a dynamické zátěži, ale zároveň mají nízkou pevnost v tlaku a ohybu. [27]

### 2.3.1 Použití přírodních vláken

Vlákna přírodního původu se při výrobě kompozitů využívají zejména v oblastech s ohledem na využití obnovitelných zdrojů a s ohledem na recyklaci použitých materiálů, kde samozřejmě záleží na použité matici. Snížení nákladů na výrobky v řadě případů zajišťuje nahrazení skleněných vláken. Nahrazení tradičních materiálů používaných pro povrchové úpravy interiérů biokompozity by mělo vést ke snížení hmotnosti zboží i jeho hodnoty (vzhledem k výrazně nižšímu obsahu přírodních plniv). Navíc díky použití

přírodních obnovitelných surovin se snižuje ekologická zátěž životního prostředí. [28]

Nejrozšířenější využití kompozitních materiálů vyztužených rostlinnými vlákny se našlo v automobilovém průmyslu. Pro vyztužení PMMA v tomto případě lze použít různá přírodní vlákna: len, bavlnu, konopí, jutu, sisal, kokos. V automobilovém průmyslu se stále více používají trvanlivé, proti korozi odolné, lehké polymerní kompozity. V současné době je v moderních automobilech asi 10 % těchto materiálů (podle hmotnosti) a jejich počet neustále roste. [29]

Velké firmy jako jsou například Audi, BMW, Opel, Peugeot, Renault, Seat, Volkswagen a Ford úspěšně používají tyto materiály ve výrobě, zejména ve výrobě interiéru vozidla, panelů, sedadel nebo nárazníků.

### **2.3.2 Polymerní kompozity vyztužené přírodními vlákny**

Díky schopnosti biodestrukce, vysokému stupni orientace, dobré pevnosti, pružnosti a značné měrné tuhosti představují přírodní vlákna velký potenciál pro využití jako vyztužené komponenty. Další výhodou použití přírodních vláken v kompozitních materiálech je jejich netoxičnost, dobré izolační vlastnosti, nízké opotřebení a obnovitelnost. Při vytváření kompozitů s přírodními vlákny je třeba vzít v úvahu vlastnosti jejich struktury, také relativně nízké mechanické vlastnosti, slabé interakce hydrofilních vláken a hydrofobní matrice a nižší tepelný odpor. [30]

Detailní studium mechanických, termických, elektrických a fyzikálně-chemických vlastností těchto kompozitních materiálů, stejně jako jejich schopnost k absorpci vody umožňuje vytvářet vyztužené kompozity, které mají nezbytně nutné komplexní požadované vlastnosti. [29]

Vlákna rostlinného původu, tradičně používaná jako plniva pro termoreaktivní polymery, jsou také perspektivní pro zpracování kompozitů na základě termoplastů. Často se používají pro vyztužení polypropylenových nebo polyesterových matric. [31]

Polymerní kompozity vyztužené přírodními vlákny se vyrábí pomocí technologických metod polymerních kompozitů a termoplastů. Tyto metody se skládají z tlakového lití, vakuové infuze, lisování, přímého vytlačování a tvarování. Obecně platí, že technologie je vybrána na základě tvaru vláken a typu matrice. Správný výběr podmínek a parametrů

procesu (teplota, tlak, čas) umožňuje získat kompozity, které mají optimální soubor požadovaných vlastností. [31]

V tabulce č. 2.3.1 jsou zobrazeny nejdůležitější fyzikální vlastnosti skleněných a přírodních vláken používaných k výrobě kompozitních materiálů. Vlastnosti kompozitů závisí na typu vlákna a matrice, povaze přísad a samotném procesu získávání. Pevnost přírodních vláken je podstatně nižší než u běžně používaného skleněného vlákna. Specifická pevnost přírodních vláken je však srovnatelná s pevností syntetických vláken. Takže specifická pevnost lněných vláken a skelných vláken je přibližně stejná.

*Tabulka č. 2.3.1 - Mechanické vlastnosti a absorpce vlhkosti přírodních vláken různého původu [26]*

Vlákno	Pevnost [N/tex]	Prodloužení při přetrhu, [%]	Navlhavost [%]
Bavlna	0,28 – 0,42	3,5 – 9,8	8 – 25
Vlna	0,1 – 0,2	22 – 39	–
Len	0,53 – 0,56	1,8 – 3	7
Juta	0,42 – 0,53	1,8	12
Sisal	0,35 – 0,44	2,4 – 5,5	11
Kenaf	0,37	3,5	–
Kokosová vlákna	0,18	17 – 19	10
Ramie	0,45 – 0,9	1,2 – 8	12 – 17
Konopí	0,47 – 0,6	2,3 – 2,5	8
Bambus	0,26 – 0,45	3 – 3,8	14

Dva hlavní problémy, ke kterým dochází při použití přírodních vláken k vytvoření kompozitů, souvisejí s jejich absorpcí vlhkosti a kompatibilitou matrice a vláken. Schopnost absorpce vlhkosti závisí na charakteru vláken. Bavlna a ramie mají vysokou absorpci vlhkosti, zatímco absorpce vlhkosti konopí a lnu je výrazně nižší. Pronikání vlhkosti do kompozitních materiálů probíhá třemi různými způsoby: difúzí přes polymerovou matrice, difúzí podél hranice části matrice-vlákno a absorpcí v pórech

a trhlinách. [32] Odstranění přebytečné vlhkosti se obvykle provádí předběžným sušením vláken.

### 2.3.3 Chemické modifikace kompozitů s přírodními vlákny

Přírodní hydrofilní vlákna nejsou kompatibilní s hydrofobní polymerní maticí a mají tendenci k aglomeraci, což ovlivňuje kvalitu výsledného kompozitu. Předúprava vláken hraje klíčovou roli, protože závisí na velikosti mezifázové interakce mezi komponentami. Modifikace vláken vede ke změně jejich struktury a zlepšení mezifáze adheze mezi vláknem a maticí. Realizace je možná jak fyzickými, tak i chemickými metodami. Mechanické vlastnosti kompozitů mohou být zvýšeny přimícháním vláken do matrice, zajišťuje se tak pevnost materiálu. Kompenzace neslučitelnosti na hranici oddílu se často uchylují k úpravě povrchu vláken. [27]

Mezi nejrozšířenější fyzikální metody zaměřené na změnu vlastností přírodních vláken se řadí elektrický výboj (studená plazma) a mikrovlnné záření. Vedou ke změnám struktury povrchu a vzniku funkčních skupin, které jsou schopny reagovat s funkčními skupinami polymerní matrice. [13]

Protože přírodní vlákna s vysokým obsahem vlákniny mají vysoký stupeň krystalizace, častěji se používá chemická úprava vláken. Krystalické oblasti agregují mezi sebou se silnými intramolekulárními vodíkovými vazbami, které brzdí jejich interakce s termoplastickými polymerními maticemi. Krystalová struktura celulózy může být zničena substitucí jejich hydroxylových skupin v důsledku chemických reakcí na jiné funkční skupiny, které slouží jako změkčovadlo. Přitom probíhající dekrystalizační procesy přispívají ke zlepšení termoplasticity celulózy a v důsledku toho ke zvýšení přilnavosti vlákna a matrice. Právě v tom spočívá smysl chemické modifikace povrchu přírodních vláken, která může obsahovat zpracování alkalitů, peroxidů, silanů (běžné aplikace pro skleněná vlákna), štěpování vinylových monomerů atd., což vede ke zlepšení pevnosti vláken, zvýšení jejich pružnosti a zvýšení přilnavosti s maticí. [33]

- Alkalické zpracování vláken je běžnou metodou získávání vysoce kvalitních vláken. V tomto případě parametry jako je povaha činidla, koncentrace alkalického roztoku, teplota a doba tepelného zpracování významně ovlivňují pevnost výsledného materiálu. Například polyesterové kompozity ošetřené

louhem, které obsahují 5 % sisalu, vykazovaly nárůst pevnosti v tahu o ~20 %.  
[34]

- Silany se také aktivně používají k úpravě vláken a výrazně zlepšují vlastnosti kompozitů. Vzhledem k přítomnosti chemicky aktivních reakčních alkylových skupin jsou schopny reagovat s funkčními skupinami matrice a zvýšit přilnavost. Silany, které nemají reakční alkylové skupiny, netvoří chemické vazby, a v takových případech se zdá, že adheze stoupá kvůli zlepšení interoperability mezi fázemi. Zpracování povrchu celulózových vláken silanem v kompozitech s polypropylenem vede k zesílení přilnavosti, což přispívá k vyšší odolnosti a zlepšení mechanických vlastností kompozitů. [34]
- Přidání malého množství benzoylperoxidu nebo dicumyl peroxidu do kompozitu celulózy s polyetylenem zlepšuje jejich mechanické vlastnosti díky protekci iniciované peroxidem roubované kopolymerizace polyethylenu na povrchu celulózy. Studie vlivu chemického zpracování na protažení a dynamické mechanické vlastnosti kompozitů sisalu s LDPE (Polyethylen s nízkou hustotou) při nízkém obsahu sisalu ukázala, že zpracování diisokyanátu snižuje hydrofilní charakter povrchu vláken sisalu a zlepšuje pružnost kompozitů. Studium morfologie povrchu lněných vláken zpracovaných silanem, benzoyl peroxidem a peroxidem vodíku ukázala, že použití těchto činidel přispívá ke zvýšení adheze mezi matricí a vláknem, čímž se zlepšují vlastnosti kompozitů v tahu ve srovnání s kompozity, ve kterých se používá surový len. [35]

Údaje uvedené v tabulce č. 2.3.2 ukazují vliv modifikátorů na mechanické vlastnosti různých kompozitů vyztužených přírodními vlákny. Jak vyplývá z tabulky, chemické ošetření v řadě případů přispívá ke zvýšení mechanických vlastností kompozitů.



Tabulka č. 2.3.2 - Vliv mísící činidel na mechanické vlastnosti kompozic vyztužených přírodními vlákny [27]

<b>kompozice</b>	mísící sloučeniny	Zvýšení pevnosti v tahu, [%]	Zvýšení modulu $E$ , [%]
Juta-epoxid	Kyselina akrylová	Beze změny	-
Juta-nenasycený polyester a epoxid	Polyester polyol	10	10
Sisal-epoxid	Silan	25	-
Celulóza-nenasycený polyester	Dimethanolmelamin	Beze změny	-
Celulóza-polystyren	Isokyanát	30	Beze změny
Celulóza-polypropylen	Kyselina stearová kopolymer malein anhydridu s polypropylenem	30 100	15 Beze změny
Len-polypropylen	Silan Malein anhydrid	Beze změny 50	50 100

Postupný přechod automobilového průmyslu od oceli k polymerním kompozitům vyztuženým skleněnými vlákny a dále ke kompozitům vyztuženým přírodními vlákny je těžší, protože automobilové společnosti mají zájem o hledání materiálů s dobrou zvukovou absorpcí a sníženou hmotností, aby snížily spotřebu paliva. Místo kompozitů vyztužených skleněnými vlákny se již nyní úspěšně uplatňují kompozity vyztužené přírodními vlákny pro vnitřní výbavu automobilů (například dveřní panely). Pro letadla, a pro oblasti leteckého a automobilového strojírenství byly vyvinuty biologicky rozložitelné a protipožární polymerní kompozity s použitím konopí, lnu a sóji. Přírodní vlákna jsou obzvláště žádána v rozvojových zemích, protože umožňují použití vlastních přírodních zdrojů při vytváření materiálů nové generace. Biodegradovatelné kompozitní materiály vyztužené přírodními vlákny s nízkými mechanickými vlastnostmi mohou být použity také jako obalové materiály, ve stavebnictví atd. [36]

### 2.3.4 Druhy rostlinných vláken

Vlastnosti rostlinných vláken jsou v obecném případě závislé na druhu rostliny, na stupni zrání, geografickém místě výskytu, počasí atd. Přírodní vlákna jsou dle původu rozdělena do tří druhů: rostlinná, minerální a vlákna živočišného původu. Vlákna živočišného původu jako je hedvábí nebo vlna se však jako výztužná vlákna příliš nerozšířila. Současně se tato rostlinná vlákna (např. přírodní a regenerovaná celulóza) aktivně používají k vyztužení kompozitů.

Rostlinná vlákna mohou být rozdělena na šest typů: lýková vlákna (jutové, kenaf, ramie), vlákna z listů (abaková, ananas, sisal), semenná vlákna (bavlna), vlákna ze slupky (kukuřice, rýže, pšenice), rostlinná vlákna (bambusové) a dřevní vlákna (měkká a tvrdá dřeva).

#### Vlákna ze semen

Bavlna je nejznámějším zástupcem přírodních vláken a používá se především v textilním průmyslu, přičemž poptávka po ní se neustále zvyšuje. Během procesu získávání vláken je bavlna vystavena silnému odsávání, což vede k tomu, že délka vláken je 1000-3000krát vyšší než jejich průměr. Celulóza získaná z bavlny je charakterizována maximální nepřítomností nečistot ve srovnání s celulózou získávanou z jiných přírodních vláken. Nárůstem obsahu bavlněných vláken v kompozitu se na rozdíl od dřevěných vláken jejich mechanické vlastnosti zlepšují. Tato skutečnost je spojena s lepší interakcí matrice a bavlněného vlákna ve srovnání s dřevěnými vlákny [3].

- Kokosová vlákna se extrahují z kokosových skořápek hlavně v Indii a na Srí Lance. Kokos je ovoce, které má pevný vnější plášť a měkký vnitřek, přičemž listy se oddělují od kokosu pomocí speciálních strojů. Vlákna nezralého kokosu mají bílou barvu (bílá vlákna), která se při zrání změní na hnědou (hnědá vlákna). Chemické složení vláken závisí na stupni zrání kokosu. Kokosová vlákna jsou charakterizována nejvyšším obsahem ligninu mezi přírodními vlákny. Jedná se o jediný druh vláken, který je poměrně odtokový a absorbuje malé množství slané vody. Nízká absorpční schopnost je spojena zřejmě s nízkým obsahem celulózy. Kompozity vyztužené kokosovými vlákny však mají nejnižší pevnost ve srovnání s kompozity vyztuženými jinými přírodními vlákny. [38]

## Lýková vlákna

Mezi lýková vlákna patří zejména již zmíněná juta, kenaf nebo ramie.

- Juta je jedním z nejlevnějších a nejdůležitějších přírodních vláken (po bavlně). Produkce juty je považována za nejstarší na světě. Juta se používá pro vyztužení polypropylenové, epoxidové, polylaktidové, polyamidové a fenolové matice. Při vývoji kompozitů na bázi polyuretanu a epoxidu vyztužených jutovými vlákny, stejně jako u kompozitů vyztužených lněnými vlákny, se používá metoda pultruze. Tyto kompozity mají zvýšené mechanické vlastnosti. V současné době dochází k intenzivnímu používání kompozitů vyztužených jutou při výrobě dveřních automobilových panelů. [39]
- Kenaf je nejrychleji rostoucí rostlinou schopnou vyrůst 10 cm/den, dosahující výšky 3 m a průměru 3 – 5 cm. Výroba kenafu má řadu ekologických i ekonomických přínosů. K získání 1 kg kenafu je vynaloženo 15 MJ (megajoule), zatímco pro získání skleněných vláken je zapotřebí vynaložit až 54 MJ. Vlastnosti kenafu jsou podobné jutovým vláknům a jeho struktura je podobná struktuře jiných přírodních vláken. Podle tabulky č. 5 se kenaf vyznačuje nejnižším obsahem celulózy a nejvyšším obsahem ligninu mezi lýkovými vlákny, což zajišťuje jeho vysoké mechanické vlastnosti. Kenaf se používá pro vyztužení termoplastických i termoreaktivních matric. Zájem o kenaf je zapříčiněn jak vysokými mechanickými vlastnostmi, tak vlastnostmi kompozitů vyztužených pomocí kenafu srovnatelných s kompozity vyztužených skleněnými vlákny. [39]

## Vlákna z listů (lýková)

Nejrozšířenějšími zástupci vláken získávaných z listů se řadí abaka, ananas nebo sisal.

- Abaka patří do rodiny banánů, sklizeň probíhá 2 – 3krát ročně. Chemické složení abaky je podobné jiným přírodním vláknům; používá se jako vyztužný materiál. Kromě toho se díky odolnosti ve slané vodě používá Abaka k výrobě mořských lan. Mezi kompozity na bázi abaka – polypropylenové, juto – polypropylenové a len – polypropylenové je prokázáno, že nejlepší mechanické vlastnosti má právě polypropylen vyztužený abakovými vlákny. [39]

- Sisal neboli agáve sicilská roste především v Tanzanii a Brazílii. Po zrání jsou vlákna extrahována z listů, přičemž tvoří pouze 4 % jejich celkové hmotnosti. Vlákna se tradičně používají k výrobě provazů a textilu. Dutá struktura sisalových vláken vede ke snížení pevnosti kompozitů. [40]

### **Vlákna ze stonků (lýková)**

- Široké použití lnu pro vyztužení kompozitů je zapříčiněno velkým obsahem vlákniny a vysokým stupněm krystaličnosti, která mu dává tuhost vyšší než ostatním lýkovým vláknům. Bylo zjištěno, že vlákna izolovaná od středu stonku mají vyšší hodnoty pevnosti a tuhosti. Přítomnost defektů ve stěnách vláken, jejich průměr, stejně jako další faktory významně ovlivňují pevnost vláken. K výrobě souvislých výrobků z kompozitů na bázi polypropylenu a lněných vláken, která mají vysoké mechanické vlastnosti, se používá metoda pultruze. Tato metoda spočívá v pre-impregnaci vyztužujících vláken termoreaktivními nebo termoplastickými pryskyřicemi a jejich následný úsek přes systém filer, který se používá k výrobě vysoce vláknitých dlouhých kompozitních profilů trvalého průřezu. [39]
- V současné době se konopí používá při výrobě textilních vláken, papíru, oleje, vosků, biopaliv ad. Díky teplému klimatu se konopí pěstuje v Chile, Indii, Japonsku, Afghánistánu, USA a mnoha dalších zemích. Variabilita chemického složení vede k rozdílu mechanických vlastností konopných vláken. Velký vliv na pevnostní charakteristiky má věk rostliny. V současnosti výrobu automobilových dílů z kompozitů vyztužených konopím zahájila například společnost "Bayerische Motoren Werke" (BMW). Na základě několika provedených experimentů závislosti pevnosti polymerních kompozitů na povaze použitých vyztužných rostlinných vláken bylo zjištěno, že pevnost v tahu kompozitu vyztuženého konopnými vlákny (30 %) je o 73 % lepší než u kompozitů vyztužených kenafem, sisalem a jutovými vlákny. [37]
- Ramie se vztahuje k lubyňským vláknům a roste v Asii. V současné době se pěstuje i v Číně, kde je známá pod názvem čínská tráva, a také v Brazílii. Sklizeň ramie probíhá 3-5krát za rok, ramie roste 7 – 20 let, její výška dosahuje

1,0 – 2,5 m. Objem vyráběných vláken je malý ( $100 \times 10^3$  tuny), a proto nemůže být ramie vnímána jako potenciálně vyztužitelné vlákno, i když má nejvyšší tuhost mezi lýkovými vlákny (pevnost v tahu 400 – 938 MPa). [39]

- Bambus patří mezi byliny a vyskytuje se v řadě asijských zemí (Indie, Čína, Indonésie). Bambus vyniká kombinací nízké hustoty a vysoké mechanické pevnosti, tj. má vysokou specifickou tuhost a pevnost, což umožňuje srovnání se skleněnými vlákny. Existuje více než 1250 druhů bambusu, přičemž specifická pevnost některých z nich v řadě případů přesahuje pevnost oceli. Obecně platí, že vlákna bambusu dělíme na dva druhy: přírodní bambusová vlákna a vlákna z bambusové hmoty (regenerovaná bambusová viskózová vlákna). Celosvětová výroba bambusových vláken používaných v textilním a papírenském průmyslu dosahuje  $30 \times 10^6$  tun. Bambusová vlákna jako výztužné prvky představují alternativu ke sklolaminátům. [40]

Hlavními složkami rostlinných vláken jsou celulóza, hemicelulóza a lignin, přičemž jejich poměr záleží na druhu rostliny, jejím věku a také část rostliny, ze které vlákna pochází (tabulka č. 2.3.3).

Tabulka č. 2.3.3 - Chemické složení a fyzikální vlastnosti rostlinných vláken [37]

Vlákno	Celulóza	Hemi – celulóza	Lignin	Hustota, [g/cm <sup>3</sup> ]	Průměr, [μm]
Bavlna	92 – 93	5 - 6	-	1,5 – 1,6	12 – 35
Juta	65 – 70	12 – 13	12	1,5	5 – 25
Abak	64	20	4 – 6	1,5	6 – 46
Len	62 – 70	15 – 17	2 - 3	1,54	5 – 76
Konopí	67 – 74	16 – 18	3 – 4	1,48	10 - 51
Kenaf	70 – 72	20 - 21	9	1,2	15 – 19
Ramie	76 – 70	13 – 15	0,6 – 1	1,5	5 - 36
Bambus	35 – 45	20 – 25	30	0,6 - 11	8 - 12
Sisal	65 – 73	12 – 13	10 - 11	1,5	7 – 47
Kokosová vlákna	43	< 1	45	1,2	15 – 24

Zde jsou zachyceny vlastnosti přírodních vláken používaných k vyztužení polymerních materiálů. Díky nízké hustotě a vyhovujícím hodnotám tuhosti a pevnosti se však tato vlákna nacházejí v řadě speciálních oblastí. Jak vyplývá z údajů v tabulce č. 2.3.3, největší pevnost srovnatelnou s pevností umělých vláken mají vlákna ramie a kenaf (vysoký obsah celulózy). Nízkou pevnost mají naopak kokosová vlákna, což je způsobeno malým množstvím celulózy.

### 2.3.5 Vlákna ze surovin živočišného původu

Vlákna získaná ze surovin živočišného původu jako je vlna, hedvábí či keratin jsou druhým nejdůležitějším typem přírodních vláken pro vyztužení kompozitů. Chemické složení, mechanické a tepelné vlastnosti živočišných vláken hrají zásadní roli při jejich aplikaci jako výztužné složky. Hedvábí a vlna jsou široce používány v textilním průmyslu. [41]

Metodou horkého lisování lze získat kompozity na bázi polypropylenové matrice vyztužených přírodními bílkovinami hybridními hedvábnými a vlněnými vlákny.

Kompozity se skládají z 35 % hedvábí, 15 % vlny a 50 % polypropylenu, který se vyznačuje nejlepšími mechanickými vlastnostmi: jeho pevnost v tahu tvoří 20 MPa až 30 MPa. Kompozitní materiály z polypropylenu vyztužené smíšenými vlákny z hedvábí a vlny mohou být potenciálně náhradou epoxidových kompozitů vyztužených skleněnými vlákny a používané jako elektroizolační materiál v tištěných deskách. [41]

### 2.3.5.1 Vlna

Zdrojem získávání vlněných vláken jsou obvykle ovce, kozy, velbloudi, králíci a někteří další savci. V průmyslovém měřítku je nejčastěji používána ovčí srst. Roční celosvětová produkce ovčí vlny se pohybuje kolem 1,2 milionu tun, z nichž 90 % spotřebuje textilní průmysl. Hlavními producenty ovčí vlny jsou Austrálie, Nový Zéland a Čína. Vlna, která se skládá především z živočišného proteinu keratinu, je před použitím jako textilní vlákno vyčištěna, aby se odstranilo "vlněné mazivo". Keratin je náchylnější k chemickým účinkům a nepříznivým podmínkám prostředí více než celulóza obsažená v rostlinných vláknech. [42]

### 2.3.5.2 Hedvábí

Přírodní hedvábí díky svým komplexním vlastnostem a nákladům představuje nejcennější surovinu. Skládá se z vysoce strukturovaných bílkovin a je charakterizováno vysokými hodnotami pevnosti a prodloužením, stejně jako chemickou odolností. Hedvábí se získává z několika zdrojů, v důsledku čehož se jeho vlastnosti značně liší. Přírodní hedvábí se získává především z bource morušového *Bombyx mori*. Dalším nejvýznamnějším zdrojem je pavoučí hedvábí na bázi fibroinů, které tvoří pavouci; existuje přibližně 4000 druhů. [43] Vlastnosti těchto dvou typů hedvábí jsou uvedeny v tabulce č. 2.3.4.

Tabulka č. 2.3.4 - Vlastnosti hedvábí [45]

<b>Vlákno</b>	Stupeň krystalinity, [%]	Maximální teplota použití, [°C]	Teplota destrukce, [°C]	Prodloužení při protahování, [%]
Hedvábí <i>Bombyx mori</i>	38 – 66	170	250	18
Dragline hedvábí Dragline Silk	20 – 25	150	234	30

Základní vlastnosti elementárních vláken přírodního hedvábí jsou následující: hustota 1,32 – 1,36 g/cm<sup>3</sup>; jemnost méně než 0.5 tex; prodloužení při přetržení 18 – 25 %; vlhkost 10-13 %. Hedvábná vlákna jsou odolná vůči mnoha chemikáliím, včetně slabých kyselin, nejsou rozpustná ve většině alkoholů a acetonu a navíc absorbují málo vody. Hedvábí se používá jako výztužná vlákna při vytváření kompozitů s polyethylenem a přírodním kaučukem. V tkáňovém inženýrství se hedvábí používá jako biomateriál, který podporuje proces hojení kostí, šlach a vazů. [43]

*Tabulka č. 2.3.5 - Mechanické vlastnosti hedvábí, různých polymerů a oceli [45]*

Materiál	Prodloužení při roztržení, [%]	Pružnost v tahu, [MPa]	Viskozita destrukce, [J/m <sup>3</sup> ]
Pavučina umělá	35	4000	160
Hedvábí	180	1500	70
Nylon	20	3000	80
Kaučuk	600	100	100
Kevlar	5	4000	50
Vysokopevnostní ocel	1	5500	6

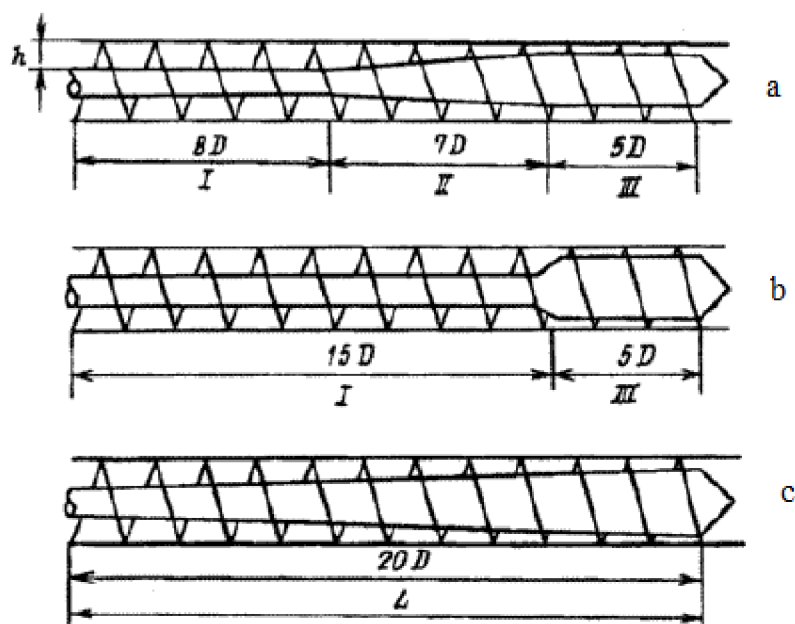
### **Kompozity na bázi hedvábí**

Biodegradabilní kompozitní materiály mohou být vyrobeny smícháním fibroinu hedvábí se syntetickým polymerem. Například hedvábná fibroinová fólie má dobrou propustnost rozpuštěného kyslíku ve vlhkém stavu, ale je příliš křehká, než aby byla použita v suché formě. Pro zlepšení mechanických vlastností kompozitu založených na fibroinu hedvábí se často používají polysacharidy, jejich krystalické a mechanické vlastnosti se výrazně zlepšují s rostoucím obsahem chitosanu. Dalším typem biokompozit jsou kompozity z hedvábného fibroinu s polysacharidem alginátu sodného, které se používají jako obvazy na rány. Použití hedvábných vláken pro výztuž polylaktidu umožňuje zvýšit modul pružnosti a mezní prodloužení výsledného kompozitu na 40 a 53 % v uvedeném pořadí; přitom je také prokázáno, že biologická rozložitelnost kompozitů se zvyšuje s obsahem hedvábného vlákna. [44]



## 2.4 Extruze

Extruze - metoda tvarování výrobků nebo polotovarů neomezené délky stlačením taveniny polymeru v extruderu přes tvarovací hlavu s kanály požadovaného profilu. K tomu se používají šnekové extrudery. Postup výroby vytlačování se začíná přípravou výstupních materiálů, postupně přidávání do extruderu a končí stlačením taveniny přes tvarovací hlavy příslušné konstrukce s následným chlazením, kalibrací. Pro úspěšné zhotovení výrobků vytlačovací metodou nestačí pouze jeden extruder. Kromě toho je třeba mít několik dalších jednotek zařízení, které dohromady tvoří vytlačovací linku. Dále existují foukací extrudery, které se používají v instalacích pro výrobu výrobků metodou vytlačování a vyfukování. Jejich popis není součástí tohoto článku. Prakticky neexistují extrudery se svislými šnekovými šrouby. Hlavním zařízením pro vpracování plastů metodou vytlačování jsou šnekové stroje, nazývané také šnekové lisy. [46]



Obrázek č. 2.4.1 - hlavní typy šneků: a – šnek pro obecné účely s třemi (I, II, III) geometrickými plochami; b – šnek pro zpracování vysoce krystalické polymery; c – šnek pro extruze;  $D$  – vnější průměr;  $L$  – Délka (technologická) šneku;  $h$  – hloubka krájení šneku [47]

### **3 Experimentální část**

Experimentální část se věnovala výrobě polymerních kompozitních materiálů pomocí metody extruze s použitím polymerní matrice a vybraných přírodních vláken (bavlna a vlna). Po výrobě kompozitních materiálů se práce dál zabývá srovnáním jejich výsledných mechanických vlastností.

#### **3.1 Výběr a příprava materiálů**

##### **3.1.1 Výběr matrice**

Matrice byla vybrána na základě hlavního požadavku biodegradace v životním prostředí. Polylakdit (PLA) tomuto kritériu odpovídal nejlépe, protože se jedná o biologicky odbouratelný, biokompatibilní, termoplastický polyester. Je považován za velmi perspektivní druh polyesteru. Monomerem je kyselina mléčná. Kyselina mléčná se získává především enzymatickým kvašením dextrózy, sacharózy nebo maltózy, mladiny a brambor, dalších polysacharidů obsahujících rostlinné potraviny, které jsou obnovitelnou surovinou biologického původu. PLA lze syntetizovat pomocí polykondenzace kyseliny mléčné a metodou polymerace s otevřením cyklu opticky aktivní lactide v tekutém stavu při 100 – 150 °C nebo v pevném stavu při 140 – 200 °C.

##### **Vlastnosti PLA:**

- Teplota tání 160 – 190 °C.
- Teplota skleněného příchodu 60 – 65 °C.
- Modul pevnosti v tahu 2,5 [GPA].
- Biokompatibilita.
- Biologická rozložitelnost.
- Pevnost a flexibilita.
- Životnost za běžných podmínek. [48]

##### **3.1.2 Výběr plniva**

Výběr výplní představoval jeden z hlavních úkolů, protože musela být zohledněna následující řada požadavků:

- Nízká cena, dostupnost.
- Ekologická bezpečnost biodegradace produktů.
- Možnost lehkého mletí.
- Vysoká absorpce vody.

Vzhledem ke všem požadavkům byla jako zástupce rostlinných vláken vybrána bavlna a jako zástupce živočišných vláken vlna.

### *3.1.2.1 Vlastnosti bavlny*

Vlákna bavlny jsou tenká, krátká, měkká a načechraná. Vlákno je poněkud zkroucené kolem své osy. Pro bavlnu je charakteristická relativně vysoká pevnost, chemická odolnost (není zničena působením vody a světla), tepelný odpor (130 – 140 °C), průměrný hyroskopický (18 – 20 %) a malý podíl elastické deformace. Odolnost bavlny proti oděru je malá. Prodloužení vlákna při roztržení je v průměru 7 – 8 %, což je způsobeno spirálovým uspořádáním vrstev celulózy ve stěně vlákna. Bavlněná vlákna jsou charakterizována malým elastickým a velkým plastickým prodloužením. Vzhledem k nízké elasticitě vláken se textilní výrobky z bavlny snadno máčejí. [3]

### *3.1.2.2 Fyzikální a mechanické vlastnosti vlny*

Pro vlnu existuje několik komplexních znaků, které charakterizují její fyzikální a technologické vlastnosti. Mezi hlavní fyzikálně-mechanické vlastnosti patří délka, tloušťka, zvlnění, pevnost, roztažnost, barva, lesk, pružnost a plasticita.

Jednou z nejdůležitějších vlastností vlny je její tloušťka. Pod tloušťkou vlny se rozumí průměr příčného průřezu vlny. Tloušťka je vyjádřena v tisících mikrometrů [ $\mu\text{m}$ ]. Tloušťka vlny závisí na druhu zvířat, podmínkách krmení a obsahu krmení, pohlaví zvířat, jejich věku a dalších individuálních vlastnostech. Délka vlny je nejdůležitější vlastností, která určuje její výrobní účel. Je to jeden z jejích hlavních výrobních znaků.

Tepelná odolnost vlny je nízká. Mezní teplota sušení je 60 – 70 °C; při teplotě 100 – 105 °C vlna ztrácí vlhkost, vlákno se stává tvrdé a lámavé, a při 120 °C vlna zežloutne a začne hnit. Vlna má nízkou tepelnou vodivost, takže vlněné tkaniny se vyznačují vysokými tepelnými vlastnostmi. [42]

### **3.1.3 Mletí přírodních vláken**

Přírodní vlákna bylo třeba nejprve rozemlet tak, aby vstupní materiál splňoval rozměrové požadavky. Mlecí proces proběhl pomocí dvou různých přístrojů.

Nejprve vlákna prošla předběžným mletím pomocí „ultraodstředivého mlýna zm 200“. Tento stroj mele na principu nárazu a stříhu mezi rotorem a pevným kruhovým sítem. Vstupní materiál bylo rozemlet na velikost přibližně 1 mm.



*Obrázek č. 3.1.1 Stroj ultraodstředivý mlýn ZM 200*

Při vytváření filmových výrobků z kompozitních materiálů je důležité, aby byla velikost frakce plniva minimální. Právě proto další proces mletí proběhl na stroji Planetový nanomlýnek „PULVERISETTE 7 premium line“ obrázek č. 3.1.2. Tento stroj je vhodný pro suché i mokré mletí. Vstupní materiály byly rozemlety suchým principem. Upínací zařízení umožňuje uzavření rozemletého vlákna v boxu (mlecí misce) a zajišťuje bezpečný pohyb rozemletého vlákna, takže nedochází k úniku přetlaku, který může nastat během nebo po procesu suchého mletí, k tomu slouží pojistné ventily.



*Obrázek č. 3.1.2 Stroj PULVERISETTE 7 premium line*

Vlastnosti nových materiálů získaných tímto procesem závisí na nastavení parametrů stroje podle požadavků experimentu. Pomocí tohoto univerzálního mlýnu byla vlákna materiálu úspěšně rozemleta na velikosti 20 – 60  $\mu\text{m}$ . Použité parametry jsou uvedeny v tabulce č. 3.1.1.

*Tabulka č. 3.1.1 Provozní charakteristika*

Provozní charakteristika	
Množství vzorku	2,5 g
Velikost vzorku	1 mm
Rychlost	850 otáček/min
Doba mletí	9 min
Průměr kuliček	10 mm
Počet kuliček	30

### **3.2 Výroba fólií vyztužených přírodními vlákny**

Při výběru matrice bylo důležitou podmínkou, aby matrice byla biodegradabilní. Zvolenou matricí dle požadavku pro výrobu polymerních kompozitních materiálů byla PLA. Z důvodu zvýšení propojení matrice a výztuže byla do směsi přidána třetí složka (změkčovadlo), která by lépe spojila polymerovou matici a plnivo. V této práci bylo jako změkčovadlo navrženo použití aciteltributylcitrátu (ATBC). Na základě těchto faktů bylo zhotoveno pět různých vzorků, každý o hmotnosti cca 200 g.

#### **3.2.1 Příprava a výroba kompozitů**

Hlavním požadavkem, který byl kladen na výrobu polymerní kompozitů, byla vysoká homogenita všech jejich fyzikálních a chemických vlastností. Vzhledem k tomu, že všechny charakteristiky kompozitu jsou určeny jeho složením, je homogenních vlastností dosaženo pouze při rovnoměrném rozložení složek v objemu matrice. K dosažení homogenní směsi bylo nutné, aby se částice pohybovaly navzájem ve všech směrech. Polymery mají vysokou viskozitu, takže jejich zpracování, včetně vzájemného míchání, se provádí při vysokých teplotách. Z toho důvodu bylo míchání složek prováděno metodou extruze. Tato metoda míchání komponent zajišťuje nejlepší rozložení plniva v polymerní matici.

Ve většině případů nemají čisté polymery požadovaný komplex vlastností a nemohou být použity pro výrobu kompozitů. Míchání různých látek umožňuje získat materiály

s novými vlastnostmi, protože směs obvykle kombinuje vlastnosti původních složek, a to znamená, že komplex vlastností se stává rozmanitější. Někdy stačí k původnímu vzorku přidat zanedbatelné množství jiné složky, aby se získal zcela nový materiál, který se liší od původních složek. Postup přípravy směsi byl určen především jeho složením.

#### **Složení pro výrobu kompozitů :**

Masterbatche 1:  $(12 \text{ g PLA} + 2 \text{ g ATBC}) \times 10 = 140 \text{ g}$

Masterbatche 2:  $(11,5 \text{ g PLA} + 2,5 \text{ g plniva}) \times 4 = 56 \text{ g}$

1 – PLA 200 g

2 – PLA/ 10 % ATBC (60 g PLA + 140 MB1 = 200g )

3 – PLA/ 5 % plniva (144 g PLA + 56g MB2)

4 – PLA/ 10 % ATBC/5 % plniva (140 g MB1 + 56 MB2 + 4 g PLA)

Každá součást plní důležitou roli při dosahování zadaných vlastností. V přípravné výrobě se získávají směsi různého složení a s různými fyzickými vlastnostmi.

Pro získání takových směsí a jejich vytvoření byl použit stroj „Xplore“. Princip stroje spočívá ve stlačení taveniny přes tvarovací hlavu s kanály požadovaného profilu.

K tomu se používá šnekový extruder. Sekvence hlavních fází tvarování byla následující:

- Nakládání surovin. Vstupní surovina pro vytlačování byla ve formě prášku a granulí. Rovnoměrné dávkování materiálu z násypky zajišťoval extruder.
- Po utěsnění materiálu do prostoru šneku bylo nutné hledat vytlačený vzduch dostávající se zpět přes násypku. Pokud by odstranění vzduchu nebylo úplné, zůstane vzduch v tavenině a po tvarování se vytvoří ve výrobku dutiny (bublíny), výrobky tak budou poškozené.
- Granule pocházející z násypky vyplňují prostor šnekové zóny a jsou utěsněny. Ke kompresi granulí dochází v šnekové zóně, zpravidla snížením hloubky krájení šneku.
- Na hlavičce docházelo k tavení směsi přiléhajícího k povrchu válce. Vzhledem k tomu, že hloubka krájení šneku klesla postupujícím materiálem, pak vznikající tlak způsobil uspání zatlačením na horkou stěnu válce, kde docházelo k tavení směsi.
- Vytlačovací proces se skládal z postupného posuvu materiálu rotujícím šnekem v jeho částech.

- Pro získání kvalitního výrobku bylo nutné kontrolovat, aby se závěrečný výrobek pohyboval po určitou dobu s konstantní délkou a tloušťkou kalibrované tvarovací části strojů.



*Obrázek č. 3.2.1 Stroj Xplore*

Stav procesu však ovlivňují důležité faktory: teplota, rychlost otáčení míchadla, relativní rychlost pohybu částic směsi, šířka a délka mezery mezi míchadlem a stěnou. Například při zahřátí na teploty kolem 200 °C jsou přísady kompatibilní v poměrně širokém intervalu sloučenin a při kontaktu přísady dochází k procesům vzájemného míchání, což vede k přechodu méně pravděpodobných konformací molekul na pravděpodobnější konformace. Tímto způsobem získáme mnoho nových materiálů s novými vlastnostmi.

Tabulka č. 3.2.1 Použité parametry stroje Xplore

Teplota taveniny	204 °C
Krouticí moment	40 Nm
Otáčky	100/min
Teplota na hlavě	200 °C
Otáčky odváděcí válce	100/min
Otáčky odvíjecí válce	50/min

### 3.3 Zkušební metody

#### 3.3.1 Stanovení tahových vlastností

Důležitým výzkumem je testování pevnosti kompozitu. Zkouška v tahu tvoří dobrou základnu informací pro detekci změn mechanických vlastností kompozitů. Výsledek procesu nejen ukazuje vlastnosti získané v průběhu zkoušky tahu (zčásti vhodné pro stanovení parametrů výrobku), ale je velmi spolehlivým základem pro porovnávání materiálů.

##### 3.3.1.1 Příprava na tahovou zkoušku

Z vyrobených folií bylo připraveno nejméně 15 vzorků o výšce 15 cm a šířce 2 cm. Vzorek byl umístěn do čelistí trhacího stroje tak, aby vzdálenost mezi úchyty byla 10 cm a vzorek bylo umístěn ve středu čelistí. Tahová zkouška byla realizována podle normy ČSN EN ISO 527-4.





Obrázek č. 3.3.1. Trhací stroj

Jednalo se o postupné zatěžování zkušební vzorku. Výsledkem testu je graf zobrazující závislosti napětí a síly na prodloužení. Statistický výpočet síly umožnil přesněji vypočítat hodnotu odporu přetrhu. Ze získaných výsledků byly použity jenom modul pružnosti  $E_t$  [MPa] a maximální síla  $F$  [N]. Určené mechanické hodnoty a statistické výpočty jsou uvedeny v tabulkách níže.

Dle statistického hodnocení byly použity následující veličiny:

- $\bar{x}$  aritmetický průměr
- $s$  směrodatná odchylka
- $v$  variační koeficient
- $IS$  interval spolehlivosti

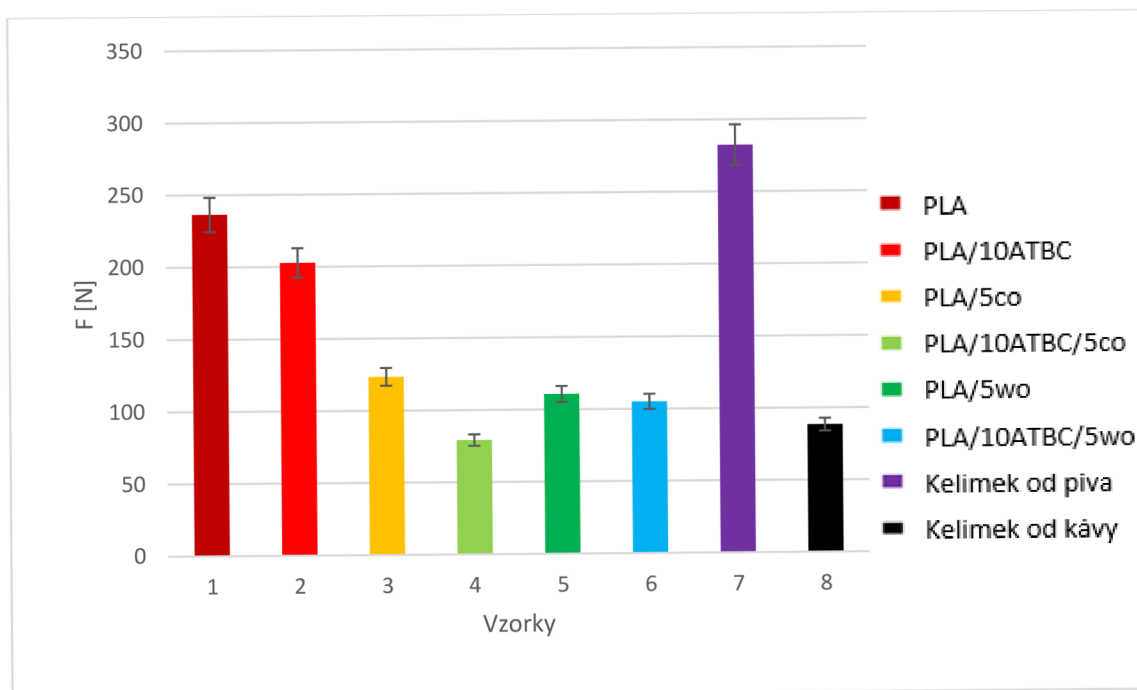
### 3.3.1.2 Výsledky měření

Tabulka č. 3.3.1 Statistické vypočítané hodnoty síly

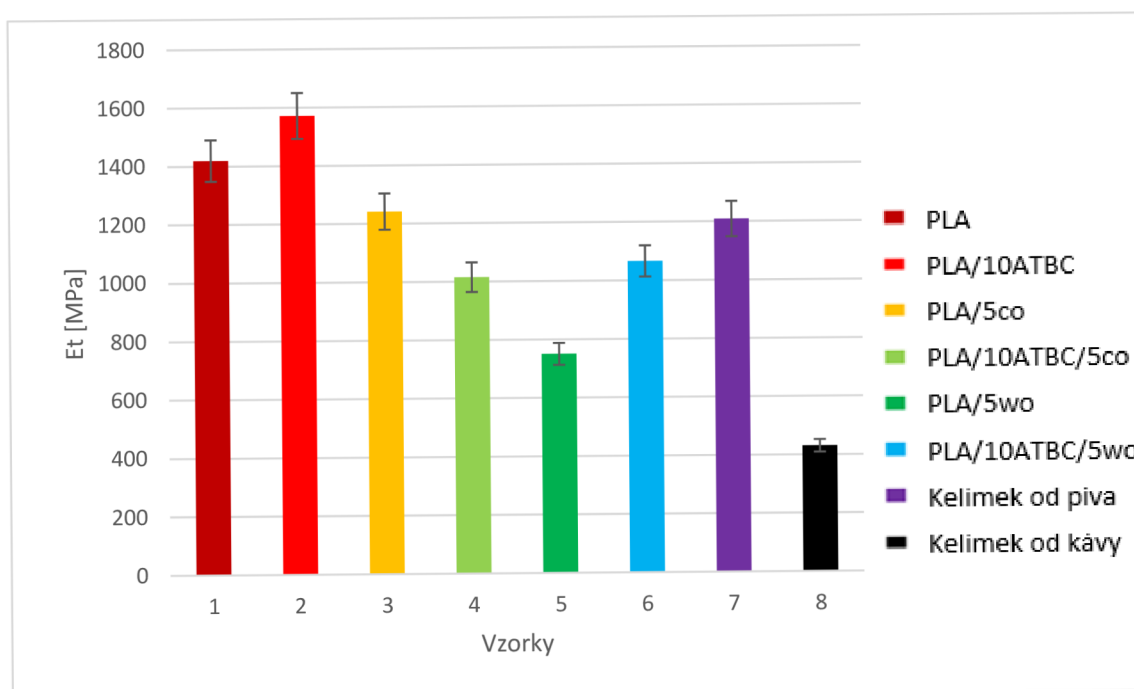
	Průměr [N]	směr. odch. [N]	var. koef. [%]	95% IS
PLA	236,5	37,5	15,9	215,8÷257,2
PLA/10ATBC	202,8	13,0	6,4	195,6÷209,9
PLA/5co	123,4	12,9	10,4	116,2÷130,5
PLA/10ATBC/5co	79,0	7,51	9,5	75,0÷83,3
PLA/5wo	110,6	10,3	9,3	105,0÷116,3
PLA/10ATBC/5wo	105,0	5,3	5,0	102,1÷107,9
Kelímek od piva	282,3	18,7	6,6	271,9÷292,6
Kelímek od kávy	88,3	7,6	8,6	84,0÷92,5

Tabulka č. 3.3.2 Statistické vypočítané hodnoty modulu pružnosti E [MPa]

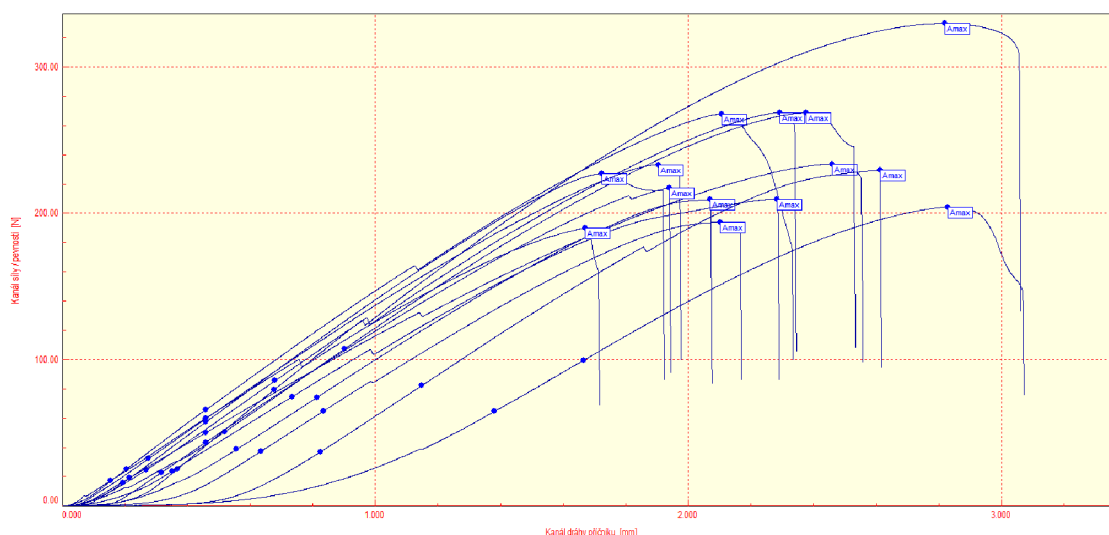
	Průměr [MPa]	směr. odch. [MPa]	var. koef. [%]	95% IS
PLA	1419,0	510	35,9	1400,0÷1439,0
PLA/10ATBC	1572,0	372,0	24,0	1366,4÷1777,5
PLA/5co	1242,0	296,0	24,0	1079,0÷1407,0
PLA/10ATBC/5co	1015,0	370,0	36,0	811,0÷1219,0
PLA/5wo	750,0	207,0	27,0	636,0÷865,0
PLA/10ATBC/5wo	1066,0	353,0	33,0	871,0÷1261,0
Kelímek od piva	1209,0	344,0	28,0	1018,9÷1399,0
Kelímek od kávy	430,0	101,0	23,6	374,0÷485,8



Obrázek č. 3.3.2 Srovnání hodnot pevnosti jednotlivých vzorků



Obrázek č. 3.3.3 Srovnání hodnot modulu pružnosti jednotlivých vzorků



Obrázek č. 3.3.4 Tahové křivky vzorku PLA

Získané výsledky svědčí o tom, že polymerní matrice zpracované s přírodními vlákny mají nižší tahovou sílu bez ohledu na složení směsi.

### 3.3.2 Zkouška tuhosti

Alternativní způsob určení mechanických vlastností kompozitů bylo prováděno metodou testování tuhosti. Vzorky byly připraveny pro testy následujícím způsobem: z každé folie byly odříznuty vzorky v podélném a příčném směru o velikosti 5 cm a 2,5 cm. Následně byly testovány podle normy ČSN 80 0858. Výsledky testů tuhosti vzorků v podélném a příčném směru jsou shrnuty do tabulky číslo 3.13. Pro srovnání byly naměřeny i tuhosti běžně používaných kelímků od nápojů.



Obrázek č. 3.3.5 Přístroj pro testování tuhosti materiálů

Tabulka č. 3.3.3 Průměrné výsledky testů vzorků na tuhosti

	F [N]			
	Podélný směr	95% IS	Příčný směr	95% IS
PLA	2,05	1,94÷2,15	1,08	0,806÷1,36
PLA/10ATBC	1,74	1,60÷1,85	1,91	1,8÷1,99
PLA/5co	1,65	1,30÷1,97	1,60	1,3÷1,89
PLA/5wo	1,07	1,04÷1,09	1,50	1,37÷1,6
PLA/10ATBC/5co	0,38	0,35÷0,39	0,65	0,6÷0,69
PLA/10ATBC/5wo	0,94	0,89÷0,97	1,07	0,61÷1,53
Kelímek od piva	0,36	0,22÷0,49	1,28	1,01÷1,54
Kelímek od kávy	0,37	0,33÷0,4	0,33	0,3÷0,35

Z tabulky číslo 3.3.3 vyplývá, že mechanické parametry, které určují odolnost kompozitů, se mírně liší u vzorků získaných s přidavkem změkčovadla. Mechanické ukazatele pro vzorky v příčném směru byly mnohem nižší než v podélném směru.

Podle výsledků výzkumu tuhosti lze vypočítat ohybový moment.

$$M_0 = F_1 \cdot K \quad (1)$$

$$K = \frac{l}{b} = \frac{5}{2,5} = 0,604 \quad (2)$$

$M_0$  – ohybový moment [mN.cm]

$F_1$  – potřebná síla [N]

$K$  - konstanta

$l$  – délka fólie [cm]

$b$  – šířka fólie [cm]

Tabulka č. 3.3.4 Výpočty ohybového momentu

	Ohybový moment [mN.cm]	
	Podélný směr	Příčný směr
PLA	1,126	1,230
PLA/10ATBC	1,051	1,153
PLA/5co	0,996	0,966
PLA/5wo	0,646	0,906
PLA/10ATBC/5co	0,226	0,392
PLA/10ATBC/5wo	0,564	0,628
Kelímek od piva	0,214	0,771
Kelímek od kávy	0,222	0,196

Během experimentálních studií mechanických vlastností vláknitých kompozitních materiálů byly také zjištěny důležité parametry vzorků jako hmotnost a tloušťka, dále byla vypočítána plošná hmotnost jednotlivých vzorků.

Tabulka č. 3.3.5 Zjištěné průměrové parametry vzorků

	Hmotnost [g]	Tloušťka [cm]	Měrná hmotnost [g/cm <sup>3</sup> ]
PLA	0,492	0,036	1,09
PLA/10ATBC	0,476	0,035	1,088
PLA/5co	0,371	0,041	0,731
PLA/5wo	0,351	0,036	0,780
PLA/10ATBC/5co	0,280	0,033	0,687
PLA/10ATBC/5wo	0,364	0,036	0,817
Kelímek od piva	0,312	0,031	0,805
Kelímek od kávy	0,218	0,019	0,917

$$\rho = \frac{m}{a \cdot b \cdot t} \quad (3)$$

$\rho$  - objemová hmotnost [g.cm<sup>-3</sup>]

$m$  – hmotnost fólie [g]

$a$  – délka fólie [cm]

$b$  – šířka fólie [cm]

$t$  – tloušťka fólie [cm]

### 3.3.3 Zjišťování tepelných vlastností na DSC

Experimentální studie tepelné odolnosti vzorků bylo prováděna na stroji DSC 3+ (diferenciální skenovací kalorimetrie). Dle normy ČSN EN ISO 11357-1 (640748).



Obrázek č. 3.3.6 DSC 3+ (diferenciální skenovací kalorimetrie) pro měření tepelné charakteristiky materiálů

#### Technické Parametry přístroje DSC 3+

Tepelný rozsah	od -150 do 700 °C
Rychlost zpracování vzorku	0,02 - 300 K/min
Hmotnost vzorku	0-1000 mg
Způsoby chlazení	sjednocená chladicí komora s cirkulací kapaliny

### 3.3.3.1 Příprava vzorků na měření.

Z jednotlivých kompozitních materiálů byly připraveny raznicí dva vzorky ve formě kruhu o průměru 5 mm, které byly následně zváženy na laboratorních vahách.

Pro hodnocení měření je klíčovým faktorem hmotnost vzorků, protože působí na tepelný tok mezi stálém a měřeném vzorkem.

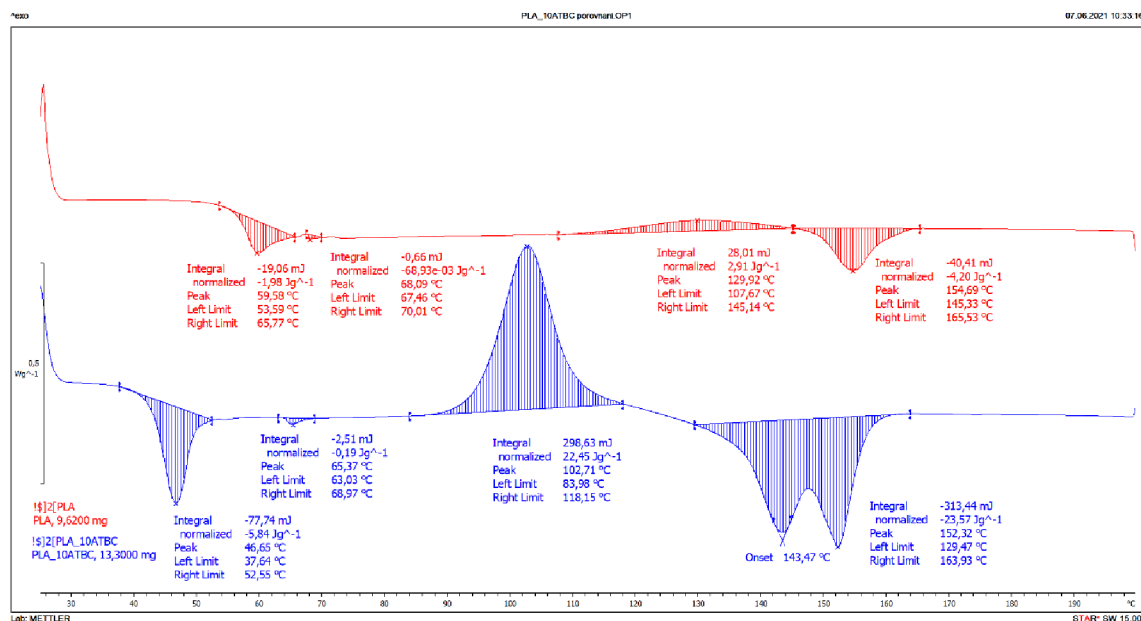
#### Program měření

1. Izoterma: 1 min, 25°C
2. Ohřev: 25-200°C, rychlostí 10°C/min
3. Chlazení: 200-25°C, rychlostí 10°C/min

### 3.3.3.2 Přehled naměřených charakteristik

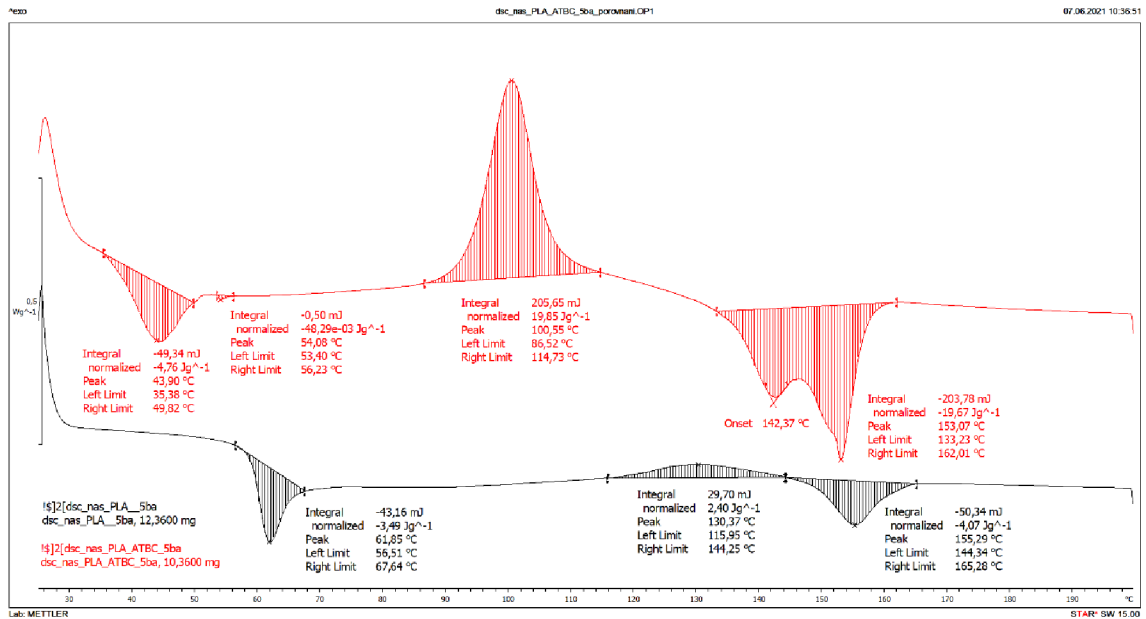
Na základě naměřených termogramů z DSC je možné odhadnout vliv teploty na změnu mechanických vlastností polymerních vláknitých kompozitních materiálů.

DSC analýzy vzorků jsou uvedeny v grafech na obrázcích č. 3.3.7 - 3.3.10.

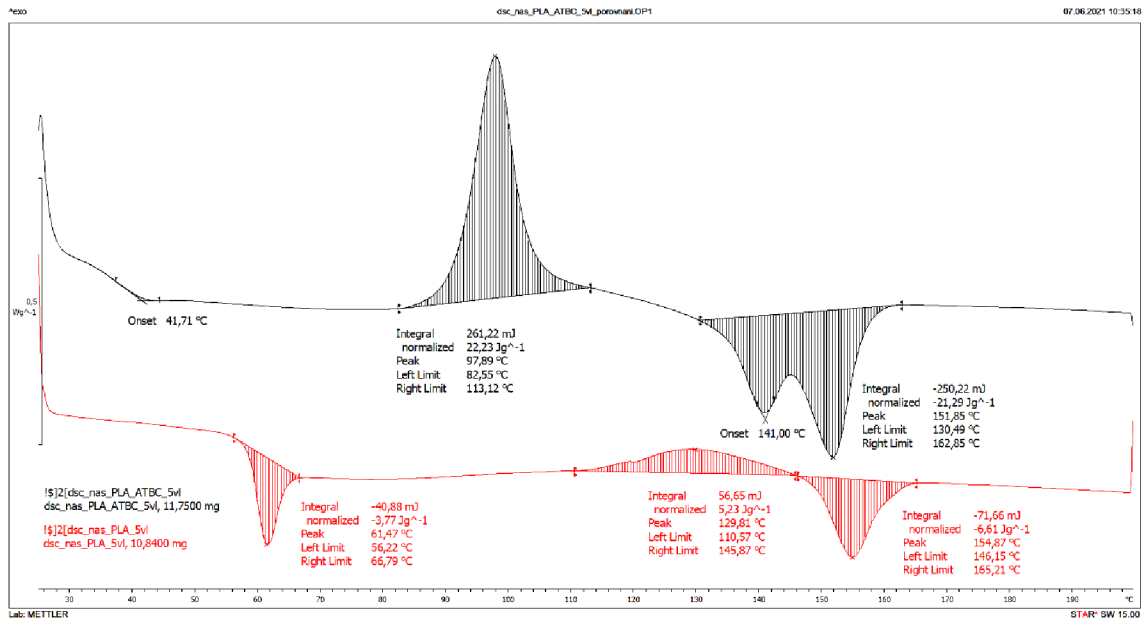


Obrázek č. 3.3.7 DSC termogramy vzorků PLA a PLA/10ATBC

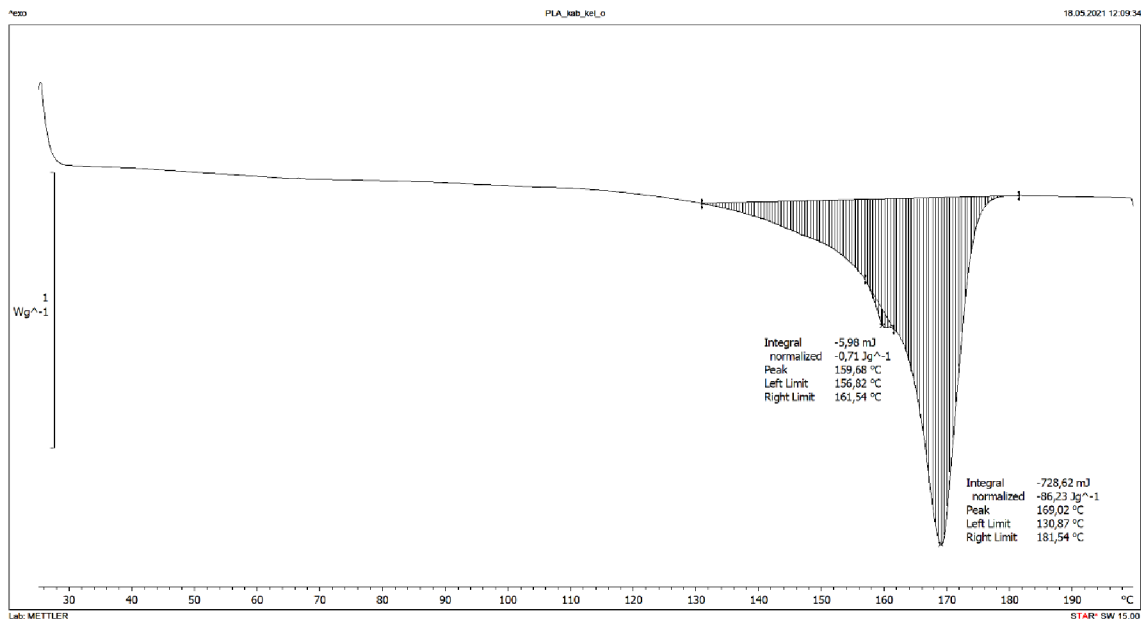




Obrázek č. 3.3.8 DSC termogramy vzorků PLA/5BA a PLA/10ATBC/5BA



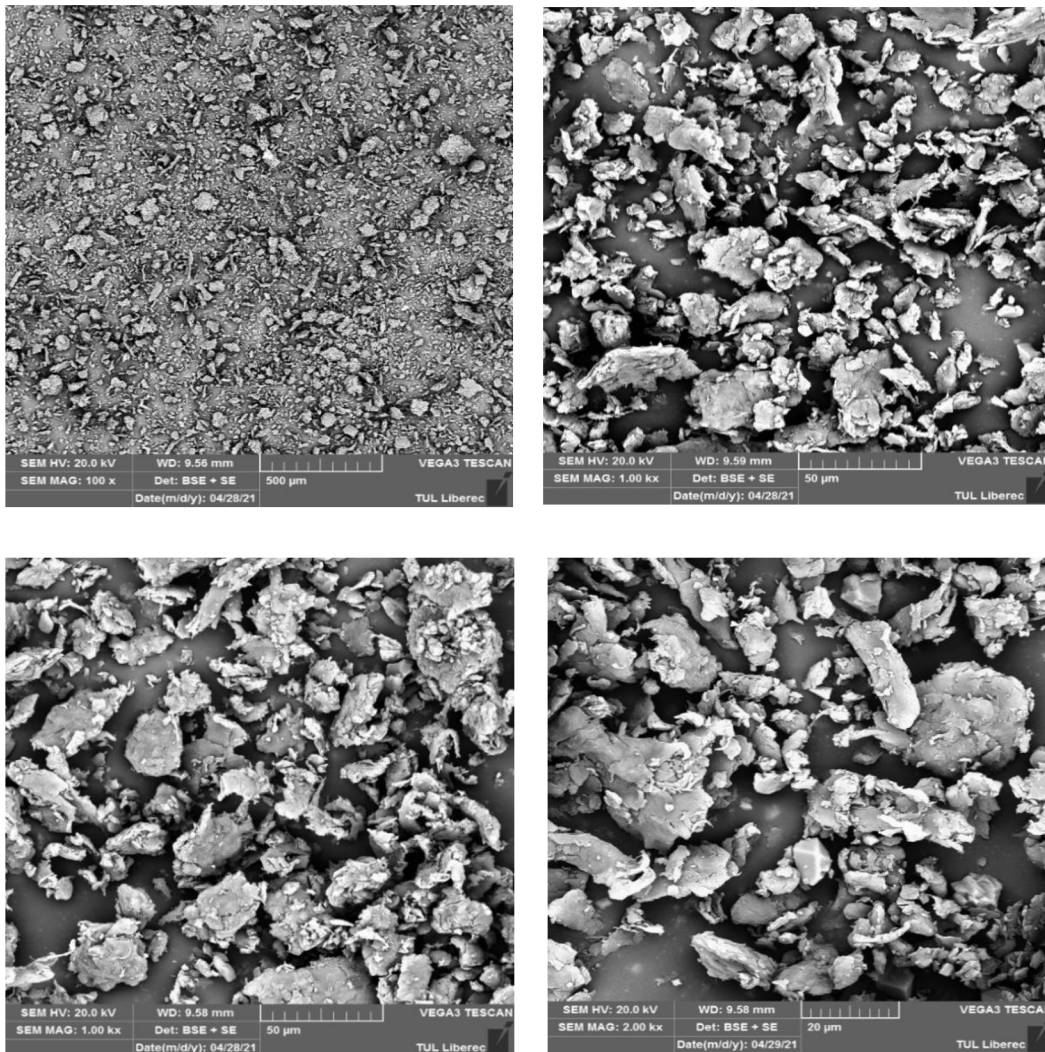
Obrázek č. 3.3.9 DSC termogramy vzorků PLA/5VL a PLA/10ATBC/5VL



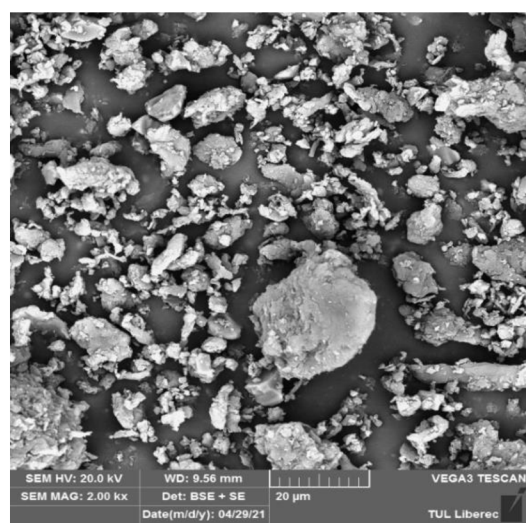
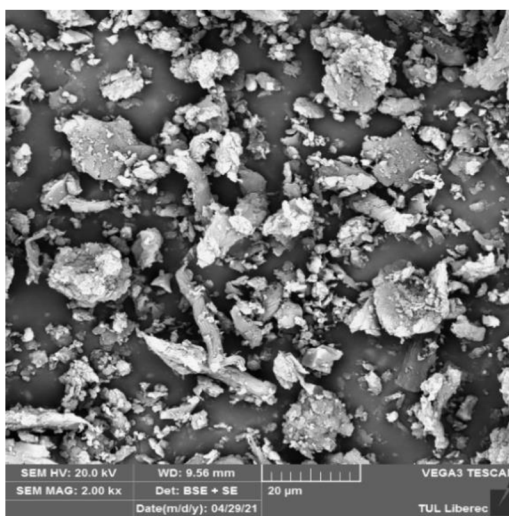
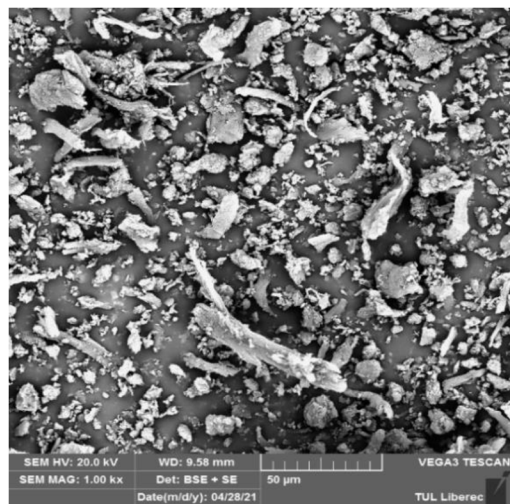
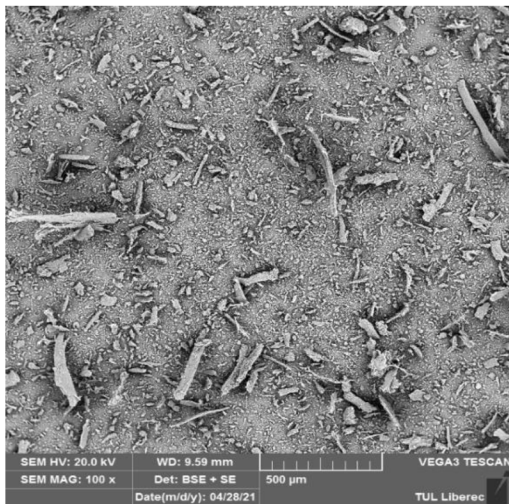
Obrázek č. 3.3.10 Kelímek od piva (kávový kelímek je ze stejného materiálu)

### 3.3.4 SEM analýza mletých vláken

Pro výzkum dokumentaci účinnosti mletí byla použita metoda elektronové mikroskopie (SEM). SEM analýza umožnilo zkoumat prvky struktury, které jsou mimo hranice viditelnosti optického mikroskopu. Na obrázcích 3.3.11-3.3.12 jsou SEM snímky částic vláken po mletí.



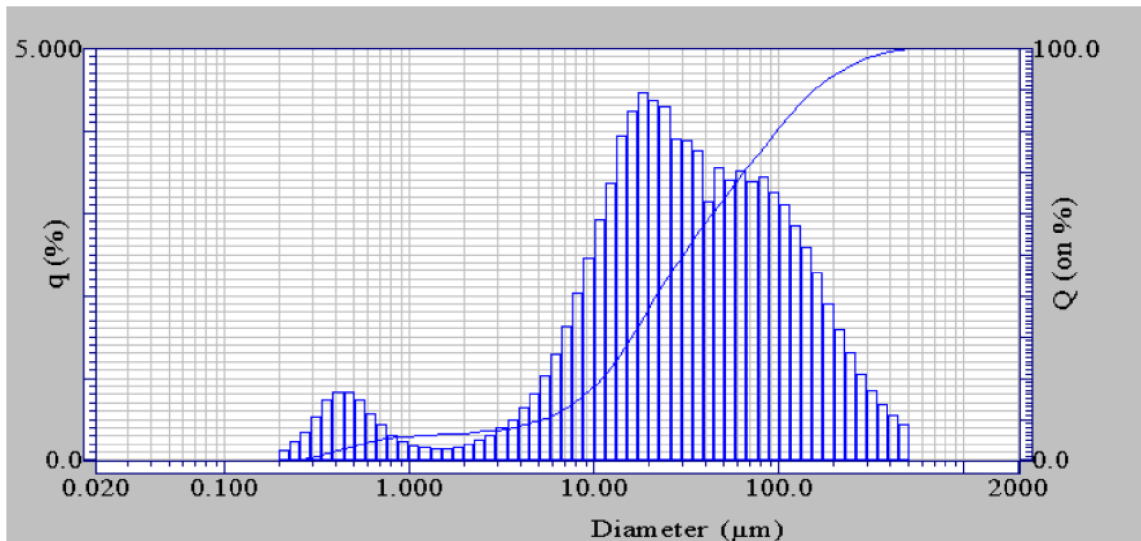
Obrázek č. 3.3.11 SEM snímky bavlněných vláken po mletí



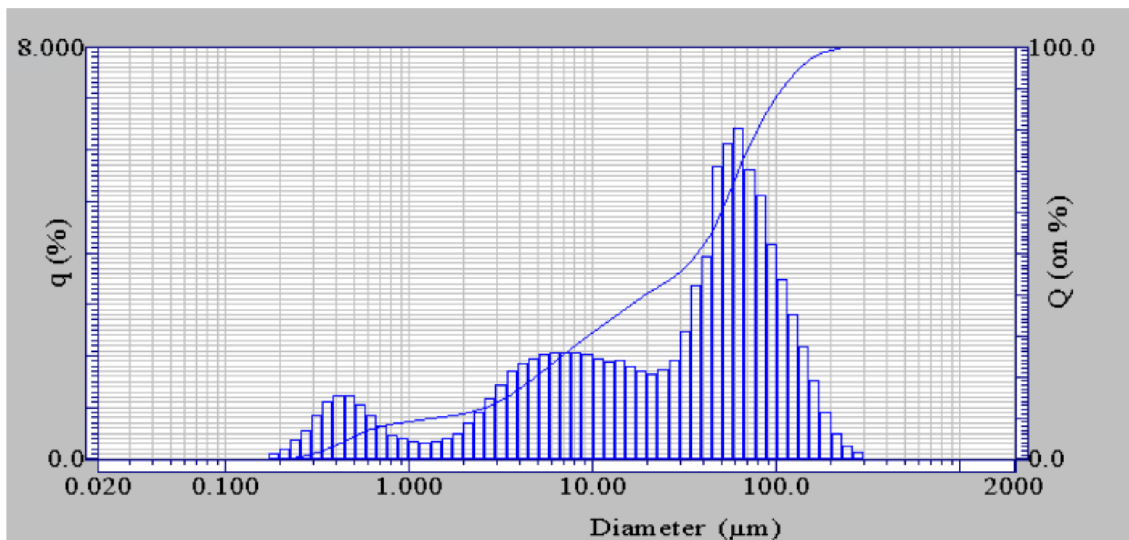
Obrázek č. 3.3.12 SEM snímky vlněných vláken po mletí

### 3.3.5 Měření velikosti částic mletého vlákna

Měření velikosti částic bylo prováděno pomocí přístroje „HORIBA LA-920“. Pro zlepšení přesnosti měření bylo provedeno 3 krát .



Obrázek č. 3.3.13 Graf naměřených průměrů bavlněných částic po mletí



Obrázek č. 3.3.14 Graf naměřených průměrů vlněných částic po mletí

Tabulka č. 3.3.6 Statistické vypočítané hodnoty vzorků, měření pomocí přístroje „HORIBA LA-920“

	Průměr [μm]	směr. odch. [μm]	var. koef. [%]
Bavlna1	61.8	78.8	127.5
Bavlna2	57.6	65.8	114.2
Bavlna3	46.5	73.2	157.5
Vlna1	46.4	45.9	99.1
Vlna2	22.4	38.1	169.9
Vlna3	22.1	35.8	161.9

Je vidět, že částice bavlny a vlny získané stejnou metodou se významně liší ve formě a velikosti.

Toto měření je pouze orientační, neboť měřicí přístroj Horiba LA-920 pracuje na principu, že částice jsou kulového tvaru a je měřen největší rozměr, z kterého vypočítá velikost.

## 4 Diskuze

Tímto se ukazuje, že metoda extruze je univerzální způsob, jak získat kompozit z více různorodých komponent. Zajišťuje jejich rovnoměrné rozložení v objemu materiálu a vysokou úroveň interakce na fázové rozhraní. Toho je dosaženo aktivací a mikrostrukturou původních práškových složek. Při mícháním těch částic zvyšuje biodegradabilitu kompozitů.

Jedním z důležitých úkolů při vývoji těchto polymerních kompozitních materiálů je zachování mechanických vlastností kompozitu s cílem zvýšení možnosti jeho rozložení. Pevnost vyvíjeného kompozitu na bázi PLA závisí na geometrickém tvaru částic výztuže/výplně (práškové, vláknité) a jejich koncentraci nejvýše 5 % hmoty, při vyšší koncentraci dochází k porušení celistvosti vyráběné fólie.

V bakalářské práci byly měřeny vlastnosti 6 fólií - pevnost v tahu a modul pružnosti v tahu, ohybová tuhost a termické vlastnosti.

## 4.1 Mechanické vlastnosti

- **Matrice bez plniva**

Největší naměřené hodnoty byly u matrice bez plniva. Přidáním 10 % změkčovadla do PLA se snížila pevnost v tahu o 16,6 %. Nejvyššího modulu pružnosti v tahu bylo dosaženo u PLA/10ATBC o 10,8% více než PLA.

- **Kompozity vyztužené přírodními vlákny**

U kompozitu vyztuženého bavlnou (PLA/5co) byla pevnost v tahu nižší oproti PLA o 48 %. U složení PLA/10ATBC/5co bylo dosaženo hodnoty o 66,6 % min než PLA. Zde bylo dosaženo nejnižší hodnoty pevnosti v tahu ze všech vyrobených folií. Kompozit PLA/10ATBC/5co dosáhl o 18 % min než PLA/5co.

V případě kompozitů vyztuženími vlnou se hodnoty pevnosti v tahu mezi jednotlivými složeními liší jen o několik procent. Modul pružnosti v tahu doplněním změkčovadla naopak dosáhl větší hodnoty než PLA/5wo. viz tabulka č. 4.1.1

Tabulka č. 4.1.1 Porovnávání naměřených hodnot

PLA/5wo	o 53,2 % [N] nižší než čistý matrice
PLA/10ATBC/5wo	o 55,6 % [N] nižší než čistý matrice
PLA/5wo	o 52,8 % [MPa] nižší než čistý matrice
PLA/10ATBC/5wo	o 24,8 % [MPa] nižší než čistý matrice

## 4.2 Tepelné vlastnosti

V této části experimentu je ukázána závislost kompozitních materiálů na teplotě. Hlavním cílem tohoto experimentu bylo stanovení teploty skelného přechodu ( $T_g$ ), teploty tání ( $T_m$ ) a teploty krystalizace ( $T_{cc}$ ) vyrobených kompozitních materiálů.

Získané výsledky tepelných vlastností byly vyhodnoceny pomocí programu Paris software, rychlost ohřevu byla vždy 10 [°C/min].

V tabulce č. 4.2.1 jsou uvedené získané charakteristické hodnoty.

Tabulka č. 4.2.1 Výsledky DSC analýzy

	$T_g$ [°C]	$T_{cc}$ [°C]	$T_m$ [°C]	$\Delta H$ [J.g <sup>-1</sup> ]
PLA	59,6 68,1	129,9	154,7	4,2
PLA/10ATBC	46,7 65,37	102,7	143,47 152,32	23,6
PLA/5co	61,9	130,4	155,3	4,1
PLA/5wo	61,5	129,8	154,9	6,6
PLA/10ATBC/5co	61,85	130,37	155,29	19,7
PLA/10ATBC/5wo	61,47	129,81	154,87	21,3
Kelímky	-	159,68	169,02	86,0

Vzorky bez změkčovadla krystalizovaly výrazně méně, jak lze odvodit od změny entalpie  $\Delta H$  [J.g<sup>-1</sup>], která je přímo úměrná schopnosti materiálu krystalizovat (viz tabulka 4.2.1). Změkčovadlo v obsahu kompozitu dále snižovalo teplotu zesklnění a také snižuje teplotu tání.



## 5 Závěr

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku tvorby konstrukčních vyztužených biodegradabilní polymerů s výztuží z přírodních vláken z hlediska změny mechanických a tepelných vlastností.

Detailní studium mechanických, tepelných a fyzikálně-chemických vlastností kompozitů a také schopnost absorpce vody má za cíl vytvářet vyztužené kompozice s potřebným komplexem požadovaných vlastností.

Zvláštností kompozitů vyztužených přírodními vlákny je slabá interakce mezi hydrofilním vláknem a hydrofobní matricí. Mechanické vlastnosti kompozitů mohou být zvýšeny úpravou obsahu komponenty, která zajišťuje pevnost materiálu. Pro zvýšení interakce mezi vláknem a matricí se často provádí fyzikální a chemické modifikaci povrchu vláken, v této práci však nebyl povrch výztuže (výplně) z přírodních vláken nijak upravován.

Vlastnosti rostlinných vláken jsou v obecném případě závislé na druhu rostliny, stupni zrání, geografickém umístění, či na počasí. Na rozdíl od chemických vláken vlastnosti přírodních vláken nelze změnit, takže se v každém jednotlivém případě charakteristiky jimi vyztužených kompozitů mohou lišit. Tato skutečnost může být zanedbatelná v případě, jedná-li se spíše o částice než o vlákna, jejichž hlavní funkcí je spíše výplň než výztuž.

Vlákna získaná ze surovin živočišného původu jako je vlna, jsou druhým typem přírodních vláken používaných k vyztužení kompozitů. Chemické složení, mechanické a tepelné vlastnosti živočišných vláken, podobně jako rostlinných vláken, hrají zásadní roli při jejich použití jako výztužné či výplňové složky.

Provedené testy ukázaly, že velká část mechanických ukazatelů je zajištěna prostřednictvím matrice s příměsí vlákenných částic, přičemž se mechanické ukazatele mění nejednoznačně, v závislosti na obsahu změkčovadla.

Z výsledků trhací zkoušky vyplývá, že se přidáním vyztužujících plniv významně mění (snižuje) mechanické vlastnosti, což ovlivní výslednou biodegradabilitu kompozitů. Přidáním změkčovadel se ještě více snižuje pevnost i tažnost v tahu, což má vliv na snadnější degradaci kompozitů. Avšak určitá míra pevnosti a tažnosti zůstává zachována,

a je tedy možné výslednou kompozitní strukturu použít na výrobu funkčních výrobků, u kterých je ale předpoklad zvýšené biodegradability.

Rostlinná a živočišná vlákna se stále více používají při výrobě kompozitních materiálů pro různé účely a tvorba kompozitů pro různé cíle, s různými obsahy vyžaduje hodně času, mnoho otázek, včetně například mezifázové interakce, která není v této práci vyřešena. Zvýšení podílu přírodních vláken v celkovém objemu vláken používaných k vyztužení plastů přispívá k řešení aktuálních problémů životního prostředí, je tedy nutné dále pokračovat ve zkoumání a vytváření nových kompozitních materiálů s využitím přírodních vláken rostlinného a živočišného původu.

Je zřejmé, že se využívání přírodních vláken díky jejich přirozenému původu (jedná se o obnovitelný zdroj) a ekonomické dostupnosti bude neustále rozšiřovat. V současné době jsou kompozity vyztužené vlákny přírodního původu úspěšně používány v automobilovém a leteckém průmyslu, při stavbě lodí a při vytváření konstrukčních materiálů.

## Seznam obrázků

<i>Obrázek č. 2.1.1 - Schéma obecného kompozitního materiálu</i>	11
<i>Obrázek č. 2.1.2 - Klasické rozdělení kompozitních systémů</i>	12
<i>Obrázek č. 2.1.3 - Termoplasty</i>	13
<i>Obrázek č. 2.1.4 - Kompozitní materiály v letadle MS-21</i>	14
<i>Obrázek č. 2.2.1 - Struktura kompozitů různého typu</i>	15
<i>Obrázek č. 2.3.1 - Schématické rozdělení přírodních vláken podle původu</i>	20
<i>Obrázek č. 2.4.1 - Hlavní typy šneků</i>	33
<i>Obrázek č. 3.1.1 - Stroj ultraodstředivý mlýn ZM 200</i>	36
<i>Obrázek č. 3.1.2 - Stroj PULVERISETTE 7 premium line</i>	37
<i>Obrázek č. 3.2.1 - Stroj Xplore</i>	40
<i>Obrázek č. 3.3.1 - Trhací stroj</i>	42
<i>Obrázek č. 3.3.2 - Srovnání hodnot pevnosti jednotlivých vzorků</i>	44
<i>Obrázek č. 3.3.3 - Srovnání hodnot modulu pružnosti jednotlivých vzorků</i>	44
<i>Obrázek č. 3.3.4 - Tahové křivky vzorku PLA</i>	45
<i>Obrázek č. 3.3.5 - Přístroj pro testování tuhosti materiálů</i>	45
<i>Obrázek č. 3.3.6 - DSC 3+ (diferenciální skenovací kalorimetrie) pro měření tepelné charakteristiky materiálů</i>	48
<i>Obrázek č. 3.3.7 - DSC termogramy vzorků PLA a PLA/10ATBC</i>	49
<i>Obrázek č. 3.3.8 - DSC termogramy vzorků PLA/5BA a PLA/10ATBC/5BA</i>	50
<i>Obrázek č. 3.3.9 - DSC termogramy vzorků PLA/5VL a PLA/10ATBC/5VL</i>	50
<i>Obrázek č. 3.3.10 - Kelímek od piva (kávový kelímek je ze stejného materiálu)</i>	51
<i>Obrázek č. 3.3.11 - SEM snímky bavlněných vláken po mletí</i>	52
<i>Obrázek č. 3.3.12 - SEM snímky vlněných vláken po mletí</i>	53
<i>Obrázek č. 3.3.13 - Graf naměřených průměrů bavlněných částic po mletí</i>	54
<i>Obrázek č. 3.3.14 - Graf naměřených průměrů vlněných částic po mletí</i>	54

## Seznam tabulek

<i>Tabulka č. 2.1.1 - Termoreaktivní polymery [5]</i>	13
<i>Tabulka č. 2.3.1 - Mechanické vlastnosti a absorpce vlhkosti přírodních vláken různého původu [26]</i>	22
<i>Tabulka č. 2.3.2 - Vliv mísící činidel na mechanické vlastnosti kompozic vyztužených přírodními vlákny [27]</i>	25
<i>Tabulka č. 2.3.3 - Chemické složení a fyzikální vlastnosti rostlinných vláken. [37]</i>	30
<i>Tabulka č. 2.3.4 - Vlastnosti hedvábí [45]</i>	31
<i>Tabulka č. 2.3.5 - Mechanické vlastnosti hedvábí, různých polymerů a oceli [45]</i>	32
<i>Tabulka č. 3.1.1 - Provozní charakteristika</i>	37
<i>Tabulka č. 3.2.1 - Použité parametry stroje Xplore</i>	40
<i>Tabulka č. 3.3.1 - Statistické vypočítané hodnoty síly</i>	43
<i>Tabulka č. 3.3.2 - Statistické vypočítané hodnoty modulu pružnosti E [MPa]</i>	43
<i>Tabulka č. 3.3.3 - Průměrné výsledky testů vzorků na tuhosti</i>	45
<i>Tabulka č. 3.3.4 - Výpočty ohybového momentu</i>	47
<i>Tabulka č. 3.3.5 - Zjištěné průměrové parametry vzorků</i>	47
<i>Tabulka č. 3.3.6 - Statistické vypočítané hodnoty vzorků, měření pomocí přístroje „HORIBA LA-920“</i>	55
<i>Tabulka č. 4.1.1 - Porovnávání naměřených hodnot</i>	56
<i>Tabulka č. 4.2.1 - Výsledky DSC analýzy</i>	57

## Použitá literatura

- [1] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály. 1. vyd. Praha: SNTL, 1988.*
- [2] *Typy a vlastnosti kompozitních materiálů.* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: [https://studref.com/507509/dokumentovedenie/kompozitsionnye\\_materialy](https://studref.com/507509/dokumentovedenie/kompozitsionnye_materialy)
- [3] AGARWAL, B., BROUTMAN, L. *Vláknové kompozity. 1. vyd. Praha: SNTL, 1987.*
- [4] MILOŠ, S. *Termoplasty v praxi: praktická příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů. Základní dílo včetně 3. aktualizace - aktuální stav: červenec 2000 Základní dílo včetně 3. aktualizace - aktuální stav: červenec 2000.* Praha: Dashöfer, 1999. ISBN 978-80-86229-15-7.
- [5] *Plasty.* [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/9565b362-b515-18b650141a2f66b0674e/1004368A.htm>
- [6] PLASTIC TECHNOLOGIES. *Úvod do technologie zpracování polymerů. Část 2.* [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://ptl.by/index.pl?act=PRODUCT&id=17>
- [7] BONDALETOVA, L., BONDALETOV, V. Tomsk Polytechnic University. *Polymerní kompozitní materiály.* [online]. [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: [https://portal.tpu.ru/SHARED/b/BONDLI/stud\\_work/p\\_k\\_m\\_m/Tab1/Posobie\\_PC\\_M.pdf](https://portal.tpu.ru/SHARED/b/BONDLI/stud_work/p_k_m_m/Tab1/Posobie_PC_M.pdf)
- [8] Letadlo MS – 21 [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: [http://olymp.asclub.ru/publ/arkhiv\\_rabot/chetyrnadcataja\\_olimpiada\\_2016\\_17\\_uch\\_god/kak\\_i\\_gde\\_pojavilis\\_kompozitnye\\_materialy\\_i\\_gde\\_oni\\_ispolzujutsja\\_sejchas\\_kakov\\_y\\_ikh\\_perspektivy\\_primenenija/37-1-0-1993](http://olymp.asclub.ru/publ/arkhiv_rabot/chetyrnadcataja_olimpiada_2016_17_uch_god/kak_i_gde_pojavilis_kompozitnye_materialy_i_gde_oni_ispolzujutsja_sejchas_kakov_y_ikh_perspektivy_primenenija/37-1-0-1993)
- [9] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 978-80-214-2443-2.
- [10] RICHARD, M. *Mechanics of Composite Materials.* Newburyport: Dover Publications, 2012. ISBN 978-0-486-13666-0.
- [11] BELOVA, N. *Kompozitní materiály na bázi uhlíkových vláken.* [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://moluch.ru/archive/104/23577/>

- [12] BERLIN, Al. *Modern polymer composite materials* [online]. [cit. 2020-12-27]. Dostupné z: <https://ilib.cz/book/801377/66bd06?regionChanged=&redirect=235918004>
- [13] ROESLER, I., HARDERE, X., BECKER, M. *Mechanical behavior of structural materials*. 2011. ISBN 978-5-91559-081-5.
- [14] WILLIAM, D., CALLISTER, Jr. *Materials science and engineering: an introduction*. 2000. ISBN 978-0-471-32013-5.
- [15] KLEMENTINA, K., ISAYEV, A., SADHAN K. *Rubber recycling*. 2005. ISBN 978-0-8493-1527-5.
- [16] BERLIN, Al., ROGOVINA, S., ZAIKOV, G. *Additives in Polymers: Analysis and Applications*. 2016. ISBN 1-4987-2859-6.
- [17] SCHEIRS, J., KAMINSKY, W. *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics: converting waste plastics into diesel and other fuels* 2006. ISBN 978-0-470-02154-5.
- [18] BASU, P. *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Burlington, MA: Academic Press 2010. ISBN 978-0-12-374988-8.
- [19] SCHEIRS, J. *Polymer recycling: science, technology, and applications*. 1998. ISBN 978-0-471-97054-5.
- [20] Encyklopedie strojírenství XXL. *Termoreaktivní Vlastnosti*. [online]. [cit. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://mash-xxl.info/info/61377/>
- [21] ROGOVINA, S. *Biodegradable Polymer Composites Based on Synthetic and Natural Polymers of Various Classes*. 2006 [online]. [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1811238216010100.pdf>
- [22] KLINKOV, S., BELYAEV, S., SKURATOV, K., SOKOLOV, V., ODNOLKO, G. *Recyklace a sekundární recyklace obalů polymerních materiálu* [online]. [cit. 2020-12-01]. Dostupné z: <https://tstu.ru/book/elib/pdf/2010/klinkov-a.pdf>

- [23] ROGOVINA, S., ALEKSANYAN, K., VLADIMIROV, L., PRUT, E., IVANUSHKINA, N., BERLIN, A. *Development of Novel Biodegradable Polysaccharide-Based Composites and Investigation of Their Structure and Properties*. 2018. [online]. [cit. 2021-01-09]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10924-017-1069-3>
- [24] IORDANSKII, L., BYCHKOVA V., SOROKINA, N., KOVARSKII, L., KOSENKO Y., MARKIN, S., GUMARGALIEVA, Z., ROGOVINA S., BERLIN, A. *Magnetically anisotropic biodegradable composites based on poly(3-hydroxybutyrate) and chitosan for controlled drug release*. *Physical Chemistry*. [online]. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S001250161407001X.pdf>
- [25] KALIA, S., INDERJEETK. *Cellulose fibers: bio- and nano-polymer composites: green chemistry and technology*. Heidelberg: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-17369-1.
- [26] ŠVÉDOVÁ, J., *Technické textilie: příručka pro odborníky z textilního průmyslu a všech průmyslových a výrobních odvětví, která používají nebo budou používat technické textilie*. 1978.
- [27] KIN-TAK LAU, A., PUI YAN HUNG, A. *Natural Fiber-Reinforced Biodegradable and Bioresorbable Polymer Composites*: ISBN: 978-0-08-100669-6.
- [28] Harriette, L. *The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials*. Wageningen University & Research. [online]. [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/40121302\\_The\\_potential\\_of\\_flax\\_fibres\\_as\\_reinforcement\\_for\\_composite\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/40121302_The_potential_of_flax_fibres_as_reinforcement_for_composite_materials)
- [29] DONETSKIY, K., KHRULKOV, A. *Application of natural fibers for manufacturing of polymer composite materials*. [online]. [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=779](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=779)
- [30] VROMAN, I., TIGHZERT, L. *Biodegradable Polymers Materials*. 2009, 2, 307-344. [online]. [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1944/2/2/307>
- [31] CHANDRA, R., RUSTGI, R. *Biodegradable polymers. Progress in Polymer Science*. 1998. [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670097000397>

- [32] MOHANTY, A., MISRA, M., DRZAL, L. *Sustainable Bio-Composites from Renewable Resources: Opportunities and Challenges in the Green Materials World*. Journal of Polymers and the Environment. 2002. [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1021013921916>
- [33] Navin. CH., Mohammed, F. *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites*: ISBN: 978-0-08-100669-6
- [34] MISHRA, S., MISRA, M., TRIPATHY, S., NAYAK, K., MOHANTY, K. *Potentiality of Pineapple Leaf Fibre as Reinforcement in PALF-Polyester Composite: Surface Modification and Mechanical Performance*. Journal Of Reinforced Plastics And Composites. 2000. [online]. [cit. 2020-11-25]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/action/doSearch?filterOption=thisJournal&SeriesKey=&SeriesKey=jrpa&AllField=Mishra+S.%2C+Misra+M.%2C+Tripathy+S.S.%2C+Nayak+S.K.%2C+Mohanty+A.K>
- [35] KURUVILLA, J., ROMILDO, D. *A review on sisal fibre reinforced polymer composites*. [online]. [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/237842659\\_A\\_review\\_on\\_sisal\\_fibre\\_reinforced\\_polymer\\_composites](https://www.researchgate.net/publication/237842659_A_review_on_sisal_fibre_reinforced_polymer_composites)
- [36] POWERS, W. *Automotive materials in the 21st Century*. 2000. [online]. [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/285685895\\_Automotive\\_materials\\_in\\_the\\_21st\\_century](https://www.researchgate.net/publication/285685895_Automotive_materials_in_the_21st_century)
- [37] MILITKÝ, J., *Textilní vlákna: Klasická a speciální*. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [38] MULINARI, D., CARVALHO, K., VOORWALD, H., CIOFFI, M., *Chemical modification effect on the mechanical properties of hips/ coconut fiber composites*. [online]. [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/CHEMICAL-MODIFICATION-EFFECT-ON-THEMECHANICALOFCarvalhoMulinari/4bf5d35e764bdeb44f18f5e255a0b0c0a33914c9>



- [39] KOZŁOWSKI, R., MACKIEWICZ-TALARCZYK, M. *Handbook of Natural Fibres*. ISBN 978-01-2820-666-9.
- [40] IBRAHIM, M., MONDA, H. *Fundamentals of Natural Fibres and Textiles*. ISBN 978-01-2821-484-8.
- [41] SALAM, S., MOHAMMAD, F. *Sustainable Natural Fibres from Animals, Plants and Agroindustrial Wastes—An Overview*. [online]. [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/301591175\\_Sustainable\\_Natural\\_Fibres\\_from\\_Animals\\_Plants\\_and\\_Agroindustrial\\_Wastes-An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/301591175_Sustainable_Natural_Fibres_from_Animals_Plants_and_Agroindustrial_Wastes-An_Overview)
- [42] MOKREJS, P., KREJCI, O., SVOBODA, P., VASEK, V. *Modeling technological conditions for breakdown of waste sheep wool*. 2011.
- [43] ALTMAN, G., FRANK, D., JAKUBA, C., CALABRO, T., HORAN, R., CHEN, J., LU, H., RICHMOND, J., KAPLAN, D. *Silk-based biomaterials*. [online]. [cit. 2021-04-11]. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/aesr.202100035>
- [44] RAJKUMAR, G., SRINIVASAN, J., SUVITHA, L. *Development of novel silk/wool hybrid fibre polypropylene composites*. Iranian Polymer Journal. 2013.
- [45] PHILIP, M., STEPHEN, A., MARGARET, A., AUERBACH, W., SONG, L., KAPLAN, W., ADAMS, W., RONALD, K., MAHONEY, D., DEBORAH, L. *Mechanical and thermal properties of dragline silk from the spider. Nephila clavipes*. 2006. [online]. [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://ur.booksc.eu/book/5370982/f6b2ce>
- [46] Volodin, V. *Extrusion of plastic pipes and profiles*. 2010. ISBN:978-5-91844-002-3.
- [47] *Description of the plastic extrusion method*. 2006. [online]. [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://polyplastic.ua/news/news-101.html>
- [48] LUBOŠ BĚHÁLEK. JIŘÍ HABR. *Moderní plasty a vláknové kompozity. Díl 1. Vstříkování plastů: materiály a technologie*. nedatováno. ISBN 978-80-749404580-1.

**Seznam příloh**

Příloha 1: Hodnoty tahové zkoušky

Příloha 2: SEM analýza bavlny a vlny

Příloha 3: Snímky výsledků měření z přístroje „HORIBA LA-920“

**Příloha č. 1: Hodnoty tahové zkoušky.***Tabulka č. 1.1 Naměřené a vypočítané hodnoty vzorku PLA*

n	$F$ [N]	$E_t$ [MPa]
1	267,75	2066,17
2	268,71	1372,66
3	329,82	1231,10
4	233,55	1934,58
5	204,14	615,67
6	268,54	1183,59
7	227,06	1812,66
8	233,17	2307,50
9	217,50	1129,87
10	209,50	1085,55
11	209,73	1184,83
12	193,75	920,46
13	229,55	794,09
14	189,84	1653,31
15	266,34	1999,57
průměr	236,5	1419
směr. odch.	37,5	510,4
var. koef. [%]	15,9	35,9
95% IS	215,8÷257,2	1399,5÷1439,2

Tabulka č. 1.2 Naměřené a vypočítané hodnoty vzorku PLA/10ATBC

n	$F$ [N]	$E_t$ [MPa]
1	206,3	1894,25
2	173,71	1962,74
3	208,19	1720,84
4	192,88	1305,24
5	219,17	1153,21
6	212,93	1893,55
7	212,37	1497,75
8	179,61	737,91
9	186,58	1487,8
10	204,94	1516,91
11	201,03	1508,7
12	216,67	2046,17
13	203,53	1833,09
14	214,42	1893,18
15	210,21	1128,89
průměr	202,8	1572
směr. odch.	13	372
var. koef. [%]	6,4	24
95% IS	195,6÷209,9	1366,4÷1777,5

Tabulka č. 1.3 Naměřené a vypočítané hodnoty vzorku PLA/5co

n	$F$ [N]	$E_t$ [MPa]
1	114,45	1494
2	131,75	1500
3	139,74	1659
4	104,53	1590
5	123,57	1449
6	136,56	1452
7	136,24	891
8	121,49	807
9	122,98	1160
10	133,50	1531
11	141,07	965
12	115,31	923
13	99,21	1202
14	111,03	1126
15	119,70	888
průměr	123,41	1242
směr. odch.	12,95	296
var. koef. [%]	10,49	24
95% IS	130,5 ÷ 116,2	1407 ÷ 1079

Tabulka č. 1.4. Naměřené a vypočítané hodnoty vzorku PLA/5wo

n	$F$ [N]	$E_t$ [MPa]
1	103,86	689,22
2	119,98	1205,61
3	91,11	501,18
4	96,64	843,78
5	123,36	836,23
6	110,20	945,86
7	106,28	820,56
8	119,06	791,71
9	111,05	797,15
10	101,80	982,60
11	117,94	709,12
12	104,11	483,36
13	123,66	469,67
14	123,08	530,10
15	106,88	645,75
průměr	110,6	750
směr. odch.	10,26	207
var. koef. [%]	9,28	27
95% IS	116,27 ÷ 105	865 ÷ 636

Tabulka č. 1.5. Naměřené a vypočítané hodnoty vzorku PLA/10ATBC/5co

n	$F$ [N]	$E_t$ [MPa]
1	84,60	512,35
2	86,08	705,77
3	76,66	646,72
4	79,67	1049,38
5	93,31	1091,36
6	82,61	1206,56
7	75,93	1297,84
8	84,32	1096,77
9	71,65	599,13
10	64,61	681,29
11	88,10	911,73
12	72,82	986,96
13	76,34	1046,00
14	78,67	1513,65
15	71,44	1882,69
průměr	79,12	1015
směr. odch.	7,51	370
var. koef. [%]	9,5	36
95% IS	83,27 ÷ 75	1219 ÷ 811

Tabulka č. 1.6 Naměřené a vypočítané hodnoty vzorku PLA/10ATBC/5wo

n	$F$ [N]	$Et$ [MPa]
1	99,65	1039,58
2	113,96	593,45
3	96,85	738,31
4	105,47	433,18
5	104,97	887,19
6	114,44	1272,55
7	103,54	1109,39
8	100,56	1592,46
9	102,68	991,68
10	103,74	1300,89
11	112,76	1467,28
12	100,41	1027,73
13	108,48	1455,65
14	105,33	1414,26
15	102,45	666,18
průměr	105,02	1066
směr. odch.	5,3	353
var. koef. [%]	5,05	33
95% IS	107,95 ÷ 102,1	1261 ÷ 871

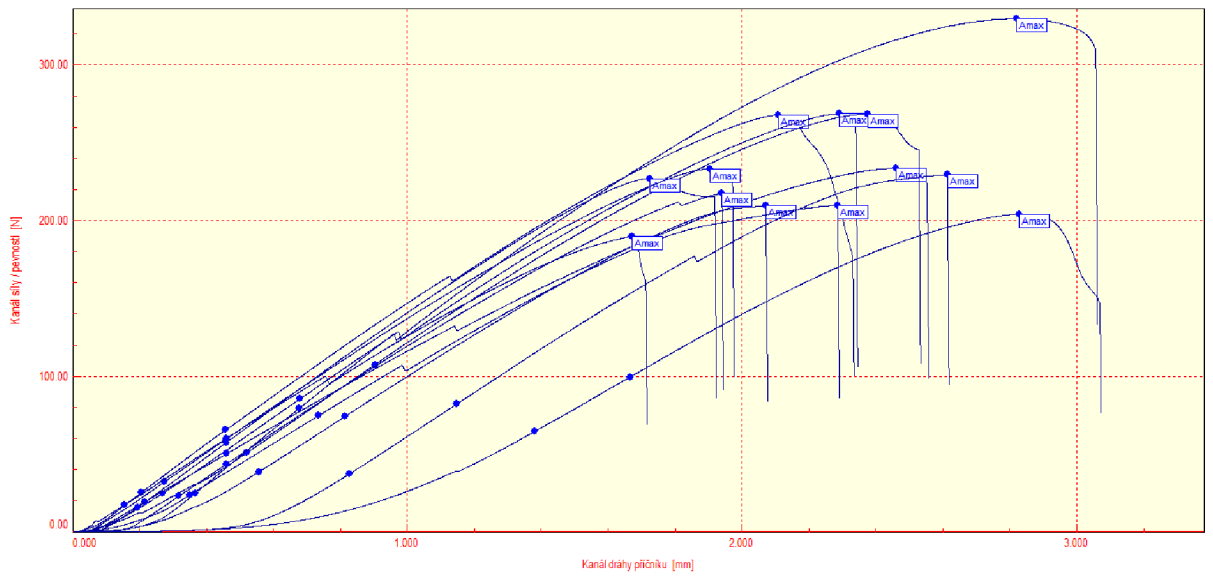


Tabulka č. 1.7 Naměřené a vypočítané hodnoty vzorku kelímků od piva

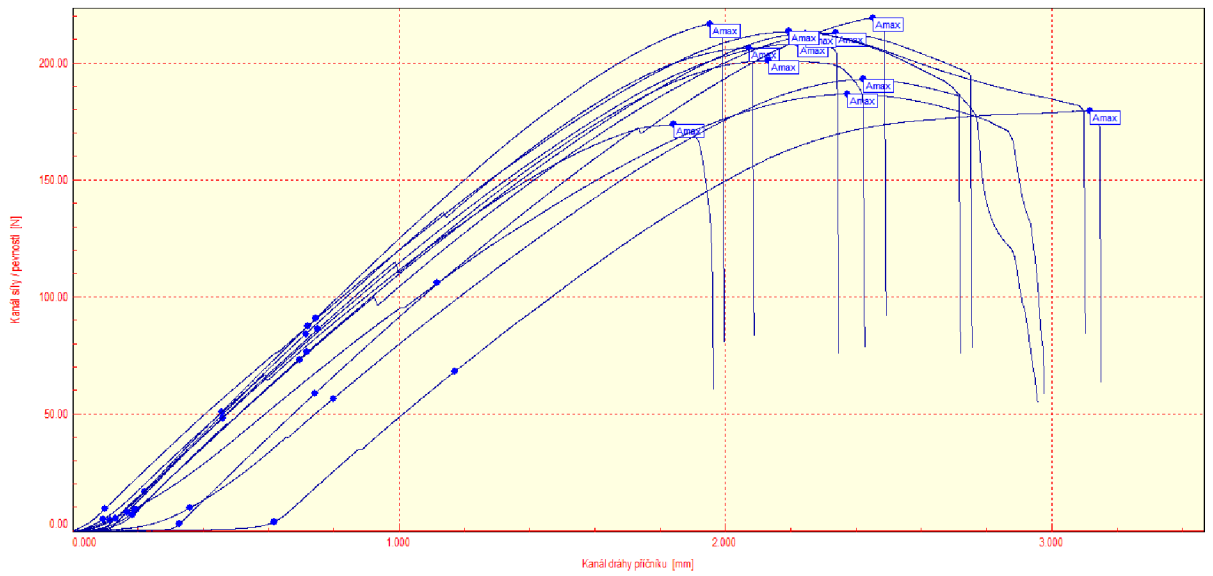
n	$F$ [N]	$E_t$ [MPa]
1	283,5	671,25
2	267,45	2312,47
3	249,34	1150,65
4	272,4	1195,33
5	275,76	1229,97
6	311,06	1065,66
7	302,09	1198,24
8	276,29	1193,37
9	307,45	1369,46
10	288,07	1301,16
11	281,75	1192,13
12	294,96	1071,01
13	285,3	999,21
14	247	1113,56
15	292,54	1068,13
průměr	282,3	1209
směr. odch.	18,7	344
var. koef. [%]	6,6	28
95% IS	271,9÷292,6	1018,9÷1399

Tabulka č. 1.8 Naměřené a vypočítané hodnoty vzorku kelímků od kávy

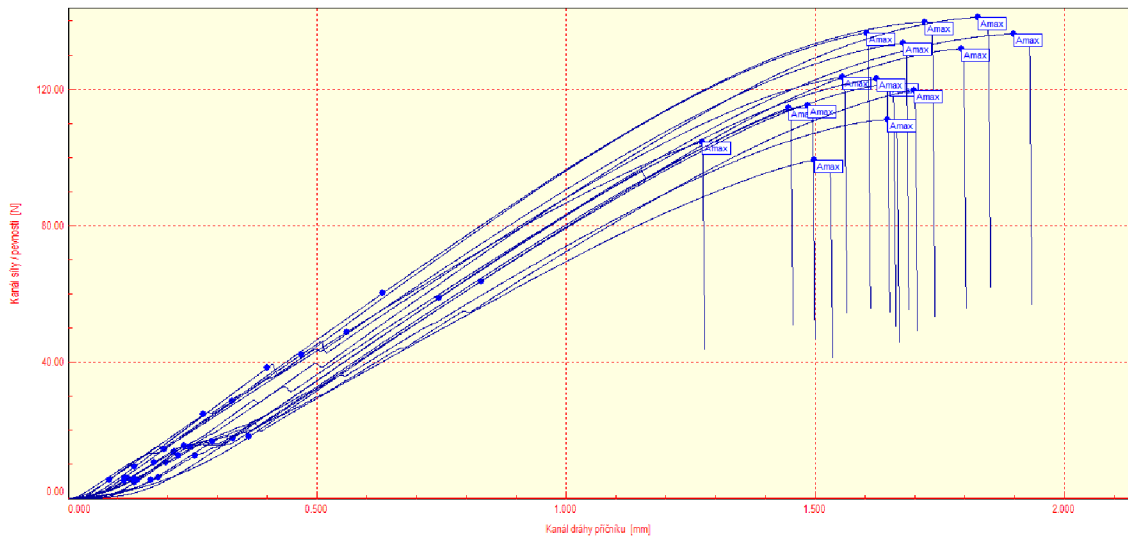
n	$F$ [N]	$E_t$ [MPa]
1	95,96	88,41
2	90,2	12,27
3	86,4	133,46
4	101,29	41,93
5	96,76	117,3
6	86,15	267,48
7	89,64	37,28
8	83,4	78,3
9	78,48	70,35
10	90,31	65,35
11	99,31	51,39
12	75	306,42
13	84,93	41,89
14	84,89	8,98
15	81,54	146,64
průměr	88,3	430
směr. odch.	7,6	101
var. koef. [%]	8,6	23,6
95% IS	84÷92,5	374÷485,8



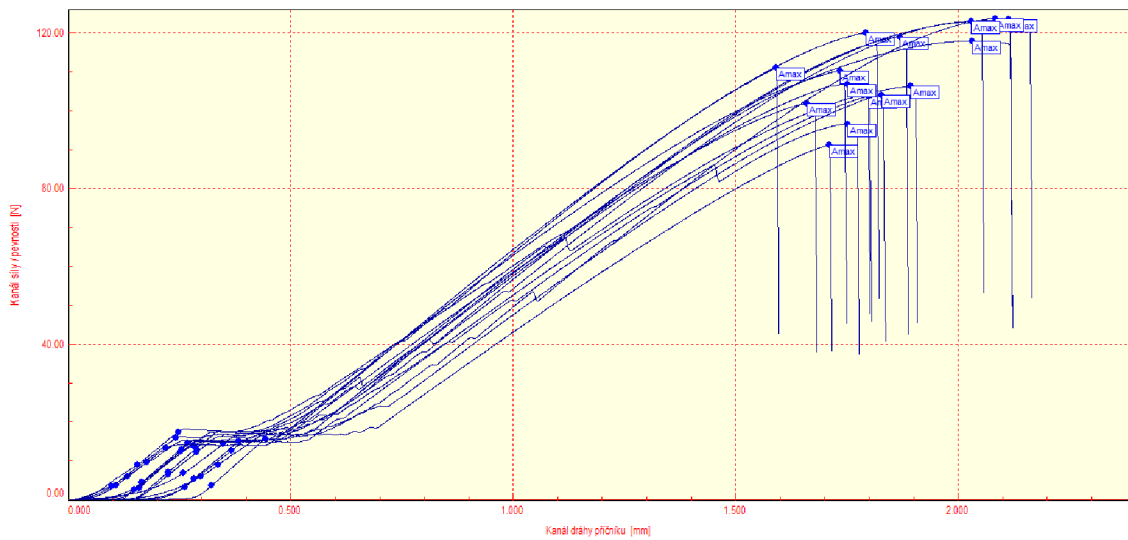
Obrázek č. 1.1 Tahové křivky vzorku PLA



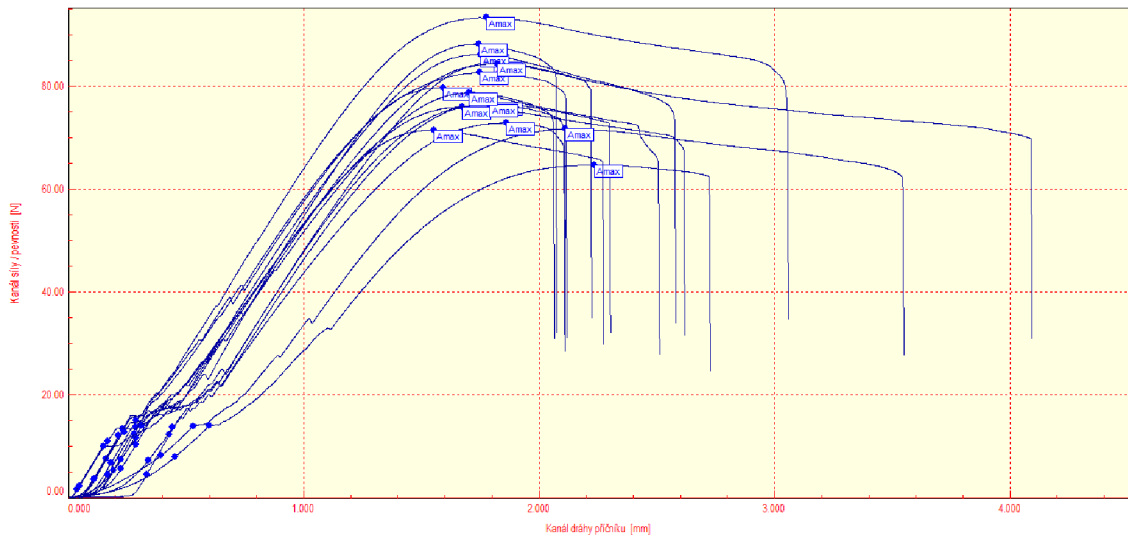
Obrázek č. 1.2 Tahové křivky vzorku PLA/10ATBC



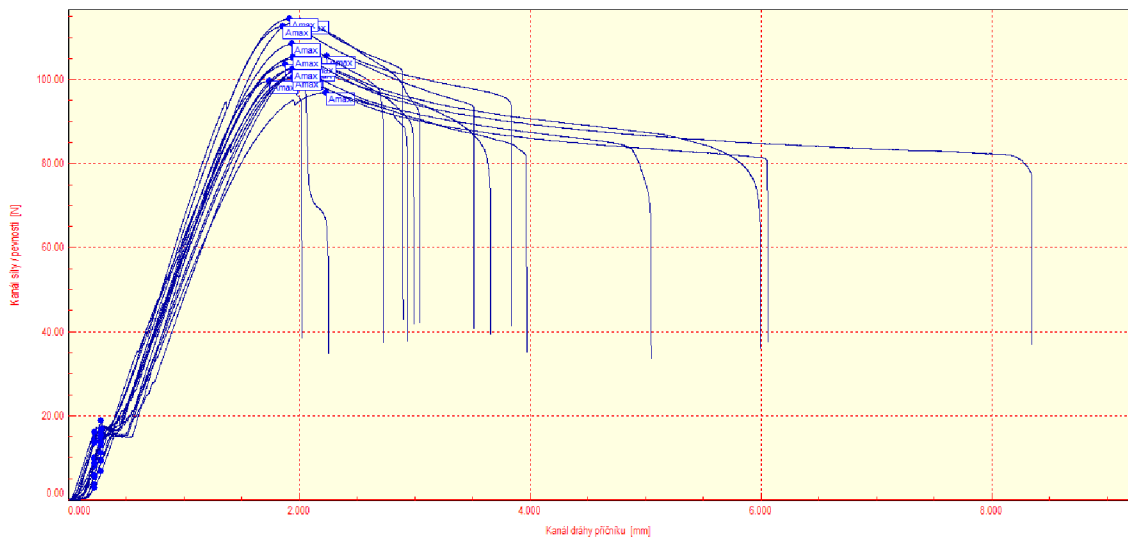
Obrázek č. 1.3 Tahové křivky vzorku PLA/5co



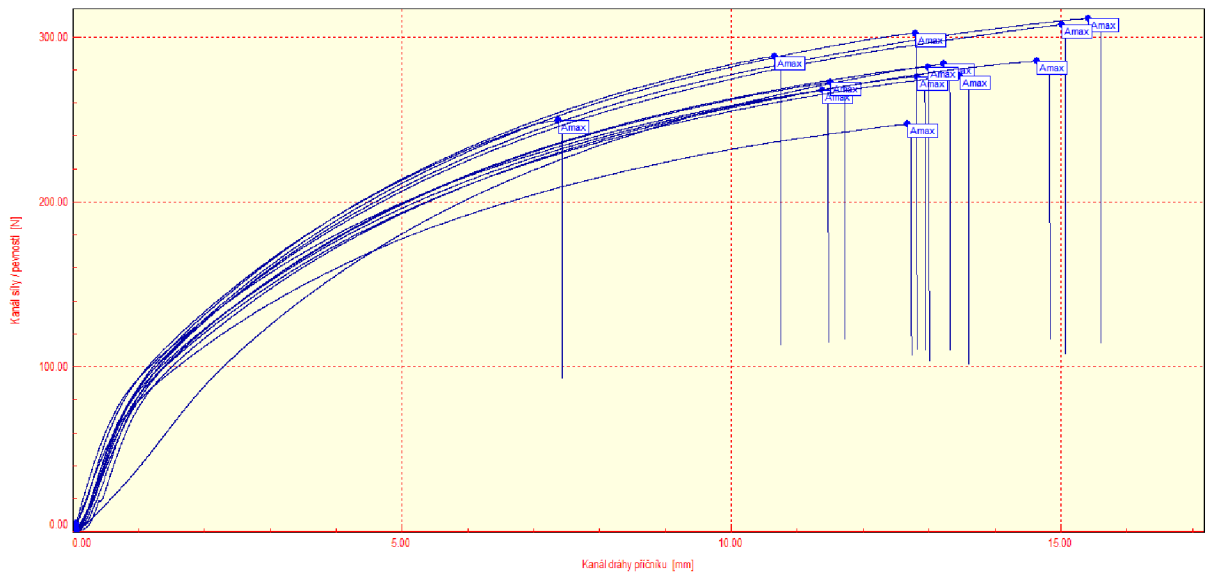
Obrázek č. 1.4 Tahové křivky vzorku PLA/5wo



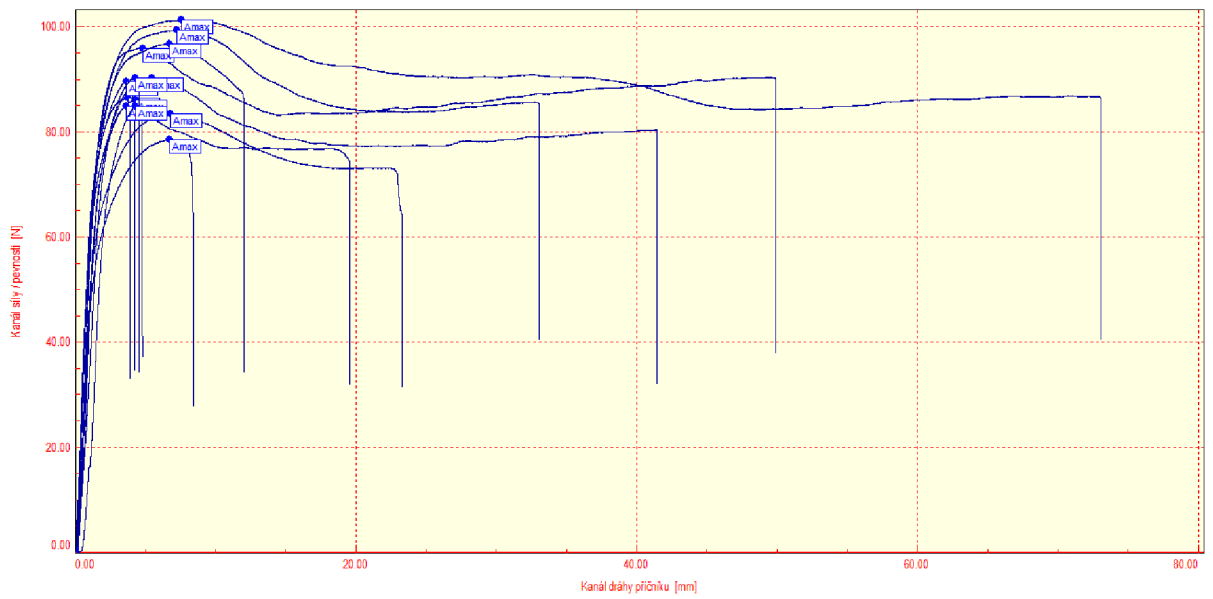
Obrázek č. 1.5 Tahové křivky vzorku PLA/10ATBC/5co



Obrázek č. 1.6 Tahové křivky vzorku PLA/10ATBC/5wo

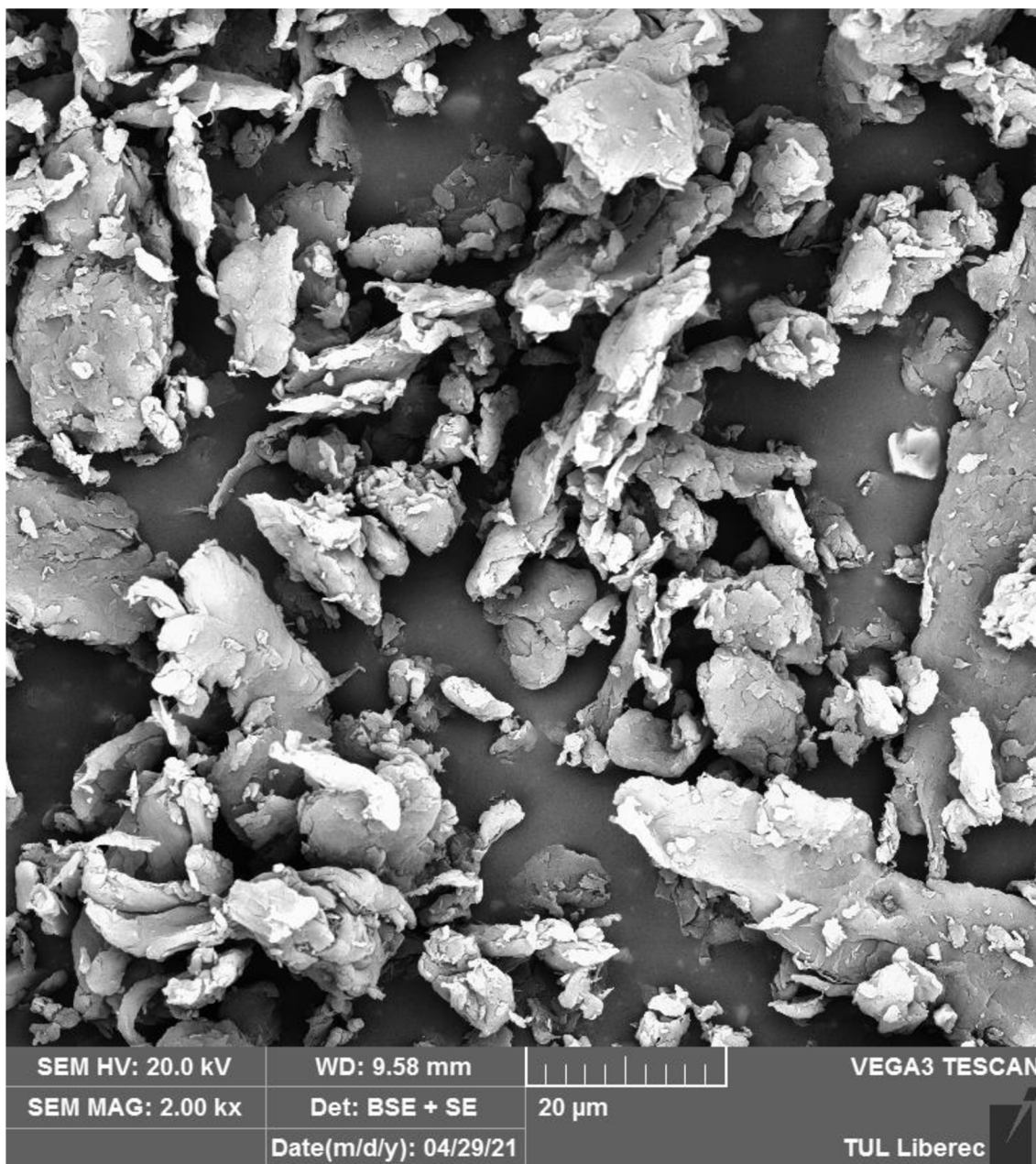


Obrázek č. 1.7 Tahové křivky kelímků od piva

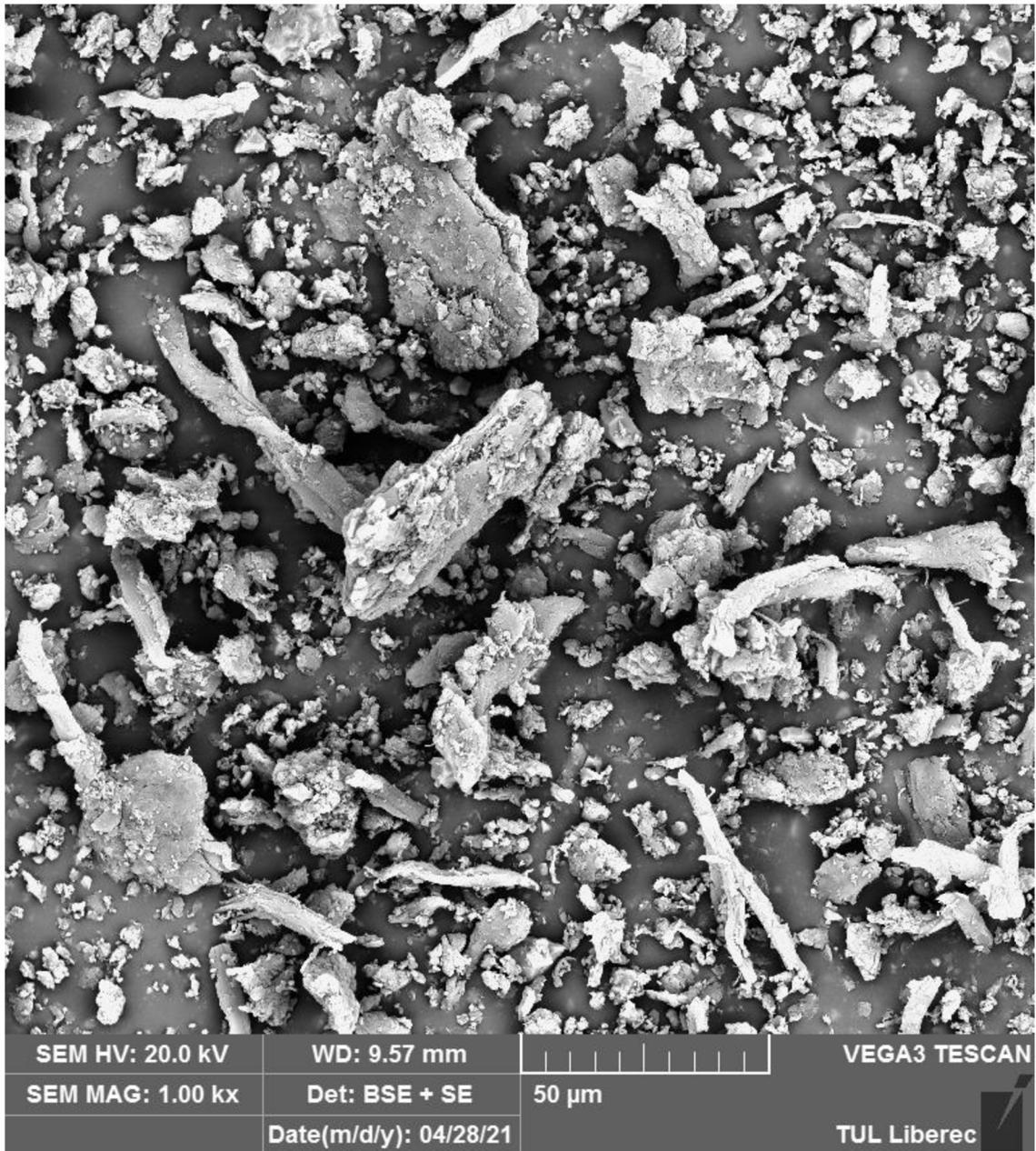


Obrázek č. 1.8 Tahové křivky kelímků od kávy

**Příloha č. 2: SEM analýza bavlny a vlny**



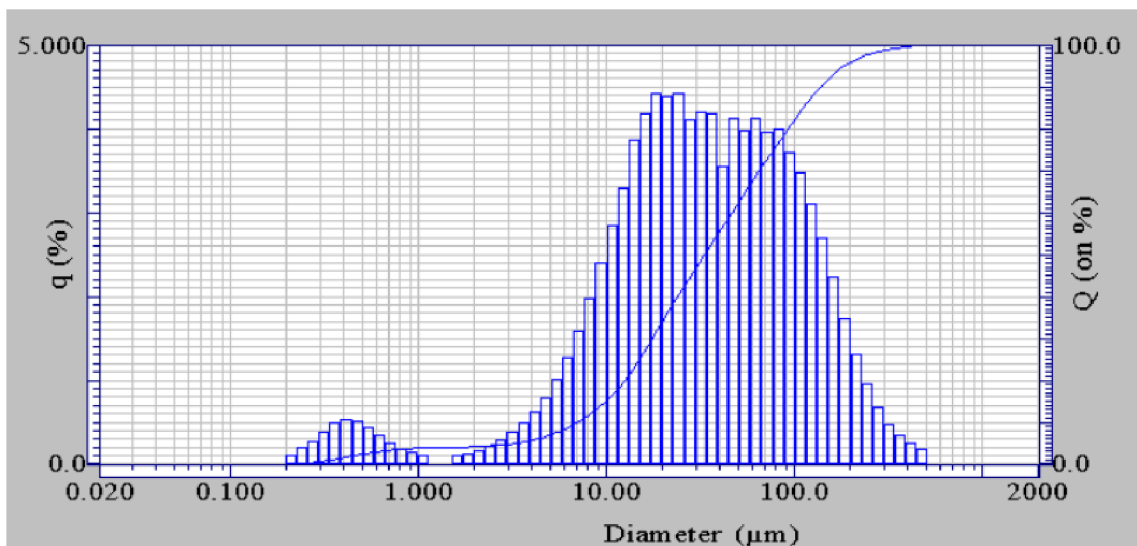
*Obrázek č.2.1 SEM analýza bavlny*



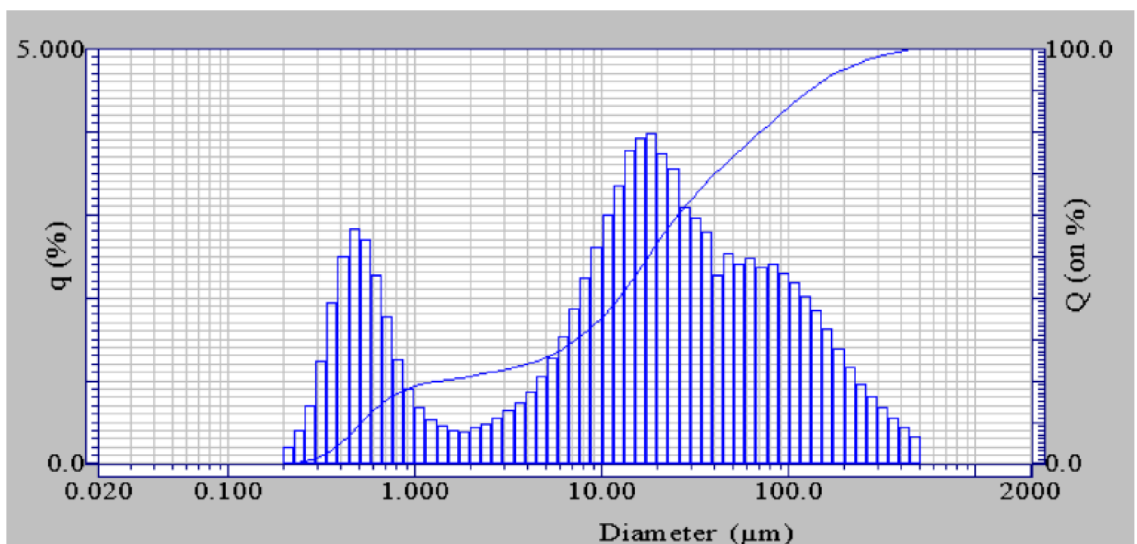
*Obrázek č. 2.2 SEM analýza vlny*



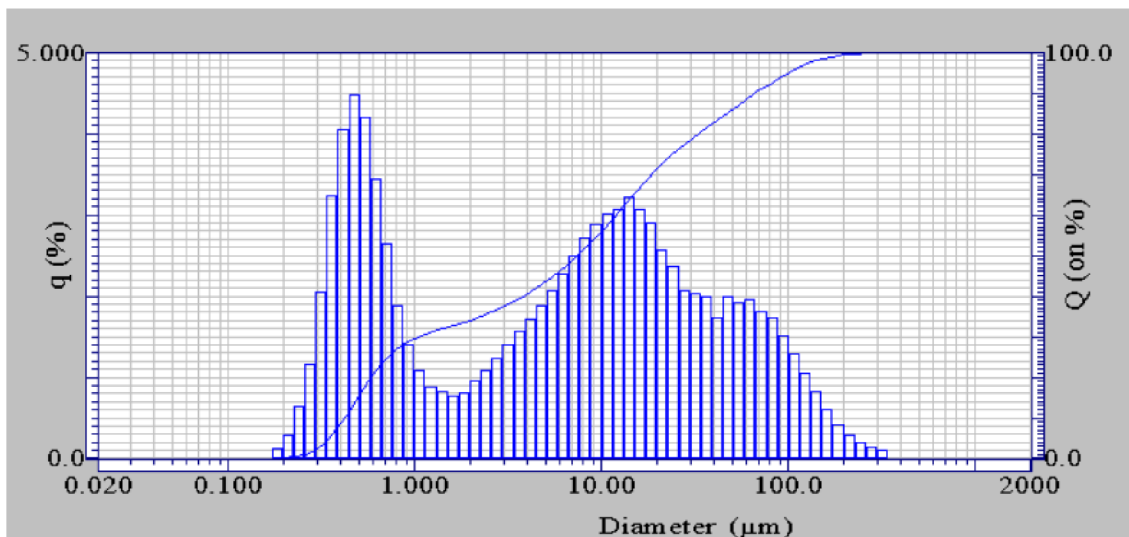
**Příloha č. 3: Snímky výsledků měření z přístroje „HORIBA LA-920“**



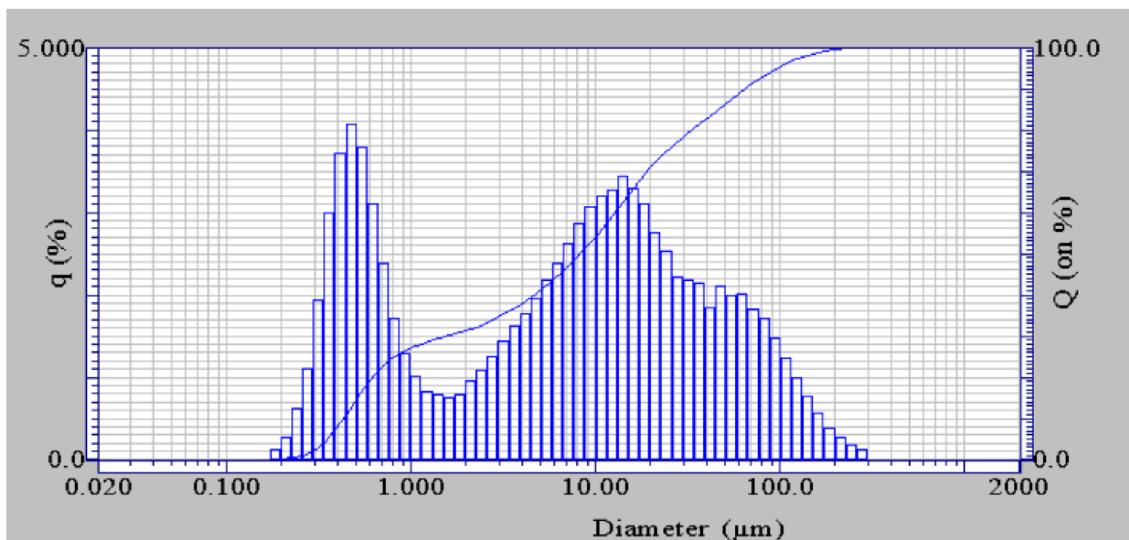
*Obrázek č. 3.1 Snímky bavlny z přístroje „HORIBA LA-920“.*



*Obrázek č. 3.2 Snímky bavlny z přístroje „HORIBA LA-920“.*



Obrázek č. 3.3 Snímky vlny z přístroje „HORIBA LA-920“



Obrázek č. 3.4 Snímky vlny z přístroje „HORIBA LA-920“