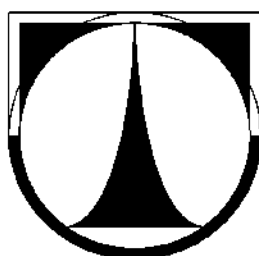


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Biodegradovatelné kompozitní systémy s vyztužujícími
přírodními vlákny – vliv typu vlákna a plnění na vybrané
mechanické parametry**

2007

Iveta Drahotová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2341 Strojírenství
Obor: 3911 R 018 Materiály a technologie
Zaměření: Materiálové inženýrství

Biodegradovatelné kompozitní systémy s vyztužujícími přírodními vlákny – vliv typu vlákna a plnění na vybrané mechanické parametry

Iveta Drahotová
KMT – B - 128

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
Konzultant bakalářské práce: Ing. Taťana Vacková

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 46
Počet tabulek: 2
Počet grafů: 25
Počet obrázků: 20
Počet příloh: 4

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra materiálů

Hálkova 6, 461 17 Liberec 1

Tel.: 48 535 3236, fax: 48 535 3535

ANOTACE

Jméno a příjmení:	Iveta Drahotová
Obor:	3911 R 018 Materiály a technologie
Zaměření:	Materiálové inženýrství
Téma práce:	Biodegradovatelné kompozitní systémy s vyztužujícími přírodními vlákny – vliv typu vlákna a plnění na vybrané mechanické parametry
Číslo bakalářské práce:	KMT – B - 128
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
Konzultant bakalářské práce:	Ing. Taťana Vacková

Anotace

Práce se zabývá studiem možností náhrady syntetických vláken v polymerních maticích vlákny přírodními. Cílem práce je posoudit vliv typu přírodního vlákna (len, konopí, bambus a celulózová vlákna z recyklovaného papíru) a velikost plnění (3 %, 6 %, 9 %, 30 %) na základní mechanické parametry (mez pevnosti, modul pružnosti, deformaci vzorků).

Klíčová slova: přírodní rostlinná vlákna, vlákna – lnu, konopí, bambusu, celulózy, polyvinylalkohol, mechanická zkouška tahem, elektronová mikroskopie.

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Department of material science

Hálkova 6, 461 17 Liberec 1
Tel.: 48 535 3236, fax: 48 535 3535

ANNOTATION

Name: Iveta Drahotová
Specialization: 3911 R 018 Materials and technologies
Focusing: Material engineering
Theme of BSC work: Biodegradable composite systems with reinforcing natural fibres – influence of type of fibre and fulfilment to selected mechanical parameters
Number of BSC work: KMT – B - 128
Supervisor of BSC work: Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
Consultant: Ing. Taťana Vacková

Annotation

The work deals with possibilities to replace synthetic fibres by natural fibres in polymer matrices. The goal of this work is to explore the influence of natural fibres type (flax, hemp, bamboo, cellulose fibres from recycled paper) and quantity of fulfilment (3 %, 6 %, 9 %, 30 %) to fundamental mechanical parameters (tensile strenght, Young's modulus, elongation to fracture).

Key words: natural plant fibres (flax, hemp, bamboo, cellulose fibres from recycled paper), polyvinylalcohol, tensile test, electron microscopy.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT LIBEREC

FAKULTÄT MASCHINENBAU

Werkstoffwissenschaften

Hálkova 6, 461 17 Liberec 1

Tel.: 48 535 3236, fax: 48 535 3535

ANNOTATION

Name: Iveta Drahotová
Fachbereich: 3911 R 018 Materiale und Technologie
Fachrichtung: Werkstoffwissenschaften
Bakalarthema: Bioalterliche Kompozitsysteme mit absteifenden Naturfasern
- Eindruck des Fasertyps und Füllung auf die ausgewählten
mechanischen Parametern
Arbeitsnummer: KMT – B - 128
Leiter: Ing. Dora Kroisová, Ph.D.
Mentor: Ing. Taťana Vacková

Annotation

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Ersatzmöglichkeiten synthetischen Fasern in der Polymermatrize durch Naturfasern. Ziel der Arbeit ist den Eindruck der Naturfaserntyps (Lein, Hanf, Bambus und Cellulosefasern aus dem Recyclingpapier) und die Füllungsgröße (3 %, 6 %, 9 %, 30 %) auf die grundlichen mechanischen Parametern (Festigkeitsgrenze, Elastizitätsmodul, Deformation der Proben) ermessen.

Schlagwörter: Naturfasern, Fasern – Lein, Hanf, Bambus und Cellulosefasern, Polyvinylalkohol, mechanische Zerreißprobe, Elektronenmikroskopie.

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Jsem si vědoma, že Technická univerzita v Liberci má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.)

Beru na vědomí, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Prohlašuji, že jsem na bakalářské práci pracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucí bakalářské práce paní Ing. Doře Kroisové, Ph.D., konzultantce paní Ing. Taťaně Vackové, za odbornou pomoc a vedení mé bakalářské práce.

Doc. RNDr. Františku Lednickému, CsC. za poskytnutí informací o rastrovací elektronové mikroskopii vzorků a odbornou pomoc.

Ing. Ladislavu Žabkovi za poskytnutí měřicích přístrojů pro zkoušku tahem ve firmě Cadence Innovation ks. v Liberci.

Ing. Soně Kaplanové za odbornou pomoc.

Obsah

1 Úvod	10
2 Teoretická část – současný stav problematiky	11
2.1 Vyztužující vlákna v polymerních matricích	11
2.2 Přírodní rostlinná vlákna	12
2.3 Nejpoužívanější typy přírodních vláken	13
2.3.1 Lněná vlákna	13
2.3.2 Konopná vlákna	15
2.3.3 Bambusová vlákna	16
2.3.4 Celulózová vlákna získaná při výrobě a recyklaci papíru	17
2.4 Volba polymerních matric	19
2.4.1 Polyvinylalkohol	19
2.5 Volba zpracovatelských procesů	21
2.6 Zkušební metody	21
2.6.1 Mechanická zkouška tahem	21
2.6.2 Elektronová mikroskopie	23
3 Experimentální část	25
3.1 Použité materiály	25
3.1.1 Vlákna	25
3.1.2 Matrice	26
3.2 Příprava vzorků	26
3.3 Experimentální metody	27
3.3.1 Zkouška tahem	27
3.3.2 Elektronová mikroskopie	28
4 Výsledky a diskuze	29
5 Závěr	45
6 Literatura	46
7 Přílohy	

1 Úvod

Tato práce se zabývá studiem možností náhrady syntetických vláken v polymerních matricích vlákny přírodními.

V současné době se jako vyztužujících prvků v polymerních matricích využívá především vláken syntetických, zejména skelných, která jsou výhodná především pro dobré mechanické vlastnosti, ale i pro svoji příznivou cenu. Nevýhodou těchto kompozitů je však jejich problematická recyklace zejména vzhledem ke značně rozdílnému chemickému složení matrice a vyztužujících vláken.

Pro studium dané problematiky bylo využito pět typů vláken na bázi celulózy s odstupňovaným plněním. Zvolená vlákna byla umístěna do polyvinylalkoholové matrice. Z těchto směsí byly odlity vzorky, které byly po vysušení podrobeny statické zkoušce tahem, lomové plochy vybraných vzorků byly mikroskopovány.

Důvodem zájmu o tuto problematiku je obnovitelnost přírodních zdrojů, specifické parametry přírodních rostlinných vláken, jejich biodegradovatelnost, ale také otázky ekologické, ekonomické a technologické.

2 Teoretická část – současný stav problematiky

2.1 Vyztužující vlákna v polymerních matricích [1, 2]

Využitím vyztužujících vláken v polymerních matricích se dosahuje vyšších hodnot nejen mechanických vlastností výsledného materiálu (Youngova modulu pružnosti, zvýšení pevnosti v tahu i tlaku), ale také ovlivnění některých fyzikálních vlastností, např. tepelné roztažnosti.

Mezi nejpoužívanější syntetická vlákna, která se používají jako vyztužující prvky v polymerních matricích, patří vlákna skelná a vlákna uhlíková.

Skelná vlákna se vyrábějí tavením tzv. sklářského kmene, což je směs křemenného písku (cca 70 %), vápence, potaše a collemanitu. Vlákna délky 2-6 mm se používají především pro výrobu premixů a vyztužování termoplastů, časté je i použití vláken kontinuálních nebo skelných.

Uhlíková vlákna se vyrábějí ze dvou výchozích surovin: polyakrylonitrilových (PAN) vláken a pyrolyzních olejů a smol vznikajících při destilaci ropy. V případě PAN vláken je již výchozí materiál ve formě vláken, která se v kontinuálním procesu oxidují a následně karbonizují při teplotách 1200 – 1400 °C v inertní atmosféře (vysokopevné typy). V případě smol jako výchozího materiálu je třeba surovinu nejprve zvláknit a poté dále upravovat. Uhlíková vlákna se používají ve formě pramenců o různé jemnosti, především jako vlákna kontinuální nebo opět jako tkaniny.

Tab. č. 1. Nejpoužívanější typy uhlíkových a skelných vláken se základními parametry [3].

Vlákno	Hustota ρ (g/cm ³)	Youngův modul pružnosti E (GPa)	Mez pevnosti v tahu σ (MPa)	Protažení při lomu ε (%)
HM ^a uhlík	1,95	axiální 380 radiální 12	2,4	1
HS ^b uhlík	1,75	axiální 230 radiální 20	3,4	1,1
E - sklo	2,56	76	2	2,6

V posledních deseti letech se řada pracovišť zabývá otázkou možnosti náhrady těchto vláken jinými materiály, například materiály přírodními – rostlinnými vlákny. V následující tabulce jsou uvedeny vybrané typy vláken a jejich základní fyzikální a mechanické parametry.

Tab. č. 2. Nejpoužívanější typy přírodních rostlinných vláken se základními parametry [1].

Typ vlákna	Hustota [g/cm ³]	Průměr vlákna [μm]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Youngův modul pružnosti [GPa]	Protažení při lomu [%]
bavlna	1,5 – 1,6	10 - 17	287 – 800	5,5 – 12,6	7,0 – 8,0
juta	1,3 – 1,45	25 – 200	393 – 773	13 – 26,5	1,2 – 1,5
len	1,5	15 - 18	345 – 1100	27,6	2,7 – 3,2
konopí	1,5	15 - 50	690	-	1,6
ramie	1,5	15 - 40	400 – 938	61,4 – 128,0	1,2 – 3,8
sisal	1,45	50 – 200	468 – 640	9,4 – 22,0	3,0 – 7,0
ananas	-	20 – 80	413 – 1627	34,5 – 82,5	1,6

2.2 Přírodní rostlinná vlákna [1]

Přírodní rostlinná vlákna se mohou dělit podle různé řady hledisek. Nejběžnějším rozdělením je dělení na vlákna lýková (lněná, konopná, jutová), listová (ananasová, sisalová) a vlákna z obalů plodů (bavlněná a kokosová).



Obř. 1. Rozdělení přírodních rostlinných vláken [1].

Rostlinná vlákna jsou obnovitelným surovinovým zdrojem. Díky chemickému složení a morfologii se vyznačují nízkou hustotou, hydrofilním charakterem a na konci svého životního cyklu snadnou biologickou odbouratelností. K dalším výhodám patří také jejich poměrně snadná zpracovatelnost a nízké abrazivní chování v porovnání s vlákny skelnými. Nevýhodou je jejich hydrofilní chování a vliv klimatických podmínek na kvalitu posuzovanou mechanickými parametry.

Vlákna, která se mohou použít jako vyztužující plnivo pro polymerní matrice jsou například: len, konopí, juta, sisal, kokosová vlákna, bambusová vlákna ale i vlákna

z recyklovaného papíru. Přírodní rostlinná vlákna se skládají z celulózy, hemicelulózy, ligninu, proteinů, pektinů, vosků, minerálních látek a vody.

Pro použití přírodních vláken jako vláken vyztužujících jsou důležité jejich mechanické parametry a kvalita vytvářeného mezifázového rozhraní, protože jsou spojovány většinou dva odlišné materiály, a to hydrofilní vlákno a hydrofobní matrice (polymer). Mezifázové rozhraní může být ovlivněno fyzikálními nebo chemickými metodami.

2.3 Nejpoužívanější typy přírodních vláken [4]

2.3.1 Lněná vlákna [4]

Len je jednoletá, jednodomá rostlina z čeledi lnovitých – Linaceae, která je považována za nejstarší pěstovanou vláknitou rostlinu. Její pěstování je doloženo archeologicky – byla využívána již v mladší době kamenné. Existuje několik druhů lnu: len prádný, len olejoprádný, len olejný. Nejvhodnější půda pro pěstování je písčito–hlinitá a hlinito-písčitá s dostatkem humusu. Len je odolný vůči mrazu, teploty -3,5 °C až -4 °C mu krátkodobě neškodí. Len je náročný na vláhu.

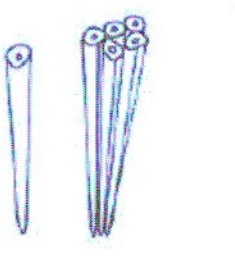
Lněné vlákno je složeno z: 74 % celulózy, 17 % hemicelulózy, 2 % ligninu, 1,7 % pektinů, 3,8 % látek nerozpustných ve vodě a 1,5 % tuků a vosků. Stonek je v průřezu kulatý, u děložních lístků čtyřhranný, u rozvětvení trojhranný. Délka stonku kolísá od 0,2 m do 1,4 m. Tloušťka stonku má vliv na rychlost rosení lnu a na výtěžnost vlákna. Průměrná tloušťka stonku je od 0,5 mm do 3 mm. Při průměru stonku do 1,5 mm se zvyšuje počet vláken, jsou jemná; nad 1,5 mm se počet vláken nezvyšuje, ale vlákna jsou hrubá. Stonek se skládá z pokožky, primární kůrového parenchymu, endodermu, síťkové rourky, kambia, dřevoviny a dřeně.

Lněné vlákno technické je tvořeno z vláken elementárních. Elementární vlákno lnu je sklerenchymatická buňka tvaru dlouhého trojbokého až šestibokého hranolku, jehož oba konce se pozvolna ztenčují a končí ostrými špičkami. Vlákno je tvořeno z několika vrstev. Střední lamela je nejstarší částí buněčné stěny a tvoří společnou stěnu s okolními buňkami. Primární lamela je velmi tenká a těsně spojená se střední lamelou. Mladší velmi silně vyvinutá je sekundární lamela, představuje téměř celou stěnu - obsahuje pektin, je tvořena z několika vrstev a ty se skládají z fibril. Terciální stěna vytváří rozhraní mezi sekundární

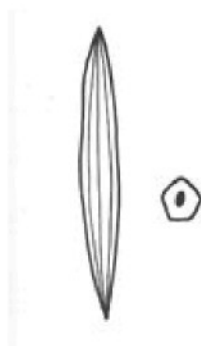
vrstvou a lumenem. Lumen je malý, rovnoměrně rozmístěný po celé délce elementárního vlákna.

Délka technického vlákna je 600 mm až 800 mm, elementárního bývá 25 mm až 30 mm. Tloušťka technického vlákna je 600 μm , elementárního 15 μm až 18 μm . Měrná pevnost za sucha je obvykle 440 mN.tex^{-1} až 530 mN.tex^{-1} . Pevnost za mokra se pohybuje v rozmezí 115 % až 120 %. Poměrné prodloužení za sucha je 0,6 % až 1,8 %, za mokra 0,7 % až 2,2 %. Měrná hmotnost bývá $1,44 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$ až $1,45 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. Hustota lněného vlákna je $1,5 \text{ g/cm}^3$. Mez pevnosti v tahu se pohybuje v rozmezí 345 MPa až 1100 MPa. Youngův modul pružnosti je 27,6 GPa. Protažení při lomu je 2,7 % až 3,2 %. Obsah vlhkosti za normálních klimatických podmínek je kolem 15 %.

Do teploty 120 °C je len odolný, při vyšších teplotách ztrácí barvu. Účinkem slunečního záření postupně ztrácí pevnost. Špatně izoluje elektřinu, dobře vede teplo. Len je odolný vůči alkáliím, kyseliny vlákno narušují. Len se používá na letní oděvní tkaniny s chladivým omakem, pracovní oděvy, ložní a stolní prádlo, oděvní přípravy, režná a technická plátna, stanoviny, plachtoviny, dopravní pásy, hnací řemeny, šicí a průmyslové nitě.



Obr. 2. Model svazku elementárních lněných vláken [4].



Obr. 3. Model elementárního lněného vlákna s průřezem [4].

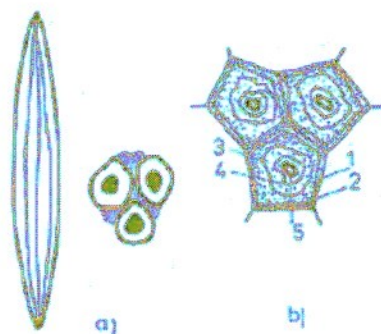
2.3.2 Konopná vlákna [4]

Jednoletá dvoudomá rostlina – *Canabis sativa* – kulturní konopí – vzniklo z konopí divokého. Je to rostlina s dlouhým rozvětveným stonkem. Známe různé druhy konopí, například konopí severské, středněruské, jižní a hašišné. Nejvhodnější půdy pro pěstování jsou bohaté živinami, nesmí být kyselé s mělkou orníci, kamenité či jílovité.

Surové konopné vlákno obsahuje 70 % až 75 % celulózy, 8 % až 15 % hemicelulózy, 8 % až 12 % ligninu, 0,5 % až 1 % popelovin, 2 % až 4 % tuků a vosků a 10 % až 12 % vlhkosti.

Konopný stonek je lodyha zpočátku více méně kulatá. Po čase začíná dřevnatět a mění původní tvar na čtyřhranný nebo šestihranný. Stonek se skládá z tenké kutikuly, epidermu, parenchymu, primární sklerenchymatické buňky – vlákna, sekundární sklerenchymatické buňky, kambia, dřevoviny, dřeně a dutiny stonku. Elementární vlákna jsou buňky vřetenovitého tvaru s tupými, případně rozvidlenými konci. Vlákno je tvořeno vnější spojovací blánou, tenkou primární stěnou, silnější sekundární stěnou a lumenem, ohraničeným terciární stěnou.

Délka technického vlákna je 1,0 m až 2,0 m, elementárních vláken 15 mm až 25 mm. Tloušťka elementárních vláken se pohybuje mezi 15 μm až 50 μm . Měrná pevnost za sucha se pohybuje v rozmezí 290 mN.tex^{-1} až 700 mN.tex^{-1} . Pevnost za mokra bývá o 15 % vyšší než za sucha. Poměrné prodloužení za sucha je 1,5 % až 3,0 %, za mokra až 4 %. Měrná hmotnost konopného vlákna je $1,48 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$. Hustota vlákna je 1,5 g/cm . Mez pevnosti v tahu je kolem 690 MPa. Protahání při lomu bývá 1,6 %. Obsah vlhkosti za normálních klimatických podmínek je 13 %. Odolnost vůči povětrnostním vlivům vykazuje konopí z přírodních vláken nejvyšší. Zpracovává se převážně jako technické vlákno do výrobků, u kterých je potřebná velká pevnost a odolnost proti vlhkosti a povětrnostním vlivům, například jako jsou technické tkaniny, obalové tkaniny, plachtoviny, dopravní pásy, lana a provazy.



Obr. 4. Model elementárního konopného vlákna:

a) elementární vlákno s průřezem,

b) s průřezem v detailu:

1- střední lamela, primární lamela, 3 – sekundární buněčná stěna, 4 – terciární lamela,
5 – lumen [4].

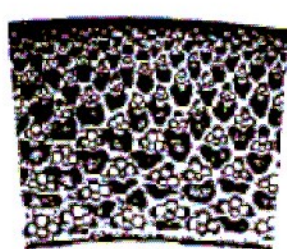
2.3.3 Bambusová vlákna [5, 6]

Bambus patří do čeledi lipnicovitých. Vyskytuje se v tropech, subtropích i mírném pásmu. V Evropě byly první rostliny vysazeny pravděpodobně roku 1827 v Portugalsku. Většina bambusů je teplomilných, najdou se však též mrazuvzdorné druhy rostoucí i v našich podmínkách celoročně venku. Jedná se o širokou skupinu rostlin zahrnující přes 600 druhů. Vyrůstají z pupenů v zemi. Mezi travami je to jediná skupina rostlin, která dřevnatí. Další odlišností je, že se větví. Největší druhy mají kmen až 30 cm v průměru a jsou až 40 m vysoké. Bambusy rostou soustavně po celých 24 hodin po dobu přibližně čtyřiceti dnů. Stéblo přirůstá asi 1 metr za den.

Stonek mají rozdělený jako ostatní trávy na jednotlivé duté články a plná kolénka. Z kolének vyrůstají listy a větvičky. Listy jsou podlouhlé a úzké. Články stonku bambusu mají nejčastěji tvar různě dlouhých válečků. Barva stonků může být zelená, hnědavá až dožluta nebo žíhaná v kombinaci těchto barev. Stonek je na povrchu lesklý, pokrytý tvrdou korovou vrstvou. Některé druhy bambusů mají na stonku tvrdé ostny. Stébla obsahují vysoký obsah kyseliny křemičité a právě díky ní jsou vykazují dlouhou životnost, tvrdost, pevnost ale i nízkou hustotu.

Pevnost v tahu je pro průměr stonku např. 80 mm pro celou tloušťku stonku 16,27 kN/cm² až 21,51 kN/cm².

Bambusy jsou jedny z nejužitečnějších rostlin světa. V zemích původu nacházejí uplatnění ve stavebnictví, ze stébel se vyrábí i nábytek, podlahy, nádoby, rybářské pruty, a díky jejich pevnosti třeba i nože. V neposlední řadě nacházejí mladé bambusové výhonky uplatnění i v kuchyni.

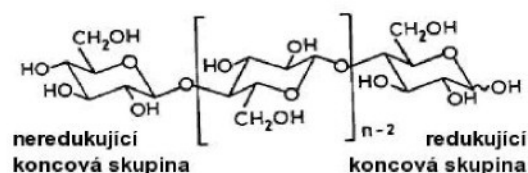


Obr. 5. Bambusové vlákno [6].

2.3.4 Celulózová vlákna získaná při výrobě a recyklaci papíru [7, 8, 9]

Papír je tenký, hladký materiál vyráběný zhotovením vláken. Použitá vlákna jsou obvykle přírodní celulózová. Papír má svou historii v různých geografických oblastech a kulturách. Patří mezi nejdůležitější vynálezy naší historie. Dnešní papír byl vynalezen v Číně přibližně roku 105 n. l. K nám se výroba papíru dostala až v 8. století. Používaly se suroviny např.: konopí, ramie, bambus, staré hadry. V roce 1769 bylo zaznamenáno první použití dřeva na výrobu papíru. Hlavní surovinou pro výrobu papíru se tedy stala celulóza získávaná ze dřeva. Dřívější výroba papíru probíhala ručním způsobem.

Dřevo se skládá z celulózy, hemicelulózy, ligninu a extrahovatelných látek. Celulóza $[C_6H_{12}O_6]_n$ je nejrozšířenější vysokomolekulární látkou na zemi. V přírodě se vyskytuje s doprovodnými látkami jako je pektocelulóza, lignocelulóza, kutocelulóza, glukóza, oligosacharidy. Ve vodě je celulóza nerozpustná. Molární hmotnost se pohybuje v rozmezí 300 000 g/mol až 500 000 g/mol, hustota je 1560 kg/m³.



Obr. 6. Vzorec celulózy [9].

Jako surovina pro výrobu papíru se používá dřevo, sběrový papír, jednoleté rostliny. V celulózkách se rozrušují vazby ligninu k celulóze, hemicelulózám a i lignin se rozrušuje na monomery či oligomery. Jednotlivá vlákna - vláknité dřevní buňky - se pak oddělují, propírají, filtrují, aby se očistila, a následně se suší. Vzniklá buničina se pak používá přímo na výrobu neběleného papíru, nebo se dále bělí. Výroba vláknin se provádí dvěma metodami. První metoda je chemická. Spočívá ve výrobě buničiny, kdy se dřevěné štěpky vaří ve vařáku s chemikáliemi. Vařením se lignin rozruší a dřevo se tak rozpadne na vlákna. Chemickou metodou sulfátovou obvykle vzniká sulfátová buničina a metodou chemickou sulfitovou vzniká sulfitová buničina. Druhou metodou je metoda mechanická. Působením mechanické síly na strukturu dřeva se oddělují jednotlivé buňky, často za spolupůsobení chemikálií, vyšší teploty i tlaku. Cílem této metody je dosáhnout výrazně větší výtěžnosti při dostatečné bělosti a pevnosti. Takto získaná vláknina se nazývá dřevovina nebo-li polobuničina.

Aby se dosáhlo potřebné bělosti je nutno odstranit či zamaskovat zbylý lignin a nečistoty v polobuničině. K bělení se většinou používá chlórdioxid, peroxid vodíku, ozon, kyslík a další látky. Neupravený papír obsahuje jen stlačenou a usušenou celulózu. Tento papír je velmi savý, a neposkytuje dobrý povrch pro psaní ani tisk. Proto se pro získání požadovaných vlastností používá velké množství přísad, např. škroby. Pro dosažení hladkosti se používají povrchové vrstvy z latexu nebo jiných pojiv a plnidel jako jsou kaolin nebo uhličitán vápenatý.

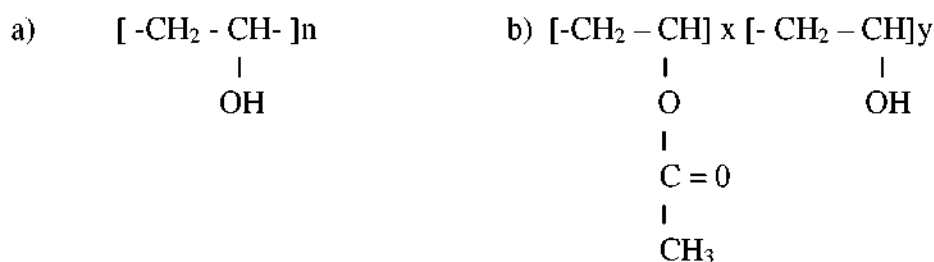
2.4 Volba polymerních matric [1]

Přírodní vlákna mohou být kombinována s termoplasty, reaktoplasty (konvenční typy polymerů), s biopolymery. K perspektivnímu použití patří také kombinace s polymery biodegradovatelnými. První důležitou podmínkou, která by měla být respektována při zpracování, je sušení vláken. Vlhkost na povrchu hydrofilních vláken a voda obecně se na mezifázovém rozhraní s hydrofobním polymerem chovají jako separační činidlo.

Mezi další nevýhodu, která omezuje použití rostlinných vláken v kombinaci s polymery zpracovávanými za tepla, je jejich tepelná stabilita do cca 230 °C. Jedinými polymery, které by vyhovovaly této teplotě jsou polyethylen a polypropylén. Ostatní technické termoplasty však vyžadují vyšší zpracovatelské teploty, což situaci komplikuje. Jedním z mála polymerů rozpustných ve vodě je polyvinylalkohol. V tomto případě odpadají komplikace s vlhkostí vláken a vlákna se dají přímo přidávat do vodného roztoku polymeru, který se následně odlévá a poté suší.

2.4.1 Polyvinylalkohol [10]

Polyvinylalkohol (PVA) nevzniká přímou polymerizací nestabilního vinylalkoholu, ale jeho výroba je založena na alkalické hydrolyze polyvinylacetátu. Nejdříve je monomer vinylacetátu polymerizován na polyvinylacetát. Ten se následně hydrolyzuje na polyvinylalkohol za působení sodného louhu jako katalyzátoru. Nakonec je produkt rozdrcen, neutralizován a sušen ve vakuové sušárně.



Obr. 7. Strukturní vzorce PVA.

a) plně hydrolyzovaného

b) částečně hydrolyzovaného [10]

Polyvinylalkohol je bílé barvy, případně nažloutlý netoxický granulát či zrnitý prášek. Je odolný proti působení světla. PVA filmy vykazují dobrou propustnost pro UV paprsky. Je prakticky nepropustný pro infračervené paprsky. Je hořlavý. Relativní hustota PVA je v rozsahu $1,23 \text{ g/cm}^3$ až $1,31 \text{ g/cm}^3$. Sypná hmotnost se pohybuje v rozmezí $0,531 \text{ g/cm}^3$ až $0,731 \text{ g/cm}^3$. Teplota skelného přechodu pro částečně hydrolyzovaný PVA je přibližně 60°C , teplota pro plně hydrolyzovaný PVA je cca 85°C . Teplota tání částečně hydrolyzovaného PVA leží v rozmezí 180°C až 190°C , se zvyšujícím stupněm hydrolyzy lze dosáhnout až 230°C .

PVA vykazuje vlastnosti emulgátorů, působí jako ochranné koloidy a povrchově aktivní látky, snižuje povrchové napětí. Různé typy polyvinylalkoholů vyvolávají rozdílné účinky podle viskozity, stupně hydrolyzy a koncentrace ve vodném roztoku. Ve vodném roztoku o koncentraci 0,1 hmotn. % až 1,0 hmotn. % PVA se povrchové napětí vody zpravidla více snižuje s přidavkem částečně hydrolyzovaného polyvinylalkoholu než plně hydrolyzovaného. To také vysvětluje přednostní využití částečně hydrolyzovaných polyvinylalkoholů jako emulgačních a ochranných koloidů.

Vynikající přilnavost mají PVA k porézním a hydrofilním fázím a plnivům jako papíru, tkaninám, korku, dřevu a některým typům barviv. Naopak k hladkým a nesavým podkladům například kovu a sklu mají PVA velmi slabou přilnavost.

Jediným rozpouštědlem PVA je voda. Rozpouštěcí rychlost závisí na teplotě. Za normální teploty se rozpouští pozvolna, se vzrůstající teplotou rozpustnost vzrůstá. Zahřátím nad 160°C se stává polymer ve vodě nerozpustný, v důsledku vytvoření trojrozměrné struktury. Rozpuštěním PVA ve vodě vzniká vodný roztok koloidní povahy, jehož viskozita stoupá v závislosti na koncentraci až k vytvoření gelu a konečně pevné hmoty, ve které voda zastává úlohu změkčovadla. Kromě vody je málo sloučenin, které za jistých podmínek rozpouštějí PVA. Mezi ně patří například kyselina fosforečná, kyselina octová a mravenčí. Dále například formamid, ethylformamid a ethylacetamid působí jako rozpouštědla za tepla.

Polyvinylalkohol činí ve vodě nerozpustným přísada chromu, například dvojchromu sodného, draselného nebo amonného. Ve většině případů stačí pouze povrchová nerozpustnost. Té se může dosáhnout působením formaldehydových par, rovněž působením par chloridu siřného.

Polyvinylalkohol nachází použití v celé řadě průmyslových odvětví díky svým vlastnostem mechanickým, odolnosti vůči rozpouštědlům, emulgační schopnosti, přilnavosti a dalším vlastnostem. Používá se v textilním, papírenském průmyslu, na výrobu lepidel, fólií.

2.5 Volba zpracovatelských procesů [1]

V současné době jsou využívány především zpracovatelské procesy jako je například lisování za horka. Při tomto procesu se střídají vrstvy polymeru a vláknenné výztuže. Dalším procesem může být injekční vstřikování. Polymer se před vstřikováním mísí a taví s krátkými sekanými vlákny.

Mechanické vlastnosti kompozitních systémů jsou vždy určovány mechanickými parametry vyztužujících vláken, kvalitou mezifázových rozhraní a parametry matric. Pro konstruovaný kompozitní systém jsou důležité nejen mechanické parametry vláken, ale i jejich průměr a délka (štíhlostní poměr). Přednost se dává jemným vláknům, která vykazují vyšší specifický povrch, který je důležitý z hlediska vytvoření kvalitního mezifázového rozhraní. Vyztužující schopnost bývá redukována snadnou tvorbou větších agregátů, které jsou obtížně rozrušitelné a tvoří se díky vazbám mezi jednotlivými vlákny.

2.6 Zkušební metody

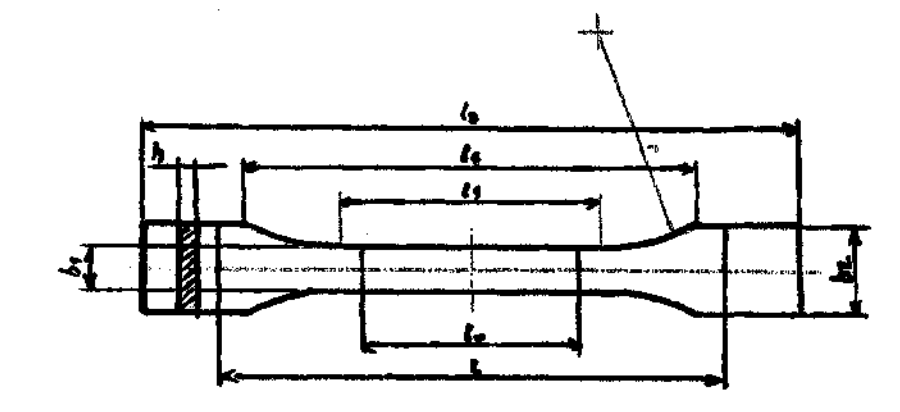
Mezi nejpoužívanější zkušební metodu, kterou lze zjistit základní mechanické vlastnosti všech materiálů patří statická zkouška tahem, která bývá velmi často doplněna sledováním lomových ploch za pomoci rastrovacího elektronového mikroskopu.

2.6.1 Mechanická zkouška tahem [11]

Zkušební vzorek s původní délkou L_0 a průřezem A_0 je při stanovené rychlosti deformace zatěžován ve směru jeho podélné osy statickou silou F zpravidla až do vlastní destrukce. Vnější síla vyvolá napětí

$$\sigma = F / A_0 \quad [\text{MPa}]$$

Při této statické zkoušce se původní délka L_0 mění na délku L .



Obr. 8. Zkušební vzorek pro zkoušku tahem [11]

Poměrné prodloužení: $\varepsilon_l = (L - L_0) / L_0 = \Delta L / L_0$, kde L - je měřená délka zkušebního tělesa v daném okamžiku zatěžování.

Při zkoušce se zmenší průřez vzorku ve směru kolmém k ose protažení. Toto se vyjadřuje poměrným zúžením ε_h (tloušťky h) nebo ε_b (šířky b):

$$\varepsilon_h = \Delta h / h_0$$

$$\varepsilon_b = \Delta b / b_0$$

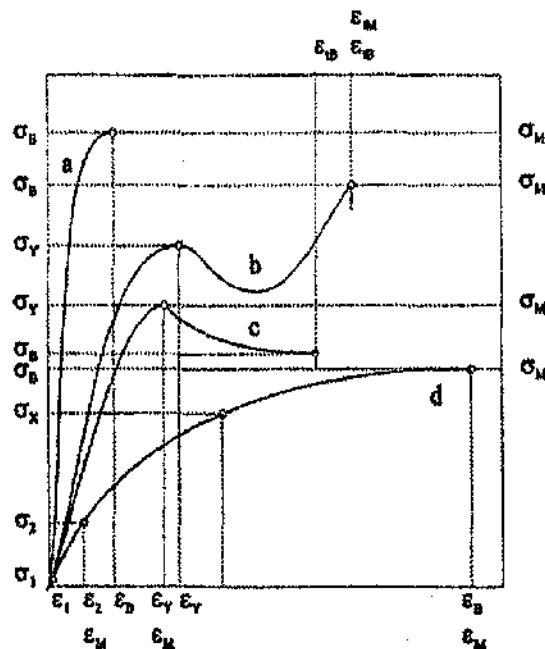
Konstanta mezi napětím a deformací se nazývá modul pružnosti v tahu E_t (Youngův modul) a vztah Hookův zákon:

$$\sigma = E_t \cdot \varepsilon \quad [\text{MPa}]$$

$$E_t = \sigma_2 - \sigma_1 / \varepsilon_2 - \varepsilon_1 = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon$$

Vztah mezi poměrným zúžením a poměrným prodloužením je tzv. Poissonův poměr μ . Čím je jeho hodnota vyšší, tím je polymer poddajnější.

Při průběhu zkoušky se s použitím elektronických zkušebních přístrojů s automatickým záznamovým systémem zaznamenávají kompletní tahové křivky efektivní tahové napětí – poměrné prodloužení. Z těchto křivek se vyhodnocují charakteristické hodnoty.



Obr. 9. Obecné tahové křivky [11]

a) křehké plasty

b, c) houževnaté plasty s mezí kluzu

d) houževnaté plasty bez meze kluzu

σ_2 – mez úměrnosti - vyjadřuje smluvní napětí

σ_x – mez pružnosti - vyjadřuje místo, do kterého je deformace vratná

σ_y – meze kluzu – místo, kde se buď vzorek přetrhne nebo nastane další pokles napětí

σ_B – mez lomu – místo, kde dojde k destrukci

2.6.2 Elektronová mikroskopie [12]

Mikroskopie má velké uplatnění i při studiu kompozitních systémů. Nejrozsáhlejší použití nachází rastrovací elektronová mikroskopie (REM) v makrofraktografii a mikrofraktografii. Podává informace o charakteru lomové plochy, z nichž lze usuzovat na způsob porušení a mechanismy porušování, které se během šíření lomové trhliny uplatňovaly.

Svazek primárních elektronů prochází elektronovou optickou soustavou a je vychylován tak, že řádek po řádku přejíždí vymezenou plochu povrchu vzorku. Pro REM se využívá emise sekundárních elektronů a odražených primárních elektronů. Na základě

rozdílné orientace jednotlivých nerovností sledovaného povrchu vůči svazku primárních elektronů se vytváří kontrast obrazu.

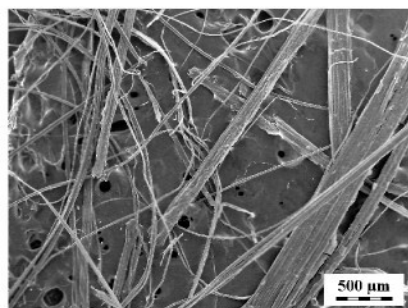
3 Experimentální část

3.1 Použité materiály

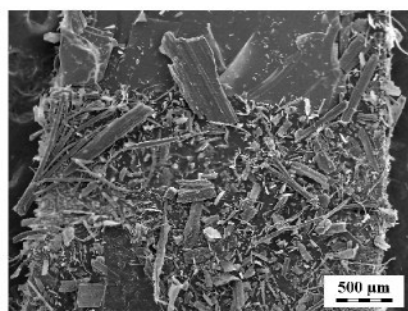
Pro přípravu vzorků kompozitních systémů byla použita vlákna lnu, konopí, bambusu, běleného a neběleného recyklovaného papíru, které byly vloženy do vodného roztoku polyvinylalkoholu.

3.1.1 Vlákna

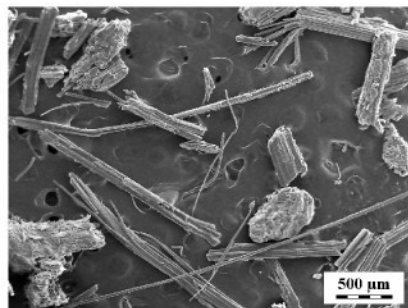
Vlákna konopná, lněná, bambusová i vlákna celulózová z recyklovaného běleného i neběleného papíru byla získána jako technický produkt, technické čistoty z Bioverfahrenstechnik FH Hannover.



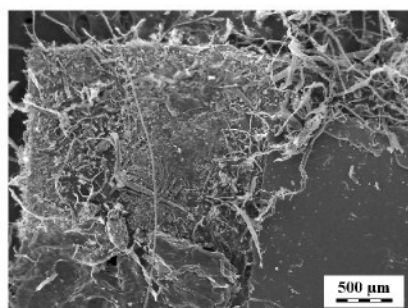
Obr. č. 10. Snímek lněných vláken. REM.



Obr. č. 11. Snímek konopných vláken. REM.



Obr. č. 12. Snímek bambusových vláken, REM.



Obr. č. 13. Snímek celulózových vláken z recyklovaného papíru, REM.

3.1.2 Matrice

Všechna vlákna byla umístěna do polyvinylalkoholové matrice (PVA). PVA typ MOWIOL GF4 – 86 je výrobkem firmy Kuraray Specialities Europe a jedná se o plně hydrolyzovatelnou formu.

3.2 Příprava vzorků

Všechny vzorky byly připraveny jako 20 % vodný roztok polyvinylalkoholu, do kterého byla postupně přidávána vlákna jednotlivých typů s odstupňovaným plněním 3 %, 6 %, 9 % a 30 %.

Směsi byly odlity do Petriho misek a byly vysušeny. Po vysušení byly vzorky zváženy, změřeny a rozřezány na proužky, které byly připraveny pro zkoušku tahem. Příslušné hodnoty jsou uvedeny v příloze č.1,2.

3.3 Experimentální metody

K posouzení základních mechanických vlastností připravených kompozitních systémů byla zvolena zkouška tahem, která byla doplněna elektronovou mikroskopií.

3.3.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem byla pro všechny vzorky provedena na zkušebním stroji značky INSTRON typ 4200. Rychlost pohybu příčnicku byla nastavena na 50 mm/min, použitý snímač síly 0,500 kN, vztažná délka vzorku 50 mm. Zkoušky probíhaly při teplotě $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ a vlhkosti cca 50 %. Vzhledem k tomu, že nebyly trhány vzorky normovaných tvarů, nelze získané hodnoty mechanických parametrů považovat za absolutní, ale pouze relativní, postačující k posouzení vlivu přírodních rostlinných vláken jako vyztužujících prvků v polymerní matici.



Obr. č. 14. Pracoviště pro zkoušku tahem.



Obr. č. 15. Čelisti zkušebního stroje Instron.

3.3.2 Elektronová mikroskopie

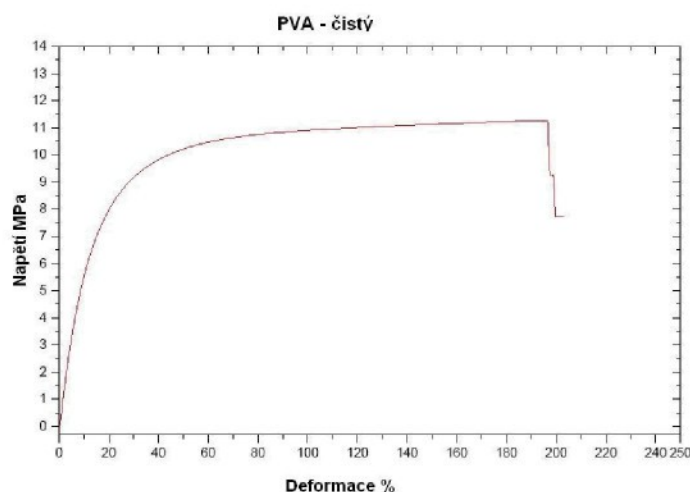
Elektronová mikroskopie byla využita jak k pozorování vlastních vláken tak k posouzení jejich adheze k polymerní matrici. Mikroskopie byla prováděna na přístroji JEOL JSM 540A s urychlovacím napětím 10 kV. Před vlastním pozorováním byly vzorky naprášeny vrstvou AuPd o síle několika nanometrů.

4 Výsledky a diskuze

Cílem práce bylo připravit a zhodnotit kompozitní systémy s matricí z polyvinylalkoholu, které byly vyztužené vybranými přírodními rostlinnými vlákny a vlákny z recyklovaného papíru.

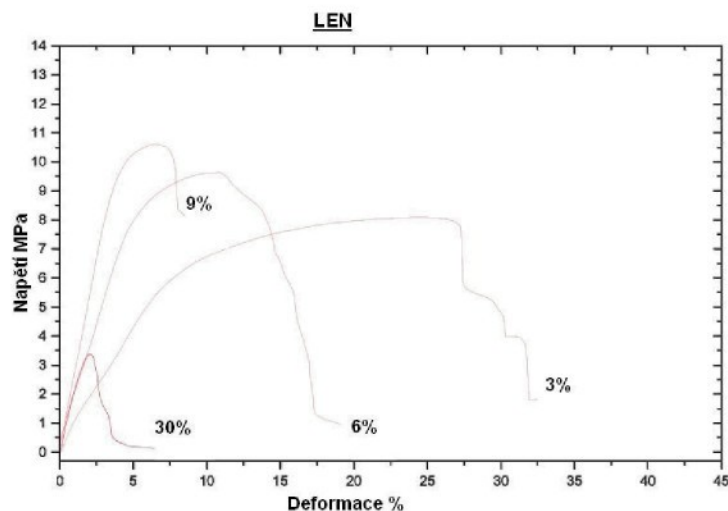
Na základě zkoušky tahem bylo provedeno hodnocení meze pevnosti v tahu, modulu pružnosti, a deformaci vzorků v závislosti na typu vláken a jejich množství. Za pomoci rastrovací elektronové mikroskopie byla posouzena homogenita připravených vzorků a adheze vláken k polymerní matrici.

Křivky uvedené v následujících grafech jsou křivkami způměrovanými z pěti až sedmi měření. Vzorky, u kterých došlo k lomu v čelistech, byly z hodnoceného souboru vyřazeny.



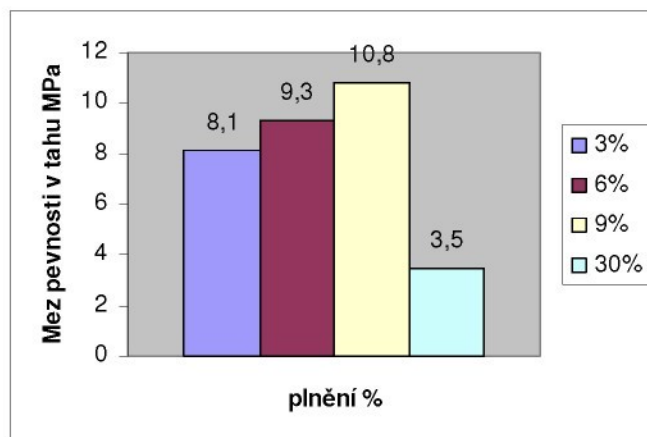
Graf č. 1. Graf závislosti napětí – deformace pro čistý polyvinylalkohol.

Z grafu č. 1. je patrné chování neplněného polyvinylalkoholu – vysoká tažnost při relativně nízkém zatížení a nízký modul pružnosti. Mez pevnosti v tahu 11 MPa, Youngův modul pružnosti 65 MPa, deformace 200 %.



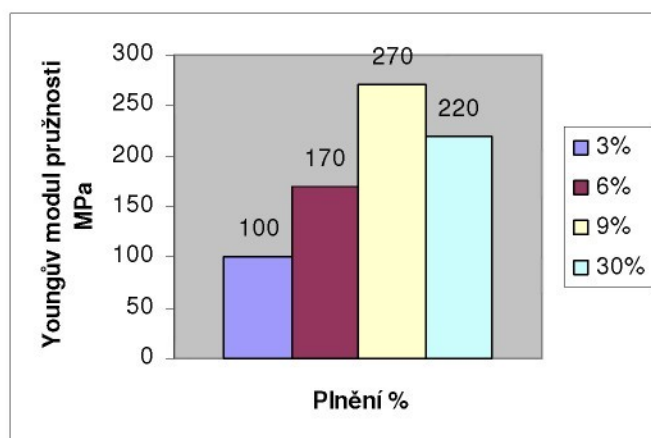
Graf č. 2. Graf závislosti napětí – deformace pro polyvinylalkohol plněný lněnými vlákny (plnění 3 %, 6 %, 9 %, 30 % hmotnostních).

Z grafu č. 2 je patrná změna v chování kompozitních systémů. Dochází k výraznému snížení deformace vzorků, zvýšení modulu pružnosti, nárůst meze pevnosti v porovnání s neplněným PVA není patrný.



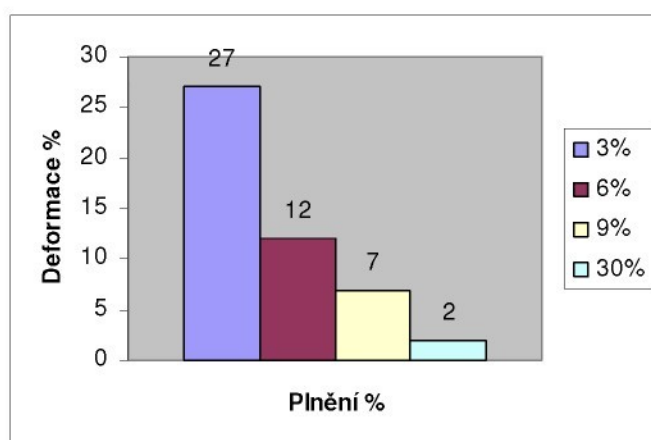
Graf č. 3. Závislost meze pevnosti v tahu na plnění pro systémy se lněnými vlákny.

Při použití lněných vláken nedochází v porovnání s neplněným PVA ke zvýšení meze pevnosti připravených kompozitních systémů při žádném plnění.



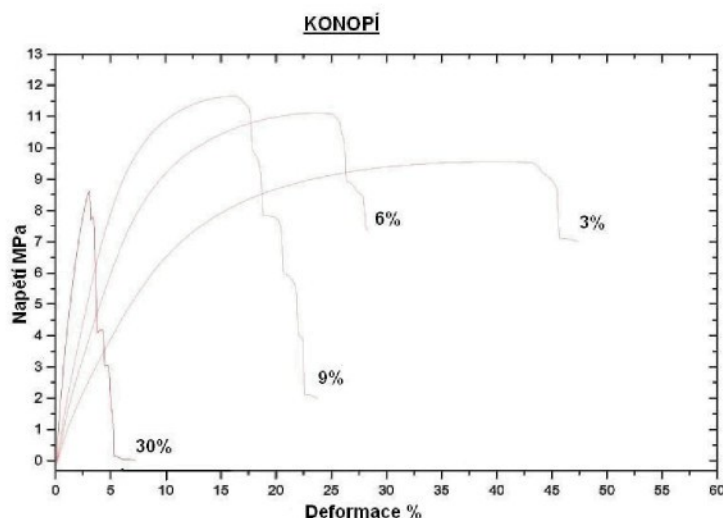
Graf č. 4. Závislost Youngova modulu pružnosti na plnění pro systémy se lněnými vlákny.

Při použití lněných vláken dochází v porovnání s neplněným PVA ke zvýšení Youngova modulu pružnosti připravených kompozitních systémů do plnění 9%, poté nastává jeho pokles.



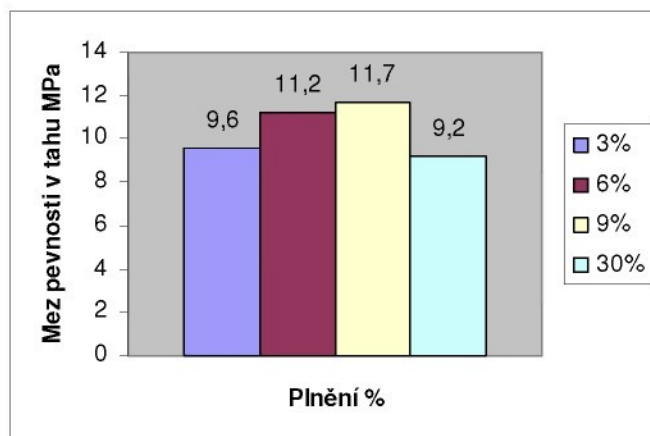
Graf č. 5. Závislost deformace na plnění pro systémy se lněnými vlákny.

Při použití lněných vláken dochází v porovnání s neplněným PVA ke snížení deformace připravených kompozitních systémů v celém rozsahu plnění.



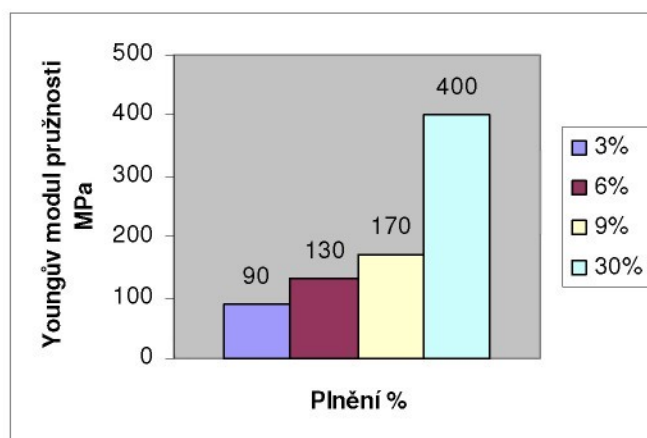
Graf č. 6. Graf závislosti napětí – deformace pro polyvinylalkohol plněný konopnými vlákny (plnění 3 %, 6 %, 9 %, 30 % hmotnostních)

Z grafu č. 6 je patrná změna v chování kompozitních systémů. Dochází k výraznému snížení deformace a zvýšení modulu pružnosti, a nárůstu meze pevnosti v porovnání s neplněným PVA není významný.



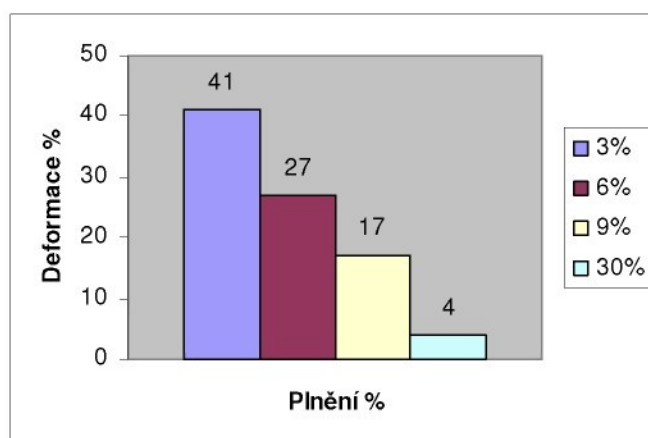
Graf č. 7. Závislost meze pevnosti v tahu na plnění pro systémy s konopnými vlákny.

Při použití konopných vláken dochází v porovnání s neplněným PVA k malému zvýšení meze pevnosti připravených kompozitních systémů.



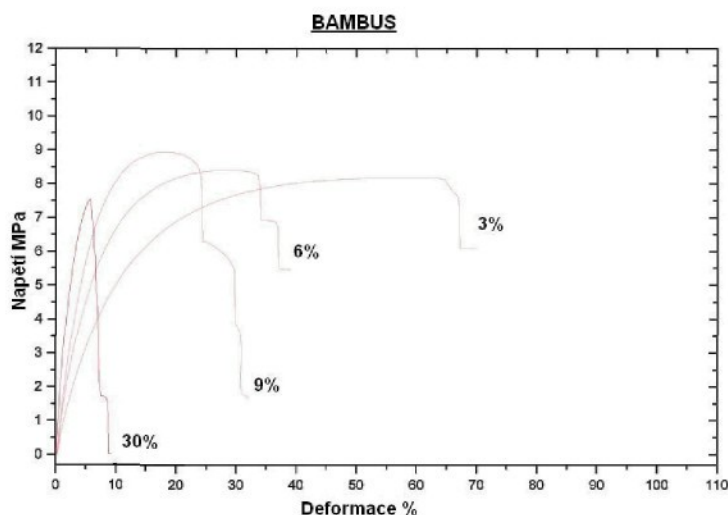
Graf č. 8. Závislost Youngova modulu pružnosti na plnění pro systémy s konopnými vlákny.

Při použití konopných vláken dochází v porovnání s neplněným PVA k velmi významnému zvýšení Youngova modulu pružnosti připravených kompozitních systémů v celém rozsahu plnění.



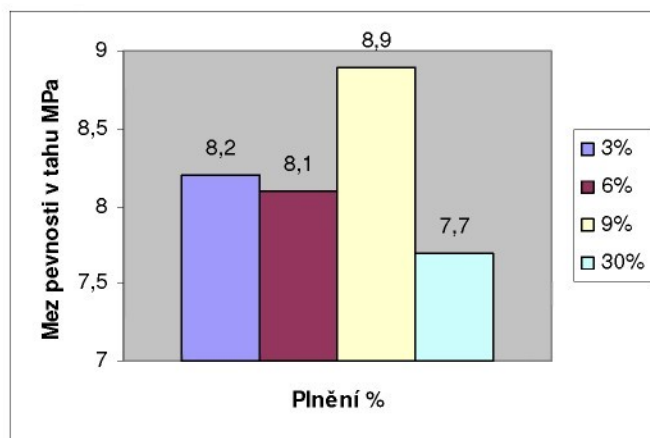
Graf č. 9. Závislost deformace na plnění pro systémy s konopnými vlákny.

Při použití konopných vláken dochází v porovnání s neplněným PVA ke snížení deformace připravených kompozitních systémů v celém rozsahu plnění.



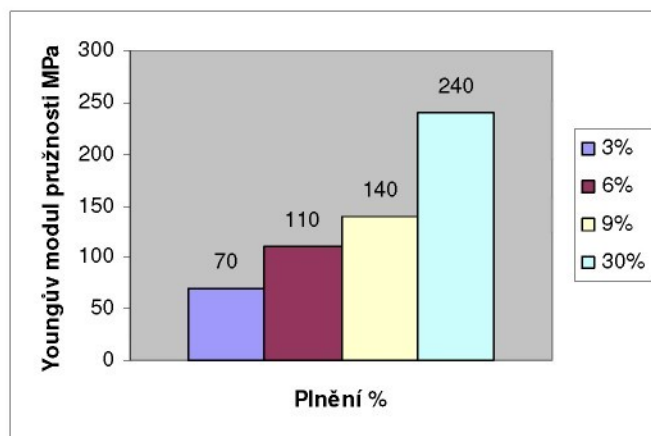
Graf č. 10. Graf závislosti napětí – deformace pro polyvinylalkohol plněný bambusovými vlákny (plnění 3 %, 6 %, 9 %, 30 % hmotnostních)

Z grafu č. 10 je patrná změna v chování kompozitních systémů. Dochází k výraznému snížení deformace vzorků, zvýšení modulu pružnosti, mez pevnosti v porovnání s neplněním PVA klesá.



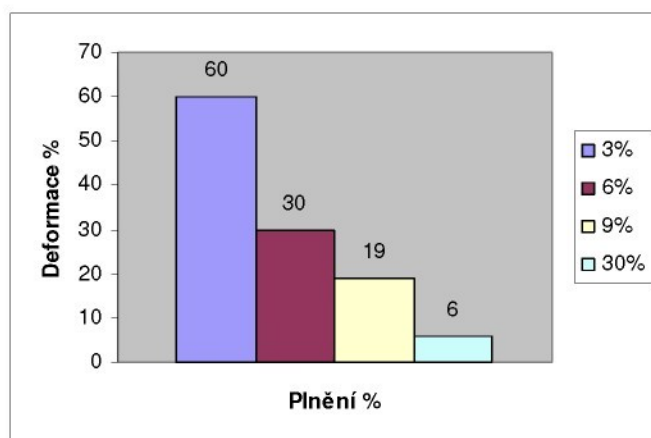
Graf č. 11. Závislost meze pevnosti v tahu na plnění pro systémy s bambusovými vlákny.

Při použití bambusových vláken dochází v porovnání s neplněným PVA k poklesu meze pevnosti připravených kompozitních systémů v celém rozsahu plnění.



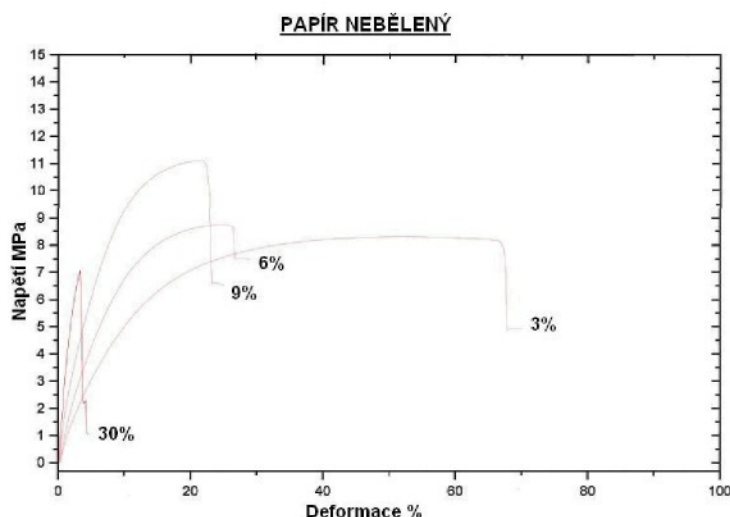
Graf č. 12. Závislost Youngova modulu pružnosti na plnění pro systémy s bambusovými vlákny.

Při použití bambusových vláken dochází v porovnání s neplněným PVA ke zvýšení Youngova modulu pružnosti připravených kompozitních systémů v celém rozsahu plnění.



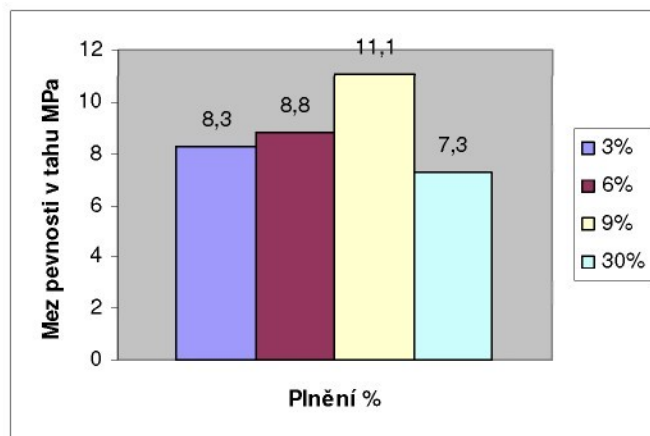
Graf č. 13. Závislost deformace na plnění pro systémy s bambusovými vlákny.

Při použití bambusových vláken dochází v porovnání s neplněným PVA ke snížení deformace připravených kompozitních systémů v celém rozsahu plnění.



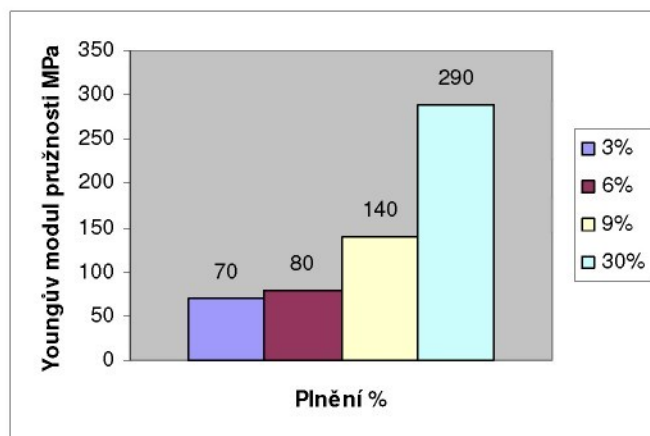
Graf č. 14. Graf závislosti napětí – deformace pro polyvinylalkohol plněný celulózovými vlákny z neběleného recyklovaného papíru (plnění 3 %, 6 %, 9 %, 30 % hmotnostních)

Z grafu č. 14 je patrná změna v chování kompozitních systémů. Dochází opět k výraznému snížení deformace a zvýšení modulu pružnosti . Nárůst meze pevnosti v porovnání s neplněným PVA není zřejmý.



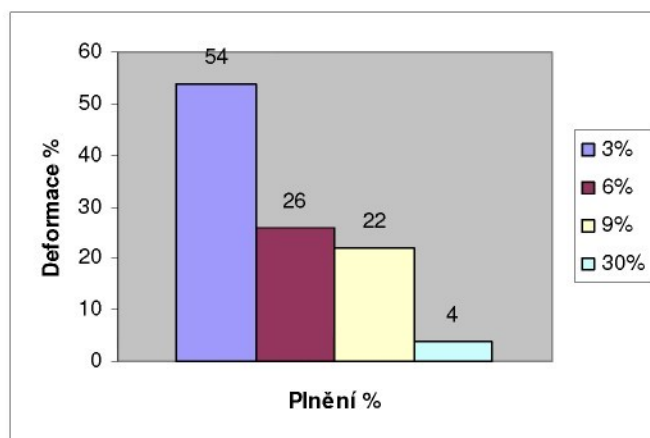
Graf č. 15. Závislost meze pevnosti v tahu na plnění pro systémy s celulózovými vlákny z neběleného recyklovaného papíru.

Při použití celulózových vláken z neběleného papíru nedochází v porovnání s neplněným PVA k nárůstu meze pevnosti připravených kompozitních systémů v celém rozsahu plnění.



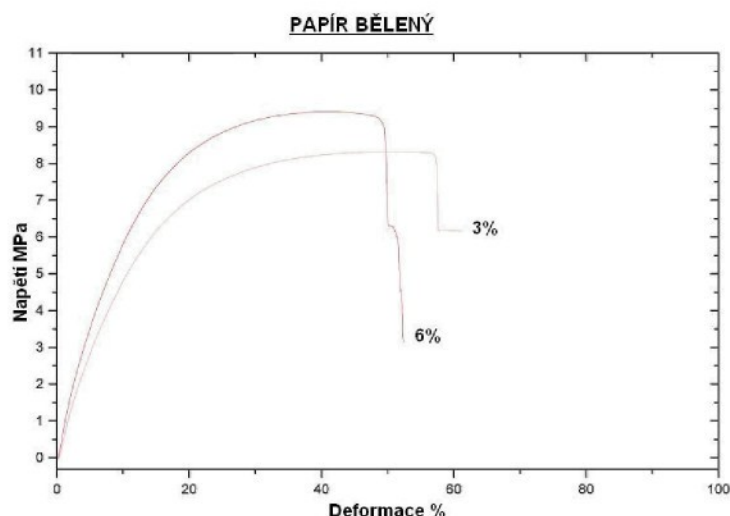
Graf č. 16. Závislost Youngova modulu pružnosti na plnění pro systémy s celulózovými vlákny z neběleného recyklovaného papíru.

Při použití celulózových vláken z neběleného papíru nedochází v porovnání s neplněným PVA ke zvýšení Youngova modulu pružnosti připravených kompozitních systémů v celém rozsahu plnění.



Graf č. 17. Závislost deformace na plnění pro systémy s celulózovými vlákny z neběleného recyklovaného papíru.

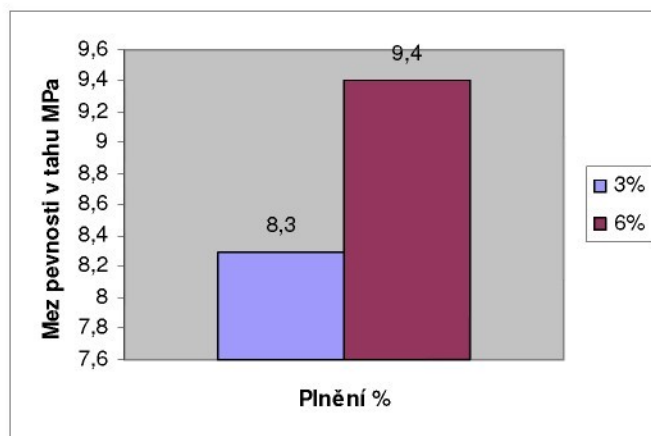
Při použití celulózových vláken z neběleného papíru nedochází v porovnání s neplněným PVA ke snížení deformace připravených kompozitních systémů v celém rozsahu plnění.



Graf č. 18. Graf závislosti napětí – deformace pro polyvinylalkohol plněný celulózovými vlákny z běleného recyklovaného papíru (plnění 3 %, 6 %, 9 %, 30 % hmotnostních).

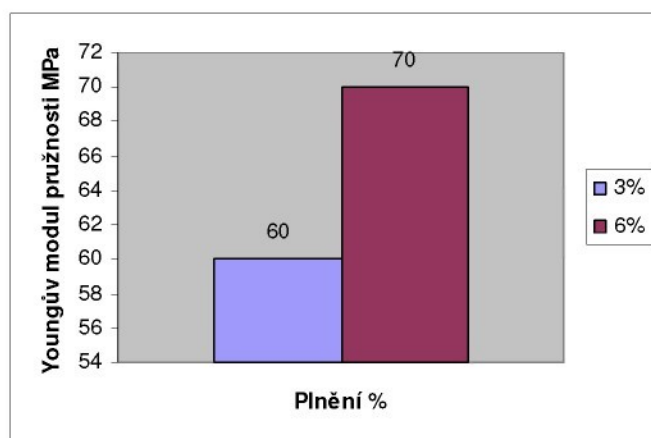
Plnění 9 % a 30 % nebyla provedena z důvodu nedostatku plniva.

Z grafu č. 18 je patrná změna v chování uvedených kompozitních systémů. Dochází ke snížení deformace, zvýšení modulu pružnosti, mez pevnosti neroste.



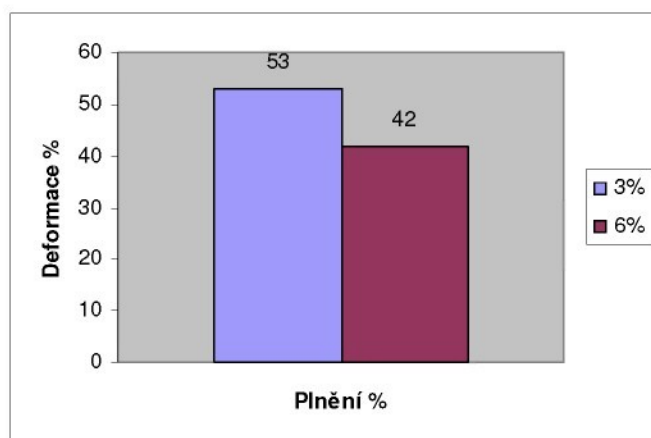
Graf č. 19. Závislost meze pevnosti v tahu na plnění pro systémy s celulózovými vlákny z běleného recyklovaného papíru.

Při použití celulózových vláken z běleného papíru nedochází v porovnání s neplněným PVA k nárůstu meze pevnosti u obou připravených kompozitních systémů.



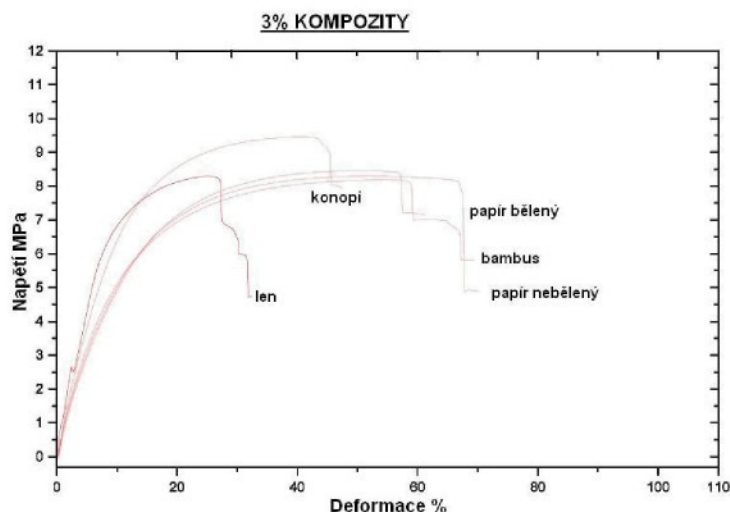
Graf č. 20. Závislost Youngova modulu pružnosti na plnění pro systémy s celulózovými vlákny z běleného recyklovaného papíru.

Při použití celulózových vláken z běleného papíru dochází v porovnání s neplněným PVA ke zvýšení Youngova modulu pružnosti u obou připravených kompozitních systémů.



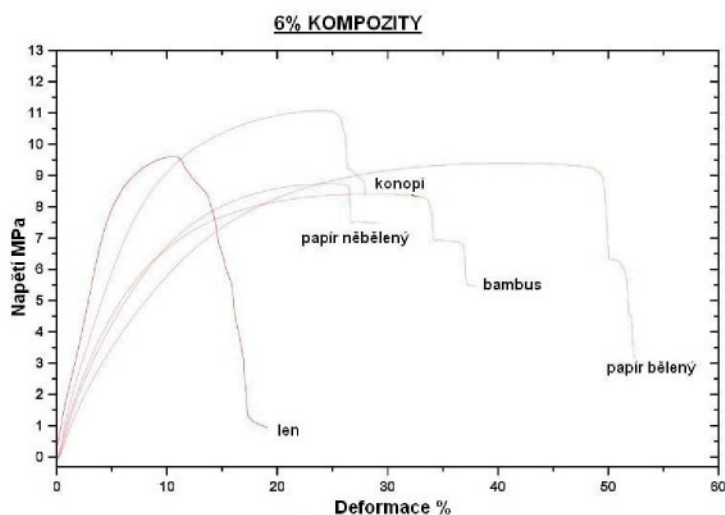
Graf č. 21. Závislost deformace na plnění pro systémy s celulózovými vlákny z běleného recyklovaného papíru.

Při použití celulózových vláken z běleného papíru dochází v porovnání s neplněným PVA ke snížení tažnosti připravených kompozitních systémů u obou sledovaných plnění.



Graf č. 22. Graf závislosti napětí – deformace pro polyvinylalkohol plněný všemi typy vláken pro plnění 3 % hmotnostních.

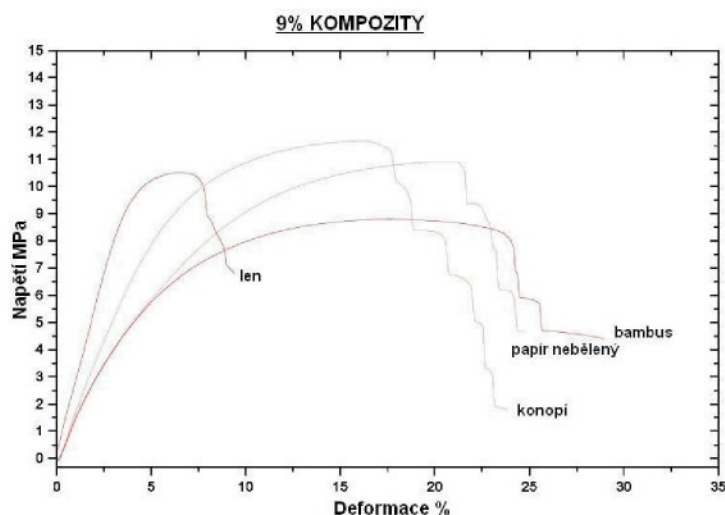
Při hodnocení kompozitních systémů plněných všemi typy vláken v hodnotě 3 % se jako nejvhodnější plniva jeví konopí a len. Proti ostatním plnivům vykazují vyšší moduly pružnosti a nižší deformace vzorků. Hodnoty meze pevnosti v tahu nepřekračují hodnoty meze pevnosti u neplněného PVA.



Graf č. 23. Graf závislosti napětí – deformace pro polyvinylalkohol plněný všemi typy vláken pro plnění 6 % hmotnostních.

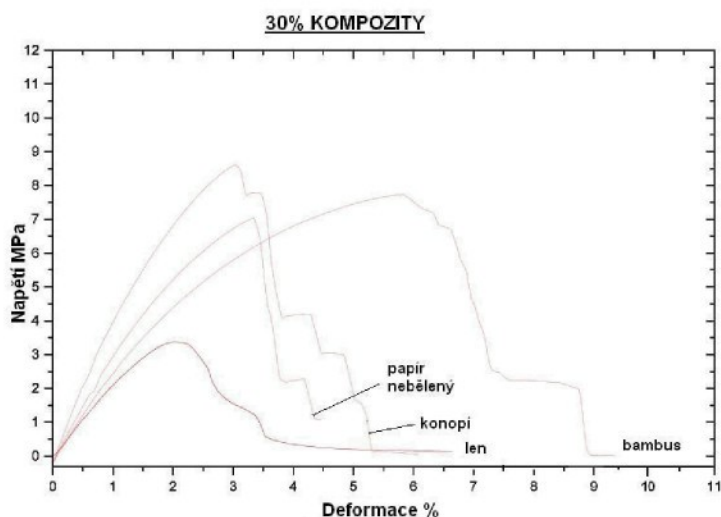
Při hodnocení kompozitních systémů plněných všemi typy vláken v hodnotě 6 % se jako nejvhodnější plniva jeví opět konopí a len. Proti ostatním plnivům vykazují vyšší moduly

pružnosti a nižší deformace vzorků. Hodnoty meze pevnosti jsou v případě konopných vláken stejné jako hodnoty meze pevnosti u neplněného PVA.



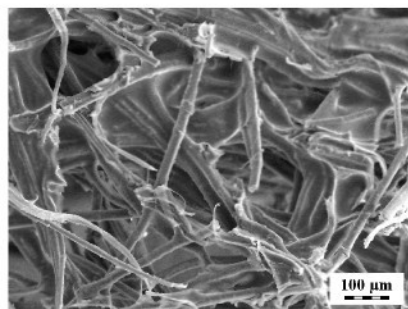
Graf č. 24. Graf závislosti napětí – deformace pro polyvinylalkohol plněný všemi typy vláken pro plnění 9 % hmotnostních.

Při hodnocení kompozitních systémů plněných všemi typy vláken v hodnotě 9 % se jako nejvhodnější plniva jeví opět konopí a len. Proti ostatním plnivům vykazují vyšší moduly pružnosti a nižší deformace vzorků. Hodnoty meze pevnosti v případě konopných vláken mírně překračují hodnoty meze pevnosti u neplněného PVA.

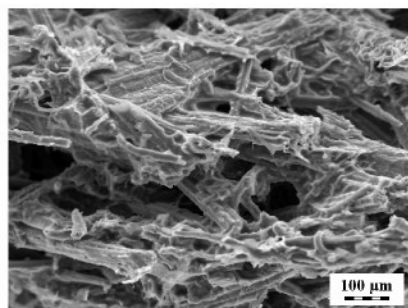


Graf č. 25. Graf závislosti napětí – deformace pro polyvinylalkohol plněný všemi typy vláken pro plnění 30 % hmotnostních.

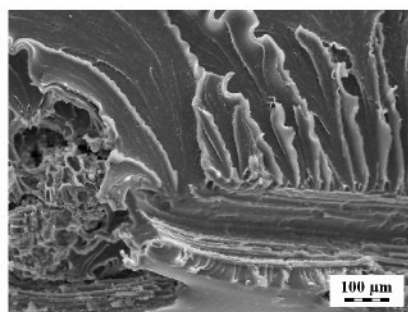
Při hodnocení kompozitních systémů plněných všemi typy vláken v hodnotě 30 % se jako nejvhodnější plniva jeví pouze konopí. Proti ostatním plnivům vykazuje vyšší moduly pružnosti a deformace vzorků pouze několik procent. Hodnoty meze pevnosti v případě konopných vláken nepřekračují hodnoty meze pevnosti u neplněného PVA.



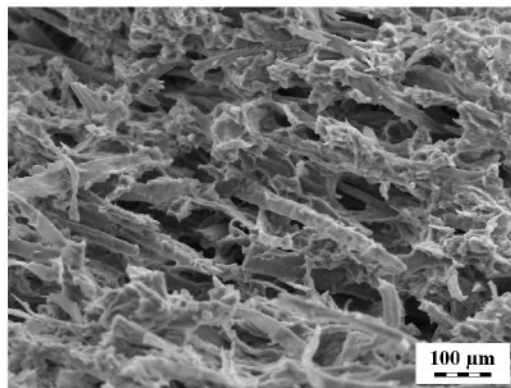
Obr. č. 16. Snímek lomové plochy: lněná vlákna – PVA matrice, plnění 9 %. REM



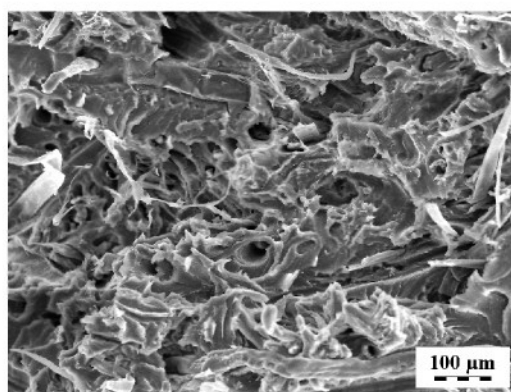
Obr. č. 17. Snímek lomové plochy: konopná vlákna – PVA matrice, plnění 9 %. REM.



Obr. č. 18. Snímek lomové plochy: bambusové vlákno – PVA matrice, plnění 3 %.



Obr. č. 19. Snímek lomové plochy: celulózová vlákna z recyklovaného papíru nebělená – PVA matrice, plnění 9 %. REM.



Obr.č. 20. Snímek lomové plochy: celulózová vlákna z recyklovaného papíru bělená – PVA matrice, plnění 6 %. REM.

Při použití uvedených plniv dochází ke změně mechanických vlastností. V porovnání s neplněným polymerem výrazně roste Youngův modul pružnosti (řádově až o stovky procent) a snižuje se míra deformace vzorků při přetržení (podle stupně plnění až na jednotky procent). Proti očekávání nedochází ke zvýšení meze pevnosti plněných systémů.

Nárůst modulů pružnosti v případě plněného PVA je dán vlastní přítomností vyztužujících vláken, která nesou část vloženého napětí, propůjčují materiálu tuhost a zvyšují modul pružnosti. Prostřednictvím vodíkových můstků dochází také k interakci mezi hydrofilním plnivem a vodorozpustnou polymerní maticí – polyvinylalkoholem, s čímž souvisí i výrazné snížení deformace vzorků při přetržení. Jak je vidět ze snímků lomových ploch vzorků, vlákna jsou obalena maticí – adheze mezi vyztužujícími vlákny a polymerní maticí je tedy dobrá. Ze snímků je patrná značná nehomogenita vzorků, což je možné vysvětlit způsobem jejich přípravy – odléváním vodných roztoků. Nehomogenita vzorků je i

vysvětlením pro to, že nedošlo k očekávanému zvýšení meze pevnosti v tahu. Velké množství dutin snižuje efektivní nosný průřez vzorků.

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo připravit a zhodnotit biodegradovatelné kompozitní systémy s vyztužujícími přírodními vlákny a vlákny z recyklovaného papíru.

Zkoušené kompozitní materiály byly připraveny jako 20 % hmotnostní vodný roztok polyvinylalkoholu, do kterého byla postupně přidávána vlákna jednotlivých typů (lněná, konopná, bambusová a vlákna z recyklovaného papíru) s plněním 3 %, 6 %, 9 % a 30 % hmotnostních. Pro porovnání byl připraven 20% hmotnostní vodný roztok neplněného polyvinylalkoholu.

Na základě mechanické zkoušky tahem byla u těchto kompozitních systémů stanovena mez pevnosti, Youngův modul pružnosti a deformace vzorků. Vlivem plnění jednotlivými typy vláken se v porovnání s neplněným PVA výrazně (až na jednotky procent) snižuje míra deformace vzorků při přetržení, až o stovky procent se zvyšuje Youngův modul pružnosti, změna meze pevnosti není patrná anebo mez pevnosti klesá.

Pomocí rastrovací elektronové mikroskopie byla pozorována jak vlastní vlákna, tak i jejich adheze k polymerní matici. Na základě mikroskopického hodnocení vzorků je možné adhezi mezi polymerní maticí a vlákny považovat za dobrou – na snímcích lomových ploch vzorků jsou vidět vlákna obalená maticí. Byla sledována také jistá nehomogenita vzorků, která je patrně dána způsobem přípravy vzorků – odléváním z vodných roztoků. Ke zvýšení meze pevnosti kompozitních systému nedošlo zřejmě díky nehomogenitě vzorků.

Na základě provedeného hodnocení by nejvhodnější náhradou kompozitních systémů plněných syntetickými vlákny, především skelnými, mohly být kompozity vyztužené konopnými a lněnými vlákny s plněním 9 % hmotnostních. U těchto kompozitních systémů se mez pevnosti pohybuje v obou případech okolo 11 MPa, u kompozitů se lněnými vlákny je Youngův modul pružnosti cca 270 MPa (zvýšení o 315 %), deformace vzorků se pohybuje kolem 7 % (tedy 3,5 % hodnoty u neplněného PVA). U kompozitů s konopnými vlákny je Youngův modul pružnosti cca 170 MPa (zvýšení o 160 %), a deformace vzorků kolem 17 % (tedy 8,5 % hodnoty u neplněného PVA).

6 Literatura

- [1] Kroisová, D., Vacková, T.: Přírodní rostlinná vlákna jako vyztužující prvky polymerních matric. In.: Plasty a kaučuk 43 (3-4), 2006, s. 6-8. ISSN 0322-7340. *překlad: Natural Plant Fibres as a Reinforcement of Polymer Matrice.*
- [2] Modding. *Všeobecný popis materiálů používaných při výrobě kompozitů.* [online]. [cit. 2007-04-10]. Dostupné z URL <<http://modding.cz/?p=73>>
- [3] Hull, D., Clyne, T. W.: An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, Second Edition 1996
- [4] Staněk, J., Hynčicová, J., Kovačič, V. Nauka o textilních materiálech. VŠST v Liberci. 1986
- [5] Web magazín časopisu Receptář. *Bambus to zní hrdě.* [online]. [cit. 2006-11-15]. Dostupné z URL <<http://www.ireceptar.cz/forum/novy-prispevek/bambus-to-zni-hrde>>
- [6] Stamm, Jörg: Guadia o, Kontext, Brief an Prof. Wilfried Führer, Lehrstuhl für Baukonstruktion II (Tragwerklehre), RWTH Aachen. [cit. 2006-12-08]. Dostupné z URL <<http://bambus.rwth-aachen.de/de/PDF-Files/Mechanische%20Eigenschaften%20von%20Bambus%20-%20%20Version%202.pdf>>
- [7] Otevřená encyklopedie Wikipedia. *Papír.* [online]. [cit. 2006-11-28]. Dostupné z URL <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Pap%C3%ADr>>
- [8] Andrlík, K., Bareš, J. Výroba celulózy a papíru. SNTL Praha. 1967
- [9] Otevřená encyklopedie Wikipedia. *Celulosa.* [online]. [cit. 2006-11-28]. Dostupné z URL <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Celul%C3%B3za>>
- [10] Kaplanová, S. Diplomová práce, TU Liberec 2006
- [11] Sova, M., Krebs, J. a kol. Termoplasty v praxi, Praktická příručka pro konstruktéry a uživatele termoplastů, VERLAG DAS HÖFER 2001
- [12] Pluhař, J. a kol. Nauka o materiálu, SNTL/ALFA Praha 1986

8 Přílohy

1. Naměřené průměry odlitých vzorků
2. Rozměry jednotlivých vzorků
3. Tabulkové hodnoty ze zkoušky tahem
4. Grafy závislosti napětí – tažnosti

1. Naměřené průměry odlitých vzorků

Tab. č. 1.

Ø vzorků (mm)	pro 3 %	pro 6 %	pro 9 %	pro 30 %
Vzorky				
Len	132	143	135	145
Konopí	130	132	132	136
Bambus	138	139	138	140
Papír nebělený	136	139	141	143
Papír bělený	139	132	-	-

Tab. č. 2.

Vzorek	Ø (mm)
PVA	138

2. Rozměry jednotlivých vzorků

* Tyto vzorky nebyly započítávány do střední hodnoty, ani nebyly v grafech znázorněny do průměrných křivek z důvodu přetržení v čelistech při zkoušce tahem.

Tab. č. 3. PVA – čistý.

Vzorek	1	2	3*	4	5	6	7*	8
Výška (mm)								
h1	1,396	1,304	1,311	1,077	1,429	1,449	1,253	1,241
h2	1,5	1,324	1,288	1,12	1,343	1,369	1,408	1,217
h3	1,43	1,325	1,218	1,159	1,377	1,272	1,445	1,253
h4	1,435	1,336	1,271	1,133	1,347	1,274	1,316	1,275
h5	1,328	1,365	1,243	1,153	1,589	1,108	1,216	1,159
h	1,4178	1,3308	1,2662	1,1284	1,417	1,2944	1,3276	1,229
Šířka (mm)								
b1	11,591	10,683	9,861	10,289	10,389	9,896	10,212	9,865
b2	11,381	10,647	10,072	10,196	10,373	9,854	10,033	10,093
b3	11,82	10,624	10,155	10,041	10,317	9,661	10,173	9,956
b4	11,56	10,624	10,173	9,919	10,163	9,693	10,095	9,668
b5	11,487	10,517	10,306	9,873	10,125	9,596	10,144	9,669
b	11,5678	10,619	10,1134	10,0636	10,2734	9,74	10,1314	9,8502

Tab. č. 4. Len 3 %.

Vzorek	1*	2	3*	4	5	6*	7
Výška (mm)							
h1	1,241	1,613	1,37	1,243	1,45	1,181	1,364
h2	1,05	1,446	1,339	1,097	1,275	1,025	1,216
h3	1,02	1,393	1,181	1,188	1,491	1,013	0,986
h4	1,179	1,458	1,281	1,323	1,082	1,077	1,001
h5	1,051	1,417	1,254	1,114	1,326	1,289	0,951
h	1,1082	1,4654	1,285	1,193	1,3248	1,117	1,1036
Šířka (mm)							
b1	10,849	10,285	10,407	10,182	9,679	10,33	10,181
b2	10,899	10,083	10,549	9,921	9,629	10,38	10,186
b3	10,951	9,925	10,366	9,99	9,528	10,409	9,904
b4	10,974	9,91	10,363	9,827	9,712	10,448	9,838
b5	10,789	10,028	10,567	10,03	9,654	10,493	9,783
b	10,8924	10,0462	10,4504	9,99	9,6404	10,412	9,9784

Tab. č. 5. Len 6 %.

Vzorek	1	2	3	4*	5	6*	7
Výška (mm)							
h1	0,91	2,077	1,165	1,041	0,882	1,024	1,064
h2	1,107	1,014	1,149	1,142	0,932	0,958	0,732
h3	0,721	0,781	0,881	1,104	1,035	1,072	0,909
h4	0,703	1,37	0,841	0,58	1,464	0,983	0,711
h5	1,054	1,237	0,911	1,252	1,53	1,16	1,03
h	0,899	1,2958	0,9894	1,0238	1,1686	1,0394	0,8892
Šířka (mm)							
b1	10,007	10,049	9,296	10,469	10,285	9,548	10,8
b2	10,168	10,034	9,124	10,498	10,126	9,669	10,816
b3	10,351	10,047	9,039	10,557	10,143	9,608	10,822
b4	10,214	10,07	8,895	10,695	10,27	9,63	10,803
b5	10,224	10,149	9,003	10,754	10,218	9,639	10,761
b	10,1928	10,0698	9,0714	10,5946	10,2084	9,6188	10,8004

Tab. č. 6. Len 9 %.

Vzorek	1	2	3*	4*	5	6
Výška (mm)						
h1	1,43	1,52	1,052	1,481	0,859	1,503
h2	1,419	1,248	1,094	1,143	1,78	1,35
h3	1,275	1,16	1,13	1,233	1,207	1,193
h4	1,3	1,027	1,474	1,132	1,59	1,156
h5	1,667	1,304	1,264	1,39	1,349	1,253
h	1,4182	1,2518	1,2028	1,2758	1,357	1,291
Šířka (mm)						
b1	10,135	10,472	9,639	9,636	10,071	9,839
b2	10,316	10,27	9,69	9,632	9,995	9,762
b3	10,439	10,237	9,796	9,717	9,898	9,901
b4	10,576	10,221	9,761	9,804	9,903	9,875
b5	10,52	10,116	9,693	9,84	9,918	10,055
b	10,3972	10,2632	9,7158	9,7258	9,957	9,8864

Tab. č. 7. Len 30 %.

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7
Výška (mm)							
h1	3,163	3,152	2,988	3,802	2,549	3,182	3,367
h2	3,38	3,35	3,455	3,275	2,854	3,345	3,163
h3	3,25	3,691	3,047	3,081	2,448	2,864	3,141
h4	3,652	3,448	3,523	2,858	3,244	3,047	2,651
h5	3,103	3,37	3,44	2,999	3,427	3,77	2,575
h	3,3096	3,4022	3,2906	3,203	2,9044	3,2416	2,9794
Šířka (mm)							
b1	9,886	10,173	10,366	9,671	10,088	10,794	10,476
b2	9,979	9,898	9,947	9,708	10,08	10,679	10,223
b3	9,828	10,078	10,323	9,742	10,21	10,659	10,302
b4	9,972	10,19	10,325	10,212	10,309	10,79	10,123
b5	9,796	9,99	9,957	10,013	10,304	10,447	10,134
b	9,8922	10,0658	10,1836	9,8692	10,1982	10,6738	10,2516

Tab. č. 8. Konopí 3 %.

Vzorek	1*	2	3	4	5	6*	7*
Výška (mm)							
h1	1,199	1,297	1,105	1,249	1,337	1,621	1,247
h2	1,097	1,223	1,156	1,249	1,31	1,661	1,124
h3	1,119	1,209	1,119	1,21	1,186	1,594	1,179
h4	1,138	1,233	1,241	1,309	1,249	1,457	1,072
h5	1,125	1,186	1,16	1,348	1,265	1,376	1,049
h	1,1356	1,2296	1,1562	1,273	1,2694	1,5418	1,1342
Šířka (mm)							
b1	10,304	9,825	9,846	10,475	10,222	10,205	10,138
b2	10,2	9,757	9,873	10,44	10,145	10,019	10,033
b3	10,258	9,657	9,845	10,542	10,186	9,931	10,154
b4	10,286	9,855	9,899	10,463	10,194	10,066	10,156
b5	10,215	9,807	9,929	10,26	10,032	10,078	10,193
b	10,2526	9,7802	9,8784	10,436	10,1558	10,0598	10,1348

Tab. č. 9. Konopí 6 %.

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7
Výška (mm)							
h1	1,24	1,17	1,155	1,19	1,242	1,264	1,253
h2	1,249	1,301	1,059	1,339	1,234	1,16	1,102
h3	1,264	1,226	1,265	1,245	1,15	1,462	0,938
h4	1,285	1,161	1,257	1,313	1,216	1,17	1,201
h5	1,127	1,255	1,344	1,201	1,455	1,144	1,185
h	1,233	1,2226	1,216	1,2576	1,2594	1,24	1,1358
Šířka (mm)							
b1	10,423	9,642	9,947	9,897	10,278	10,514	10,458
b2	10,492	9,746	9,859	9,856	10,303	10,591	10,47
b3	10,506	9,789	9,824	9,948	10,387	10,621	10,659
b4	10,515	9,827	9,881	10,053	10,247	10,704	10,725
b5	10,57	9,735	9,838	10,026	10,227	10,886	10,726
b	10,5012	9,7478	9,8698	9,956	10,2884	10,6632	10,6076

Tab. č. 10. Konopí 9 %.

Vzorek	1	2	3*	4	5	6	7
Výška (mm)							
h1	1,042	1,26	0,978	1,258	1,565	1,474	1,61
h2	1,047	1,268	1,112	1,28	1,268	1,413	1,245
h3	1,04	1,172	1,062	1,071	1,282	1,255	1,223
h4	1,153	1,224	1,103	1,224	1,286	1,269	1,2
h5	1,322	1,207	1,268	1,127	1,133	1,493	1,398
h	1,1208	1,2262	1,1046	1,192	1,3068	1,3808	1,3352
Šířka (mm)							
b1	9,994	10,079	10,69	10,132	9,048	9,861	10,776
b2	10,091	10,01	10,894	9,911	9,244	9,808	10,582
b3	10,146	9,996	10,748	10,194	9,132	9,843	10,706
b4	10,179	10,093	10,455	10,183	9,224	9,856	10,604
b5	10,234	10,027	10,478	10,23	9,359	9,939	10,798
b	10,1288	10,041	10,653	10,13	9,2014	9,8614	10,6932

Tab. č. 11. Konopí 30 %.

Vzorek (mm)	1	2	3	4	5	6	7
Výška (mm)							
h1	2,238	2,406	2,446	2,49	2,669	2,081	2,278
h2	2,319	2,46	2,6	2,21	2,705	2,253	2,331
h3	2,473	2,45	2,679	2,33	2,34	2,279	2,554
h4	2,492	2,751	2,532	2,475	2,38	1,974	2,277
h5	2,403	2,472	2,413	2,264	2,392	2,355	2,418
h	2,385	2,5078	2,534	2,3538	2,4972	2,1884	2,3716
Šířka (mm)							
b1	10,668	10,314	10,926	9,886	10,582	10,141	10,099
b2	11,252	10,019	10,505	10,272	10,19	10,269	10,309
b3	10,83	10,211	10,559	10,115	10,321	10,189	10,097
b4	11,258	10,373	10,377	10,111	10,358	9,911	10,045
b5	11,171	10,313	10,421	10,322	10,096	9,692	10,274
b	11,0358	10,246	10,5576	10,1412	10,3094	10,0404	10,1648

Tab. č. 12. Bambus 3 %.

Vzorek	1	2	3*	4*	5	6	7*
Výška (mm)							
h1	0,961	0,914	0,869	0,988	1,057	0,96	1,05
h2	0,919	0,931	1,003	1,005	1,014	0,904	1,09
h3	0,856	0,885	0,968	0,997	0,989	0,942	1,056
h4	0,872	0,874	0,915	0,958	0,861	0,935	1,026
h5	0,883	0,907	0,918	0,953	0,995	0,894	0,958
h	0,8982	0,9022	0,9346	0,9802	0,9832	0,927	1,036
Šířka (mm)							
b1	9,843	9,479	10,135	9,691	9,751	10,384	10,153
b2	9,808	9,44	10,235	9,644	9,708	10,378	10,09
b3	9,715	9,638	10,397	9,704	9,627	10,376	10,138
b4	9,686	9,652	10,551	9,626	9,685	10,562	10,139
b5	9,783	9,681	10,545	9,615	9,707	10,502	10,066
b	9,767	9,578	10,3726	9,656	9,6956	10,4404	10,1172

Tab. č. 13. Bambus 6 %.

Vzorek	1	2	3*	4	5	6	7
Výška (mm)							
h1	1,172	1,007	0,938	1,179	1,074	1,041	1,261
h2	1,166	1,036	0,939	1,14	1,105	1	1,19
h3	1,084	1,023	1,02	0,964	1,059	1,061	0,954
h4	0,951	1,09	1,091	0,954	1,167	1,137	0,943
h5	0,944	1,207	1,044	0,958	1,161	1,203	0,96
h	1,0634	1,0726	1,0064	1,039	1,1132	1,0884	1,0616
Šířka (mm)							
b1	9,414	9,906	10,002	9,254	10,341	10,797	10,758
b2	9,355	10,096	10,039	9,327	10,241	10,658	10,558
b3	9,391	9,927	10,064	9,324	10,193	10,77	10,738
b4	9,417	10,002	10,089	9,366	10,102	10,65	10,763
b5	9,439	9,897	10,093	9,503	10,042	10,752	10,756
b	9,4032	9,9656	10,0574	9,3548	10,1838	10,7254	10,7146

Tab. č. 14. Bambus 9 %.

Vzorek	1*	2	3*	4	5*	6	7
Výška (mm)							
h1	1,151	1,284	1,069	1,1	1,137	1,064	1,102
h2	1,146	1,257	1,082	1,062	1,161	1,092	1,137
h3	1,13	1,302	1,103	1,036	1,078	1,036	1,163
h4	1,131	1,179	1,031	0,998	1,15	1,012	1,208
h5	1,065	1,17	0,999	1,008	1,122	1,05	1,17
h	1,1246	1,2384	1,0568	1,0408	1,1296	1,0508	1,156
Šířka (mm)							
b1	9,839	9,407	10,757	9,842	10,256	10,457	10,449
b2	9,932	9,461	10,756	9,861	10,165	10,36	10,507
b3	9,952	9,601	10,565	9,749	10,134	10,429	10,315
b4	9,909	9,375	10,448	9,774	10,125	10,337	10,409
b5	9,948	9,633	10,424	9,801	10,269	10,313	10,488
b	9,916	9,4954	10,59	9,8054	10,1898	10,3792	10,4336

Tab. č. 15. Bambus 30 %.

Vzorek	1	2	3*	4	5*	6*	7	8
Výška (mm)								
h1	2,093	2,196	1,997	2,33	1,941	1,746	1,734	2,348
h2	2,238	2,107	2,019	2,321	1,67	1,709	2,098	2,086
h3	2,069	2,045	2,357	2,081	1,566	1,841	2,69	2,048
h4	2,018	1,978	2,373	2,173	1,813	1,718	2,116	2,093
h5	1,864	2,005	2,131	1,908	1,735	1,94	2,099	2,034
h	2,0564	2,0662	2,1754	2,1626	1,745	1,7908	2,1474	2,1218
Šířka (mm)	10,914	10,128	9,821	11,433	9,582	10,215	10,479	11,283
b1	10,823	10,393	9,887	11,426	9,909	10,367	10,622	11,526
b2	11,268	10,318	10,018	11,298	9,842	10,18	10,698	11,56
b3	11,239	10,323	10,048	11,381	9,876	10,209	10,419	11,341
b4	11,105	10,679	9,928	11,313	9,784	10,146	10,22	11,516
b5								
	11,0698	10,3682	9,9404	11,3702	9,7986	10,2234	10,4876	11,4452
b								

Tab. č. 16. Papír nebělený 3 %.

Vzorek	1	2	3	4	5
Výška (mm)					
h1	1,001	1,437	1,013	1,096	1,288
h2	0,958	1,28	0,952	0,995	1,221
h3	1,085	1,17	0,897	1,017	1,037
h4	1,277	1,18	0,96	1,168	0,955
h5	1,133	1,25	1,393	1,228	0,983
h	1,0908	1,2634	1,043	1,1008	1,0968
Šířka (mm)					
b1	10,063	9,912	9,739	10,175	10,336
b2	10,004	9,889	9,799	10,08	10,387
b3	10,049	9,781	9,744	10,12	10,3
b4	10,049	9,776	9,824	10,015	10,239
b5	10,063	9,71	9,995	10,058	10,135
b	10,0456	9,8136	9,8202	10,0896	10,2794

Tab. č. 17. Papír nebělený 6 %.

Vzorek	1*	2	3	4	5	6	7
Výška (mm)							
h1	1,187	0,98	0,835	0,737	0,722	0,742	0,735
h2	0,951	1,026	0,881	0,844	0,817	0,791	0,831
h3	0,952	1,219	0,908	0,925	1,076	0,874	1,024
h4	0,948	1,289	1,04	0,965	1,071	1,064	1,084
h5	0,974	1,293	1,2	0,961	1,276	1,15	1,311
h	1,0024	1,1614	0,9728	0,8864	0,9924	0,9242	0,997
Šířka (mm)							
b1	9,792	9,762	10,107	9,991	10,29	9,839	10,246
b2	9,957	9,751	10,089	10,033	10,27	9,925	10,238
b3	9,804	9,687	10,095	10,035	10,218	9,847	10,236
b4	9,908	9,801	9,888	10,125	10,242	9,849	10,303
b5	10,094	9,719	9,952	10,218	10,314	9,858	10,09
b	9,911	9,744	10,0262	10,0804	10,2668	9,8636	10,2226

Tab. č. 18. Papír nebělený 9 %.

Vzorek	1	2	3*	4*	5	6	7
Výška (mm)							
h1	1,106	1,16	1,309	1,336	0,932	0,917	1,07
h2	1,32	1,156	1,199	1,294	0,875	1,182	1,161
h3	0,97	1,037	1,254	1,115	1,1	1,149	1,205
h4	1,022	1,13	1,254	1,151	1,133	1,115	1,186
h5	1,093	1,046	1,207	1,142	1,16	1,117	1,27
h	1,1022	1,1058	1,2446	1,2076	1,04	1,096	1,1784
Šířka (mm)							
b1	9,937	10,472	9,851	9,985	10,231	10,269	10,243
b2	9,875	10,513	9,933	10,093	10,137	10,215	10,058
b3	9,904	10,436	9,867	10,021	9,884	10,196	10,127
b4	9,766	10,495	9,938	10,055	9,803	10,151	9,992
b5	9,701	10,565	9,94	9,991	9,727	10,223	10,052
b	9,772	10,543	9,883	10,036	9,702	10,278	10,09

Tab. č. 19. Papír nebělený 30 %.

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7
Výška (mm))							
h1	2,317	2,303	2,748	2,455	2,265	2,561	2,915
h2	2,785	2,471	2,632	2,623	2,335	2,783	2,582
h3	2,593	2,415	2,553	2,635	2,535	2,438	2,836
h4	2,049	2,36	2,643	2,403	2,581	2,491	2,641
h5	2,642	2,347	2,496	2,429	2,704	2,542	2,523
h	2,4772	2,3792	2,6144	2,509	2,484	2,563	2,6994
Šířka (mm)							
b1	9,532	10,59	10,485	10,147	9,811	10,923	10,005
b2	9,503	10,443	10,691	10,032	9,951	10,658	10,147
b3	9,364	10,733	10,9	9,709	10,019	10,589	10,068
b4	9,603	10,625	10,444	9,922	9,897	10,535	9,971
b5	9,818	10,539	10,427	9,925	9,898	10,448	10,03
b	9,564	10,586	10,5894	9,947	9,9152	10,6306	10,0442

Tab. č. 20. Papír bělený 3 %.

Vzorek	1*	2	3	4*	5	6	7*
Výška (mm)							
h1	0,93	1,332	0,859	1,128	0,918	0,971	0,939
h2	1,121	1,1	0,859	1,124	1,131	1,112	1,022
h3	0,911	1,035	0,856	1,115	1,112	0,823	1,14
h4	0,854	1,26	1,097	1,176	1,084	1,123	1,143
h5	1,154	1,139	1,054	1,042	1,26	1,118	1,168
h	0,994	1,1732	0,945	1,117	1,101	1,0294	1,0824
Šířka (mm)							
b1	10,011	10,787	10,159	9,974	9,739	9,78	9,833
b2	9,877	10,586	10,258	9,893	9,766	9,594	10,058
b3	10,251	10,514	10,344	10,011	9,865	9,651	9,963
b4	10,167	10,452	10,391	9,947	9,742	9,587	9,964
b5	10,19	10,378	10,403	9,793	9,847	9,572	9,9
b	10,0992	10,5434	10,311	9,9236	9,7918	9,6368	9,9436

Tab. č. 21. Papír bělený 6 %.

Vzorek	1	2	3	4	5	6	7*
Výška (mm)							
h1	1,423	1,22	1,317	1,339	1,05	1,367	1,213
h2	1,414	1,194	1,501	1,504	1,321	1,311	1,316
h3	1,439	1,201	1,192	1,39	1,436	1,24	1,651
h4	1,345	1,351	1,09	1,71	1,251	1,413	1,342
h5	1,371	1,241	1,47	1,611	1,349	1,192	1,227
h	1,3984	1,2414	1,314	1,5108	1,2814	1,3046	1,3498
Šířka (mm)							
b1	9,838	10,169	9,823	10,201	9,595	10,55	10,458
b2	9,841	10,244	9,85	10,271	9,558	10,397	10,378
b3	9,805	10,183	9,792	10,461	9,53	10,579	10,408
b4	9,953	9,925	9,9	10,495	9,587	10,386	10,5
b5	9,989	9,782	9,938	10,459	9,534	10,478	10,365
b	9,8852	10,0606	9,8606	10,3774	9,5608	10,478	10,4218

3. Tabulkové hodnoty ze zkoušky tahem

* Tyto vzorky nebyly započítávány do střední hodnoty, ani nebyly v grafech znázorněny do průměrných křivek z důvodu přetržení v čelistech při zkoušce tahem.

Tab. č. 22. PVA - čistý

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	12,5	194,8	66,4
2	11,55	314,9	63,47
3*	10,34	242,7	73,09
4	9,323	190,8	54,3
5	11,69	278	75,77
6	11,82	195,5	77,44
7*	11,11	293,9	66,56
8	11,41	270,6	52,14
Střední hodnota	11,382	240,267	64,9

Tab. č. 23. Len 3 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1*	8,976	36,51	107
2	7,865	24,56	96,89
3*	8,783	31,19	525,9
4	8,849	27,46	11,5
5	7,276	31,51	81,82
6*	8,329	29,93	77,12
7	8,569	23,05	98,86
Střední hodnota	8,139	26,645	97,267

Tab. č. 23. Len 6%.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	10,55	10,88	181,3
2	7,652	13,55	121,2
3	9,821	12,96	158,8
4*	9,859	13,43	168,6
5	9,183	11,3	175,6
6*	9,659	14,7	168,7
7	11,16	9,273	231
Střední hodnota	9,296	11,97	173,58

Tab. č. 24. Len 9 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	9,509	7,357	221,6
2	11,08	7,41	281,2
3*	10,46	6,232	282,9
4*	10,35	7,313	264,4
5	9,856	4,903	292,9
6	12,68	7,934	299,8
Střední hodnota	10,78	6,901	273,88

Tab. č. 25. Len 30 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	3,036	2,269	185,1
2	2,589	1,856	197,2
3	2,353	1,874	162,6
4	2,901	2,172	191,6
5	4,92	2,705	248,1
6	3,746	1,991	259,2
7	4,904	2,252	290,1
Střední hodnota	3,493	2,16	219,1

Tab. č. 26. Konopí 3 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1*	9,168	44,85	79,92
2	9,404	40,03	87,6
3	9,456	42,25	86,25
4	9,872	40,7	92,3
5	9,53	40	87,7
6*	10,47	41,54	82,96
7*	8,333	45,46	65,28
Střední hodnota	9,565	40,745	88,46

Tab. č. 27. Konopí 6 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	11,46	21,4	150,2
2	11,26	27,15	134,6
3	10,98	30,26	116,6
4	11,02	34,55	115,8
5	10,72	26,57	129
6	11,13	22,73	121,3
7	11,63	25,91	149,6
Střední hodnota	11,17	26,94	130,6

Tab. č. 28. Konopí 9 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	11,16	15,55	172,2
2	11,37	18,15	164,9
3*	11,79	17,24	179,4
4	11,54	14,88	180,1
5	10,99	16,27	167,5
6	12,91	18,14	178,7
7	12,13	18,17	175,1
Střední hodnota	11,7	16,91	173,08

Tab. č. 29. Konopí 30 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	8,132	4,048	340,6
2	10,74	4,51	418,5
3	8,595	3,473	382,7
4	7,875	2,887	404,3
5	10,23	4,645	404,1
6	8,79	3,229	437,7
7	10,04	3,307	446,2
Střední hodnota	9,201	3,728	404,9

Tab. č. 30. Bambus 3 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	8,361	51,96	70,43
2	7,955	59,29	67,83
3*	8,351	72,24	68,66
4*	7,912	52,81	69,62
5	8,111	67,46	57,23
6	8,345	59,34	80,15
7*	8,267	49,16	84,72
Střední hodnota	8,193	59,51	68,91

Tab. č. 31. Bambus 6 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	8,158	28,93	92,22
2	8,433	32,28	98,59
3*	8,674	34,12	108,5
4	8,627	25,27	108
5	8,26	40,36	97,11
6	8,576	28,45	132,1
7	8,613	25,42	120,9
Střední hodnota	8,444	30,118	108,153

Tab. č. 32. Bambus 9 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1*	9,136	16,05	157
2	8,469	19,65	124
3*	8,157	23,95	113,2
4	8,349	19,84	131,4
5*	8,754	17,34	149,5
6	9,239	19,48	142,2
7	9,794	16,76	179,8
Střední hodnota	8,963	18,93	144,35

Tab. č. 33. Bambus 30 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	8,498	7,594	244,3
2	7,724	6,417	250,5
3*	6,756	6,12	215,2
4	7,549	6,69	234,6
5*	9,07	7,635	255,6
6*	8,888	6,295	239,8
7	7,334	5,423	255,1
8	7,267	6,053	232,6
Střední hodnota	7,674	6,435	243,42

Tab. č. 34. Papír nebělený 3 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	8,464	54,82	66,24
2	8,398	62,2	69,23
3	8,052	50,48	72,17
4	8,4	52,33	75,09
5	8,249	48,6	66,79
Střední hodnota	8,312	53,69	69,9

Tab. č. 35. Papír nebělený 6 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1*	8,275	56,5	66,73
2	7,385	21,91	75,81
3	9,012	26,64	100,7
4	10,18	30,15	102,9
5	8,45	24,57	91,78
6	9,39	25,7	105,5
7	8,196	24,51	90,6
Střední hodnota	8,768	25,58	79,45

Tab. č. 36. Papír nebělený 9 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	11,19	23,11	140,9
2	11,85	23,34	136,4
3*	10,32	22,13	132,7
4*	10,78	19,93	159,9
5	11,22	21,41	143,1
6	11,07	20,92	132,2
7	10,18	22,07	139,6
Střední hodnota	11,102	22,14	138,44

Tab. č. 37. Papír nebělený 30 %.

Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	7,843	4,278	282,2
2	8,201	4,179	318,8
3	6,596	3,63	258,7
4	7,392	3,465	323,2
5	7,219	3,358	297,3
6	6,728	3,416	248,2
7	6,965	3,425	283,5
Střední hodnota	7,278	3,679	287,4

Tab. č. 38. Papír bělený 3 %.

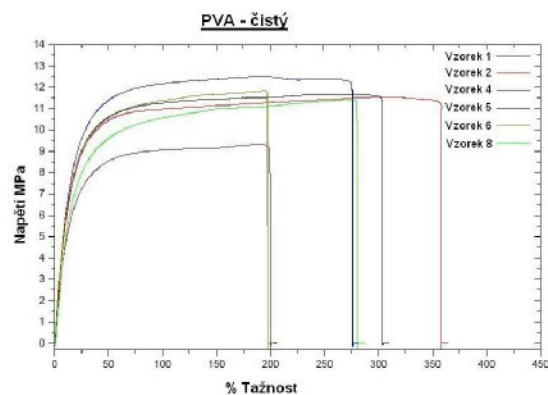
Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1*	8,793	48,41	65,02
2	8,027	49,65	52
3	8,483	47,7	69,22
4*	7,913	47,52	51,73
5	8,55	51,95	66,5
6	8,298	60,99	70,75
7*	9,303	62,85	71,86
Střední hodnota	8,339	52,572	64,62

Tab. č. 39. Papír bělený 6 %.

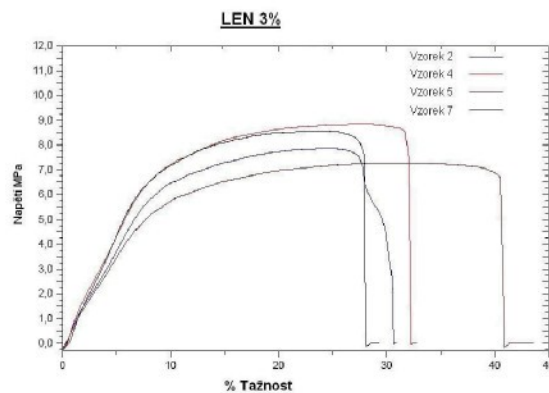
Vzorek	Napětí v max. zatížení (MPa)	% Deformace v max. zatížení (%)	Modul pružnosti (MPa)
1	9,44	43,42	67,84
2	9,94	42,97	86,01
3	9,407	40,45	79,82
4	8,39	41,76	65,22
5	9,382	40,08	76,41
6	9,833	41,33	71,81
7*	8,829	40,16	76,4
Střední hodnota	9,398	41,65	74,518

4. Grafy závislosti napětí – tažnosti.

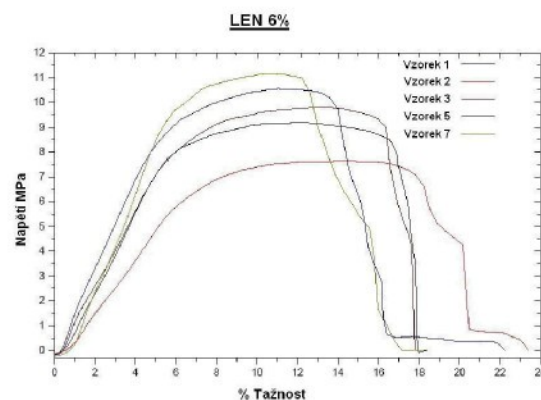
Tyto grafy jsou původní ze zkušebního stroje INSTRON.



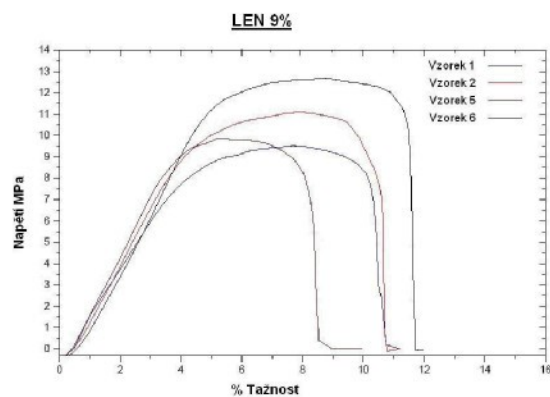
Graf č. 1. Graf závislosti napětí – tažnosti pro čistý polyvinylalkohol.



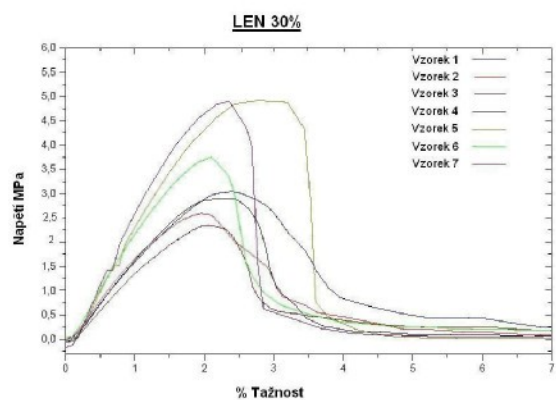
Graf č. 2 Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný lněnými vlákny (plnění 3 %, hmotnostních)



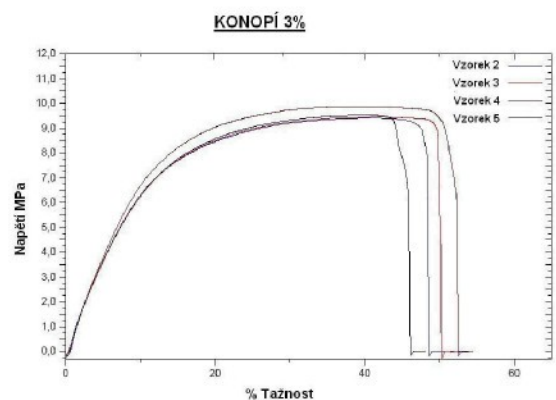
Graf č. 3. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný lněnými vlákny (plnění 6 %, hmotnostních)



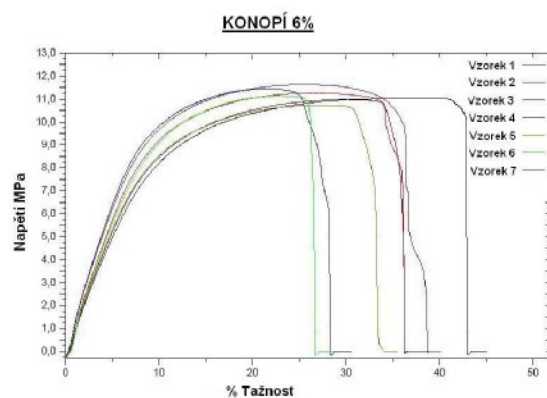
Graf č. 4. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný lněnými vlákny (plnění 9 %, hmotnostních)



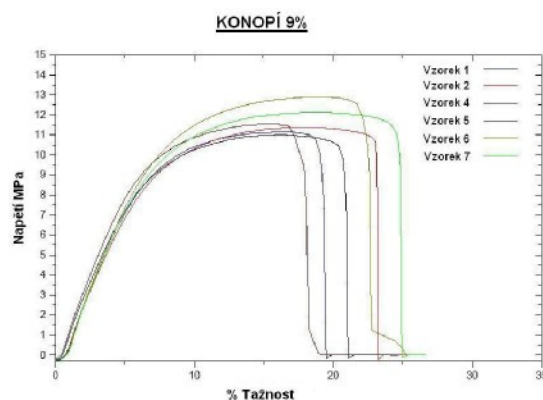
Graf č. 5. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný lněnými vlákny (plnění 30 %, hmotnostních)



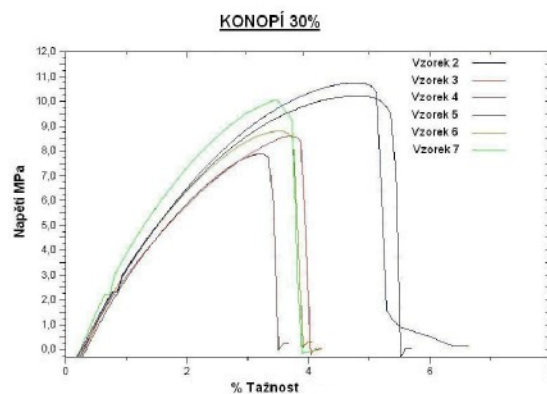
Graf č. 6. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný konopnými vlákny (plnění 3 %, hmotnostních)



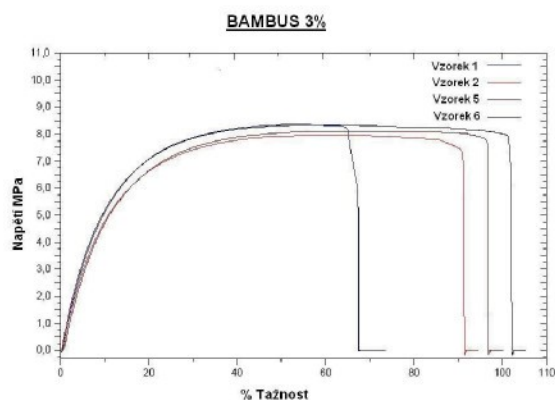
Graf č. 7. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný konopnými vlákny (plnění 6 %, hmotnostních)



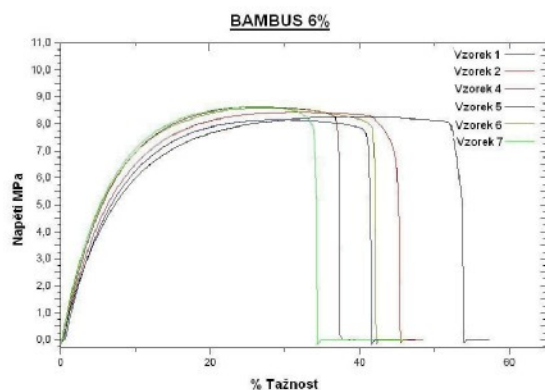
Graf č. 8. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný konopnými vlákny (plnění 9 %, hmotnostních)



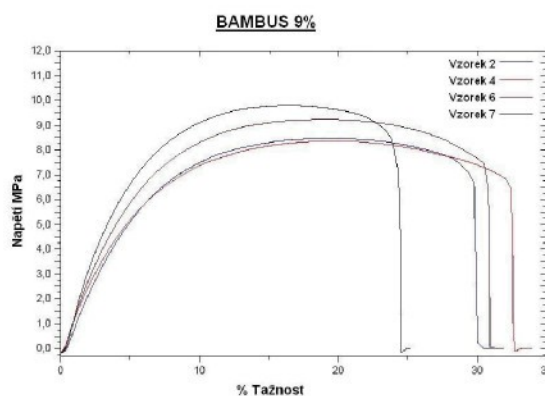
Graf č. 9. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný konopnými vlákny (plnění 30 %, hmotnostních)



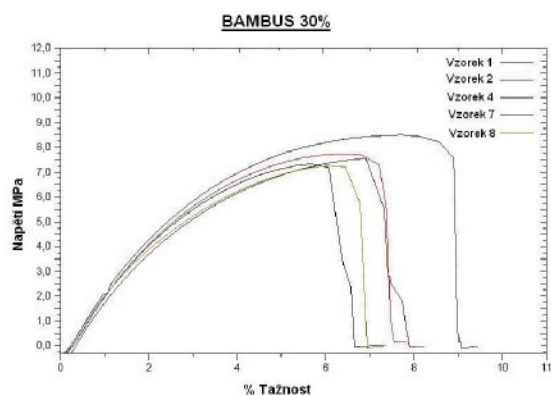
Graf č. 10. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný bambusovými vlákny (plnění 3 %, hmotnostních)



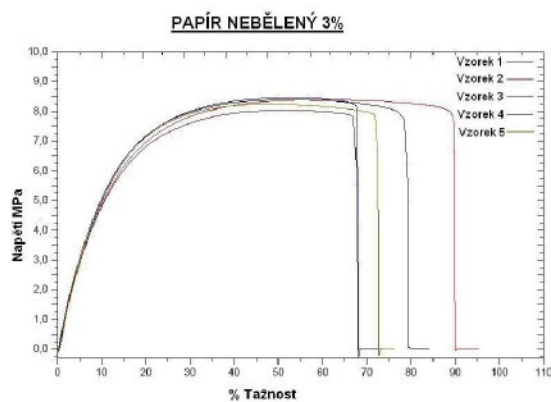
Graf č. 11. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný bambusovými vlákny (plnění 6 %, hmotnostních)



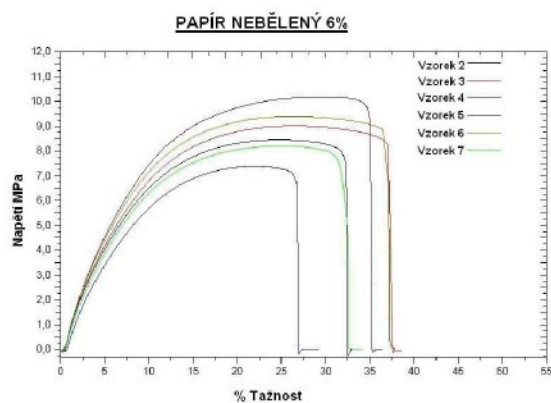
Graf č. 12. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný bambusovými vlákny (plnění 9 %, hmotnostních)



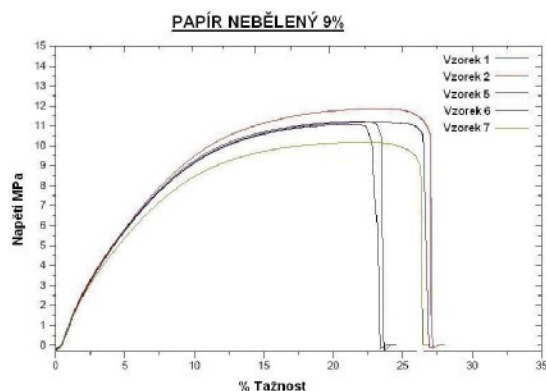
Graf č. 13. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný bambusovými vlákny (plnění 30 %, hmotnostních)



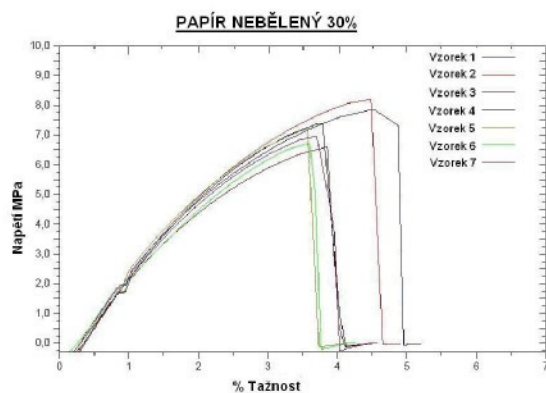
Graf č. 14. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný celulózovými vlákny z neběleného recyklovaného papíru (plnění 3 %, hmotnostních)



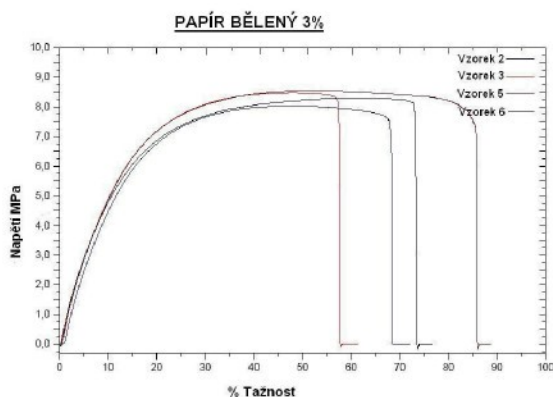
Graf č. 15. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný celulózovými vlákny z neběleného recyklovaného papíru (plnění 6 %, hmotnostních)



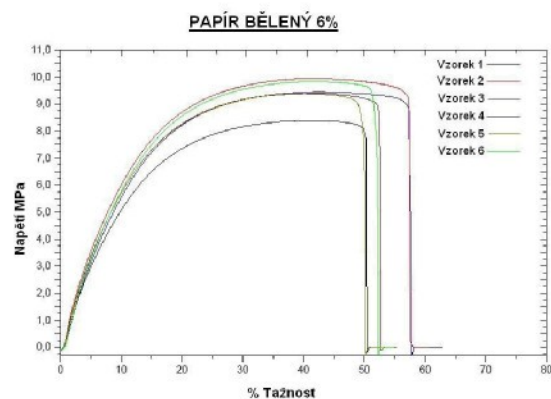
Graf č. 16. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný celulózovými vlákny z neběleného recyklovaného papíru (plnění 9 %, hmotnostních)



Graf č. 17. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný celulózovými vlákny z neběleného recyklovaného papíru (plnění 30 %, hmotnostních)



Graf č. 18. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný celulózovými vlákny z běleného recyklovaného papíru (plnění 3 %, hmotnostních)



Graf č. 19. Graf závislosti napětí – tažnosti pro polyvinylalkohol plněný celulóзовými vlákny z běleného recyklovaného papíru (plnění 6 %, hmotnostních)