



Kompozitní materiály s textilní hierarchickou strukturní výztuží

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Jan Černý**
Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld





Zadání diplomové práce

Kompozitní materiály s textilní hierarchickou strukturní výztuží

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Černý**
Osobní číslo: S17000249
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2018/2019**

Zásady pro vypracování:

1. Rešerše kompozitních materiálů z hlediska typu plniva a matrice.
2. Problematika textilních strukturních výztuží.
3. Příprava zkušebních vzorků pro zvolenou matici a textilní výztuž.
4. Provedení experimentálních měření a zkoušek, mikroskopie lomových ploch.
5. Diskuze výsledků, závěr.



Rozsah grafických prací: grafy, obrázky, tabulky
Rozsah pracovní zprávy: cca 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

- [1] LENFELD, P. *Technologie vstřikování*. www.etul.publi.cz, 2015. ISBN iOS: 978-80-88058-72-4, ISBN Android: 978-80-88058-73-1.
[2] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Praha: VŠCHT v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.
[3] MEISSNER, B. a ZILVAR, V. *Fyzika polymerů*. SNTL/ALFA, Praha 1987.
[4] RITTER, Elizabeth, ed. *Thermoplastic composites: emerging technology, uses and prospects*. New York: Nova Publishers, 2017. ISBN 978-1-5361-0707-4.
[5] THOMAS, Sabu, ed. *Polymer composites*. Volume 1, Macro- and microcomposites. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. ISBN 978-3-527-32624-2.

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Katedra strojírenské technologie
Datum zadání práce: 31. října 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

24. 4. 2019

Bc. Jan Černý

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi, FEng. za odbornou pomoc během vypracování tohoto tématu. Dále bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Habrovi, Ph.D. za pomoc při výrobě kompozitních dílů. V neposlední řadě patří velké díky Ing. Lubošovi Běhálkovi, Ph.D. za výraznou pomoc během experimentálního měření. Nakonec bych rád poděkoval celé své rodině za podporu a trpělivost během mých dosavadních studií.

Diplomová práce vznikla s podporou řešení projektu studentské grantové soutěže SGS 21280 „*Výzkum a vývoj pro inovace materiálů a výrobních technologií s aplikačním potenciálem ve strojírenství*“ na Technické univerzitě v Liberci v rámci účelové podpory specifického vysokoškolského výzkumu poskytnuté Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy ČR v roce 2019.

Anotace

Diplomová práce se zabývá hodnocením vlastností biodegradovatelného kompozitního materiálu s hierarchickou textilní strukturou. V teoretické části je popsán princip kompozitních systémů, jejich dělení a výroby. Dále je rozebrána problematika textilních struktur, zejména tkanin a pletenin, použitých jako výztuž v kompozitních dílech. V neposlední řadě je vysvětlen princip a vliv povrchových modifikací vlákněných struktur. Nakonec je jedna kapitola věnována přípravě a využití kyseliny polymléčné.

V experimentální části je v úvodu popsán použitý materiál matrice a vlastnosti zvolených textilií. Dále je rozebrána příprava kompozitních vzorků technologií zastříkování a následně je zkoumán vliv typu výztuže, její orientace a povrchové modifikace na vybrané vlastnosti kompozitů na základě zkoušky v ohybu, tahu a zkoušek rázové houževnatosti.

Klíčová slova

kompozit, textilie, tkanina, pletenina, in-mould zastříkování, PLA

Annotation

This diploma thesis is focused on the evaluation of the properties of biodegradable composite material with hierarchic textile structure. The theoretical part describes the principal of the composite system, classification and manufacture. Issues of textile structures, more precisely woven fabric and knitting, as reinforcement in composites are included. Last but not least, the principle and surface treatment of fiber structures are explained. Last chapter is devoted to the preparation and usage of polylactic acid.

The experimental part starts with a description of matrix material and properties of chosen textiles. Next, the preparation of composite samples by in-mould technology is described. Subsequently, the impact of the type of textile, orientation and surface treatment on mechanical properties of composites is analyzed based on the test of flexural properties, tensile properties and by the impact resistance test.

Key words

composite, textile, woven fabric, knitting, in-mould injection molding, PLA

Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	9
1 Úvod.....	11
2 Teorie	12
2.1 Rozdělení kompozitů.....	12
2.1.1 Částicové kompozity.....	13
2.1.2 Vláknové kompozity	13
2.1.3 Laminátové kompozity.....	14
2.2 Vlákná	14
2.2.1 Přírodní vlákná	14
2.3 Druhy vlákněných plniv	16
2.3.1 Pramence	16
2.3.2 Rohože.....	17
2.3.3 Tkaniny	17
2.3.4 Pleteniny.....	18
2.3.5 Vlastnosti textilií	18
2.4 Polymery	19
2.4.1 Kyselina polymléčná (PLA).....	21
2.5 Modifikace povrchu vlákněných struktur.....	24
2.5.1 Fyzikální úpravy.....	26
2.5.2 Chemické úpravy	27
2.6 Metody přípravy kompozitních materiálů.....	29
2.6.1 Vstřikování.....	30
2.6.2 Zastřikování „in-mould“	30
3 Experimentální část.....	32
3.1 Textilie.....	32
3.2 Příprava textilií	33

3.2.1	Plazmatická modifikace	33
3.2.2	Acetylace.....	34
3.3	Výroba kompozitních hybridních vzorků.....	34
3.3.1	Stroj.....	35
3.3.2	Forma	36
3.4	Příprava zkušebních těles	36
3.5	Hodnocení vlastností biokompozitů.....	37
3.6	Zkouška v ohybu	38
3.6.1	Vyhodnocení získaných hodnot	40
3.7	Zkouška v tahu	46
3.7.1	Vyhodnocení získaných hodnot	48
3.8	Zkoušky rázové houževnatosti	51
3.8.1	Vyhodnocení získaných hodnot	53
4	Závěr	56
	Seznam použité literatury.....	58

Seznam symbolů a zkratk

Označení	Rozměr	Význam
T	Tex	jemnost
m	kg	hmotnost
l	m	délka
D _u	m ⁻¹	dostava útku
D _o	m ⁻¹	dostava osnovy
P _s	g·m ⁻²	plošná hmotnost
S	m ²	plocha
H _c	m ⁻²	celková hustota
H _f	m ⁻¹	hustota řádků
H _s	m ⁻¹	hustota sloupků
T _m	°C	teplota tání
T _g	°C	teplota zesklnění
\bar{x}	-	střední hodnota výběru
s	-	střední směrodatná odchylka
E _f	MPa	modul pružnosti v ohybu
σ _{f2}	MPa	napětí při deformaci 0,25 %
σ _{f1}	MPa	napětí při deformaci 0,05 %
ε _{f2}	%	poměrné prodloužení 0,25 %
ε _{f1}	%	poměrné prodloužení 0,05 %
σ _m	MPa	mez pevnosti v tahu
σ _{fm}	MPa	mez pevnosti v ohybu
ε _{tb}	%	jmenovité poměrné prodloužení při přetržení
E _c	J	energie potřebná k přeražení
h	mm	tloušťka
b	mm	šířka
a _{cU}	kJ·m ⁻²	rázová houževnatost
θ	°	úhel smáčivosti
γ _{SG}	J·m ⁻²	povrchová energie mezi pevnou látkou a plynem
γ _{SL}	J·m ⁻²	povrchová energie mezi pevnou látkou a kapalinou
γ _{LG}	J·m ⁻²	povrchová energie mezi kapalinou a plynem
CMCs	-	Ceramic matrix composites (kompozity s keram. maticí)
MMCs	-	Metal matrix composites (kompozity s kovovou maticí)
PMCs	-	Polymer matrix composites (kompozity s polymerní maticí)

PE	-	polyetylen
PP	-	polypropylen
PS	-	polystyren
PVC	-	polyvinylchlorid
PA	-	polyamid
PI	-	polyimid
PC	-	polykarbonát
PLA	-	kyselina polymléčná
LA	-	kyselina mléčná
PLLA	-	stereoizomer PLA poly-L-lactid
PDLA	-	stereoizomer PLA poly-D-lactid
PDLLA	-	stereoizomer PLA poly-DL-lactid
PHB	-	polyhydroxybutyrát
PHA	-	polyhydroxyalkanoát
PHBV	-	polyhydroxybutyrát-valerát
H	-	vodík
Cl	-	chlór
F	-	flor
OH	-	hydroxid
NH₂	-	amidová skupina
ROP	-	ring-opening polymerization (polymerizace otevřením laktidového řetězce)
NaOH	-	hydroxid sodný
CH₃CO	-	acetylová skupina
P-LFT	-	pelletized processing long-fiber-reinforced thermoplastic
D-LFT	-	direct processing long-fiber-reinforced thermoplastic
IML	-	in-mould labeling
IMD	-	in-mould decoration
RTM	-	Resin transfer molding
VARTM	-	Vacuum assisted resin transfer molding
SQRTM	-	Same qualified resin transfer molding
HP-RTM	-	High pressure resin transfer molding
L-RTM	-	Light resin transfer molding

1 Úvod

Polymerní kompozitní materiály se dnes dostávají do popředí zájmu průmyslových výrobců. Díky nim je možné vyrábět díly s vysokými mechanickými vlastnostmi a zároveň zachovat relativně nízkou hmotnost. V současnosti existují mnoho různých kompozitních systémů, směsí i samotných polymerů a tak je možné téměř pro každou aplikaci vybrat vhodný materiál případně vícesložkový systém. Je nutné si uvědomit, že v dnešní době je stále většina polymerů, a tím pádem i polymerních kompozitů, vyráběna z ropných produktů. Vzhledem k rostoucím cenám fosilních paliv na světových trzích se tak samotná výroba prodražuje. Neméně důležitý problém je velké množství plastového odpadu, který díky obrovské produkci plastových dílů každoročně vzniká. Běžné syntetické polymery jsou zatím prakticky přírodně nerozložitelné, a proto mohou v důsledku špatné recyklace působit značnou zátěž pro životní prostředí. Z toho důvodu stále častěji zaobíráme vývojem a využitím biodegradovatelných materiálů a kompozitních systémů na bázi biodegradovatelných matic.

Proto byla zadána tato diplomová práce, která se zabývá biodegradovatelnými polymerními systémy s textilní hierarchickou strukturou. Cílem diplomové práce je zjištění vlivu hierarchických textilních výztuží na výsledné mechanické vlastnosti kompozitních dílů s ohledem na jejich orientaci a povrchovou modifikaci. Na základě experimentu by měla vzniknout doporučení pro následný výzkum anebo pro využití zkoumaných materiálů v praxi.

Diplomová práce je rozdělena na dvě části. V teoretické části jsou popsány základy teorie kompozitů, jejich dělení a výroba. Důraz je kladen na biopolymery, přírodní vláknové výztuže a jejich povrchovou modifikaci.

Experimentální část se zabývá výrobou kompozitních hybridních desek technologií zastríkování. Kompozity jsou složeny z různě orientované vrstvy bavlněné textilie a polymeru PLA. Z připravených desek jsou vyřezány zkušební tělesa pro zkoušku v ohybu, tahu a rázové houževnatosti.

2 Teorie

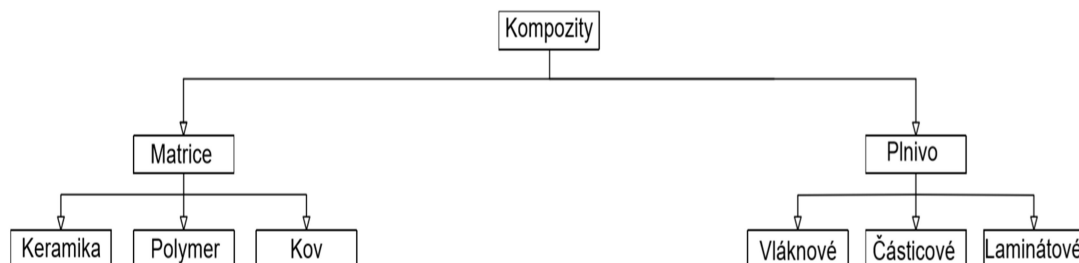
Kompozity jsou materiály, které se skládají ze dvou anebo více chemicky a fyzikálně odlišných fází (tzv. matrice a výztuže). Na rozdíl od slitin zůstávají u kompozitů jednotlivé fáze rozeznatelné. Pravděpodobně nejzajímavější schopností kompozitních materiálů je tzv. synergický efekt. Jedná se o jev, kdy jednotlivé fáze materiálu poskytují ve výsledku lepší vlastnosti, než by poskytly osamoceně nebo v pouhé sumární kombinaci. [1, s. 3]

Matrice představuje spojitou fázi, která funguje jako pojivo a zajišťuje požadované rozmístění výztuže. Zároveň zajišťuje přenos napětí na vlákna a současně chrání vlákna proti okolnímu prostředí. Obvyklým materiálem bývá kov, keramika nebo polymer. Výztuž (plnivo) zlepšuje nejen mechanické vlastnosti, ale může ovlivňovat např. i vlastnosti fyzikální (elektrickou vodivost apod.). [2, s. 19]

Je nutné si uvědomit, že kompozity nejsou vzhledem k výrazné anizotropii svých vlastností univerzálním materiálem a jejich použití je vždy podmíněno specifickým účelem. Jsou-li vhodně zvoleny, mohou být zajímavou alternativou ke klasickým materiálům nejen z hlediska konečných vlastností, ale i energetické a ekonomické výhodnosti.

2.1 Rozdělení kompozitů

Na rozdělení kompozitních materiálů může být nahlíženo např. z pohledu materiálu matrice anebo typu plniva. Matrice může být tvořena keramikou (CMCs), kovem (MMCs) či polymerem (PMCs) – obr. 2.1. S ohledem na téma práce se budeme zabývat jen kompozity s polymerní matricí.



Obr. 2.1 Rozdělení kompozitů [1, s. 5]

V průmyslové praxi jsou nejčastější kompozitní materiály s polymerní maticí. Využívá se jak termoplastů, tak reaktoplastů. Mezi nejběžněji používané polymery patří PE, PP, PA, PI, PC, nenasycené polyesterové, vinylesterové, epoxidové, melaminové pryskyřice apod. V současné době je snaha využívat materiály, které co možná nejméně zatěžují životní prostředí. Snahou je využívat takové materiály, které mohou být vyráběny z obnovitelných zdrojů a současně je možné je po uplynutí doby použitelnosti ekologicky zlikvidovat. Mluvíme o biodegradovatelných polymerech (např. PLA, PHBV). [1, s. 5]

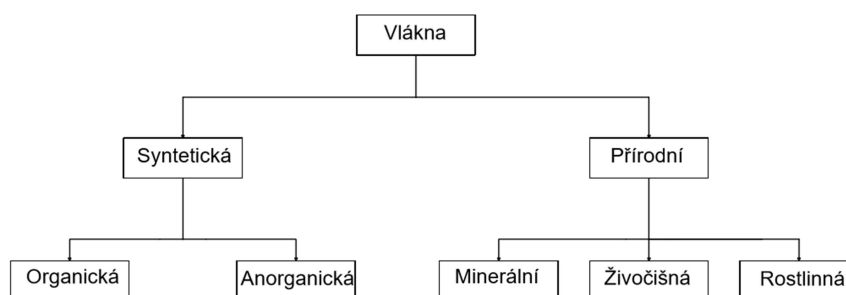
Z pohledu plniva můžeme rozlišovat kompozity s vláknovou nebo částicovou výztuží popřípadě lamináty, což jsou vlastně vícevrstevné kompozity.

2.1.1 Částicové kompozity

Částicové plnivo může mít tvar kulovitý, destičkovitý, tyčinkovitý či nepravidelný. Zpevňující efekt je poměrně malý, ačkoliv například částice na bázi pryže v křehkých maticích mohou zlepšovat odolnost vůči prasklinám. Obecně je možné tvrdit, že se částicového plniva využívá spíše pro zlepšení ostatních vlastností. Dochází kupříkladu ke změnám tepelné a elektrické vodivosti, odolnosti za zvýšených teplot, snížení tření, zvýšení otěruvzdornosti, zvýšení tvrdosti či snížení smrštění. Avšak výrazného zvýšení mechanických vlastností kompozitního materiálu lze dosáhnout pouze použitím vlákněných struktur. [3, s. 14]

2.1.2 Vláknové kompozity

Vlákna jsou útvary, kde jeden rozměr výrazně převyšuje rozměry ostatní. Na vláknové kompozity můžeme pohlížet opět z pohledu jejich geometrie (krátkovláknové a dlouhovláknové) anebo z pohledu výroby – syntetické nebo přírodní – obr 2.2.



Obr. 2.2 Dělení vláken

Vláknové kompozity našly uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích (automobilovém, leteckém, stavebním či vojenském). Jedná se o materiály, které se dostávají do středu zájmu výrobců napříč průmyslovou praxí. Pro představu celkové množství polymerních vláknových kompozitů ve formě hotových produktů dosáhlo jen v USA v roce 2015 $2,61 \times 10^9$ kg. To znamená dvacetičtyřnásobné zvýšení oproti roku 1960. Množství výrobků z oceli za stejné období se zvýšilo pouze 1,5×. [4, s. 8]

2.1.3 Laminátové kompozity

Lamináty jsou v podstatě vícevrstevné kompozitní systémy. Při jejich návrhu je nutné uvažovat o orientaci jednotlivých vyztužujících vrstev. Nevhodná orientace může mít za následek zeslabení výsledného kompozitu. Naopak vhodně zvolená konstrukce může vést k výborným mechanickým vlastnostem a výrazné úspoře hmotnosti oproti tradičním materiálům. [5, s. 287]

2.2 Vlákna

Vlákna přispívají k vysoké tuhosti a pevnosti. Zatímco polymerní matrice zodpovídá za nízkou hmotnost, jednoduchou výrobu a korozní odolnost. Vlákna jsou hlavními nosiči napětí. Vyrábí se nejčastěji ze skla, uhlíku či aramidu. V poslední době se často setkáváme i s přírodními materiály jako bavlna, len, konopí apod. [4, s. 17]

2.2.1 Přírodní vlákna

Přírodní vlákna můžeme dělit na živočišná, rostlinná a minerální. Živočišná vlákna se získávají buď ze srsti (ovčí vlna, mohér apod.), ze sekretu (hedvábí, tussah), z mořských řas apod. [6, s. 30] Vzhledem k tématu práce a s přihlédnutím k využitelnosti jednotlivých druhů se dále budeme zabývat pouze rostlinnými vlákny, které tvoří textilní struktury v experimentální části diplomové práce.

Rostlinná vlákna

Rostlinná vlákna nacházíme v různých částech rostlin. Dle původu je můžeme dělit na:

- Vlákna ze semen (bavlna, kapok, kokos apod.)
- Vlákna ze stonků (len, konopí, juta, kenaf, bambus apod.)
- Vlákna z listů (sisal, agave, ananas apod.)

Jedná se o přírodní vlákna, která jsou tvořena převážně celulórou ve formě mikrofibril rozptýlených v matici z ligninu. Hemicelulóza zprostředkovává kontakt mezi celulórovým plnivem a ligninovým pojivem. Z biologického pohledu se jedná vlastně o rostlinnou buňku ve formě vlákna. Elementární vlákno může mít délku od 1 do 50 mm a průměr od 10 do 50 μm . [7, s. 18] Mezi další složky přírodních vláken patří například pektin, jenž drží ochranné vosky na celulórovém vláknu, či anorganické prvky jako Ca, Na, K, Mg, Al a Si, které podporují růst rostliny. [8, s. 16] Přehled vlastností nejběžnějších rostlinných vláken je uveden v tab. 2.1.

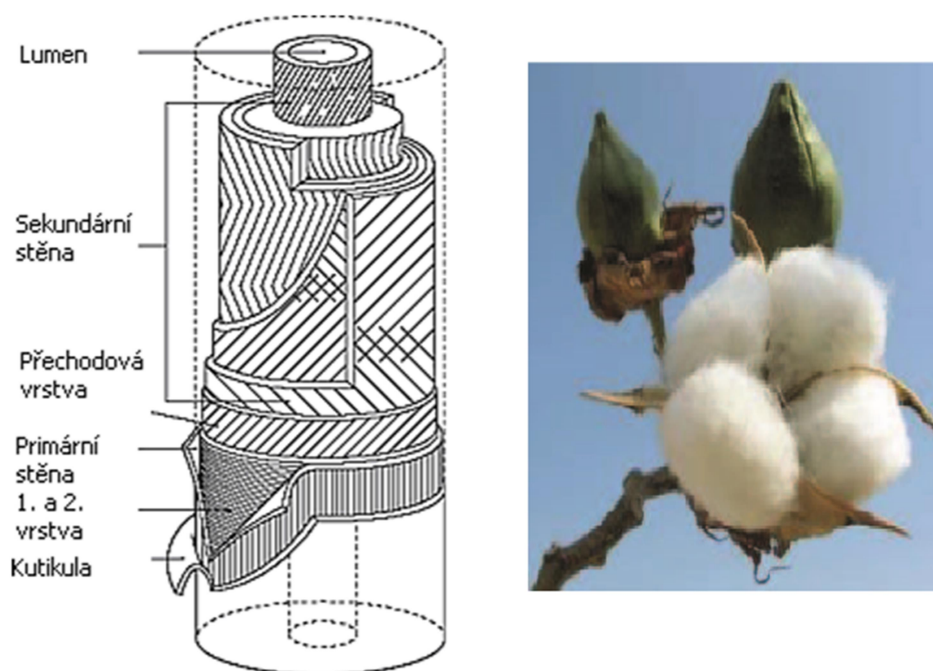
Tab. 2.1 Přehled vlastností přírodních vláken [8, s. 19]

Název	Hustota [gcm ⁻³]	Porozita [%]	Krysta linita [%]	Polymerační stupeň	MFA [°]	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti v tahu [GPa]	Prodlou žení při přetržení í [%]
Len	1,42 – 1,52	10 – 11	-	2300 – 8000	5 – 10	343 – 1500	8 – 100	1,2 – 4,0
Konopí	1,4 – 1,6	-	85 – 90	2200 – 3000	2,0 – 6,2	310 – 1110	5 – 90	1,3 – 6,0
Juta	1,3 – 1,5	14 – 15	78 – 82	1900 – 3000	7 – 10	187 – 800	3 – 64	0,2 – 3,1
Ramie	1,5 – 1,6	7,5 – 8,0	-	2100 – 6500	7,5 – 12,5	290 – 1060	5 – 128	1,2 – 4,6
Kenaf	1,2 – 1,4	-	-	-	-	180 – 1191	22 – 128	1,6 – 6,9
Dřevo	1,5 – 2,0	-	-	-	-	1000 – 1100	35 – 40	2 – 10
Bavlna	1,5 – 1,6	-	-	5000 – 8000	20 – 30	220 – 840	4,5 – 12,6	2 – 10
Kapok	1,47 – 1,56	-	40 – 50	-	-	45 – 93	1,7 – 4,0	2 – 10
Kokos	1,15 – 1,50	-	40 – 45	-	30 – 49	95 – 270	2,5 – 6,0	15 – 50
Sisal	1,0 – 1,5	17	55 – 70	2000 - 3000	10 – 25	80 – 855	9 – 38	1,9 – 14
Ananas	0,8 – 1,6		55 – 75	-	6 - 18	170 – 1627	6,2 – 82,5	0,8 – 3,0
Abaká	1,4 – 1,5	17 - 21	-	-	-	12 – 980	12 – 72	1 – 12
Banán	1,30 - 1,35	35 - 53	-	-	10 – 12	430 – 914	7,7 – 42,5	1 – 10
Bambus	0,6 – 1,5	-	-	-	-	140 – 1000	11 – 89	-
Cukrová třtina	0,45 – 1,25	-	40 – 50	-	-	20 – 290	2,7 – 17,5	0,9 – 1,1

Bavlna

Vlákna se získávají z tobolek bavlníku. Mohou být dlouhá až 6 cm. [3, s. 16] Strukturně je tvoří soustředné zóny s centrálním dutým jádrem nazývané lumen. Vrchní vrstva obsahuje převážně pektin, tuky a vosky. Pod ní se nachází primární stěna tvořena fibrilami celulózy, které jsou spirálově stočené kolem osy vlákna.

Následuje sekundární stěna tvořena velkými spirálově uspořádanými celulóзовými řetězci. Schéma bavlněného vlákna je vidět na obrázku 2.3.



Obr. 2.3 Schéma bavlněného vlákna [9, s. 18] a bavlník [6, s. 32]

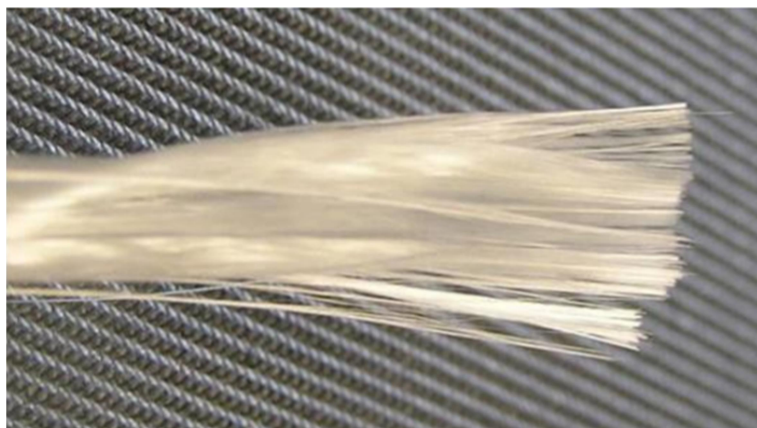
Jako u ostatních materiálů na bázi celulózy jsou i pro bavlnu omezující hydroxilové skupiny –OH, které přispívají k celkové hydrofilitě vláken. [10, s. 306]

2.3 Druhy vláknenných plniv

Jednotlivá vyztužující vlákna se samostatně používají pouze výjimečně. Z praktických důvodů jsou z nich většinou vyráběny složitější struktury. V následujících odstavcích jsou uvedeny některé druhy takových struktur. Z pohledu tématu diplomové práce je větší pozornost věnována hlavně tkaninám a pleteninám.

2.3.1 Pramence

Jedná se o svazek rovnoběžných vláken, které nejsou vzájemně propletené. Většinou se používají vlákna o průměru od 9 μm do 13 μm . Využívají se pro pultruzi, navíjení či výrobě prepregů. [4, s. 23]



Obr. 2.4 Pramenec ze skelných vláken [11, s. 19]

2.3.2 Rohože

Jedná se o netkané plošné výrobky. Rozlišujeme je na základě vláken, kterými jsou tvořeny.

- Rohože ze sekaných pramenců
- Rohože z kontinuálních vláken

Rohože ze sekaných pramenců dosahují plošné hmotnosti 300 až 900 g·m⁻². Tvoří je nasekané pramence či vlákna o délce 25 až 50 mm, které jsou neorientovaně plošně uloženy do vrstev prosycených pojivem. Po následném sušení mohou být navíjeny do rolí.

Rohože z kontinuálních vláken se skládají z nekonečných vláken (pramenců) uložených nepravidelně v několika vrstách, které jsou vzájemně prosycené pojivem. [5, s. 44]

2.3.3 Tkaniny

Jedná se o plošné výrobky složené z vláken či pramenců uložených vůči sobě pravouhle. Ve směru délky mluvíme o osnově, ve směru příčném o útku. Místa, kde se kříží osnova a útek, se nazývají vazné body. Rozlišujeme tzv. osnovní vazný bod (tj. místo, kde je osnova nad útkem) a útkový vazný bod (tj. místo, kde je útek nad osnovou). Opakovaným vytvářením vazebných bodů vznikají na tkanině vazby, které ovlivňují mechanické vlastnosti, vzhled, tepelnou izolaci, prodyšnost apod. [12, s. 15] Vlivem zvlnění vláken, které vzniká ve vazných bodech, dochází k poklesu mechanických vlastností. [10, s. 242] Například u skleněných vláken dochází vlivem zvlnění ke snížení modulu pružnosti až o 5 %, u uhlíkových dokonce

o 7 % oproti přímým vláknům. [5, s. 309] Existují tři základní typy vazeb – plátňová, keprová a atlasová viz. obr. 2.5. [5, s. 45]



Obr. 2.5 Typy vazeb [13, s. 18]

2.3.4 Pleteniny

Jedná se o plošné výrobky, které vznikají provázáním jedné nebo více nití. Základním prvkem pletenin je očko. [14, s. 276] V pleteninách rozeznáváme tzv. sloupky (vzájemně provázaná očka uspořádaná nad sebou) a řádky (očka ležící vedle sebe). Dle provázání nití rozlišujeme osnovní (složitě vedené soustavy nití) a zátažné pleteniny (z jedné nitě vedené ve směru řádků). [15, s. 13, 14] Pleteniny mohou být přizpůsobeny tvaru a způsobu namáhání konstrukčních prvků na základě typu a orientace oček. [5, s. 48]

2.3.5 Vlastnosti textilií

Vzhledem k tomu, že experimentální část diplomové práce je zaměřena na zastříkování textilií ve formě tkanin a pletenin, jsou v následujících odstavcích popsány vybrané vlastnosti a parametry tkanin a pletenin.

Jemnost

Jemnost je veličina představující délkovou hustotu příze. Jednotkou je 1 tex, který představuje přízi o délce 1 km a hmotnosti 1 g. [16, s. 56]

$$T = \frac{m}{l} \quad (2.1)$$

kde je:

T... jemnost [tex]

m... hmotnost příze [g]

l... délka příze [km]

Dostava

Dostava představuje počet nití připadajících na jednotku délky. U tkanin rozeznáváme dostavu útku (D_u) a dostavu osnovy (D_o). [13, s. 17]

Plošná hmotnost

Plošná hmotnost představuje hmotnost plošné jednotky textilie. [13, s. 17]

$$P_s = \frac{m}{S} \quad (2.2)$$

kde je:

P_s ... plošná hmotnost [g/m^2]

m... hmotnost [g]

S... plocha [m^2]

Hustota pletenin

Hustota pleteniny, nebo také celková hustota, vyjadřuje míru zaplnění pleteniny vazebnými prvky nebo nití těchto prvků. Udává počet oček na jeden m^2 . Hustota řádků představuje počet řádků připadajících na jednotku délky, podobně poté hustota sloupků ukazuje počet sloupků na jednotku délky. [17, s. 20]

$$H_c = H_r \times H_s \quad (2.3)$$

kde je:

H_c ... celková hustota [m^{-2}]

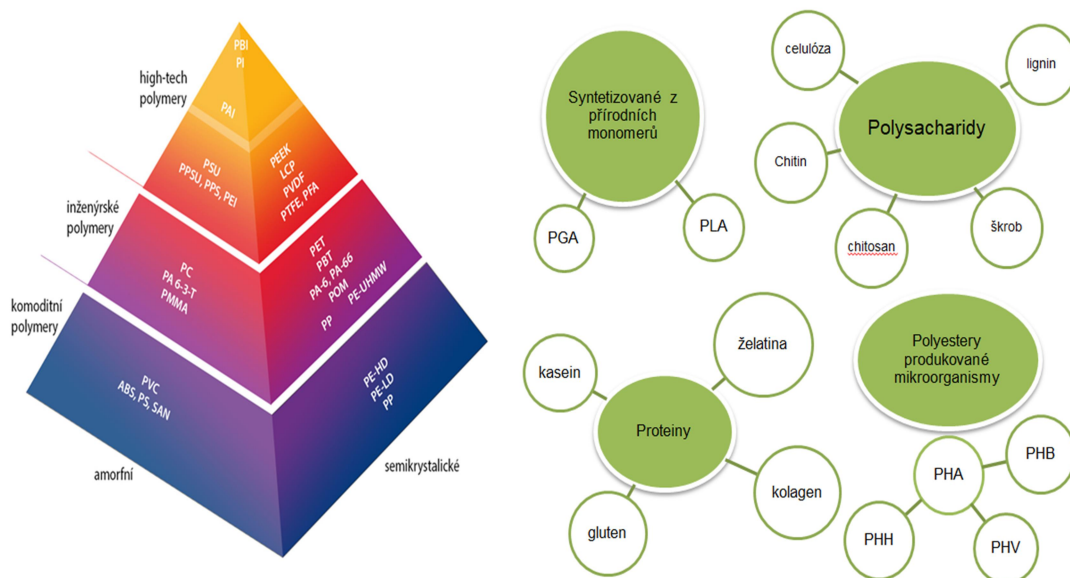
H_r ... hustota řádků [m^{-1}]

H_s ... hustota sloupků [m^{-1}]

2.4 Polymery

Polymery jsou vysokomolekulární látky tvořené dlouhými řetězci atomů převážně uhlíku. Ten doplňují v řetězci další atomy (H, O, Cl, F apod.) či molekulové skupiny (OH, NH_2 apod.). Jejich vlastnosti jsou obrazem zejména jejich chemického složení, molekulové a nadmolekulární struktury. Na polymerní materiály můžeme nahlížet z mnoha hledisek. Asi nejběžnější dělení je na plasty a elastomery, respektive na

termoplasty, reaktoplasty, kaučuky a popřípadě termoplastické elastomery. S ohledem na téma práce se však podíváme na dělení z pohledu původu – syntetické a přírodní viz. obr. 2.6.



Obr. 2.6 Rozdělení polymerů (syntetické vlevo, přírodní vpravo) [18]

Syntetické polymery se běžně vyrábějí na základě tzv. polyreakcí (polymerace, polyadice a polykondenzace), při kterých dochází k řetězení jednoduchých nízkomolekulárních látek, monomerů, ve větší celky. Základní surovinou pro výrobu většiny syntetických polymerů jsou fosilní paliva. Mezi nejčastěji používané zástupce patří tzv. komoditní plasty. Jedná se o PE, PP, PS a PVC. Jejich recyklace může být složitá a z časového hlediska i velmi náročná. [19, 4, s. 34]

V poslední době existuje snaha snižovat zátěž životního prostředí, a proto se zájem obrací směrem k polymerům na přírodní bázi tzv. biopolymerům. Jedná se o materiály, které jsou vyráběny z obnovitelných zdrojů a zároveň je možné výrobky z nich po uplynutí doby použitelnosti při dodržení určitých podmínek recyklovat, respektive jejich úplným rozkladem dosáhnout návratu základních látek do přírodního cyklu. Mluvíme o tzv. biodegradaci.

Biodegradace je jev, při kterém dochází k rozkladu polymerních látek v důsledku okolního prostředí. Její proces je možno dělit do dvou základních kroků. V prvním kroku dochází ke štěpení dlouhých makromolekul polymerního řetězce na kratší

jednotky (oligomery). V druhém kroku materiál podléhá působení mikroorganismů a ostatním okolním vlivům, přičemž dochází k jeho rozpadu na jednoduché látky, kterými jsou například oxid uhličitý, voda či organické zbytky (biomasa). Celý proces je možno považovat za ukončený, když jsou všechny chemické látky opětovně zařazeny do přírodního cyklu. [6, s. 26]

Na biopolymery může být opět nahlíženo z několika hledisek. Rozlišujeme biopolymery přírodního původu, které vznikají většinou činností živých organismů. Běžnými představiteli jsou polysacharidy (škrob, glykogen, chitin, celulóza, heparin apod.), proteiny (kolagen, keratin, hemoglobin apod.) či polyestery (PHA, PHB, PHV apod.).

Další skupinou jsou biopolymery syntetické. Ty vznikají na základě monomerních látek, které byly podrobeny polyreakcím. Vzhledem k faktu, že v experimentální části bylo použito polymeru PLA, a že se jedná asi o nejpoužívanějšího zástupce skupiny bude v dalších odstavcích popsán jeho vznik, vlastnosti a využití.

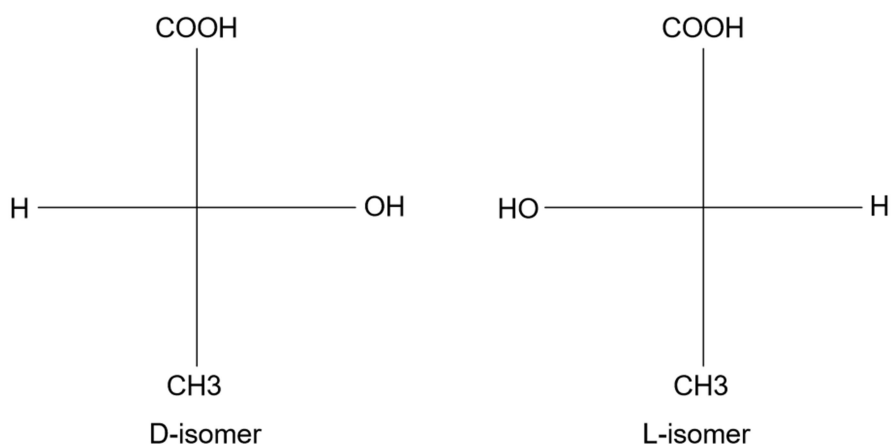
2.4.1 Kyselina polyléčná (PLA)

Vstupní surovinou pro výrobu PLA je kyselina mléčná. Ta se získává na základě chemické syntézy nebo pomocí fermentace materiálů obsahujících polysacharidy či cukry, nejčastěji z kukuřice, brambor, melasy nebo cukrové řepy. V současnosti se hledají cesty k získávání LA bez využívání potravinových produktů. Jedná se především o fermentaci celulozové biomasy, zemědělského odpadu či „nepotravinových“ rostlin např. proso prutnaté. [20, s. 19]



Obr. 2.7 Proso prutnaté [21]

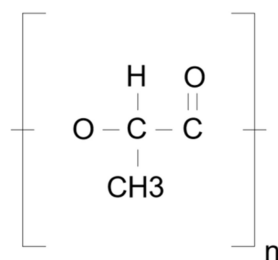
Kyselina mléčná se vyskytuje ve dvou formách, které mají stejné chemické složení, ale liší se uspořádáním atomů v prostoru. Existuje tzv. levotočivý L-izomer (otáčí rovinu polarizovaného světla proti směru hodinových ručiček) a pravotočivý D-izomer (otáčí rovinu polarizovaného světla po směru hodinových ručiček). [22, s. 22]



Obr. 2.8 Izomery kyseliny mléčné [23, s. 31]

Kyselina polymléčná

Kyselina polymléčná (polyaktidová), neboli PLA, je termoplastický polyester. Jedná se o biokompatibilní a biodegradovatelný materiál získávaný z nefosilných, obnovitelných zdrojů. Poprvé ji vyrobil roku 1845 Théophile-Jules Pelouze. [24, s. 28] Vzhledem k nákladné výrobě a nemožnosti vyrábět PLA s vyšší molekulovou hmotností byla využívána až do 90. let 20. století jen pro specifické aplikace zejména v medicíně. Zlom nastal s příchodem komerčně využitelného postupu výroby vysokomolekulární PLA NaturWorks® od firmy Cargill Dow LLC. [20, s. 20]



Obr. 2.9 Kyselina polymléčná [23, s. 30]

Výroba

PLA je produkována na základě polymerizace kyseliny mléčné (LA) nebo pomocí tzv. ring-opening polymerization (ROP), která spočívá v otevírání laktidového kruhu. [20, s. 19] Existuje i třetí způsob, který tkví v přímé polykondenzaci LA, ale výsledný produkt není bez dalších zásahů použitelný. [8, s. 21]

Nejobvyklejším způsobem výroby kyseliny polymléčné je ROP.

1. V prvním kroku dochází k přípravě laktidu. Vodný roztok LA se na základě polykondenzace bez přítomnosti rozpouštědla převádí na nízkomolekulární produkt ($5000 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$) tzv. prepolymer. Následuje termická depolymerace, za účasti katalyzátoru, sníženého tlaku a teploty mezi $200\text{-}300 \text{ }^\circ\text{C}$, na jejíž základě vzniká laktid. Následkem typu prepolymeru, teploty, času kondenzace a použitého katalyzátoru může vzniknout L-laktid, D-laktid nebo DL-laktid. Nakonec dochází k čištění pomocí vakuové destilace.
2. V druhém kroku probíhá vlastní ROP. Iniciátorem reakce bývá látka se skupinou $-\text{OH}$. Použitá látka ovlivňuje výslednou molekulovou hmotnost a akcelaraci reakce. Teplota reakce je dána polymerizujícím laktidem. Na základě ROP vzniká finální produkt – kyselina polymléčná s molekulovou hmotností větší než $600\,000 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$. [25, s. 31]

Vlastnosti PLA

Kyselina polymléčná existuje obecně ve třech formách – PLLA, PDLA a PDLLA. PLLA a PDLA jsou semikrystalické, tvořené stereoisomerem L, respektive D. PDLLA je tzv. racemát, tvořený stejným množstvím levotočivé a pravotočivé formy. Jedná se o látku amorfni. [2, s. 27]

Vlastnosti kyseliny polymléčné závisí převážně na její molekulové hmotnosti a na zastoupení jednotlivých izomerů v řetězci. Může se jednat jak o semikrystalický, tak amorfni polymer. Stupeň krystalinity závisí převážně na poměru L-izomeru a D-izomeru. Se vzrůstajícím množstvím D-izomeru klesá stupeň krystalinity. Zároveň klesají T_m a T_g . Současně roste rychlost degradace.

Mechanické vlastnosti jsou závislé na molekulové hmotnosti. Vzhledem k teplotě zeskenění, která se běžně pohybuje mezi $50\text{-}65 \text{ }^\circ\text{C}$ [26, s. 574], se za normální teploty jedná o materiál tuhý a křehký. Teplota tání se pohybuje mezi $160\text{-}170 \text{ }^\circ\text{C}$.

Mez pevnosti v tahu může dosahovat 60 MPa. [3 s. 26] Modul pružnosti v tahu se pohybuje v rozmezí 3000-4000 MPa. PLA se vyznačuje poměrně nízkou tažností. [24, s. 30] Vlastnosti lze velmi dobře ovlivnit např. kopolymerací, výrobou směsí či využitím PLA v kompozitních systémech.

Kyselina polymlečná je hořlavá a její hoření produkuje bílý kouř. Dobře odolává UV záření. Je nerozpustná ve vodě a dobře odolává alkoholům. Má dobrou odolnost proti tukům a olejům. PLA má vysokou propustnost pro plyny, a proto se hodí jako obalový materiál, zároveň však není vhodná k uchovávání sycených nápojů. [25, s. 37]

Pro běžné aplikace se využívá L-izomer (PLLA). Materiály s rozdílným poměrem L/D izomeru jsou využívány pro specifické aplikace. [20, s. 22] Například kompozity na bázi PLA a bavlněných tkanin se využívají k lokální aplikaci antibiotik u rozsáhlých kožních zranění či popálenin. [27, s. 174] V současné době se PLA dostává do stále většího zájmu průmyslových firem. Například Toyota již dnes využívá směsí PLA jako výplň dveří automobilů či v jiných částech interiéru. Firma Pannasonic ji používá jako obal baterií a Fujitsu při výrobě částí krytování laptopů. [25, s. 43]

2.5 Modifikace povrchu vláknenných struktur

Pro správnou funkčnost kompozitu je nutné zaručit kompaktnost celého systému. Matrice neslouží pouze jako pojivo či ochrana výztuže před vnějšími chemickými vlivy. Nejspíše nejdůležitější funkcí je schopnost reagovat na vnější zatížení a přenášet vzniklé napětí na výztuž. Výztuž má totiž obvykle vyšší mechanické vlastnosti než matrice, a proto by bylo vhodné, aby byla během namáhání nositelem napětí právě ona. Z tohoto důvodu je nutná její dobrá povrchová adheze k matici na mezifázovém rozhraní.

Pro vysokou přilnavost je nutný těsný kontakt obou materiálů, respektive dobrá smáčivost, která je charakterizována povrchovou energií. Bylo dokázáno, že v případech, kdy je povrchová energie výztuže výrazně vyšší, než energie matrice, dochází k dobrému smáčení plniva pojivem. Informaci o povrchové energii nám přeneseně podává tzv. úhel smáčení (kontaktní úhel) θ . Jedná se úhel, který spolu svírá tečna povrchu kapaliny s pevnou látkou. Je-li úhel menší ,než 90° , je povrch pevné látky (plniva) dobře smáčen. Naopak pokud dosahuje velikosti větší, než 90° ,

obvykle nedochází k dobrému smáčení materiálu. Úhel je definován jako poměr povrchové energie na rozhraní fází. [28, s.12]

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}} \quad (2.4)$$

kde je:

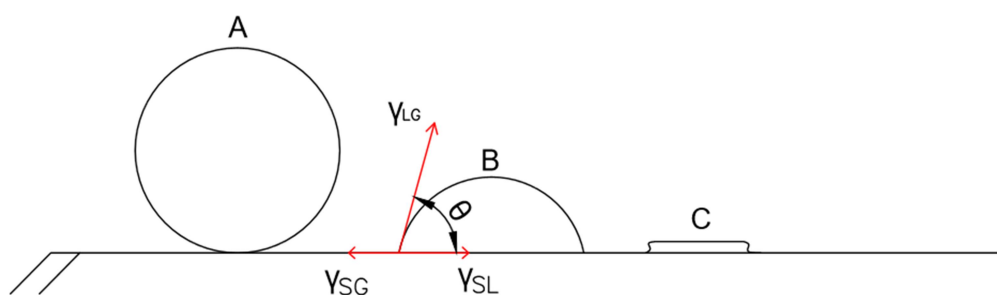
θ ... úhel smáčení [-]

γ_{SG} ... povrchová energie mezi pevnou látkou a plynem [Jm^{-2}]

γ_{SL} ... povrchová energie mezi pevnou látkou a kapalinou [Jm^{-2}]

γ_{LG} ... povrchová energie mezi kapalinou a plynem [Jm^{-2}]

Na následujícím obrázku je možno vidět znázorněný kontaktní úhel a jednotlivé povrchové energie.

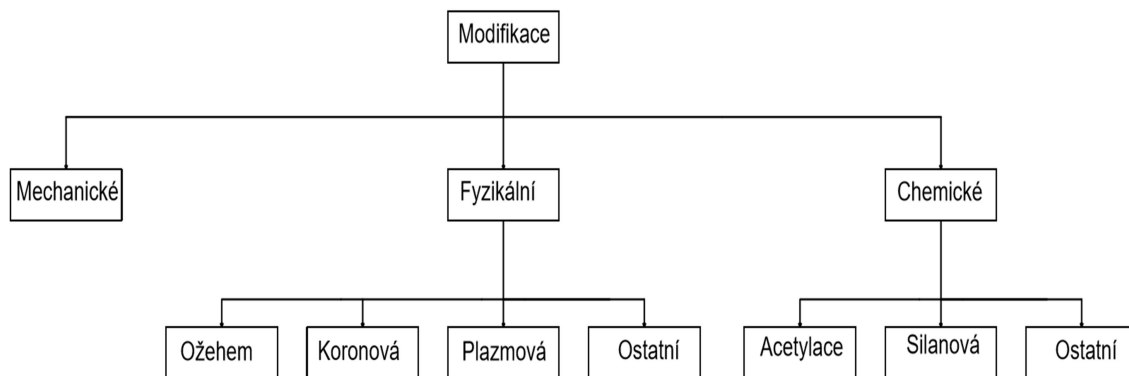


Obr. 2.10 Úhel smáčení [28, s. 10] (A $\theta > 90^\circ$ nesmáčí, B $\theta < 90^\circ$ smáčí dobře, C $\theta = 0^\circ$ plně smáčí)

Rozhodující je také druh vazby mezi plochami obou materiálů. Nejsilnější je vazba chemická (iontová či kovalentní), která vzniká na základě chemické reakce mezi oběma materiály. Další typ vazby může vznikat na základě difúze, kdy dojde k vytvoření spletců volných konců molekulárních řetězců. Během kontaktu dvou materiálů se projevují také tzv. van der Waalsovy síly. Jejich princip spočívá v existenci elektrického náboje na povrchu dvou látek. Jsou-li náboje opačného znaménka, projeví se přitažlivá elektrostatická síla. Na adhezi má současně vliv i geometrie obou povrchů, respektive drsnost, na jejímž základě vzniká mechanický kontakt obou ploch. [8, s. 28, 29]

V následujících odstavcích budou uvedeny způsoby, kterými je možné ovlivnit adhezi matrice-výztuž. Mluvíme o tzv. předúpravách (modifikaci) vláken. Při výrobě biokompozitů vzniká problém se smáčivostí přírodních vláken s polymerní matricí,

protože přírodní vlákna jsou silně polární a hydrofilní materiály. To je způsobeno jejich chemickým složením zejména přítomností silně polarizovatelných –OH skupin. Proces předúpravy vedou k vyčištění povrchu a k jeho chemické modifikaci, která zaručí snížení absorpce vlhkosti a zvýší drsnost. Rozlišujeme úpravy mechanické, fyzikální a chemické viz. obr. 2.9. [7, s. 24]



Obr. 2.11 Dělení modifikací povrchu

2.5.1 Fyzikální úpravy

Fyzikální úpravy ovlivňují mechanickou vazbu na základě změny strukturních a povrchových vlastností výztuže. Mezi nejpoužívanější metody patří úprava koronovým výbojem, plazmatem či ožeh. [7, s. 24]

Plazmatická úprava

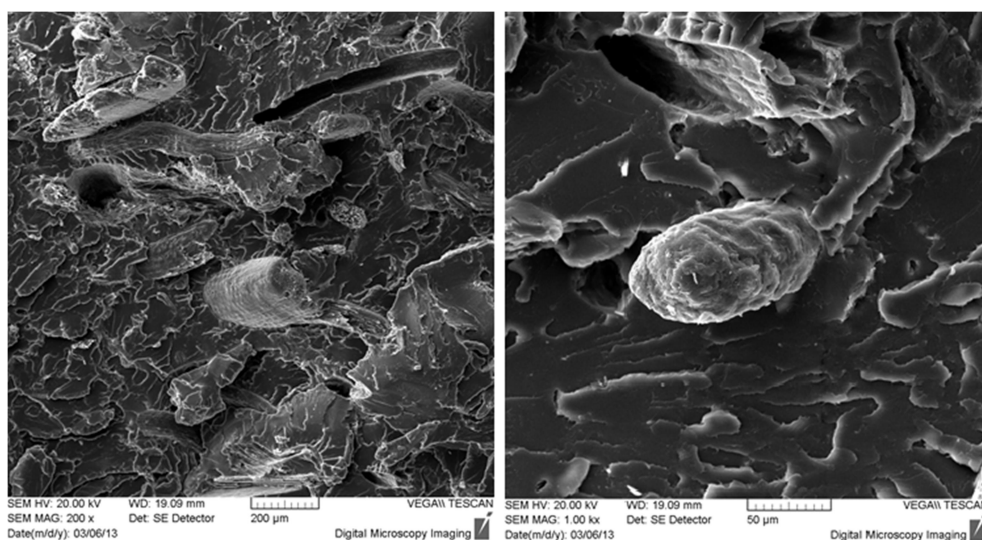
Plazma je skupenství látky, které je charakteristické určitým stupněm ionizace. Jedná se o směs kladně a záporně nabitých iontů, která vykazuje kvazineutrální stav. To znamená, že v určitém objemu látky, který je charakterizován tzv. Debyeovou délkou, je koncentrace kladných a záporných iontů přibližně stejná. [29, s. 16]

V závislosti na použitém zdroji energie, respektive na základě elektronové hustoty a teplotě plazmatu, rozlišujeme dva základní druhy – horké a studené.

U horkého plazmatu dochází k tzv. elastickým kolizím částic. Elektron indukuje vznik reaktivní částice a spotřebovává svou energii na ohřev iontu. Zatímco u studeného plazmatu elektrony způsobují inelastické kolize, které indukují vznik reaktantů, ale elektrony si svou energii zachovávají. Studené plazma má nižší elektronovou hustotu. Poměr elastických a inelastických kolizí je výrazně ovlivňován

i tlakem. K modifikacím polymerních materiálů se vzhledem k jejich teplotní odolnosti využívá převážně studeného plazmatu. [30, s. 21]

Účelem ošetření polymerních materiálů plazmatem vzhledem k výrobě kompozitních systémů je primárně zvýšení jejich smáčivosti na základě změny povrchové energie viz. obr. 2.10. Princip spočívá v ostřelování materiálu nabitými částicemi, a tím vzniku nových funkčních skupin či atomů na povrchu. [30, s. 23] Při použití vzduchu, O₂, N₂ nebo H₂ během úprav dojde k narušení povrchu bavlněných vláken a ke zvýšení smáčivosti a barvitelnosti na základě zvýšené přítomnosti karboxylových a karbonylových skupin. Bohužel efekty popsané výše se vytrácí již během 4 týdnů. [29, s. 23]



Obr. 2.12 Rozdílná smáčivost vláken v PLA (bez plazmatické úpravy vlevo, s úpravou vpravo) [18]

Výsledek je ovlivněn dobou expozice, tlakem, či použitým plynem. Tepelné ovlivnění materiálu je minimální. [8, s. 30] Na rozdíl od chemických úprav není výsledek ovlivňován nasákavostí materiálu či zbytky roztoku. Nevýhodou plazmatického ošetření je nepřenosnost procesu mezi různými zařízeními. Navíc plazmatická modifikace je komplexní proces, u kterého nelze předem určit přesné množství depozice funkčních skupin. [30, s. 23]

2.5.2 Chemické úpravy

U dvojic, kde nevzniká dobrá adheze, je možné dosáhnout kompatibility pomocí dalšího členu – kompatibilizátoru. Nejběžnějšími kompatibilizátory jsou sloučeniny na bázi maleinanhydridu a silany. Běžně fungují na základě zvětšení plochy povrchu

výztuže, která je v přímém kontaktu s matricí a umožňuje vznik vazby. Vazba vzniká pomocí –OH skupin z přírodních vláken.

Pro biokompozity s PLA matricí a přírodním plnivem se považují chemické úpravy za nejužitečnější způsob k zajištění kvalitní adheze. Mezi nejčastěji používané úpravy patří alkalická, maleinanhydridová, silanová, acetylace či úprava pomocí enzymů. [8, s. 32]

Silanová úprava

Silan obsahuje bifunkční molekuly, které slouží jako spojovací činidlo mezi polymerem a celulózou. Výsledné vlastnosti kompozitu ovlivňuje několik faktorů např. silanová struktura, organofunkční skupiny, kyselost prostředí, podmínky sušení, chemické složení vlákna apod.

Silan má obecný vzorec $R-Si-X_3$. R skupina reaguje s polymerem. Jedná se o vinyl, γ -aminopropyl, γ -methacrelaxypropyn apod. X představuje skupiny chloro, methoxy, ethoxy apod., které reagují s –OH skupinami na povrchu celulózy. [31, s. 37]

Úprava vláken probíhá ve vodném roztoku silanu s koncentrací 0,25 % až 1,5 %. Doba máčení se pohybuje od jedné do dvou hodin. Do lázně se přidává kyselina octová z důvodu ovlivnění pH. Po vyndání z lázně se vlákna proplachují destilovanou vodou a následně se suší při pokojové teplotě nejméně dva dny. [8, s. 32]

Alkalická úprava

Alkalická úprava spočívá v máčení vláken v roztoku NaOH. NaOH je silně zásaditá sloučenina, která odstraňuje určité množství ligninu, vosků a olejů z povrchu vláken, a tím povrch značně zdrsňuje, což vede k zvýšení schopnosti vytvořit následně mechanickou, ale i chemickou vazbu. Vlákna po úpravě mají vyšší povrchové napětí, což vede k lepší smáčivosti s matricí a k lepším výsledným mechanickým vlastnostem. Vzhledem k tomu, že různá přírodní vlákna mají různé procentuální zastoupení ligninu a dalších látek, je nutné k alkalickým úpravám přistupovat obezřetně a vždy volit správnou koncentraci roztoku NaOH. Úprava nezpůsobuje pouze zvýšení smáčivosti, ale vede ke snížení pórovitosti, zvýšení hustoty a ke zvýšení odolnosti proti navlhání. [8, s. 33] Často se používá jako předúprava k následné silanové úpravě. [31, s. 30]

Acetylace

Acetylace je postup úpravy přírodních vláken, který slouží ke změně hydrofilního charakteru na hydrofobní, tak abychom dosáhli lepší přilnavosti vláken s matricí. Jedná se o náhradu vodíkového atomu ze skupiny –OH za acetylovou skupinu CH₃CO. [8, s. 34]

Maleinanhydridová úprava

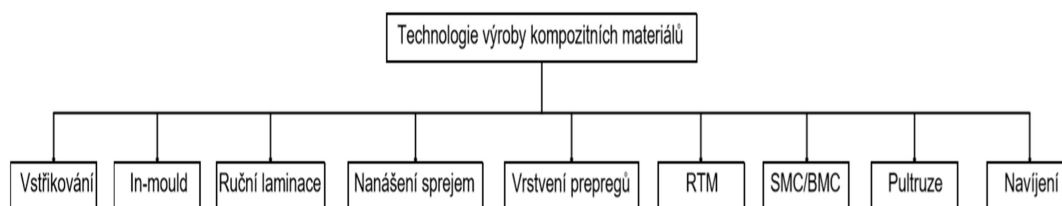
Maleinanhydridová úprava spočívá v přimíchání maleinanhydridu a t-butyl peroxybenzenoátu do taveniny polymeru. Aditivum přispívá ke zlepšení vlastností polymerní matrice, protože funguje jako zesíťovadlo. Zajišťuje dobrou adhezi nejen vláken, ale i ostatních pevných plniv. Výhodou oproti ostatním úpravám je snadná aplikace, kdy lze použít plnivo ve formě granulátu, který stačí v určitém poměru (obvykle 4 až 7 %) přimíchat do polymeru s vlákny. [8, s. 34]

Enzymová úprava

Úpravy pomocí enzymů se používají především v oblasti textilní výroby. Jedná se o způsob, který je poměrně šetrný k životnímu prostředí. Při úpravě vláken na bázi celulózy dochází ke změně morfologie povrchu. Enzymy odstraňují z povrchu vosky a obecně snižují obsah pektinu, ligninu a hemicelulózy. Na základě jejich působení roste smáčivost vláken, což vede ke zvýšení výsledných mechanických vlastností. [8, s. 35]

2.6 Metody přípravy kompozitních materiálů

V současnosti existuje velké množství metod výroby kompozitních materiálů. Výběr vhodné technologie je předurčen tvarem a velikostí výrobku, požadovanými vlastnostmi, kvalitou, sériovostí apod. Na obr. jsou uvedeny některé technologie výroby kompozitních materiálů. Vzhledem k tématu práce budou v následujících odstavcích rozebrány pouze technologie vstřikování a in-mould.



Obr. 2.13 Technologie výroby kompozitních materiálů

2.6.1 Vstřikování

Vstřikování je jednou z nejdůležitějších technologií při výrobě kompozitních materiálů. Umožňuje produkovat velké množství výrobků konstantní kvality. Jedná se o cyklický diskontinuální proces zpracování převážně termoplastů (omezeně lze zpracovat i reaktoplasty a elastomery). Vstřikovací cyklus lze rozdělit do čtyř základních fází – plastifikace v tavicí komoře, vstříknutí taveniny do formy, dotlak a chlazení a vyhození výrobku z formy. Při vstřikování vlákněných kompozitů rozeznáváme dva základní přístupy. D-LFT (direct processing long-fiber-reinforced thermoplastic) je technologie, při které jsou vlákna míchána s polymerem, a následně okamžitě probíhá proces vstřikování. Druhým přístupem je P-LFT (pelletized long-fiber-reinforced thermoplastics), kde se během vstřikování využívají předem vyrobené pelety z polymeru a vláken. Nejzásadnějším problémem výroby kompozitních dílů vstřikováním je fragmentace vláken vlivem smykového namáhání během procesu, zejména v plastifikační komoře a při průchodu taveniny tryskou. Zkrácení vláken má vliv na výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti. Během procesu dochází mimo jiné k rozdílné orientaci vlákněných struktur ve výsledném dílu. Vlivem smykového namáhání taveniny a jejího prudkého zchlazení na povrchu formy dochází ke vzniku neorientované povrchové vrstvy. [1, s. 112-114]

Při použití přírodních vláken je nutné používat nižší teploty než u vláken syntetických. Zpracovatelské teploty se pohybují okolo 175-190 °C. Při vyšších teplotách by mohla být negativně ovlivněna struktura vláken (degradace celulózy). Vzhledem k tomu jsou značně omezeny možnosti výběru vhodného polymeru. [7, s. 32]

2.6.2 Zastřikování „in-mould“

Principem in-mould technologie je nastříknutí taveniny plastu na jiný materiál (kov, textilie apod.). V důsledku spojení dvou materiálů po vsřiku dochází ke zlepšení mechanických vlastností, úspoře plastu, případně ke zlepšení korozní odolnosti či vzhledových vlastností.

Princip spočívá ve vkládání souvislé textilie či folie do dělicí roviny formy a následném zastříknutí taveninou plastu. Lze tak velmi dobře ovlivňovat směrovost výsledného kompozitu na základě způsobu uložení polotovaru do formy. Základními technologiemi jsou tzv. IML (zastřikování folií) a IMD (zastřikování dekoračních

materiálů). Při zastříkávání se obecně používají nižší tlaky než u běžné technologie vstříkávání tak, aby se zabránilo možným deformacím textilie či folie (shrnutí apod.). Chlazení je ovlivněno teplotními a tepelnými vlastnostmi vloženého materiálu. Po vyjmutí výrobku z formy běžně dochází k odstranění přebytečného polotovaru.

Existují různé technologické úpravy, které zlepšují založení polotovaru do formy. Časté je využití podtlaku pro předtvarování zahřáté folie či textilie. [32]

3 Experimentální část

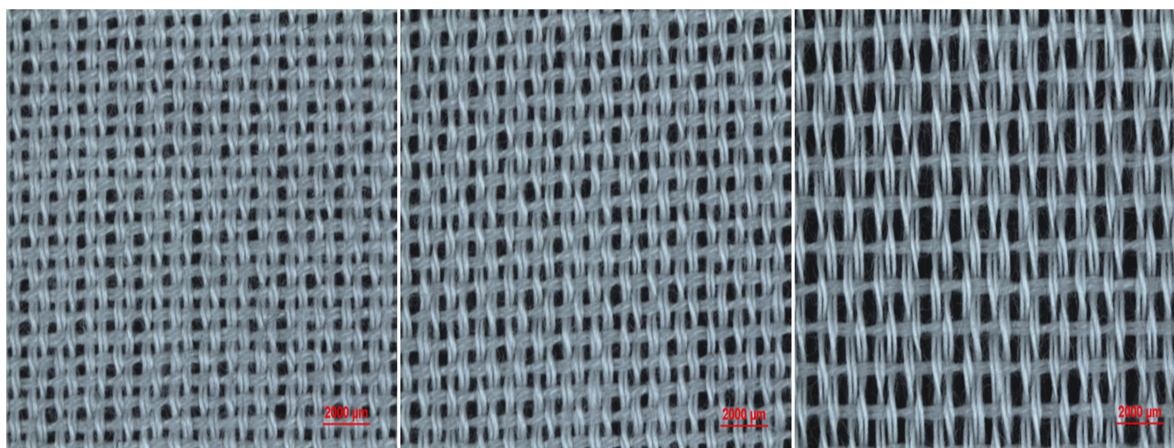
V experimentální části diplomové práce je nejenom popsán proces výroby kompozitních dílů, ale i výzkum a hodnocení vlastností pomocí zkoušek dle norem ISO. Kompozitní vzorky byly připraveny z rozdílných druhů bavlněných tkanin a pletenin zastříknutých polymerem PLA Ingeotm Biopolymer 3001D. Cílem experimentu diplomové práce je vyhodnotit vliv typu bavlněných textilií (tkanin a pletenin), jejich orientace (0°, 45°, 90°) a modifikace (bez, plazmy, acetylace) na konečné vlastnosti kompozitu.

3.1 Textilie

Jako výztuž kompozitních dílů zkoumaných v diplomové práci byly vybrány tři druhy bavlněných tkanin (obr. 3.1) a tři druhy bavlněných pletenin (obr. 3.2), které se lišily hlavně v plošné hustotě respektive v hustotě celkové. Jednotlivé vlastnosti textilií jsou popsány v tab. 3.1 a 3.2.

Tab. 3.1 Vlastnosti tkanin

Druh tkaniny	1T	2T	3T
T_o [tex]	2×20	2×20	2×20
T_u [tex]	2×20	2×20	2×20
D_u [cm ⁻¹]	16	16	16
D_o [cm ⁻¹]	16	12	8
Vazba	plátňová	plátňová	plátňová
P_s [g.m ⁻²]	130	112	96

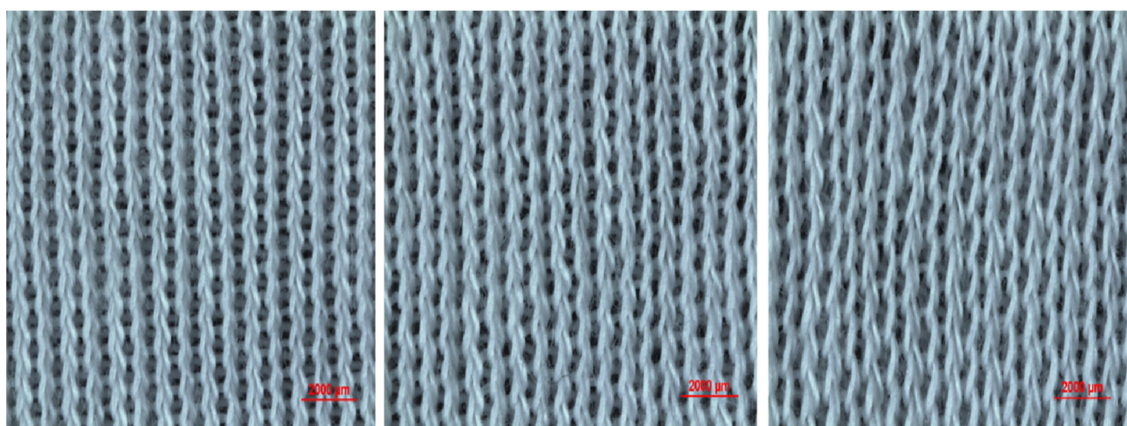


Obr. 3.1 Snímky tkanin (zleva 1T, 2T, 3T)

V práci byly použity tzv. interlok pleteniny. Jedná se o textilie s poměrně složitou strukturou, která zaručuje nestáчивost okrajů a relativně nízkou roztažnost oproti klasickým jednolícniím. V principu jde o dvojitou, vzájemně provázanou pleteninu.

Tab. 3.2 Vlastnosti pletenin

Druh pleteniny	1P	2P	3P
T [tex]	20	20	20
H_s [m⁻¹]	2208	2440	2480
H_f [m⁻¹]	1520	1140	892
H_c [m⁻²]	6712320	5563200	4424320
P_s [g.m⁻²]	265,4	246,8	246,5



Obr. 3.2 Snímky pletenin (zleva 1P, 2P, 3P)

3.2 Příprava textilií

Prvním krokem přípravy bylo vytvoření přístřihů z textilií navinutých v rolích tak, aby bylo možné je zakládat do vstřikovací formy.

V dalším kroku byly přístřihy jednotlivých textilií rozděleny vždy na tři skupiny. První skupina zůstala bez povrchové úpravy. Druhá byla podrobena fyzikální modifikaci – nízkoteplotní plazmě a třetí chemické modifikaci – acetylaci.

3.2.1 Plazmatická modifikace

K plazmatické modifikaci textilií byla použita technologie nízkoteplotního plazmatu – konkrétně DPD (atmosférický dielektrický bariérový výboj). Plazmování probíhalo na zařízení ve firmě MSV system CZ. Parametry procesu jsou uvedeny v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Parametry plazmatické modifikace

Parametr	Nastavená hodnota
Napětí [kV]	20
Frekvence [kHz]	3-10
Nominální výkon [W]	200
Vzdálenost mezi elektrodami [mm]	15
Čas modifikace [s]	5
Pracovní plyn	vzduch
Relativní vlhkost [%]	40

3.2.2 Acetylace

Vzorky pletenin a tkanin byly namočeny v acetylační lázni v uzavřené nádobě po dobu 24 hod při 20 °C. Následně proběhl oplach pod tekoucí vodou až do neutrálního pH a neutralizace uhličitánem sodným o koncentraci 1 g·l⁻¹. Nakonec byly textilie vysušeny při běžné teplotě.

Tab. 3.4 Parametry acetylační lázně

Složení lázně	Množství [g]
Anhydrid kyseliny octové	170
Kyselina sírová	2
Kyselina octová	1800

3.3 Výroba kompozitních hybridních vzorků

Po vytvoření textilních přístřihů a následných předúpravách následoval proces výroby kompozitních vzorků. Jako matrice byl zvolen materiál PLA, konkrétně Ingeotm Biopolymer 3001D od firmy NatureWorks. Parametry jsou popsány v tab. 3.5. Vzhledem k navlhavosti PLA bylo nutné ji před zpracováním vysušit. Sušení probíhalo při 80 °C po dobu 8 hodin v horkovzdušné sušárně značky Motan.

Tab. 3.5 Vybrané vlastnosti Ingeotm Biopolymer 3001D [33]

Ingeo tm Biopolymer 3001D	Rozměr
Hustota	[g·cm ³] 1,24

MFR (210 °C, 2,16 kg)	[g/10 min]	22
Pevnost v tahu	[MPa]	62
Poměrné prodloužení v tahu	[%]	3,5
Rázová houževnatost (Izod)	[J·m ⁻¹]	16
Pevnost v ohybu	[MPa]	108
Modul pružnosti v ohybu	[MPa]	3600
Teplota tvarové stálosti	[°C]	55

3.3.1 Stroj

Zastříkávání bylo provedeno na hydraulickém bezsloupkovém vstříkolisu Engel Victory 1800/300 Tech s uzavíratelnou tryskou. Vstříkovací parametry (tab. 3.6) byly nastaveny tak, aby nedocházelo ke shrnování textilií či k výskytu jiných vad.

Tab. 3.6 Parametry stroje

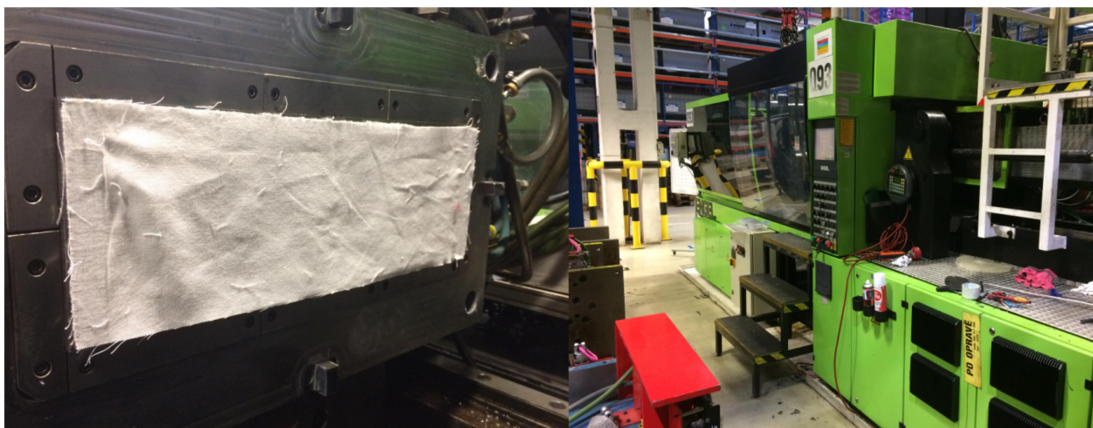
Název	Engel Victory 1800/300 Tech
Typ řízení	CC 200
Pohon	hydraulický
Uzavírací síla	3000 kN
Průměr šneku	70 mm

Tab. 3.7 Parametry vstříkování

Teplotní profil válce	[°C]	200-200-195-185-175-170-45
Teplota formy	[°C]	20
Teplota hork. rozvodu	[°C]	210-210
Dávka	[mm]	120
Dekomprese	[mm]	0
Zpětný tlak	[bar]	5
Obvod. rychlost šneku při dávkování	[m/min]	25
Rychlost vstříkování	[mm/s]	44
Dotlak	[bar]	50
Doba dotlaku	[s]	4
Doba chlazení	[s]	30

3.3.2 Forma

Tvar dutiny formy měl rozměry $525 \times 170 \times 2,6$ mm. Jednalo se o dvojnásobnou formu s kuželovým vtokem, který byl umístěn kolmo na dělicí rovinu a přecházel v rozváděcí kanál, jenž pomyslně dělil výrobek na dvě shodné desky. Výsledkem zastríkování byly desky o rozměrech 525×170 mm.



Obr. 3.3 Zakládání textilie a pohyblivá strana formy (vlevo), vstřikovací stroj Engel Victory (vpravo)

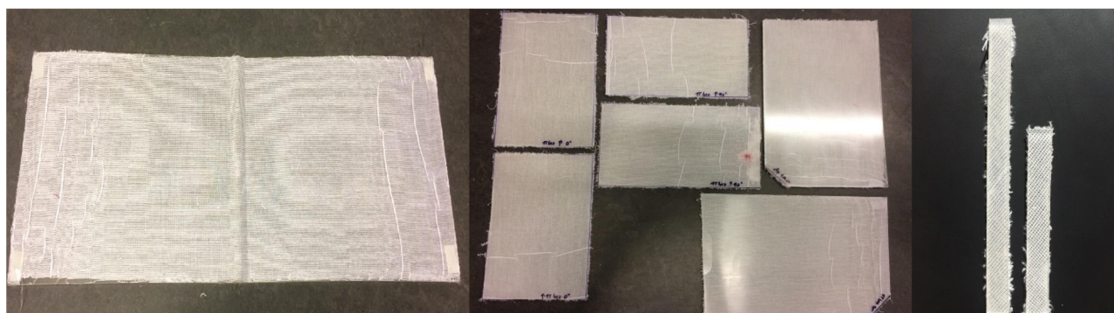
3.4 Příprava zkušebních těles

Z desek vyrobených na vstřikovacím stroji bylo nutné následně vytvořit vzorky pro zkoušky vybraných vlastností. Původně měly být vzorky vyřezány pomocí vodního paprsku, ale docházelo k tomu, že desky praskaly a tělesa tímto způsobem nebylo možné připravit (obr 3.4).



Obr. 3.4 Popraskaná tělesa po řezání vodním paprskem

Nakonec byla zkušební tělesa z desek vyřezána na pásové pile. Zkušební tělesa měla dva rozměry. Pro ohybovou zkoušku dle ČSN EN ISO 178 a tahovou zkoušku ČSN EN ISO 527 měla rozměry 120×10 mm. Pro zkoušku rázové houževnatosti dle ČSN EN ISO 179-1 byly rozměry 80×10 mm.



Obr. 3.5 Deska, sada pro tělesa, tělesa

Vzhledem k anizotropii kompozitních materiálu byly vyřezány vzorky s orientací 0°, 45° a 90° oproti osnově tkaniny respektive sloupkům pleteniny. Celkem bylo připraveno 1620 vzorků.

3.5 Hodnocení vlastností biokompozitů

Výsledné uvažované hodnoty (při všech zkouškách) byly vypočteny jako střední hodnoty výběru (\bar{x}) dle vzorce 3.1 se směrodatnou odchylkou (s) dle vzorce 3.2.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.2)$$

kde je:

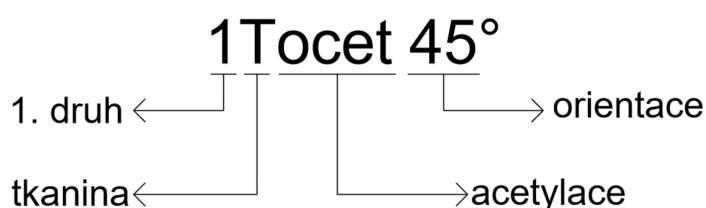
\bar{x} ... střední hodnota výběru

x_i ... dílčí hodnota i-tého prvku výběru

n ... počet prvků výběru

Z naměřených a vypočtených dat byly pro přehlednost výsledků vytvořeny sloupcové grafy, kde výše grafu ukazuje zjištěnou střední hodnotu výběru a směrodatná odchylka je zobrazena jako chybová úsečka.

Pro orientaci v naměřených datech byla jednotlivá zkušební tělesa označována tak, že první dva znaky udávají, o jakou tkaninu či pleteninu se jedná (viz tab. 3.1, 3.2), následuje klíčové slovo, které popisuje druh předúpravy a poslední číslo představuje směr orientace (obr. 3.6). Vzorčky ze zvoleného PLA Ingeotm Biopolymer 3001D jsou označeny jako „PLA“.



Obr. 3.6 Příklad značení těles

3.6 Zkouška v ohybu

Zkouška v ohybu (dle ČSN EN ISO 178) byla měřena na trhacím stroji Hounsfield H10KT se snímací hlavou HTE-500N schopnou měřit do velikosti síly 500 N. Kondicionace proběhla dle normou ČSN EN ISO 291 preferovaných 23/50. Zkušební tělíska o rozměrech 120×10 mm (délka×šířka) byla umístěna na dvě podpory vzdálené 40 mm. Předtím byla vlastním měřením určena a zapsána tloušťka vzorků.



Obr. 3.7 Hounsfield H10KT

Pro zjišťování modulu pružnosti probíhalo měření při rychlosti 1 mm/min s předpětím dle normy. Měření bylo uskutečněno na deseti vzorcích (pokud byly k dispozici, jinak byl vždy naplněn alespoň minimální počet pěti vzorků daný normou). Naměřené hodnoty byly zaznamenávány programem Qmat. Pro sekantový modul bylo nutné zjistit napětí (σ_{f2} a σ_{f1}) při poměrném prodloužení 0,05 % (ε_{f1}) respektive při 0,25 % (ε_{f2}). Samotný modul pružnosti byl následně vypočten na základě vztahu 3.3.

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} [MPa] \quad (3.3)$$

kde je:

E_f ... sekantový modul [MPa]

σ_{f2} ... napětí při poměrném prodloužení 0,25 %

σ_{f1} ... napětí při poměrném prodloužení 0,05 %

ε_{f2} ... poměrné prodloužení 0,25 %

ε_{f1} ... poměrné prodloužení 0,05 %

Tab. 3.8 Vypočtené hodnoty z ohybové zkoušky

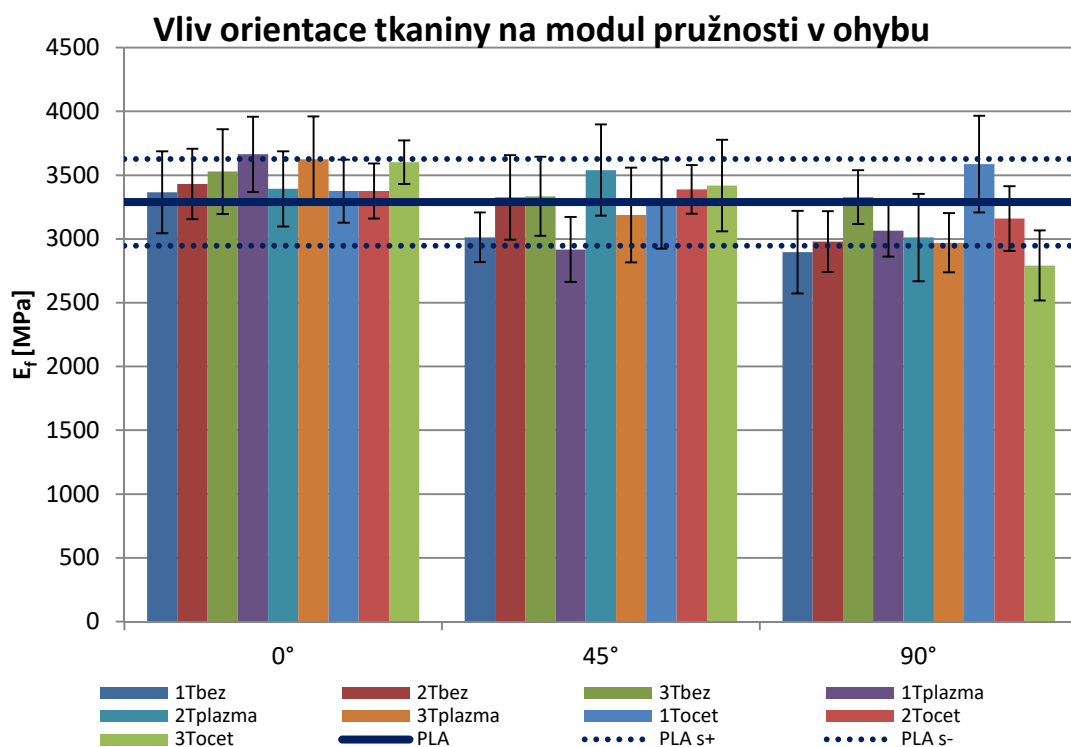
Tělesa	E_f [MPa]	σ_{fm} [MPa]
PLA	3287±340	102,9±3,5
1Tocet 90°	3587±378	124,0±6,7
1Tocet 45°	3273±350	117,2±3,1
1Tocet 0°	3258±248	113,3±16,3
1Tbez 90°	2897±323	109,0±5,5
1Tbez 45°	3013±195	107,5±3,0
1Tbez 0°	3366±321	123,1±7,9
1Tplazma 90°	3066±204	112,7±4,4
1Tplazma 45°	2918±255	111,2±8,0
1Tplazma 0°	3664±294	126,9±7,2
2Tocet 90°	3160±255	111,8±9,1
2Tocet 45°	3388±191	113,4±5,0
2Tocet 0°	3375±215	119,0±9,5
2Tbez 90°	2980±238	108,9±5,9
2Tbez 45°	3326±332	113,7±6,7
2Tbez 0°	3431±276	123,0±8,8
2Tplazma 90°	3011±342	109,9±6,0
2Tplazma 45°	3392±294	117,8±6,5
2Tplazma 0°	3539±357	123,3±7,2
3Tocet 90°	2792±276	97,4±6,7
3Tocet 45°	3419±359	112,7±6,9
3Tocet 0°	3602±171	104,9±3,9
3Tbez 90°	3328±211	112,2±4,1
3Tbez 45°	3334±309	112,9±6,8
3Tbez 0°	3528±332	129,4±9,4
3Tplazma 90°	2970±232	106,3±4,0
3Tplazma 45°	3188±371	113,5±5,2
3Tplazma 0°	3623±338	129,2±6,0

Tělesa	E_f [MPa]	σ_{fm} [MPa]
PLA	3287±340	102,9±3,5
1Pocet 90°	2522±147	96±5,0
1Pocet 45°	2704±304	98,6±5,4
1Pocet 0°	2870±296	96,8±10,8
1Pbez 90°	2478±288	87,7±6,4
1Pbez 45°	2892±174	99,5±5,8
1Pbez 0°	3149±258	109,2±8,4
1Pplazma 90°	2986±189	104,9±9,8
1Pplazma 45°	2654±246	95,8±5,3
1Pplazma 0°	2879±317	98,1±6,1
2Pocet 90°	2457±289	87,6±5,1
2Pocet 45°	2669±228	95,7±5,0
2Pocet 0°	2909±199	100,1±8,4
2Pbez 90°	2835±392	96,8±6,3
2Pbez 45°	2814±384	94,9±6,4
2Pbez 0°	2701±99	95,8±7,5
2Pplazma 90°	2631±245	90,9±2,3
2Pplazma 45°	2406±224	94,5±4,7
2Pplazma 0°	3321±571	118,6±3,8
3Pocet 90°	2824±321	95,1±4,0
3Pocet 45°	2971±270	107,0±5,2
3Pocet 0°	3262±244	101,4±2,5
3Pbez 90°	2561±359	95,2±4,4
3Pbez 45°	3030±207	107±3,4
3Pbez 0°	3184±250	109,1±3,1
3Pplazma 90°	2939±471	98,1±6,9
3Pplazma 45°	3199±163	114,5±3,5
3Pplazma 0°	3608±151	101,1±2,7

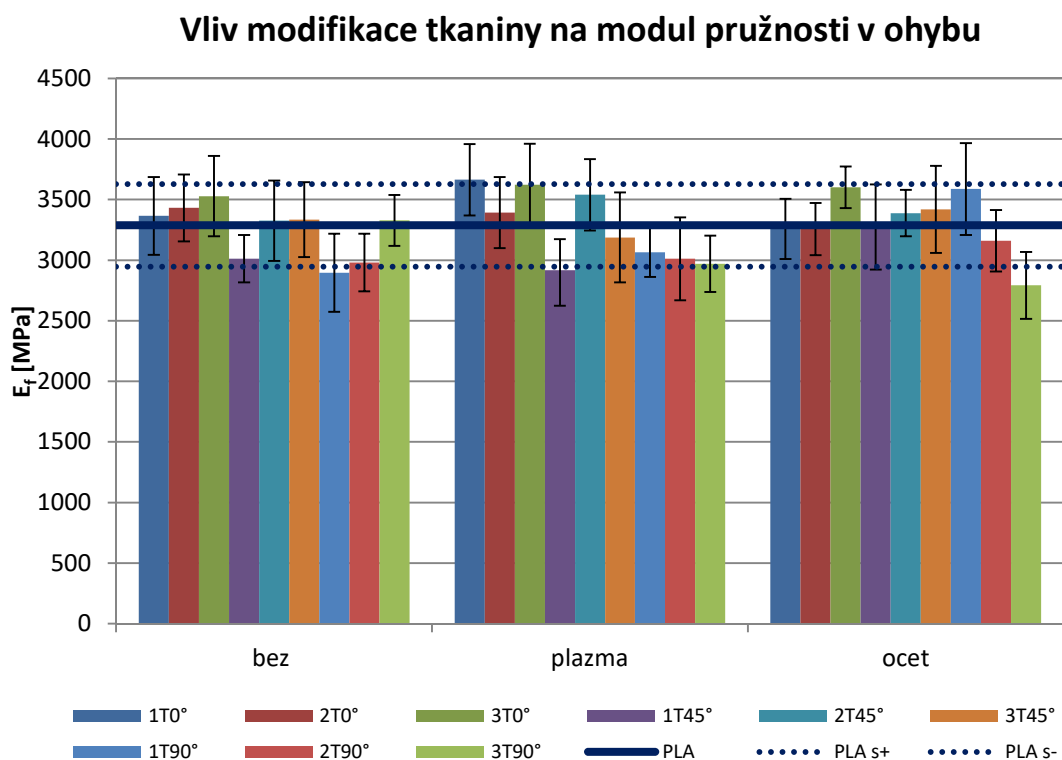
3.6.1 Vyhodnocení získaných hodnot

Zkoušky v ohybu proběhly dle normy ČSN EN ISO 178. Byla zjišťována mez pevnosti v ohybu a sekantový modul pružnosti v ohybu. V grafech 3.1, 3.2, 3.3 a 3.4 je zobrazen vliv orientace a případné modifikace textilií na vlastnosti v ohybu.

Modul pružnosti v ohybu

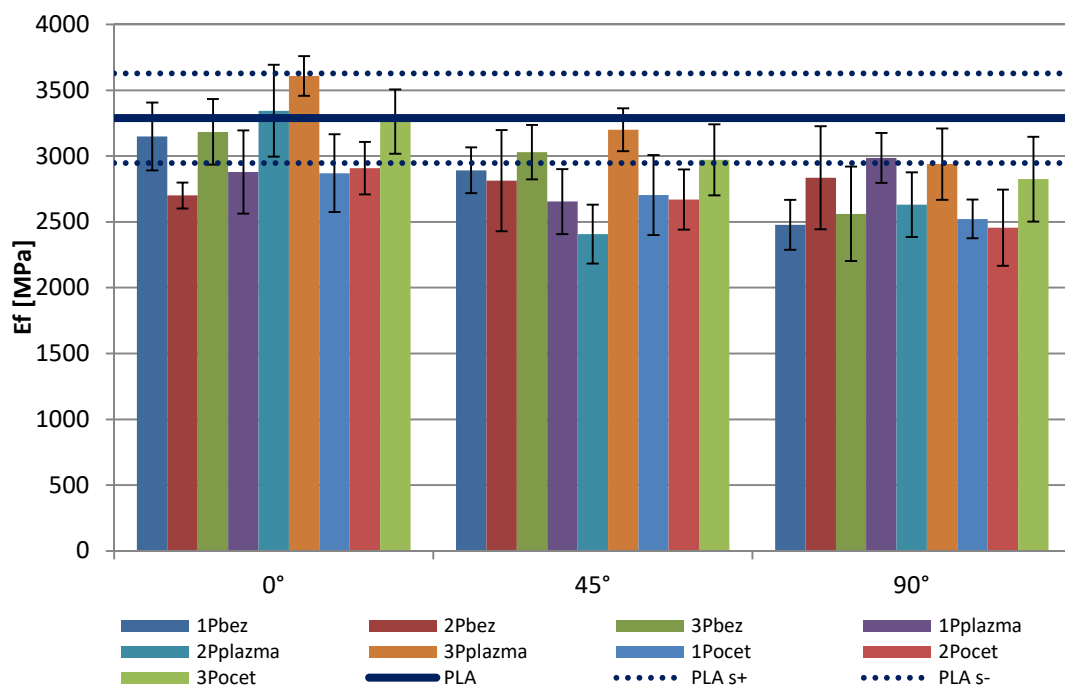


Graf 3.1 Vliv orientace tkaniny na modul pružnosti v ohybu



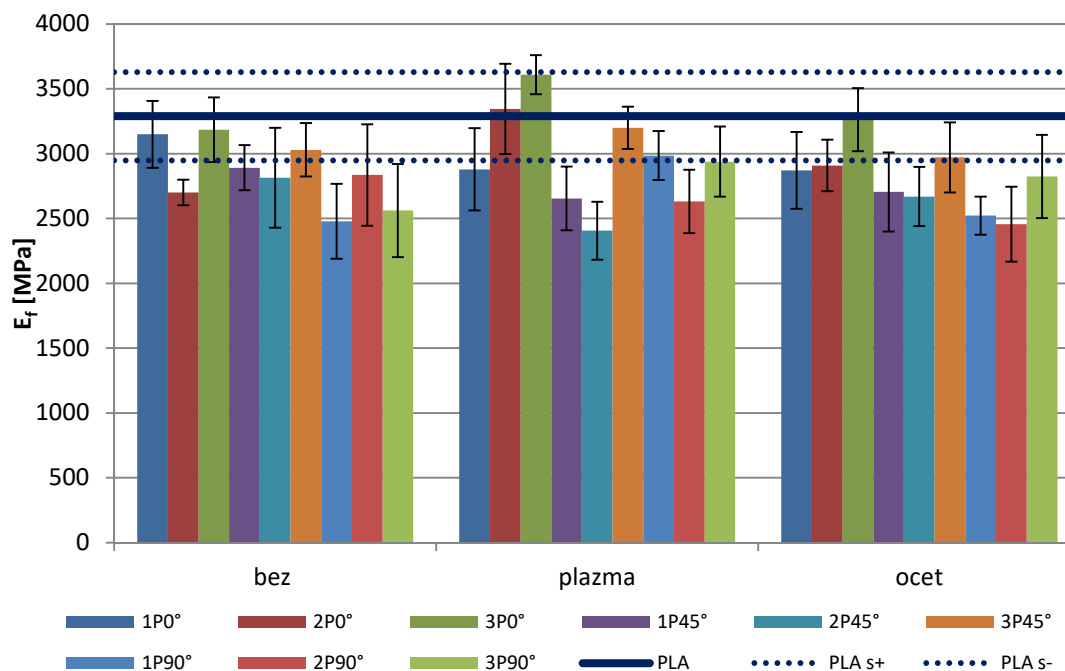
Graf 3.2 Vliv modifikace tkaniny na modul pružnosti v ohybu

Vliv orientace pleteniny na modul pevnosti v ohybu



Graf 3.3 Vliv orientace pleteniny na modul pevnosti v ohybu

Vliv modifikace pleteniny na modul pevnosti v ohybu



Graf 3.4 Vliv modifikace pleteniny na modul pevnosti v ohybu

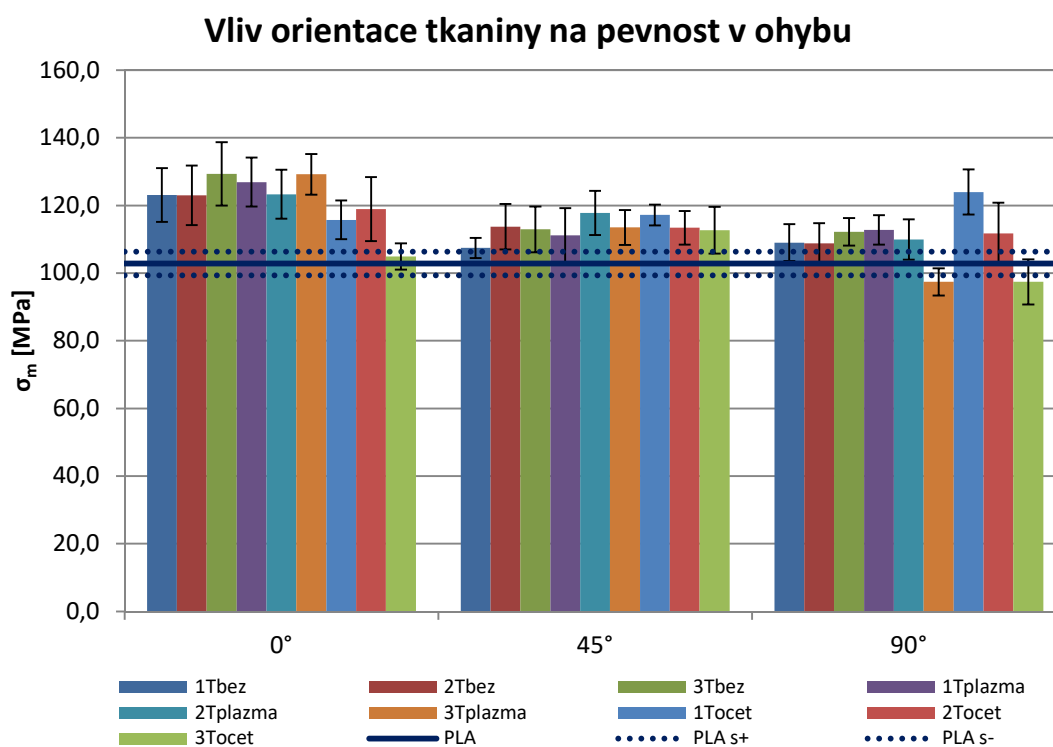
Na základě grafů 3.1, 3.2 a dat z tabulky 3.8 je u vzorků s tkaninou patrné:

1. Orientace tkaniny nezpůsobuje, vzhledem ke směrodatným odchylkám, výraznou změnu modulu pružnosti v ohybu.
2. Na základě naměřených dat se neobjevil žádný trend, který by upřednostňoval některou z povrchových modifikací.
3. Vzhledem k směrodatné odchylce nedochází zastříknutím tkaniny k výraznému růstu oproti vzorkům PLA.

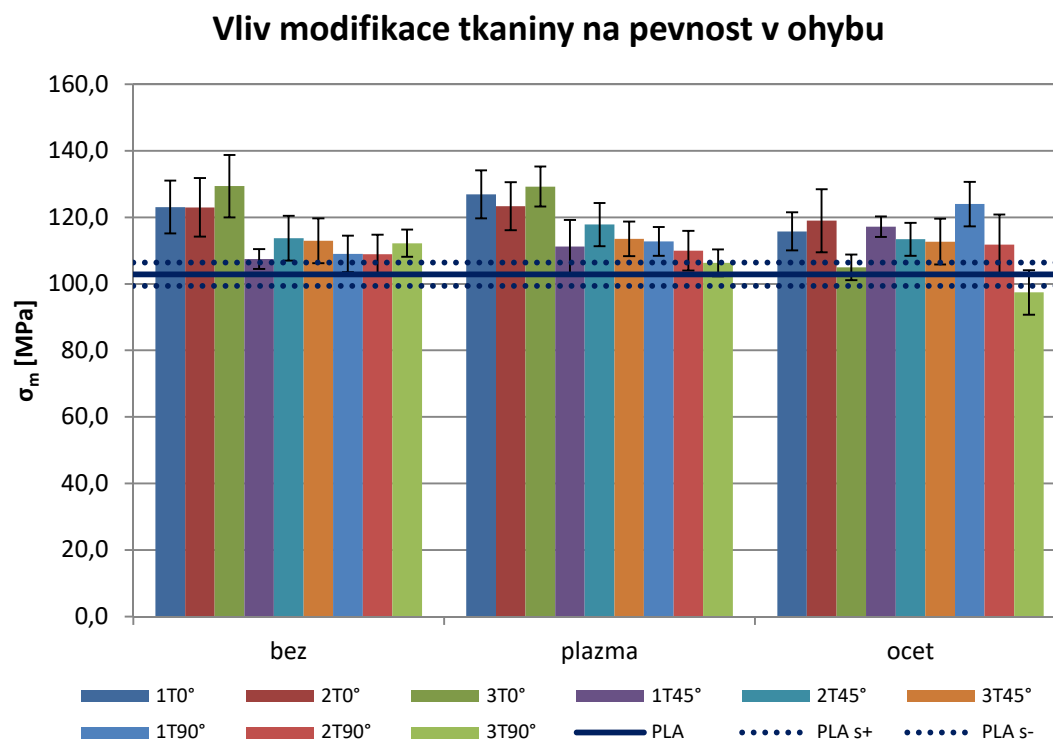
Na základě grafů 3.3, 3.4 a dat z tabulky 3.8 je u vzorků s pleteninou patrné:

1. Neexistuje orientace pleteniny, u které by docházelo k výraznému zvýšení modulu pružnosti.
2. Z naměřených dat nevyplývá žádné doporučení k výhodnosti použití plazmatické modifikace či acetylace.
3. U některých řad vzorků se objevilo snížení modulu pružnosti oproti PLA. Šlo převážně o orientaci 90°, konkrétně 1Pbez 90°, 1Pocet 90°, 2Pocet 90° a 2Pplazma 45°. Jedná se poklesy maximálně 10 % (1Pocet 90°).

Mez pevnosti v ohybu

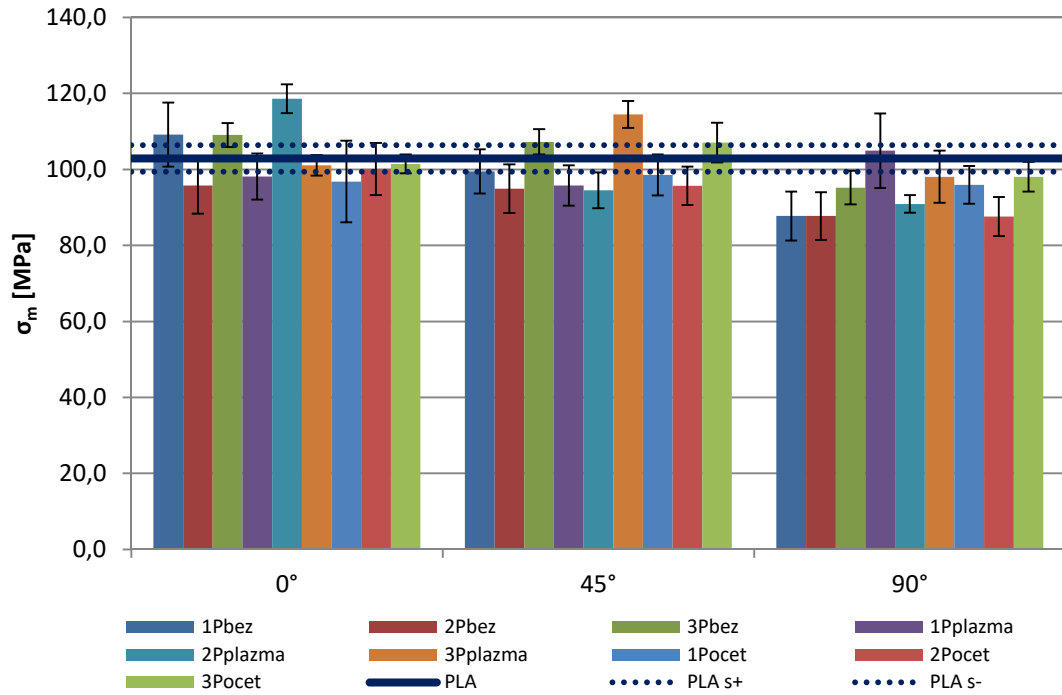


Graf 3.5 Vliv orientace tkaniny na pevnost v ohybu



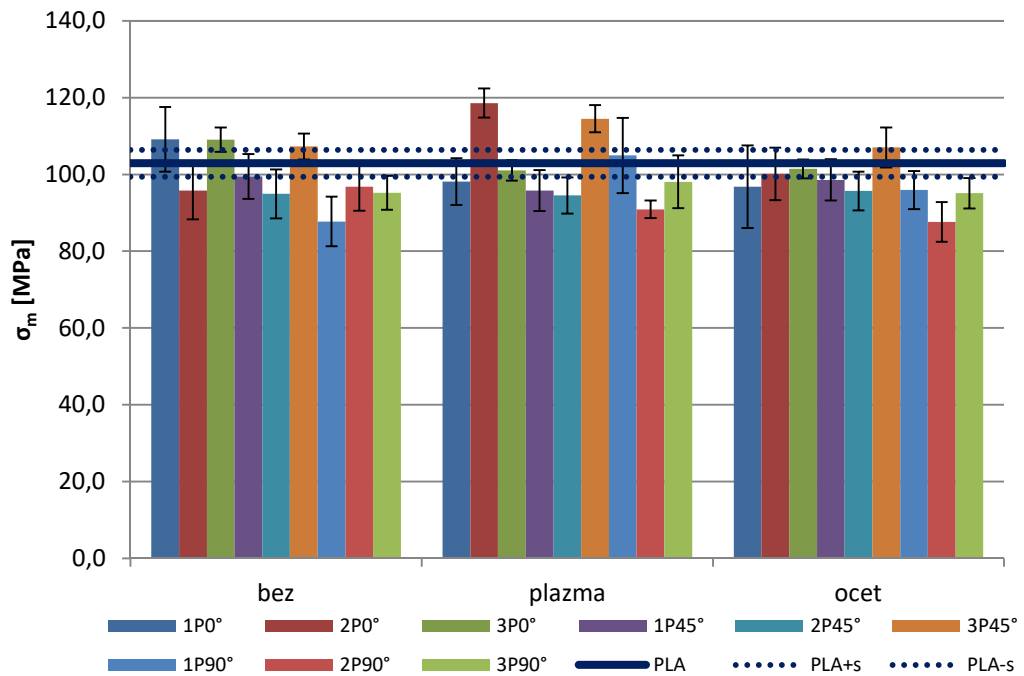
Graf 3.6 Vliv modifikace tkaniny na pevnost v ohybu

Vliv orientace pleteniny na pevnost v ohybu



Graf 3.7 Vliv orientace pleteniny na pevnost v ohybu

Vliv modifikace pleteniny na pevnost v ohybu



Graf 3.8 Vliv modifikace pleteniny na pevnost v ohybu

Na základě grafů 3.5, 3.6 a tab. 3.8 je u vzorků vyztužených tkaninou patrné, že:

1. U tělísek vyztužených tkaninou došlo k mírnému zvýšení pevnosti v ohybu zejména u šarží s orientací 0°, konkrétně 1Tplazma 0°, 1Tbez 0°, 2Tplazma 0°, 2Tbez 0°, 3Tplazma 0° a 3Tbez 0°. Vzhledem k směrodatným odchylkám se jedná o růst pevnosti pouze v rozsahu do 10 % oproti tělískům PLA. Vzhledem ke křížovému uspořádání tkanin je zajímavé, že zvýšení se výrazněji neobjevuje i u těles s orientací 90°. Jediným zástupcem, u kterého došlo ke zvýšení, byl 1Tocet 90°.
2. Největšího růstu meze pevnosti s ohledem na modifikaci dosáhla tělíska bez modifikace a vzorky ošetřené plazmou. Tělíska podrobená acetylaci nevykázala výraznou změnu oproti šarži PLA.

Na základě grafů 3.7, 3.8 a tab. 3.8 je u vzorků vyztužených pleteninou patrné, že:

1. Není patrný žádný trend, který by upřednostňoval typ pleteniny, orientaci či modifikaci.
2. Mírné zvýšení oproti PLA se objevilo u 2Pplazma 0° a 3Pplazma 45°.
3. Naopak k mírnému poklesu meze pevnosti došlo u 1Pbez 0°, 2Pplazma 90° a 2Pocet 90°.

3.7 Zkouška v tahu

Zkouška v tahu (dle ČSN EN ISO 527) byla měřena na trhacím stroji TiraTest 2300 při rychlosti 5 mm/min, respektive 3 mm/min do dosažení předpětí 2 N. Počáteční vzdálenost čelistí byla 70 mm. Zjišťovala se mez pevnosti v tahu, která pro dané materiály odpovídá napětí při přetržení a jmenovité poměrné prodloužení při přetržení. K vyhodnocení se používal program LabNet. Zkouška probíhala v preferovaných podmínkách 23/50 dle ČSN EN ISO 291.



Obr. 3.8 TiraTest 2300

U jednotlivých tělísek o rozměrech 120×80 mm (délka×šířka) byla ještě před zkoušením přeměřena a zapsána tloušťka. Každá měřená šarže představovala deset vzorků (pokud byly k dispozici, jinak bylo vždy použito alespoň minimálního počtu šesti tělísek dle normy).

Tab. 3.9 Vypočtené hodnoty z tahové zkoušky

Tělesa	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
PLA	50,9±2,6	3,6±0,2
1Tocet 90°	49,8±3,6	3,6±0,4
1Tocet 45°	54,2±4,6	3,3±0,5
1Tocet 0°	47,9±5,1	3,6±0,2
1Tplazma 90°	49,2±2,0	3,5±0,2
1Tplazma 45°	48,6±2,4	3,5±0,2
1Tplazma 0°	48,8±3,2	3,2±0,4
1Tbez 90°	50,0±3,6	3,6±0,4
1Tbez 45°	51,6±3,6	3,6±0,1
1Tbez 0°	50,5±2,5	3,5±0,4
2Tocet 90°	52,9±3,7	3,6±0,2
2Tocet 45°	53,1±2,3	3,6±0,2
2Tocet 0°	54,5±3,9	3,6±0,2
2Tplazma 90°	55,1±3,4	3,7±0,2
2Tplazma 45°	54,7±2,6	3,7±0,2
2Tplazma 0°	55,0±2,9	3,7±0,2

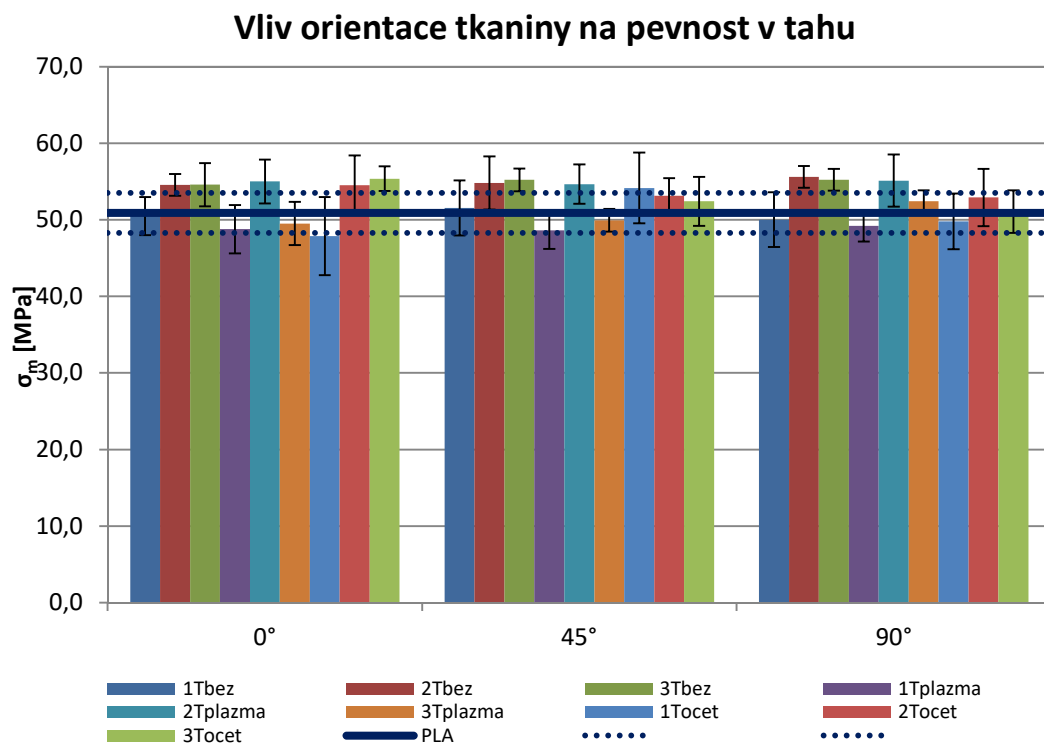
Tělesa	σ_m [MPa]	ϵ_{tb} [%]
PLA	50,9±2,6	3,6±0,2
1Pocet 90°	49,8±3,6	3,6±0,2
1Pocet 45°	54,2±4,6	3,6±0,4
1Pocet 0°	47,9±5,1	3,3±0,5
1Pplazma 90°	49,2±2,0	3,6±0,2
1Pplazma 45°	48,6±2,4	3,5±0,2
1Pplazma 0°	48,8±3,2	3,2±0,2
1Pbez 90°	50,0±3,6	3,6±0,4
1Pbez 45°	51,6±3,6	3,8±0,4
1Pbez 0°	50,5±2,5	3,3±0,1
2Pocet 90°	50,3±1,4	3,7±0,2
2Pocet 45°	50,6±1,8	3,8±0,3
2Pocet 0°	50,9±3,3	3,8±0,3
2Pplazma 90°	50,5±3,8	3,9±0,6
2Pplazma 45°	51,9±1,9	4,0±0,5
2Pplazma 0°	49,6±2,3	3,6±0,6

2Tbez 90°	55,6±1,4	3,7±0,2	2Pbez 90°	50,3±1,7	3,5±0,2
2Tbez 45°	54,8±3,5	3,8±0,2	2Pbez 45°	52,4±1,1	3,7±0,3
2Tbez 0°	54,6±1,4	3,6±0,2	2Pbez 0°	51,4±0,5	3,6±0,2
3Tocet 90°	51,1±2,8	3,5±0,2	3Pocet 90°	52,5±1,3	3,9±0,3
3Tocet 45°	52,4±3,2	3,7±0,2	3Pocet 45°	52,6±3,0	3,7±0,2
3Tocet 0°	55,4±1,6	3,9±0,2	3Pocet 0°	52,0±1,4	3,6±0,2
3Tplazma 90°	52,5±1,4	3,6±0,2	3Pplazma 90°	50,4±1,2	3,4±0,3
3Tplazma 45°	49,9±3,1	3,7±0,4	3Pplazma 45°	54,9±2,5	3,9±0,2
3Tplazma 0°	49,5±2,5	3,6±0,3	3Pplazma 0°	57,3±1,1	4,1±0,3
3Tbez 90°	55,2±1,4	3,6±0,2	3Pbez 90°	51,6±3,5	3,5±0,3
3Tbez 45°	55,2±1,5	3,6±0,2	3Pbez 45°	54,1±1,5	3,7±0,1
3Tbez 0°	54,6±2,8	3,7±0,3	3Pbez 0°	53,7±2,8	3,8±0,4

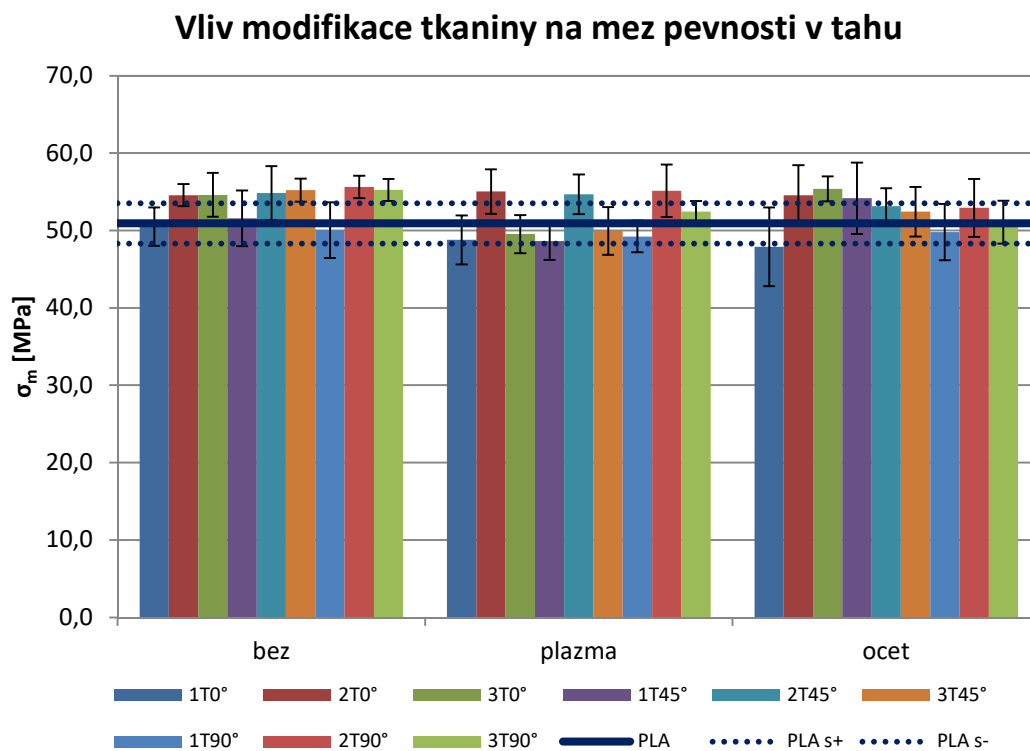
3.7.1 Vyhodnocení získaných hodnot

Při pohledu na hodnoty jmenovitého prodloužení při přetržení (tab. 3.9) jak u tělísek s tkaninou, tak s pleteninou, můžeme vzhledem ke směrodatné odchylce tvrdit, že nedošlo k významným změnám oproti vzorkům PLA.

Mez pevnosti v tahu

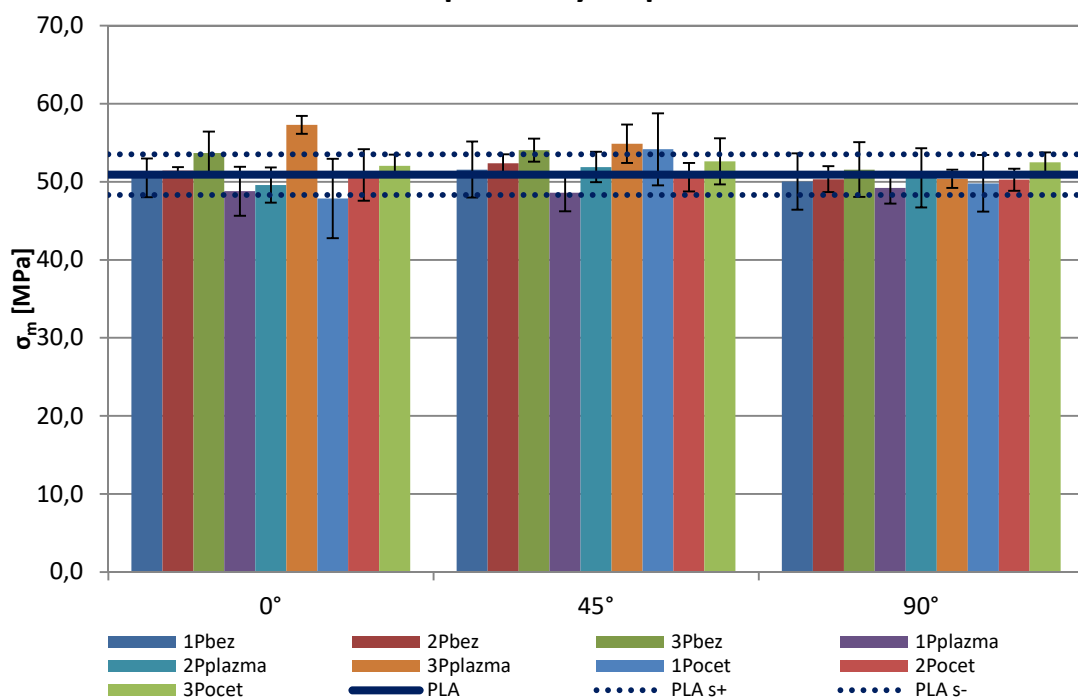


Graf 3.9 Vliv orientace tkaniny na pevnost v tahu



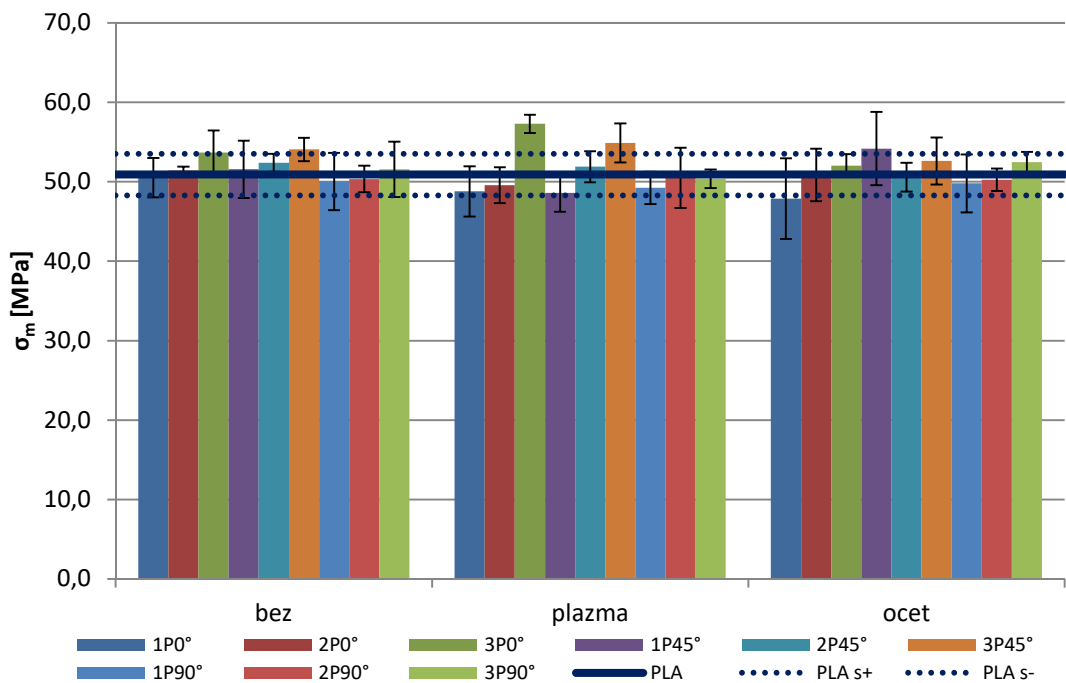
Graf 3.10 Vliv modifikace tkaniny na mez pevnosti

Vliv orientace pleteniny na pevnost v tahu



Graf 3.11 Vliv orientace pleteniny na pevnost v tahu

Vliv modifikace pleteniny na pevnost v tahu



Graf 3.12 Vliv modifikace pleteniny na pevnost v tahu

Na základě grafů 3.9, 3.10, 3.11 a 3.12 je vidět, že zastříknutí žádného druhu pleteniny či tkaniny nemá významný vliv na mez pevnosti v tahu. Není možné vysledovat žádný výrazný trend vzhledem k orientaci či k povrchové modifikaci zakládáné textilie. Jedinou výjimku představuje šarže 3Pplazma 0°, kde došlo k mírnému 5% nárůstu pevnosti oproti PLA.

3.8 Zkoušky rázové houževnatosti

Pro stanovení rázové houževnatosti byla zvolena Charpyho metoda. Ke zkoušení sloužilo zkušební zařízení Resil 5.5 a probíhalo dle normy ČSN EN ISO 179-1. Vzhledem k charakteru použitých textilií a snaze zjistit mechanické vlastnosti korespondující s nelaboratorním využitím zkoušených materiálů probíhaly zkoušky ve směru rázu na širší stranu (f). Ve snaze vyhodnotit vliv vyztužení od tkanin respektive pletenin byl ráz veden proti plastové části kompozitu tak, aby textilní materiál byl během rázu natahován.



Obr. 3.9 Resil 5.5

Před zkouškou byly přeměřeny rozměry jednotlivých těles – šířka (b) a tloušťka (h). K přerážení bylo použito kyvadlo o nominální energii 5 J. Před vlastním měřením bylo nutné provést kalibraci přístroje na mechanický odpor a odpor vzduchu při spuštění „naprázdno“. Následně byly vzorky umístovány na podpěry a na základě rázu byla zjišťována a zapisována energie potřebná k jejich přerážení případně typ přerážení (u všech vzorků došlo k úplnému lomu – typ přerážení C). Po měření došlo k vypočtení rázové houževnatosti a_{cU} dle vztahu 3.4.

$$a_{cU} = \frac{E_c}{hb} \times 10^3 \text{ [kJ/m}^2\text{]} \quad (3.4)$$

kde je:

E_c ... energie potřebná k přeražení zkušební tělesa [J]

h ... tloušťka zkušební tělesa [mm]

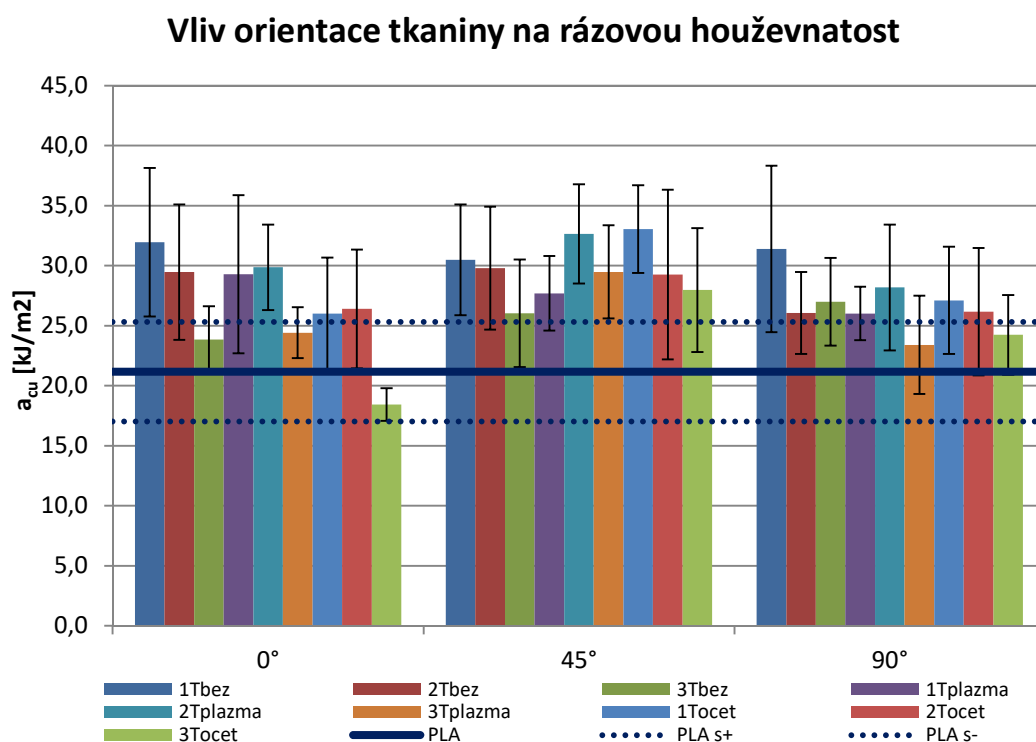
b ... šířka zkušební tělesa [mm]

Tab. 3.10 Vypočtené hodnoty z rázové zkoušky

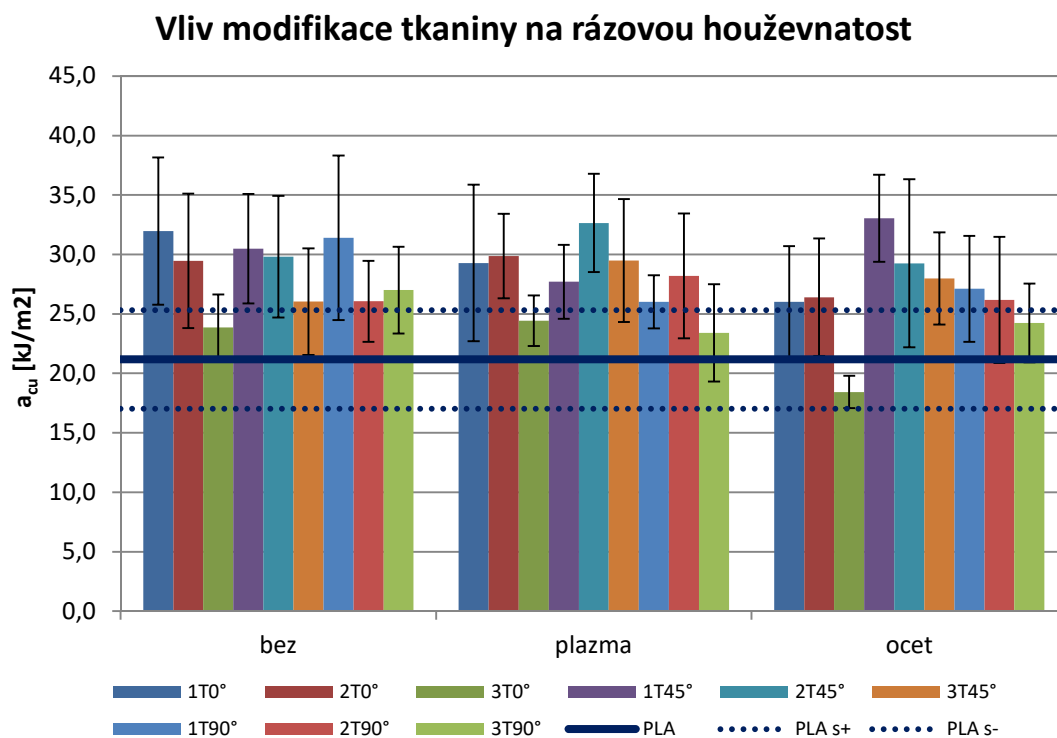
Tělesa	acU[kJ/m ²]	Tělesa	acU[kJ/m ²]
PLA	21,2±4,1	PLA	21,2±4,1
1Tocet 90°	27,1±4,5	1Pocet 90°	22,2±3,4
1Tocet 45°	36,5±9,6	1Pocet 45°	25,3±6,3
1Tocet 0°	26,0±4,7	1Pocet 0°	22,3±5,5
1Tbez 90°	31,4±6,9	1Pbez 90°	24,4±3,0
1Tbez 45°	30,5±4,6	1Pbez 45°	28,5±6,9
1Tbez 0°	32,8±7,8	1Pbez 0°	25,0±4,1
1Tplazma 90°	26,0±2,2	1Pplazma 90°	21,6±2,4
1Tplazma 45°	27,7±3,1	1Pplazma 45°	28,1±4,9
1Tplazma 0°	29,3±6,6	1Pplazma 0°	25,2±6,3
2Tocet 90°	26,2±5,3	2Pocet 90°	21,9±3,9
2Tocet 45°	29,3±7,1	2Pocet 45°	25,2±3,8
2Tocet 0°	26,4±4,9	2Pocet 0°	22,9±2,6
2Tbez 90°	26,1±3,4	2Pbez 90°	19,6±1,9
2Tbez 45°	29,8±5,1	2Pbez 45°	25,8±3,8
2Tbez 0°	29,5±5,6	2Pbez 0°	26,2±4,1
2Tplazma 90°	28,2±5,2	2Pplazma 90°	18,8±2,2
2Tplazma 45°	32,6±4,1	2Pplazma 45°	28,7±4,2
2Tplazma 0°	29,9±3,6	2Pplazma 0°	21,7±4,0
3Tocet 90°	24,2±3,3	3Pocet 90°	24,3±4,0
3Tocet 45°	28,0±5,2	3Pocet 45°	26,1±4,7
3Tocet 0°	18,4±1,4	3Pocet 0°	24,7±4,0
3Tbez 90°	27,0±3,7	3Pbez 90°	19,3±2,0
3Tbez 45°	26,0±4,5	3Pbez 45°	31,4±3,4
3Tbez 0°	23,9±2,8	3Pbez 0°	26,1±3,2
3Tplazma 90°	23,4±4,1	3Pplazma 90°	23,5±3,1
3Tplazma 45°	29,5±3,9	3Pplazma 45°	29,7±2,5
3Tplazma 0°	24,4±2,1	3Pplazma 0°	36,6±5,0

3.8.1 Vyhodnocení získaných hodnot

Rázová houževnatost

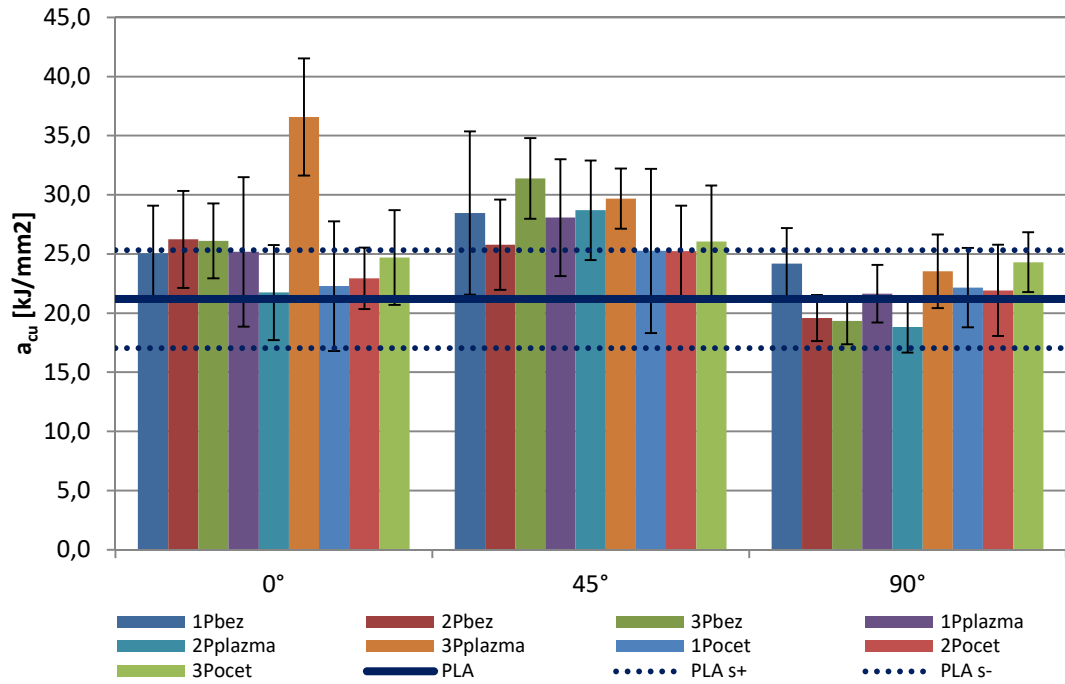


Graf 3.13 Vliv orientace tkaniny na rázovou houževnatost



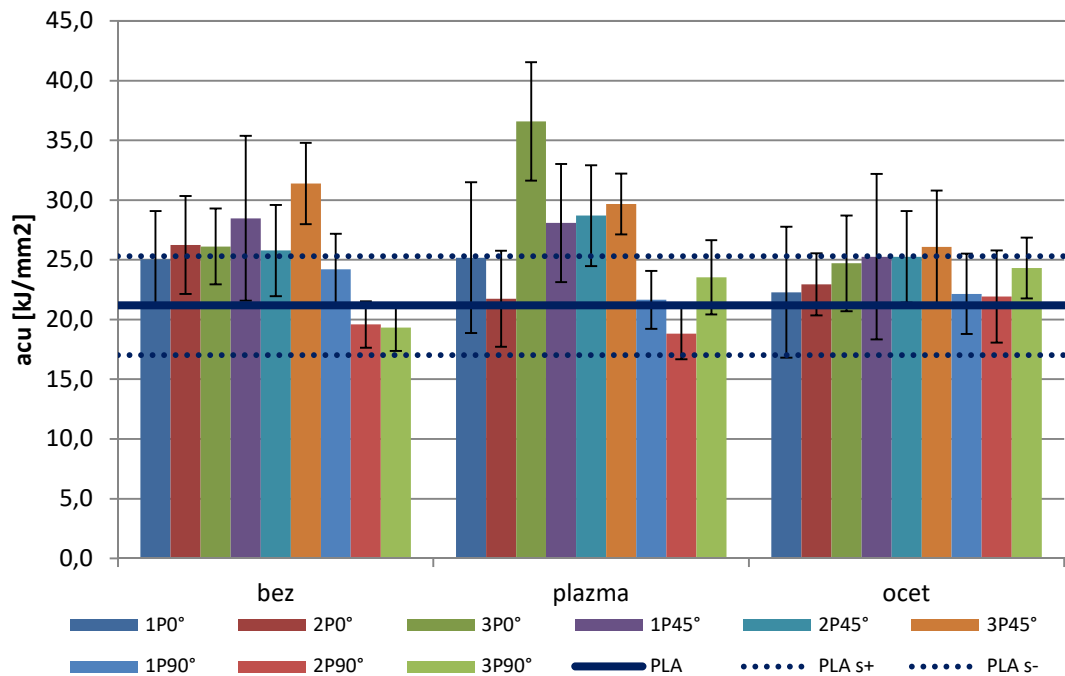
Graf 3.14 Vliv modifikace tkaniny na rázovou houževnatost

Vliv orientace pleteniny na rázovou houževnatost



Graf 3.15 Vliv orientace pleteniny na rázovou houževnatost

Vliv modifikace pleteniny na rázovou houževnatost



Graf 3.16 Vliv modifikace pleteniny na rázovou houževnatost

Na základě grafu 3.13, 3.14 a tab. 3.10 je patrné, že:

1. U vzorků se zastříknutou tkaninou nelze vyvodit žádný závěr vzhledem k orientaci zakládání.
2. Při pohledu na graf vlivu modifikací 3.14 rovněž není možné rozhodnout o zlepšujícím účinku jedné z úprav.
3. Vzhledem k tělískům PLA nedochází k výrazným změnám v rázové houževnatosti. Jedinými vzorky, které vykazují mírný růst, jsou 1Tocet 45° a 2Tplazma 45.

Na základě grafu 3.15, 3.16 a tab. 3.10 je patrné, že:

1. U zastříknutých pletenin se rovněž nevyskytuje žádný všeobecný trend co do orientace, či povrchové modifikace.
2. Nejvyšší rázové houževnatosti, respektive nejvyššího růstu oproti PLA, dosahují šarže z pleteniny 3P (konkrétně 3Pplazma 0°, 3Pbez 45° a 3Pplazma 45°).

4 Závěr

Diplomová práce Kompozitní materiály s textilní hierarchickou strukturní výztuží je rozdělena na dvě základní části – teoretickou a experimentální. Teoretická část popisuje základy kompozitních materiálů a možné způsoby jejich výroby. Důraz je kladen převážně na tzv. zelené kompozity. V práci jsou rovněž rozebrána přírodní vlákna a způsoby jejich povrchové modifikace. V neposlední řadě je jedna kapitola věnována vlastnostem a způsobu výroby kyseliny polymléčné, která je použita během experimentu.

V experimentální části byl zkoumán vliv textilních struktur na výsledné vlastnosti kompozitního materiálu. Jako výztuž byly zvoleny tři druhy bavlněných tkanin a tři druhy bavlněných pletenin, které se vzájemně lišily převážně plošnou hmotností respektive celkovou hustotou. V práci byl dále zkoumán vliv modifikace povrchu použitých textilií (konkrétně efekt plazmatické modifikace a acetylace) a také směru orientace textilní výztuže. Jako pojivo byl zvolen polymer kyseliny polymléčné Ingeotm Biopolymer 3001D. Vzorky byly připraveny technologií zastříkávání textilií. Na vyrobených tělesech byly provedeny testy vybraných vlastností dle ISO norem.

Na základě provedených měření a vyhodnocení získaných dat lze učinit následující závěry:

1. Žádný druh textilní výztuže nezpůsobil výrazné zvýšení sledovaných vlastností.
2. Vliv orientace u obou typů textilií je zanedbatelný (viz. grafy 3.1, 3.3, 3.5, 3.7, 3.9, 3.11 a 3.13).
3. Rovněž žádný ze vzorků vystavený povrchové modifikaci nedosáhl znatelně lepších výsledků ve zkouškách než ostatní. (viz. grafy 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 3.10, 3.12, 3.14)
4. Vzhledem ke směrodatné odchylce dosahovaly zkoušené vyztužené materiály přibližně stejných výsledků jako tělesa PLA.
5. Důvodem nárůstu rázové houževnatosti u těles s pleteninou 3P by mohlo být větší prosycení textilie, vzhledem k tomu, že pletenina 3P má nejnižší celkovou hustotu. Tento závěr však nepotvrzují výsledky ostatních zkoušek.
6. Nárůsty a poklesy vlastností popsané v kapitolách „vyhodnocení“ nelze z celkového pohledu brát jako vypovídající. Změna dosahovala maximálně

10 % oproti vzorkům z PLA (i při započítání směrodatných odchylek). Důvodem může být jak způsob výroby těles (vyřezání na pásové pile), tak možná chyba při měření.

Příčinu bodů 1-4 je možné hledat v samotném principu výroby, kdy nedošlo k dostatečnému prosycení textilií polymerem Ingeotm během zastříkávání. To mělo za následek neúplné smočení vláken v polymeru, které vedlo k nedostatečné adhezi mezi plnivem a pojivem. Nelze tak rozhodnout o vlivu orientace a povrchové modifikace textilních výztuží. Vyrobené kompozitní díly dosahovaly průměrných vlastností oproti tělesům z PLA. Na základě výsledků lze tvrdit, že postup použitý v diplomové práci nevede k tvorbě kompozitních systémů s uspokojivými vlastnostmi.

Pro další výzkum bych doporučoval použít textilie nižší plošné hustoty či polymerní materiál s nižší viskozitou. Nejvhodnějším pokračováním by však bylo zvolit jiný způsob výroby dílů, který by odstranil výše popsané problémy. Namísto hybridní technologie by bylo možné se zaměřit na technologii lisování, zopakovat měření týkající se vlivu orientace a povrchové modifikace textilií a vyvodit jasné závěry. Dalším směrem výzkumu by mohlo být zkoumání vlivu vícevrstvých kompozitů s rozdílnou vzájemnou orientací výztuže. V neposlední řadě by bylo možné využití jiných biodegradovatelných polymerů v rámci výroby kompozitních dílů s textilní hierarchickou strukturou.

Seznam použité literatury

- [1] THOMAS, Sabu, ed. *Polymer composites*. Volume 1, [Macro- and microcomposites]. Weinheim: Wiley-VCH, 2012. ISBN 978-3-527-32624-2.
- [2] ANTOŠ, Vlastimil. *Funkční vlastnosti nanokompozitních materiálů: Characterization of nanocomposite materials for functional properties*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci.
- [3] DRAŠTÍKOVÁ, Inka. *Pevnostní a rázové charakteristiky PLA kompozitů s přírodními vlákny: Strength and impact characteristics of PLA composites with natural fibers*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. Bakalářské práce. Technická univerzita v Liberci.
- [4] AGARWAL, Bhagwan D., Lawrence J. BROUTMAN a K. CHANDRASHEKHARA. *Analysis and performance of fiber composites*. Fourth edition. Hoboken: Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-38998-9.
- [5] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [6] PRŮŠEK, Jan. *Hodnocení biodegradability PLA kompozitů s přírodními vláknými plnivými: Biodegradability evaluation of PLA composites with natural fiber additives*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci.
- [7] BORŮVKA, Martin. *Hodnocení vlastností kompozitu s PP maticí a celulóзовým plnivem: Evaluation of composite properties with PP matrix and cellulose filler*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci.
- [8] HABR, Jiří. *Výzkum technologie přípravy a zpracování kompozitů s PLA maticí a vlákny rostlinného původu: Research of the Technologies for Preparation and Processing Biocomposites with PLA Matrix and Fibers of the Plant Origin*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016. Disertace. Technická univerzita v Liberci.

- [9] BLAŽKOVÁ, Lenka. *Speciální povrchové úpravy textilií: Special surface treatments of textiles*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci.
- [10] WEI, Q. *Surface modification of textiles*. Boca Raton: CRC Press, 2009. Woodhead Publishing in textiles. ISBN 978-1-84569-419-7.
- [11] MOTÁŇ, Filip. *Lisování uhlíkových kompozitů*. Zlín, 2014. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [12] MRÁČKOVÁ, Klára. *Výukový katalog bavlnářských tkanin a jejich užitných vlastností*. Liberec, 2018. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [13] ILDZHIEVA, Svetlana. *Porovnání teoretického zakrytí tkaniny se zakrytím získaným z obrazové analýzy*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [14] GORDON, Stuart a You-lo HSIEH. *Cotton: science and technology*. Boca Raton: CRC Press, 2007. Woodhead Publishing in textiles. ISBN 978-1-84569-026-7.
- [15] KRATOCHVÍLOVÁ, Jitka. *Tahové charakteristiky pletenin s obsahem čedičových vláken: Tensile characteristic of knit with basalts fibers*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. Bakalářské práce. Technická univerzita v Liberci.
- [16] MILITKÝ, Jiří. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. [2. vydání]. V Liberci: Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [17] ŠKOPOVÁ, Adéla. *Vliv podložených kliček na mechanické vlastnosti pletenin: Influence of float loops on the mechanical properties of knitted fabrics*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci.
- [18] LENFELD, PETR. *Příroda se dostává do průmyslu*. [prezentace]. Liberec: Strojírenské fórum. 27. 3. 2019.
- [19] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Verze knihy: 15. Online: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-66-3. Učebnice středních škol. Code Creator (firma).

- [20] MURARIU, Marius a Philippe DUBOIS. PLA composites: From production to properties. *Advanced Drug Delivery Reviews* [online]. 2016, **107**, 17-46 [cit. 2019-03-09]. DOI: 10.1016/j.addr.2016.04.003. ISSN 0169409X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169409X16301028>
- [21] CHHE. Panicum virgatum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2009 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/29/PanicumVirgatum.jpg>
- [22] MAŠKOVÁ, Gabriela. *Krystalizace PLA kompozitů s přírodními vlákny: Crystallization of PLA composites with natural fibers*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. Bakalářské práce. Technická univerzita v Liberci.
- [23] JANKŮ, Petr. *Studium krystalizace PLA kompozitů s přírodními vlákny metodou DSC* Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci.
- [24] BRYCH, Petr. *Struktura a vlastnosti biopolymeru PLA s nanokrystalami celulózy povrchově upravených ligninem a modifikátorem houževnatosti*. Liberec, 2018. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [25] KUCHARCZYK, Pavel. *Kyselina mléčná a syntéza polylaktidu*. Zlín, 2008. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [26] TSUJI, Hideto. Poly(lactide) Stereocomplexes: Formation, Structure, Properties, Degradation, and Applications. *Macromolecular Bioscience* [online]. 2005, **5(7)**, 569-597 [cit. 2019-03-09]. DOI: 10.1002/mabi.200500062. ISSN 1616-5187. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/mabi.200500062>
- [27] MACHA, Innocent J., Medard M. MUNA a Josephat L. MAGERE. In vitro study and characterization of cotton fabric PLA composite as a slow antibiotic delivery device for biomedical applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology* [online]. 2018, **43**, 172-177 [cit. 2019-03-09]. DOI: 10.1016/j.jddst.2017.10.005. ISSN 17732247. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S177322471730610X>
- [28] HOLUB, Jiří. *Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.

- [29] HELLER, Jan. *Vliv plazmatické předúpravy na adhezní vlastnosti textilií: Influence of plasma pretreatment on adhesive properties of textiles*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. Diplomové práce. Technická univerzita v Liberci.
- [30] BEZDĚKOVÁ, Dagmar. *Plazmatická úprava funkcionalizovaných PVA nanovláken za účelem zvýšení adheze, viability a proliferace mezenchymálních kmenových buněk*. Praha, 2013. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [31] ŠNÉVAJSOVÁ, Erika. *Chemické úpravy celulózy pro použití v polymerních kompozitech*. Zlín, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [32] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování*. Verze knihy: 18. Online: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-72-4.
- [33] *Ingeo™ Biopolymer 3001D Technical Data Sheet Injection Molding Process Guide* [online], citováno [22. 4. 2019] Dostupné z:
https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_3001D_injection-molding_pdf.pdf