

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

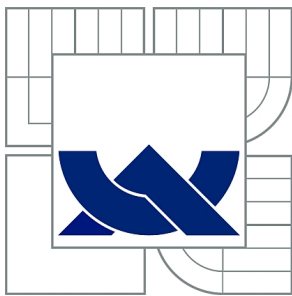
PULTRUZE BIOKOMPOZITU NA BÁZI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

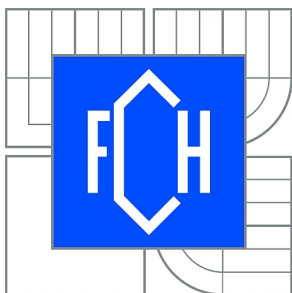
EMIL LETAVAJ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

# PULTRUZE BIOKOMPOZITU NA BÁZI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN

PULTRUSION PROCESS OF COMPOSITE BASED ON NATURAL FIBRES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

EMIL LETAVAJ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. RADEK PŘIKRYL, Ph.D.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně  
**Fakulta chemická**  
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

## Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce:	<b>FCH-BAK0847/2014</b>	Akademický rok: <b>2014/2015</b>
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	<b>Emil Letavaj</b>	
Studijní program:	Chemie a chemické technologie (B2801)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)	
Vedoucí práce	<b>Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.</b>	
Konzultanti:		

### Název bakalářské práce:

Pultruze biokompozitu na bázi přírodních vláken

### Zadání bakalářské práce:

Studium možností využití přírodních vláken pro pultruzi kompozitních materiálů na bázi termosetových pryskyřic. Kompatibilizace povrchu vláken a matrice za účelem optimalizace vlastností kompozitu.

### Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2015

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

-----  
Emil Letavaj  
Student(ka)

-----  
Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.  
Vedoucí práce

-----  
prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.  
Ředitel ústavu

V Brně, dne 30.1.2015

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Teoretická časť práce je zameraná na všeobecný prehľad o kompozitných materiáloch, prírodných vláknach a ich rôznych modifikáciách. Praktická časť spočíva v chemickej úprave ľanových vlákien prostredníctvom dvoch typov silanov, za účelom optimalizácie rozhrania medzi jednotlivými fázami v kompozitnom materiáli. Takto upravené vlákna boli použité na výrobu kompozitov technologickým postupom pultrúzie. Na záver bol posúdený vplyv chemickej úpravy vlákien na výsledné mechanické vlastnosti kompozitných profilov.

## **Abstract**

The theoretical part of bachelor thesis is focused on general overview of composite materials, natural fibers and their various modifications. The practical part is based on chemical treatment of flax fibers by two types of silanes, in order to optimize the interface between the phases in the composite material. Such modified fibers were applied to produce composites by pultrusion technological process. In conclusion, the impact of chemical treatment of flax fibers was reviewed on the mechanical properties of the resulting composite profiles.

## **Kľúčové slová**

Kompozity, prírodné vlákna, silany, pultrúzia

## **Keywords**

Composites, natural fibres, silanes, pultrusion

## **Citácia**

LETAVAJ, E. *Pultruze biokompozitu na bázi prírodných vlákien*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2015. 34 s. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Radek Přikryl, Ph.D..

## **Prehlásenie**

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne a že všetky použité literárne zdroje som správne a úplne citoval. Bakalárska práca je z hľadiska obsahu majetkom Fakulty chemickej VUT v Brne a môže byť využitá ku komerčným účelom len so súhlasom vedúceho bakalárskej práce a dekana FCH VUT.

.....  
Podpis študenta

## **Pod'akovanie**

*Rád by som poďakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce Mgr. Radkovi Přikrylovi, Ph.D. a taktiež Bc. Filipovi Hahnovi, Ing. Přemyslovi Menčíkovi za pomoc pri získavaní teoretických znalostí a praktických skúseností. Veľká vďaka patrí aj mojej rodine, ktorá ma podporuje a verí vo mňa.*

## Obsah

1	Úvod.....	5
2	Výroba kompozitných materiálov.....	5
2.1	Pultruzia.....	5
3	Kompozitné materiály.....	6
3.1	Časticové kompozity.....	7
3.2	Vláknové kompozity.....	7
3.2.1	Typy vystužujúcich vlákien.....	7
4	Prírodné vlákna.....	9
4.1	Chemická a fyzikálna štruktúra vlákien.....	9
4.2	Proces získavania vlákien.....	12
4.3	Rozdelenie prírodných vlákien a ich vlastnosti.....	13
4.3.1	Ľanové vlákna.....	13
4.3.2	Konopné vlákna.....	13
4.3.3	Jutové vlákna.....	13
4.3.4	Bambusové vlákna.....	13
4.3.5	Vlastnosti prírodných vlákien.....	14
5	Modifikácie vlákien.....	14
5.1	Fyzikálne úpravy.....	14
5.2	Chemické úpravy.....	14
5.2.1	Silanizácia.....	15
5.2.2	Alkalická úprava.....	16
5.2.3	Acetylácia.....	16
5.2.4	Maleinové reakčné činidlá.....	17
6	Polymérne matrice.....	17
6.1	Termoplasty.....	17
6.2	Termosety.....	17
7	Testy mechanických vlastností.....	18
7.1	Pevnosť v ohybe.....	18
7.2	Rázová húževnatosť.....	19
8	Experimentálna časť.....	21
8.1	Použité materiály.....	21
8.1.1	Ľanové vlákna.....	21

8.1.2	Matrice .....	21
8.2	Chemická úprava ľanových vlákien .....	23
8.3	Experimentálne podmienky výroby kompozitných profilov .....	24
8.4	Testy mechanických vlastností kompozitných profilov .....	27
9	Záver.....	30
10	Literatúra .....	31
11	Zoznam použitých skratiek .....	34

# 1 ÚVOD

Tak ako nám dejiny hovoria o dobe kamennej, bronzovej, železnej, tak my môžeme povedať, že sme svedkami doby plastovej. Sme deťmi tejto doby. Väčšina populácie si to možno ani neuvedomuje, pretože nevedia čo všetko sa z plastov vyrába. Nachádzajú sa všade okolo nás. Ťažko by sme našli nejakú domácnosť, v ktorej sa nepoužívajú plastové výrobky. V posledných rokoch ich produkcia naberala na obrátkach, počas ktorých sa začali objavovať rôzne problémy. Problémy ako napríklad nedostatok fosílnych palív (neobnoviteľných zdrojov) na ich výrobu, nárast skládok, plastový odpad spojený so znečisťovaním prostredia a iné. Kvôli tomu vzrastá záujem vyvíjať či už alternatívne, respektíve nové materiály založené na bio báze alebo ďalšie inovatívne technológie, ktoré nás môžu oslobodiť od závislosti na fosílnych palivách. Práve kompozitné materiály na báze prírodných vlákien predstavujú akúsi alternatívu voči plastom a ďalším materiálom (kovy). Ich použitie by sa dalo uskutočniť napríklad v automobilovom priemysle (palubné dosky, náhrada za rôzne plastové a kovové diely) a športe (hokejka, golfová palica, raketa). Bohužiaľ, realizácia nie je až taká jednoduchá, pretože sa jedna o prírodné materiály, ktoré sú rôznorodé. [1] Existuje mnoho faktorov, ktoré hrajú dôležitú rolu pri konečných vlastnostiach biokompozitu. Záleží na type vlákna, prírodných podmienkach (miesto, odkiaľ vlákna pochádzajú), metódach spracovania a akýchkoľvek úpravách vlákien. [13]

## 2 VÝROBA KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV

Techniky spracovania kompozitných materiálov z prírodných vlákien sú podobné tým, ktoré pri spracovaní používajú syntetické vlákna. Výrobné procesy sa líšia v závislosti od použitia typu a tvaru výstuže alebo termoplastických, respektíve termosetických matric. Medzi najznámejšie techniky patrí ručné kladenie, lisovanie, navíjanie, vstrekovanie, pultruzia, extrúzia a iné.

### 2.1 Pultruzia

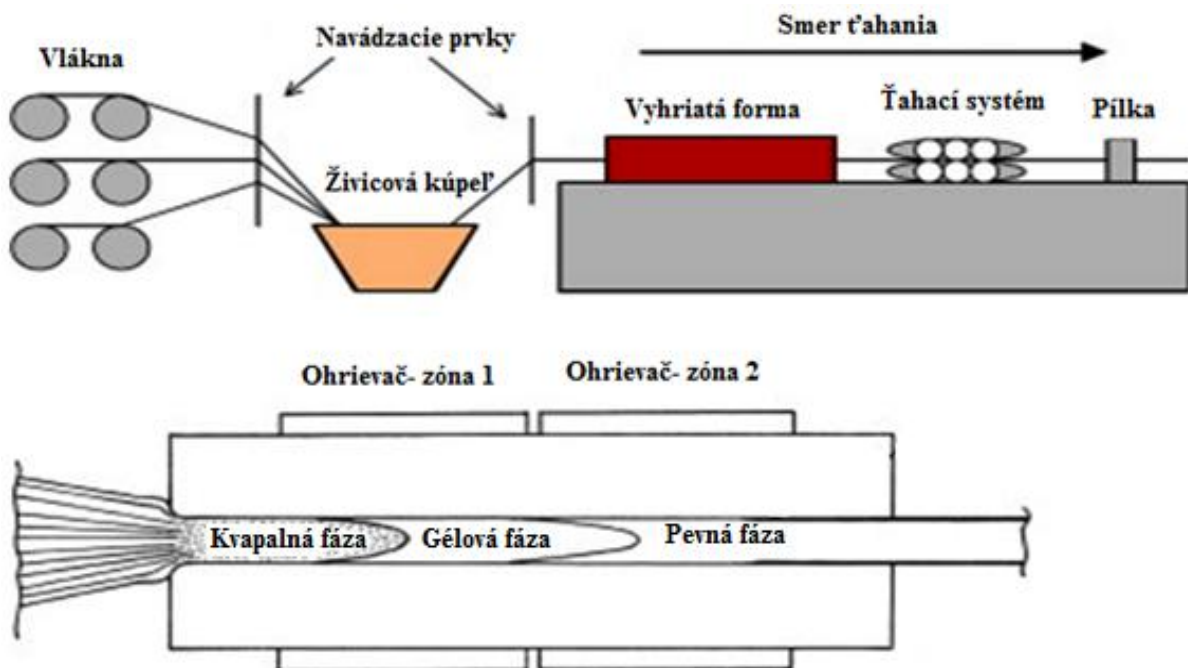
Kompozitné materiály sú charakteristické vysokou pevnosťou v pomere ku ich hmotnosti a čím ďalej tým viac sa využívajú po celom svete pre rôzne účely. Jednou z techník, pomocou ktorej sa vyrábajú, je pultruzia. Patrí medzi najstarší kontinuálny výrobný proces kompozitných materiálov s dlhovláknovou výstužou a konštantným profilom (nosníky, výstuhy, rúrky). Vynález pochádza z päťdesiatych rokov minulého storočia. Zaujal nízkymi požiadavkami na laboratórne vybavenie. Jeho fascinujúcou výhodou je vysoká produktivita, nízka cena a malé množstvo odpadu vďaka nepretržitej výrobe.

Podstata spočíva v natiahnutí zväzkov vopred modifikovaných a vysušených vlákien z cievkovnice cez živicovú kúpeľ (matricu) za účelom impregnácie. Okrem vlákien možno použiť ako výstužný materiál ešte rohože alebo tkaniny. Matrica môže obsahovať plnivá, farbivá, retardéry horenia, prípadne ďalšie prísady pre zlepšenie vlastností. Po impregnácii, vlákna spolu s matricou putujú cez navádzacie prvky zabezpečujúce maximálne presýtenie vlákien do vopred vyhriatej formy na určitú teplotu. Počas tohto kroku sa v určitom okamžiku kvapalná fáza matrice zmení na gélovú. Nakoniec dôjde k vytvrdnutiu matrice do požadovaného tvaru. Forma môže byť vyhrievaná pomocou externých alebo



inertných elektrických ohrievačov, vykurovacieho pásu, horúcim olejom alebo parou. Najbežnejšie sa používajú externé elektrické ohrievače. Pri výstupe z formy je už spolymerizovaná a skonsolidovaná časť kompozitu ťahaná pomocou kontinuálneho ťahacieho systému. Nakoniec sa výsledný produkt nareže na požadovanú dĺžku pomocou píly. Pultruzný proces a fázová zmena termosetického kompozitu sú znázornené na Obrázku 1. [2,3,4]

Aj napriek relatívnej jednoduchosti tohto procesu, jeho kontinuálny charakter stanovuje obmedzenia týkajúce sa systému riadenia kvality v dôsledku početných vzájomných závislostí kontrolných premenných. Pre rovnaké zloženie výrobku a jeho prierez, ťahaciu silu a rýchlosť, dĺžku a teplotu formy existujú vzájomne závislé premenné, ktoré majú vplyv na kvalitu konečného produktu. [2]



Obrázok 1 Schematické znázornenie pultruzného procesu (hore) a fázovej zmeny termosetického kompozitu vo vyhriatej forme (dole) [2]

### 3 KOMPOZITNÉ MATERIÁLY

Kompozitné materiály predstavujú heterogénny systém, v ktorom sú špecifickým spôsobom kombinované najmenej dve zložky, ktoré sa výrazne líšia vo fyzikálnych, chemických a mechanických vlastnostiach. Prvá zložka (matrica-živica) je spojitá a slúži ako spojivo. Má nízku hustotu, je ľahko spracovateľná a má dobrú stabilitu voči širokému spektru prostredí a chemikálií. Sekundárna zložka (vlákna, tkaniny, rohože) je nespojitá a slúži ako výstužný materiál pre kompozit. Oproti matrici má výstuž obvykle výrazne lepšie mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnosť, tvrdosť). Hlavnou nevýhodou je, že výrobok nemôže byť vytvorený iba z výstuže. Pre kompozitné materiály je charakteristický synergizmus, čo znamená, že v porovnaní s jednotlivými zložkami, t.j. výstužou, matricou, majú kompozity podstatne odlišné unikátne vlastnosti, ktoré sú nedosiahnuteľné samotnými jednotlivými komponentmi. Kvalita rozhrania medzi matricou a výstužou má zásadný vplyv na vlastnosti

výsledného kompozitu. Najznámejším prírodným kompozitom je drevo, ktoré je zložené z celulózových vlákien uložených v ligníne. Poznáme niekoľko typov kompozitov s rôznou kombináciou matrica-výstuž, napr. kov-kov, keramika-kov, keramika-polymer, keramika-keramika, polymer-polymer.

Majú výborné mechanické vlastnosti a preto sa začali používať vo všetkých priemyselných odvetviach. Ďalšími výhodami sú nízka merná hmotnosť, vysoká pevnosť pri statickom a dynamickom namáhaní, vynikajúca odolnosť voči pôsobeniu korozívnych prostredí, tepelné a elektrické izolačné vlastnosti, prakticky nulový útlm elektromagnetického žiarenia v širokom intervale frekvencií od kHz až po GHz. Ich nevýhodou je obtiažna spracovateľnosť a vysoká cena. V súčasnosti je na trhu dostupné široké spektrum kompozitných materiálov líšiacich sa spojivom (živicom), typom a charakterom výstuži (vlákna, tkaniny, rohože) a spôsobom výroby (laminácia, navíjanie atď.) Podľa geometrického tvaru výstuže delíme kompozity na časticové a vláknové. [5,6]

### **3.1 Časticové kompozity**

Časticové kompozity sú zložené z polymérnej matrice a anorganických (napr.  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mastenec, kremenná múčka, kov) či organických (drevo, ryža, škrob) častíc. Priemery a tvary častíc môžu byť veľmi odlišné, pretože ich existuje veľa druhov. Môžu mať guľovitý, doštičkovitý, tyčinkovitý, nepravidelný tvar. Priemery sa pohybujú v rozmedzí od rádovo  $\mu\text{m}$  do 100 nm. Široká škála distribúcie priemerov je výhodou pre dosiahnutie vysokého obsahu plniva, pretože priestor medzi väčšími časticami je vyplnený menšími. Používajú sa za účelom zníženia ceny materiálu, zlepšenia vlastností matrice ako sú napríklad tepelná a elektrická vodivosť, odolnosť voči oteru, tvrdosť povrchu. Všeobecným problémom pri príprave vysoko plnených polymérov je nekompatibilita medzi časticami plniva a polyméru. Vzniká nerovnomerná disperzia častíc a často sa objavujú ich veľké aglomeráty, ktoré majú veľmi nízku vnútornú pevnosť, znižujú súdržnosť, indukujú tvorbu trhlín a pri zaťažení vytvárajú krehký lom. Pravdepodobnosť vzniku aglomerátov stúpa s klesajúcim priemerom častíc. Typickým príkladom časticového kompozitu je napríklad betón (cementová matrica s časticami piesku a štrku). [7,8]

### **3.2 Vláknové kompozity**

Vláknové kompozity delíme podľa dĺžky vystužujúcich vlákien na kompozity s krátkymi vláknami a na kompozity s dlhými (kontinuálnymi) vláknami. [6] Vystužujúce vlákna významne zvyšujú mechanickú pevnosť inak krehkej matrice a znižujú koeficient tepelnej rozťažnosti na hodnotu porovnateľnú s kovmi. [8] Existuje mnoho typov vystužujúcich vlákien. Najpoužívanejšími sú sklenené, uhlíkové a aramidové vlákna.

#### **3.2.1 Typy vystužujúcich vlákien**

##### **Sklenené vlákna**

Vzhľadom k ich nízkej cene, vysokej pevnosti v ťahu, vysokej odolnosti proti nárazu a dobrej chemickej odolnosti sa používajú vo veľkej miere ako výstuž kompozitných materiálov. Sú vyrobené z kremičitého piesku, vápenca, kyseliny boritej a menšieho množstva

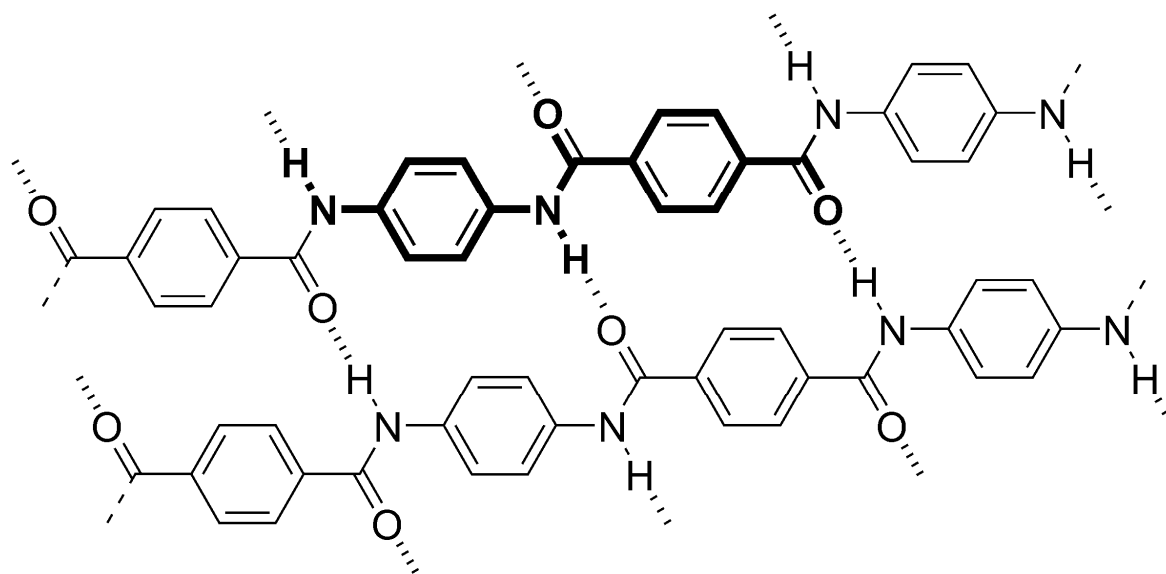
iných látok ako sú napríklad íl, fluorit. Poznáme tri druhy bežne používaných sklenených vlákien, ktorými sú E-sklo, S-sklo, kremenné sklo. E-sklo je najviac používané, pretože je najlacnejšie. S-2 sklo je drahšie a o 40 % pevnejšie ako E-sklo. Pri zvýšených teplotách si zachováva väčšie percento svojej pevnosti. Kremenné sklo je pomerne drahé a používa sa v náročných elektrických aplikáciách kvôli tomu, že je dobrý elektrický izolant. [9]

### Uhlíkové vlákna

Vyrábajú sa z viskózových alebo polyakrylonitrilových (PAN) vlákien. Vlákna sa pripravujú karbonizáciou primárneho vlákna. Poznáme vysokopevnostné vlákna, ktoré sú získavané pri 900 °C až 1500 °C. Ich ďalšou karbonizáciou vznikajú vysokomodulové vlákna, ktoré sú drahšie. [5] Vlastnosti závisia na ich štruktúre. Sú atraktívne vďaka nasledujúcim vlastnostiam. Nízka hustota, vysoký modul pružnosti a pevnosť v ťahu, nízky koeficient tepelnej rozťažnosti, tepelná stabilita, chemická odolnosť, nízky elektrický odpor a iné. Najväčšia nevýhoda je vysoká cena, ktorá je v porovnaní so sklenenými vláknami desať až stokrát väčšia. Nachádzajú uplatnenie napr. v leteckom, vojenskom priemysle, tvoria kľúčovú súčasť rakiet. [10]

### Aramidové vlákna

Vyrábajú sa reakciou para-fenyléndiamínu s tereftaloyl chloridom v organickom rozpúšťadle za vzniku polypara-fenylén-tereftalamidu (aramidu), vid'. Obrázok 2.



Obrázok 2 Znárodnenie vnútromolekulových väzieb v aramidoch [11]

Medzi najznámejšieho výrobcu patrí firma Du Pont, ktorá vyrába vlákna pod označením Nomex alebo Kevlar. Najbežnejšie sú tri typy Kevlaru a to Kevlar 29 (vysoko húževnatý), Kevlar 49 (vysoko modulový) a Kevlar 149 (ultra vysoko modulový). Aramidové vlákna sú menej krehké ako sklenené alebo uhlíkové. Majú charakteristickú jasnú zlatožltú farbu, vysokú pevnosť, nízku hustotu, vysokú špecifickú pevnosť v ťahu. Používajú sa hlavne ako výstuž v pneumatikách, pásoch, gumových výrobkoch a v nepriestrelných vestách. Sú z nich vyrábané plachty pre pretekárske lode. [11,12]

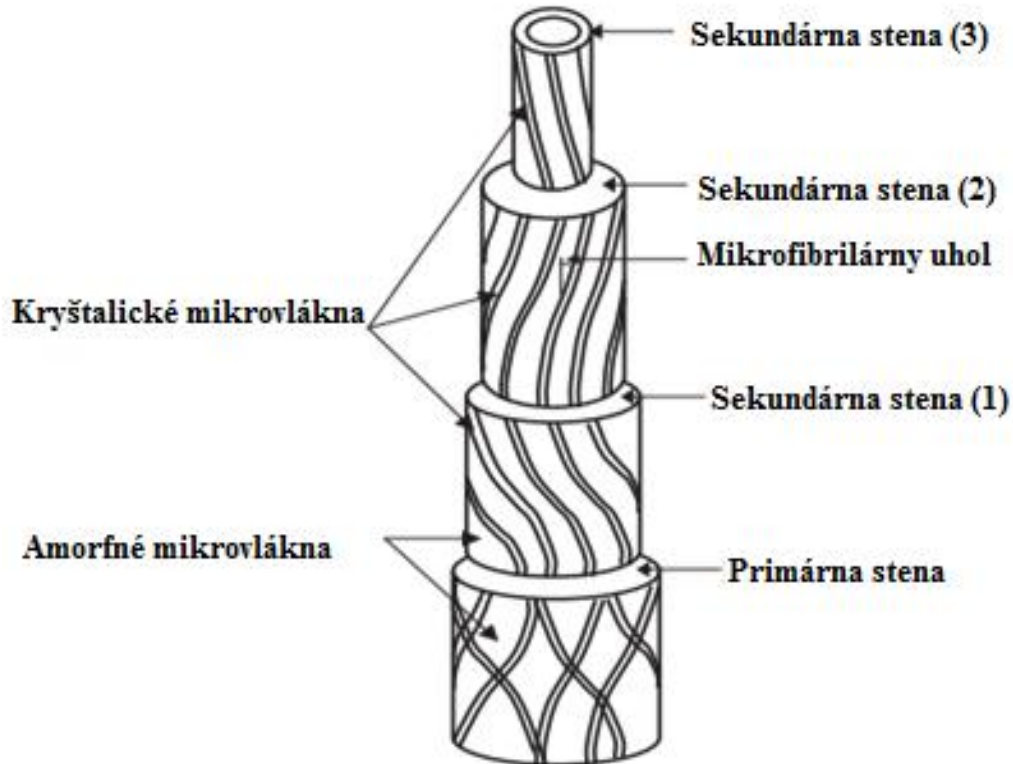
## 4 PRÍRODNÉ VLÁKNA

Nie je už žiadnym tajomstvom, že trend použitia prírodných vlákien ako plnív resp. výstuží v plastických kompozitoch neustále narastá. Ľudstvo si je vedomé, že sa neobnoviteľné zdroje vyčerpávajú veľmi rýchlo. Kvôli tomu stúpa dopyt po obnoviteľných zdrojoch (predovšetkým rastlinného pôvodu). Hovorí sa, že prírodné vlákna sú obnoviteľné. Nie je to pravda. Rastliny, z ktorých boli vlákna získané sú obnoviteľné, nie samotné vlákna. Tieto rastliny sa delia v závislosti na ich využití na primárne (pestujú sa kvôli samotným vláknam)- konope, juta a sekundárne (vlákna sú získané ako vedľajší produkt)- ananás, kokos. [13]

Výhodou prírodných vlákien oproti syntetickým ako napr. skleneným sú nízka cena, nízka hustota, prijateľné špecifické pevnostné vlastnosti, ľahkosť separácie, sekvestrácia CO<sub>2</sub> a biodegradabilita. V práci sa zaoberám len rastlinnými prírodnými vláknami. [1]

### 4.1 Chemická a fyzikálna štruktúra vlákien

Prírodné vlákna môžu byť považované za kompozity, ktoré sú zložené z vlákien celulózy držaných pohromade vďaka matici z lignínu a hemicelulózy. Štruktúra vlákien je znázornená na Obrázku 3. Každé vlákno má vrstevnatú štruktúru pozostávajúcu z tenkej primárnej steny, ktorá obklopuje sekundárnu. Sekundárna stena sa skladá z troch vrstiev. Mechanické vlastnosti vlákna určuje hrubá stredná vrstva, ktorá je zložená z radu špirálovito vinutých bunkových mikrovláknien tvorených z molekúl s dlhým reťazcom celulózy. Uhol medzi osou vlákien a mikrovláknami sa nazýva mikrofibrilárny uhol. Charakteristická hodnota mikrofibrilárneho uhlu sa líši pre každé jedno vlákno. Mikrovlákná majú zvyčajne priemer približne 10-30 nm. Sú tvorené z 30 až 100 molekúl celulózy v reťazovej konformácii a zabezpečujú mechanickú pevnosť vlákna. Amorfná matrica v bunkovej stene pozostáva z hemicelulózy, lignínu a v niektorých prípadoch pektínu. Molekuly hemicelulózy sú atómami vodíku viazané na celulózu pričom sa správajú ako lepidlo medzi jednotlivými mikrovláknami. Tvoria celulózo-hemicelulózoú sieť, ktorá je považovaná za hlavnú konštrukčnú zložku vlákien. Hydrofóbna lignínová sieť ovplyvňuje vlastnosti inej siete takým spôsobom, že sa správa ako spojovacie činidlo a zvyšuje tuhosť celulózo-hemicelulózoú kompozitu. [16]



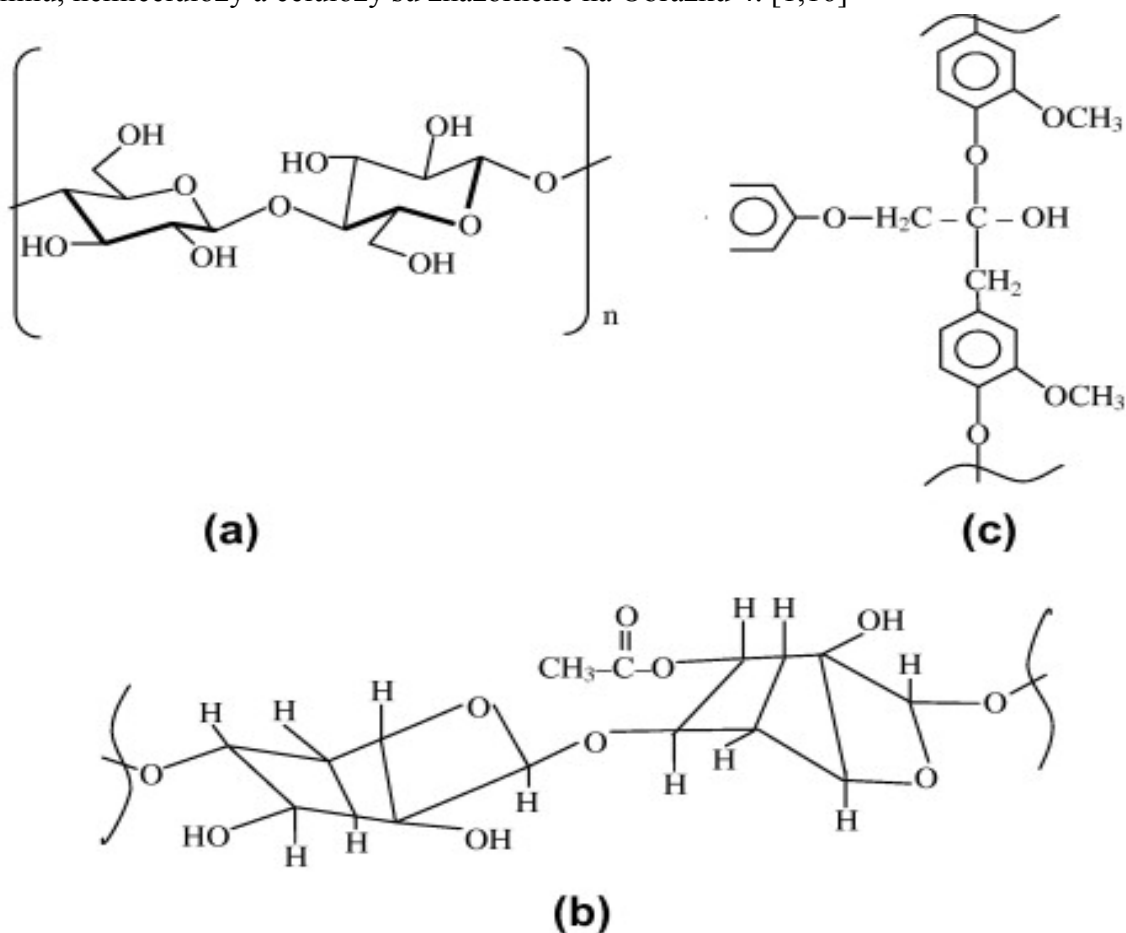
Obrázok 3 Štruktúra prírodných vlákien [19]

Vystužujúca schopnosť prírodných vlákien súvisí s povahou celulózy a jej kryštalickou podobou. Celulóza je hydrofilný glukozidový polymer o vysokej molekulovej hmotnosti. Skladá sa z lineárneho reťazca 1,4- $\beta$ -viazaných anhydro-glukozidových jednotiek, ktoré obsahujú alkoholovú hydroxy skupinu. Tieto hydroxylové skupiny tvoria intramolekulárne vodíkové väzby vnútri samotnej molekuly, medzi ostatnými celulóзовými makromolekulami ako aj s hydroxylovými skupinami zo vzduchu. Z tohto dôvodu sú všetky prírodné vlákna hydrofilnej povahy. Ich obsah vlhkosti je približne 8-12,6 %. Aj keď je chemická štruktúra celulózy v rôznych prírodných vláknach rovnaká, stupeň polymerizácie (ďalej iba SP) sa mení. [17]

SP ukazuje, že sa dĺžky polymérnych reťazcov líšia v závislosti od typu prírodných vlákien. Z približne 10 000 rôznych prírodných vlákien vykazujú lykové vlákna najvyšší stupeň polymerizácie. Mechanické vlastnosti vlákien súvisia so SP, závisia od typu celulózy, pretože každý typ má vlastnú geometriu buniek a geometrické podmienky určujú mechanické vlastnosti. Tuhá celulóza tvorí mikrokryštalickú štruktúru s oblasťou vysokého rádu (kryštalická oblasť) a nízkeho rádu (amorfná oblasť). Prírodzene vyskytujúca celulóza kryštalizuje v monoklinickej-hemimorfnej štruktúre. Molekulárne reťazce sú orientované v smere vlákien. [18]

Hemicelulóza zahŕňa skupinu polysacharidov (okrem pektínu), ktoré zostávajú s celulózou spojené po odstránení lignínu. Od celulózy sa líši v troch aspektoch. V prvom rade, hemicelulóza obsahuje niekoľko rôznych sacharidových jednotiek, zatiaľ čo celulóza iba 1,4- $\beta$ -glukopyranosové jednotky. Ďalším rozdielom je stupeň vetvenia reťazca. Celulóza má prísne lineárny reťazec. Po tretie, stupeň polymerizácie natívnej celulózy je 10 až 100 krát väčší ako u hemicelulózy.

Lignín je uhľovodíkový kopolymér s vysokou molekulovou hmotnosťou obsahujúci alifatickú a aromatickú zložku. Chemická štruktúra hlavných zložiek lignínu nie je presne definovaná. Dôvodom je to, že sa zatiaľ nepodarilo izolovať lignín z vlákien v pôvodnom zložení. Metódy boli dostačujúce na identifikovanie jednotiek a skupín lignínu, ako sú napríklad hydroxylové, methoxylové a karbonylové skupiny. Vo väčšine rozpúšťadiel sú tieto zložky úplne nerozpustné a neštiepia sa na monomerné jednotky. Lignín je amorfny a hydrofóbny. Dáva rastlinám tuhosť. Jeho teplota skelného prechodu je cca 170 °C. Nerozpúšťa sa v kyselinách, rozpúšťa sa len v horúcich alkáliách, ľahko oxiduje. Štruktúry lignínu, hemicelulózy a celulózy sú znázornené na Obrázku 4. [1,16]



Obrázok 4 Chemická štruktúra (a) celulóza (b) hemicelulóza (c) lignin [19]

Pektín je súhrnný názov pre heteropolysacharidy, ktoré sa skladajú prevažne z kyseliny polygalaktúronovej. Po čiastočnej neutralizácii alkalickým kovom alebo hydroxidom amonným je rozpustný vo vode. Rastline zabezpečuje pružnosť.

Vosky sa dajú z určitých častí vlákien vyextrahovať pomocou organických roztokov. Skladajú sa z rôznych druhov alkoholov nerozpustných vo vode a v niekoľkých kyselinách (napr. kyselina palmitová, olejová, steárová). [18]

Tabuľka 1 uvádza chemické zloženie a obsah vlhkosti niektorých prírodných vlákien.

Tabuľka 1 Chemické zloženie a obsah vlhkosti niektorých prírodných vlákien [17]

Typ vlákna	Celulóza (hm. %)	Lignín (hm. %)	Hemicelulóza (hm. %)	Pektín (hm. %)	Vosky (hm. %)	Obsah vlhkosti (hm. %)
Lykové						
Juta	61-71,5	12-13	13,6-20,4	0,2	0,5	12,6
Ľan	71	2,2	18,6-20,6	2,3	1,7	10,0
Konope	70,2-74,4	3,7-5,7	17,9-22,4	0,9	0,8	10,8
Kenaf	31-39	15-19	21,5	-	-	-

## 4.2 Proces získavania vlákien

Ľanové vlákna sa najčastejšie získavajú zo stonky rastliny. Aj keď je tento proces časovo náročnejší, nie je veľmi komplikovaný. Ľanové vlákna sú obklopené bunkovým tkanivom, voskom, pektínom. Táto štruktúra musí byť porušená, aby bolo možné vlákna izolovať bez väčších problémov. Existujú rôzne metódy pomocou ktorých možno získať vlákna. Jednou z nich je proces máčania. Poznáme viacero spôsobov a to rosenie, máčanie v stojatej vode, v pomalom prúde vody alebo v chemických rozpúšťadlách (zriedené kyseliny/alkalické roztoky).

Rosenie je najrozšírenejším spôsobom porušovania štruktúry stoniek. Spočíva v rozprestretí vytrhaných stoniek na zem počas 3-12 týždňov. V priebehu tejto doby sa vlákna začnú oddeľovať od stoniek vplyvom pôsobenia mikroorganizmov a plesní, ktoré rozpúšťajú bunkové tkanivo. Tento proces je podporovaný vlhkosťou z rosy padajúcej na stonky v noci a teplom zo slnka počas dňa.

Po máčaní sú stonky vysušené. Drevené časti sú odstránené mechanickými procesmi (lámanie, trepanie). Počas lámania sa vysušené stonky dajú medzi kanelované valce, kde sa drevené časti (pazderie) delia podľa ich dĺžky. Trepacia linka s čepeľami slúži na oddelenie neporušených ľanových vlákien od pazderia, ktoré sa používa na výrobu dosiek. Po mechanickom oddelení opúšťa ľan trepaciu linku vo forme zväzkov vlákien, ktoré sú k sebe prilepené pomocou pridaných lepkavých látok.

V ďalšej fáze sú zväzky vlákien česané pomocou sady kolíkov, ktoré zabezpečujú ich postupnú jemnosť. Pred spriadaním do priadze sa vlákna dajú do alkalického kúpeľa pri 65-90 °C za účelom odstránenia použitého lepidla v predchádzajúcom kroku. Ak chceme odstrániť prírodnú krémovú farbu vlákien, môžeme ich vybieliť použitím peroxidov. Najkvalitnejšie ľanové vlákna sú získavané z pobrežných oblastí Francúzska, Belgicka a Holandska. [20]

### 4.3 Rozdelenie prírodných vlákien a ich vlastnosti

Prírodné vlákna sa delia podľa pôvodu na organické (rastlinné, živočíšne) a anorganické. Anorganické vlákna sa používajú vo veľmi malých množstvách často kvôli faktorom, ktoré nepriaznivo ovplyvňujú ľudské zdravie počas extrakcie. Rastlinné vlákna (juta, ľan, konope) sú zložené prevažne z celulózy. Živočíšne vlákna (vlna, hodváb, vlasy) sú zložené z proteínov. Poznáme niekoľko základných typov prírodných vlákien z rastlín, ktorými sú napríklad lykové vlákna, listové vlákna, vlákna zo semien (kokos), trávové a trstinové vlákna (ryža, kukurica). Lykové vlákna sú známe tiež ako stonkové vlákna, pretože sú získavané z vonkajších vrstiev buniek stonky rôznych dvojklíčnolistových rastlín. Ľan a konope sú príklady rastlín, z ktorých sa tieto vlákna získavajú. Listové vlákna sú hrubšie a získavajú sa napr. z ananásu. [13,14]

#### 4.3.1 Ľanové vlákna

Získavajú sa z ľanu siateho, *Linum usitatissimum*. Pestuje sa v miernych oblastiach a je jednou z najstarších priadnych rastlín na svete. Vlákna sa najčastejšie používajú v textilom priemysle. Nachádzajú uplatnenie aj v oblasti kompozitov. Mechanické vlastnosti v ťahu sa odhadujú podľa ich priemeru a umiestnenia v stonke. Vyššie hodnoty mechanických vlastností vlákien pochádzajúcich zo stredu stonky a sú spojené s chemickým zložením ich bunkových stien. [13]

#### 4.3.2 Konopné vlákna

Konopa siata (*Cannabis sativa*) je po stáročia zdrojom vlákien pre laná, plachty a oblečenie. Pestuje sa v Rusku, východnej Európe, a stále viac aj v západnej Európe vrátane Veľkej Británie. Je to vysoká listnatá rastlina (1,5-4 m) so silnými vláknitými stonkami. Dobré sa pestuje v odvodnenej pôde. Vonkajšia časť stonky produkuje silné lykové vlákna s vysokým obsahom celulózy. Zväzky vlákien bývajú dlhé 30-90 cm. Zo všetkých prírodných vlákien majú najvyššiu odolnosť voči vode. [14,15]

#### 4.3.3 Jutové vlákna

Po bavlně je juta najrozšírenejším zdrojom rastlinných vlákien. Má vyšší obsah lignínu ako ľan alebo konope. Jutovníky sa pestujú v teplom a vlhkom prostredí v Bangladéši, Indii, Číne. Môže narásť až do výšky 2,5-3 m za 4-6 mesiacov. Jutové vlákna sú extrahované zo stonky pomocou máčania v pomaly tečúcej vode. Enzýmy vylučované mikroorganizmami rozoberú necelulózovú časť medzi vláknami, ktoré sú bohaté na pektíny. Hmotnosť suchých vlákien je v rozmedzí 4,5-8 % hmotnosti pôvodnej rastliny. Používajú sa ako obalový materiál, koberce, povrazy, nite a nástenné dekorácie. [14,15]

#### 4.3.4 Bambusové vlákna

Bambus je celoročná rastlina, ktorá dorastá v monzúnovom podnebí až do výšky 40 metrov. Používa sa v stavebníctve, tesárstve, na tkanie a pletenie. Záclony z bambusového vlákna dokážu absorbovať ultrafialové žiarenie v rôznych vlnových dĺžkach, ktoré ľudskému



telu neprospieva. Experimentálne výsledky ukázali, že bambusové vlákna majú dostatočnú špecifickú pevnosť v ťahu, podobne ako sklenené vlákna. [13]

### 4.3.5 Vlastnosti prírodných vlákien

Je nutné mať neustále na pamäti, že prírodné vlákna sú produkty vytvorené samotnou prírodou. To znamená, že pri určovaní vlastností (viď. Tabuľka 2) musíme dbať na prostredie, v ktorom boli rastliny pestované, jeho teplotu, vlhkosť, zloženie pôdy, pevnosť stonky, hustotu, zber a spracovanie rastlín. [13,14]

Tabuľka 2 Niektoré vlastnosti vybraných prírodných vlákien [26]

Vlákno	Pevnosť v ťahu (MPa)	Youngov modul pružnosti (GPa)	Ťažnosť (%)	Hustota (g/cm <sup>3</sup> )
Lan	343-1500 (700)	8-100 (70)	1,2-4 (3)	1,4-1,52
Konope	310-1110 (800)	3-90 (65)	1,3-6 (3)	1,4-1,6
Juta	187-800 (500)	3-64 (30)	0,2-3,1 (1,8)	1,3-1,5
Kenaf	180-1191 (700)	22-128 (55)	1,2-4,6 (3)	1,2-1,4

## 5 MODIFIKÁCIE VLÁKIEN

Rozhranie medzi vláknom a matricou je reakčná zóna, v ktorej sú chemicky alebo mechanicky spojené dve fázy. Kvalita tohto rozhrania je dôležitým faktorom pri použití prírodných vlákien ako výstuž kompozitov. Hlavnou nevýhodou prírodných vlákien je ich hydrofilný charakter, čo znižuje kompatibilitu s hydrofóbnou polymérou matricou. Ďalším problémom je vysoká absorpcia vlhkosti. Vlákna sa modifikujú za účelom odstránenia alebo redukcie týchto problémov. Používajú sa fyzikálne a chemické úpravy. [13]

### 5.1 Fyzikálne úpravy

Menia štruktúrne a povrchové vlastnosti vlákna, pričom jeho chemické zloženie zostáva zachované. Patrí sem napínanie, vyhladzovanie, úprava teplotou. Ďalšou metódou je úprava plazmovým výbojom, ktorá patrí medzi najzaujímavejšie techniky. Tento proces mení povrchovú energiu celulóзовých vlákien. Rovnaké účinky dosiahneme aj plazmou za studena. V závislosti od typu a povahy použitých plynov môžeme získať rôzne výsledky povrchových úprav, počas ktorých môže dôjsť k zvýšeniu alebo zníženiu povrchovej energie alebo k vytvoreniu reaktívnych voľných radikálov. [18]

### 5.2 Chemické úpravy

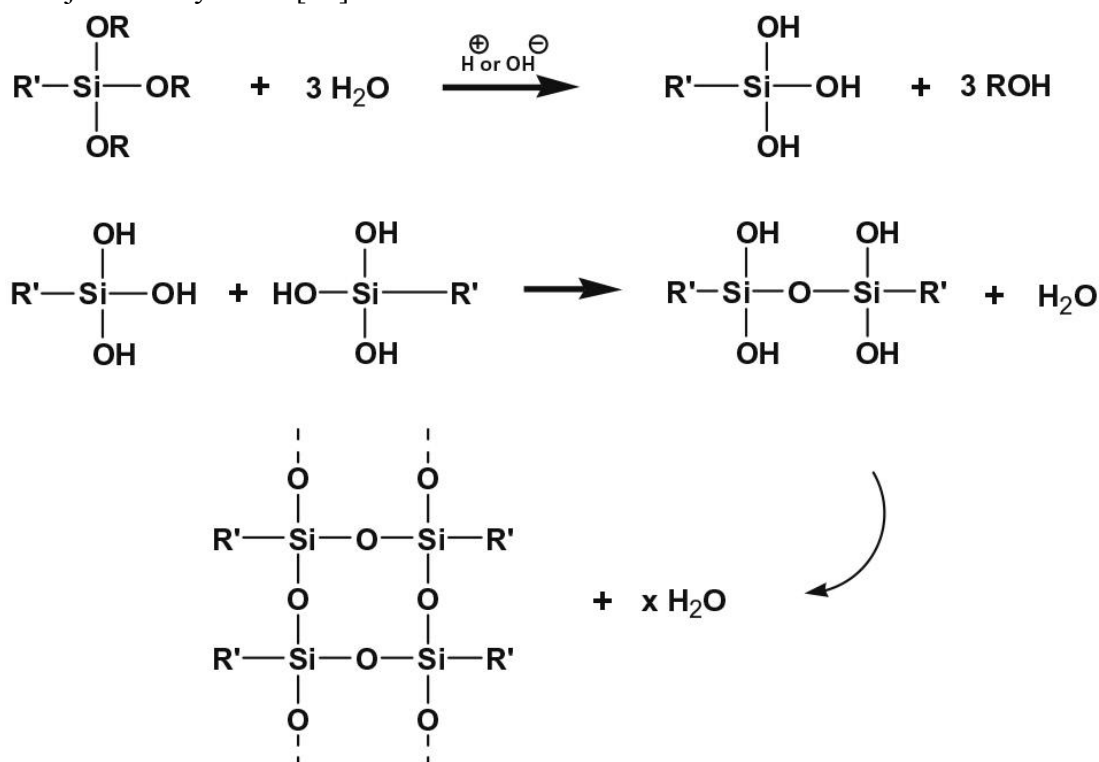
Silne polarizované celulóзовé vlákna nie sú kompatibilné s hydrofóbnymi polymérami. Kvôli tomu sa do vlákien zavádza látka (tzv. väzbové činidlo), ktorá spôsobí zmenu chemického zloženia povrchu vlákien. Zabezpečuje lepšiu kompatibilitu s matricou a zároveň prenáša napätie na rozhraní medzi vláknom a matricou. Väzbové činidlá sú molekuly vykazujúce dve funkcie. Prvá funkcia spočíva v reakcii s OH skupinami celulóзы, zatiaľ čo druhá funkcia zabezpečuje reakciu s funkčnými skupinami matrice. Vhodný výber väzbového

čínidla, ktoré môže kombinovať pevnosť a húževnatosť je dôležitým faktorom pre kompozitné materiály. [21]

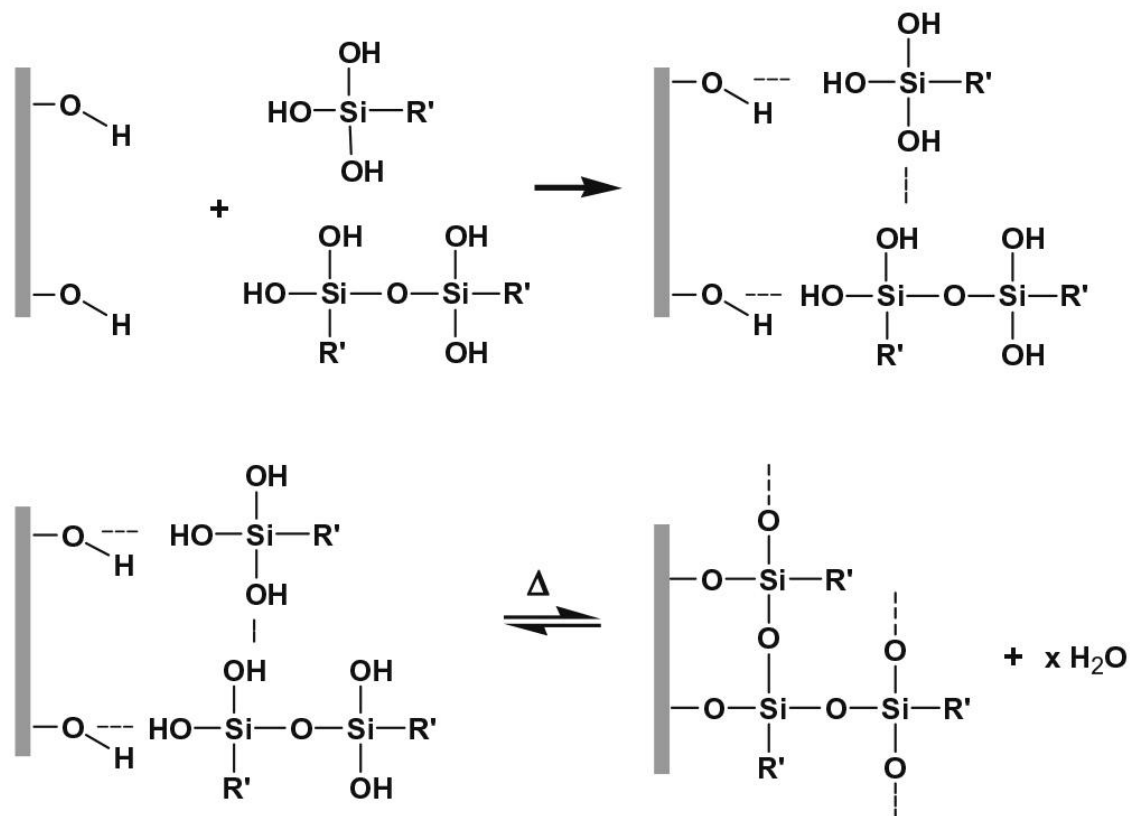
### 5.2.1 Silanizácia

Medzi bežne používané väzbové čínidlo patrí silan. Konkrétne sa preferujú hydroxysilany. Mal by obsahovať dvojfunkčné skupiny, ktoré sú schopné reagovať s matricou aj výstužou, pričom sa medzi nimi vytvorí spojovací mostík. Všeobecná štruktúra silanových čínidiel je  $R_{(4-n)}-Si-(R'X)_n$  ( $n = 1,2$ ). R je alkokyskupina, X predstavuje funkčnú organickú skupinu, R' je alkylový mostík spájajúci kremíkový atom s funkčnou skupinou matrice. Interakcia čínidla s vláknami prebieha prostredníctvom niekoľkých krokov, ktorými sú hydrolýza, kondenzácia, adsorpcia a štiepenie.

Silanové monoméry hydrolyzujú v prítomnosti vody a katalyzátorov (kyseliny, zásady) za vzniku alkoholu a húževnatých reaktívnych silanolových skupín. Počas hydrolýzy prebieha tiež kondenzácia týchto skupín. Miera kondenzácie je ovládaná prostredníctvom pH hydrolyzujúceho systému. Kyslé pH zvyčajne urýchľuje hydrolýzu silanov a zároveň spomaľuje rýchlosť kondenzácie silanolu. Reaktívne silanolové monoméry a oligoméry sú adsorbované na OH skupiny vlákna prostredníctvom vodíkových väzieb. Voľné silanolové skupiny taktiež medzi sebou reagujú za vzniku pevnej polysiloxanovej štruktúry so stabilnými  $-Si-O-Si-$  väzbami. Počas zahrievania sa vodíkové väzby medzi silanolovou a hydroxylovou skupinou rozpadnú, uvoľní sa voda a vzniknú kovalentné väzby  $-Si-O-C-$ . Popísané reakcie znázorňujú Obrázky 5 a 6. [22]



Obrázok 5 Hydrolýza a kondenzácia silanu [22]



Obrázok 6 Reakcia hydrolyzovaného silanu s povrchom prírodných vlákien [22]

### 5.2.2 Alkalická úprava

Najbežnejší spôsob alkalického úpravy je pomocou roztoku NaOH. Podstata spočíva v narušení vodíkových väzieb a v zmene orientácií kryštalickej štruktúry celulózy, pričom sa vytvorí amorfná oblasť, v ktorej sú celulózové mikromolekuly separované na väčšiu vzdialenosť. Priestor medzi nimi vyplňajú molekuly vody. Hydroxylové skupiny sú citlivé na alkalické prostredie. Dôjde k ich štiepeniu a následnej reakcii s molekulami vody, ktorá je potom odstránená zo štruktúry vlákna. Zostávajúce reaktívne molekuly vytvoria väzbu vlákno-O-Na. Vzhľadom k tomu, že sú hydrofilné hydroxylové skupiny redukované, zvýši sa odolnosť vlákna voči vlhkosti. Zároveň dôjde k odstráneniu určitého množstva lignínu, hemicelulózy, pektínu a vosku čo zabezpečuje čistotu povrchu vlákna. Okrem toho sa zníži priemer vlákna a tým sa zvýši pomer dĺžka/priemer, čo zvyšuje účinnú plochu vlákien pre dobrú adhéziu s matricou. [19].

### 5.2.3 Acetylácia

Táto úprava spočíva v zavedení acetylovej funkčnej skupiny. Acetylácia prírodných vlákien je známa esterifikačná metóda, ktorá spôsobuje plastifikáciu celulózových vlákien. Reakcia zahŕňa tvorbu kyseliny octovej ako vedľajšieho produktu, ktorý musí byť odstránený pred použitím vlákien. Chemická modifikácia anhydridom kyseliny octovej nahrádza hydroxylové skupiny celulózových vlákien acetylovou skupinou, ktorá spôsobí zmenu vlastností týchto vlákien a to tak, že sa stanú hydrofobnými. Takže acetylácia znižuje hygroscopický charakter prírodných vlákien a zvyšuje rozmerovú stálosť kompozitov. [23]

#### 5.2.4 Maleinové reakčné činidla

Maleinizovaný PP alebo PP naviazaný na anhydrid kyseliny maleinové (MAPP) je široko používaný ako väzbové činidlo. Úprava celulózových vlákien pomocou MAPP zabezpečuje tvorbu kovalentných väzieb na fázovom rozhraní, vyššiu povrchovú energiu vlákien a tým pádom lepšiu zmáčavosť a vyššiu medzifázovú adhéziu. Pod obchodným názvom je MAPP známy ako epolene, polybond a hostaprime s obsahom kyseliny v rozmedzí od 0,1 do 4 hmotnostných % v dôsledku čoho sa molekulová váha MAPP môže líšiť. Predpokladá sa, že molekulová hmotnosť má výrazný vplyv na difúziu na rozhraní a kompatibilitu s matricou. V prípade, že je molekulová hmotnosť príliš vysoká, môže dôjsť k zamotaniu MAPP s molekulami PP. V dôsledku toho majú polárne skupiny MAPP problém nájsť hydroxylové skupiny na povrchu vlákna. [23]

Používajú sa ešte úpravy peroxidom, izokyanátom, kyselinou steárovou, manganistanom, chloritanom sodným. [19]

## 6 POLYMÉRNE MATRICE

Tvar kompozitu, vzhľad povrchu, tolerancia voči životnému prostrediu a celková životnosť je riadená vlastnosťami polymérnej matrice. Polyméry sa delia do dvoch kategórií: termoplasty a termosety. V poslednej dobe získavajú pozornosť zo strany výskumu tzv. biodegradabilné polyméry.

### 6.1 Termoplasty

Charakteristickým štruktúrnym znakom termoplastov sú veľmi dlhé molekuly (makromolekuly) vytvorené opakovaním rovnakých štruktúrnych jednotiek (niekoľko tisíc až miliónov). Z tohto dôvodu býva tento typ makromolekúl označovaný ako polymér. Jednotlivé makromolekuly nie sú navzájom spojené chemickými väzbami. Držia pokope vďaka slabším sekundárnym väzbám (medzimolekulárne sily) ako sú napríklad van der Waalsové sily a vodíkové mostíky. Pri zvýšenej teplote nad určitú hodnotu, ktorá je charakteristická pre daný polymér dôjde k dočasnému rozdeleniu medzimolekulárnych väzieb v tuhom termoplastickom polyméri. Molekuly sa môžu voči sebe voľne pohybovať a zaujímať nové pozície. Po ochladení v týchto pozíciách molekuly zmrznú, dôjde k obnoveniu medzimolekulárnych síl a výsledkom je termoplast nového a pevného tvaru. Teda tuhý polymér môže byť teplom zmäkčený, roztavený, pretvarovaný toľkokrát, koľkokrát je to žiadané a možné z hľadiska degradácie materiálu. Inými slovami, termoplasty sú recyklovateľné. Patrí sem polystyrén (PS), polypropylén (PP), polyetylén (PE), polykarbonát (PC), polyetylén tereftalát (PET) a iné. [5,25]

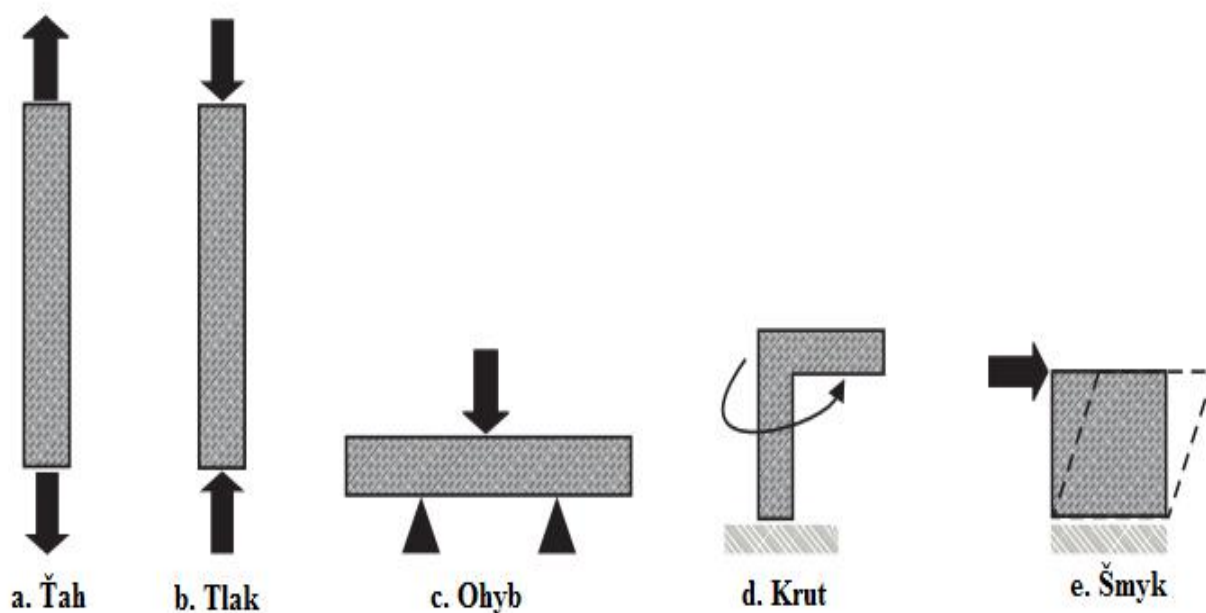
### 6.2 Termosety

Zvyčajne to sú viskózne tekutiny s konzistenciou riedkeho medu tvorené oproti termoplastom relatívne malými molekulami tzv. predpolymeru (najčastejšie polyesteru), ktoré sú vytvrdené vďaka reaktívnym skupinám chemickou reakciou po dodaní katalyzátora a iniciátora. Vytvrdenie prebieha buď za izbovej alebo zvýšenej teploty alebo svetlom podľa zvoleného iniciátora. Pretože pri vytvrdení dochádza ku vzniku chemických väzieb medzi

malými molekulami, vzniká namiesto dlhých lineárnych molekúl, ktoré sú charakteristické pre termoplasty, trojdimenzionálna polymérna sieť s rôznou hustotou. V ideálnom prípade je celý makroskopický výrobok jedinou molekulou. To spôsobuje, že už vytvrdený termoset zostáva v pevnej fáze aj po zahriati, čo vysvetľuje jeho odolnosť voči vysokým teplotám. Na druhej strane sa zvyšuje jeho krehkosť a obmedzuje recyklovateľnosť. Avšak, v prípade, ak je počet väzieb medzi molekulami nízky, pri vysokej teplote môže termoset zmäknúť. Patria sem epoxidy, nenasýtené polyestery, fenol formaldehydové živice, vinylestery atď. [5,25]

## 7 TESTY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Mechanické vlastnosti sú stanovené testovaním kompozitného materiálu pri rôznych silách. Ako je znázornené na Obrázku 7, v kompozitných štruktúrach hrá dôležitú rolu týchto päť síl: ťah, tlak, ohyb, krut, šmyk. Vďaka nim môžeme určiť správanie kompozitov za rôznych podmienok, resp. okolností. Niektoré dôležité vlastnosti sú stanovené za štandardných testovacích podmienok (teplota miestnosti, pomaly pôsobiace sily atď.). Ďalšie vlastnosti sa stanovujú na základe zmeny testovacích podmienok. Napríklad rázové skúšky zahŕňajú sily, ktoré sú aplikované rýchlo. V testoch tečenia a v ťahových skúškach sa uplatňujú statické sily pôsobiace počas dlhšieho časového úseku. Únavové skúšky zahŕňajú opakované ohybové zaťaženie po dlhšiu dobu. V práci boli kompozitné profily testované na pevnosť v ohybe a rázovú húževnosť. [27]

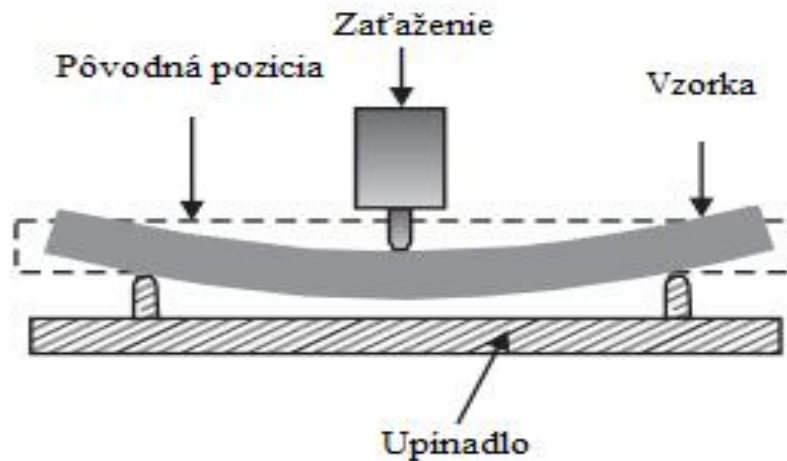


Obrázok 7 Typy síl [27]

### 7.1 Pevnosť v ohybe

Pevnosť v ohybe sa stanovuje nasledovným spôsobom (viď. Obrázok 8). Obdĺžniková vzorka je umiestnená medzi dve podpery. Na vrchnú časť vzorky sa aplikuje napätie a to buď v jednom kontaktnom mieste, vtedy hovoríme o štandardnej ohybovej skúške, resp. trojbodovej skúške ohybom, alebo výnimočne v dvoch kontaktných miestach (štvorbodová skúška ohybom). Počas testu je vrchná časť vzorky pod tlakom, zatiaľ čo opačná časť vzorky

je v ťahu. Je zrejme, že sa prechod medzi týmito silami musí vyskytovať v strednej časti. Tu dochádza k čistému šmyku, ktorý sa musí maximálne obmedziť. To dosiahneme pomocou správneho nastavenia geometrie skúšky. Je to bežne používaný test na kontrolu kvality a je obzvlášť užitočný, keď sú práve ohybové sily tie, ktoré sa môžu vyskytnúť pri použití kompozitného dielu (napríklad vanička do sprchového kútu, na ktorú pôsobí sprchujúci sa človek svojou hmotnosťou). Dopredu môžeme povedať aké zaťaženie daný diel vydrží/nevdrží. [27]

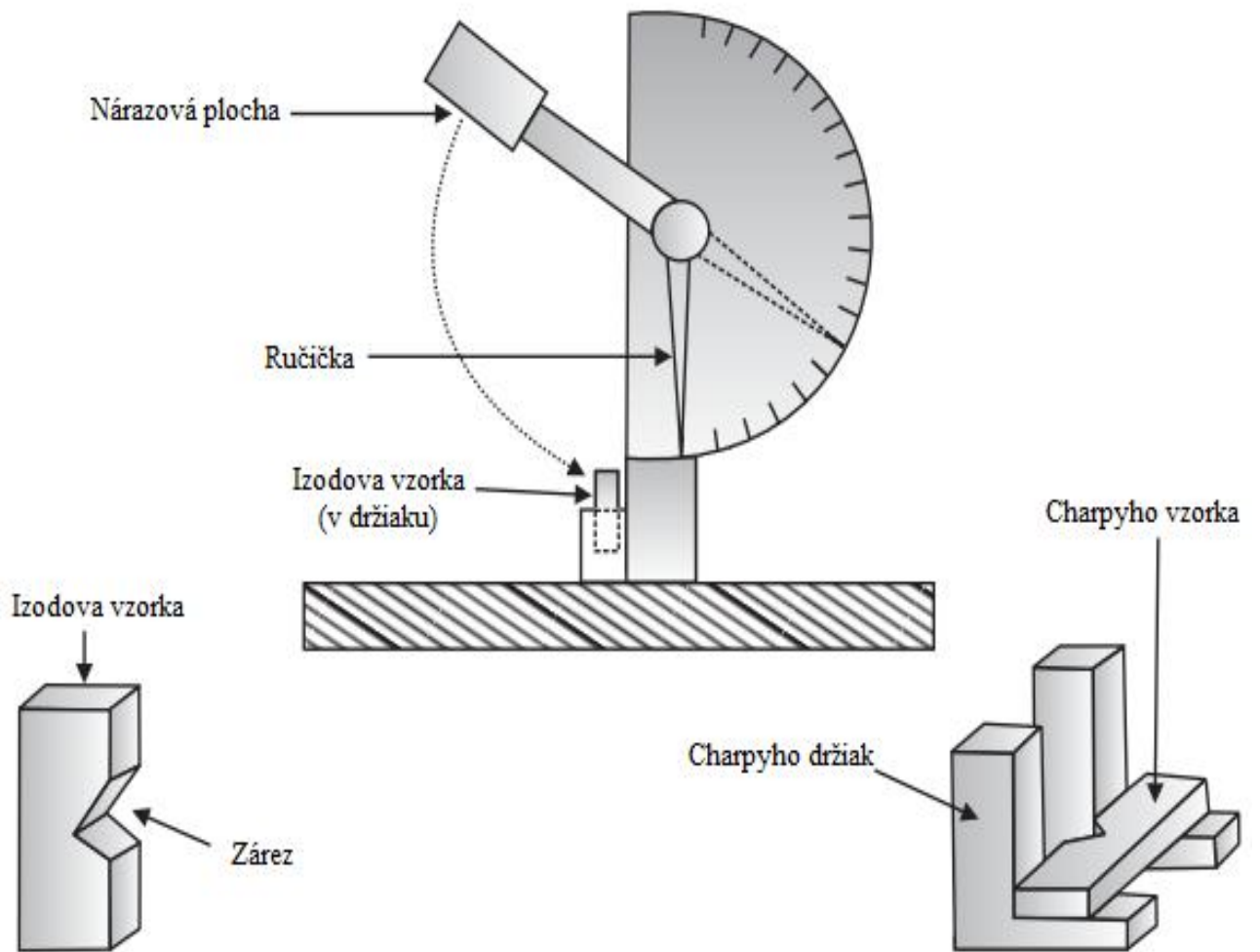


Obrázok 8 Test v ohybe [27]

## 7.2 Rázová húževnatosť

Schopnosť materiálu absorbovať energiu bez porušenia sa nazýva húževnatosť. Všeobecne platí, že húževnatosť materiálu je oveľa dôležitejšia pri náraze, počas ktorého sa sila aplikuje náhle, než po relatívne dlhú dobu. Preto sa vlastnosť materiálu nazýva rázová húževnatosť (niekedy označovaná ako rázová pevnosť) a je definovaná ako energia absorbovaná materiálom pri náhlom náraze. Veľmi závisí na schopnosti vnútornej deformácie materiálu, aby došlo k prispôbeniu nárazu.

Izodov a Charpyho test rázovej húževnatosti využíva kyvadlo, ktoré je znázornené na Obrázku 9. Vzorka sa upne v držiaku buď vo vertikálnej alebo horizontálnej polohe a môže mať zárez, ktorý iniciuje prasknutie. Kyvadlo obvykle zlomí vzorku a pokračuje v ceste za miestom nárazu. Časť energie kyvadla je absorbovaná pri porušení vzorku, preto sa kyvadlo nedostane späť do pôvodnej polohy, v ktorej sa nachádzalo pred nárazom. Zníženie výšky (potenciálnej energie) priamo súvisí s absorbovaním energie vzorky. Pomocou ručičky sa zaznamenáva maximálna výška švihy. Energia absorbovaná z nárazu sa meria z výšky ručičky. Táto energia je mierou tuhosti, resp. húževnatosti vzorku. [27]



Obrázok 9 Test rázovej húževnatosti pomocou kyvadla [27]

## 8 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť pozostáva z výroby šiestich druhov kompozitných profilov pomocou pultruzie, ktoré sa líšia predovšetkým typom matrice a chemickou úpravou ľanových vlákien. Na záver sú uvedené výsledky z testov mechanických vlastností pre každý jeden kompozitný profil.

### 8.1 Použité materiály

#### 8.1.1 Ľanové vlákna

Ako výstuž boli použité vopred upravené ľanové vlákna v roztoku NaOH s malým krutom od francúzskej firmy SAFILIN, určené priamo pre pultruziu. V Tabuľke 3 sú uvedené niektoré vlastnosti vlákien. Použité zväzky mali dĺžkovú hmotnosť 1000 tex.

Tabuľka 3 Vlastnosti ľanových vlákien od firmy SAFILIN

Vlastnosti	SAFILIN 100% ľanové vlákna s malým krutom
Hustota ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1,45
Priemer vlákien ( $\mu\text{m}$ )	20
Pevnosť v ťahu (MPa)	742
Modul pružnosti v ťahu (GPa)	72,9
Špecifická tuhosť v ťahu (GPa)	50,3

#### 8.1.2 Matrice

Boli použité dva typy matric obsahujúce zložky uvedené v Tabuľke 4, ktoré boli dodané od firmy GDP Koral. Do polypropylénového tégliku boli navážené jednotlivé komponenty. Pomocou mechanického miešadla bol obsah tégliku premiešaný a 5 minút ponechaný v pokoji kvôli odvodušneniu. Pripravená matrica bola prevedená do impregnačnej vane. V prvej receptúre bolo množstvo styrénu navýšené, zatiaľ čo v druhej receptúre sa styren do matrice nepridával.

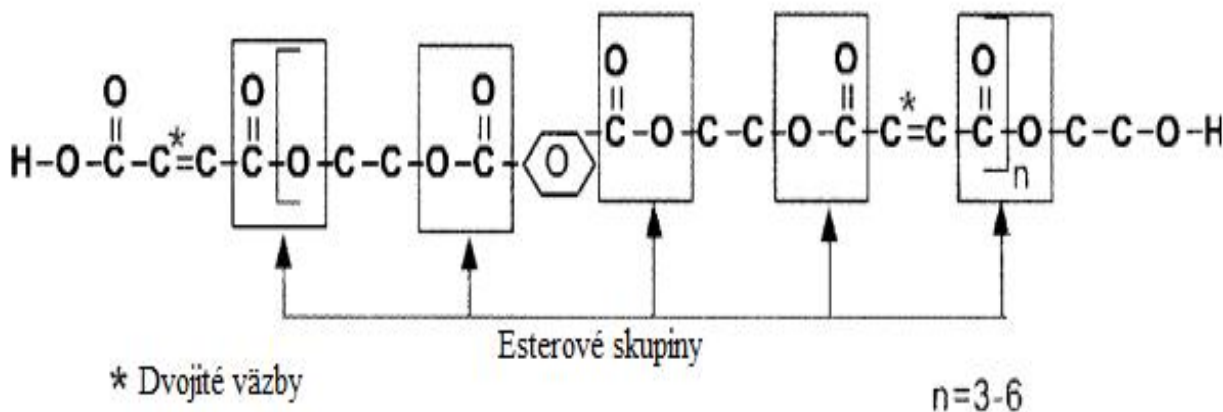
Tabuľka 4 Zloženie matric

Zložka	Receptúra			
	1.	Hm. zastúpenie v matrici [%]	2.	Hm. zastúpenie v matrici [%]
Živica	Poliver ISO 112-G	93,2	Derakane 470 HT-400	93,6
Separáčny činidlo	MOLD WIZ INT-PUL-24	4,7	MOLD WIZ INT-PUL-24	4,3
Iniciátori	BP-50 FT	1,1	BP-50 FT	1,7
	Trigonox C	0,1	TMCH-90-AL	0,4
Sieťovadlo	Styrén	0,9		



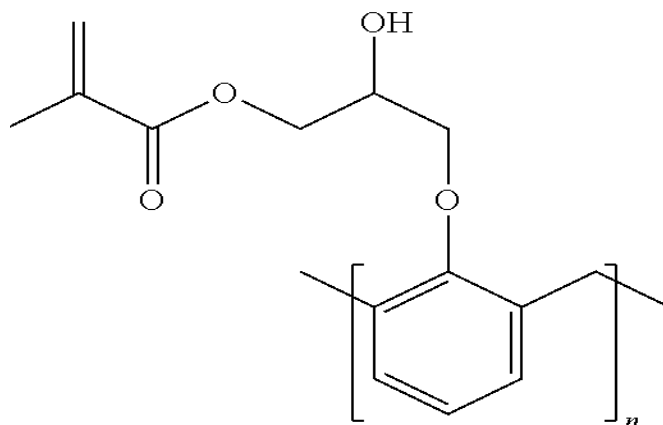
## Živice

Polimer ISO 112-G je isoftalická nenasýtená polyesterová živica rozpustená v styréne s výbornou chemickou odolnosťou. Je obľúbená v námorníctve, pretože odoláva vode. Nenasýtené polyesterové živice obsahujú niekoľko esterových skupín a nenasýtených (dvojitých) väzieb ako je znázornené na Obrázku 10.



Obrázok 10 Štruktúra isoftalickej polyesterovej živice

Derakane 470 HT-400 je epoxi-novolako-vinylesterová živica (viď. Obrázok 11). Má dobrú tepelnú odolnosť, pretože si pri zvýšených teplotách zachováva svoju pevnosť a húževnatosť. Je zaujímavá aj vďaka dobrej odolnosti voči chemickým rozpúšťadlám, kyselinám a oxidačným látkam ako je napríklad chlór.



Obrázok 11 Štruktúra epoxi-novolako-vinylesterovej živice

Tabuľka 5 Mechanické vlastnosti živíc

Živica	Pevnosť v ohybe [MPa]	Modul pružnosti v ohybe [GPa]
ISO112G	135	4,05
470HT	150	3,50

## Separáčne činidlo

MOLD WIZ INT-PUL-24 od výrobcu AXEL je separáčne činidlo na báze organických kyselín, esterov a amínov.

## Iniciátori

V oboch typoch matric bol použitý iniciátor s označením BP-50 FT, ktorý sa aktivuje približne pri 70 °C. Predstavuje ho biela zmes vo forme prášku dibenzoylperoxidu a esteru kyseliny ftalovej v pomere 1:1.

V prvej matrici bol ako ďalší iniciátor použitý terc-butyl peroxybenzoát s obchodným označením Trigonox C. Je to číra kvapalina, ktorá sa aktivuje v teplotnom rozmedzí 120-170 °C. Toto rozmedzie môže byť znížené v závislosti od použitia ďalších látok a katalyzátorov.

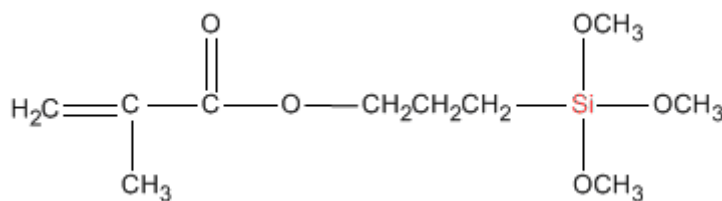
Do druhej matrice bol pridaný iniciátor 1,1-bis(tercbutylperoxid)3,3,5-trimetyl cyklohexán s obchodným označením TMCH-90-AL. Je to transparentná kvapalina s kritickou teplotou 60 °C. Iniciátori sa používajú kvôli vytvrdeniu živice.

## 8.2 Chemická úprava ľanových vlákien

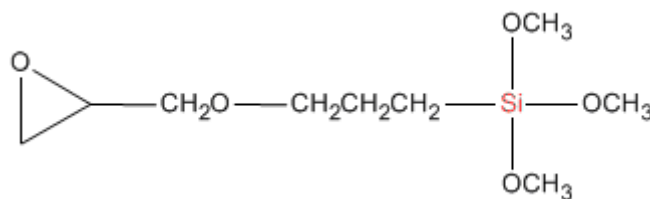
Kvôli zlepšeniu kompatibility, resp. adhézie jednotlivých fáz v kompozite boli ľanové vlákna upravené 3% roztokom silanu za použitia dvoch druhov silanov (MPTMS a GPTMS, celé názvy sú uvedené na Obrázkoch 12 a 13), ktoré sa líšili v skupinách interagujúcich s matricou. Mechanizmus silanizácie je popísaný v kapitole 5.2.1.

MPTMS je bifunkčný silan obsahujúci reaktívnu metakrylovú organickú skupinu a trimetoxysilylovú anorganickú skupinu. Jeho ďalšie výhody spočívajú vo zvýšení pevnosti kompozitu v ťahu a ohybe.

GPTMS silan obsahuje namiesto metakrylovej skupiny epoxidovú. Zlepšuje vlastnosti kompozitu v ťahu a tlaku.



Obrázok 12 Silan MPTMS (3-(trimetoxysilyl)propylmetakrylát)



Obrázok 13 Silan GPTMS (3-glycidoxypropyl trimetoxysilan)

Do 5 l kadičky bolo pridaných 300 ml H<sub>2</sub>O, 1200 ml EtOH, 35,8 ml silanu MPTMS (35 ml v prípade silanu GPTMS). Aby bola hydrolýza účinnejšia, pH roztoku sa upravilo pomocou kyseliny octovej na hodnotu 4. Hydrolýza silanu prebiehala za laboratórnej teploty 2 hodiny. Roztok bol z kadičky prevedený do 2 l reakčnej banky. Následne boli vlákna pridané do roztoku v reakčnej banke opatrenej spätným chladičom, ktorý bol pomocou topného hniezda privedený k varu a silanizovalo sa 2 hodiny pri teplote 85 °C. Po uplynutí tejto doby boli vlákna 12 hodín sušené v sušiarňi pri 80 °C.

### 8.3 Experimentálne podmienky výroby kompozitných profilov

Pre všetky kompozity boli použité rovnaké experimentálne podmienky. Profily boli vyrobené technologickým postupom zvaným pultruzia (viď. Kapitola 2.1). Zväzky vysušených a upravených ľanových vlákien (objemový podiel v kompozitoch predstavuje 50 %) dlhých približne 8 m bolo navinutých na plastové špulky, z ktorých prostredníctvom navádzacích prvkov smerovali najprv do prázdnej impregnačnej vane, potom do studenej formy s profilom o rozmeroch 12,7x2 mm. Po zavedení vlákien do poslednej časti pultruznej linky (dva odťahové valce) bola forma vyhrievaná dvojzónovo pomocou externého elektrického ohrievača na teplotu 100 °C (prvá teplotná zóna) a 160 °C (druhá teplotná zóna). Po dosiahnutí požadovaných teplôt bola do impregnačnej vane umiestnená matrica. Odťah bol nastavený na konštantnú rýchlosť 0,3 m/min. Výsledné vytvrdnuté profily boli narezané na požadované rozmery. Pultruzná linka je znázornená na Obrázku 17.



Obrázok 17 Pultruzná linka

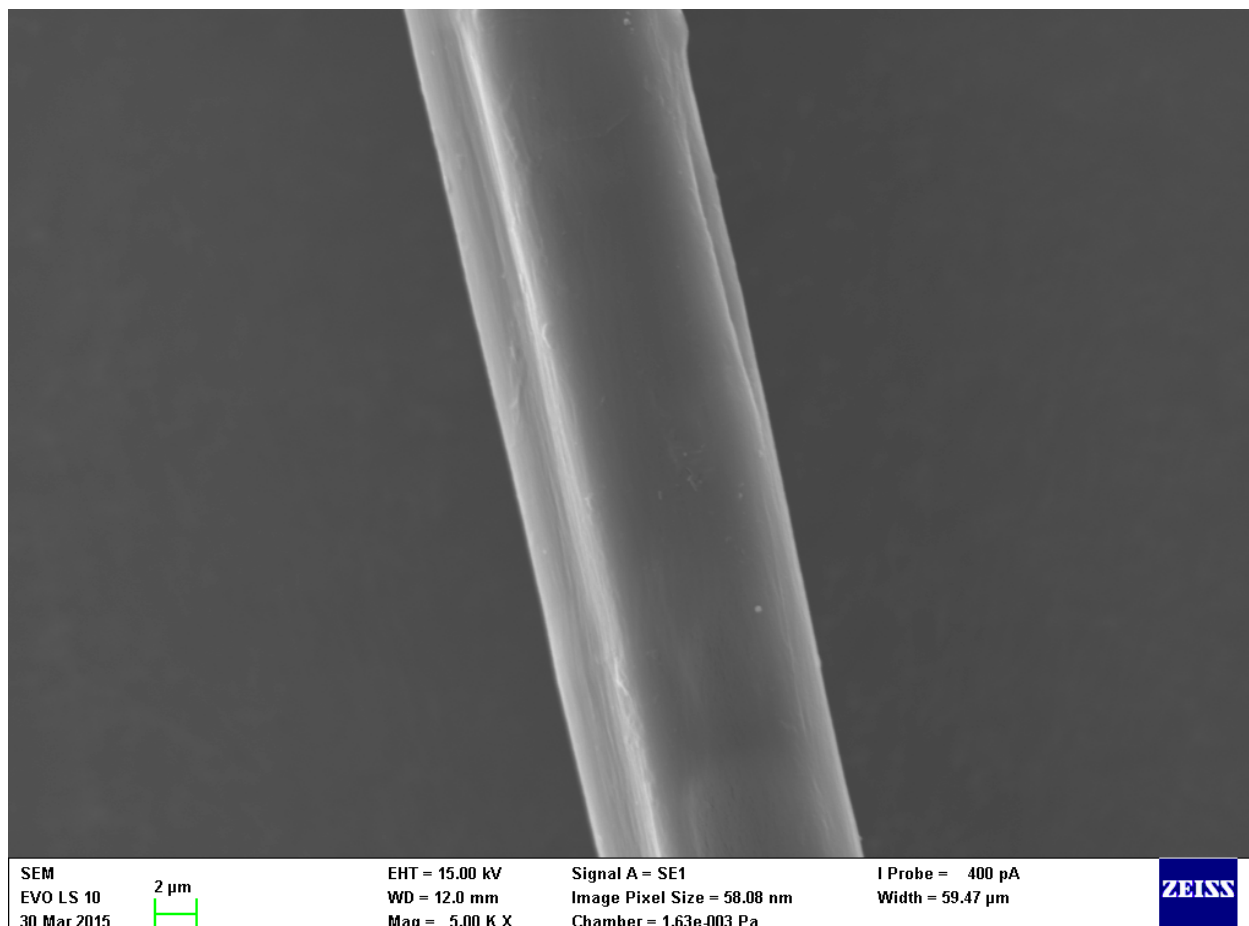
## VÝSLEDKY A DISKUSIA

### Elektrónová mikroskopia:

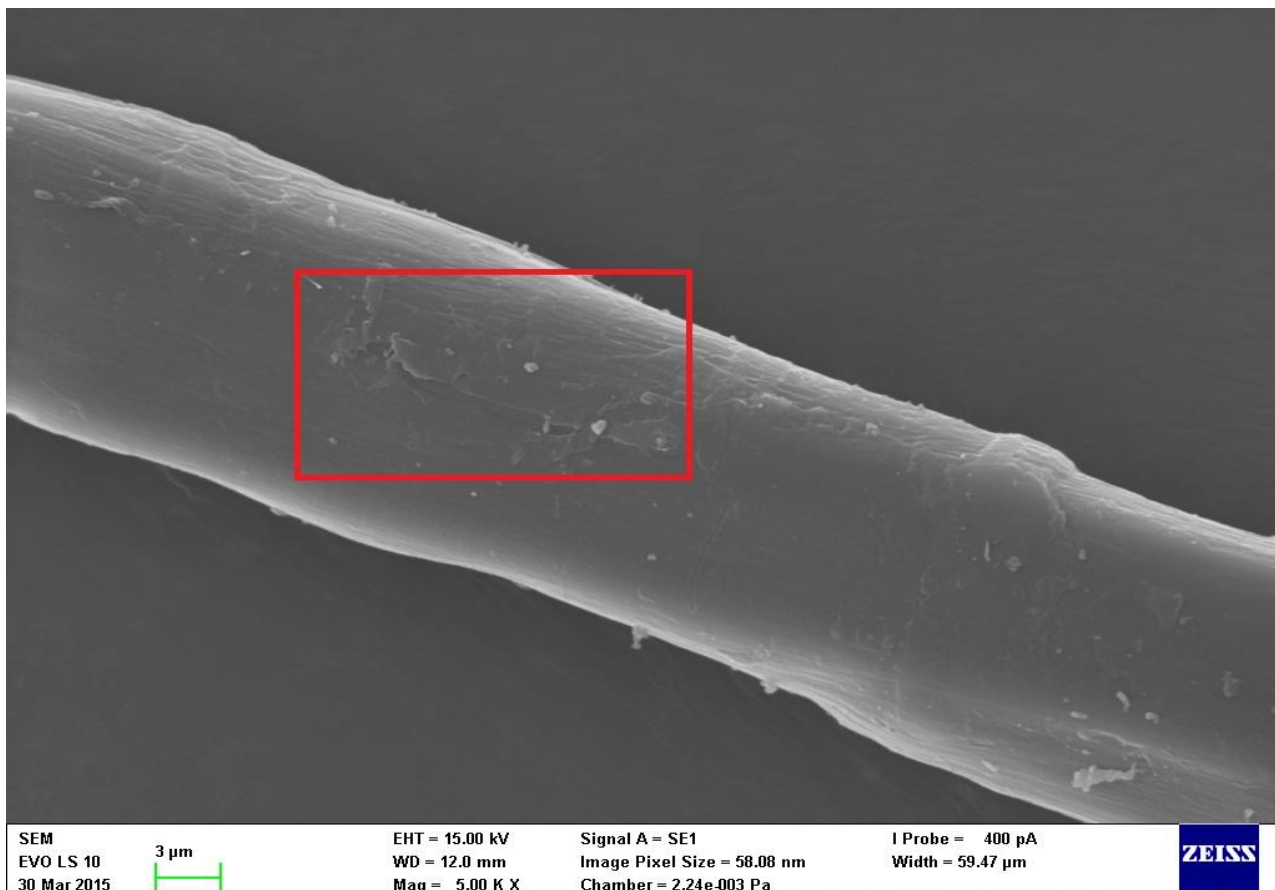
Efektivita naviazania silanu na povrch vlákien bola overená pomocou skenovacieho elektrónového mikroskopu EVO LS 10 (Zeiss) s EDS detektorom, vďaka ktorým sa získali snímky povrchu vlákien a ich prvkové zloženie. Ako referencia boli použité ľanové vlákna upravené len v roztoku NaOH (viď. Obrázok 14). Na snímkach vlákien vidno nehomogénne naviazanie silanu vo vyznačenej červenej oblasti (Obrázky 15-16) a Tabuľka 6 s percentuálnym zastúpením prvkov vo vláknach, z ktorej vyplýva, že GPTMS silanu sa naviazalo približne o 0,8 hmotnostných % viac. Hodnota je však meraná iba z jedného miesta, preto jej nemožno prisúdiť veľkú vypovedajúcu hodnotu. Ióny vápnika a chlór predstavujú nečistoty. Vlákná obsahujú zároveň kation sodíka, pretože boli upravované v roztoku NaOH.

Tabuľka 6 Percentuálne zastúpenie prvkov v upravených ľanových vláknach

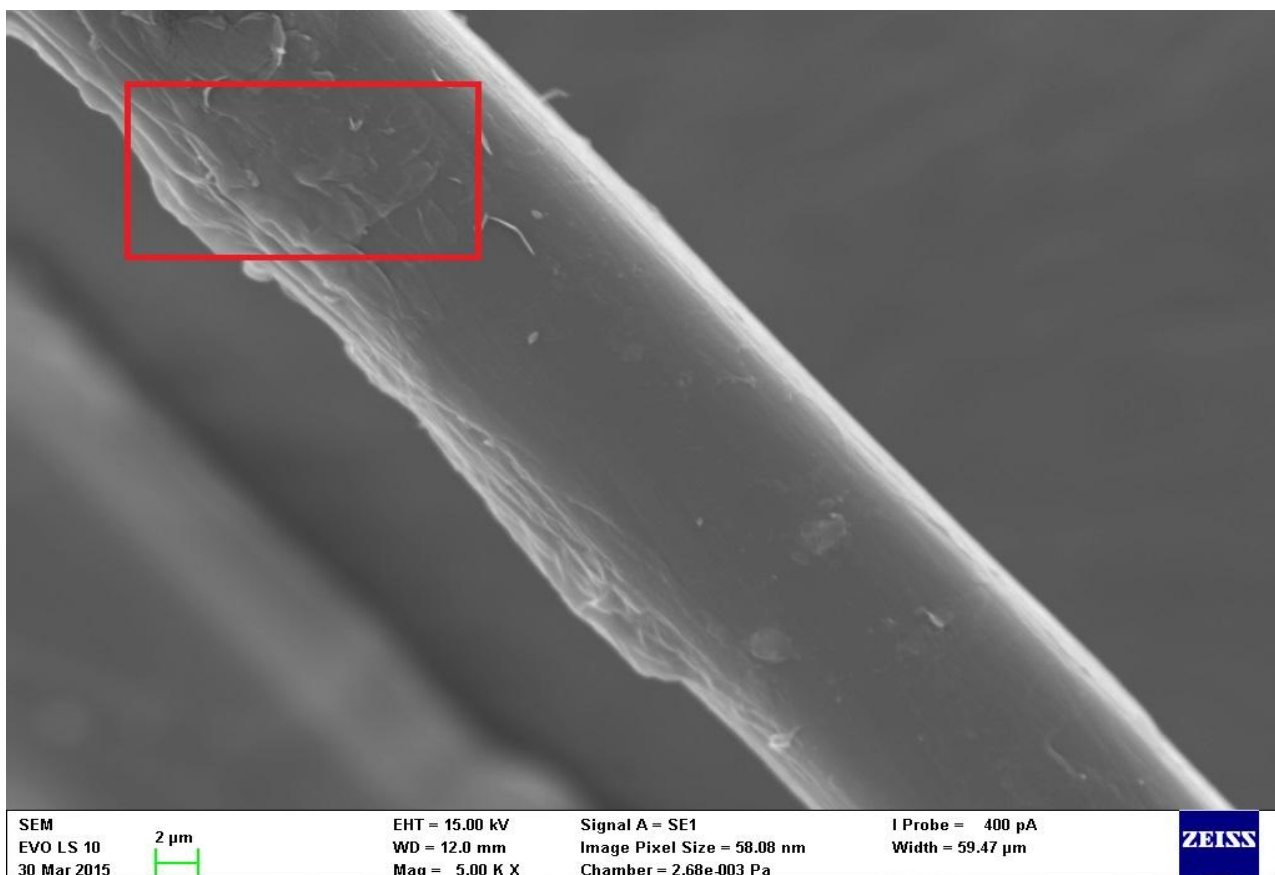
Prvok	NaOH hm. %	MPTMS silan hm. %	GPTMS silan hm. %
C	74,58	74,24	68,56
O	25,25	22,74	29,10
Na	0,09	0,52	0,06
<b>Si</b>	-	<b>1,33</b>	<b>2,17</b>
Ca	0,08	0,69	0,11
Cl	-	0,47	-
Spolu	100	100	100



Obrázok 14 Referenčná vzorka



*Obrázok 15 Vlákna upravené MPTMS silanom*



*Obrázok 16 Vlákna upravené GPTMS silanom*

## 8.4 Testy mechanických vlastností kompozitných profilov

Profily boli testované na pevnosť v ohybe a rázovú húževnatosť. Ako referencia bol použitý kompozitný profil, ktorého vlákna boli upravené len v roztoku NaOH. Princípy skúšok sú bližšie popísané v kapitole 7.

### Pevnosť v ohybe

6 vzoriek o dĺžke 45 mm s rovnakým prierezom bolo mechanicky namáhaných na prístroji *Zwick Z010*. Skúška bola prevedená v trojbodovom systéme s podperami o priemere 32 mm. Zaťažovacia rýchlosť bola nastavená na 1 mm/min. Vzorky boli testované podľa normy ISO 14125.

Kvôli rozdielnym mechanickým vlastnostiam a štruktúram jednotlivých živíc (viď. Tabuľka 5 a Obrázky 10-11) sú výsledky komentované pre oba kompozity zvlášť.

### Výsledky kompozitov s matricou ISO112G

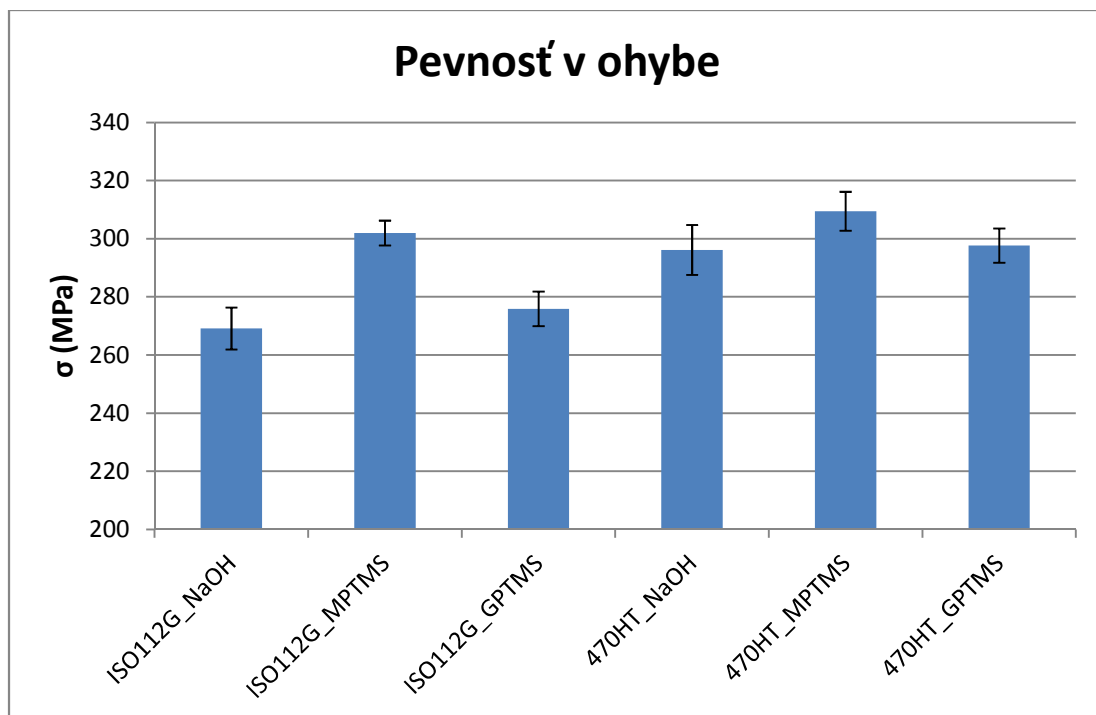
Z grafu na Obrázku 18 vyplýva, že úprava silanom MPTMS mala pozitívnejší efekt na pevnosť kompozitných profilov v ohybe, ktorá sa oproti referencií zlepšila o 10,9 %. Úprava silanom GPTMS nemala výrazný vplyv na zlepšenie vlastností, pretože hodnoty sú veľmi podobné referenčným. Z toho vyplýva, že interakcia medzi matricou a silanom s metakrylovou skupinou bola lepšia ako s epoxidovou. Môže to byť spôsobené vytvorením kovalentnej väzby medzi matricou a silanom MPTMS v priebehu radikálového vytvrdzovania. Predpoklad vytvorenia fyzikálnych väzieb je medzi GPTMS silanom a matricou, ktorá neobsahovala funkčnú skupinu potrebnú na otvorenie oxiranového kruhu v silane. To by vysvetľovalo nižšie hodnoty pevnosti v ohybe.

Z grafu na Obrázku 19 možno vidieť, že hodnoty silanizovaných kompozitov sú v rámci chyby podobné. Ich modul pružnosti sa zlepšil o necelých 1,4 GPa oproti referencii.

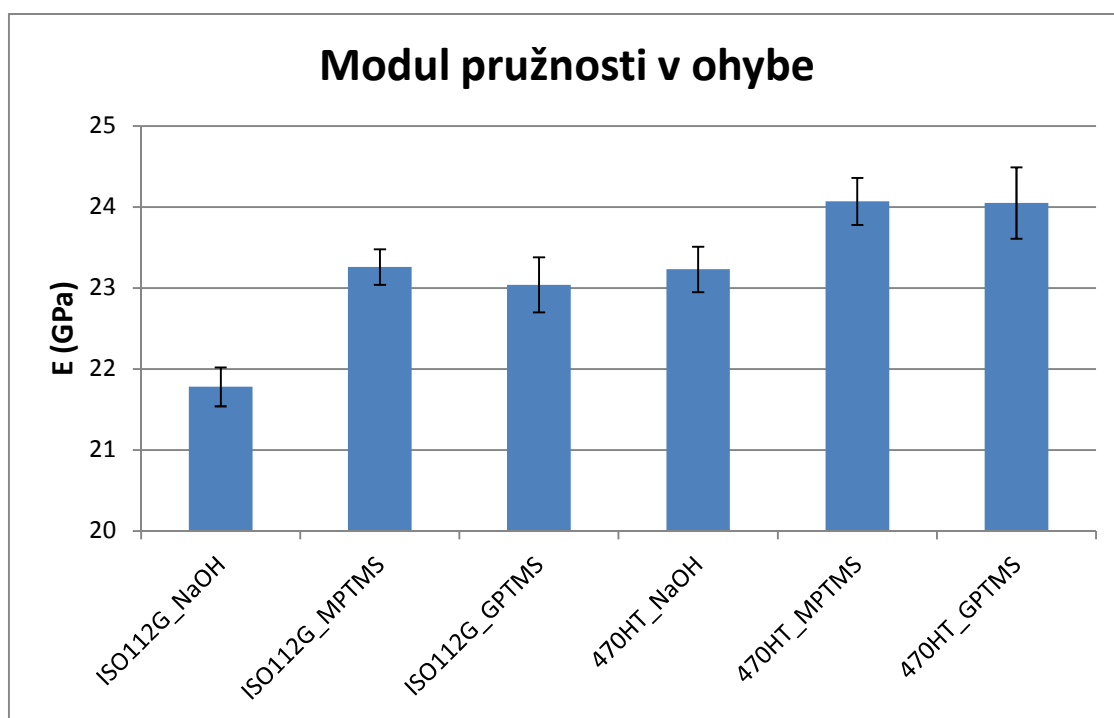
### Výsledky kompozitov s matricou 470HT

Výsledky sú podobné predošlým, viď Obrázok 18. Úprava MPTMS silanom bola pozitívna na pevnosť v ohybe, avšak s menšou efektívnosťou zlepšenia, ktorá činí 4,3 % oproti referencii. Úprava GPTMS silanom sa na pevnosti v ohybe neprejavila. Modul pružnosti sa v tomto prípade zlepšil približne o 0,8 GPa oproti referencii (Obrázok 19). To platí pre kompozity či už s vláknami upravenými v MPTMS alebo GPTMS silane.

Kompozity s matricou 470HT dosiahli vyššie hodnoty pevnosti a modulu pružnosti v ohybe oproti kompozitom s matricou ISO112G. Dôvodom je lepšia pevnosť v ohybe samotnej matrice 470HT (viď. Tabuľka 5) a jej okom pozorovaná lepšia impregnácia vlákien, čo sa prejavilo na zvýšení modulu pružnosti výsledného kompozitu.



Obrázok 18 Porovnanie pevnosti v ohybe testovaných kompozitných profilov



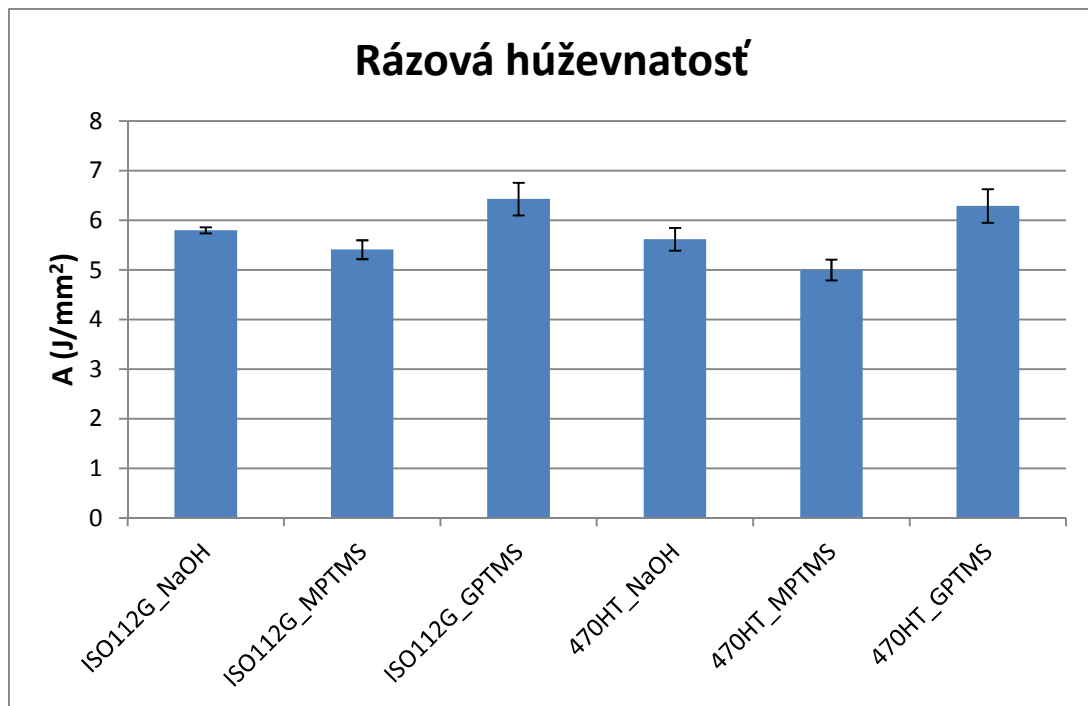
Obrázok 19 Porovnanie modulu pružnosti v ohybe testovaných kompozitných profilov

#### Rázová húževnatosť

6 vzoriek o dĺžke 50 mm s rovnakým prierezom bolo podrobených skúške rázovej húževnatosti na prístroji Labtest CHK 50J-I (LaborTech). Vzorky boli testované podľa normy ISO 179-2.

## Výsledky a diskusia

Na Obrázku 20 je vidieť, že rázová húževnatosť oboch referencií je podobná. Z toho vyplýva, že obe matrice majú približne rovnaké vlastnosti pri náhlom a rýchlom náraze. Ďalej si možno povšimnúť, že úprava vlákien silanom MPTMS mala negatívny dopad na rázovú húževnatosť. Je to spôsobené tým, že väzby medzi matricami a silanom MPTMS sú pevnejšie, tým pádom je výsledný profil krehkejší. To sa prejaví na znížení rázovej húževnatosti. Naopak, úprava vlákien silanom GPTMS mala pozitívny vplyv. Interakcie medzi matricami a vláknami sú o niečo slabšie. Menej krehký profil sa pri náhlom náraze dokáže lepšie prispôbiť (vnútorne sa deformovať) a to sa prejaví na zvýšení rázovej húževnatosti.



Obrázok 20 Porovnanie rázovej húževnatosti testovaných kompozitných profilov



## 9 ZÁVER

Cieľ práce spočíval v chemickej úprave ľanových vlákien a vo výrobe kompozitov technologickým postupom pultruzie. Úprava vlákien bola prevedená prostredníctvom dvoch typov silanov za účelom optimalizácie rozhrania medzi jednotlivými fázami kompozitu. Naviazanie silanov na povrch vlákien bolo overené EDS detektorom, ktorý je súčasťou elektrónového mikroskopu. Bol posúdený vplyv týchto úprav na výsledné mechanické vlastnosti zhotovených kompozitov.

Pomocou EDS detektoru a elektrónového mikroskopu bola získaná prvková analýza a snímky povrchu vlákien, z ktorých vyplýva, že sa silan podarilo naviazať a to nehomogénne. Môže to byť spôsobené tým, že roztok v reakčnej banke nebol miešaný a zväzky vlákien boli uložené na sebe, pričom sa silan do vnútorných zväzkov zle dostával.

Zo získaných výsledkov pevnosti kompozitných profilov v ohybe možno povedať, že na úpravu vlákien je vhodnejší GAMA silan, pretože interakcia medzi metakrylovou skupinou silanu a matricou bola lepšia. To sa odzrkadlilo na vyšších hodnotách pevnosti v ohybe. To isté platí aj pre výsledky z modulu pružnosti v ohybe. Lepšie interakcie medzi skupinami, respektíve tvorba pevnejších, kovalentných väzieb zväčšila krehkosť materiálu, čo potvrdzuje test na rázovú húževnatosť, pričom hodnoty oproti referencii klesli. Výsledky sú zdieľané s Bc. Filipom Hahnom, pretože výroba kompozitov bola prevedená spoločne.

Z celkového hľadiska však úprava vlákien silanom nemala výraznejší vplyv na mechanické vlastnosti zhotovených kompozitov. Predpokladá sa, že čím väčší povrch vlákien bude homogénne pokrytý silanovými skupinami, tým lepšie budú výsledné mechanické vlastnosti kompozitov vďaka funkčnému rozhraniu a lepšej adhézii vlákien v matrici. Práve to by mohlo byť predmetom ďalšieho skúmania, vrátane vplyvu na hydrolytickú stabilitu materiálu, prípadne i horľavosť a podobne.

## 10 LITERATÚRA

- [1] MOHANTY, A. K., M. MISRA a L. T. DRZAL. Sustainable bio-composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment* [online]. 2002, vol. 10, 1/2, s. 19-26 [cit. 8.11 2014]. DOI: 10.1023/A:1021013921916.  
Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1021013921916>
- [2] SILVA, F.J.G., F. FERREIRA, M.C.S. RIBEIRO, Ana C.M. CASTRO, M.R.A. CASTRO, M.L. DINIS a A. FIÚZA. Optimising the energy consumption on pultrusion process. *Composites Part B: Engineering*. 2014, vol. 57, s. 13-20. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.09.035.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836813005489>
- [3] BARAN, Ismet, Cem C. TUTUM a Jesper H. HATTEL. The effect of thermal contact resistance on the thermosetting pultrusion process. *Composites Part B: Engineering*. 2013, vol. 45, issue 1, s. 995-1000. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.09.049.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812005999>
- [4] BARAN, Ismet, Cem C. TUTUM, Michael W. NIELSEN a Jesper H. HATTEL. Process induced residual stresses and distortions in pultrusion. *Composites Part B: Engineering*. 2013, vol. 51, s. 148-161. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.03.031.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836813001339>
- [5] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [6] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.
- [7] MICHLER, Goerg H a F BALTA-CALLEJA. *Nano- and micromechanics of polymers: structure modification and improvement of properties*. Cincinnati: Hanser Publications, 2012, xvii, 566 p. ISBN 978-344-6428-447.  
Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpNMPSMIPQ/cid:kt00BX8KE2/viewerType:pdf/root\\_slug:nano-micromechanics-polymers?cid=kt00BX8KE2&page=1](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpNMPSMIPQ/cid:kt00BX8KE2/viewerType:pdf/root_slug:nano-micromechanics-polymers?cid=kt00BX8KE2&page=1)
- [8] MILNE, I, R RITCHIE a B KARIHALOO. *Comprehensive structural integrity*. 1st ed. Boston: Elsevier/Pergamon, 2003, 10 v. ISBN 00804415059.  
Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpCSIV0002/cid:kt004RDIM1/viewerType:pdf/root\\_slug:comprehensive-structural?cid=kt004RDIM1&page=3](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpCSIV0002/cid:kt004RDIM1/viewerType:pdf/root_slug:comprehensive-structural?cid=kt004RDIM1&page=3)
- [9] CAMPBELL, F. *Manufacturing processes for advanced composites*. Oxford: Elsevier, 2004, 517 s. ISBN 18-561-7415-8.  
Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpMPAC0002/cid:kt009ADD22/viewerType:pdf/root\\_slug:manufacturing-processes?cid=kt009ADD22&page=3](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpMPAC0002/cid:kt009ADD22/viewerType:pdf/root_slug:manufacturing-processes?cid=kt009ADD22&page=3)
- [10] CHUNG, Deborah D. *Carbon fiber composites*. Boston: Butterworth-Heinemann, c1994, x, 215 p. ISBN 07-506-9169-7.

- Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpCFC00012/cid:kt0057A96E/viewerType:pdf/root\\_slug:carbon-fiber-composites?cid=kt0057A96E&page=1](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpCFC00012/cid:kt0057A96E/viewerType:pdf/root_slug:carbon-fiber-composites?cid=kt0057A96E&page=1)
- [11] HOA, Suong. *Principles of the manufacturing of composite materials*. Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc., 2008, p. cm. ISBN 978-193-2078-268.  
Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpPMCM0004/cid:kt006R6LG9/viewerType:pdf/root\\_slug:principlesmanufacturing?cid=kt006R6LG9&page=15](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpPMCM0004/cid:kt006R6LG9/viewerType:pdf/root_slug:principlesmanufacturing?cid=kt006R6LG9&page=15)
- [12] MURPHY, John. *Additives for plastics handbooks*. 2nd ed. New York, NY, USA: Elsevier Science Ltd., c2001, xxii, 469 p. ISBN 18-561-7370-4.  
Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpAPHE0001/cid:kt004WV6W4/viewerType:pdf/root\\_slug:additives-plastics-handbook?cid=kt004WV6W4&page=4](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpAPHE0001/cid:kt004WV6W4/viewerType:pdf/root_slug:additives-plastics-handbook?cid=kt004WV6W4&page=4)
- [13] FARUK, Omar, Andrzej K. BLEDZKI, Hans-Peter FINK a Mohini SAIN. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science* [online]. 2012, vol. 37, issue 11, s. 1552-1596 [cit. 2013-05-03]. DOI: /10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670012000391>
- [14] *Natural polymers*. Editor Thomas Sabu, J Maya. Cambridge: RSC Publishing, c2012, xviii, 349 p. RSC green chemistry, no. 16. ISBN 978-184-9734-028.  
Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpNPVC000E/cid:kt00B40EJ1/viewerType:pdf/root\\_slug:natural-polymers-volume?cid=kt00B40EJ1&page=3](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpNPVC000E/cid:kt00B40EJ1/viewerType:pdf/root_slug:natural-polymers-volume?cid=kt00B40EJ1&page=3)
- [15] EDITED BY S. EICHHORN, Edited by S.J. *Handbook of textile fibre structure*. 1. publ. Cambridge: Woodhead Pub, 2009. ISBN 978-184-5697-303.  
Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpHTFSVNRM/cid:kt00940JH3/viewerType:pdf/root\\_slug:handbook-textile-fibre?cid=kt00940JH3&page=22](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpHTFSVNRM/cid:kt00940JH3/viewerType:pdf/root_slug:handbook-textile-fibre?cid=kt00940JH3&page=22)
- [16] JOHN, Maya Jacob a Rajesh D. ANANDJIWALA. Recent developments in chemical modification and characterization of natural fiber-reinforced composites. *Polymer Composites*. 2008, vol. 29, issue 2, s. 187-207. DOI: 10.1002/pc.20461. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.20461>
- [17] MOHANTY, A. K., M. MISRA a G. HINRICHSEN. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*. 2000, 276-277, issue 1, s. 1-24. DOI: 10.1002/(sici)1439-2054(20000301)276:1<1::aid-mame1>3.0.co;2-w.
- [18] BLEDZKI, A. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*. 1999, vol. 24, issue 2, s. 221-274. DOI: 10.1016/S0079-6700(98)00018-5.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670098000185>
- [19] KABIR, M.M., H. WANG, K.T. LAU a F. CARDONA. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Composites Part B: Engineering*. 2012, vol. 43, issue 7, s. 2883-2892. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053.  
Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812002922>
- [20] MATHER, R a R WARDMAN. *The chemistry of textile fibres*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, c2011, xvii, 367 p. ISBN 18-475-5867-4. Dostupné z:

[https://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpCTF00001/cid:kt00A7TR15/viewerType:pdf/root\\_slug:chemistry-textile-fibres?cid=kt00A7TR15&page=24&b-q=separation%20flax%20fibres&sort\\_on=default&b-subscription=TRUE&b-group-by=true&b-sort-on=default&q=separation%20flax%20fibres](https://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpCTF00001/cid:kt00A7TR15/viewerType:pdf/root_slug:chemistry-textile-fibres?cid=kt00A7TR15&page=24&b-q=separation%20flax%20fibres&sort_on=default&b-subscription=TRUE&b-group-by=true&b-sort-on=default&q=separation%20flax%20fibres)

- [21] GEORGE, Jayamol, M. S. SREEKALA a Sabu THOMAS. A review on interface modification and characterization of natural fiber reinforced plastic composites. *Polymer Engineering*. 2001, vol. 41, issue 9, s. 1471-1485. DOI: 10.1002/pen.10846. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pen.10846>
- [22] XIE, Yanjun, Callum A.S. HILL, Zefang XIAO, Holger MILITZ a Carsten MAI. Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010, vol. 41, issue 7, s. 806-819. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.03.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X10000850>
- [23] LI, Xue, Lope G. TABIL a Satyanarayan PANIGRAHI. Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Journal of Polymers and the Environment*. 2007-2-17, vol. 15, issue 1, s. 25-33. DOI: 10.1007/s10924-006-0042-3. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10924-006-0042-3>
- [24] MOHANTY, A. K., M. MISRA a L. T. DRZAL. Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview. *Composite Interfaces*. 2001, vol. 8, issue 5, s. 313-343. DOI: 10.1163/156855401753255422. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1163/156855401753255422>
- [25] EDITORS, Vijay Kumar Thakur. *Biomass-based biocomposites*. 1st. Shawbury: Smithers Rapra Technology, 2013. ISBN 978-184-7359-803. Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpBB00001G/cid:kt00C4I1D2/viewerType:pdf/root\\_slug:biomass-based-biocomposites?cid=kt00C4I1D2&page=11](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpBB00001G/cid:kt00C4I1D2/viewerType:pdf/root_slug:biomass-based-biocomposites?cid=kt00C4I1D2&page=11)
- [26] MÜSSIG, Jörg. *Industrial application of natural fibres: structure, properties, and technical applications*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2010, xxi, 538 p. ISBN 978-047-0695-081.
- [27] STRONG, A. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. 2nd ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2008, xiii, 620 p. ISBN 978-087-2638-549. Dostupné z: [http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpFCMMMAE5/cid:kt00A1X3E5/viewerType:pdf/root\\_slug:fundamentals-composites?cid=kt00A1X3E5&page=16](http://app.knovel.com/web/view/swf/show.v/rcid:kpFCMMMAE5/cid:kt00A1X3E5/viewerType:pdf/root_slug:fundamentals-composites?cid=kt00A1X3E5&page=16)

## 11 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

SP	Stupeň polymerizácie
PP	Polypropylén
MAPP	Maleinizovaný polypropylén
PS	Polystyrén
PE	Polyetylén
PC	Polykarbonát
PET	Polyetylén tereftalát
MPTMS	Silan obsahujúci metakrylovú skupinu
GPTMS	Silan obsahujúci epoxidovú skupinu
ISO112G	Isoftalická nenasýtená polyesterová živica
470HT	Epoxi-novolako-vinylesterová živica