

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

KOMPOZITY NA BÁZI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

FILIP HAHN

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

KOMPOZITY NA BÁZI PŘÍRODNÍCH VLÁKEN
COMPOSITES BASED ON NATURAL FIBERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

FILIP HAHN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Mgr. RADEK PŘIKRYL, Ph.D.

BRNO 2013



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

Zadání bakalářské práce

Číslo bakalářské práce: **FCH-BAK0692/2012** Akademický rok: **2012/2013**
Ústav: Ústav chemie materiálů
Student(ka): **Filip Hahn**
Studijní program: Chemie a chemické technologie (B2801)
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808R016)
Vedoucí práce **Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.**
Konzultanti:

Název bakalářské práce:

Kompozity na bázi přírodních vláken

Zadání bakalářské práce:

Zmapování aktuálního stavu technologie výroby a využití kompozitních materiálů na bázi přírodních vláken a jejich základních technických parametrů.

Termín odevzdání bakalářské práce: 10.5.2013

Bakalářská práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu bakalářské práce. Toto zadání je přílohou bakalářské práce.

Filip Hahn
Student(ka)

Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.
Vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
Ředitel ústavu

V Brně, dne 31.1.2013

prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Vypracovaná bakalářská práce se v teoretické části zabývá aktuálním stavem výzkumu na poli kompozitních materiálů na bázi přírodních vláken a polymerních matric, a výrobními metodami kompozitních materiálů. Experimentální část byla zaměřena na testování mechanických vlastností sisalových a lněných vláken a také na jejich úpravu roztokem NaOH. Za použití metody pultruze na laboratorním pultruzním zařízení byly z uvedených vláken a nenasycené polyesterové matrice vyrobeny kompozitní materiály. Následně byly testovány jejich mechanické vlastnosti v ohybu. Zhotovené polymerní kompozity na bázi přírodních vláken byly porovnány s kompozity na bázi skleněných vláken.

Abstract

The theoretical part of this bachelor thesis deals with current state of art in the field of composite materials based on natural fibers and polymer matrices, and with production methods of the composite materials. The practical part focuses on the testing of the mechanical properties of sisal and flax fibers and on their chemical treatment by NaOH solution. The above mentioned fibers and unsaturated polyester resin were used to produce composite materials by means of pultrusion process. The flexural properties of the material samples were tested and compared to those of glass fiber composites.

Klíčová slova

Kompozity, přírodní vlákna, pultruze, nenasycená polyesterová pryskyřice

Keywords

Composites, natural fibers, pultrusion, unsaturated polyester resin

Citace

HAHN, F. *Kompozity na bázi přírodních vláken*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2013. 64 s. Vedoucí bakalářské práce Mgr. Radek Přikryl, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

Poděkování

Chtěl bych vyjádřit upřímné poděkování vedoucímu bakalářské práce Mgr. Radku Přikrylovi, Ph.D. a taktéž Ing. Přemyslu Menčíkovi za jejich ochotu, odbornou pomoc, cenné připomínky a rady během mé práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Adamu Bábíkovi a Ing. Antonínu Knobovi za jejich pomoc a praktické rady během experimentální části. Nakonec bych chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni za intenzivní podporu během mého studia.

OBSAH

1	Úvod.....	6
2	Kompozitní materiály	6
2.1	Částicové kompozity	6
2.2	Vláknové kompozity	6
2.2.1	Typy vláknových výztuží	7
3	Přírodní vlákna.....	7
3.1	Struktura přírodních vláken.....	8
3.1.1	Chemická a fyzikální struktura vláken	8
3.2	Vlastnosti vybraných přírodních vláken.....	9
3.3	Proces získávání přírodních vláken	10
3.4	Rozdělení přírodních vláken	10
3.4.1	Lněná vlákna	11
3.4.2	Sisalová vlákna.....	11
3.4.3	Jutová vlákna.....	12
3.4.4	Kokosová vlákna	12
3.4.5	Abaková vlákna.....	13
3.4.6	Konopná vlákna.....	13
3.4.7	Ananasová vlákna.....	14
3.4.8	Vlákna z olejové palmy	15
3.4.9	Kenafová vlákna.....	15
3.4.10	Bambusová vlákna	15
3.4.11	Vlákna Curauá.....	16
3.4.12	Vlákna Isora	16
3.4.13	Vlákna z rostliny Sansevieria cylindrica	17
3.4.14	Další přírodní vlákna s potenciálem výztuže.....	17
4	Modifikace přírodních vláken	19
4.1	Fyzikální úpravy.....	19
4.2	Chemické úpravy.....	19
4.2.1	Alkalická úprava.....	19
4.2.2	Silanová reakční činidla	19
4.2.3	Acetylace	20
4.2.4	Benzoylace	20
4.2.5	Úprava peroxidem	21
4.2.6	Maleinová reakční činidla	21
4.2.7	Úprava chloritanem sodným.....	21
4.2.8	Akrylace a roubování akrylonitrilu	21
4.2.9	Úprava izokyanátem.....	22
4.2.10	Úprava kyselinou stearovou	22
4.2.11	Úprava manganistanem	22
4.2.12	Další úpravy vláken.....	22
5	Polymerní matrice.....	22
5.1	Termosetové matrice	23
5.1.1	Nenasycené polyesterové pryskyřice	23
5.1.2	Vinylesterové pryskyřice.....	23

5.1.3	Epoxidové pryskyřice.....	24
5.1.4	Fenolické pryskyřice	24
5.1.5	Bismaleimidy.....	25
5.1.6	Kyanoestery	25
5.1.7	Polyimidy	25
5.1.8	Polyuretany.....	25
6	Technologie výroby	26
6.1	Technologie pro termosetové matrice	26
6.1.1	Ruční kladení.....	26
6.1.2	Nastřikování	27
6.1.3	Navíjení.....	27
6.1.4	Pultruze (tažení)	28
6.1.5	Metoda lisování se vstřikem matrice (RTM).....	28
6.1.6	Lisování ve formě.....	29
6.2	Technologie pro termoplastické matrice	29
6.2.1	Metoda přímého vstřikování.....	30
6.2.2	Navíjení termoplastické pásky	30
6.2.3	Lisování ve formě.....	31
6.2.4	Hot press technika	31
6.2.5	Formování za pomoci membrány.....	32
7	Charakterizace vlastností kompozitních materiálů	32
7.1	Charakterizace ohybových vlastností	32
7.2	Charakterizace tahových vlastností	33
7.3	Charakterizace smykových vlastností	33
7.4	Stanovení pevnosti na otláčení	33
7.5	Stanovení nasákavosti ve vodě.....	34
7.6	Kalcinační metoda.....	34
7.7	Diferenční snímací kalorimetrie	34
7.8	Stanovení teploty vychýlení	35
8	Experimentální část.....	36
8.1	Metody a zařízení	36
8.2	Materiály	37
8.2.1	Vláknové výztuže	37
8.2.2	Matrice.....	39
8.3	Výběr vhodné matrice	40
8.3.1	Test mezilaminární smykové pevnosti	41
8.4	Kvalita přírodních vláken.....	42
8.4.1	Alkalická úprava přírodních vláken	42
8.4.2	Tahová zkouška jednotlivých vláken	42
8.5	Pultruze s použitím sisalových vláken	45
8.5.1	Test pevnosti v ohybu.....	45
8.6	Pultruze s použitím lněných vláken.....	48
8.7	Celkové srovnání pultrudovaných kompozitních materiálů.....	50
8.8	Ručně kladené kompozitní materiály	52
9	Závěr	54
10	Literatura.....	56

11	Seznam použitých zkratek.....	61
12	Seznam příloh	62

1 ÚVOD

Zvyšující se ekologická, sociální a ekonomická vnímavost, rychlé tempo spotřeby ropných zásob a nové regulace týkající se životního prostředí dávají podnět k hledání "zelených" materiálů šetrných k životnímu prostředí. Vývoj vysoce kvalitních materiálů vyrobených z přírodních surovin zaznamenal v poslední době celosvětový nárůst. Jedním z takových materiálů jsou kompozity obsahující přírodní vlákna s funkcí výztuže. Tyto materiály jsou středem zájmu zejména v automobilovém průmyslu, kde nabízí řešení náhrady tradičních materiálů, ze kterých jsou vyrobeny především díly mimo deformační zóny, například palubní desky a jiné pohledové části. Nejedná se ovšem o zdaleka jediný směr, který tyto materiály nabízejí. Přírodní vlákna byla například experimentálně použita pro výrobu lopatek k větrným elektrárnám nebo k výrobě sportovního náčiní, například kajaku. Ovšem velkou překážkou při pracování s kompozity na bázi přírodních vláken je jejich velká rozmanitost jednak druhová a také co se týče vlastností. O výsledných parametrech kompozitu totiž rozhoduje celá řada proměnných, například typ vlákna, přírodní podmínky (místo pěstování), metoda zpracování a často také dodatečné úpravy vláken [1].

TEORETICKÁ ČÁST

2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Pod pojmem kompozit si můžeme představit heterogenní systém, který je tvořen minimálně dvěma fázemi o rozdílných vlastnostech a různém chemickém složení. Výsledný kompozit pak využívá užitečných vlastností jednotlivých fází a synergicky je spojuje ve funkční celek. Ten se poté zpravidla vyznačuje především vysokou tuhostí, pevností a také nízkou měrnou hmotností, což snižuje celkovou hmotnost výrobku. Jedna z fází má funkci pojivové matrice, další fáze jsou potom fázemi sekundárními, někdy označované jako výztuže. Ty obvykle nejsou spojené a mohou být tvořeny částicemi různých tvarů (kulovitého, destičkového, vláknitého). Výztuže bývají zpravidla tou fází, která konečnému produktu propůjčuje pevnost a tuhost. Velmi důležitou roli hraje také rozhraní mezi jednotlivými fázemi, která zodpovídá za celkovou soudržnost kompozitu. Podle toho jaký materiál tvoří matici, můžeme zavést rozdělení na kompozity s kovovou, polymerní a keramickou maticí [2].

2.1 Částicové kompozity

U tohoto druhu kompozitu se setkáváme s výztuží, která je tvořena částicemi majícími přibližně stejné rozměry ve všech směrech. Částice jsou kulovité, destičkovité tyčinkovité nebo mohou mít jakýkoliv jiný pravidelný nebo nepravidelný tvar. Částicové kompozity mívají menší pevnost a tuhost než kompozity s dlouhými vlákny, jsou však obvykle mnohem levnější. Také zpravidla obsahují nižší objemový podíl výztuže než vláknové kompozity (40-50 %) a jejich další nevýhodou je jejich častá křehkost [3].

2.2 Vlákenné kompozity

V současné době jsou vyvíjeny materiály, které mají ve své struktuře zahrnutu možnost recyklace, čímž je snížena potenciální zátěž životního prostředí po skončení užitého cyklu výrobku. Materiály, které netvořily nosné části konstrukcí, se nahrazují plasty vzhledem k jejich omezeným mechanickým vlastnostem. Avšak polymerní kompozity se díky širokému spektru vlastností mohou rovnat tradičním konstrukčním materiálům. Největšího potenciálu v této oblasti dosáhly kompozity, ve kterých vystupuje polymer jako matrice a výztuž představují anorganická nebo organická vlákna [4].

Tento typ kompozitních materiálů kombinuje vysokou pevnost tuhých výztuží s vysokou houževnatostí pružné polymerní matrice, přičemž na celkové vlastnosti kompozitu mají vliv vlastnosti vyztužujících vláken, matrice, mezivrstev, objemový zlomek vláken v matrici a jejich geometrie či orientace v matrici. Nejrozšířenějším typem vláknové výztuže jsou bezesporu skleněná vlákna, která tvoří okolo 90 % celkové produkce kompozitních materiálů. Mezi další vláknové výztuže můžeme zařadit vlákna uhlíková, aramidová, polyetylenová, ale také vlákna přírodní [5].

2.2.1 Typy vláknových výztuží

Skleněná vlákna

Tento typ vláken v produkci dominuje především díky jejich výborným technickým vlastnostem, jako například vysoká pevnost a modul pružnosti v tahu. Navíc jsou tato vlákna poměrně odolná vůči vysokým teplotám, jsou nehořlavá, dobře chemicky odolná a také disponují dobrými elektrickými vlastnostmi. Pro svoje dobré tepelné a zvukové izolační vlastnosti jsou skleněná vlákna hojně využívána ve stavebním průmyslu.

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna disponují krystalickou strukturou s krystaly orientovanými paralelně k dlouhé ose vláken. Vyznačují se vysokými pevnostmi, nízkou tepelnou vodivostí a měrnou hmotností a dobrou elektrickou vodivostí. Uhlíková vlákna se vyrábí metodou řízené oxidace, karbonizace a grafitizace organických látek s vysokým obsahem uhlíku. Mezi tyto látky patří například polyakrylonitril, celulóza nebo bitumen (živice). U tohoto typu vláken se často setkáváme s povrchovými úpravami, které mají za úkol zlepšit adhezi k polymerní matrici.

Aramidová vlákna

Jde o vlákna z aromatických polyamidů, která disponují vysokou pevností a modulem pružnosti v tahu. Mimoto mají tato vlákna nízkou měrnou hmotnost, jsou žáruvzdorná a také citlivá na UV záření a vlhkost. Výroba je založena na zvláknování z kapalného roztoku za pomoci iontové složky reakční směsi, která se váže na vodíkové můstky amidové skupiny, přičemž důležitá je také volba organického rozpouštědla.

Polyetylenová vlákna

Polyetylenová vlákna s označením UHMWPE (ultra-high molecular weight polyethylene) se vyrábí zvláknováním z roztoku, který obsahuje mezi 5 až 10 % polymeru a rozpouštědlo, které napomáhá separaci molekul a jejich uspořádání ve směru vlákna při průchodu tryskou. Vlákna mají dobré chemické vlastnosti (odolávají alkáliím a i kyselinám) a vysokou pevnost v tahu [5].

3 PŘÍRODNÍ VLÁKNA

Obecně můžeme přírodní vlákna rozdělit podle jejich původu na rostlinná, živočišná a minerální, přičemž mohou být složena jak z organických tak anorganických sloučenin. Práce je zaměřena pouze na vlákna získaná z rostlin. Ty obsahují přírodní vlákna ve svých listech, stoncích nebo semenech (plodech). Vlákna se liší ve svých vlastnostech a morfologii, což vyplývá z jejich odlišných funkcí v různých částech rostliny. Průmyslově nejdůležitějším rostlinným vláknem je bavlna, z hlediska využití ve formě kompozitní výztuže mají ovšem zásadní význam tzv. lýková vlákna jako je len setý, konopí, juta nebo sisal. Stále je však celá řada vláken, kterým z hlediska využití v průmyslové výrobě kompozitních materiálů není přikládána velká váha i přesto, že by svými mechanickými vlastnostmi tomuto účelu vyhovovala [6].

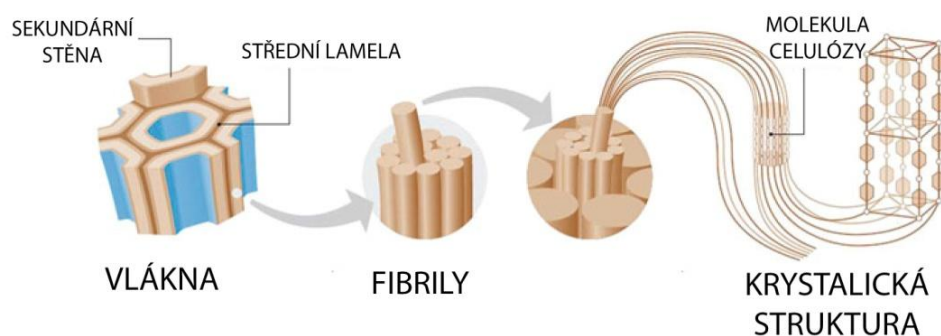
3.1 Struktura přírodních vláken

Je zřejmé, že struktura, složení a vlastnosti vláken získaných z různých druhů rostlin se budou lišit. To ovšem není jediný faktor ovlivňující tuto skutečnost. Velmi záleží například na podmínkách, ve kterých je daná rostlina pěstována a s tímto faktem přímo souvisí také stáří samotné rostliny, při kterém obvykle dochází k jejímu sklizení, neboť složení buněčných stěn rostliny se s časem mění, což samozřejmě částečně promlouvá do konečných vlastností samotných vláken. Dalším faktorem je zvolený proces pro získání přírodních vláken, z těla rostliny. Tyto procesy mohou být mechanické, chemické nebo enzymatické.

Pod pojmem přírodní vlákno zpravidla rozumíme svazek vláken získaný z dané rostliny. Tyto svazky se poté skládají z jednotlivých vláken. K oddělení svazků vláken z rostlin se používají mechanické procesy, kdežto k získání vláken samotných je zapotřebí procesů chemických nebo enzymatických [7].

3.1.1 Chemická a fyzikální struktura vláken

Rostlinná vlákna se skládají ze silných, tuhých molekul celulózy, které jsou vnořeny do matrice tvořené ligninem společně s dalšími polysacharidy včetně hemicelulózy a pektinu, které jsou propojeny s celulózą a ligninem. V buněčné stěně vlákna je obsažena řada dalších látek zahrnující vosky, anorganické soli, dusíkaté sloučeniny, avšak tyto sloučeniny nemají stavební funkci. Vysoce uspořádané molekuly celulózy držené maticí z ligninu a ostatních polysacharidů v buněčné stěně tvoří strukturu známou jako mikrofibrily [7].



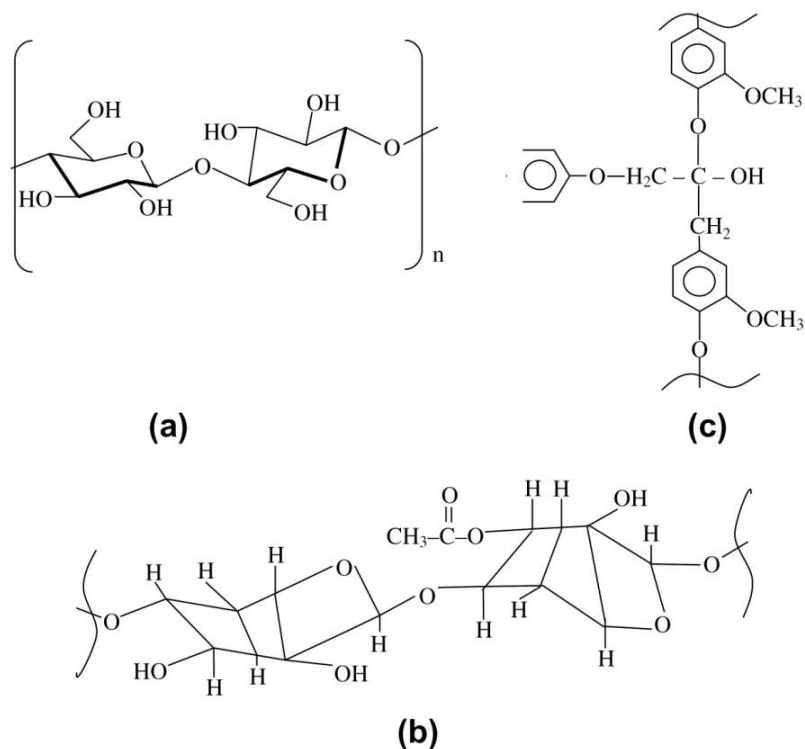
Obrázek 1 Uspořádání mikrofibril a celulózy v buněčné stěně rostliny [6]

Nejdůležitějším stavebním článkem přírodního vlákna je celulóza. Tento polysacharid o vysoké molekulové hmotnosti je složen pouze z atomů uhlíku, vodíku a kyslíku, přičemž jednotlivé molekuly celulózy jsou spojené do řetězců skrze β 1,4 glykosidické vazby. Tyto řetězce nejsou větvené a disponují schopností odolávat hydrolýze, avšak tato vlastnost je mírně degradována jakoukoliv chemickou úpravou vláknů.

Hemicelulóza jako další součást přírodního vlákna je polysacharid o nižší molekulové hmotnosti, často ve formě kopolymeru, který tvoří náhodné, amorfni rozvětvené nebo nelineární struktury s malou pevností. Může být snadno hydrolyzována zředěnými kyselinami nebo bázemi.

Lignin tvořící aromatické struktury je tvořen během nevratného procesu odbourávání vody z cukrů, především xylózy. Proces lignifikace propůjčuje rostlině během jejího růstu pevnost, lignin se stává tužším a zpevňuje buněčnou stěnu. Tím jí propůjčuje permeabilitu a napomáhá při transportu vody [6].

U přírodních vláken obecně dochází k jejich degradaci při teplotách okolo 240 °C, přičemž jednotlivé stavební složky vlákna jsou citlivé na různé rozsahy teplot. K degradaci dochází nejprve u ligninu při zhruba 200 °C, celulóza a hemicelulóza degradují při následně teplotách vyšších.



Obrázek 2 Chemická struktura a) celulózy b) hemicelulózy c) ligninu [8]

3.2 Vlastnosti vybraných přírodních vláken

Mechanické i jiné vlastnosti přírodních vláken závisí na celé řadě faktorů, což je hlavní problém pro reprodukovatelnost při výrobě polymerních kompozitů na bázi těchto vláken. V následující tabulce jsou uvedeny základní mechanické vlastnosti a hustoty některých přírodních vláken. Tabulka 1 představuje souhrn hodnot získaných z více odborných zdrojů. V závorce je vždy uvedena nejčastěji udávaná hodnota jednotlivých vlastností.

Tabulka 1 Některé vlastnosti vybraných přírodních vláken [9]

Vláknó	Pevnost v tahu (MPa)	Youngův modul pružnosti (GPa)	Tažnost (%)	Hustota (g/cm ³)
Len	343-1500 (700)	8-100 (70)	1,2-4 (3)	1,4-1,52
Konopí	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
Kapok	45-93 (60)	1,7-4 (2,9)	1,2-4 (2)	1,47
Kokos	95-270 (200)	2,8-6 (5)	15-51,4 (30)	1,15-1,5
Abaka	12-980 (600)	12-72 (50)	1-12 (4)	1,4-1,5
Ananas	170-1627 (750)	6,2-82 (40)	0,8-3 (2)	0,8-1,6
Curauá	439-495 (460)	10 (10)	1,3-4,5 (3)	0,92
Bambus	140-1000 (500)	11-89 (30)	1,2-4 (3)	0,6-1,5
Sisal	80-855 (600)	9-38 (12)	1,9-4 (3)	1,0-1,5
Olejová palma	248 (248)	3,2-6,7 (4,5)	14-25 (20)	0,7-1,55
E - sklo	3500	73,5	4,8	2,6

3.3 Proces získávání přírodních vláken

Proces separace vláken nebo svazků vláken je operace složená z několika kroků a některé z nich mohou mít více variant. V této kapitole je popsán obecný způsob získávání vláken ze stonku, například lněných nebo konopných vláken.

Samotný proces separace vláken začíná na poli, kde jsou během sklizně stonky vytrhány (len) nebo posečeny (konopí) a rozprostřeny na zemi. Stonky jsou sesbírány a následně podstupují proces máčení, který zajišťuje, aby stonky změkly a došlo k oddělení svazků vláken od zbývajícího stonkového pletiva. Během máčení dochází také vlivem mikroorganismů k degradaci pektinu, který je z velké části zodpovědný za spojení svazků vláken s pletivem stonku. Proces máčení může být proveden několika způsoby. Jedním z nich je máčení bez posečení rostlin, kdy je rostlina dehydratována vysušujícím herbicidem, ještě předtím než je sklizena. Další možností je impregnace vláken hydroxidem sodným a následným vypíráním alkálií nasycenou vodní parou.

Po tomto kroku jsou stonky sesbírány a převezeny k dekortačním a separačním zařízením. Během dekortace je od svazků vláken mechanicky nejčastěji za pomoci dekortačních linek odtržena dřevitá část stonku. Další procesy separace jsou v průmyslu prováděny ručně a částečně chemicky. Enzymatická separace vláken je v současné době předmětem výzkumů a čeká na využití v zemědělském sektoru.

3.4 Rozdělení přírodních vláken

Přírodní vlákna zpravidla rozdělujeme do tří skupin dle toho, z jaké části rostliny byla izolována na vlákna získaná z lýka, listů nebo semen (plodů).



Obrázek 3 Rozdělení přírodních vláken

Lýko se skládá z dřevěného jádra, které je obklopeno stonkem. Uvnitř stonku je potom množství vláknových svazků a každý z nich obsahuje jednotlivá vlákna. Do této skupiny můžeme zařadit například len, konopí, jutu nebo kenaf. Listová vlákna jako například sisal, abaka nebo banánovník jsou vlákna hrubějšího charakteru. K vláknům získaných ze semen lze zařadit například kokosová nebo vlákna z olejové palmy [6].

3.4.1 Lněná vlákna

Lněná vlákna (*Linum usitatissimum*) patří k vláknům, které je možno získat ze stonku rostliny. Jedná se o rostlinu, které vyhovuje mírné podnebí a patří k nejstarším pěstovaným plodinám na světě. Mimo textilního průmyslu hrají tato vlákna svou roli ve výrobě kompozitních materiálů [1].

Ebru Bozaci a kolektiv se zabýval úpravou lněných vláken za pomoci plazmatu v atmosféře vzduchu a také v atmosféře argonu pro zlepšení mezifáze mezi matricí a výztuží. Upravená vlákna byla následně použita pro výrobu kompozitu s HDPE nebo nenasyčenou polyesterovou pryskyřicí. Kompozity zhotovené z upravených vláken vykazovaly vyšší mezifázovou adhezi, přičemž při použití nenasyčené polyesterové pryskyřice jako matrice dosahovala lepších výsledků úprava plazmatem v atmosféře vzduchu. Za použití skenovací elektronové mikroskopie bylo zjištěno, že povrch vláken po úpravě vykazoval vyšší hrubost [10].

Nový typ biokompozitního materiálu byl experimentálně zhotoven z netkané textilie z lněných vláken a arabské gumy získané ze semen lnu dvou různých odrůd. K zesíťování matrice došlo za pomoci epichlorhydrinu, což mělo za následek i zvýšenou stabilitu kompozitu ve vodném prostředí a jako plastifikátoru bylo použito glycerolu [11].

Duigou a kolektiv se zabýval vlastnostmi mezifáze v kompozitním materiálu zhotoveného z lněných vláken představující výztuž a kyseliny poly-L-mléčné jako matrice. Kompozit byl zhotoven metodou přímého vstřikování a byl porovnán s kompozitem ze skleněných vláken a nenasyčené polyesterové pryskyřice anebo polypropylenu. Kompozit s přírodními vlákny dosahoval vyšších hodnot zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti než kompozit ze skleněných vláken a polypropylenu a podobných hodnot jako kompozit s nenasyčenou polyesterovou pryskyřicí jako matricí. Po namočení lněných vláken na tři dny do vody a vysušení na vzduchu vykazoval kompozit nižší tahové pevnosti ale signifikantně vyšší hodnoty zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti. Vysušením vláken při 105 °C došlo ke snížení jejich modulu pružnosti a také ke snížení adheze mezi matricí a výztuží až o 20 % [12].

3.4.2 Sisalová vlákna

Sisalová vlákna pocházejí z listů rostliny agáve (*Agave sisalana*), která je komerčně produkována například v Brazílii a Východní Africe. Poptávka po této plodině se v posledních deseti letech neustále zvyšuje, neboť její pěstování vyžaduje minimum financí a dá se provozovat i na neúrodných půdách, což napomáhá konzervaci půdy. Mezi hlavní přednosti těchto vláken patří nízká hustota a vysoká specifická pevnost v tahu, navíc mají tepelné a akustické izolační vlastnosti. Vlákna jako taková se v poslední době používají především při výrobě lan, podložek nebo rohoží, ale také kompozitních materiálů nejrůznějšího použití [1].

Sisalová vlákna byla experimentálně použita jako výztuž, jak do termosetových, tak termoplastických polymerních matric. Mezi použité matrice v experimentálních pracích lze zařadit epoxidy (EP), polyestery (UP) nebo fenol-formaldehydy (PR) z řad termosetů a polyetylen (PE), polypropylen (PP), polyether ether keton (PEEK), polyvinylchlorid (PVC) a polystyren (PS) z řad termoplastů. Technik použitelných pro výrobu těchto kompozitů je celá řada, například: ruční kladení, RTM technika, lisování, lisování se vstřikováním, navíjení nebo pultruze [6].

Z oblasti výzkumu stojí za povšimnutí úspěšné testování retardérů hoření do kompozitů zhotovených ze sisalových vláken a polypropylenu. Rychlost hoření a tepelná stabilita zhotoveného kompozitu byla vylepšena přidáním hydroxidu hořečnatého a boridu zinečnatého. Jejich přidání nijak nezkomplikovalo výrobu a navíc nedošlo k výrazné změně ohybových a tahových vlastností výrobku [1].

Zkoumány byly také elektrické vlastnosti sisalovými vlákny vyztužené polyesterové matrice s ohledem na obsah vláken v materiálu. Kompozit byl zhotoven RTM technikou a bylo zjištěno, že s rostoucím obsahem vláken dochází ke zvyšování dielektrické konstanty, ztrátového činitele a vodivosti vyrobeného kompozitu. Tento nárůst byl nejvýraznější při obsahu sisalových vláken 50 % obj. a dále bylo zjištěno, že při vzrůstající teplotě kompozitu došlo ke zvýšení hodnoty dielektrické konstanty [13].

Použití kompozitů na bázi sisalových vláken je velmi rozmanité, ať už se jedná o použití v souvislosti s konstrukčními materiály, automobilový, železniční nebo letecký průmysl. Nabízí se i možnost nahrazení azbestových vláken v kompozitních materiálech zhotovených jako střešní krytiny [6].

3.4.3 Jutová vlákna

Vlákna juty jsou získávána ze stonků rostlin rodu *Corchorus*, což zahrnuje něco okolo sta druhů rostlin. Jedná se o jedno z nejlevnějších vláken a také objemově nejvíce produkovaných. Mezi hlavní producenty těchto vláken patří Bangladéš, Čína a Indie [1].

Kromě toho, že se tato vlákna používají jako balicí materiál, mají celosvětové uplatnění jako krytiny podlah, domácí textil, dekorativní látky, nákupní tašky, záclony nebo geotextilie a samozřejmě jako výztuž do kompozitních materiálů [9].

Vlákna juty byla zkoumána z hlediska hybridních kompozitů, konkrétně byla zkombinována s bavlněnými vlákny. Byly zhotoveny rohože jednotlivých vláken, které na sebe byly kladeny v příčném směru a jako pojivo byla použita polyesterové matrice. Pevnost v tahu materiálu se zvyšovala společně se zvyšujícím se obsahem vláken, přičemž maxima bylo dosaženo při 50 % obj. [1].

Experimentálně byly zhotoveny kompozity s polypropylenovou maticí a vlákny juty jako výztuží. Jako výrobní proces byla zvolena extruze a lisování se vstřikováním. Zhotovený materiál byl následně upraven urotropinem a bylo zjištěno, že upravený kompozit dosáhl vyšší pevnosti v tahu, ohybu a vyššího Youngova modulu pružnosti. Mimoto byla také zvýšena hydrofilní povaha jutových vláken, čímž došlo k zesílení vazby mezi jednotlivými fázemi. Experimentálně byl také zhodnocen vliv obsahu vláken na mechanické vlastnosti. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při 30% obj. obsahu vláken [14].

Pro dosažení optimální tuhosti a zároveň pevnosti byly experimentálně zhotoveny kompozity na bázi vláken juty jako výztuže a kyseliny polymléčné (PLA) a polykaprolaktonu (PCL) jako polymerní matrice. Vlákna byla předem upravena silanovým reakčním činidlem. Pro výrobu kompozitu bylo použito lisování za zvýšeného tlaku a teploty. Výsledný kompozitní materiál vykazoval poměrně dobré mechanické vlastnosti vhodné pro aplikaci v automobilovém průmyslu [15].

3.4.4 Kokosová vlákna

Kokosová vlákna jsou přírodní vlákna získávaná ve svazcích ze slupky, která obklopuje semeno kokosu. V minulosti byla kokosová vlákna považována za levný produkt nízké kvality, který se používal především pro výrobu rohoží, smetáků nebo kartáčů. Kokosová vlákna disponují vynikající odolností proti mořské vodě, a proto lana z kokosových vláken nacházejí použití v námořním průmyslu. V poslední době se však ukazuje, že jsou kokosová vlákna svými vlastnostmi vhodná i pro výrobu polymerních kompozitů. Mezi největší producenty kokosových vláken lze zařadit například Indonésii, Filipíny, Indii a Brazílii [9].

Experimentálně byl zhotoven polymerní kompozit s polypropylenovou maticí naroubovanou anhydridem kyseliny maleinové a výztuží z kokosových vláken. Studie porovnávala vliv obsahu

vláken na vlastnosti kompozitu. Důraz byl kladen na zjištění hořlavosti a dále na mechanické vlastnosti kompozitu. Nejlepších ohybových a tahových vlastností bylo dosaženo při 60 % objemových vláken a při dalším zvyšování již docházelo k poklesu těchto vlastností. Zhotovený kompozit svými vlastnostmi vyhovoval použití pro nekonstrukční části automobilu, například dveřní panely. Odolnost vůči hořlavosti se zvyšovala až do 70 % objemových vláken [16].

Středem zájmu byl vliv alkalické úpravy na kokosová vlákna v polyesterové matrici. Kompozit s vlákny ošetřenými 5% roztokem NaOH po dobu 72 hodin vykazoval nárůst pevnosti v tahu o 31 %. Mimoto došlo u tohoto kompozitu zhotoveného ručním kladením k nárůstu pevnosti v ohybu a rázové houževnatosti [17].

Pro zlepšení vlastností kompozitu s epoxidovou matricí byla navržena výztuž sestávající z vláken juty a kokosových vláken. Vlákna juty tvořila dvě rohože, mezi které byla vložena krátká kokosová vlákna. U zhotoveného hybridního kompozitu bylo dosaženo rapidního zvýšení mechanicko-dynamických a mechanických vlastností. Po alkalické úpravě vláken juty bylo rovněž dosaženo zvýšené odolnosti proti vlhkosti výsledného kompozitu. Nejlepších mechanických vlastností bylo dosaženo při poměru 1:1 obou druhů vláken [18].

3.4.5 Abaková vlákna

Abaková vlákna pocházející ze specifického druhu banánovníku patří k nejsilnějším komerčně dostupným vláknům. Rostlina původem z Filipín je momentálně produkována především v Ekvádoru a díky své dobré odolnosti vůči mořské vodě byla kdysi používána pro výrobu lanová v námořnickém průmyslu. Jedná se o excelentní technickou plodinu, relativně nenákladnou, která má za sebou úspěšné použití jako výztuž do kompozitů v automobilovém průmyslu [9].

Andrzej K. Bledzki a kolektiv se zabýval mechanickými vlastnostmi kompozitů zhotovených z abakových vláken a polypropylenu v závislosti na délce použitých vláken a různých procesů výroby kompozitu a bylo zjištěno, že s rostoucí délkou vláken se mírně zlepšují i ohybové a tahové vlastnosti výsledného kompozitu. Z výrobních procesů vyšla nejlépe metoda přímého vstříkávání, u které byla zaznamenána až o 90 % vyšší pevnost v tahu než u procesu lisování za zvýšeného tlaku. [1].

Rovněž byl prozkoumán vliv obsahu vláken na výsledné mechanické vlastnosti kompozitu. Jako polymerní matrice byl použit polypropylen a jako reakční činidlo byl přidán polypropylen naroubovaný anhydridem kyseliny maleinové. S přidáním šesti hmotnostních procent tohoto činidla se zvýšila efektivita abakových vláken jako výztuže. Díky vyšší flexibilitě abakových vláken bylo docíleno až 50 % hmotnostního obsahu vláken v polypropylenové matrici. Postupným zvyšováním obsahu vláken docházelo i k takovému zvýšení hodnot pevnosti v tahu a modulu pružnosti, které by se daly srovnat se skleněnými vlákny jako výztuží. Nicméně, vysoký obsah abakových vláken vyústil ve velice tuhý materiál s velmi malou rázovou houževnatostí [19].

3.4.6 Konopná vlákna

Společně s lněnými jsou konopná vlákna jedny z nejdůležitějších přírodních vláken získávaných z lýka rostliny. Jedná se o jednoletou bylinu, která se pěstuje v mírném klimatickém pásu. Společně s lněnými vlákny mají široké možnosti, co se týče jejich využití jako výztuž do polymerních matric [1].

Na stejně rozmanité možnosti narazíme při použití různých výrobních procesů pro zhotovení kompozitu. Kompozity obsahující konopná vlákna se dají bez problému kombinovat jak s termoplastickými, tak termosetovými matricemi. Z výrobních procesů můžeme uvést například ruční kladení, pultruze, extruze, navíjení, ale i RTM a VARI techniky.

Kompozity na bázi konopných vláken mají za sebou úspěšné použití v automobilovém průmyslu, například jako dveřní panely, přístrojové desky nebo boční ventilátory. Obrovský potenciál mají tyto

kompozity společně s kompozity na bázi lněných vláken na poli sportovního náčiní a potřeb. Z nich můžeme uvést například tenisové rakety, rybářské pruty, surfovací prkna, lyže a helmy [7].

Pro zlepšení mechanických vlastností byla průmyslově vyrobená konopná vlákna upravena různými chemickými látkami. Mezi testovanými látkami byl hydroxid sodný, acetanhydrid, maleinanhydrid a silanová reakční činidla. Nejvýraznějšího zvýšení mechanických vlastností vláken bylo dosaženo po úpravě hydroxidem sodným, což bylo pravděpodobně způsobeno zvýšením krystalinity řetězců celulózy. Všechny ostatní úpravy naopak zapříčinily malý pokles pevnosti v tahu vláken. U všech chemických úprav byl zjištěn nárůst Youngova modulu pružnosti ošetřených vláken [20].

Pro zlepšení adheze mezi lněnými vlákny a polypropylenovou matricí byla navržena nová metoda propojení vláken a matrice založená na přidavku dvou různých organosilanů do polymerní taveniny. Oba použité organosilany byly naroubovány na polypropylen během extruze kompozitu a vytvořili mezi matricí a vlákny silanové můstky. Tímto způsobem bylo dosaženo 40% navýšení pevnosti v tahu kompozitu v porovnání s kompozity zhotovenými bez použití organosilanů. Mimoto došlo ke zvýšení tepelné odolnosti a odolnosti vůči vlhkosti zhotoveného kompozitu [21].

3.4.7 Ananasová vlákna

Ananas je tropická rostlina původem z Brazílie. Ananasová vlákna získávaná z listů rostliny jsou bohatá na celulózu, relativně nenákladná a hojně dostupná. Mezi největší producenty těchto vláken patří Thajsko, Filipíny a Brazílie. Momentálně jsou ananasové listy brány jako odpadní produkt kultivace ananasu a tudíž mohou být bez problému využity v různých průmyslových odvětvích. Kromě toho, že jsou tato vlákna hojně používána v textilním průmyslu, mají navíc veliký potenciál, co se týče využití, jako výztuže do polymerní matrice [22].

Mezi nejčastěji používané termoplastické matrice s ananasovými vlákny jako výztuží patří polyetylen (PE) a polypropylen (PP), čili matrice, které jsou nenákladné, široce dostupné a recyklovatelné. Vlákna byla například zkombinována s nízko hustotním polyetylenem a bylo zjištěno, že při větším obsahu vláken dochází ke zvýšené sorpci okolní vody do zhotoveného kompozitu, ke zhoršení mechanických vlastností a teploty, při které dochází k degradaci materiálu. Nicméně po úpravě vláken pomocí hydroxidu sodného, silanovým reakčním činidlem nebo izokyanátem došlo ke zlepšení adheze mezi vlákny a matricí a bylo také zaznamenáno výrazné snížení nežádoucích vlastností oproti neupraveným vláknům [6].

Předmětem výzkumu byl také vliv obsahu vláken v polypropylenové matrici na mechanické vlastnosti kompozitu zhotoveného lisováním za zvýšené teploty a tlaku. Pevnost v tahu se zvyšovala spolu s obsahem vláken, přičemž maximálních hodnot bylo dosaženo při obsahu vláken 10,8 % obj..

Při použití ananasových vláken upravených NaOH v kompozitu s matricí na bázi polykarbonátu (PC) vykazoval kompozit lepší mechanické vlastnosti, než kterými disponoval samotný polykarbonát. V menší míře se potom do výsledných vlastností kompozitu promítla vlákna, která byla ošetřena silanovým reakčním činidlem.

Mezi termosetovými matricemi experimentálně vyztuženými ananasovými vlákny se nejčastěji setkáváme s epoxidy, polyestery, vinylestery nebo fenolickými pryskyřicemi, přičemž nejčastěji používané jsou polyestery. Běžnou metodou pro výrobu kompozitů s těmito matricemi je lisování nezávisle na délce použitých vláken.

Při studiu mechanických vlastností kompozitu s polyesterem jako matricí bylo zjištěno, že při 30% hm. obsahu ananasových vláken vykazoval kompozit nejvyšší pevnost v tahu, Youngův modul pružnosti, pevnost v ohybu a rázovou houževnatost [6].

3.4.8 Vlákna z olejové palmy

Největším producentem těchto vláken jsou asijské země jako Indonésie, Malajsie a Indie. Vlákna z olejové palmy (VOP) mohou být získána ze dvou různých zdrojů, které poskytuje tento strom. Prvním zdrojem jsou chomáče vláken z dutého plodu a druhým je mesokarp. Za účelem výroby kompozitních materiálů jsou především využívána vlákna z prvního zdroje. To proto, že tato vlákna už jsou ve formě svazků, které jsou snadno dostupné a za nízkou cenu. Vlákna jsou získávána smáčením, zatímco vlákna z mezokarpu jsou odpadním produktem po extrakci oleje a je nezbytné je očistit před finálním použitím [23].

Experimentálně byly zhotoveny hybridní kompozity z VOP a vláken juty. U nich byly potom zaznamenány změny mechanických vlastností v závislosti na obsahu vláken. Vlákna byla ručně kladena do formy ve dvou vrstvách, přičemž se vždy změnil obsah jednotlivých vláken, ale tak, aby celkový hmotnostní obsah vláken v kompozitu byl 40 %. K impregnaci vláken byla použita epoxidová matrice. Bylo zjištěno, že s rostoucím poměrem dochází ke zvyšování tahových vlastností, protože vlákna juty vydrží větší podíl zátěže a menší podíl přenáší na vlákna olejové palmy. Při poměru vláken 1:4 z pohledu VOP bylo dosaženo lepší interakce mezi maticí a vlákny. Navzdory velkému zájmu ze strany výzkumu se zatím nepodařilo u kompozitů vyrobených z těchto vláken dosáhnout takových vlastností, aby mohly konkurovat synteticky vyrobeným vláknům [24].

3.4.9 Kenafová vlákna

Kenaf (*Hibiscus cannabinus*) je teplomilná jednoletá bylina původem ze střední Afriky a běžně volně rostoucí v tropických a subtropických oblastech Afriky a Asie. Nejsilnějšímu zájmu se kenafová vlákna těší v Malajsii, protože v tamním klimatu roste velmi rychle, což umožňuje dvě sklizně za rok. Mnoha svými vlastnostmi je podobná jutě a může být použita jako její alternativa nebo spolu s ní v hybridních kompozitech [25].

V nedávné době byl zkoumán vliv obsahu vláken v polyuretanové maticí na mechanické vlastnosti. Tato matrice byla použita z důvodu její výborné odolnosti vůči otěru a také kvůli dobrým mechanickým vlastnostem. Navíc izokyanátová aktivní skupina ochotně reaguje se skupinou hydroxylovou navázanou na celulóze tvořící vlákno. Nejvyšší pevnosti v tahu bylo dosaženo při 30 % hm. obsahu kenafových vláken. S rostoucím objemem vláken se zvyšovala také pevnost v ohybu a modul pružnosti, na druhou stranu došlo ke snížení tepelné odolnosti kompozitu [26].

Středem zájmu byl také vliv úpravy vláken roztokem NaOH na ohybové vlastnosti výsledného kompozitu. Upravená vlákna byla na povrchu zbavena nečistot a některých voskovitých látek a také došlo k částečnému zdrsnění jejich povrchu, což vede k lepší interakci mezi vlákny a maticí. Také došlo k rozvolnění vláknových svazků na jemná vlákna a to způsobilo lepší impregnaci vláken. Lisováním do formy byl připraven kompozit s epoxidovou maticí obsahující jako výztuž buď ošetřená nebo neošetřená kenafová jednosměrná vlákna. Ošetřená vlákna způsobila až 36% nárůst pevnosti v ohybu epoxidového kompozitu, kdežto neošetřená pouze 20%. Při porovnání s epoxidovými kompozity se skleněnými vlákny bylo zjištěno, že je možné nahradit skleněná vlákna těmi kenafovými, pokud by se jednalo o aplikace vyžadující odolnost vůči namáhání v ohybu [27].

3.4.10 Bambusová vlákna

Bambus (*Bambusa Shreb.*) je trvalá rostlina, která roste až do výšky 40 m v oblastech monzunových dešťů. Obecně se používá ve stavebnictví, tesařství nebo tkaní. Experimentálně však bylo zjištěno, že svazky bambusových vláken mají dostatečnou specifickou pevnost v tahu, stejnou jako konvenční skleněná vlákna.

Hongyan Chen testoval vliv absorbované vlhkosti na sílu interakce mezi bambusovými vlákny a vinylesterovou maticí. Bambusová vlákna stejně jako řada jiných přírodních vláken absorbuje vzdušnou vlhkost i za standardních podmínek. Byla zaznamenána anizotropní expanze vlákna, protože její velká část se odehrávala po obvodu jednotlivých vláken. Expanze v podélném směru byla zanedbatelně malá. Absorbovaná vlhkost způsobila především snížení modulu pružnosti, zatímco pevnost v tahu nebyla výrazně ovlivněna. S přibývajícím obsahem vlhkosti se také snižovala mezilaminární smyková pevnost, a to až o 38 %. Výrazný pokles byl ovšem zaznamenán pouze během prvních devíti dní vystavení kompozitu vlhkosti. Delší doba expozice nevedla k dalšímu snižování mezilaminární smykové pevnosti [28].

3.4.11 Vlákna Curauá

Vlákna Curaua získávaná z listů mají specifické mechanické vlastnosti podobné anorganickým vláknům a jsou důležitou obnovitelnou surovinou. Jedná se o lignocelulózní vlákna, jejichž použití v kompozitních materiálech je posledních pár let na vzestupu. Stejně jako u jiných přírodních vláken, ani zde nelze definovat přesné hodnoty mechanických vlastností vlákna, neboť ty se odvíjejí od místa vypěstování, zpracování vláken a dalších faktorů [29].

Vlákna jsou izolována z rostliny *Ananas erectifloius*, která je pěstována především v Jižní Americe, konkrétně v Brazílii, kde už byly kompozity zhotovené z těchto vláken experimentálně použity do interiérů automobilů namísto tradičních plastů. Hlavním důvodem tohoto kroku je snížení nákladů výroby, a také váhy automobilu, protože přírodní vlákna disponují velmi nízkou hustotou. V porovnání s ostatními přírodními vlákny mají tato nespornou výhodu, jelikož jsou bez zápachu i při tepelné zátěži při zpracování [30].

Kompozity z těchto vláken byly experimentálně nejčastěji vyráběny lisováním do formy, ale úspěšně byla použita i metoda extruze. Matric pro výrobu kompozitů na bázi vláken Curauá bylo experimentálně testováno několik, například polyuretany nebo polypropylen. Mimoto byly také testovány mechanické vlastnosti těchto vláken po úpravě roztokem hydroxidu sodného. Byl zaznamenán pokles některých vlastností samostatných vláken, například pevnosti v tahu. Ovšem po použití upravených vláken v biodegradabilní pryskyřici na bázi kukuřičného škrobu, došlo k mírnému zlepšení pevnosti v tahu a tažnosti vyrobeného kompozitu [31].

3.4.12 Vlákna Isora

Vlákna Isora, která lze izolovat ze stonků rostliny *Helicteres isora* patří spíše k těm méně známým. Nejlepší vlákna lze získat z rostliny, která je stará 1-1,5 let, vlákna z rostliny starší než 2 roky jsou pro aplikaci v kompozitních materiálech příliš křehká. Kořeny, listy a plody se používají pro aplikace v medicíně. Mezi hlavní producenty této plodiny patří například Indie, Nepál, Malajsie nebo Indonésie.

Jedná se o vlákna bohatá na celulózu s podstatně nižším obsahem ligninu. Vlákna byla experimentálně upravena roztokem NaOH, čímž bylo dosaženo mírné snížení hustoty vláken, nicméně došlo i ke snížení pevnosti v tahu vláken. Dále bylo dosaženo také zvýšené tepelné stability vláken. Hodnota tažnosti vlákna při lomu se u upravených oproti neupraveným nijak výrazně nezměnila. Nejdůležitějším faktem je však, že vlákna Isora mohou konkurovat jiným přírodním vláknům používaným jako výztuž do polymerní matrice [6].

Experimentálně byly zhotoveny kompozity z přírodního kaučuku jako matrice a vláken Isora jako výztuže. Kompozit s podélně orientovanými vlákny dosahoval lepších mechanických vlastností než s vlákny orientovanými příčně. K ideálnímu vyztužení matrice došlo při použití vláken dlouhých

10 mm a 30% obj. obsahu vláken. U bazicky upravených vláken bylo také dosaženo lepší adheze vlákna s matricí.

Při použití polyesteru jako matrice a neupravených vláken Isora jako výztuže, vykazoval kompozit nejvyšší hodnoty tahové a ohybové pevnosti při 45% respektive 49% obj. obsahu vláken. Při použití bazicky upravených vláken byl jejich optimální obsah stanoven na 66 % obj. [6].

3.4.13 Vlákna z rostliny *Sansevieria cylindrica*

Rostlina *Sansevieria cylindrica* patří do čeledě *Agavaceae* a její vlákna jsou získávána z listů. Běžně jsou tato vlákna používána pro výrobu domácích dekorací a mezi největší producenty patří například Indie.

Experimentálně byl zhotoven polymerní kompozit s epoxidovou matricí a výztuží z vláken této rostliny. Předmětem výzkumu byl vliv obsahu vláken a alkalické úpravy vláken na konečné vlastnosti vyrobeného kompozitu. Mechanické vlastnosti jako je pevnost v tahu nebo ohybu byly nejvíce rozvinuty při 9 % obj. vláken. Alkalicky upravená vlákna vykazovala vyšší hodnoty tahové i ohybové vlastnosti než neošetřená a navíc disponovala lehce zvýšenou tepelnou odolností [32].

Cílem jiné studie bylo porovnání vlivu různých chemických úprav vlákna na konečné vlastnosti kompozitu. Mezi použitými chemickými úpravami byla alkalická úprava, úprava manganistanem draselným, benzoyl peroxidem a kyselinou stearovou. Všechny úpravy vláken vyústily v lepší mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. Největší nárůst modulu pružnosti a pevnosti v tahu byl zaznamenán u vláken ošetřených manganistanem draselným [33].

U polymerního kompozitu s polyesterovou matricí a vyztuží z krátkých vláken rostliny *Sansevieria cylindrica* byly proměřeny některé mechanické vlastnosti. Bylo zjištěno, že mechanické vlastnosti kompozitu závisí na délce a obsahu vláken. Optimálních vlastností dosáhl kompozit s 30% hm. obsahem vláken o délce 30 mm. Navzdory slabé adhezi mezi vlákny a polyesterovou matricí mohou být mechanické vlastnosti srovnány s kompozity zhotoveny z jiných přírodních nebo skleněných vláken [34].

3.4.14 Další přírodní vlákna s potenciálem výztuže

Vlákna získaná z artičoku byla testována jako potenciální výztužní materiál do polymerních kompozitů. Vlákna byla extrahována ze stonků rostliny, které jsou považovány v dnešní době za odpad. Vlákna byla testována z pohledu mechanických vlastností a bylo zjištěno, že se tyto vlastnosti blíží jiným přírodním vláknům nebo vláknům skleněným [35].

Experimentálně byly zhotoveny polymerní kompozity obsahující vlákna v podobě malých částic, krátká vlákna nebo dlouhá vlákna rostliny *Hibiscus sabdariffa* také známé pod názvem Roselle. Jako polymerní matrice byla zvolena močovino-formaldehydová pryskyřice a výrobek byl zhotoven lisováním ve formě. Jako efektivnější variantou z pohledu mechanických vlastností kompozitu se jeví použití vláken ve formě prášku a takovýto výrobek lze srovnat s ostatními polymerními kompozity na bázi přírodních vláken [36].

Vlákna z rostliny *Phormium tenax* byla použita jako výztuž do polymerního kompozitu zhotoveného metodou přímého vstřikování. Rostlina *Phormium tenax* je rostlina rostoucí na Novém Zélandu, jejíž vlákna získávaná z listů jsou používána pro výrobu rohoží a šňůr. Vlákna mají díky poměrně vysokému obsahu celulózy dostatečné tahové vlastnosti pro některé konstrukční aplikace. Jako matrice byla zvolena kyselina polymléčná z důvodu možnosti její biodegradability a použitým výrobním procesem byla extruze. Mechanické vlastnosti kompozitu se zvyšovaly až do 40 % objemových vláken a hotový by vyhovoval aplikacím vyžadující vyšší tuhost a nižší navlhavost. Negativním jevem byla slabá adheze mezi vlákny a matricí při vyšším obsahu vláken [37].

Jako potenciální výztuž do polymerní matrice byla testována vlákna z listů rostliny Piassava. Rostlina ze třídy *Attalea funifera* je původem z oblasti jihovýchodní Brazílie. Kompozity s epoxidovou matricí obsahující více než 20 % obj. těchto vláken vykazovaly zvýšené hodnoty tahových a ohybových vlastností, adheze mezi vlákny a matricí však byla slabá [38].

V nedávné době byly také prováděny studie založené na využití borového jehličí jako výztuž do polymerních kompozitů. To je dostupné v obrovských množstvích v západní části Himalájských lesů, kde představuje potenciální hrozbu lesních požárů. Hlavní problémem tohoto jehličí je jejich slabá schopnost adheze s běžnými pryskyřicemi, úspěšná však byla kombinace jehličí s isokyanátem jako matricí. Panely zhotovené z těchto materiálů vykazovaly dobrou rozměrovou stabilitu jak v suchém tak vlhkém prostředí a mají potenciál pro aplikaci jako izolační materiál [39].

Grewia optiva je rostlina s četným využitím s místem výskytu v oblasti Himalájí. Různé její části mohou být využity například jako krmivo nebo palivo. Také na ni rostou jedlé plody a obsahují vlákna vhodná jako výztuž pro polymerní kompozity. Vlákna jsou běžně používána při výrobě levných produktů, například šňůry, tašky, ponožky, boty nebo rohože. Experimentálně byl zhotoven kompozit z těchto vláken a polyesterovou matricí. Vlákna byla upravena naroubováním akrylonitrilu, čímž bylo dosaženo zvýšené teplotní odolnosti a odolnosti vůči vlhkosti vláken. Kompozity zhotoveny s pomocí upravených vláken vykazovaly rovněž vyšší hodnoty pevnosti v tahu a ohybu [40].



Obrázek 4 Některé z rostlin pěstovaných pro přírodní vlákna (dostupné z <http://www.naturalfibres2009.org/en/fibres/>)

4 MODIFIKACE PŘÍRODNÍCH VLÁKEN

I přesto, že přírodní vlákna disponují některými velice výhodnými vlastnostmi (nízká hustota, cena), najdou se i vlastnosti, které až tak pozitivní nejsou. Mezi největší problémy přírodních vláken patří slabá odolnost vůči jakékoliv formě vlhkosti. To je způsobeno obsahem hydroxylových skupin uvnitř celulózoového řetězce, které velmi ochotně přitahují okolní molekuly vody do vlákna a tím dochází k jeho bobtnání. K největšímu prostupu vody dochází v příčném řezu vlákna. Interakce mezi hydrofilním vláknem a hydrofobní matricí způsobí, že vlákno začne bobtnat uvnitř matrice. Následně dojde k oslabení vazby mezi jednotlivými fázemi a může dojít i k popraskání matrice, což může vyústit ve velmi slabé mechanické vlastnosti výsledného kompozitu. K omezení této skutečnosti je nutné vlákna modifikovat různými aditivami nebo chemickými postupy [8].

4.1 Fyzikální úpravy

U tohoto typu úprav nedochází ke změně chemického složení vlákna a patří sem například napínání, vyhlazování, tepelné úpravy, nebo výroba hybridních přízí. Další možností je úprava plazmovým výbojem, kdy dochází ke změně povrchové energie vláken. Tato metoda je výhodná především pro tzv. neaktivní polymerní substráty, jako jsou polystyren (PS), polyetylen (PE) nebo polypropylen (PP). Podobného efektu je dosaženo při použití studeného plazmatu. V závislosti na použitých plynných médiích můžeme dosáhnout různých výsledků. Během úpravy může dojít ke zvýšení nebo snížení povrchové energie nebo k vytvoření reaktivních volných radikálů nebo skupin [41].

4.2 Chemické úpravy

Silně polarizovaná vlákna celulózy jsou v podstatě nekompatibilní s hydrofobními polymery. Tento problém je možné vyřešit zavedením třetí látky, která má své vlastnosti někde na pomezí hydrofobního a hydrofilního materiálu [41].

4.2.1 Alkalická úprava

Úprava vláken pomocí roztoku hydroxidu sodného (NaOH) patří mezi nejběžnější způsoby úprav celulózové struktury vláken. Za pomoci alkalického roztoku (nejčastěji 5-15%) dojde ke změně orientace velmi zhuštěné krystalické struktury tvořené celulózou a tím dojde k vytvoření amorfni oblasti. Svazky vláken jsou následně rozvolněnější a usnadňují vstup dalších chemikálií. Také však dojde ke zvětšení vzdáleností mezi jednotlivými molekulami celulózy, mezi kterými se nachází molekuly vody. Hydroxylové skupiny mezi molekulami jsou velmi citlivé na zásadité prostředí a tím dojde k jejich rozrušení a následné reakci s vodou. Ta odchází ze struktury vlákna. Zbylé reaktivní molekuly vytvoří vazbu vlákno-O-Na. Díky této skutečnosti dojde k redukci hydrofilních hydroxylových skupin a tím je zvýšena odolnost vlákna vůči vlhkosti. Mimoto také dojde k částečnému vmytí hemicelulózy, ligninu a pektinu, čímž se stane povrch vlákna více jednotným, neboť dojde k odstranění mikropórů. To způsobí lepší adhezi vláken a matrice [8].

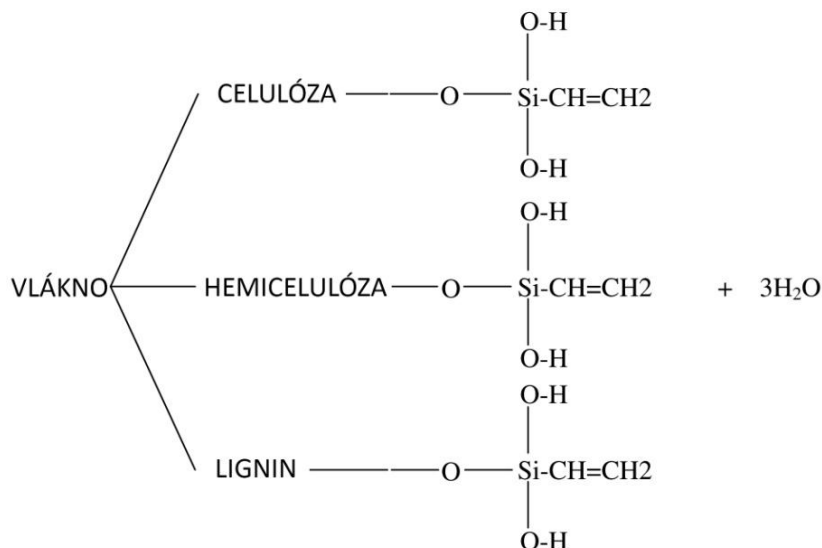


Obrázek 5 Chemická reakce mezi buňkou vlákna a NaOH [8]

4.2.2 Silanová reakční činidla

Silany jsou multifunkční molekuly, které se používají jako reakční činidlo pro modifikaci povrchu přírodních vláken. Stavba silanů umožňuje tvorbu chemické vazby mezi povrchem vlákna a matricí ve formě siloxanového můstku. Celá reakce je složená z několika fází hydrolyzy, kondenzace a tvorby

nových vazeb. Během hydrolyzy dojde vlivem přítomnosti vlhkosti a alkoxy skupin ke tvorbě silanolů. Následně, během kondenzace, reaguje v ideálním případě jeden konec silanolu s hydroxylovou skupinou celulózy a druhý konec reaguje s funkční skupinou matrice a tím dojde k vytvoření ochranné vrstvy na povrchu vlákna. Kompozity s vlákny upravenými tímto způsobem poté vykazovaly nárůst hodnot pevnosti v tahu [8].



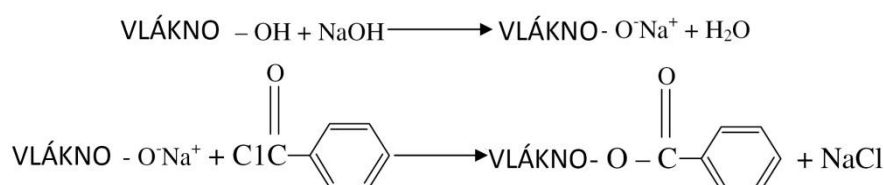
Obrázek 6 Povrchová struktura vlákna po reakci se silanovým činidlem [8]

4.2.3 Acetylace

Tato metoda je také známá jako esterifikační metoda pro plastifikaci přírodních vláken. Acetylová skupina (CH_3O) reaguje s hydrofilními hydroxylovými skupinami (OH) na přírodním vlákně a snižuje tak jejich vlhkost. Výsledkem je snížení hydrofilní povahy vlákna a zlepšení jeho rozměrové stability. Mimoto je docíleno menšího počtu pórů, což umožňuje lepší adhezi s matricí. Naroubování acetylových skupin na celulóзовou strukturu vlákna lze provádět za přítomnosti kyselého katalyzátoru. K urychlení reakce jsou vlákna namočena nejprve v kyselině octové a následně upravena anhydridem kyseliny octové [8].

4.2.4 Benzoylace

Při této metodě se využívá benzoylchloridu ke snížení hydrofilní povahy vlákna a ke zlepšení adheze mezi jednotlivými fázemi, čímž dochází zároveň ke zvýšení pevnosti kompozitu. Samotné benzoylaci předchází alkalická úprava vlákna, které odkryje reaktivní hydroxylové skupiny (OH) na povrchu vlákna. Na jejich místo se potom naváží benzoylové skupiny, což zvýší hydrofobní povahu vlákna. U kompozitu na bázi sisalových vláken bylo rovněž zjištěno, že úprava posiluje tepelnou stabilitu materiálu. U kompozitu na bázi lněných vláken s nízkohustotním polyetylenem jako matricí došlo ke zvýšení pevnosti v tahu o 6 % a o 33% nárůst odolnosti vůči vlhkosti [8].



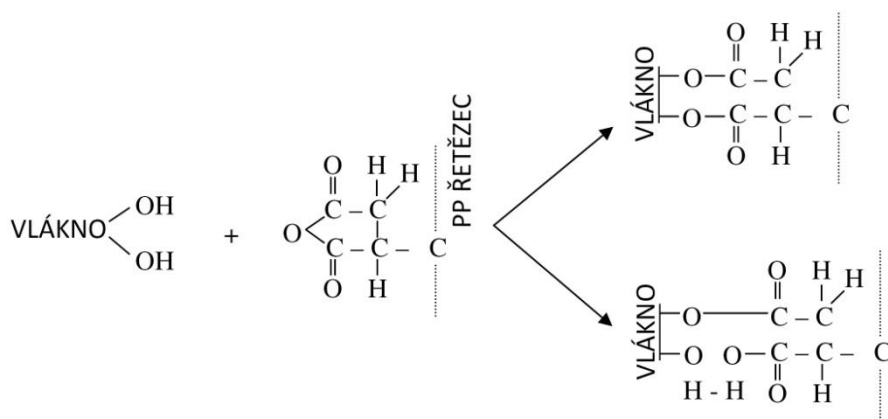
Obrázek 7 Reakce mezi celulóзовým vláknem a benzoylchloridem [8]

4.2.5 Úprava peroxidem

Mezifázové vlastnosti vlákna a matrice mohou být zlepšeny úpravou za pomoci peroxidu. Jde o peroxidem indukované roubování polyetyleny na povrch přírodního vlákna. Volné peroxidové radikály navíc reagují s hydroxylovými skupinami a matricí. Výsledkem je dobrá adheze na rozhraní fází a také zvýšení odolnosti vůči vlhkosti a tepelné stability. Samotné reakci je často předřazena úprava alkalickým roztokem. Poté jsou vlákna ponořena do roztoku benzoyl peroxidu a acetonu zhruba na 30 minut. K úplnému rozložení zbylých peroxidových radikálů po úpravě, které jsou potom už nežádoucí, stačí směs zahřát na vyšší teplotu [8].

4.2.6 Maleinová reakční činidla

Tato činidla poskytují vhodnou interakci mezi funkčním povrchem vlákna a matricí. V první samostatné fázi dojde k aktivaci naroubovaného polypropyleny anhydridem kyseliny maleinové za teploty okolo 1700 °C. Ten pak reaguje s hydroxylovými skupinami v oblasti amorfního uspořádání celulózy a odstraňuje je z buněčné stěny. Amar Mohanty dosáhl touto metodou zajímavých výsledků u vláken juty, která byla namočena na 5 minut do roztoku toluenu a naroubovaného anhydridu kyseliny maleinové polypropylenem. Kompozit z upravených vláken a polypropyleny poté dosahoval o 72 % vyšších hodnot pevnosti v ohybu [8].



Obrázek 8 Reakce naroubovaného polypropyleny s celulóзовým vláknem [8]

4.2.7 Úprava chloritanem sodným

Chloritan sodný (NaClO_2) je používán jako bělicí činidlo v kyselém prostředí pro přírodní vlákna. Chloritan je okyselen za uvolňování kyseliny chlorité, která podléhá oxidaci za vzniku oxidu chloričitého. Ten následně reaguje s ligninem obsaženým v přírodním vlákně a odstraňuje ho. Rovněž dochází k reakci s hydroxylovými skupinami navázanými na molekulách hemicelulózy. Tím dojde ke zvýšení hydrofobní povahy vlákna a ke zlepšení jeho ohybových vlastností, dojde však ke snížení hodnot tuhosti [8].

4.2.8 Akrylace a roubování akrylonitrilu

Kyselina akrylová je používána ke zvýšení vazby mezi matricí a výztuží, kdy dochází k reakci s hydroxylovými skupinami navázanými na molekulách celulózy a vytváří tím zlepšený přístup makroradikálům celulózy k polymeračnímu médiu. Karboxylová kyselina z reakčního činidla vytváří esterové vazby s hydroxylovými skupinami. Toto roubování se provádí po alkalické úpravě vláken a je iniciováno peroxidovými radikály. Je zde i možnost použití akrylonitrilu namísto kyseliny akrylové,

přičemž oba způsoby zvýší odolnost vlákna proti vlhkosti a v případě akrylonitrilu bylo rovněž dosaženo zvýšené pevnosti v tahu kompozitu [8].

4.2.9 Úprava izokyanátem

Izokyanáty se používají jako reakční činidlo pro úpravu povrchu přírodních vláken. Funkční skupina izokyanátů (-N=C=O) reaguje s hydroxylovými skupinami navázanými na celulóze za vytvoření uretanové vazby. Toto spojení poskytuje silnou kovalentní chemickou vazbu mezi vlákny a matricí. Navíc, izokyanát reaguje s vlhkostí přítomnou uvnitř vláken a tím vzniká močovina, která poté může reagovat s dalšími hydroxylovými skupinami. Díky tomu je dosaženo vyšší odolnosti vlákna vůči vlhkosti [8].

4.2.10 Úprava kyselinou stearovou

Kyselina stearová v roztoku etanolu je používána k modifikaci povrchu přírodních vláken. Karboxylová skupina reaguje s hydroxylovými skupinami a poskytuje zvýšenou odolnost vůči vlhkosti. Mimoto dochází k odstranění nekystalických prvků (např. pektinu) ze struktury vlákna. Tím je způsobena disperze vláken, což zlepšuje mechanické vlastnosti zhotoveného kompozitu, například pevnosti v tahu [8].



Obrázek 9 Reakce mezi vláknem a kyselinou stearovou [8]

4.2.11 Úprava manganistanem

Pro tuto úpravu se používá roztok manganistanu draselného (KMnO₄) v acetonu. Během úpravy dochází k tvorbě vysoce reaktivních manganistanových iontů, které reagují s hydroxylovými skupinami a poskytují vazbu pro zahájení roubované kopolymerace. Kromě toho, že dojde ke zvýšení hydrofobní povahy vlákna, získáme vlákna s vyšší tepelnou stabilitou. U několika experimentálně zhotovených kompozitních materiálů byly zjištěny vyšší hodnoty pevnosti v tahu a ohybu materiálu. Je nutné dbát na koncentraci manganistanu, neboť při koncentracích vyšších než 1 % již dochází k degradaci vlákna [8].

4.2.12 Další úpravy vláken

Některé halogenderiváty triazinu se používají k modifikaci povrchu přírodních vláken. Příkladem může být trichlortriazin, který ochotně reaguje s hydroxylovými skupinami a tvoří vazbu mezi celulózu a reakčním činidlem.

Další možností jsou halogenderiváty mastných kyselin. Tato úprava se používá ke zvýšení odolnosti přírodních vláken proti vlhkosti a také ke zlepšení adheze mezi vlákny a matricí. Jako příklad může posloužit chlorid kyseliny olejové, který se roubuje reakcí s hydroxylovými skupinami na skelet celulózy. Výsledkem je zvýšení hydrofobní povahy vlákna [8].

5 POLYMERNÍ MATRICE

Mezi základní funkce matrice patří například to, že drží vlákna ve správné pozici, chrání je před okolním prostředím, přenáší zatížení mezi vlákny a dává výslednému kompozitu tuhost. [42].

Pokud se budeme pohybovat v oblasti vláknových kompozitů, narazíme na matrice především ve formě termosetů, které jsou v práci popsány podrobněji, nicméně použití termoplastických matric je také možné a časté. Nejvýznamnějšími zástupci termosetů jsou nenasycené polyestery (UP), vinylestery (VE), epoxidy (EP) a fenolické pryskyřice (PR), které jsou používány především pro

celkové snížení hořlavosti výsledného kompozitu. Z termoplastů lze uvést například polyetylen (PE), polypropylen (PP), polystyren (PS) a polyvinylchlorid (PVC) [4].

Pomyslnou třetí skupinu polymerních matic mohou tvořit biodegradabilní polymery, které v poslední době získávají zájem ze strany výzkumu. Do této skupiny můžeme například zařadit polymery, jejichž výroba je založená na kyselině mléčné (PLA) nebo polyhydroxybutyrát (PHB) patřící do skupiny přírodních polyhydroxyalkanoátů a dále polybutylensukcinát (PBS) nebo polyvinylalkohol (PVA) z řad syntetických polymerů [7].

5.1 Termosetové matrice

Oproti termoplastům disponují termosetové matrice vyšší pevností v tlaku, tepelnou odolností a také lepší únavovou životností. Mají ovšem horší dielektrické vlastnosti, jsou křehké a výrobní proces nelze opakovat, neboť vytvrzení je nevratný chemický proces. V této kapitole budou postupně zmíněni pouze nejdůležitější zástupci termosetových matic, termoplastické matrice v práci podrobněji rozebírány nejsou.

5.1.1 Nenasycené polyesterové pryskyřice

Pod tímto pojmem si můžeme představit roztok nenasyčených polyesterů, které obsahují reaktivní dvojnou vazbu C=C. Nutností je také přítomnost rozpouštědla ochotného polymerovat, a které tak napomáhá vytvrzovacímu procesu. Jedním z nejvhodnějších rozpouštědel je styren, který při polymeraci vytváří styrenové můstky. Reakce, při které dochází k zesíťování je zpravidla iniciována peroxidovými radikály vzniklými termickým štěpením organických diperoxidů. Teplota vytvrzování je stejně jako u jiných termosetových matic daná teplotou, při které dochází k maximálnímu rozpadu zmíněných iniciátorů.

Obecně jsou nenasyčené polyesterové produkty produktem reakce organické kyseliny a alkoholu, přičemž obě složky musí být alespoň dvojfunkční. Mezi základní reaktanty při jejich výrobě jsou anhydrid kyseliny maleinové a kyselina maleinová přecházející izomerně na kyselinu fumarovou. Dalšími složkami je potom některý z diolů, nejpoužívanějším je propylenglykol a etylenglykol. Často se kvůli vysoké reaktivitě složek přidává do směsi tzv. modifikující kyselina, například kyselina ortoftalová, izoftalová nebo paraftalová. Volba této kyseliny potom může ovlivňovat například různé mechanické vlastnosti výsledné matrice. Při vytvrzování nenasyčených polyesterových pryskyřic, dochází k reakci velkého množství dvojných vazeb, což má za následek velké objemové polymerační smrštění, proto se dnes do polymeračních směsí přidávají plniva, která toto smrštění snižují až na 6 % [4].

5.1.2 Vinylesterové pryskyřice

Tento typ pryskyřice zahrnuje část chemických sloučenin, které vznikly na bázi dianových epoxidů a kyseliny akrylové. Jsou velmi vhodné pro výrobu kompozitů s uhlíkovými nebo skleněnými vlákny jako výztuží. Jejich předností je výborná chemická odolnost a také schopnost snést velké mechanické namáhání.

Mezi základními reaktanty při výrobě vinylesterů patří bis-fenol A (dian), který se rovněž používá při výrobě epoxidových pryskyřic. Další společnou složkou je epichlorhydrin. Jedinou odlišnou složkou je kyselina akrylová. Základem výroby je alkalická kondenzace prvních dvou složek za vzniku epoxidových skupin. V dalším kroku následně dochází k reakci vzniklých epoxidových skupin s kyselinou akrylovou. Výsledkem je poté řetězec zakončený vinylovými funkčními skupinami.

Vytvrzování pryskyřice je založeno na stejném systému složek jako u UP. Nejčastěji používaným iniciátorem je dibenzoylperoxid, ale je možné použít i kombinaci různých iniciátorů. Pokud chceme

dosáhnout lepších fyzikálních nebo mechanických vlastností je vhodné pryskyřici dotvrdit při zvýšené teplotě.

Chemická odolnost vůči především bazickému prostředí je dána malým počtem esterových vazeb přítomných v řetězci, což je hlavní odlišnost od nenasyčených polyesterových pryskyřic, které v bazickém prostředí mnohem snadněji podléhají degradaci. Mimoto jsou UP díky většímu počtu dvojných vazeb v řetězci náchylnější k degradaci vlivem UV záření [4].

5.1.3 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou sloučeniny obsahující ve svém řetězci epoxidovou neboli oxiranovou skupinu, která je velmi reaktivní a ochotně se otevírá působením celé řady látek. Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty, což má za následek nízké polymerační smrštění a tato vlastnost je vhodná pro výrobky vyžadující velmi přesné rozměry. V porovnání s předešlými pryskyřicemi má nejlepší mechanické a elektrické vlastnosti a mezi klady patří i dobrá odolnost vůči bazickému a kyselému prostředí.

Nejběžnějším typem epoxidových pryskyřic jsou ty, které obsahují glycidylové skupiny. Základním reaktantem pro jejich výrobu je bisfenol-A (dian), který alkalicky kondenzuje s epichlorhydrinem. Mimoto probíhají i jiné vedlejší reakce, při kterých vznikají nežádoucí produkty, které je nutno od vzniklých epoxidů oddělit.

Pro dostatečnou impregnaci výztuže je nutno snížit vysokou viskozitu samotného epoxidu. Toho lze docílit částečně zvýšením teploty při zpracování, pomocí vysokovroucího rozpouštědla (dibutylftalát), reaktivního rozpouštědla (glycidylethery) nebo zředěním látkou obsahující dvojnou vazbu, která je schopná polymerace (styren)[4].

Na rozdíl od předešlých pryskyřic vytvrditelných pouze radikálovou polymerací, lze epoxidové pryskyřice vytvrdit jinými způsoby, například polyadící nebo polykondenzací. Pro rychlejší vytvrzení je nutné, aby systém obsahoval tvrdidlo, urychlovač a katalyzátor vytvrzování. Klíčem k vytvrzení je reaktivní oxiranová skupina na konci jednotlivých řetězců. Ty ochotně reagují například s polyfunkčními aminy, kdy je k úspěšnému vytvrzení potřeba, aby měl použitý amin alespoň tři aktivní atomy vodíku. Další alternativou je vytvrzení za pomoci polyfunkčních thiolů nebo použití anhydridů.

K vytvrzení může dojít také polymerací epoxidové skupiny, která může probíhat aniontově iniciována kovovými hydroxidy nebo kationtově iniciována katalyzátory jako je BF_3 nebo AlCl_3 [42].

5.1.4 Fenolické pryskyřice

Tyto pryskyřice patří k velmi křehkým látkám. Disponují však vysokou tvrdostí, modulem pružnosti a malou houževnatostí. Vyrábí se kondenzací formaldehydu a fenolu, přičemž v závislosti na poměru těchto dvou složek lze připravit takzvané novolaky (poměr menší než jedna) nebo rezoly (poměr větší než jedna)[4].

Častěji se při výrobě setkáme s novolaky, které se vytvrzují za pomoci hexametylentetraminu. Při výrobě rezolů není tvrdící činidlo potřeba, neboť každá molekula fenolu je v důsledku nadbytku formaldehydu spojena methylenovým můstkem. Abychom dosáhli vysoké tepelné odolnosti kompozitu, je nutné, aby fenolická pryskyřice podstoupila proces pyrolýzy, díky které dojde k vytvoření uhlíkové matrice a k částečnému odpaření pryskyřice. Využití lze najít například v podobě roštů na vrtných plošinách, neboť jsou schopné čelit i teplotám okolo 900 °C po dobu 40 minut [42].

5.1.5 Bismaleimidy

Bismaleimidy patří k cenově nákladnějším pryskyřicím. Nejčastěji jsou vyráběny polyadici, přičemž základními složkami jsou primární diamin a anhydrid kyseliny maleinové při teplotě okolo 175 °C. K tomu, aby získaly vysokou tepelnou odolnost, se nechávají volně dotvrzovat při vyšších teplotách v rozmezí 230-245 °C. Samotné kompozity využívající bismaleimidy jako matricí se vyrábí nejčastěji za využití autoklávu, navíjením nebo RTM technikou.

Možností vytvrzení bismaleimidů je celá řada. Nejjednodušším způsobem je homopolymerace za zvýšené teploty, vytvrzená pryskyřice je však extrémně křehká. Dalším způsobem je kopolymerace s diaminy nebo olefiny. V závislosti na použitém způsobu vytvrzování můžeme získat matrice o různých fyzikálních a mechanických vlastnostech. Svou tuhostí se mohou některé rovnat epoxidovým pryskyřicím [42].

5.1.6 Kyanoestery

Další ze skupiny velmi drahých pryskyřic, které mohou svými vlastnostmi substituovat bismaleimidy nebo epoxidy. Zhotovené kompozity disponují totiž podstatně lepší odolností vůči ohni a také vůči vlhkosti. Mají však zhoršenou schopnost adheze s výztuží a kyanoesterové prepregy jsou vysoce citlivé na vlhkost, což může vést k vyvíjení oxidu uhličitého během vytvrzování a tím ke vzniku defektů.

Hlavními reaktanty pro výrobu kyanoesterů je kyselina kyanatá a bisfenol A, které podléhají esterifikaci za vzniku substituovaného triazinového kruhu. Při vytvrzování za zvýšené teploty poté polyadici dochází ke spojení jednotlivých kruhů a bisfenolových skupin pomocí kyslíkových můstků.

Díky vysokému počtu benzenových a triazinových kruhů má výsledná pryskyřice vysokou teplotu skelného přechodu. Výsledný kompozit také disponuje atraktivními elektrickými vlastnostmi jako je například nízká dielektrická konstanta a disipační faktor. Kyanoestery jsou také velmi odolné vůči absorpci vody, mnohem více než epoxidy nebo bismaleimidy [42].

5.1.7 Polyimidy

Polyimidy lze považovat jak za termoplasty, tak za termosety. Jsou to materiály, které lze vystavit vysokým teplotám okolo 300 °C. Mohou být vyrobeny polykondenzací nebo polyadici, přičemž během polykondenzace mohou nastat problémy díky uvolňující se vodě nebo alkoholu. Pokud nejsou tyto látky závčas odstraněny, může dojít k tvorbě dutin a následné degradaci vytvrzené matrice. Polyimidy vyžadují v porovnání s epoxidovými matricemi vyšší teplotu a také vyšší tlak během vytvrzovacího procesu.

Z polyimidů vyráběných polyadici lze uvést například polyimid s označením PMR-15, pryskyřici na bázi tří monomerů, z nichž je však jeden považován za karcinogen. Tento polymer byl schopný snést teploty okolo 300 °C i několik stovek hodin [42].

5.1.8 Polyuretany

Polyuretany jsou polymery obsahující uretanové vazby a zařazením odpovídají jak termoplastům, tak termosetům. Základními složkami potřebnými pro přípravu polyuretanů jsou polyoly, polyisokyanáty a různé modifikátory, které však nejsou nezbytné.

Použitím lineárních a nízkofunkčních polyolů dosáhneme nízkomodulového polyuretanu, který je flexibilní. Naopak použití vícefunkčních a rozvětvených polyolů vede k tvrdým vysokomodulovým polyuretanovým systémům. V závislosti na struktuře páteřního řetězce polyolu rozlišujeme polyetherové polyoly a polyesterové polyoly, přičemž častěji se setkáme s prvními zmíněnými.

Druhou složkou polyuretanů je monomer obsahující dvě nebo více isokyanátových funkčních skupin. Pro výrobu termosetových polymerů jsou nejčastěji používány polyisokyanáty známé pod označením TDI, MDI, HDI. Jejich největším problémem je jejich toxicita, která je omezena přídavkem blokujícího činidla. Své uplatnění nachází polyuretany v textilním, obuvnickém, automobilovém nebo stavebnickém průmyslu [43].

6 TECHNOLOGIE VÝROBY

Technologických procesů výroby kompozitních materiálů je dnes celá řada, přičemž každý z nich disponuje určitými výhodami i nevýhodami. Také je nutné rozlišit výrobní procesy při použití termoplastických a termosetových matric, neboť každá z nich vyžaduje jiný přístup.

6.1 Technologie pro termosetové matrice

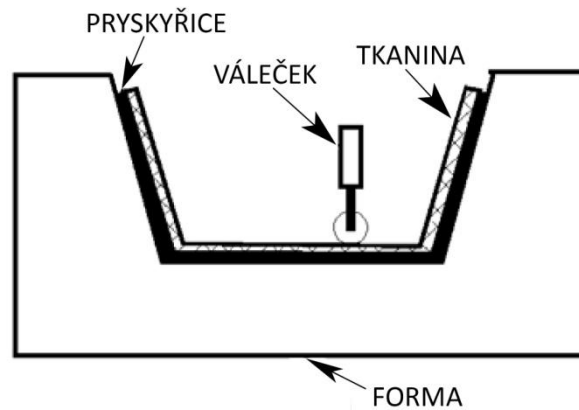
Mezi běžné termosetové pryskyřice patří epoxidy, polyestery a vinylestery. Tyto pryskyřice tvoří jedno nebo dvousložkové systémy a při pokojové teplotě se nachází v kapalném stavu. K vytvrzení dochází za zvýšené nebo pokojové teploty, čímž materiál získá konečný tvar. Práce s termosety je snadnější, neboť počáteční pryskyřice se nachází v kapalném stavu a to také umožňuje lepší impregnaci vláken a dochází k méně častému vzniku dutin a pórů. Termosety jsou také méně náročné na množství tepla a tlaku potřebného k vytvrzení než je tomu u termoplastů, což vede k nižší spotřebě energie nutné pro výrobu. Na druhou stranu vyžadují termosety delší čas nutný k vytvrzení a tím dochází ke zpomalování tempa výroby. Dalším problémem je jejich obtížná recyklovatelnost pro nemožnost opakovaného tvarování výrobku po vytvrzení.

6.1.1 Ruční kladení

Jde o jednu z nejběžnějších metod vůbec a to hlavně z důvodu její nenáročnosti z pohledu technologie a také díky nízké ceně zejména v oblasti rozvojových zemí. Metoda není příliš vhodná pro velkoobjemové výroby, nicméně se hodí pro zhotovení prototypů. Obsluha forem klade také vysoké nároky na manuální zručnost pracovníků, neboť jsou to oni, kdo zodpovídá za konečnou podobu výrobku. Tato technologie také vykazuje poměrně špatnou reprodukovatelnost vlastností jednotlivých výrobků, protože není řízena programově. Metoda se využívá například pro výrobu bazénů nebo různých nádrží.

Forma je u tohoto způsobu výroby otevřená, což je nevýhoda z pohledu úniku par rozpouštědel. Do formy se mohou klást prepregy anebo se do formy nejdříve vlije pryskyřice a do ní se naklade výztuž. Pro zlepšení impregnace se vrstva přejede válečkem a po jejím částečném ztuhnutí se mohou nanést další vrstvy stejným způsobem. Výrobek může být vytvrzen volně na vzduchu, ve vyhřívané peci nebo v autoklávu.

Určitou variací ručního kladení je tzv. rolování, kdy se na stůl položí prepregy v požadované orientaci a poté jsou navinuty na ocelovou tyč. Ta je i s navinutými prepregy stažena fólií a poté umístěna do stojanu, který je umístěn do horkovzdušné pece, kde dojde k vytvrzení. Tato metoda poskytuje výrobky tubulárního tvaru a pomocí ní je možné zhotovit například golfové hole nebo rybářské pruty [44].



Obrázek 10 Schéma procesu ručního kladení [44]

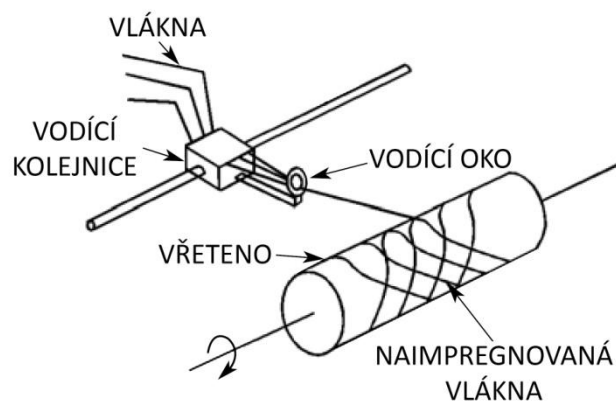
6.1.2 Nastříkování

Nastříkování je metoda, která je podobná ručnímu kladení. Jedná se především o jednu z levnějších technik, u které je rovněž špatná reprodukovatelnost vlastností výrobku, a mimoto zaručuje hladkost pouze jedné z jeho stran. Nasekaná vlákna jsou i s matricí nastříkována speciálním zařízením do formy nebo na kopyto. Povrch je částečně uhlazen pomocí válečku, díky kterému se z materiálu také vytlačí nežádoucí vzduchové bubliny. Tato technologie je například využívána na výrobu sedaček pro sportovní stadiony nebo na výrobu van [44].

6.1.3 Navíjení

Navíjení je technologicky náročnější metodou, která je někdy kombinovaná s tzv. pultruzí (viz další kapitola). Metoda je limitovaná výrobou produktů pouze válcovitého tvaru, ovšem na druhou stranu výrobky disponují dobrými mechanickými vlastnostmi. Běžně se takto vyrábí různé nádrže, tlakové nádoby, trubky nebo dokonce kryty raketových motorů.

Vlákna z cívek jsou vedena okem do lázně s pryskyřicí a následně navíjena na otáčející se vřeteno, které se po vytvrzení vyjme nebo zůstane jako součást hotového výrobku. Vodicí oko je umístěné na kolejnici, po které se pohybuje různou rychlostí, na níž je závislý úhel navíjených vláken. Někdy se na hotový výrobek přidává propustná teflonová vrstva, která nasaje přebytečnou pryskyřici a vyhladí tím povrch výrobku [44].



Obrázek 11 Schéma procesu navíjení [44]

6.1.4 Pultruze (tažení)

Pultruze patří k plně automatizovaným kontinuálním procesům. Je vhodná pro velkoobjemové výroby a samotné výrobní náklady jsou poměrně nízké. Touto metodou se dají vyrábět profily nejrůznějších tvarů za přijatelnou cenu, nicméně výroba více komplexních tvarů je nemožná. Pultruzí se vyrábí například zábradlí, žebříky, kryty kolejnic, trubky, čili výrobky relativně jednoduché svým tvarem.

Základem tažených kompozitů jsou jednosměrně orientovaná vlákna, která jsou naimpregnovaná ve vaně s pryskyřicí. Pro zvýšení mechanických vlastností kompozitu v příčném směru, jsou na jednosměrná vlákna často navíc přikládány tkané rohože nebo netkané textilie. K vytvrzení následně dochází ve vytvrzovací hlavě, a hotový výrobek požadované délky je odříznut automatickou pilou. Nejdražší a nejdůležitější částí je tažné zařízení, kterým mohou být například dva housenkovité pásy nebo dva hydraulické svěráky pohybující se po kolejnici [44].

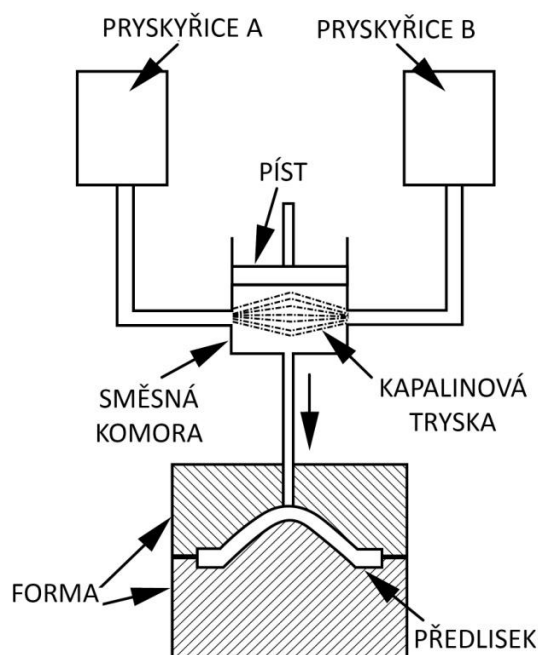
6.1.5 Metoda lisování se vstřikem matrice (RTM)

Metoda RTM nebo také proces lisování s přenosem pryskyřice, je vhodná pro výrobu konstrukčních kompozitních materiálů komplexních tvarů. Pomocí této metody jsou vyráběny například panelové desky do automobilů, letecké díly, lopatky větrných mlýnů, hokejky, helmy atd. Zařízení pro výrobu je nákladné, na druhou stranu mohou zhotovené kompozity obsahovat vysoké objemové procento vláken. Hotové výrobky mohou také splňovat přísnější rozměrové tolerance a disponují hladkým povrchem ze všech stran.

Výroba probíhá tak, že se do uzavřené formy umístí suchý vláknový předlisek s pěnovým jádrem. Pomocí trysek je následně do formy vytlačena termosetická pryskyřice až do jejího úplného naplnění. Následuje ohřátí formy na zvýšenou teplotu, čímž dojde k vytvrzení pryskyřice. Forma je poté otevřena a je z ní vyjmut hotový výrobek.

Určitou variací této metody a metody ručního kladení může být použití otevřené formy a vakuového vaku, díky kterému dojde k vytvoření podtlaku a rovnoměrnému nasátí pryskyřice do formy (metoda VARTM). Této úpravy se používá především k výrobě velkých dílů, jako jsou například trupy lodí.

Částečnou modifikací metody RTM je metoda SRIM (structural reaction injection molding), který se liší použitými pryskyřicemi, k jejichž promísení dojde ještě před vstupem do samotné formy. Pryskyřice A a B jsou smíchány ve směsné komoře, do které jsou obě přiváděny velkou rychlostí (100 m/s). Tím dojde k vytvoření velkého tlaku, čímž dojde k částečnému zesíťování pryskyřice už ve směsné komoře. Částečně zesíťovaná pryskyřice je následně už za menšího tlaku dopravena do formy, kde dojde vlivem zvýšené teploty k dotvrzení. Ta už nemusí být tak vysoká, což urychluje výrobu a proto se tato metoda používá například v automobilovém průmyslu pro zhotovení některých interiérových dílů. Používané pryskyřice jsou nejčastěji na bázi polyuretanů a musí být smíchány v přesném poměru [44].

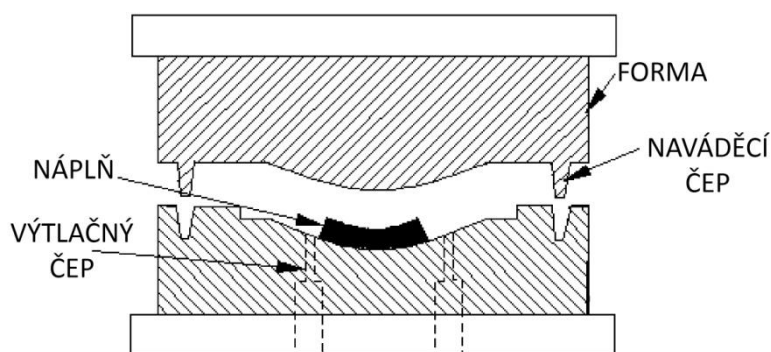


Obrázek 12 Schéma procesu SRIM [44]

6.1.6 Lisování ve formě

Lisování je velice oblíbenou metodou v automobilovém průmyslu, neboť se jedná o technologii pro velkoobjemové výroby vhodnou například pro výrobu jednodílných nebo dvoudílných panelů, nárazníků nebo spoilerů. Dalšími aplikacemi může být například výroba vojenských beden, spacích kabin kamionů nebo krytů pouličních lamp. Povrchy výrobků mají vysokou kvalitu povrchu a metoda je také vhodná pro spojení více částí dohromady.

Vstupní surovinou pro výrobu jsou polotovary, předimpregnovaná vlákna ve formě desek (tzv. SMC) nebo ve formě „těsta“ (tzv. BMC). Tento polotovar je umístěn na spodní polovinu formu, která je stejně jako ta horní předehřátá. Polotovary musí být do formy umístěné v požadované orientaci a po přitisknutí horní poloviny formy dojde k vytvrzení, které trvá přibližně 1 - 4 min [44].



Obrázek 13 Schéma procesu lisování ve formě [44]

6.2 Technologie pro termoplastické matrice

V rámci průmyslu kompozitů dominují trhu z velké části kompozity s termosetovou matricí. Použití termoplastických matic se stává populární v leteckém a automobilovém průmyslu, především vzhledem k jejich vyšší tuhosti, rychlosti výroby a minimálním ekologickým obavám. V komerčním

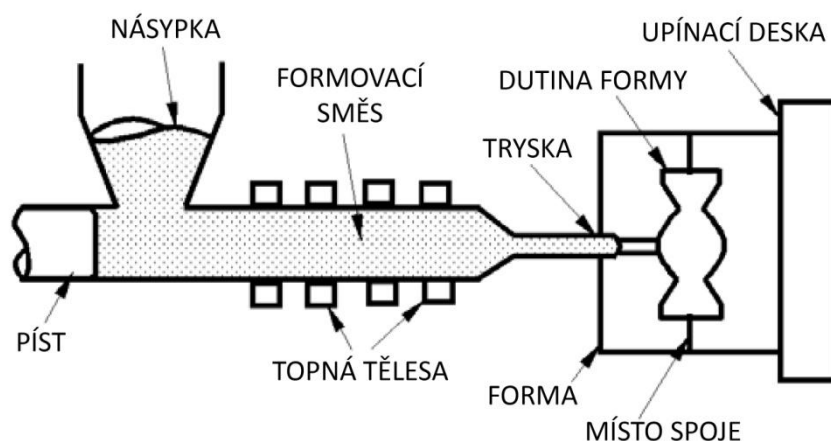
sektoru výroby termoplastických kompozitů převládají dvě metody, metoda přímého vstřikování a lisování ve formě.

Řada metod používaných u termosetových matric byla přenesena i k termoplastickým. Jedná se o metodu navíjení, extruzi (variace pultruze), lisování ve formě. Hlavní rozdíl při používání termosetových a termoplastických matric je ten, že vytvrzení termoplastů trvá v řádu sekund a jde o čistě fyzikální proces a neprobíhá zde žádná chemická reakce tak, jako v případě termosetů.

6.2.1 Metoda přímého vstřikování

Metoda má širokou škálu využití od domácích potřeb jako jsou kbelíky, hrnky, hračky až po díly do interiérů aut nebo počítačů. Rychlost výroby je značná a umožňuje zhotovení komplexních dílů během zhruba 30 s, přičemž nejvíce času zabere chlazení výrobku.

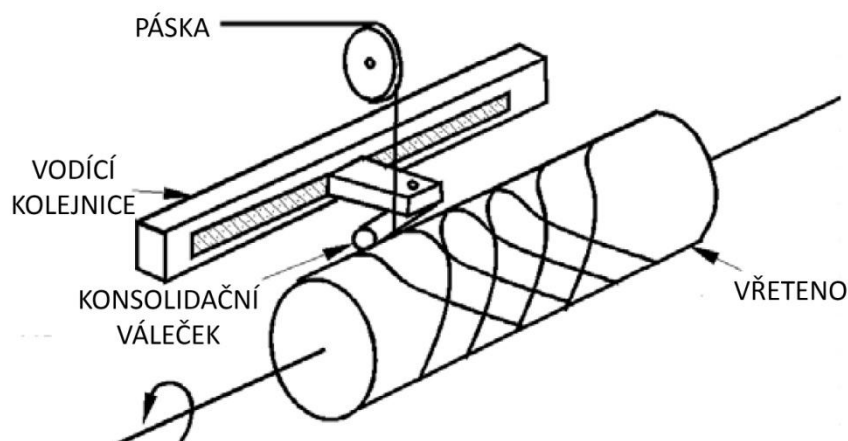
Výroba probíhá tak, že do násypky je sypán granulát, který je složen z termoplastu a krátkých nasekaných vláken. Tento granulát je postupně posouván zařízením pomocí šneku a za zvýšené teploty dochází k jeho natavení. Na konci šneku je tryska, pomocí které je roztavená směs nastříknuta do formy. Ta se následně ochladí a poté otevře, aby z ní hotový výrobek mohl být vyjmut. Metoda přímého vstřikování byla úspěšně použita i pro výrobu kompozitů s termosetovou matricí, mimoto se jedná o běžnou výrobu plastových výrobků [44].



Obrázek 14 Schéma metody přímého vstřikování [44]

6.2.2 Navíjení termoplastické pásky

Tato metoda je velmi podobná navíjení používanému u termosetových pryskyřic s tím rozdílem, že místo vláken je na vřeteno navíjena termoplastická prepregová páska. Při tomto způsobu navíjení je nutné prepreg předeheat (například horkým vzduchem) ještě před konsolidačním válečkem, který je umístěn v blízkosti vřetena a je jím aplikován tlak. Oproti termosetovému způsobu je tato metoda čistší, neboť zde není žádná vana s pryskyřicí. Také je tímto způsobem možné zhotovit struktury, které jsou tlustší a navíc odpadá problém s parami rozpouštědel (např. styren). Na druhou se jedná o velmi drahou metodu, a to jak co se týče zařízení, tak surovin potřebných pro výrobu. Technologie zatím nenašla širší komerční využití, nicméně byla některými průmyslovými odvětvími využita pro zhotovení prototypů [44].

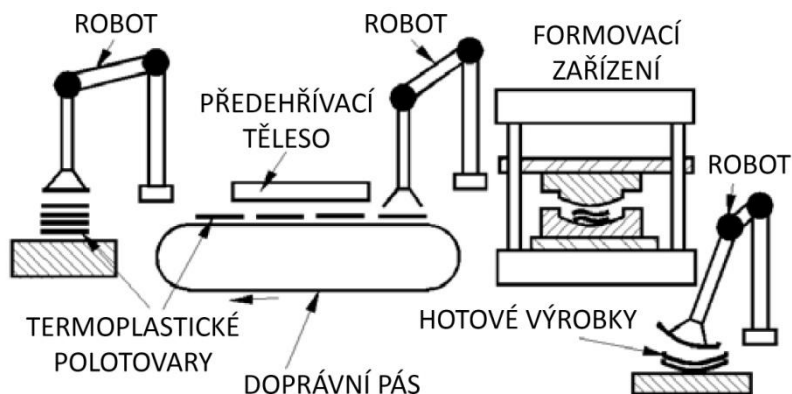


Obrázek 15 Schéma procesu termoplastického navíjení pásky [44]

6.2.3 Lisování ve formě

Lisování ve formě při použití termoplastů je široce využívaná technologie a její použití je směřováno především do velkoobjemových výrob, například v automobilovém průmyslu. Jedná se o jednu z nejefektivnějších metod, neboť na výrobu jednoho dílu je potřeba něco okolo šedesáti sekund. Základní surovinou potřebnou k výrobě je polotovary z termoplastu a krátkých nasekaných vláken.

Zásadní rozdíl při použití termoplastů a termosetů spočívá v tom, že forma není zahřívána, ale naopak je chlazená vodou. Zvýšená teplota se používá pouze k předehřátí polotovarů, které jsou vloženy do chlazené formy. Celá výroba je levná, efektivní a může být plně automatizovaná. Nevýhodou je nízká hranice objemu vláken (30 %) z důvodu viskozity matrice a povrch hotových výrobků nedosahuje těch nejvyšších kvalit [44].



Obrázek 16 Schéma procesu lisování ve formě [44]

6.2.4 Hot press technika

Metoda velice podobná lisování ve formě s tím rozdílem, že termoplastické prepregy obsahují jednosměrně orientovaná vlákna, která mohou dosáhnout až 60 % objemových. Metoda je používána k výrobě plochých laminátů o konstantní tloušťce, avšak zatím nedosáhla širšího komerčního uplatnění.

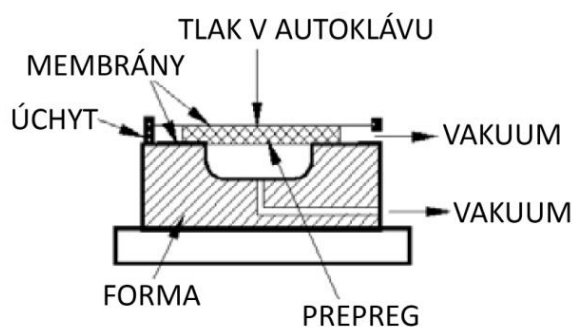
Při výrobě se do formy ošetřené separačními činidly klade prepreg, který pokrývá celou plochu formy. Forma se následně uzavře a zvýšenou teplotou a mírným tlakem dojde k vytvarování výrobku. Poté se forma ochladí, čímž dojde ke ztuhnutí výrobku a umožní jeho vyjmutí. Pro aplikaci zvýšené teploty může být namísto vyhřívání formy použit také autokláv. Tento způsob vytvrzování se používá

především v kosmonautice k výrobě tuhých částí. Metoda byla použita například pro výrobu paže vesmírného robota určeného k prozkoumávání planet [44].

6.2.5 Formování za pomoci membrány

Jedná se o unikátní metodu, která nebyla převzata technik používaných při použití termosetů. Metoda není ještě tolik komerčně rozšířená, ale byla úspěšně aplikovaná při výrobě komplexních dílů, jako jsou například helmy, malé nádrže nebo výrobky vlnitých tvarů.

Hlavní surovina potřebná k výrobě je stejná jako u hot press techniky, čili prepregy s jednosměrně orientovanými vlákny, které se předem nahřejí například v peci. Následně se umístí na membránu, která je natažena nad formou a uchycena po jejích stranách. Přes prepreg je poté přetažena druhá membrána a za pomoci tlaku nebo vakua (popřípadě obojího) dojde k jeho vytlačení do formy. Metoda je vhodná pro zhotovení komplexních výrobků s vynikajícími konstrukčními vlastnostmi [44].



Obrázek 17 Schéma procesu formování za pomoci membrány [44]

7 CHARAKTERIZACE VLASTNOSTÍ KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ

U kompozitních materiálů lze stanovit celou řadu vlastností určujících jejich kvalitu a následně také možnost jejich praktického využití. Měření některých těchto vlastností je podrobněji rozebráno v následujících kapitolách.

7.1 Charakterizace ohybových vlastností

Vhodnou metodou pro stanovení ohybových vlastností polymerních kompozitů vyztužených vlákny je tříbodové nebo čtyřbodové zatěžování. Obě metody jsou použitelné jak pro termoplastové, tak pro termosetové matrice. Podstatou metody je umístění tělesa ve tvaru hranolu do zkušebního přípravku, ve kterém je ohýbáno konstantní rychlostí, dokud nedojde k porušení tělesa nebo k předem dané deformaci, přičemž se během zkoušky měří síla působící na těleso a průhyb. Pomocí tohoto měření lze zjistit hodnoty pevnosti v ohybu, ohybového modulu a jiných parametrů, které vyplývají ze vztahu ohybové deformace.

Zkušební tělesa musí mít určité rozměry a jejich průřez by měl být pravoúhlý. Délka tělesa by se měla pohybovat okolo 80 mm, šířka 15 mm a tloušťka 4 mm. V závislosti na materiálu je také nutné nastavit správnou vzdálenost podpěr, na kterých je těleso umístěno. Těleso je následně zatěžováno trny o definovaném průměru, přičemž geometrie zkoušky je nastavena tak, aby byla maximálně omezena smyková deformace a vyloučeno porušení v důsledku mezilaminárního smyku. Zkušební rychlost by měla být taková, aby poskytovala průhyb co nejbližší 0,4násobku tloušťky za 1 min. Při zkoušce je nutné testovat alespoň pět těles pro větší zpřesnění výsledku průměrné hodnoty. Výsledky zkoušek, při kterých se zkušební těleso poruší mimo střední třetinu vzdálenosti mezi podpěrami

(třibodová zkouška) nebo mimo střední část (čtyřbodová zkouška), musí být vyloučeny a místo nich je nutné provést měření u nových těles [45].

U pultrudovaných profilů je také možné stanovit vlastnost s názvem efektivní modul pružnosti v ohybu. Principem metody je zatěžování taženého profilu v třibodovém uspořádání s rozpětím, které je 20 krát větší než je průřezu. Tuhost ohybu se získá ze směrnice závislosti výsledné deformace na použitém zatížení. Efektivní modul pružnosti v ohybu se poté získá vydělením ohybové tuhosti momentem setrvačnosti. Pro zpřesnění výsledků je nutné provést měření pro nejméně tři zkušební tělesa, jejichž délka musí být 1,2 krát větší než rozpětí podpěr, přičemž zkušební rychlost se nastaví tak, aby k maximálnímu průhybu došlo za dobu 30 až 90 s [46].

7.2 Charakterizace tahových vlastností

Tahové vlastnosti polymerních kompozitů jako je například maximální prodloužení nebo modul pružnosti v tahu jsou stanoveny metodou, kdy je zkušební vzorek o definovaných rozměrech uchycen do čelistí zkušebního zařízení a následně je na něj vyvíjeno napětí v tahu. Tato metoda je použitelná jak pro termoplastické, tak pro termosetové kompozity, které mohou být vyztuženy všemi typy výtuzí, ať už jsou to přímá vlákna nebo tkané i netkané textilie.

V závislosti na typu polymerního kompozitu je nutné upravit jeho rozměry. Pro termosetové kompozity je nutné, aby délka zkušební vzorku byla větší než 250 mm. Šířku vzorku je možno upravit na 25 nebo 50 mm. Tloušťka vzorku by se měla pohybovat v rozmezí 2 až 10 mm. Na koncích zkušební vzorku je nutno vyvrtat otvory s průměrem zhruba 3 mm, které slouží pro uchycení vzorku ve zkušebním zařízení. Vzdálenost čelistí uchycujících zkušební těleso by měla být nastavena na 150 mm a testovací rychlost je nutno nastavit na 2 mm/min [47].

7.3 Charakterizace smykových vlastností

Podstatou zkoušky pro stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti je zatížení pravoúhlého hranolu tak, aby došlo ke smykovému mezilaminárnímu porušení. Metoda je vhodná pro vlákny vyztužené kompozity s matricí z termosetů nebo termoplastů za předpokladu, že dojde k mezilaminárnímu smykovému porušení. Zkušební těleso je umístěno na dvou podpěrách a je zatěžováno zatěžovacím trnem umístěným uprostřed mezi podpěrami. Zkouška je svým principem podobná metodě měření ohybových vlastností třibodovým zatěžováním s tím rozdílem, že je použito menšího poměru mezi vzdáleností podpěr a tloušťkou zkušební tělesa z důvodu vyvolání smykového mezilaminárního porušení.

Pro zpřesnění získaných výsledků je nutné provést měření pro vzorky definovaných rozměrů. Tloušťka zkušební tělesa by měla mít hodnotu 2 mm, délka 20 mm a šířka 10 mm. Pro zpřesnění výsledků je nutné provést měření nejméně pro pět zkušebních těles při zkušební rychlosti 1 mm/min [48].

7.4 Stanovení pevnosti na otláčení

Pro stanovení pevnosti na otláčení u polymerního kompozitu musí mít zkušební těleso obdélníkový průřez a vystředěný otvor. Toto těleso je zatěžováno na dvoustřih pomocí kovového čepu umístěného v otvoru. Maximální zatížení se následně použije ke stanovení pevnosti na otláčení v závislosti na průmětu kontaktní plochy mezi čepem a tělesem.

Měření je nutné provést alespoň pro pět těles s šířkou 36 mm a délkou 180 mm. Do každého z nich musí být obroben otvor s průměrem 6 mm s tolerancí do 0,1 mm od osy tělesa a ve vzdálenosti 36 mm od konce tělesa. Zkouška probíhá při pokojové teplotě při zkušební rychlosti 1 mm/min [46].

7.5 Stanovení nasákavosti ve vodě

Plastové materiály, které jsou vystaveny vodnému prostředí, mohou podléhat několika efektům. Může dojít například k rozměrovým změnám vlivem absorpce vody, extrakci ve vodě rozpustných sloučenin nebo změně jiných vlastností. Testování nasákavosti lze provést ponořením zkušební vzorku do destilované vody při 23 °C, do vařící destilované vody nebo lze vzorek vystavit prostředí 50% vzdušnou vlhkostí. Množství vody absorbované každou metodou je určeno změřením rozdílu hmotností vzorku před a po provedení zkoušky.

Zkušební tělesa mohou mít různou podobu, je však nutné aby všechna testovaná tělesa měla stejné rozměry, přičemž z důvodu přesnosti měření je nutné provést zkoušku u nejméně tří stejných zkušebních těles. Před samotným měřením je nutné vzorky vysušit například ve vakuové sušárně při teplotě 50 °C po dobu dvou až deseti hodin a následně zchladit na pokojovou teplotu, poté se vzorky zváží. Délka sušení zkušební tělesa by měla být závislá na jeho tloušťce. Pokud je vzorek podroben zkoušce ponořením do vody o teplotě 23 °C, je nutné, aby byl objem vody nejméně 300 ml, přičemž by mělo platit pravidlo, že na jeden metr čtvereční vzorku připadá 8 ml vody. Zkušební vzorky jsou v destilované vodě ponořeny po dobu 24 h a poté co jsou vyjmuty, je nutné jejich povrch vysušit například filtračním papírem nebo suchou látkou a poté jsou zváženy [49].

7.6 Kalcinační metoda

Kalcinační metoda slouží k určení obsahu skleněné výztuže nebo minerálních plniv v polymerních kompozitech. Princip metody je velice jednoduchý, je totiž založený na rozdílu hmotností vzorku před a po kalcinačním procesu. Pokud polymerní kompozit obsahuje navíc minerální plniva, je nutné zbylou skelnou výztuž a plniva od sebe oddělit rozpuštěním v 35% kyselině chlorovodíkové a následnou filtrací. Obsah skelné výztuže je potom zjištěn z rozdílu hmotnosti vzorku před kalcinací a vysušeným vzorkem po reakci s kyselinou chlorovodíkovou.

Při měření je vhodné si připravit dva až tři zkušební vzorky pro maximální snížení chyby. Měřené vzorky musí být co nejvíce identické a jejich hmotnost by se měla pohybovat mezi 2 až 20 g v závislosti na tom zda se jedná o prepregy, formované výrobky nebo lamináty. Vzorky jsou umístěné do porcelánového kelímku a poté do pece, kde je udržována teplota 625 °C tak dlouho dokud nedojde k ustálení hmotnosti vzorku. Pokud polymer obsahuje skleněná vlákna nebo minerální plniva, která nejsou schopná tuto teplotu snést, je možné tuto teplotu upravit libovolně na hodnotu v rozmezí 500-600 C. Udržovaná teplota během kalcinace by však neměla kolísat o více než 20 °C [50].

7.7 Diferenční snímací kalorimetrie

Diferenční snímací kalorimetrie je metoda, která je založená na měření rozdílu mezi rychlostí tepelného toku ve zkušebním vzorku a referenčním kelímku. Tento rozdíl se derivuje jako funkce teploty nebo času (nebo obojího), přičemž jak zkušební vzorek, tak referenční materiál jsou podrobeny stejnému řízenému teplotnímu režimu. Metodou lze provést termickou analýzu polymerů a směsí polymerů jako jsou termoplasty, reaktoplasty nebo elastomery. U uvedených materiálů je možné zaznamenat fyzikální přeměny, například skelný přechod, polymorfni přechody, tání nebo krystalizace. Metoda dále slouží také k zaznamenání chemických reakcí, odolnosti vůči oxidaci nebo ke zjištění tepelné kapacity.

Před samotným měřením je nutné provést kalibraci zařízení. Zkušební vzorek může být v kapalném nebo pevném skupenství a jeho hmotnost by se měla pohybovat někdy mezi 2 až 40 mg. Kelímek, do kterého je vzorek umístěn, musí být z materiálu s velkou tepelnou vodivostí, např. hliníku. Výsledkem měření je tzv. DSC křivka, což je závislost tepelného toku na teplotě nebo času. Na křivce se mohou nacházet píky o různé velikosti. Endotermický pik naznačuje, že rychlost toku tepla v kelímku se

zkušební vzorkem je větší než v referenčním kelímku. Endotermický pík může například značit, že došlo k tání zkušební vzorku. Exotermický pík je opakem endotermického a může naznačovat například proces krystalizace [51].

7.8 Stanovení teploty vychýlení

Tato metoda slouží k určení teploty, při které se objeví jakákoliv deformace zkušební vzorku podrobeného ohybovému zatížení ve svislé poloze. Na zkušební vzorek pravouhlého průřezu ve svislé poloze je aplikována zátěž v jeho středu pro vyvinutí maximálního napětí. Vzorek pod napětím je ponořen do média s funkcí přenosu tepla.

Pro zpřesnění měření je nutné provést zkoušku pro alespoň dvě zkušební tělesa, která by měla mít délku 127 mm, šířku 13 mm a tloušťku 3 až 13 mm. Zkušební rychlost by měla být nastavena na 2 °C/min, přičemž teplota média by měla být změřena ve chvíli, kdy dojde k vychýlení zkušební tělesa o 0,25 mm [52].

8 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část byla zaměřena na zhotovení polymerních kompozitních materiálů metodou pultruze za použití skleněných a přírodních vláken. Po výběru vhodné matrice se práce zabývá kontrolou kvality mechanických vlastností samotných přírodních vláken, ale také jejich chemickou úpravou. Rovněž bylo provedeno srovnání mechanických vlastností zhotovených kompozitních materiálů.

8.1 Metody a zařízení

Pultruzní linka

Pultruzní linka, na které byla provedena výroba veškerých profilů s výjimkou ručně kladených trámečků byla navržena a sestrojena Ing. Přemyslem Menčíkem. Linka je zmenšenou adaptací klasické průmyslové linky a skládá se ze tří částí: impregnační, vytvrzovací a odtahovací. Linka jako taková je navíc rozdělena na dvě patra, kde spodní patro slouží k uskladnění zásobních cívek skleněných nebo přírodních vláken a v horním patře probíhá samotný proces pultruze. Všechny části linky, které přichází do kontaktu s vlákny, jsou vyrobeny z galvanicky pozinkované oceli, čímž je zvýšena odolnost vůči působení agresivních složek obsažených v pryskyřici a také je usnadněno čištění zařízení po ukončení procesu.

Nejdůležitější částí linky je impregnační část, kde je umístěna impregnační vana ve tvaru trojúhelníku se zaoblenou spodní hranou, do které jsou přiváděna vlákna ze spodního patra přes ocelové naváděcí tyče. V impregnační vaně jsou vlákna tažena přes hrazdy, která přidržují vlákna ve spodní části vany a napomáhají tak prosycení svazků vláken pryskyřicí. Naimpregnovaná vlákna vycházející z vany jsou navedena do vymačkávacích kladek, které ze svazků odstraní přebytečnou pryskyřici.

V další části naimpregnovaná vlákna prochází vytvrzovací formou (tryskou), která je vyrobena z nástrojové oceli. Forma byla zapůjčena firmou GDP Koral se sídlem v Tišnově. Forma jako taková se skládá ze dvou polovin spojených vymešovými čepy a disponuje třemi drahami různého průřezu, které jsou povrchově kalené. Tím, že je forma otvíratelná, je podstatně usnadněno její čištění po ukončení výrobního procesu. Na formě jsou upevněna čtyři vyhřívací tělesa, která jsou rozmístěna nahoře i dole v přední a zadní části formy. Tímto uspořádáním je vytvořen teplotní gradient, který je potřebný k úplnému vytvrzení použité matrice. Teplota uvnitř formy je v přední a zadní části zaznamenávána teplotními čidly a teplotu v jednotlivých částech lze možno regulovat. Při vstupu vláken do formy dojde k dalšímu vymačkání přebytečné pryskyřice, ta steče do připraveného žlabu (například z kartonu) vedoucí do impregnační vany. Při výrobním procesu je nad formou zapnuto odsávání zplodin a celá forma je přikryta minerální izolací.

V odtahové části hrají hlavní roli dvě dvojice ocelových odtahových válců, které jsou pokryty vrstvou neoprenu, čímž je dosaženo vyššího tření a tudíž účinnějšího odtahu. Každá z dvojic válců je poháněna přes převod ve formě ozubeného řemene třífázovým asynchronním motorem o výkonu 250 W a maximální rychlosti 1400 otáček za minutu. V příloze 1 je uvedeno schéma pultruzní linky včetně popisků pro jednotlivé části.



Obrázek 18 Pultruzní linka

8.2 Materiály

8.2.1 Vláknové výztuže

V experimentální části byly zhotoveny pultrudované polymerní kompozity s jednosměrnou výztuží ve formě skleněných, sisalových a lněných vláken.

Skleněná vlákna

Skleněná vlákna značky Taishan Fiberglass byla poskytnuta firmou GDP Koral. Jedná se o skleněné rovingy bez krutu z E-skla, což je nejběžnější typ skloviny, ze které se skleněná vlákna vyrábějí. Použitá vlákna měla průměr 13-24 μm a svými vlastnostmi byla určena pro aplikaci v procesu pultruze nebo navíjení. Navíc byla na těchto vláknech předem provedena apretace, která zajišťuje kompatibilitu vláken s nenasyčenými polyesterovými, vinylesterovými a epoxidovými pryskyřicemi. Pro zhotovení polymerních kompozitů byla použita vlákna s délkovou hmotností 2400 a 4800 tex.



Obrázek 19 Roving skleněných vláken

Přírodní vlákna

Sisalová vlákna vyrobená firmou JUTA byla zakoupena v místním obchodě. Vlákna nejsou primárně určena pro výrobu polymerních kompozitů ani pro proces pultruze. Použitá sisalová vlákna s délkovou hmotností 1200 tex byla navíc kroucená, což je patrné i z obr. 20.



Obrázek 20 Motouz sisalu

Lněná vlákna byla dodána francouzskou firmou Safilin. Firma je producentem lněných vláken určených přímo k procesu pultruze, která jsou omyta od prachu a vosků a upravená roztokem uhličitanu sodného, což zlepšuje adhezi k některým polymerním matricím. Vlákna použitá v experimentální části však žádnými úpravami neprošla, neboť se jedná o nový dosud netestovaný produkt. Použitý svazek s nízkým krutem měl délkovou hmotnost 1000 tex.



Obrázek 21 Svazek lněného vlákna

8.2.2 Matrice

Použitou maticí pro výrobu veškerých polymerních kompozitních materiálů byla nenasyčená polyesterová pryskyřice, která byla poskytnuta firmou GDP Koral. K dispozici bylo pět různých receptur, z nichž byla vybrána na základě testů mechanických vlastností polymerních kompozitů ta nejlepší a následně použita i pro výrobu kompozitních materiálů s výztuží z přírodních vláken.

Každá z receptur obsahuje nevytvrzenou nenasyčenou polyesterovou pryskyřici, plnivo pro lepší pohledové vlastnosti, separační činidla, aditivum omezující smrštění zhotoveného kompozitu a také systém iniciátorů. Nedílnou součástí každé receptury je také styren, který snižuje viskozitu namíchané matrice a také funguje jako síťovadlo. Jednotlivé složky navážené na předvážkách byly vždy důkladně strojově promíchány v PP kelímku a následně byla pryskyřice vždy ponechána deset minut v klidu, aby došlo k jejímu částečnému odvodu. Z důvodu použití receptur v průmyslovém sektoru není uvedeno procentuální zastoupení složek, ale pouze jednotlivé složky a účel jejich přítomnosti.

Pryskyřice

Pryskyřice Norsodyne je maleinová nenasyčená polyesterová pryskyřice, která je čirá a dobře barvitelná. Obsahuje zahušťovadlo ve formě oxidu manganatého a také určité množství styrenu jako rozpouštědla a síťovadla. Maleinovou nenasyčenou polyesterovou pryskyřici představuje také Poliver R90X0, který lze vytvrdit v kratším časovém intervalu i při nízkém obsahu iniciátorů a rovněž je rozpuštěna ve styrenu. Pryskyřice Poliver ISO 112 G je isoftalická nenasyčená polyesterová ve styrenu rozpuštěná pryskyřice s vynikající chemickou odolností.

Plniva

Plniva vystupující ve všech recepturách zastupuje pouze Omyacarb, což je minerální plnivo v podobě uhličitanu vápenatého (CaCO_3). Jedná se o nejběžnější plnivo v plastikářském průmyslu, které je snadno dostupné, ekonomické a kompatibilní s širokou škálou polymerních pryskyřic. Mezi jeho funkce patří snižování povrchové energie výrobku a v případě dostatečné jemnosti částic zvyšuje rázovou houževnatost a ohybový modul výrobku. Mimoto propůjčuje výrobku neprůhlednost a lesklý povrch.

Separáčn

Prvním z použitých separačních činidel s funkcí antistatika je Zelec UN, činidlo na bázi alkohol fosfátu svou aplikací určené přímo pro proces pultruze. Činidlo je dodáváno v kyselé formě a je nezneutralizováno. Dalším separačním činidlem je hydrofobní stearát zinečnatý, bílá práškovitá látka, která je někdy také nazývána "zinkové mýdlo". Jedná se o nejsilnější separační činidlo používané pro uvolnění výrobku z formy.

Aditiva (nadouvadla)

Aditiva mají za úkol snižovat smrštění nenasyčené polyesterové pryskyřice, které je způsobeno velkým množstvím dvojných vazeb v systému. Aditivum Norsolook A 71074 je na bázi polyvinylacetátu, stejně jako nadouvadla Vinapas a Palapreg H1080-01.

Iniciátory

Iniciátor BCH PC představuje katalyzátor ve formě benzoylchloridu. Iniciátor Trigonox C je v podstatě terc-butylperoxybenzoát s ideální teplotou pro síťování okolo 140 °C. Posledním katalyzátorem je BP-50 FT. Jde o směs dibenzoylperoxidu a esteru kyseliny ftalové v poměru 1:1, která je aktivována při teplotě přibližně 70 °C.

Tabulka 2 Složení testovaných matic

SLOŽKA	RECEPTURA				
	1.	2.	3.	4.	5.
Pryskyřice	Norsodyne M 0070	Poliver R90X0	Poliver R90X0	Poliver R90X0	Poliver R90X0
				Poliver ISO 112 G	Poliver ISO 112 G
Plniva	Omyacarb	Omyacarb	Omyacarb	Omyacarb	Omyacarb
Separační činidla	Zelec UN	Zelec UN	Zelec UN	Zelec UN	Zelec UN
	Stearát zinečnatý	Stearát zinečnatý	Stearát zinečnatý	Stearát zinečnatý	Stearát zinečnatý
Aditiva	Norsolook A71074	Vinapas	Palapreg H1080-01	Vinapas	Palapreg H1080-01
Iniciátory	BCH PC	BCH PC	BCH PC	BCH PC	BCH PC
	BP-50 FT	BP-50 FT	BP-50 FT	BP-50 FT	BP-50 FT
	Trigonox C	Trigonox C	Trigonox C	Trigonox C	Trigonox C
Síťovadlo	Styren	Styren	Styren	Styren	Styren

8.3 Výběr vhodné matrice

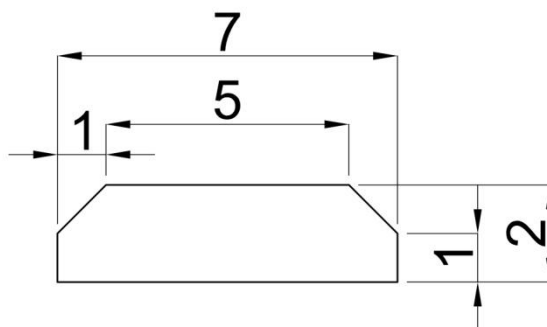
Pro porovnání jednotlivých matic a následný výběr té s nejlepšími mechanickými vlastnostmi byly metodou pultruze zhotoveny polymerní kompozity s výztuží ze skleněných vláken. Veškeré profily byly taženy rychlostí 0,35 m/s, přičemž ve dvou teplotních zónách byla nastavena teplota 110 °C respektive 160 °C. Profil taženého kompozitu je znázorněn na obr. 22 a koresponduje se všemi ostatními pultrudovanými profily vyrobenými v praktické části. Dle rovnice 8.1 byl určen obsah skleněných vláken ve zhotovených kompozitech na 83 % hm. a objemový zlomek byl dle rovnice 8.2 určen na 65 %. Pro určení hmotnostního zlomku byl zvážen metr použité výztuže pro daný výrobek a metr hotového pultrudovaného kompozitu. Pro výpočet objemu vláken V_f byla uvažována hustota E-skla 2,6 g/cm³.

$$w_f = \frac{M_f}{M_c} \quad 8.1$$

Kde M_f představuje hmotnost vláken a M_c hmotnost kompozitu.

$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad 8.2$$

Kde V_f představuje objem vláken a V_c objem kompozitu.



Obrázek 22 Rozměry taženého profilu

8.3.1 Test mezilaminární smykové pevnosti

Test zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti (kap. 7.3) byl prováděn dle normy ČSN ISO 14130. Test byl uskutečněn na zařízení *Zwick Z010* v třibodovém uspořádání s podpěrami o průměru 3 mm a se zatěžovacím trnem o průměru 6 mm. Vzdálenost mezi podpěrami byla vzhledem k omezení zařízení nastavena na 13 mm. Test byl proveden pro šest zkušebních vzorků o délce 20 mm, tloušťce 2 mm a šířce 7 mm. Vzhledem k tomu, že zkušební tělesa mají tvar lichoběžníku a tím jejich rozměry neodpovídají rozměrům stanovených normou zadávané rozměry aproximovány na obdélníkový průřez. Rychlost zatěžování byla nastavena na 1 mm/s.

I přesto, že by během procesu pultruze mělo dojít k úplnému vytvrzení matrice, může docházet k případům, kdy tomu tak není a výsledný kompozit potom dosahuje horších mechanických vlastností, než je očekáváno. U kompozitního materiálu pak může po výrobním procesu s odstupem času dojít k částečnému dovytvrzení matrice a ke změně těchto vlastností. Z toho důvodu byl test zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti proveden pro zkušební tělesa připravená den a tři dny od samotné výroby. Ta byla na požadovanou délku nařezána pomocí brusného kotouče.

Pro výpočet zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti zkušebních vzorků byla použita rovnice 8.3.

$$\tau = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{b \cdot h} \quad 8.3$$

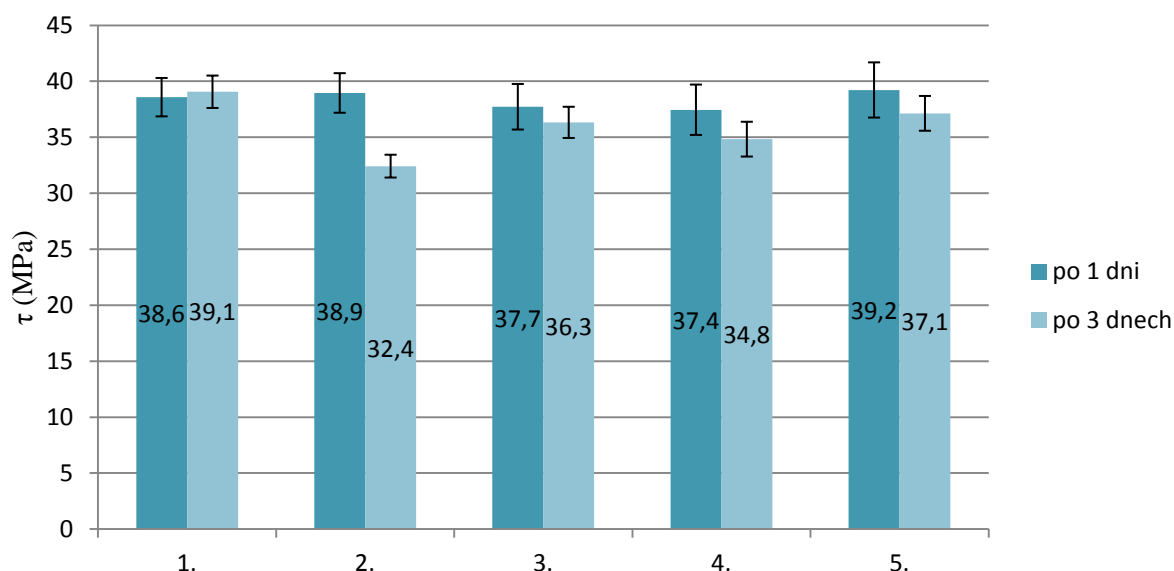
kde F je zatížení při porušení nebo maximálním zatížení v N;

b šířka zkušebního tělesa v mm;

h tloušťka zkušebního tělesa v mm.

Výsledky a diskuze

Na obr. 23 je graficky znázorněno porovnání zdánlivých mezilaminárních smykových pevností kompozitů pro jednotlivé matrice. U každé matrice je vždy uveden i výsledek měření, které bylo provedeno tři dny od výrobního procesu. Čísla matric korespondují s tabulkou č. 2.



Obrázek 23 Porovnání mezilaminárních smykových pevností jednotlivých matric

V grafickém zobrazení jsou vždy uvedeny průměrné hodnoty zdánlivých mezilaminárních smykových pevností s chybovými úsečkami vytvořenými na základě směrodatné odchylky. Z obrázku je patrné, že v případě měření provedeného jeden den po výrobě dosáhla nejvyšších hodnot matrice připravené podle receptury č. 5 s průměrnou hodnotou mezilaminární smykové pevnosti 39,2 MPa,

nicméně ostatní receptury za touto příliš nezaostávají, zejména pokud zohledníme i znázorněné chybové úsečky.

Pokud se zaměříme na měření provedené tři dny od data výroby, je patrné, že pro receptury č. 2-4 došlo k poklesu mezilaminární smykové pevnosti, přičemž výraznější pokles lze pozorovat u receptur č. 2 a 4, což jsou receptury využívající nadouvadlo Vinapas. Mírnější pokles je pozorovatelný u matric č. 3 a 5 s nadouvadlem Palapreg H1080-01. Naopak zvýšených hodnot (39,1 MPa) dosáhla matrice připravená podle receptury č. 1 s nadouvadlem Norsolook A71074. Pokles hodnot mezilaminární smykové pevnosti u zmíněných matric mohl být způsoben nekompatibilitou samotné pryskyřice s nadouvadlem nebo s některou z ostatních složek. V materiálu mohlo při volném dovytvrzení vlivem nadouvadla vzniknout vnitřní pnutí, což se následně odrazilo v mechanických vlastnostech materiálu.

S ohledem na získané výsledky byly další kompozitní materiály zhotoveny s matricí připravovanou podle receptury č. 1.

8.4 Kvalita přírodních vláken

Předtím, než byla přírodní vlákna použita pro výrobu pultrudovaných kompozitních materiálů, byla podrobena tahové zkoušce. V teoretické části byl zmíněn fakt, že přírodní vlákna nedisponují dobrou reprodukovatelností svých vlastností, což představuje určitý problém při jejich určování. Z tabulky č. 1 je dobře viditelný velký rozptyl mechanických vlastností přírodních vláken. Tahová zkouška byla provedena jednak z důvodu ověření tohoto trendu a také z důvodu zjištění, zdali dosahují použitá přírodní vlákna horní nebo spíše dolní hranice uváděných pevností.

Část teoretické části se také věnuje různým chemickým modifikacím přírodních vláken. Pro posouzení vlivu těchto úprav byla vybrána ta nejméně technicky a časově náročná – alkalická úprava. Upravená vlákna byla následně porovnána pomocí tahové zkoušky s těmi neupravenými.

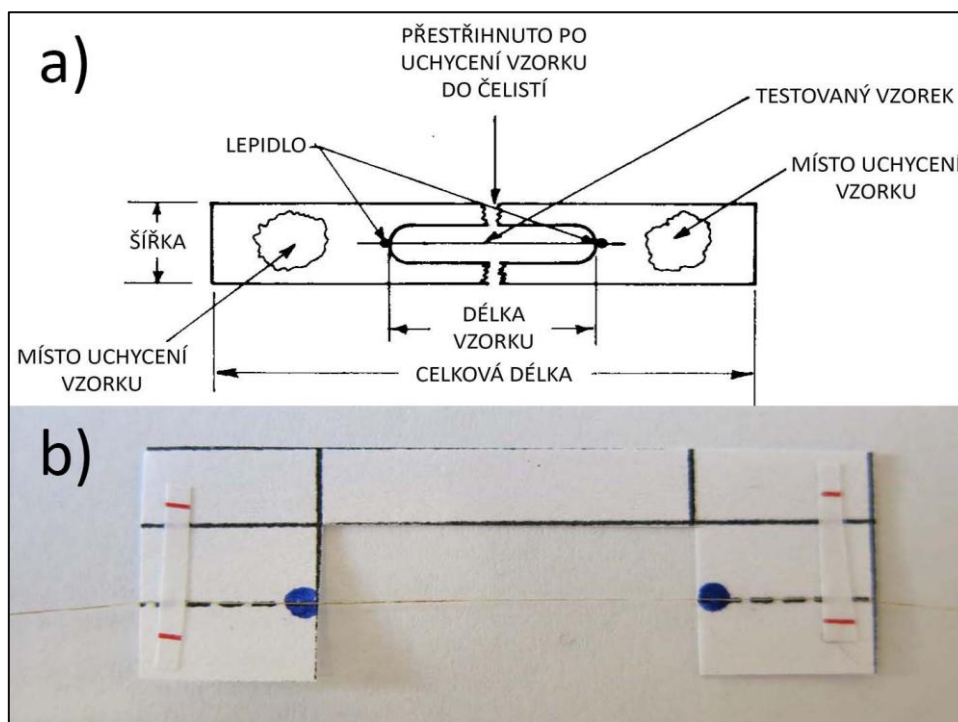
8.4.1 Alkalická úprava přírodních vláken

Alkalická úprava byla již podrobněji zmíněna v teoretické části v kapitole 4.2.1. V prvním kroku byly připraveny dva 5% roztoky NaOH do kádinek o objemu 700 ml. Do každé z nich bylo ponořeno přiměřené množství sisalových respektive lněných vláken po dobu 1 hodiny za laboratorní teploty, přičemž byl kladen důraz na to, aby byla vlákna zcela ponořena. Po uplynutí jedné hodiny byl roztok NaOH vylit a vlákna byla důkladně promývána destilovanou vodou až do doby, kdy tato promývací voda vykazovala neutrální pH. Během promývání lněných vláken byla destilovaná voda zbarvená do hněda, což bylo s největší pravděpodobností způsobeno vymýváním nečistot z povrchu vláken. Tato skutečnost navíc logicky koresponduje s faktem, že dodána lněná vlákna nebyla předem nijak promývána nebo upravována. Voda použitá k promytí sisalových vláken byla zbarvena mírně do žluta, ovšem toto zbarvení zmizelo po několika sériích promytí na rozdíl od lněných vláken, kde zbarvení přetrvávalo po podstatně delší dobu promývání. Promytá vlákna byla následně rovnoměrně rozložena na filtrační papír a ten položen na kovový rošt, který byl vsunut do sušárny. Vlákna byla sušena v programově řízené sušárně při teplotě 60 °C po dobu 24 hodin.

8.4.2 Tahová zkouška jednotlivých vláken

Tahová zkouška jednotlivých vláken byla provedena dle normy ASTM International D 3379-75. Nejpodstatnější částí tohoto druhu tahové zkoušky je upevnění vzorku do čelistí tak, aby došlo opravdu ke změření pevnosti v tahu samotného vlákna. Proto je nutné konce měřených vláken připevnit k papíru tak jak je znázorněné na obr. 24. Ten je po uchycení vzorku přestřížen a následně může být zahájeno samotné měření. Na stejném obrázku je znázorněna také podoba měřených vzorků, kde papír, na němž je vlákno uchyceno, má tvar hranatého C. Tento tvar byl zvolen pro jeho snazší

přípravu a také jeho přestřihnutí během měření. Změna tvaru papírové opory není z hlediska měření podstatná, důležité však je, že zůstala zachována délka měřeného úseku vlákna 20 mm, která je udávaná normou. Vlákno je na papíru přichyceno hned dvěma způsoby. Na vzdálenějších koncích papíru je vlákno přichyceno izolepou (lepícími štítky), a co nejtěsněji k měřenému úseku je nanášena malá kapka lepidla, což je znázorněno modrými tečkami. Jako ideální volba lepidla s dostatečnou pevností a nízkou cenou se prokázalo univerzální lepidlo Herkules dostupné v běžném papírnictví. Čelisti uchytily vzorek tak, aby nesvíraly část s nanášeným lepidlem.



Obrázek 24 Upevnění vzorku k papíru a) dle normy b) skutečné provedení

Postupně byly proměřeny na zařízení *Zwick Z010* vzorky o délce 20 mm pro upravená i neupravená vlákna lnu a sisalu při zatěžovací rychlosti 1 mm/s, přičemž pro každý typ vlákna bylo proměřeno 30 vzorků. Pevnost v tahu je přímo vyhodnocována měřicím softwarem podle rovnice 8.4. Průměry jednotlivých vláken byly změřeny za pomoci optického mikroskopu Olympus B201, přičemž byl kladen důraz na to, aby byl z rovingu přírodních vláken odebrán vzorek s průměrem co nejmenším, nejlépe jedno jediné vlákno.

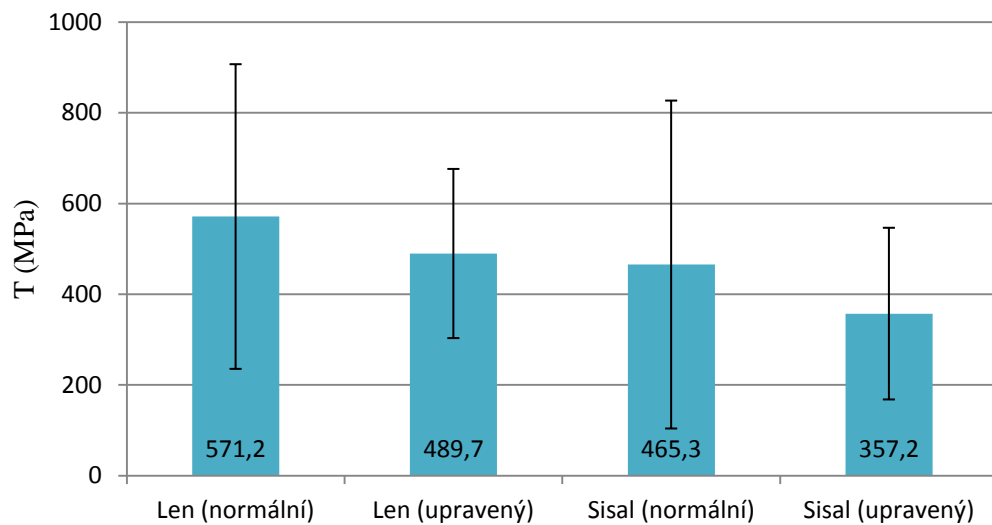
$$T = \frac{F}{A} \quad 8.4$$

Kde F je zatížení při porušení nebo maximálním zatížení v N;
 A je průměr vlákna v mm.

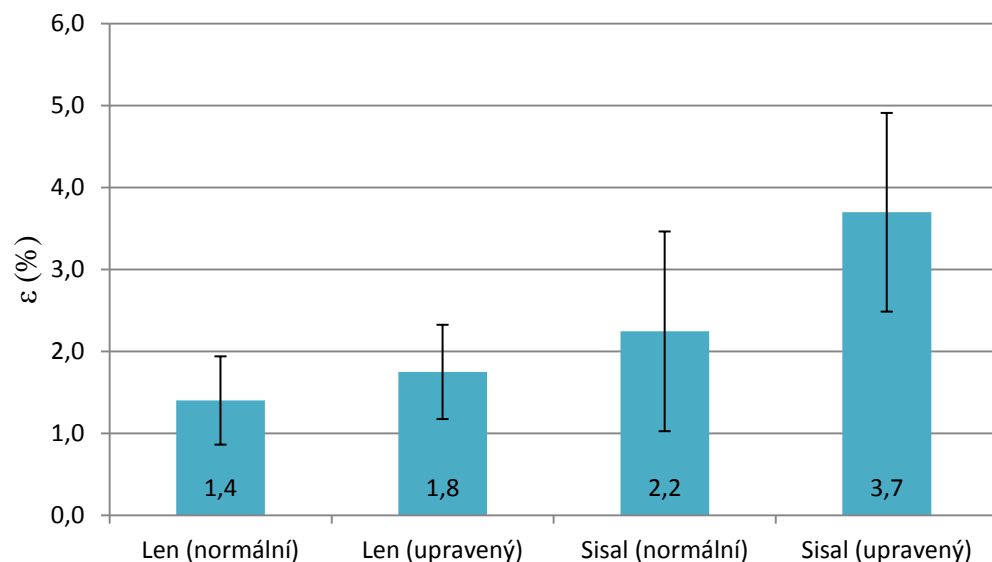
Výsledky a diskuze

Na obrázcích č. 25 a 26 je znázorněné grafické srovnání průměrných hodnot pevností v tahu respektive tažností jednotlivých vláken. Hodnoty neupravených vláken spadají do intervalu udávaného odbornou literaturou, přičemž jak sisalová, tak lněná vlákna mírně zaostávají za průměrnými hodnotami (viz Tabulka 1). Z výsledků je patrné, že vlivem alkalické úpravy došlo k poklesu pevností v tahu, což koresponduje s fakty zjištěnými z odborné literatury (viz kapitola 3.4.11). Na druhou stranu ale došlo u všech vzorků ke zlepšení tažnosti, přičemž strmější růst lze pozorovat u upravených sisalových vláken. Dle tabulky č. 1 disponují lněná vlákna vyššími pevnostmi v tahu než vlákna

sisalová a stejný trend lze pozorovat z naměřených výsledků. Je však nutné podotknout, že nižší hodnota pevnosti neupravených sisalových vláken mohla být částečně také způsobena nemožností izolovat ze svazků vláken samotná vlákna ale pouze svazky sestávající z několika vláken. Tyto svazky mají prakticky pokaždé určitý krut, který působí negativně na tahové vlastnosti vzorku. Odebírání samotných vláken však bylo mnohem snadnější u upravených sisalových vláken a to s největší pravděpodobností díky částečnému rozvolnění vláknových svazků vlivem hydroxidu (viz kapitola 4.2.1). U lněných vláken výrazné rozvolnění svazků po alkalické úpravě pozorováno nebylo. Z grafického znázornění si také můžeme všimnout poměrně velkých chybových úsečků, které potvrzují fakt, že u přírodních vláken lze téměř vždy hovořit pouze o určitém rozptylu vlastností. Pro jednoduchost byly výsledky vyhodnoceny průměrem a směrodatnou odchylkou. Nebylo aplikováno Weibullovo rozdělení, které se často ve spojitosti s vyhodnocením výsledků vláken používá.



Obrázek 25 Srovnání pevností v tahu jednotlivých vláken



Obrázek 26 Srovnání tažností jednotlivých vláken

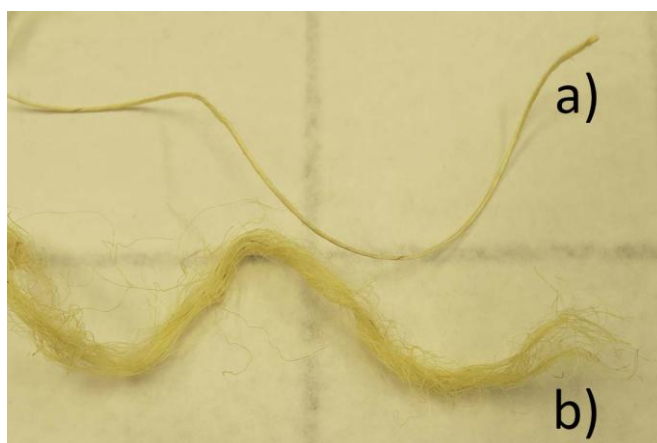
8.5 Pultruze s použitím sisalových vláken

Na pultruzní lince byly experimentálně zhotoveny kompozitní materiály za použití svazků sisalových vláken zmíněných v kapitole 8.2.1. Pro výrobní proces byla nastavena odtahová rychlost 0,35 m/s a v jednotlivých teplotních zónách nastavena teplota 110 respektive 160 °C.

Pultruzi za použití sisalových vláken lze rozdělit do dvou částí. V té první bylo použito šest svazků sisalových vláken v podobě, kterou můžeme vidět na obr. 27, přičemž teoretický obsah sisalových vláken ve zhotoveném kompozitu byl dle rovnice 8.1 určen na 59 % hm. a objemový zlomek vláken pak podle rovnice 8.2 na 53 %. Už během výrobního procesu bylo zřejmé, že vlivem velkého krutu sisalových vláken docházelo k velmi špatné impregnaci vláken, neboť pryskyřici nebylo umožněno dostat se k jednotlivým vláknům. Navíc vlivem drsnosti povrchu jednotlivých svazků mezi nimi docházelo k velkému tření, což vedlo k občasnému zadrhnutí taženého profilu uvnitř formy. Tyto komplikace musely být během procesu řešeny dočasným zvýšením odtahové rychlosti, aby došlo k vytržení zadrhlého profilu z formy, což se mohlo projevit na kvalitě vytvrzení pryskyřice. Zmíněné skutečnosti se následně odrazily jak na pohledových tak na mechanických vlastnostech kompozitního materiálu.

Ve druhé části byla použita sisalová vlákna, která byla částečně zbavena krutu, aby byla umožněna kvalitnější impregnace jednotlivých vláken. Toho bylo docíleno tak, že z motouzu sisalového vlákna byla odmotána a ustřižena určitá délka (cca 15 m). Jeden konec ustřiženého vlákna byl připevněn k pevnému bodu a druhý byl uchycen do automatické vrtačky. Za pomoci krouživého pohybu vrtačky proti směru krutu vláken došlo ke snížení tohoto krutu. Svazek vláken následně zvětšil svůj objem, ale měl tendenci vracet se do původní podoby, avšak jen částečně. Podoba normálního a objemovaného svazku je znázorněna na obr. 27. Skutečnost, že svazky vláken nabyly na objemu, způsobila snížení použitých svazků v procesu pultruze ze šesti na pouhé dva. Výsledný kompozitní materiál tak obsahoval pouze 21 % obj. (25 % hm.) sisalových vláken. Během výrobního procesu docházelo k podobným problémům, jako u normálních sisalových svazků, ne však v takové míře.

Jednotlivé kompozitní profily byly testovány na ohybovou a mezilaminární smykovou pevnost a výsledky byly porovnány také s kompozity se skleněnými vlákny.



Obrázek 27 Svazek sisalu a) normální b) objemovaný

8.5.1 Test pevnosti v ohybu

Test pevnosti v ohybu provedený dle normy ČSN ISO 14125 na zařízení zkušebním Zwick Z010 je již podrobněji rozebrán v kapitole 7.1. Jednotlivé vzorky připraveny stejným způsobem jak to pro test mezilaminární smykové pevnosti měli stejný průřez jako na obr. 22 a délku 40 mm. Zkouška byla

provedena v třibodovém systému s podpěrami o průměr 3 mm a zatěžovacím trnem o průměru 6 mm. Pro každou sérii bylo proměřeno šest zkušebních vzorku při zatěžovací rychlosti 1 mm/s.

Z výsledků ohybové zkoušky lze vypočítat pevnost v ohybu materiálu dle rovnice 8.5.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad 8.5$$

Kde σ je pevnost v ohybu v MPa;

F síla v N;

L vzdálenost podpěr v mm;

h tloušťka tělesa v mm;

b šířka tělesa v mm.

Pro určení ohybového modulu se podle rovnice 8.6 vypočítají průhyby s' a s'' , které odpovídají daným hodnotám ohybové deformace $\varepsilon_f' = 0,0005$ a $\varepsilon_f'' = 0,0025$.

$$s' = \frac{\varepsilon_f' L^2}{6h} \text{ a } s'' = \frac{\varepsilon_f'' L^2}{6h} \quad 8.6$$

Kde s' a s'' jsou průhyby uprostřed tělesa v mm;

ε_f' a ε_f'' jsou ohybové deformace, jejichž hodnoty jsou uvedeny výše.

Ohybový modul pružnosti následně vypočítá z rovnice 8.7.

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta s} \quad 8.7$$

Kde E_f je ohybový modul pružnosti v MPa;

Δs je rozdíl v průhybu mezi s' a s'' ;

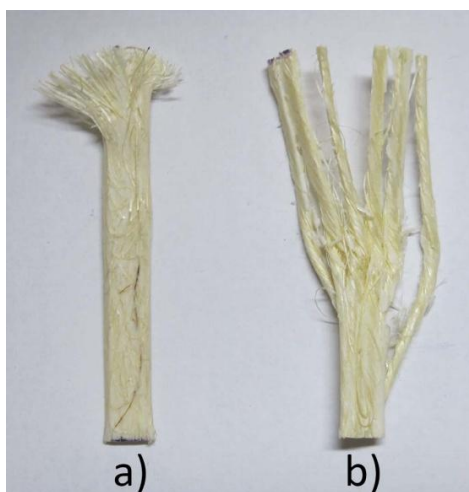
ΔF je rozdíl mezi silou F' a F'' při s' a s'' .

Test mezilaminární smykové pevnosti

U vyrobených kompozitních materiálů byla rovněž provedena zkouška mezilaminární smykové pevnosti. Ta byla provedena za stejných podmínek a s tělesy o stejných rozměrech jako v kapitole 8.3.1.

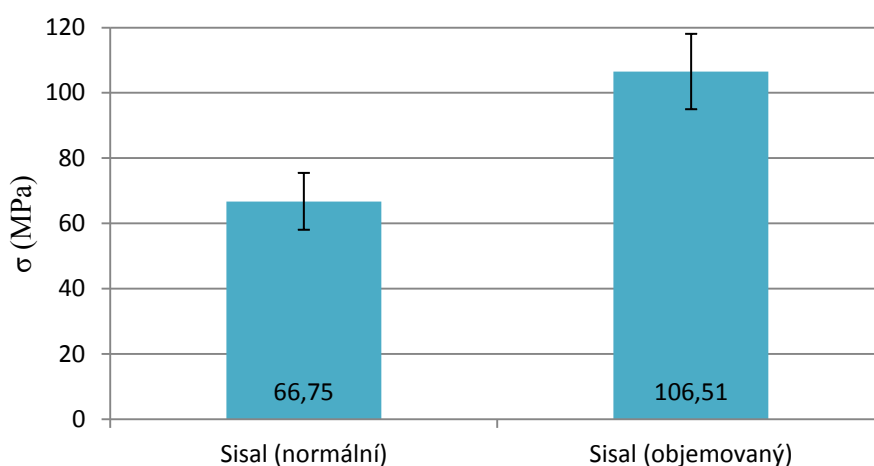
Výsledky a diskuze

Na obrázcích č. 29 a 30 je znázorněno porovnání ohybové pevnosti respektive ohybového modulu pružnosti pro materiály s normálními a objemovanými sisalovými svazky jako výztuží. Při porovnání ohybových pevností kompozit z objemovaných sisalových svazků svými pevnostmi převyšuje ten z normálních svazků zhruba o 40 MPa. Tento výsledek však s největší pravděpodobností není způsoben kvalitnější impregnačí vláken, ale pouze vyšším obsahem pryskyřice v materiálu. S ohledem na ohybový modul pružnosti se oba materiály jeví podobně, s tím že u kompozitu s objemovanými svazky lze očekávat lepší reprodukovatelnost vlastností. U kompozitu s normálními svazky byl obsah matrice poměrně malý a zdálo se, že zastávala spíše funkci „lepidla“, které drží jednotlivé svazky pohromadě, což je dobře patrné z obr. 28, na kterém jsou vlákna roztřepena za použití pouze lidské síly.

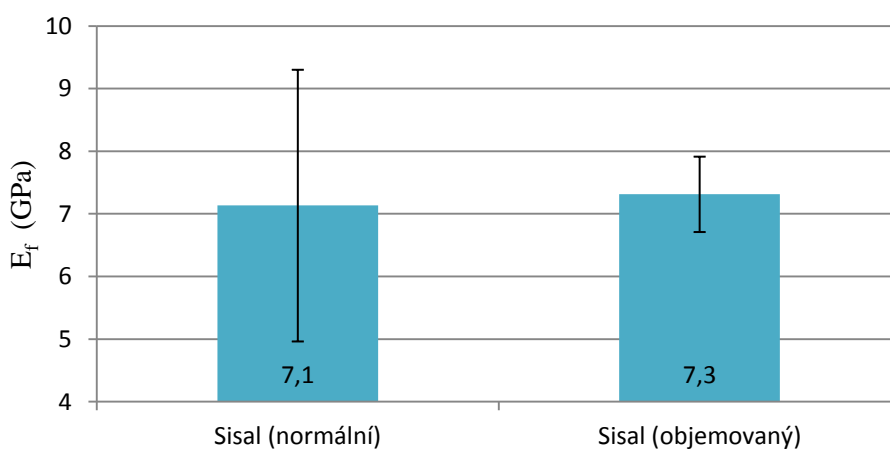


Obrázek 28 Povaha třepení výztuže pro a) objemované b) normální svazky

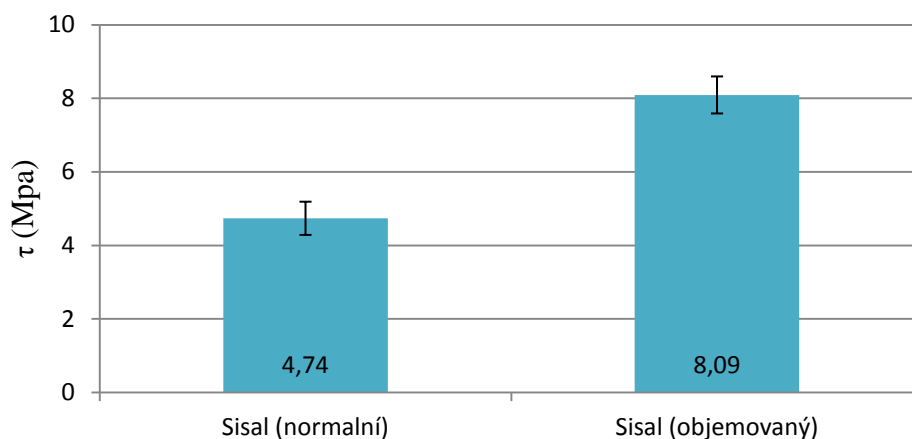
Výsledky testu mezilaminární smykové síly nejsou příliš průkazné, neboť při bližším pohledu na testovaný vzorek bylo patrné, že nedošlo k mezilaminárnímu smykovému porušení materiálu. Nicméně materiál s normálními sisalovými svazky dosáhl naměřených hodnot téměř dvakrát větších než ten s objemovanými svazky (viz obr. 31).



Obrázek 29 Srovnání ohybových pevností testovaných materiálů



Obrázek 30 Srovnání ohybových modulů pružnosti testovaných materiálů

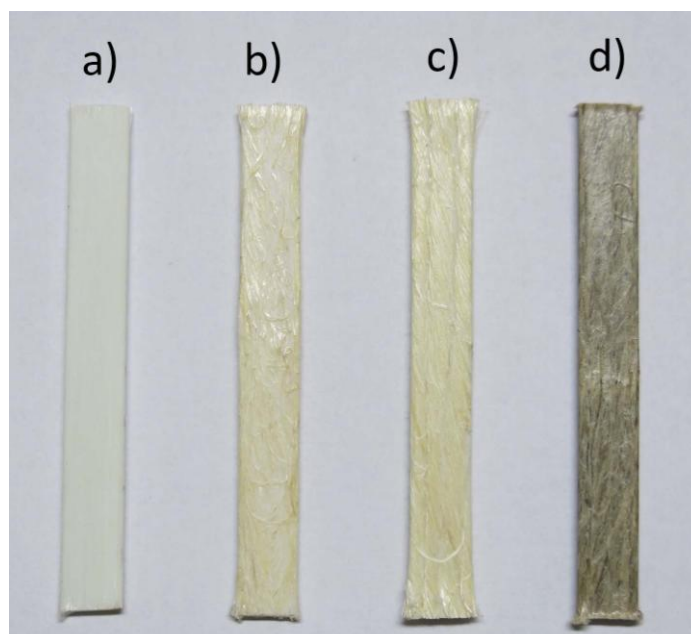


Obrázek 31 Porovnání zdánlivých mezilaminárních smykových pevností testovaných materiálů, nedošlo však ke správnému porušení materiálu

8.6 Pultruze s použitím lněných vláken

Na pultruzní lince byly experimentálně zhotoveny kompozitní materiály za použití lněných vláken již zmíněných v kapitole 8.2.1. Pro výrobní proces byla nastavena odtahová rychlost 0,35 m/s a v jednotlivých teplotních zónách nastavena teplota 110 respektive 160 °C.

Použitá lněná vlákna nebyla před výrobním procesem žádným způsobem upravována. I přes tuto skutečnost bylo v porovnání se sisalovými vlákny mnohem snazší lněné svazky impregnovat. Z toho důvodu bylo cílem pultruze lněných vláken zhodnocení vlivu obsahu vláken na mechanické vlastnosti kompozitního materiálu. První kompozit obsahoval deset lněných svazků, což dle rovnice 8.1 představuje 53 % hm. a 47 % obj. vláken (podle rovnice 8.2). Ten druhý obsahoval o dva svazky více (12), zvyšující obsah vláken v materiálu na 61 % hm. a 56 % obj.. Na obr. 32 jsou vedle sebe všechny kompozitní materiály vyrobené metodou pultruze v experimentální části práce.



Obrázek 32 Kompozit s vlákny a) skleněnými b) sisalovými (objemovanými) c) sisalovými (normálními) d) lněnými

Test zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti

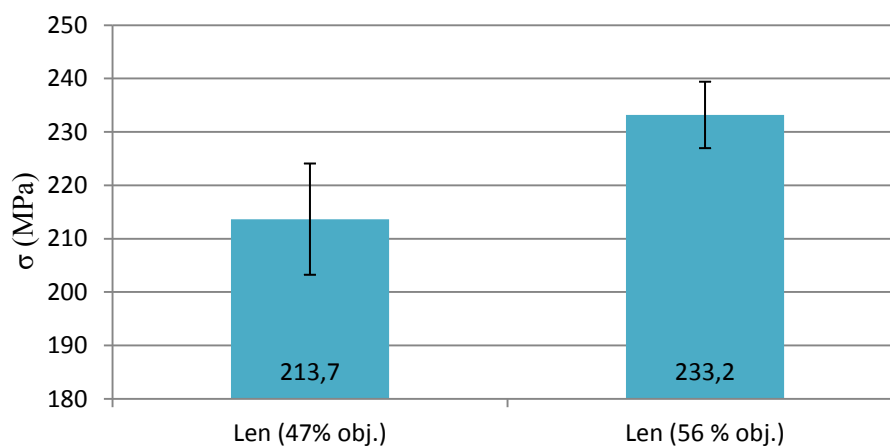
Dle podmínek a rozměru testovaných těles uvedených v kapitole 8.3.1 byla provedena zkouška mezilaminární smykové pevnosti zhotovených kompozitů.

Test pevnosti v ohybu

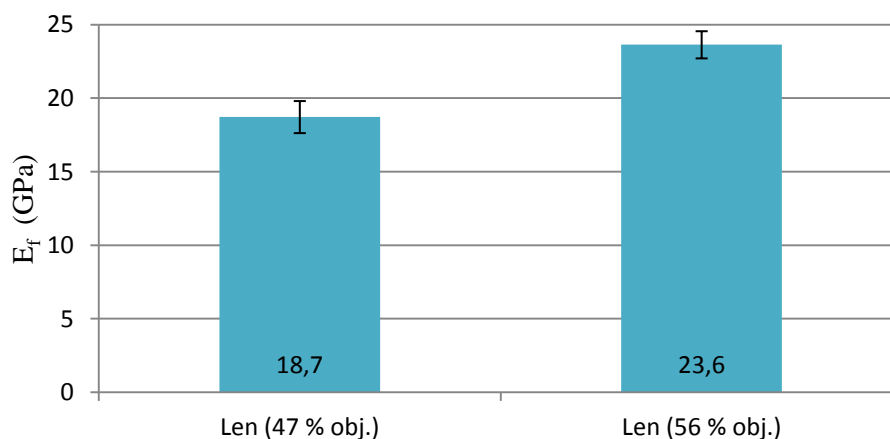
Dle podmínek a rozměru testovaných těles uvedených v kapitole 8.5.1 byla provedena zkouška pevnosti v ohybu zhotovených kompozitů.

Výsledky a diskuze

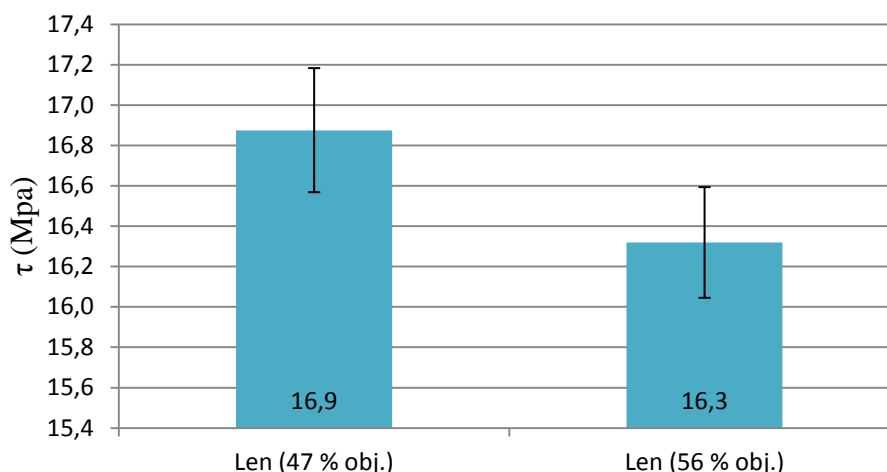
Na obr. 33 a 34 je zobrazeno grafické srovnání pevností v ohybu respektive modulů pružnosti v ohybu pro jednotlivé materiály. Kompozity s 56% obj. obsahem vláken dosahovaly vyšších hodnot než kompozity s 47 % obj. vláken, tudíž se zvyšujícím se obsahem vláken získával materiál lepší mechanické vlastnosti. Bohužel pokračující trend nebo jeho hranici nebylo možno určit, neboť použití více vláknových svazků nebylo možno jak z důvodu nedostatku další cívky, tak z důvodu dosažení limitu odtahové síly. Její zvýšení by mohlo způsobit problémy při odtahu, které by mohly vyústit v přetržení pultrudovaného kompozitu nebo přetížení pohonu odtahové zařízení. I přesto však zjištěná skutečnost koresponduje s fakty uvedenými v teoretické části (viz kapitola 3.4.9). Opačný trend lze pozorovat ve výsledcích měření zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti (obr. 35), kde však stejně jako u kompozitů se sisalovými vlákny nedošlo k porušení vzorku vlivem mezilaminárního smyku. Charakter požadovaného porušení a vyvolaného porušení je zobrazen na obr. 36.



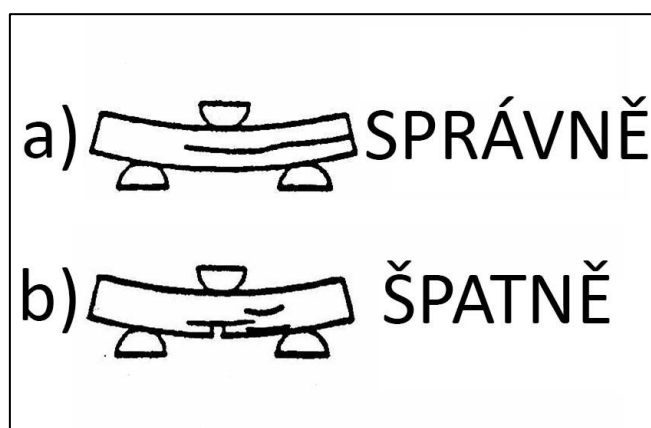
Obrázek 33 Srovnání pevnosti v ohybu testovaných materiálů



Obrázek 34 Srovnání modulů pružnosti v ohybu testovaných materiálů



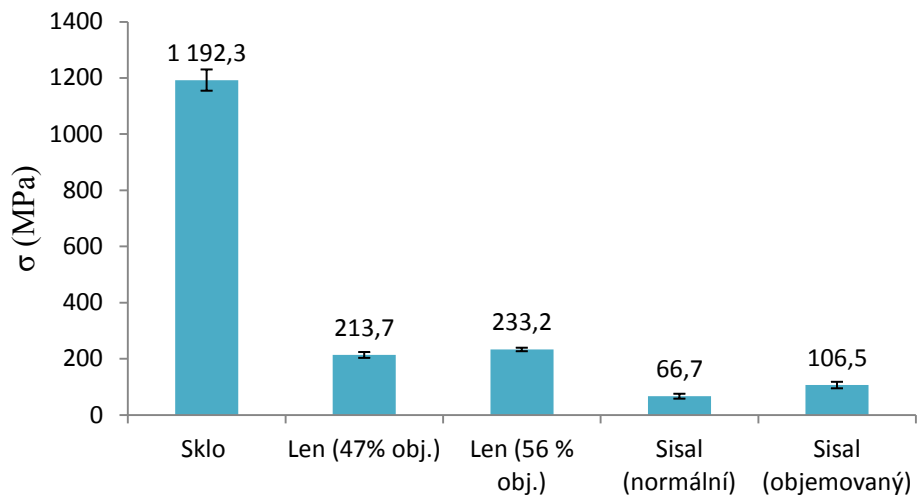
Obrázek 35 Srovnání zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti testovaných materiálů



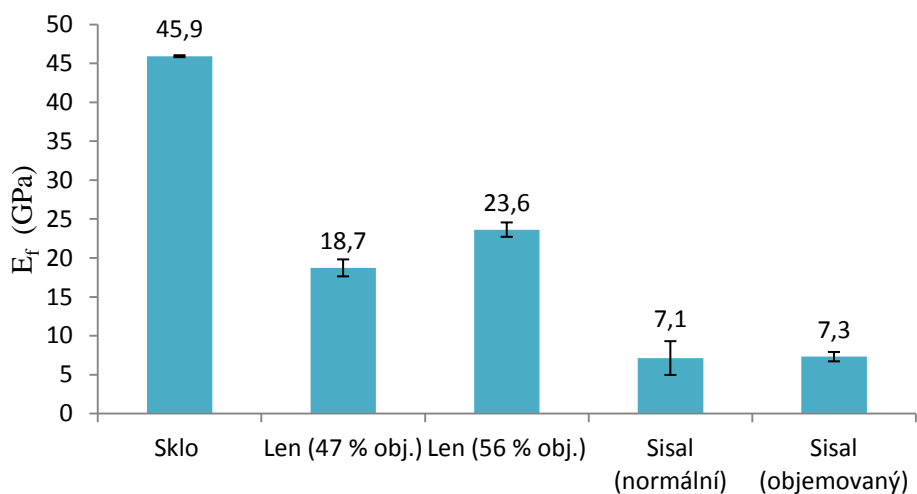
Obrázek 36 Charakter porušení a) mezilaminárním smykem b) tahem (ohybem)

8.7 Celkové srovnání pultrudovaných kompozitních materiálů

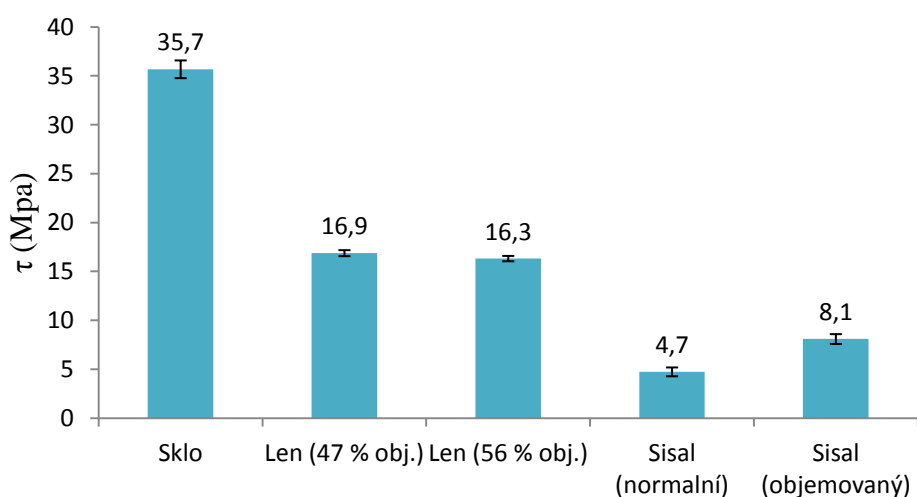
Tato kapitola je věnována celkovému srovnání všech materiálů zhotovených metodou pultruze. Jak lze vidět na obr. 37, 38 a 39 a jak lze předpokládat, materiály využívající jako výztuž skleněná vlákna převyšují svými vlastnostmi ty s přírodními vlákny. Pevnost v ohybu sklovláknových kompozitů byla dokonce až šestkrát vyšší. Mírnější skok lze pozorovat u modulů pružnosti v tahu, kde tyto kompozity dosahují hodnot pouze dvakrát vyšších, pokud bereme jako srovnávací bod kompozity s lněnými vlákny (56 % obj.). Srovnání zdánlivých mezilaminárních pevností jednotlivých materiálů nelze přikládat příliš váhu, neboť jak již bylo řečeno v předchozích kapitolách, u kompozitů s přírodními vlákny nedošlo při jejich testování k porušení vlivem mezilaminárního smyku. Tento jev si lze vysvětlit tak, že zdánlivá mezilaminární smyková pevnost testovaných materiálů byla větší než pevnost samotných přírodních vláken. Další skutečnost, kterou je nutno vzít v potaz je ta, že použitá skleněná vlákna jsou upravená tak, aby měla dobrou adhezi s nenasycenými polyesterovými pryskyřicemi. V případě sisalových vláken, nejen že nebyla žádným způsobem upravována pro zlepšení adheze s matricí, ale navíc nebyla svým účelem určena pro proces pultruze. Tato skutečnost se samozřejmě odrazila ve špatných mechanických vlastnostech materiálu a na místě je také myšlenka, zdali vůbec došlo mezi vlastnostmi matrice a výztuže k synergii jejich vlastností, což je v podstatě hlavní klíč k dobrým vlastnostem kompozitních materiálů.



Obrázek 37 Srovnání pevností v ohybu všech pultrudovaných materiálů



Obrázek 38 Srovnání modulů pružnosti v ohybu všech pultrudovaných materiálů

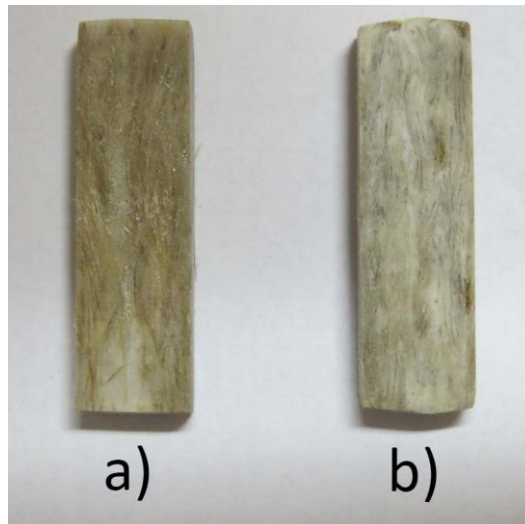


Obrázek 39 Srovnání zdánlivých mezilaminárních smykových pevností všech pultrudovaných materiálů

8.8 Ručně kladené kompozitní materiály

Závěr část experimentální části byl věnován zhotovení kompozitů metodou ručního kladení pro zhodnocení vlivu alkalické úpravy lněných vláken na mechanické vlastnosti polymerního kompozitu z těchto vláken (viz kapitola 8.4.1). Cílem bylo vytvoření materiálu s 50 % obj. lněných vláken, která byla kladena do formy z Lukoprenu. Jako matrice byla použita stejná nenasyčená polyesterová pryskyřice jako pultrudovaných materiálů. Zhotovené trámečky jsou vyfoceny na obr. 40.

Jednotlivá vlákna byla nastříhána na požadovanou délku a za pomoci pinzety byla ponořena do PP kelímku s připravenou pryskyřicí. Po dostatečné impregnaci byla druhou pinzetou z vlákna vymačkána přebytečná pryskyřice. Následně bylo vlákno položeno do formy, tak aby byl zachován úhel vláken 0° . Pomocí špachtle s rovnou hranou bylo vlákno co nejvíce rozprostřeno po šířce a formy a rovněž byly vymačkány další zbytky přebytečné pryskyřice. Tento postup se neměnil až do naplnění formy požadovaným obsahem vláken. Naplněná forma byla následně umístěna do programově řízené sušárny, kde podle teplotního režimu zhruba odpovídajícímu režimu použitého během pultruze došlo k vytvrzení materiálu.



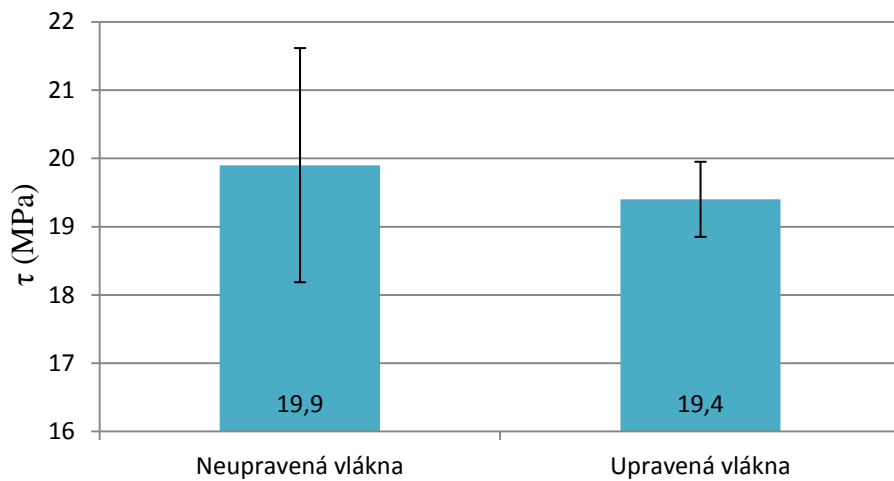
Obrázek 40 Trámeček s vlákny a) neupravenými b) upravenými

Test mezilaminární smykové pevnosti

Připravená zkušební tělesa byla podrobena testu zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti na zařízení *Zwick Z010* podle normy ASTM International D 2344/D 2344M - 00. Zkušební tělesa byla obroušena pomocí brusného papíru na požadované rozměry, čili délku 35 mm, šířku 10 mm a tloušťku 5 mm. Zkouška byla prováděna v tříbodovém systému s podpěrami o průměru 3 mm a zatěžovacím trnu o průměru 6 mm při rychlosti při rychlosti zatěžování 1 mm/s. Vzdálenost podpěr byla nastavena na vzdálenost 20 mm a pro každou sérii bylo změřeno pět zkušebních těles.

Výsledky a diskuze

Na obr. 41 je zobrazeno grafické srovnání zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti jednotlivých vzorků. Cílem testu bylo ověřit vliv úpravy vláken na mechanické vlastnosti kompozitu. Materiál s neupravenými vlákny dosáhl vyšších pevnostních hodnot, které jsou však zatíženy vyšší chybou. Zkouška však opět není příliš průkazná, neboť opět během ní nedošlo k požadovanému porušení vlivem mezilaminárního smyku (viz obr. 36).



Obrázek 41 Srovnání zdánlivých mezilaminárních smykových pevností testovaných materiálů

9 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámení se s problematikou využití přírodních vláken jako výztuže do polymerních kompozitů a jejich aplikací. Teoretická část se věnovala získání co nejaktuálnějších poznatků z odborné literatury a v navazující praktické části byla následně uplatněna snaha aplikovat získané poznatky v praxi. Cílem praktické části práce bylo otestovat možnosti nové laboratorní pultruzní linky při výrobě kompozitů na bázi přírodních vláken.

Na základě získaných informací bylo zjištěno, že atributem, který všechna přírodní vlákna spojuje, je v podstatě stejná struktura, která se liší jenom ve smyslu zastoupení základních stavebních složek. Tato odlišnost je však nesmírně důležitá, neboť všechna tato vlákna na druhou stranu rozděluje. Zastoupení jednotlivých stavebních složek je totiž ovlivněno velkým počtem faktorů, počínaje klimatem, ve kterém rostliny vyrůstají a konče nesčetnými možnostmi chemických či fyzikálních úprav samotných vláken. Bylo zjištěno, že hlavní podstatou těchto úprav je zbavení vláken jejich největší slabiny, a to jejich schopnosti sorbce molekul vody v jakékoliv formě do své struktury, což je způsobeno velkým počtem hydroxylových skupin především v molekule celulózy. Ne vždy je však cílem těchto úprav hydroxylové skupiny odstranit. Vzhledem k jejich reaktivitě se totiž nabízí možnost tyto skupiny využít k naroubování některých polymerů na molekuly celulózy, které potom v polymerním kompozitu vystupují jako matrice, čímž je dosaženo velice silné adheze. Častým cílem vědeckých prací je také zhodnocení vlivu délky a obsahu výztuže v polymerní matici, přičemž z výrobních procesů zatím převládají ty, které využívají vlákna o malých délkách.

Pro aplikaci v některých různých průmyslových odvětvích, výše zmíněné úpravy vláken nemusí být nezbytné nebo přinejmenším tak intenzivní. Jedná se například o využití materiálů na bázi přírodních vláken pro interiérové aplikace, kde je kontakt s vodným prostředím omezen. V poslední době je nejčastěji skloňovanou možností využít tyto materiály v automobilovém průmyslu, neboť čím dál přísnější pravidla týkající se emisí nutí výrobce aut snižovat hmotnost dílů, čímž zároveň snižují množství produkovaných spalin. Cílem praktické části práce bylo otestovat možnosti nové laboratorní pultruzní linky při výrobě kompozitů na bázi přírodních vláken. Přírodní vlákna jsou v tomto ohledu vhodnou volbou z důvodu jejich nízké hustoty a u některých vláken také relativně dobrých mechanických vlastností. Další možnosti aplikace se nabízejí v oblasti výroby sportovního náčiní, jako jsou například rámy jízdních kol nebo helmy. V neposlední řadě se nabízí také využití v oblasti dekorativních předmětů nebo konstrukčních dílů, kde se však zatím jedná pouze o oblast nízkého namáhání, například střešních krytin.

Experimentální část práce byla věnována výrobě kompozitu na bázi přírodních vláken metodou pultruze za použití nenasyčené polyesterové pryskyřice jako matrice. Z přírodních vláken byla vybrána vlákna sisalová a lněná především s ohledem na jejich dostupnost a také reálnou možnost je pro proces pultruze použít.

V první řadě byly ověřeny mechanické vlastnosti použitých vláken, které korespondovaly s informacemi získanými z odborné literatury. Provedena byla také alkalická úprava vláken 5% roztokem hydroxidu sodného, která s očekáváním vyústila v horší mechanické vlastnosti jednotlivých vláken. Pro zhodnocení vlivu úpravy vláken na vlastnosti kompozitních materiálů, byly následně zhotoveny ručně kladené trámečky z neupravených a laboratorně upravených vláken. Test zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti však mezi jednotlivými materiály neodhalil signifikantní rozdíl, nejspíš díky malé pevnosti samotných vláken, která způsobila absenci porušení mezilaminárním smykem.

Úspěšně byl metodou pultruze zhotoven materiál s výztuží ze sisalových vláken, avšak s velmi slabými mechanickými vlastnostmi. Pro zlepšení impregnace sisalových vláken pryskyřicí byly

jednotlivé svazky částečně zbaveny krutu, čímž bylo dosaženo materiálu s vyššími mechanickými vlastnostmi, avšak stále velmi nízkými. Získaný materiál by s ohledem na jeho vlastnosti s největší pravděpodobností nenašel žádné specifické využití.

Z lněných vláken přímo určených k procesu pultruze byl úspěšně zhotoven pultrudovaný kompozit s 47% a 56% obj. obsahem vláken. Oproti kompozitům na bázi sisalových vláken bylo dosaženo znatelně lepších mechanických vlastností, přičemž lze říci, že zvyšující se obsah vláken této skutečnosti napomáhal. S ohledem na dobré pohledové a poměrně slušné mechanické vlastnosti by mohl tento materiál nalézt své uplatnění při výrobě nekonstrukčních materiálů.

Kompozitní materiály na bázi přírodních vláken vyrobené metodou pultruze se svými mechanickými vlastnostmi nepřiblížily na dosah těm na bázi skleněných vláken, nicméně do úvahy je potřeba vzít několik skutečností. Použitá vlákna nebyla v případě těch sisalových primárně určena k procesu pultruze a v případě lněných vláken není zcela jisté, zdali jsou tato vlákna zcela kompatibilní s nenasyčenými polyesterovými pryskyřicemi. V tomto ohledu se otvírá nový prostor pro výzkum, který by se o materiály na bázi přírodních vláken nezajímal pouze z pohledu výztuže, ale také ze strany druhé, z pohledu polymerní matrice. V úvahu přichází použití jak jiných typů nenasyčených polyesterových pryskyřic, tak zcela odlišných matric, jako například polyuretanů nebo epoxidů. Z pohledu přírodních vláken je možné provést testy úprav, kde se s ohledem na možnosti a zařízení Fakulty chemické VUT v Brně nabízí například úprava vláken studeným plazmatem.

10 LITERATURA

- [1] 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>
- [2] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.
- [3] CAMPBELL, F. *Structural composite materials*. 1. vyd. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010, xiii, 612 p. ISBN 16-150-3037-9.
- [4] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. Brno: VUT, 2003, 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
- [5] HULL, D. *An introduction to composite materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, 326 s. ISBN 05-213-8855-4.
- [6] KALIA, S., B. S. KAITH a I. KAUR. *Cellulose fibers: bio- and nano-polymer composites*. New York: Springer, 2011, p. cm. ISBN 978-3-642-17369-1.
- [7] REYNE, Maurice a Préface Frédérique MUTEL. *Flax and Hemp fibres: a natural solution for the composite industry*. 1st ed. Paris: JEC, 2012. ISBN 978-2-9526276-1-0.
- [8] 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* [online]. 2012, vol. 43, issue 7, s. 2883-2892 [cit. 2013-05-03]. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.053. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812002922>
- [9] MÜSSIG, Jörg. *Industrial application of natural fibres: structure, properties, and technical applications*. Wiley, 2010, xxi, 538 p. ISBN 978-047-0695-081.
- [10] BOZACI, Ebru, Kutlay SEVER, Mehmet SARIKANAT, Yoldas SEKI, Asli DEMIR, Esen OZDOGAN a Ismail TAVMAN. Effects of the atmospheric plasma treatments on surface and mechanical properties of flax fiber and adhesion between fiber–matrix for composite materials. *Composites Part B: Engineering*. 2013, vol. 45, issue 1, s. 565-572. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.09.042. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812005926>
- [11] PAYNEL, Florence, Claudine MORVAN, Stéphane MARAIS a Laurent LEBRUN. Improvement of the hydrolytic stability of new flax-based biocomposite materials. *Polymer Degradation and Stability*. 2013, vol. 98, issue 1, s. 190-197. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.10.010. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S014139101200393X>
- [12] LE DUIGOU, Antoine, Alain BOURMAUD, Eric BALNOIS, Peter DAVIES a Christophe BAILEY. Improving the interfacial properties between flax fibres and PLLA by a water fibre treatment and drying cycle. *Industrial Crops and Products*. 2012, vol. 39, issue 1, s. 31-39. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.02.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926669012000623>

- [13] SREEKUMAR, P.A., Jean Marc SAITER, Kuruvilla JOSEPH, G. UNNIKRIISHNAN a Sabu THOMAS. Electrical properties of short sisal fiber reinforced polyester composites fabricated by resin transfer molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012, vol. 43, issue 3, s. 507-511. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.11.018. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X11003897>
- [14] RAHMAN, Md. Rezaur, Md. Monimul HUQUE, Md. Nazrul ISLAM, Mahbub HASAN a Sabu THOMAS. Improvement of physico-mechanical properties of jute fiber reinforced polypropylene composites by post-treatment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012, vol. 39, issue 11, s. 1739-1747. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.08.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X08002121>
- [15] GORIPARTHI, Bhanu K., K.N.S. SUMAN, Mohan Rao NALLURI, Mahbub HASAN a Sabu THOMAS. Processing and characterization of jute fiber reinforced hybrid biocomposites based on polylactide/polycaprolactone blends. *Polymer Composites*. 2012, vol. 33, issue 2, s. 237-244. DOI: 10.1002/pc.22145. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.22145>
- [16] AYRILMIS, Nadir, Songklod JARUSOMBUTI, Vallayuth FUEANGVIVAT, Piyawade BAUCHONGKOL a Robert H. WHITE. Coir fiber reinforced polypropylene composite panel for automotive interior applications. *Fibers and Polymers*. 2011, vol. 12, issue 7, s. 919-926. DOI: 10.1007/s12221-011-0919-1. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12221-011-0919-1>
- [17] JAYABAL, S., S. SATHIYAMURTHY, K. T. LOGANATHAN a S. KALYANASUNDARAM. Effect of soaking time and concentration of NaOH solution on mechanical properties of coir-polyester composites. *Bull. Mater. Sci.* 2012, vol. 35, issue 4, s. 567-574.
- [18] SAW, Sudhir Kumar, Gautam SARKHEL, Arup CHOUDHURY a S. KALYANASUNDARAM. Preparation and characterization of chemically modified Jute-Coir hybrid fiber reinforced epoxy novolac composites. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012-08-15, vol. 125, issue 4, s. 3038-3049. DOI: 10.1002/app.36610. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/app.36610>
- [19] GIRONÈS, J., J.P. LOPEZ, F. VILASECA, J. BAYER R., P.J. HERRERA-FRANCO a P. MUTJÉ. Biocomposites from *Musa textilis* and polypropylene: Evaluation of flexural properties and impact strength. *Composites Science and Technology*. 2011, vol. 71, issue 2, s. 122-128. DOI: 10.1016/j.compscitech.2010.10.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353810004148>
- [20] SAWPAN, Moyeenuddin A., Kim L. PICKERING, Alan FERNYHOUGH, J. BAYER R., P.J. HERRERA-FRANCO a P. MUTJÉ. Effect of various chemical treatments on the fibre structure and tensile properties of industrial hemp fibres: Evaluation of flexural properties and impact strength. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2011, vol. 42, issue 8, s. 888-895. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.03.008. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X11000789>

- [21] RACHINI, A., G. MOUGIN, S. DELALANDE, J.-Y. CHARMEAU, C. BARRÈS a E. FLEURY. Hemp fibers/polypropylene composites by reactive compounding: Improvement of physical properties promoted by selective coupling chemistry. *Polymer Degradation and Stability*. 2012, vol. 97, issue 10, s. 1988-1995. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.03.034. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141391012001231>
- [22] SATYANARAYANA, K.G., J.L. GUIMARÃES, F. WYPYCH, J.-Y. CHARMEAU, C. BARRÈS a E. FLEURY. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007, vol. 38, issue 7, s. 1694-1709. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.02.006. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X07000279>
- [23] HASSAN, Azman, Arshad Adam SALEMA, Farid Nasir ANI, Aznizam Abu BAKAR, C. BARRÈS a E. FLEURY. A review on oil palm empty fruit bunch fiber-reinforced polymer composite materials: Source, production, morphology, properties and applications. *Polymer Composites*. 2010, vol. 31, issue 12, s. 2079-2101. DOI: 10.1002/pc.21006. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.21006>
- [24] JAWAID, M., H.P.S. ABDUL KHALIL, Farid Nasir HASSAN, Rudi DUNGANI, A. BARRÈS a E. FLEURY. Effect of jute fibre loading on tensile and dynamic mechanical properties of oil palm epoxy composites: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part B: Engineering*. 2013, vol. 45, issue 1, s. 619-624. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.04.068. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359836812003071>
- [25] SUMMERSCALES, John, Nilmini P.J. DISSANAYAKE, Amandeep S. VIRK, Wayne HALL, A. HADIYANE a E. FLEURY. A review of bast fibres and their composites. Part 1 – Fibres as reinforcements: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2010, vol. 41, issue 10, s. 1329-1335. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.06.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X10001685>
- [26] EL-SHEKEIL, Y.A., Nilmini P.J. SAPUAN, K. ABDAN, E.S. HALL, A. HADIYANE a E. FLEURY. Influence of fiber content on the mechanical and thermal properties of Kenaf fiber reinforced thermoplastic polyurethane composites: Source, production, morphology, properties and applications. *Materials*. 2012, vol. 40, issue 10, s. 299-303. DOI: /10.1016/j.matdes.2012.04.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306912002373>
- [27] YOUSIF, B.F., A. SHALWAN, C.W. CHIN, K.C. MING, A. HADIYANE a E. FLEURY. Flexural properties of treated and untreated kenaf/epoxy composites: Source, production, morphology, properties and applications. *Materials*. 2012, vol. 40, issue 10, s. 378-385. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.04.017. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306912002518>

- [28] CHEN, Hongyan, Menghe SHALWAN, Xin DING, K.C. MING, A. HADIYANE a E. FLEURY. Influence of moisture absorption on the interfacial strength of bamboo/vinyl ester composites: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2009, vol. 40, issue 12, s. 2013-2019. DOI: 10.1016/j.compositesa.2009.09.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X09002693>
- [29] SPINACÉ, Márcia A.S., Carlos S. LAMBERT, Karen K.G. FERMOSELLI, Marco-A. DE PAOLI, A. HADIYANE a E. FLEURY. Characterization of lignocellulosic curaua fibres: Source, production, morphology, properties and applications. *Carbohydrate Polymers*. 2009, vol. 77, issue 1, s. 47-53. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.12.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0144861708005493>
- [30] ZAH, R., R. HISCHIER, A.L. LEÃO, I. BRAUN, A. HADIYANE a E. FLEURY. Curauá fibers in the automobile industry – a sustainability assessment: Source, production, morphology, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*. 2007, vol. 15, 11-12, s. 1032-1040. DOI: 10.1016/j.jclepro.2006.05.036. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652606003507>
- [31] ALEXANDRE, Gomes, Koichi GODA a Junji OHGI. Effect of alkali treatment to reinforcement to tensile properties of Curaua fiber green composites. *JSME International journal*. 2004, vol. 47, issue 4.
- [32] ASHOK KUMAR, M., K. HEMACHANDRA REDDY, G. RAMACHANDRA REDDY a K. R. VISHNU MAHESH. Characterization of light weight epoxy composites from short Sansevieria Cylindrica fibers. *Fibers and Polymers*. 2012, vol. 13, issue 6, s. 769-774. DOI: 10.1007/s12221-012-0769-5. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12221-012-0769-5>
- [33] SREENIVASAN, V.S., D. RAVINDRAN, V. MANIKANDAN a R. NARAYANASAMY. Influence of fibre treatments on mechanical properties of short Sansevieria cylindrica/polyester composites. *Materials*. 2012, vol. 37, issue 6, s. 111-121. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.01.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306912000131>
- [34] SREENIVASAN, V.S., D. RAVINDRAN, V. MANIKANDAN a R. NARAYANASAMY. Mechanical properties of randomly oriented short Sansevieria cylindrica fibre/polyester composites. *Materials*. 2011, vol. 32, issue 4, s. 2444-2455. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.11.042. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0261306910006680>
- [35] FIORE, V., A. VALENZA, G. DI BELLA a R. NARAYANASAMY. Artichoke (*Cynara cardunculus* L.) fibres as potential reinforcement of composite structures. *Composites Science and Technology*. 2011, vol. 71, issue 8, s. 1138-1144. DOI: 10.1016/j.compscitech.2011.04.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353811001357>
- [36] SINGHA, A. S. a V. K. THAKUR. Mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Bull. Matter. Sci.* 2008, vol. 31, issue 5, s. 791-799. Dostupné z: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12034-008-0126-x>
- [37] DE ROSA, I.M., A. IANNONI, J.M. KENNY, D. PUGLIA, C. SANTULLI, F. SARASINI a A. TERENCE. Poly(lactic acid)/Phormium tenax composites: Morphology and thermo-mechanical behavior. *Polymer Composites*. 2011, vol. 32, issue 9, s. 1362-1368. DOI: 10.1002/pc.21159. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.21159>

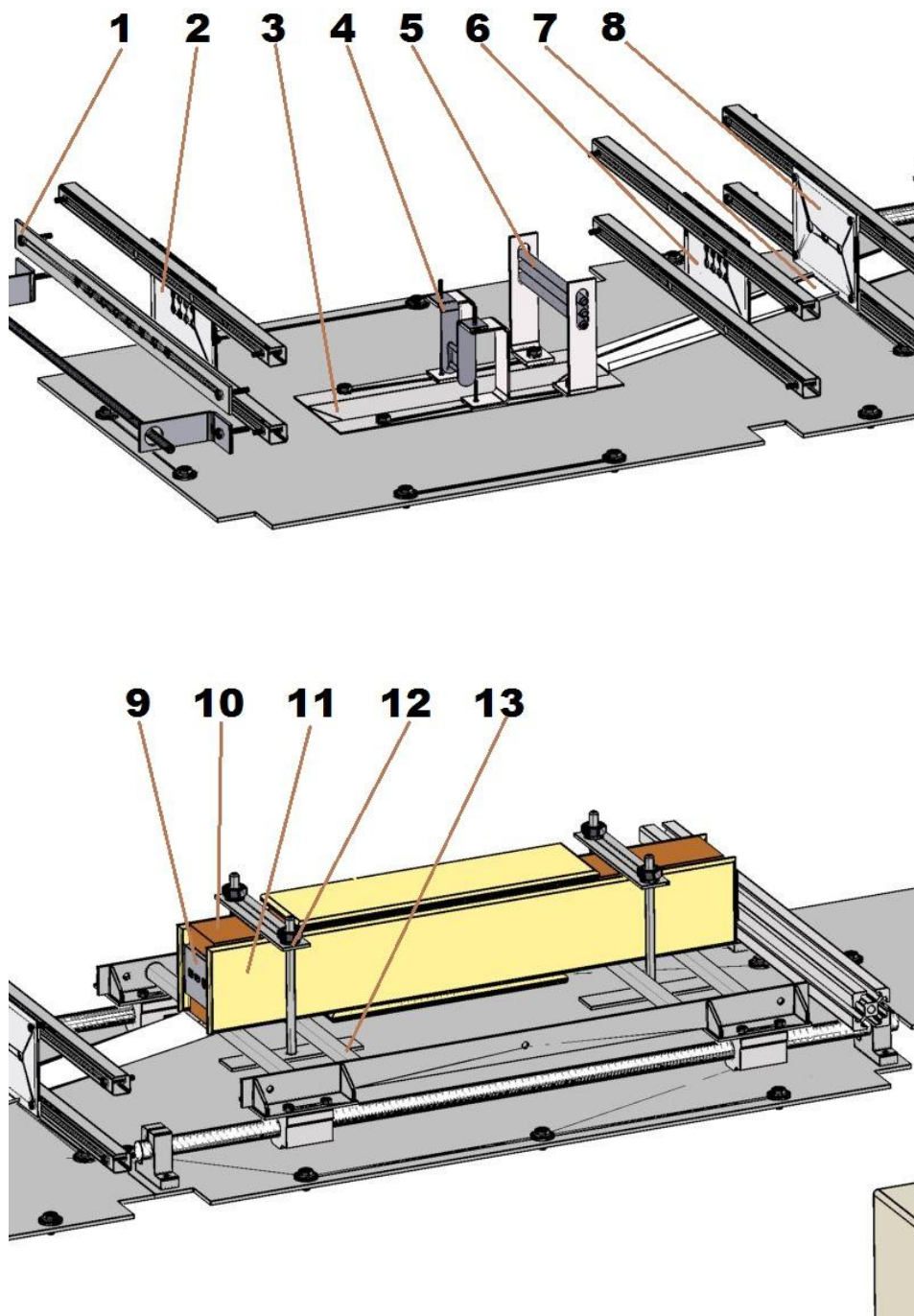
- [38] NASCIMENTO, Denise Cristina O., Ailton S. FERREIRA, Sergio N. MONTEIRO, Regina Coeli M.P. AQUINO, Satyanarayana G. KESTUR, F. SARASINI a A. TERENCEI. Studies on the characterization of piassava fibers and their epoxy composites: Morphology and thermo-mechanical behavior. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2012, vol. 43, issue 3, s. 353-362. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.12.004. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359835X11004088>
- [39] CHAUHAN, Monika, M. GUPTA, B. SINGH, A.K. SINGH, V.K. GUPTA, F. SARASINI a A. TERENCEI. Pine needle/isocyanate composites: Dimensional stability, biological resistance, flammability, and thermoacoustic characteristics. *Polymer Composites*. 2012, vol. 33, issue 3, s. 324-335. DOI: 10.1002/pc.22151. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.22151>
- [40] SINGHA, A.S., Ashvinder K. RANA, B. SINGH, A.K. SINGH, V.K. GUPTA, F. SARASINI a A. TERENCEI. Effect of graft copolymerization on mechanical, thermal, and chemical properties of grewia optiva/unsaturated polyester biocomposites: Dimensional stability, biological resistance, flammability, and thermoacoustic characteristics. *Polymer Composites*. 2012, vol. 33, issue 8, s. 1403-1414. DOI: 10.1002/pc.22267. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/pc.22267>
- [41] BLEDZKI, A. K. a J. GASSAN. Composites reinforced with cellulose based fibres. *Prog. Polym. Sci.* 1999, vol. 24, s. 221-274.
- [42] CAMPBELL, F. *Manufacturing processes for advanced composites*. Oxford: Elsevier, 2004, 517 s. ISBN 18-561-7415-8.
- [43] RATNA, Debdatta. *Handbook of thermoset resins*. Shawbury: Smithers Rapra, 2009, 517 s. ISBN 978-184-7354-105.
- [44] MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2002, 392 s. ISBN 08-493-0585-3.
- [45] ČSN EN ISO 14125. *Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení ohybových vlastností*. Praha : Český normalizační institut, 1999.
- [46] ČSN EN 13706-2. *Vyztužené plasty (kompozity) - Specifikace pro tažené profily - Část 2: Metody zkoušení a obecné požadavky*. Praha : Český normalizační institut, 2007.
- [47] ČSN ISO 527-4. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 4: Zkušební podmínky pro izotropní a orthotropní plastové kompozity vyztužené vlány*. Praha : Český normalizační institut, 1998.
- [48] ČSN EN ISO 14130. *Vlákný vyztužené plastové kompozity - Stanovení zdánlivé mezilaminární smykové pevnosti metodou krátkého nosníku*. Praha : Český normalizační institut, 1999.
- [49] DIN EN ISO 62. *Plastics - Determination of water absorption*. Berlin : Deutsches Institut für Normung, 2008.
- [50] ČSN EN ISO 1172. *Textilní sklo - Vyztužené prepregy (předimpregnovaný laminát) lisovací směsi a lamináty - Stanovení obsahu textilního skla a minerálního plniva - Kalcinační metoda*. Praha : Český normalizační institut, 1999.
- [51] ČSN EN ISO 11357-1. *Plasty - Diferenční snímací kalorimetrie (DSC) - Část 1: Základní principy*. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [52] D648 - 07. *Standard test method for deflection temperature of plastics under flexural load in the edgewise position*. West Conshohocken : ASTM International, 2012.

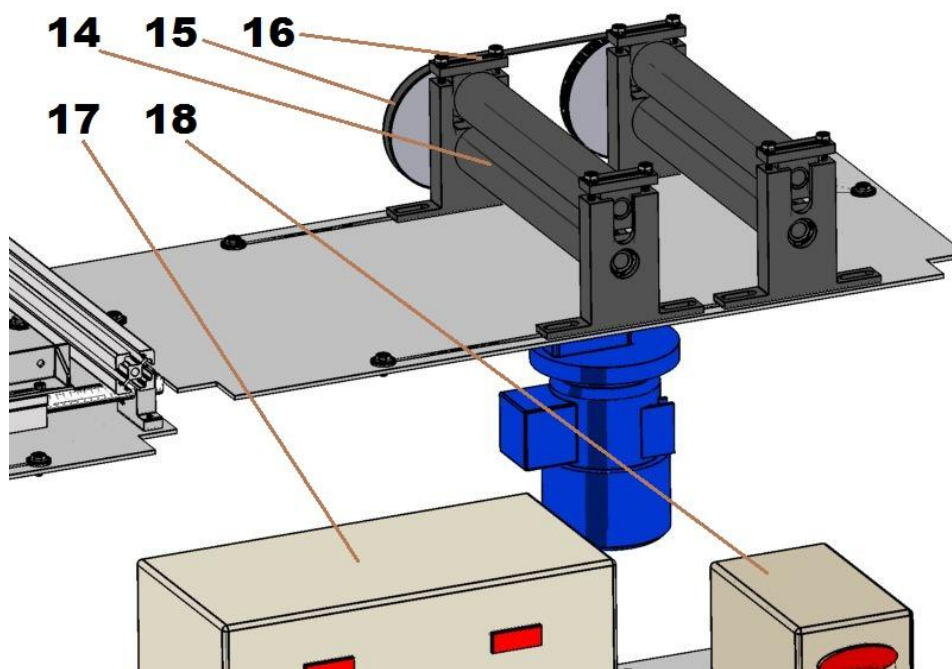
11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BMC	Prepreg ve formě těsta
EP	Epoxid
HDPE	Vysokohustotní polyetylen
PCL	Polykaprolakton
PE	Polyetylen
PEEK	Polyether ether keton
PLA	Kyselina polymléčná
PP	Polypropylen
PR	Fenol-formaldehydová pryskyřice
PS	Polystyren
PVC	Polyvinylchlorid
RTM	Formování s přenosem pryskyřice
SMC	Prepreg ve formě desky
SRIM	Formování se vstřikováním za proběhnutí reakce
UHMWPE	Polyetylen o vysoké molekulové hmotnosti
UP	Nenasycený polyester
VARI	Vstřikování pryskyřice za asistence vakua
VE	Vinylester
VOP	Vlákna z olejové palmy

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Schéma pultruzní linky





Pozice	Komponenta
1	Rozdělování vláken
2	1. naváděcí deska
3	Impregnační vana
4	Česlo
5	Vymáčkávací kladky
6	2. naváděcí deska
7	Odkapávací žlab
8	3. naváděcí deska
9	Forma
10	Vytápěcí tělesa
11	Tepelná izolace
12	Uchycení formy
13	Rošt formy
14	Odtahové válce
15	Řemenový převod
16	Přítlak válců
17	Ovládání vyhřívání
18	Ovládání odtahu

Příloha 2: Uspořádání zařízení Zwick Z010 při ohybové zkoušce

