

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

**MECHANICKÉ VLASTNOSTI VLÁKEN ZÍSKANÝCH
Z ROSTLINY ENSETE VENTRICOSUM**

Katedra mechaniky a strojnictví

Doktorská disertační práce

ČESTMÍR MIZERA

2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele a uvedl veškerou použitou literaturu. Tištěná a elektronická verze práce se doslovně shodují.

JMÉNO A PŘÍJMENÍ: Ing. Čestmír Mizera

PODPIS:

DATUM: 3.5.2017

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu disertační práce prof. Ing. Davidu Herákovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování této disertační práce. Za pomoc při provádění experimentálních měření zasluží poděkování také Ing. Petr Hrabě, Ph.D. Dále bych rád poděkoval Ing. Kristině Rušarové, Ph.D. za pomoc při řešení disertační práce a možnosti účasti na konferenci v Etiopii.

Abstrakt

Ochrana životního prostředí a poptávka spotřebitelů po nových konstrukčních materiálech vytváří tlak na hledání nových materiálů na bázi přírodních obnovitelných zdrojů. Jeden ze způsobů využití přírodních materiálů je použití přírodních vláken. Velmi zajímavou rostlinou pro produkci přírodních vláken je „falešný“ banánovník (*Ensete ventricosum*). Cílem této disertační práce je popis mechanických vlastností vláken rostliny „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) a sestavení matematických modelů popisujících mechanické chování těchto vláken. Byla stanovena délka, jemnost, hustota a příčný řez vláken. S využitím elektronového mikroskopu byly stanoveny snímky řezu a struktury povrchu vláken. Dále byly vytvořeny vzorky vláken s upínací délkou 25 mm a provedeny tahové zkoušky. Bylo zjištěno napětí vláken při přetržení ($390,33 \pm 21,96$) MPa při ekvivalentním průměru vláken (205 ± 10) μm , relativní deformace ($0,021 \pm 2 \cdot 10^{-5}$), modul pružnosti (23470 ± 3328) MPa a deformační objemová energie ($3,39 \pm 0,22$) Jm^{-3} . Naměřené hodnoty tahového napětí byly proloženy pomocí Marquardt – Levenbergova algoritmu a byl sestaven obecný model mechanického chování vláken v tahu. Efekt délky vláken, teploty a vlhkosti na tahové vlastnosti byl také zkoumán. Pomocí exponenciální rovnice byl sestaven obecný matematický model popisující vliv délky vláken na tahové vlastnosti. Z hlediska viskoelastického chování vláken byl zkoumán vliv rychlosti deformace, relaxace a kríp. Byly stanoveny viskoelastické modely pro relaxaci a kríp vláken s využitím obecných Maxwellových a Kelvinových modelů. Dále byly stanoveny hygroskopické vlastnosti a sušicí křivky pro různé teploty sušení vláken. Naměřené hodnoty sušicích křivek byly transformovány do obecného matematického modelu sušení. Všechny navržené matematické modely byly ověřeny pomocí analýzy rozptylu (ANOVA).

Klíčová slova: přírodní materiál, „falešný“ banánovník, tahové vlastnosti, konstrukční prvky

Abstract

Environmental protection and consumer demand for new construction materials are putting pressure on finding new materials based on renewable natural resources. One way of use of natural materials is the use of natural fibres. One very interesting plant for the production of natural fibres is the false banana (*Ensete ventricosum*). The aim of this thesis was to describe the mechanical behaviour of the fibres of false banana plant (*Ensete ventricosum*) and determine mathematical models of these behaviours. Length, fineness, density and cross-sectional area of the fibres were determined. Using scanning electron microscope (SEM) images, the morphology and structure of the fibre surface were determined. Further samples were prepared with fibre clamping length of 25 mm and tensile tests were carried out. Tensile stress at rupture ($390,33 \pm 21,96$) MPa at diameter of the fibres (205 ± 10) μm , strain at rupture ($0,021 \pm 2.10^{-5}$), modulus of elasticity (23470 ± 3328) MPa and deformation volume energy ($3,39 \pm 0,22$) Jm^{-3} were determined. The measured values of tension were fitted using the Levenberg - Marquardt algorithm and the general models of mechanical behaviour of the fibres were determined. Effects of fibre length, temperature and moisture content on mechanical behaviour of fibres were also determined. The general mathematical model expressing the effect of fibre length on tensile properties was determined as an exponential form. In terms the viscoelastic behaviour of the fibres, the influence of strain rate, creep and relaxation was studied. Viscoelastic models describing the relaxation and creep of these fibres were developed based on the general Maxwell and Kelvin models. Hygroscopic properties and drying curves of fibres for different drying air temperatures were also determined. The measured values of the drying curves were transformed into a mathematical model of the drying process. All determined mathematical models were verified by analysis of variance (ANOVA).

Key words: natural material, false banana, tensile properties, design elements

Obsah

Prohlášení	i
Poděkování	ii
Abstrakt	iii
Abstract.....	iv
Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	xi
Úvod	1
1 Přehled o současném stavu poznání	3
1.1 Co je přírodní vlákno?	3
1.1.1 Chemické složení	3
1.1.2 Rozdělení vláken a funkce v přírodě	7
1.1.3 Velikost a tvar	8
1.1.4 Struktura buněčné stěny	10
1.2 Typy vláken	12
1.2.1 Kokosovník ořechoplodý (<i>Cocos nucifera</i>)	13
1.2.2 Banánovník textilní (<i>Musa textillis</i>)	14
1.2.3 Len setý (<i>Linium usitatissimum</i>)	15
1.2.4 Konopí seté (<i>Cannabis sativa</i>)	16
1.2.5 Jutovník (<i>Corchorus</i>)	17
1.2.6 Agáve sisalová (<i>Agave sisalana</i>)	17
1.2.7 Bavlník (<i>Gossypium</i>)	19
1.2.8 Ananasovník chocholatý (<i>Ananas comosus</i>)	19
1.2.9 Plama olejná (<i>Elaeis guineensis</i>)	20
1.2.10 Ibišek konopovitý (<i>Hibiscus cannabinus</i>)	20
1.2.11 Bambus (<i>Bambusa Shreb</i>)	21
1.3 Geometrické vlastnosti	21
1.3.1 Jemnost vláken	21
1.3.2 Délka vláken	22
1.3.3 Příčný řez vláken	24
1.3.4 Morfologie vláken s využitím SEM	26
1.4 Mechanické vlastnosti	29
1.4.1 Variabilita mechanických vlastností vláken	31

1.4.2 Příprava zkušebních vzorků vláken	32
1.4.3 Tahové zkoušky vláken	32
1.4.4 Vliv délky vláken.....	37
1.4.5 Vliv rychlosti deformace vláken.....	37
1.4.6 Relaxace vláken	38
1.4.7 Kríp vláken	40
1.4.8 Chemická modifikace vláken.....	41
1.5 Využití přírodních vláken	43
1.6 Rostlina „falešného“ banánovníku (<i>Ensete ventricosum</i>).....	47
1.6.1 Anatomie.....	47
1.6.2 Botanická klasifikace a oblast pěstování	48
1.6.3 Sklizeň a možnosti využití	49
2 Cíle disertační práce	51
3 Materiály a metody	54
3.1 Materiál.....	54
3.2 Stanovení fyzikálních vlastností	54
3.2.1 Stanovení délky.....	54
3.2.2 Stanovení jemnosti.....	55
3.2.3 Stanovení příčného řezu.....	56
3.2.4 Stanovení vlhkosti a hustoty	57
3.2.5 Stanovení struktury řezu s využitím SEM technologie	58
3.3 Stanovení mechanických vlastností	58
3.3.1 Stanovení tahových vlastností	58
3.3.2 Stanovení vlivu délky	60
3.3.3 Stanovení vlivu teploty a vlhkosti	61
3.4 Stanovení viskoelastických vlastností	62
3.4.1 Stanovení vlivu rychlosti zatěžování	62
3.4.2 Stanovení relaxace	62
3.4.3 Stanovení kríp	63
3.5 Stanovení sušicích křivek a hygroskopických vlastností.....	64
3.6 Analýza dat	65
4 Výsledky a diskuse	66
4.1 Fyzikálních vlastnosti	66

4.1.1 Délka vláken	66
4.1.2 Jemnost vláken.....	66
4.1.3 Příčný řez vláken	67
4.1.4 Vlhkost a hustota vláken.....	68
4.1.5 Struktura řezu vláken s využitím SEM technologie	69
4.2 Mechanické vlastnosti.....	71
4.2.1 Tahové vlastnosti vláken	71
4.2.2 Vliv délky vláken na tahové vlastnosti	75
4.2.3 Vliv teploty a vlhkosti vláken na tahové vlastnosti	79
4.3 Viskoelastické vlastnosti.....	82
4.3.1 Vliv rychlosti zatěžování vláken na tahové vlastnosti.....	82
4.3.2 Kríp vláken	85
4.3.3 Relaxace vláken	88
4.4 Sušicí křivky a hygroskopické vlastnosti.....	92
4.5 Souhrn poznatků	95
5 Závěr	98
Literatura	101

Seznam obrázků

1.1: Schématický diagram struktury stěny rostlinné buňky (Somerville et al., 2004).....	3
1.2: Schéma rostlinné buněčné stěny (McCann & Roberts, 1991).....	5
1.3: Schématické uspořádání vláken v částech rostlin (Eder & Burgert, 2010).....	8
1.4: Délka a průměr vybraných přírodních vláken (Eder & Burgert, 2010).....	9
1.5: Struktura vrstev buněčné stěny (www.bio.miami.edu).....	10
1.6: Schématické uspořádání buněčných stěn (Eder a Burgert, 2010).....	11
1.7: Rozdělení přírodních vláken (Müssig, 2010).....	12
1.8: Struktura plodu kokosovníku (Jayasekara & Amarasinghe, 2010).....	13
1.9: Banánovník textilní (<i>Musa textilis</i>) (Jayasekara & Amarasinghe, 2010).....	14
1.10: (a) Len setý (<i>Linium usitatissimum</i>), (b) Iněná vlákna (Wikipedie).....	15
1.11: Příčný řez rostlinou konopí setého (Amaducci & Gusovius, 2010).....	16
1.12: Jutovník (<i>Corchorus</i>)(Müssig, 2010).....	17
1.13: Agáve sisalová (<i>Agave sisalana</i>) (Wikipedie).....	18
1.14: Schématický řez listem rostliny Agáve sisalové (Anandjiwala & John, 2010)....	18
1.15: Bavlník (<i>Gossypium</i>) (http://www.scienceclarified.com/Co-Di/Cotton.html).....	19
1.16: Plantáž Kenaf rostlin a kenaf vlákno (Saba et al., 2015).....	20
1.17: Vlákna bambusu (<i>Bambusa Shreb</i>)(Trujillo et al., 2014).....	21
1.18: Schématické zobrazení dvou vláken se stejnou jemností (Militký, 2002).....	22
1.19: Délky vláken bavlny, konopí, sisalu, juty (Müssig et al., 2010).....	23
1.20: Histogram četností délek vláken (Militký, 2002).....	23
1.21: Tvar příčného řezu vláknem (Munawar et al., 2006).....	24
1.22: Faktory rozvinutosti tvaru (Militký, 2002).....	24
1.23: Průměry rostlinných přírodních vláken (Müssig et al., 2010).....	25
1.24: Distribuční křivky průměrů vláken bavlny, konopí, lnu (Müssig et al., 2010).....	25
1.25: Princip elektronového mikroskopu SEM (http://www.ammr.org.au).....	26
1.26: SEM obraz vláken lnu (<i>Linium usitatissimum</i>) (Slootmaker & Müssig, 2010)	27
1.27: SEM obraz vláken konopí (<i>Cannabis sativa</i>) (Slootmaker & Müssig, 2010).....	27
1.28: SEM obraz vláken bavlny (<i>Gossypium</i>) (Slootmaker & Müssig, 2010).....	28
1.29: SEM obraz vláken abaky (<i>Musa textillis</i>) (Slootmaker & Müssig, 2010).....	28
1.30: SEM obraz vláken kokosu (<i>Cocos nucifera</i>) (Slootmaker & Müssig, 2010).....	29
1.31: Schématická křivka tahového napětí (Eder & Burgert, 2010).....	30
1.32: Upevnění zkušebního vzorku vlákna k papíru dle normy (ASTM D 3379-75)	32

1.33: Pracovní diagram vlákna (Militký, 2002).....	32
1.34: Tahové zkoušky vláken bavlny, lnu a kokosu (Müssig, 2010).....	34
1.35: Modul pružnosti vlákna (Militký, 2002)	35
1.36: Deformační energie vlákna (Militký, 2002)	36
1.37: Vliv délky vláken sisalu na pevnost (Nechwatal, Mieck, & Reußmann, 2003)	37
1.38: Vliv rychlosti zatěžování vláken kokosu v tahu (Kulkarni et al., 1981)	38
1.39: Generalizovaný Maxwellův model.....	39
1.40: Obecný Kelvinův model	40
1.41: Typická struktura alkalicky (Leonard & Martin, 2002)	42
1.42: Využití přírodních vláken (Graupner & Müssig, 2012)	44
1.43: Princip kompozitního materiálu (Graupner & Müssig, 2012).....	44
1.44: Henry Ford zkouší v roce 1940 pevnost dílů (Baltazar & Sain, 2012).....	45
1.45: Recyklovatelné díly automobilu BMW na bázi k. (Kozłowski, 2012).....	46
1.46: Přírodní geotextilie pro ochranu svahů proti erozi (Kozłowski, 2012)	47
1.47: Rostlina „falešného“ banánovníku (<i>Ensete ventricosum</i>) (Brandt et al., 1997)	48
1.48: Oblast pěstování rostliny <i>Ensete ventricosum</i> v Etiopii (Brandt et al., 1997).....	49
3.1: Schéma přípravku pro řezy vláken	56
3.2: Schématický příčný řez vláknem (Munawar et al., 2006).....	56
3.3: Nosný papír pro tahové zkoušky vláken (ASTM D 3379-75).....	58
3.4: Stanovení průměrů vláken	59
3.5: Počáteční tangentský modul vlákna (Militký, 2002)	60
3.6: Standardní průběh zatěžování pro relaxaci a křivky relaxace napětí.....	63
3.7: Standardní průběh zatěžování pro kríp a křivky krípu	63
3.8: Standardní režim sušení sušících vah Radwag	64
4.1: Histogram četností délek vláken (<i>Ensete ventricosum</i>).....	66
4.2: Zobrazení příčného řezu vlákna (<i>Ensete ventricosum</i>).....	67
4.3: Histogram četností průměrů vláken (<i>Ensete ventricosum</i>)	68
4.4: SEM analýza vlákna (<i>Ensete ventricosum</i>) z mikroskopu	69
4.5: SEM mikrostruktura řezu vlákna (<i>Ensete ventricosum</i>)	69
4.6: SEM mikrostruktura povrchu vlákna (<i>Ensete ventricosum</i>).....	70
4.7: Vztah mezi tahovou silou a prodloužením vláken (<i>Ensete ventricosum</i>).....	71
4.8: Vztah mezi tahovou silou a relativní deformací vláken (<i>Ensete ventricosum</i>).....	72
4.9: Vztah mezi napětím při přetržení a délkou vláken (<i>Ensete ventricosum</i>)	76

4.10: Vztah mezi objemovou deformační energií (<i>Ensete ventricosum</i>).....	76
4.11: Vztah mezi počátečním tangentovým modulem pružnosti a délkou vláken	78
4.12: Vliv teploty na tahové napětí při přetržení vláken (<i>Ensete ventricosum</i>).....	80
4.13: Vliv obsahu vlhkosti na tahové napětí při přetržení vláken	81
4.14: Vliv obsahu vlhkosti na relativní deformaci vláken (<i>Ensete ventricosum</i>)	82
4.15: Křivky napětí – deformace pro různé rychlosti zatěžování vláken	83
4.16: Vliv rychlosti zatěžování na počáteční tangentový modul pružnosti vláken	83
4.17: Křivky krípu vláken „falešného“ banánovníku (<i>Ensete ventricosum</i>)	85
4.18: Viskoelastický model krípuvého chování vláken (<i>Ensete ventricosum</i>)	86
4.19: Relaxace napětí vláken „falešného“ banánovníku (<i>Ensete ventricosum</i>).....	88
4.20: Normalizované napětí vláken při relaxaci (<i>Ensete ventricosum</i>)	89
4.21: Viskoelastický model relaxačního chování vláken (<i>Ensete ventricosum</i>).....	90
4.22: Sušicí křivky vláken „falešného“ banánovníku (<i>Ensete ventricosum</i>)	92
4.23: Rychlost sušení vláken „falešného“ banánovníku (<i>Ensete ventricosum</i>)	94
4.24: Absorbce a desorpce vlhkosti vláken	95

Seznam tabulek

1.1: Chemické složení přírodních vláken (Müssig et al., 2010)	7
1.2: Světová roční produkce přírodních vláken (Ecotech, 2013; Faruk et al., 2012)	13
1.3: Mechanické vlastnosti vybraných přírodních vláken. (Müssig, 2010).....	31
4.1: Průměr a plocha průřezu vláken „falešného” banánovníku (<i>Ensete ventricosum</i>)..	67
4.2: Mechanické vlastnosti vláken „falešného” banánovníku (<i>Ensete ventricosum</i>)	72
4.3: Matematické modely tahového napětí vláken (<i>Ensete ventricosum</i>)	73
4.4: Statistická analýza ANOVA obecného lineárního modelu	74
4.5: Mechanické vlastnosti vláken „falešného” banánovníku (<i>Ensete ventricosum</i>)	75
4.6: Statistická analýza ANOVA obecného lineárního modelu (rov. 4.2 a 4.3).....	77
4.7: Statistická analýza ANOVA obecného lineárního modelu (rov. 4.4)	78
4.8: Vliv teploty na mechanické vlastnosti vláken (<i>Ensete ventricosum</i>)	80
4.9: Koeficienty modelu a ANOVA pro modul pružnosti vláken (rov. 4.5)	84
4.10: Koeficienty modelů pro kríp vláken pro jednotlivá zatížení (rov. 4.6)	86
4.11: Konstanty viskoelastického modelu krípkového chování vláken.....	87
4.12: Statistická analýza ANOVA modelů krípu vláken (rov. 4.7).....	87
4.13: Koeficienty modelu pro relaxaci vláken (rov. 4.8).....	90
4.14: Vypočtené hodnoty viskoelastického modelu relaxačního chování vláken	91
4.15: Statistická analýza ANOVA modelů relaxace vláken	91
4.16: Hodnoty koeficientů matematického modelu (rov. 4.10) sušení vláken	93
4.17: Statistická analýza ANOVA obecného modelu sušení vláken	93

Úvod

Stále rostoucí ekologická, sociální a ekonomická vnímavost, rychlé tempo spotřeby ropných zásob a nové regulace vztahující se k životnímu prostředí dávají podnět k hledání udržitelných materiálů šetrných k životnímu prostředí. Technologický vývoj spojený s požadavky a očekáváním spotřebitelů stále zvyšuje nároky na globální zdroje, což vede k významným otázkám dostupnosti materiálu a udržitelnosti životního prostředí. Zvláště atraktivní jsou nové materiály, u nichž je značná část na bázi přírodních obnovitelných zdrojů, aby se zabránilo dalšímu tlaku na životní prostředí (Alves et al., 2010). V tomto ohledu se obnovitelné zdroje stávají klíčovou oblastí při hledání alternativ k syntetickým materiálům. Naše společnost po staletí téměř výhradně využívala obnovitelné zdroje při výrobě materiálů až do 19. století, kdy byl tento trend v západním světě významně omezen nástupem syntetických materiálů. V současné době je však patrná snaha provádět výzkum na poli obnovitelných zdrojů s cílem vývoje nových materiálů. Toto bude mít zásadní význam pro zajištění úrovně komfortu pro rostoucí počet lidí žijících na planetě. Je to výzva pro současné i budoucí generace vědců s cílem vyvinout udržitelnější způsoby, jak vytvářet prosperitu a boj proti chudobě. Jeden z možných směrů využití přírodních materiálů je aplikace přírodních vláken, které mohou svými vlastnostmi postupně nahrazovat vlákna syntetická (Poole, Church, & Huson, 2009, Wambua, Ivens, & Verpoest, 2003). Vlákna z obnovitelných zdrojů jsou šetrná k životnímu prostředí, jsou biologicky odbouratelná a recyklovatelná. Používání přírodních vláken snižuje problémy s likvidací odpadů a snižuje znečištění životního prostředí (Kalia, Thakur, Celli, Kiechel, & Schauer, 2013). Přírodní vlákna mají významné výhody ve srovnání s tradičními vlákny (např. skleněnými). Jsou neabrazivní při zpracování, CO₂ neutrální, netoxické a konkurenceschopné v moderních průmyslových aplikacích, především pak v automobilovém průmyslu a stavebnictví (Alves et al., 2010, Faruk, Bledzki, Fink, & Sain, 2012, Rao & Rao, 2007, Munawar, Umemura, & Kawai, 2006, Silva, Chawla, & Filho, 2008, Sankari, 2000). Vlivem jejich nízké hustoty dosahují vysoké měrné pevnosti a tuhosti. V posledních desetiletích došlo k dramatickému rozvoji využívání přírodních vláken, především ze lnu, juty, sisalu, banánu, kokosu a kenafu (Cheung, Ho, Lau, Cardona, & Hui, 2009, Stamboulis, Baillie, & Peijs, 2001, Zhai, Li, Pan, Sugiyama & Itoh, 2012). Další vhodnou tropickou rostlinou s velkým potenciálem pro produkci přírodních vláken je Enset (*Ensete ventricosum*). Enset (*Ensete ventricosum*), také známý jako „falešný“ banánovník je

vytrvalá léčivá rostlina, která roste v jižní a jihozápadní části Etiopie a je určena především k lidské spotřebě a krmení zvířat (Tsegaye & Struik, 2000). Rostlina falešného banánovníku (*Ensete ventricosum*) neprodukuje jedlé plody a není zařazena mezi běžné banánovníky (rodu *Musa*).

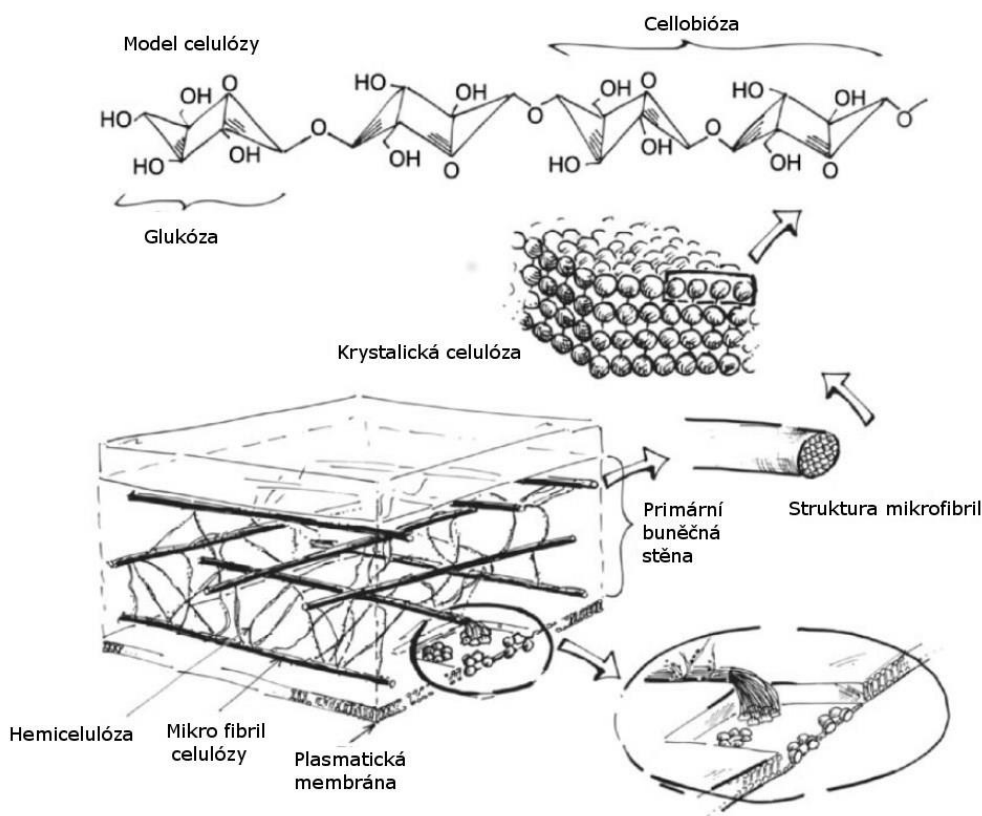
Tato disertační práce je rozdělena do dvou částí. Část teoretickou tvoří literární rešerše zaměřená na problematiku rostlinných přírodních vláken. Úvodní část práce je věnována základní stavbě vláken a chemickému složení. Další kapitola pak tvoří funkce vláken v přírodě, vlastnosti vláken a využití nejběžnějších typů rostlinných přírodních vláken. Druhou část tvoří experimentální metody a postupy zkoušení vláken zaměřené na vlákna rostliny falešného banánovníku (*Ensete ventricosum*). V této části práce jsou představeny mechanické a fyzikální vlastnosti vláken a jejich matematický popis.

1 Přehled o současném stavu poznání

1.1 Co je přírodní vlákno?

1.1.1 Chemické složení

Přírodní rostlinná vlákna jsou buněčné stěny, které se vyskytují v kmenových, listových a jiných částech rostlin a jsou složeny z celulózy, hemicelulózy, pektinu, ligninu, vosků, aromátů a dalších ve vodě rozpustných sloučenin (Rowell, Han, & Rowell, 2000). V rostlinné struktuře je vlákno nejmenší neporušená identifikovatelná jednotka buněčné stěny (Vincent, 2000). Obrázek 1.1 zobrazuje stěnu rostlinné buňky s hlavními složkami a jejich organizací. Chemická struktura vláken určuje jejich charakteristiky a chování a je dána třemi základními výše uvedenými složkami. Struktura, složení a vlastnosti přírodních vláken jsou závislé především na druhu rostliny. Dalším faktorem, který ovlivňuje strukturu vláken, jsou podmínky pěstování a samotné stáří rostliny, při kterém dochází ke sklizni, neboť složení buněčných stěn rostliny se mění v čase, což má za následek ovlivňování konečných vlastností samotných vláken.



Obrázek 1.1: Schématický diagram struktury stěny rostlinné buňky (Somerville et al., 2004)

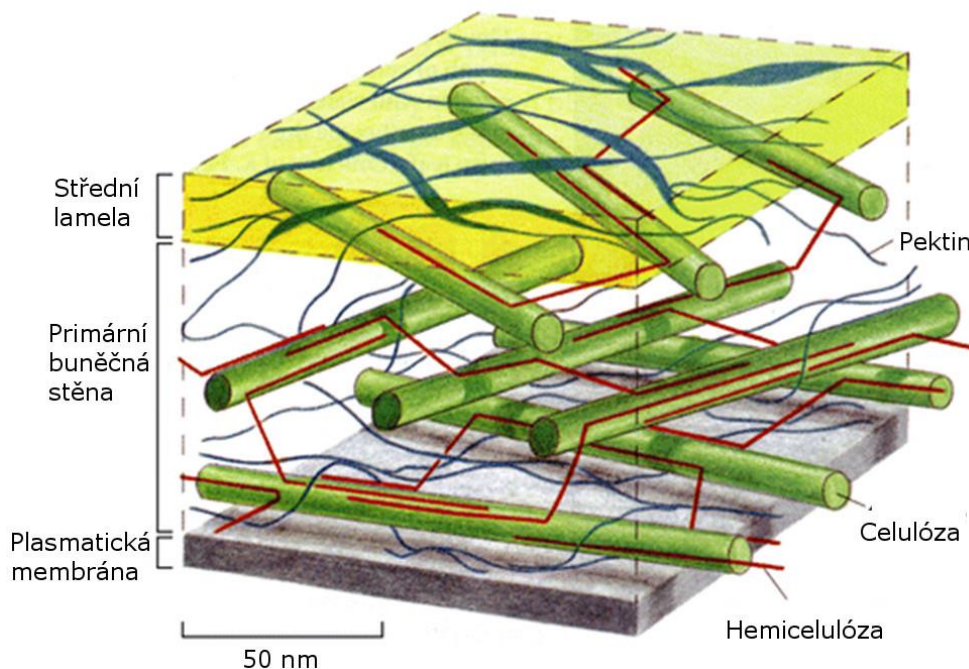
Celulóza

Celulóza je nejvýznamnějším stavebním článkem přírodních rostlinných vláken a odpovídá za většinu jejich vlastností (Bao et al. 2012, Dhakal et al. 2012). Jedná se o lineární polymer glukózy (Nelson & Cox, 2000). Ve své nejjednodušší formě jde o sacharidový polymer s glykosidickou vazbou $\beta - 1,4$ mezi jednotlivými sacharidovými jednotkami. Nicméně základní opakující se jednotkou celulózy je celobióza, která se skládá ze dvou jednotek glukózy vázaných vazbou $\beta - 1,4$, jakož i mezimolekulární vodíkovou vazbou. Typická struktura celulózy je zobrazena na obrázku 1.2. Struktura, jakou je glukóza vázána v lineárním polymeru, určuje vlastnosti celulózy. Celulóza může mít mnoho podob, což je jev, na který je zaměřeno mnoho vědeckých prací zabývajících se tímto přírodním polymerem (Ljungdahl, 1990, Focher, Marzetti, & Sharma, 1992). Stručně řečeno, celulóza se skládá z tisíců jednotek glukózy, lze ji skládat a vytvářet krystalické formy s mezi molekulovou vodíkovou vazbou a vytváří stabilní polymer s vysokou pevností v tahu. Celulóza se vyskytuje v rostlinných buněčných stěnách jako mikrovlákná (o průměru 2 – 20 nm a délce 100 – 40 000 nm) poskytující lineární a strukturálně silný rámec. Bylo stanoveno několik variant uspořádání mikrovláken celulózy. Vyskytují se oblasti s krystalickým uspořádáním, a zrovna tak méně uspořádané nekystalické oblasti. Tyto rozdíly mají významný vliv na mechanické vlastnosti přírodních vláken (Ljungdahl, 1990).

Hemicelulóza

Po celulóze je hemicelulóza druhý nejvíce zastoupený sacharid rostlinných buněčných stěn (Deblois & Wiegel, 1990). Hemicelulóza je souhrnný termín pro označení heterogenní skupiny polysacharidů (o nižší molekulové hmotnosti), které se liší jak složením, tak i strukturou, která je dána jejich původem. Hemicelulóza se skládá z necelulóзовých polysacharidů, jako například: glukán (polymer D glukózy – $C_6H_{12}O_6$), manan (polymer cukru manózy – $C_6H_{12}O_6$), glaktan (polymer cukru glaktózy – $C_6H_{12}O_6$), arabinan (polymer arabinózy – $C_5H_{10}O_5$) a xylan (složitý polymer cukru xylózy – $C_5H_{10}O_5$).

Hemicelulózy, které nejsou lineární, jsou spojeny s pektiny, celulózou a aromatickými složkami a vytvářejí tak rostlinnou buněčnou stěnu (obr. 1.2).



Obrázek 1.2: Schéma rostlinné buněčné stěny (McCann & Roberts, 1991)

Hemicelulózy jsou často pokládány za složky matrice a lze je nalézt ve středu lamel a v oblastech hlavních stěn, kde vážou buněčné stěny vlákna (Focher, 1992). Vliv hemicelulózy u přírodních vláken zkoumala celá řada autorů (Focher et al., 1992; Akin et al., 1996). Jedná se o důležitý prvek především z důvodu velkého významu na zpracování a funkční vlastnosti vláken. Například vysoká absorpce vlhkosti lněných vláken je dána zvláště vysokým obsahem hemicelulózy a celulózy (Müssig, 2010).

Pektin

Pektiny spolu s hemicelulózou jsou různorodé skupiny látek, které jsou spojeny s buněčnými stěnami přírodních vláken (Sakai, Sakamoto, Hallaert, & Vandamme, 1993). Zbytky kyseliny galakturonové spojené přes α vazby jsou hlavní složkou mnoha pektinů. Množství pektinu v přírodních vláknech je poměrně nízké, ale jsou strategicky rozmístěny uvnitř rostlinných pletiv. Pektiny spolu s hemicelulózou se společně nazývají matrice polysacharidů a jejich úkolem je soudržnost rostlinných tkání. Pomocí elektronové mikroskopie je možné pozorovat, že v rozdílných částech rostlin se vyskytují rozdílné struktury pektinů (Himmelsbach, Khalili, & Akin, 1998, Andem-Onzighi, Girault, His, Morvan, & Driouich, 2000).

Přestože obsah pektinu v přírodních vláknech je poměrně malý, má zásadní vliv na zpracovatelské vlastnosti vláken. Například povrch bavlněných vláken je pokryt

ochrannou vrstvou vosku. Pektin je matricový materiál, který je umístěn v primární buněčné stěně a zachycuje voskovou vrstvu na celulózových vláknech bavlny. Odmašťování za použití hydroxidu sodného (NaOH) nebo v poslední době stále častěji pomocí pektolytických enzymů, jsou metody používané k degradaci pektinu a odstranění ochranné voskové vrstvy z povrchu vlákna. Takto upravené vlákno pak vykazuje lepší zpracovatelské vlastnosti a možnosti barvení.

Lignin a aromatické sloučeniny

Lignin vzniká během nevratného procesu odbourávání vody z cukrů, především xylózy a tvoří aromatické struktury, které jsou hlavní chemickou složkou v ligninu. Tyto sloučeniny jsou velmi rozmanité a přítomné v mnoha formách uvnitř rostlin a rostlinných buněčných stěn. Lignin je vysokomolekulární polyfenolická amorfní látka. Je složen z polyfenylpropanoidů, které se často označují jako prezurzory ligninu. Lignin je druhou nejvíce zastoupenou sloučeninou v rostlinách a je zodpovědný za pevnost, tuhost a ochranu proti mikrobiálním patogenům z buněčných stěn. Lignin je v rostlinných buněčných stěnách úzce spojen s hemicelulózou a celulózou pomocí kovalentních vazeb.

Lignin nemá pravidelnou strukturu a opakující se jednotky, které jsou běžné u ostatních přírodních polymerů, jako je například celulóza. Z tohoto důvodu se lignin nedefinuje jako samostatná sloučenina, ale jako směs fyzikálně a chemicky heterogenních látek, jejíž strukturu lze popsat modely. V různých rostlinách a v různých částech rostlin převládají různé typy ligninu (syringylové nebo koniferylové ligniny)(Sarkanen & Ludwig, 1971; Akin, 2008). Typ ligninu pak ovlivňuje stupeň biologického rozkladu, citlivost na mikrobiální reakce a na chemická ošetření. Proces lignifikace dává rostlině během jejího růstu pevnost. Lignin se stává tužším a zpevňuje buněčnou stěnu. Tím dodává stěně permeabilitu a napomáhá při transportu vody (Kalia, Kaith, & Kaur, 2011).

Základní skupinu aromatických látek v rostlinných buněčných stěnách tvoří fenolové kyseliny s nízkou molekulovou hmotností, především pak kyselina ferulová a kyselina p – kumarová. Sisalová vlákna (*Agave sisalana*), která jsou získávána z listové pochvy, obsahují aromáty s chlórem siřičitanu, což ukazuje převahu syringylu nebo jiných aromatických látek v buněčné stěně (Akin, 1987). Chemickou strukturu a složení aromatických látek ve vláknech lnu (*Linum usitatissimum*) a konopí (*Cannabis sativa*)

zkoumali například autoři Fischer, Müssig a Bluhm (2005). Chemické složení vybraných přírodních vláken je uvedeno v tabulce 1.1.

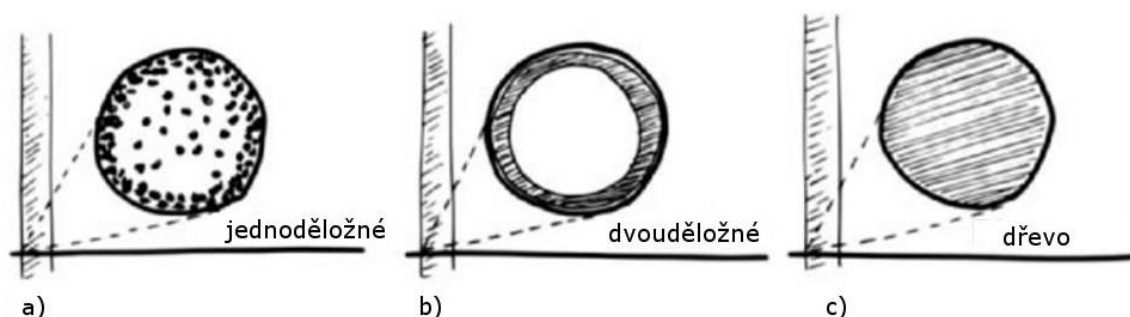
Tabulka 1.1: Chemické složení přírodních vláken (Müssig et al., 2010)

Vlákn	Celulóza	Hemicelulóza	Lignin	Pektin
	(%)	(%)	(%)	(%)
Kokos (<i>Cocos nucifera</i>)	32–53	0,2–0,3	40–45	3–4
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	43–88	10–15	4–14	0,5–10
Ananas (<i>Ananas erectifloius</i>)	80–83	16–19	5–13	2–3
Abaka (<i>Musa textilis</i>)	56–68	19–25	5–13	0,5–1
Bambus (<i>Bambusa shreb</i>)	26–43	15–30	21–31	–
Palma olejná (<i>Elaeis guineensis</i>)	65	–	19–29	–
Len (<i>Linium usitatissimum</i>)	60–81	14–21	2–5	0,9–3,8
Konopí (<i>Cannabis sativa</i>)	57–92	6–22	2,8–13	0,8–2,5
Juta (<i>Corchorus</i>)	51–84	12–24	5–14	0,2–4,5
Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i>)	36–72	20–21	9–19	2
Bavlna (<i>Gossypium</i>)	82–96	2–6	0–1,6	0–7

1.1.2 Rozdělení vláken a funkce v přírodě

Přírodní vlákna jsou řešením přírody pro přizpůsobení vlastností rostlinného materiálu vůči mechanickému namáhání, kterému jsou rostliny během životního cyklu vystaveny. V tomto smyslu dosahuje přírodní vlákno rostlin optimální struktury, která je dána evolucí a proto bylo technicky využíváno již od počátku lidstva (Eder & Burgert, 2010). Předpokladem k pochopení a správné aplikaci přírodních vláken je porozumění mezi strukturou a funkcí rostlinných vláken v přírodě. Různé druhy přírodních vláken, jejich uspořádání v těle rostlin a jejich anatomie vykazují různé mechanické vlastnosti a specifickou organizaci buněčné stěny.

Na světě existuje velké množství přírodních vláken, které mají potenciál pro technické využití. Uspořádání vláken v těle rostlin může být v různém provedení. Základní schématický nákres uspořádání vláken v částech rostlin je uveden na obrázku 1.3.



Obrázek 1.3: Schématické uspořádání vláken v částech rostlin: a) jednoduchých, b) dvouděložných, c) dřevin (Eder & Burgert, 2010)

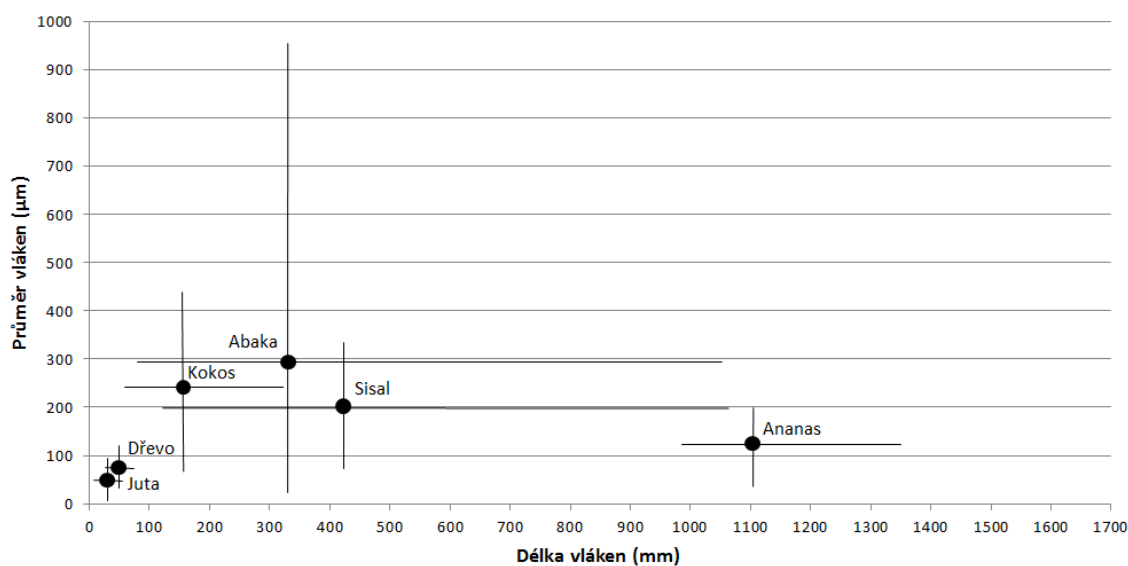
Základní skupinu tvoří rostliny, které mají rovnoměrné rozmístění vláken v celé části rostliny (obr. 1.3c). Do této skupiny patří především vlákna ze dřevin, která jsou tvořena primárním a sekundárním xylémem. Xylém je botanické označení pro druh pletiva cévnatých rostlin, které rozvádí minerální živiny z kořenové soustavy rostlin směrem nahoru. Druhou důležitou skupinu tvoří lýková vlákna (floém). Tato vlákna jsou většinou uspořádána do svazků a rozmístěna v rostlině ve tvaru prstence (obr. 1.3b). Mezi zástupce této skupiny lze zařadit vlákna získaná ze stonků jednoletých rostlin jako například z konopí (*Cannabis sativa*) nebo ze lnu (*Linum usitatissimum*). Další třídu vláken pak tvoří vlákna z jednoduchých rostlin jako například sisalu (*Agave sisalana*) nebo abaky (*Musa textilis*). U těchto rostlin jsou vlákna spojena do malých shluků, nebo vytvářejí kruhové struktury (obr. 1.3a). Tato vlákna vstupují do listů jednoduchých rostlin a mají za úkol stabilizovat polohu listů.

Další skupinu tvoří vlákna získaná ze semen rostlin. Do této skupiny patří vlákna bavlníku (*Gossypium*), jedny z nejčastěji používaných vláken v textilním a oděvním průmyslu. Dále pak vlákna kapok ze semen stromu vlnovce pětimužného (*Ceiba pentandra*). Poslední skupinu vláken pak tvoří vlákna mezokrapu, plodů rostlin. Nejrozšířenějším zástupcem této skupiny jsou vlákna kokosu (*Cocos nucifera*), která se získávají z mezokrapu zralých nebo nezralých plodů (Eder & Burgert, 2010).

1.1.3 Velikost a tvar

Vezmeme-li v úvahu uspořádání vláken v různých částech rostlin, pak je zřejmé, že velikost a tvar dosahují proměnlivých hodnot. Výjimku tvoří pouze vlákna ze semen, ale všechna ostatní technicky využívaná vlákna jsou přímo odvozena od rostlinných pletiv, což má zásadní dopad na jejich vznik a následný růst. Konečná délka vláken palmy olejné může od svého vzniku na úrovni kambium vzrůst až pětinasobně

(Khalil, Alwani, Ridzuan, Kamarudin, & Khairul, 2008). Například vlákna z ramie (*Boehmeria nivea*) začínají svůj růst při velikosti 20 mikronů a v konečné délce mohou dosahovat délky až 550 milimetrů, což odpovídá 27 000 krát prodloužení vlákna (Eder & Burgert, 2010). Důležitým údajem pro využití přírodních vláken v kompozitních materiálech je poměr mezi jejich délkou a průměrem. Na obrázku 1.4 je uveden přehled délek a průměrů běžných technicky využívaných vláken. Jednotlivé body zobrazují průměrné hodnoty a čáry pak jednotlivé rozsahy.



Obrázek 1.4: Délka a průměr vybraných přírodních vláken (Eder & Burgert, 2010)

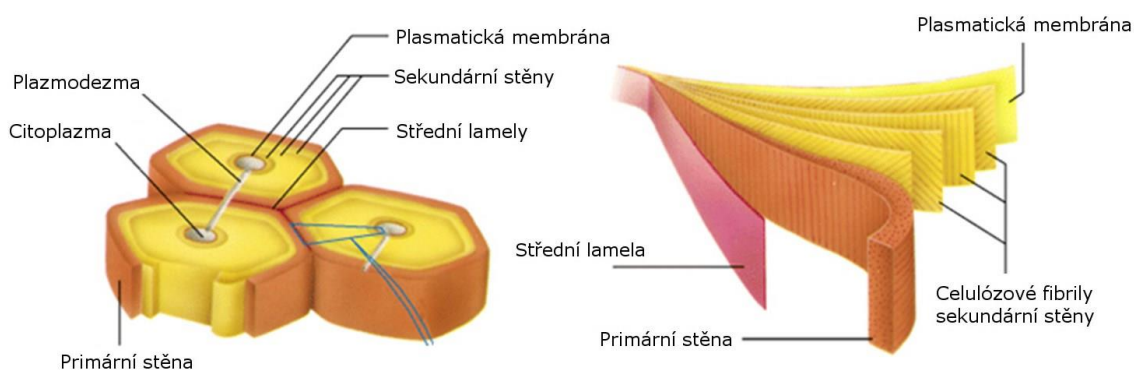
Velikost, tvar a tím i poměr stran rostlinných vláken závisí na podmínkách prostředí, jako například: množství srážek, půda, vítr a další. Dřevěná vlákna jsou zpravidla duté trubky dlouhé 5 – 40 mm s průměrem 40 – 80 μm. Tvar trubky je obdélníkový, šestiúhelníkový, kruhový nebo nepravidelný a tloušťka stěny dosahuje 0,5 – 10 μm. Rozdíly v geometrii dřevěných vláken jsou patrné u různých druhů stromů a v konkrétních částech každého stromu. Vlákna získaná z kmene palmy olejné (*Elaeis guineensis*) dorůstají délky 0,66 mm a jejich průměr zpravidla nepřekročí 16,6 μm (Khalil et al., 2008). Vlákna získaná z listů rostlin dosahují častěji poměru stran větší než 100, což je dáno schopností, že tato vlákna udržují růst a zvyšují tloušťku buněčné stěny po celou dobu života rostliny.

Naopak vlákna získaná ze semen rostlin nejsou odvozeny od rostlinných pletiv. Vyrůstají z jednotlivých epidermálních buněk. Vlákna bavlny dosahují průměru 20 – 25 μm s konečnou délkou 6 – 7 mm (Anderson & Kerr, 1938). Poté probíhá pouze zpevnění buněčných stěn. Bavlníková vlákna dosahují po vyschnutí velmi vysokého

poměru stran a jsou tak vhodná pro přádací technologické zpracování (Maxwell, Gordon, & Huson, 2003).

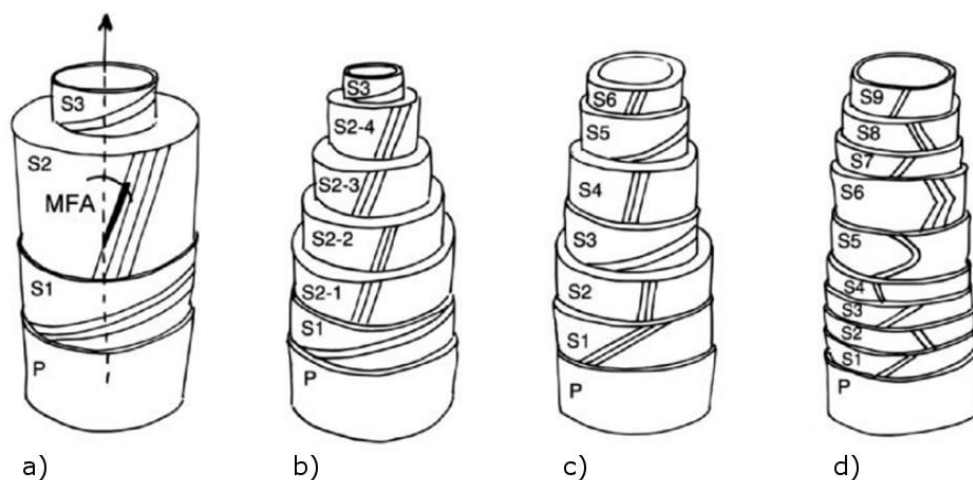
1.1.4 Struktura buněčné stěny

Stejně jako u ostatních rostlinných buněk jsou jednotlivé buňky vláken slepeny dohromady pomocí pektinu a ligninu. Ve srovnání s živočišnými buňkami, rostlinné buňky mají buněčnou stěnu, která odpovídá za mechanickou stabilitu. V závislosti na vývojové fázi se rostlinná buněčná stěna skládá z jedné nebo několika vrstev s různou tloušťkou a chemickou strukturou (obr. 1.5). Protoplasma rostoucí buňky je obvykle obklopena 0,1 – 1 μm tenkou primární buněčnou stěnou. Speciální uspořádání jednotlivých struktur primární buněčné stěny (celulózy, hemicelulózy, pektinu a strukturálních bílkovin) a makromolekulárního spojování během růstu umožňují rozšíření buněčné stěny bez prasknutí (Cosgrove, 2005; Schopfer, 2001). Poté co vlákno dosáhne své konečné velikosti a tvaru, dochází pomocí syntézy k vytváření poměrně silné sekundární buněčné stěny (obr. 1.5). Tato sekundární stěna začne převládat a představuje zásadní prvek z hlediska mechanické odolnosti vlákna.



Obrázek 1.5: Struktura vrstev buněčné stěny (www.bio.miami.edu)

Jednotlivé celulózové mikro fibrily, které vytváří sekundární buněčnou stěnu, jsou paralelně vedeny ve tvaru S nebo Z – šroubovice. Úhel celulózových mikro fibril, který svírají jednotlivé mikro fibrily k podélné ose buněk, se označuje jako úhel stoupání mikro fibril (MFA úhel). Tloušťka jednotlivých vrstev buněčných stěn a úhel stoupání mikro fibril hrají důležitou roli z hlediska mechanické pevnosti vláken. Obrázek 1.6 ilustruje organizaci buněčných stěn různých druhů vláken a jejich MFA úhly.

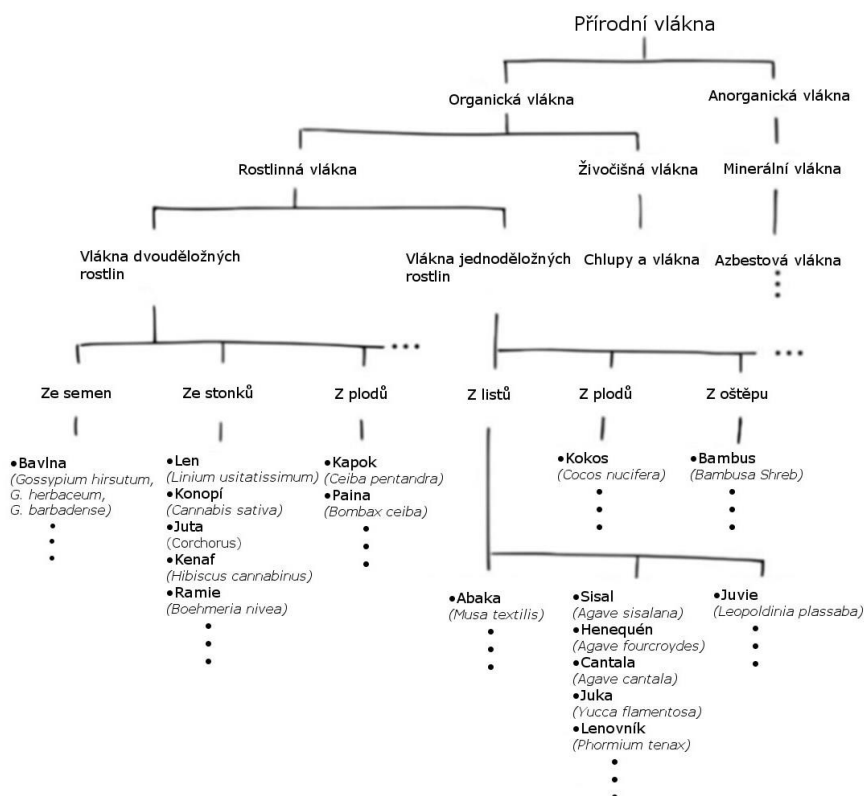


Obrázek 1.6: Schématické uspořádání buněčných stěn: (a) vlákna dřeva, (b) lýková vlákna, (c) vlákna jednoděložných rostlin, (d) vlákna ze semen. Jednotlivé čáry zobrazují úhel stoupání mikro fibril (MFA úhel)(Eder a Burgert, 2010)

Buněčná stěna vláken dřeva se skládá z primární a sekundární buněčné stěny, která je tvořena třemi vrstvami S1, S2 a S3. Dominantní vrstvou je vrstva S2, jejíž tloušťka se může podle typu dřeva značně lišit. Úhel stoupání mikro fibril v případě těchto vláken je v literatuře uváděn v rozsahu $0 - 20^\circ$ (Barnett & Bonham, 2004). Konstrukce buněčné stěny lýkových vláken je zobrazena na obrázku 1.6b. Sekundární stěna lýkových vláken se skládá z více vrstev. Úhel stoupání mikro fibril je zpravidla menší než 10° a je srovnatelný v jednotlivých vrstvách sekundární stěny (Blake, Marcus, Copeland, Blackburn, & Knox, 2008; Romhany, Karger-Kocsis, & Czigany, 2003). Ve srovnání s vlákny dřeva, lýková vlákna rostou delší dobu a tloušťka buněčných stěn se neustále zvětšuje, dokud jejich vnitřní objem téměř nevymizí. Podobné je to také u vláken jednoděložných rostlin. Například vlákna palmy (*Elaeis guineensis*) nebo bambusu (*bambusoide Luerse*) rostou po celou dobu života rostliny (Tomlinson, 2006). Jednotlivé vrstvy buněčných stěn s různými úhly mikro fibril tak vytvářejí multilamelární strukturu buněčné stěny. Schématický náčrt buněčných stěn vláken bavlny (*Gossypium*) je uveden na obrázku 1.6d. Multilamelární struktura sekundární stěny je výsledkem denního růstu. Úhel stoupání mikro fibril se rychle mění mezi jednotlivými tvary šroubovice S a Z (Eder & Burgert, 2010). Zkoumáním buněčných stěn vláken kokosu (*Cocos nucifera*) se zabývali autoři Jarman & Laws (1965), kteří zjistili, že sekundární stěna se skládá z poměrně silné vrstvy S1 s tvarem S – šroubovice a vrstvy S2 s podobnou tloušťkou a typem šroubovice mikro fibril Z.

1.2 Typy vláken

V terminologii Schnegelsberg (1999) je vlákno entita, která je lineární, má charakteristický podélný tvar a průřez a je složena z hlavní chemické látky. Vlněné vlákno je například složeno z keratinu, vláknitého strukturního proteinu, zatímco bavlněné vlákno je složeno z celulózy – lineárního polysacharidu. Rozmanitost vláken v přírodě je široká. Nacházejí se v různých částech jednotlivých rostlin v závislosti na jejich funkci. Umístění vlákna ve stonku závisí na druhu. Rostlinná vlákna lze nalézt například ve stoncích jednoděložných a dvouděložných rostlin (Müssig & Sloomaker, 2010). V technické praxi se využívá celá řada vláken, pro zajímavost vlákna dřeva pro výrobu papíru, konopná vlákna (*Cannabis sativa*), vlákna sisalu (*Agave sisalana*), vlákna bavlníku (*Gossypium*) či vlákna získaná z mezokarpu kokosu (*Cocos nucifera*). Na obrázku 1.7 je uvedeno základní rozdělení přírodních vláken na vlákna organická a anorganická. Organická vlákna se pak dále dělí na vlákna rostlinná a živočišná. Rostlinná vlákna se získávají z různých částí rostlin, především pak z listů, stonků, plodů či semen.



Obrázek 1.7: Rozdělení přírodních vláken (Müssig, 2010)

Rostliny, ze kterých se získávají přírodní vlákna, se klasifikují na primární a sekundární. Primární rostliny jsou pěstovány přímo pro produkci přírodních vláken,

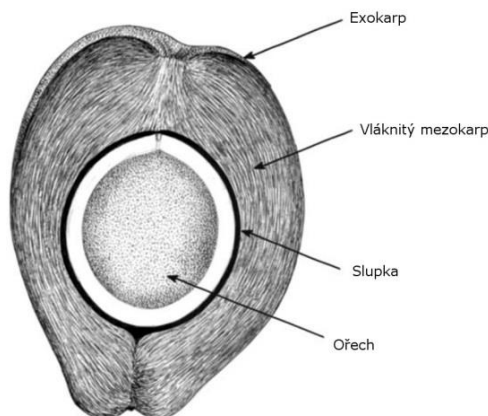
zatímco u sekundárních rostlin se vlákna získávají jako vedlejší produkt. Příkladem primárních rostlin jsou například: jutovník (*Chorchorus*), konopí (*Cannabis sativa*) či agáve sisálová (*Agave sisalana*). Za sekundární rostliny lze označit ananasovník chocholatý (*Ananas comosus*), palmu olejnou (*Elaeis guineensis*) a kokosovník ořechoplodý (*Cocos nucifera*). V tabulce 1.2 jsou uvedena komerčně využívaná přírodní vlákna.

Tabulka 1.2: Světová roční produkce přírodních vláken (Ecotech, 2013; Faruk et al., 2012)

Zdroj vláken	Roční světová produkce (10 ⁶ tun)	Hlavní producenti
Bavlna (<i>Gossypium</i>)	25	Čína, USA, Indie, Pakistán
Juta (<i>Corchorus</i>)	2,5	Indie, Bangladéš
Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i>)	0,45	Čína, Indie, Thajsko
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	0,3	Brazílie, Čína, Tanzanie, Keňa
Ramie (<i>Boehmeria nivea</i>)	0,15	Čína
Konopí (<i>Cannabis sativa</i>)	0,1	Čína
Abaka (<i>Musa textilis</i>)	0,1	Filipíny, Ekvádor
Kokos (<i>Cocos nucifera</i>)	0,1	Indie, Srí Lanka

1.2.1 Kokosovník ořechoplodý (*Cocos nucifera*)

Kokosová vlákna patří mezi běžná přírodní vlákna a získávají se ve svazcích ze slupky, která obklopuje semeno kokosovníku ořechoplodého (*Cocos nucifera*). Odhaduje se, že zhruba 10 % všech kokosových slupek se využívá k produkci přírodních vláken (Faruk et al., 2010). Tloušťka vláken se pohybuje mezi 50 – 300 μm a délka 10 – 35 mm.



Obrázek 1.8: Struktura plodu kokosovníku ořechoplodého (*Cocos nucifera*) (Jayasekara & Amarasinghe, 2010)

Kokosový ořech se oddělí od slupek, které obklopují plod (obr. 1.8). Slupky jsou tedy vedlejším produktem, při získávání kopry, bohaté na olej a zpracovávané v potravinářském průmyslu. Tloušťka slupky se může pohybovat v rozmezí 2 až 5 cm v závislosti na odrůdě. Tradičně se kokosová vlákna získávala ze slupek máčením ve slané mořské vodě a následným ručním zpracováním pomocí dřevěných nástrojů. Způsob získávání vláken ze slupky má zásadní vliv na jejich kvalitu. Kokosová vlákna se považují za levný produkt nízké kvality, a využívají se především pro výrobu kartáčů, smetáků nebo rohoží. Další využití kokosových vláken je ve výrobě lan pro námořní průmysl, protože disponují velmi dobrou odolností proti mořské vodě (Barker, 1933). Jedná se také o velmi oblíbený produkt při výrobě polymerních kompozitních materiálů (Santafé, Da Costa, Rodriguez, Lopes, & Monteiro, 2010; Islam, Rahman, Haque, & Huque, 2010, Bledzki, Mamun, & Volk, 2010) či výrobě geotextilií, pro snížení rizika eroze půdy (Jayasekara & Amarasinghe, 2010). Za největší producenty kokosových vláken lze označit Filipíny, Indii, Indonésii a Brazílii (Müssig, 2010). Základní mechanické vlastnosti kokosového vlákna jsou uvedeny v tabulce 1.3 a chemické složení v tabulce 1.1.

1.2.2 Banánovník textilní (*Musa textilis*)

Abaková vlákna se získávají z listů textilního banánovníku (*Musa textilis*) a patří k nejsilnějším komerčně dostupným vláknům. Rostlina (obr. 1.9) je původem z Filipín a mezi největší dnešní producenty patří Ekvádor. Roste velmi dobře ve stinných a vlhkých oblastech a vyžaduje dobře odvodněné hlinité půdy. Vlákna dosahují délky 1,5 – 3 m s průměrným hektarovým výnosem 600 – 1300 kg/ha suchých vláken (Shahri, Tahir, & Ahad, 2014). Textilní banánovník se pěstuje ve středně horských oblastech do nadmořské výšky 500 m n. m. Abakové vlákno má velmi vysokou pevnost a je velmi odolné proti hnilobě (Bledzki et al., 2010).

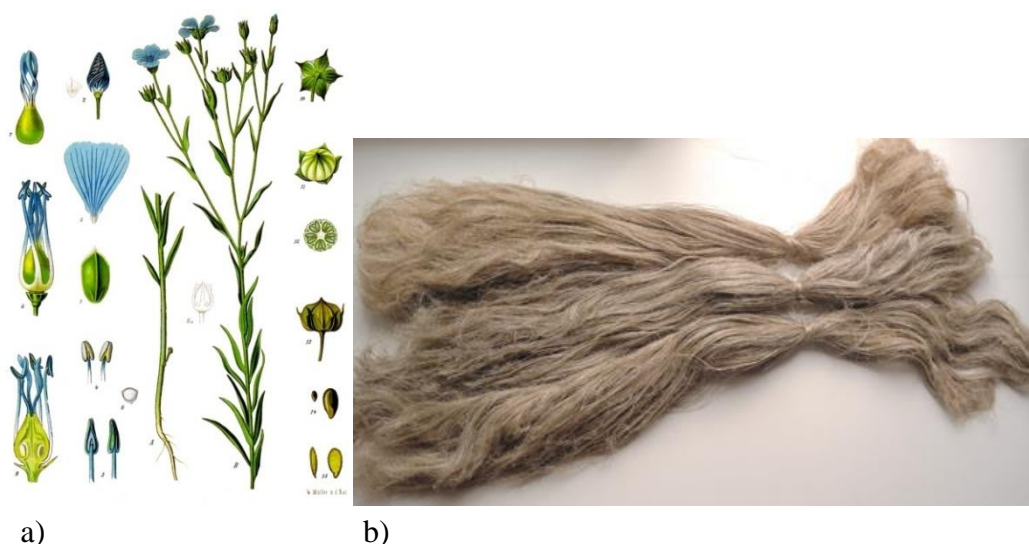


Obrázek 1.9: Banánovník textilní (*Musa textilis*) (Jayasekara & Amarasinghe, 2010)

Dnes se nejčastěji využívají abaková vlákna v automobilovém, papírenském, textilním a nábytkářském průmyslu (Shahri et al., 2014). Slouží k výrobě speciálních papírů, jako jsou bankovky, cigaretový papír nebo čajové sáčky. Další využití je při výrobě polymerních kompozitních materiálů především pro automobilový průmysl (Müssig, 2010; Pothan, Thomas, & Groeninckx, 2006) a vykazují silný potenciál v náhradě skelných vláken v kompozitních materiálech.

1.2.3 Len setý (*Linium usitatissimum*)

Len setý (*Linium usitatissimum*) je jednoletá bylina, která se pěstuje pro lněná vlákna a olejnatá semena. Rostlina byla původně pěstována v oblastech východního Středomoří a Indie. Postupně se však rozšířila i do západní Evropy. Jedná se o modře kvetoucí rostlinu (obr. 1.10), která dorůstá výšky až 1,2 m. Pro produkci vláken se rostliny vysévají ve velké hustotě, tak aby byl počet rostlin na 1 m² větší než 2000 (Sultana, 1992). Sklizeň následně probíhá při plné zralosti, kdy se získávají tenké rovné stonky s vysokým výnosem vláken. Lněná vlákna se zařazují do kategorie lýkových vláken, do které patří také vlákna konopí (*Cannabis*), kenafu (*Hibiscus cannabinus*) nebo ramie (*Boehmeria nivea*) (Sultana, 1992). Lněná vlákna obsahují nižší hodnoty celulózy (65 – 80 %), oproti například vláknům bavlny. Naproti tomu obsahují vyšší hodnoty pektinu a hemicelulózy (Focher et al., 1992). Využití lněných vláken v průmyslu je poměrně široké.



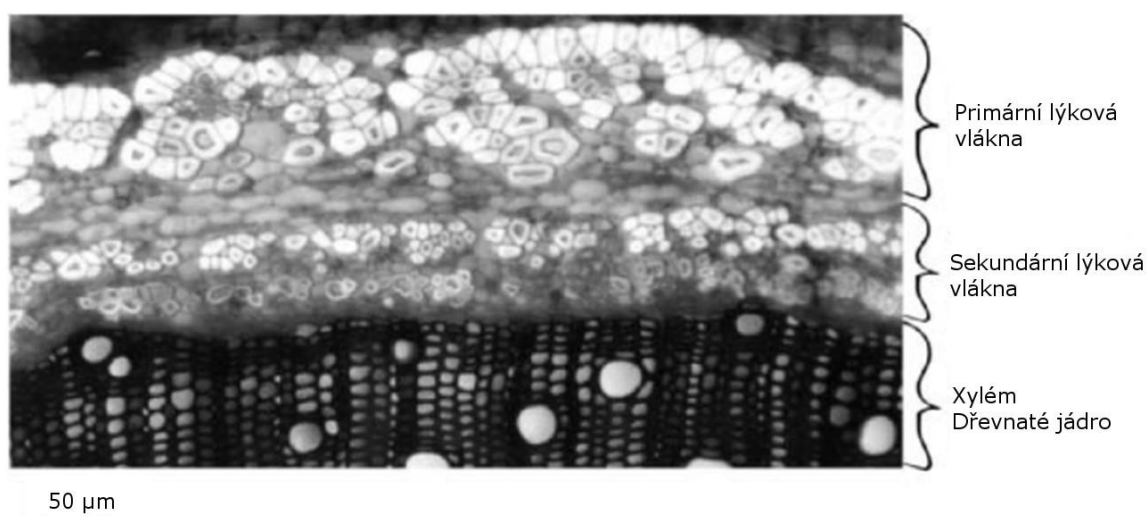
Obrázek 1.10: (a) Len setý (*Linium usitatissimum*), (b) lněná vlákna (Wikipedie)

Nejčastěji se využívají v textilním průmyslu, výrobě lan nebo pytlů. Stále častěji se lněná vlákna začínají využívat také ve stavebním průmyslu jako stavební

desky, izolační hmoty, filtrační materiály, apod. Velkou výhodou lněných vláken jsou jejich mechanické vlastnosti, především oděrová odolnost. Vybrané mechanické vlastnosti vláken jsou uvedeny v tabulce 1.3.

1.2.4 Konopí seté (*Cannabis sativa*)

Konopí seté (*Cannabis sativa*) je jednoletá rostlina z čeledi konopovité, původem ze střední Asie. Jedná se o průmyslově využívanou rostlinu, která má velký potenciál výnosu v poměrně krátkém čase. Výnosy v evropských podmínkách mohou dosahovat až 20 t suché biomasy na hektar (Struik et al., 2000). Konopí seté se pěstuje pro tři základní produkty: olejná semena, vlákna a psychotropní látky, které obsahují samičí květy. Pokud jde o získávání vláken, ta jsou rozdělena do tří frakcí – krátká vlákna, dlouhá vlákna a dřevnaté jádro (označované jako pazdeří). Získaná vlákna se poté využívají k výrobě lan, tašek a odolných tkanin. Pazdeří slouží především k energetickým účelům při spalování (Sponner, Toth, Cziger, & Franck, 2005). V poslední době se konopná vlákna využívají také k výrobě kompozitních materiálů či jako různé výplně v automobilovém průmyslu (Mussig, 2010). Zpracování konopných vláken probíhá na technologických linkách, kde se zpracovávají svazky kvalitních vláken, které jsou následně určeny pro textilní průmysl. Konopné svazky vláken procházejí procesem máčení, kdy se uvolňuje spojení mezi jednotlivými vlákny. Tím se získává čistší a jemnější kvalitní vlákno. Využití vláken je jak ve stavebním průmyslu, tak ve výrobě oděvů. Konopné textilie jsou vysoce absorpční a vhodné pro lidi s citlivou pokožkou.



Obrázek 1.11: Příčný řez rostlinou konopí setého (*Cannabis sativa*) a jednotlivá vlákna (Amaducci & Gusovius, 2010)

1.2.5 Jutovník (*Corchorus*)

Juta je společný název pro vlákna získaná ze stonků rostlin jutovníků (*Corchorus*), které se řadí do čeledi lípovitých (*Tiliaceae*). Na světě je známo asi 40 druhů jutovníků. Nicméně pro získávání vláken se využívají především dva druhy, juta bílá (*C. capsularis*) a juta tossa (*C. olitorius*)(obr. 1.12). Oba druhy si jsou velmi podobné s dlouhými rovnými stonky, které dosahují obvodu kolem 3 cm. Hlavní rozdíl obou druhů je ve velikosti a tvaru semen. Obě rostliny jsou poměrně náročné na vodu a pěstují se v období dešťů při průměrných teplotách 21 – 38 °C (Sobhan, 2010). Vlákna z jutovníku jsou obecně textilní vlákna, která jsou ekologicky nezávadná, biologicky odbouratelná a poskytují zaměstnání v mnoha venkovských tropických oblastech. Svazky juta vláken se používají k výrobě kobereců, podkladových tkanin, šňůr, oděvů, příkrývek, apod. (Rahman, 2010). Jednotlivá vlákna jsou 1 – 6 mm dlouhá s průměrem 5 – 30 μm. Vlákna se extrahují máčením, kdy dochází k oddělení vlákniny od dřevité části stonku (Mitra, 1999). Máčení je jeden z faktorů, který zásadně ovlivňuje kvalitu získaných vláken.



Obrázek 1.12: Jutovník (*Corchorus*)(Müssig, 2010)

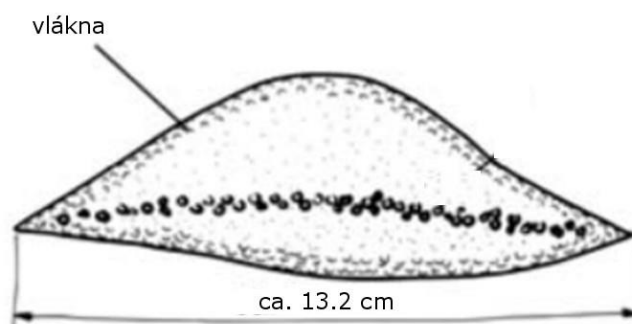
1.2.6 Agáve sisalová (*Agave sisalana*)

Sisal je přírodní vlákno, které se získává z listů agáve sisalové (*Agave sisalana*) (obr. 1.13). Rostlina se pěstuje pouze v tropickém a subtropickém pásmu. Délka života rostliny je 7 – 15 let, v závislosti na genetickém druhu, klimatu, růstových podmínkách a půdě (Anandjiwala & John, 2010).



Obrázek 1.13: Agáve sisalová (*Agave sisalana*) (Wikipedie)

Jedná se o rostlinu s listy ve tvaru růžice, která se pěstuje především pro získávání vláken. Rostlina má silné široké listy ve tvaru meče, které vycházejí z pseudostemu a mají špičatý konec. Každá růžice listů narůstá po celou dobu života rostliny a vykveté pouze jednou. Během kvetení vyroste ze středu růžice jeden velký květ, po odkvetení rostlina odumírá. Vlákna se získávají výhradně z listů rostliny. Na obrázku 1.14 je uveden schématický řez listem rostliny.



Obrázek 1.14: Schématický řez listem rostliny Agáve sisalové (*Agave sisalana*) (Anandjiwala & John, 2010)

Délka extrahovaných sisalových vláken se pohybuje v rozmezí 0,2 – 1,1 m s průměrem vláken 100 – 300 μm a průměrnou hustotou 1,26 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Li, Mai, & Ye, 2000; Martins & Joekes, 2003). Mechanické vlastnosti sisalových vláken jsou závislé na klimatických podmínkách, typu rostliny, kvalitě půdy apod. Nejčastější využití sisalových vláken je výroba lan, provázků a netkaných textilií. Vybrané mechanické vlastnosti sisalových vláken jsou uvedeny v tabulce 1.3.

1.2.7 Bavlník (*Gossypium*)

Bavlník (*Gossypium*) je rod z čeledi slézovité (obr. 1.15). Vyskytuje se převážně v tropech a subtropích a patří mezi nejdůležitější a nejpěstovanější plodinu z hlediska získávání přírodních vláken. Bavlna se pěstuje na více než 10 000 hektarech půdy ročně a mezi hlavní producenty patří Čína, Indie a USA (Chaudhry, 2010). Na světě probíhala celá řada pokusů, jak přiblížit vlastnosti syntetických vláken vlastnostem bavlny. Nicméně některé vlastnosti je možné nalézt pouze u bavlny, jako například biologická rozložitelnost, savost, výborné termostatické vlastnosti či pohodlí spotřebitelů. Rostlina disponuje rozrostlým kořenovým systémem, což ji umožňuje překonat nepříznivé vlivy počasí. Vláknina bavlny se získávají ze semen. Bavlna vykvétá měsíc po zasetí a po šesti měsících od zasetí je možné bavlnu sklízet. Po odkvětu vytváří tobolek, které obsahují semena pokrytá jemnými vlákny. Po dozrání tobolek prasknou a uvolní chomáčky bavlny, které se následně ručně či mechanizovaně sklízí. Vláknina bavlny obsahuje nejvíce celulózy (82 – 96 %) ze všech přírodních vláken (Müssig, 2010). Vybrané mechanické vlastnosti a chemické složení bavlny je uvedeno v tabulkách 1.3 a 1.1.



Obrázek 1.15: Bavlník (*Gossypium*) (<http://www.scienceclarified.com/Co-Di/Cotton.html>)

1.2.8 Ananasovník chocholatý (*Ananas comosus*)

Ananasová vlákna se získávají tropické rostliny Ananasovníku chocholatého (*Ananas comosus*), která je původem z Brazílie. Mezi největší producenty těchto vláken patří Brazílie, Thajsko a Filipíny. V současné době jsou listy ananasu považovány za odpadní produkt, a proto mohou být bez problémů využity v různých průmyslových odvětvích. Rostliny pěstované přímo pro produkci vláken se pěstují na zastíněných plochách, kde nevytvářejí velké plody, zato však dorůstají velkých výšek. Vláknina se získává vylučováním listů a namáčením ve vodě, kdy je následně možné vlákna oddělovat od ostatního pletiva. Z vláken se vyrábí tzv. ananasové hedvábí, různé tkaniny a provazy. Poměrně velký potenciál mají také vlákna ananasu při výrobě

polymerních kompozitních materiálů (Threepopnatkul, Kaerkitcha, & Athipongarporn, 2008, Satyanarayana, Guimaraes, Wypych, Charneau, Barres, & Fleury, 2007).

1.2.9 Plama olejná (*Elaeis guineensis*)

Palma olejná (*Elaeis guineensis*) poskytuje přírodní vlákna ze dvou různých zdrojů. Prvním zdrojem jsou chomáče vláken z dutého plodu a druhým je mezokarp (Sreekala, Kumaran, & Thomas, 1997). Nejčastěji se využívají vlákna z prvního zdroje, protože jsou již ve formě svazků, které jsou snadno dostupné a za nízkou cenu. Tato vlákna se získávají smáčením, zatímco vlákna z mezokarpu vznikají jako odpadní produkt po extrakci oleje a je nutná jejich další úprava a čištění před finálním použitím (Hassan et al. 2010). U vláken z rostliny palmy olejné se provádí modifikace jejich mechanických vlastností a využívají se dále k výrobě polymerních kompozitních materiálů (Suradi, Yunus, Beg, Rivai, & Yusof, 2010; Khalil et al., 2008).

1.2.10 Ibišek konopovitý (*Hibiscus cannabinus*)

Kenaf vlákna se získávají z rostliny ibišku konopovitého (*Hibiscus cannabinus*), což je jednoletá bylina původem ze střední Afriky, která je rodu *Hibiscus* a rodiny *Malvaceae*. Vyskytuje se v tropických a subtropických oblastech Afriky a Asie (Salleh et al., 2012). Kenaf je vytrvalá odolná rostlina s vláknitým stonkem a odolná před poškozením hmyzem či různými chorobami (Elsaid, Dawood, Seracino, & Bobko, 2011). Nejlépe se rostlině daří v oblastech Malajsie, protože v tamním klimatu roste velmi rychle a umožňuje tak dvě sklizně za rok. Vlákna (obr. 1.16) se získávají ze stonku. Střední průměr vláken je 67,6 μm (Mahjoub, Yatim, Mohd, & Hashemi, 2014). Rostlina může dorůst výšky až 3 m s průměrem stonku 25 – 51 mm (Aziz, Ansell, Clarke, & Panteny, 2005). Vlákna mají podobné mechanické parametry jako vlákna juty (*Corchorus*), a velmi často se používá jako její alternativa nebo spolu s ní v hybridních kompozitních materiálech (Jawaid et al., 2013).



Obrázek 1.16: Plantáž Kenaf rostlin a kenaf vlákno (Saba et al., 2015)

1.2.11 Bambus (*Bambusa Shreb*)

Bambusová vlákna se získávají z rostliny bambusu (*Bambusa Shreb*), která dorůstá výšky až 40 m v oblastech s monzunovými dešti. Bambusová vlákna se využívají ve stavebnictví, tesařství nebo tkaní. Vlákna se využívají také k výrobě závěsů, které mohou pohlcovat větší množství ultrafialového záření, které je škodlivé pro lidský organismus (Faruk et al., 2012). Bambusová vlákna (obr. 1.17) dosahují průměru 5 – 25 μm (Ren, Yu, Li, Wang, & Yu, 2014). Vlákna obsahují okolo 60 % celulózy a mají poměrně vysoký obsah ligninu – asi 32 % (Jain, Kumar, & Jindal, 1992). Průměrná délka vláken bambusu dosahuje 25 – 30 cm (Trujillo et al., 2014).



Obrázek 1.17: Vlákna bambusu (*Bambusa Shreb*)(Trujillo et al., 2014)

1.3 Geometrické vlastnosti

1.3.1 Jemnost vláken

Jemnost vláken (měrná lineární hmotnost) patří mezi nejdůležitější geometrické vlastnosti vláken. Má vliv na celou řadu vlastností vláken, jako např. velikost povrchu a způsob použití. Vlákna se nastříhají na stejnou délku a oddělí se jednotlivě pomocí pinzety. Minimální vzorek je 500 vláken. Vztah pro výpočet jemnosti (rov. 1.1) je poté ve tvaru

$$T = \frac{m}{N_v \cdot l_v} \quad [\text{tex}] \quad (1.1)$$

kde:

T ... jemnost vláken [tex]

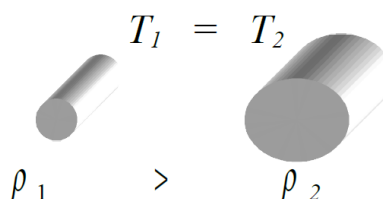
m ... hmotnost vzorku vláken [mg]

N_v ... počet vláken [-]

l_v ... měrná délka vláken [m]

V mezinárodní soustavě fyzikálních jednotek se uvádí jednotka jemnosti $1 \text{ Mtex} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$. V praxi se však používají jednotky milionkrát menší a platí tedy $1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ Mtex} = 1 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1} = 1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-1}$. U některých materiálů se udává jemnost v jednotce decitex – $\text{dtex} = \text{g}/10\text{km}$.

Je tedy zřejmé, že při stejné jemnosti T bude průměr vláken s menší měrnou hmotností (hustotou) větší, než průměr vláken s vyšší měrnou hmotností (obr. 1.18).

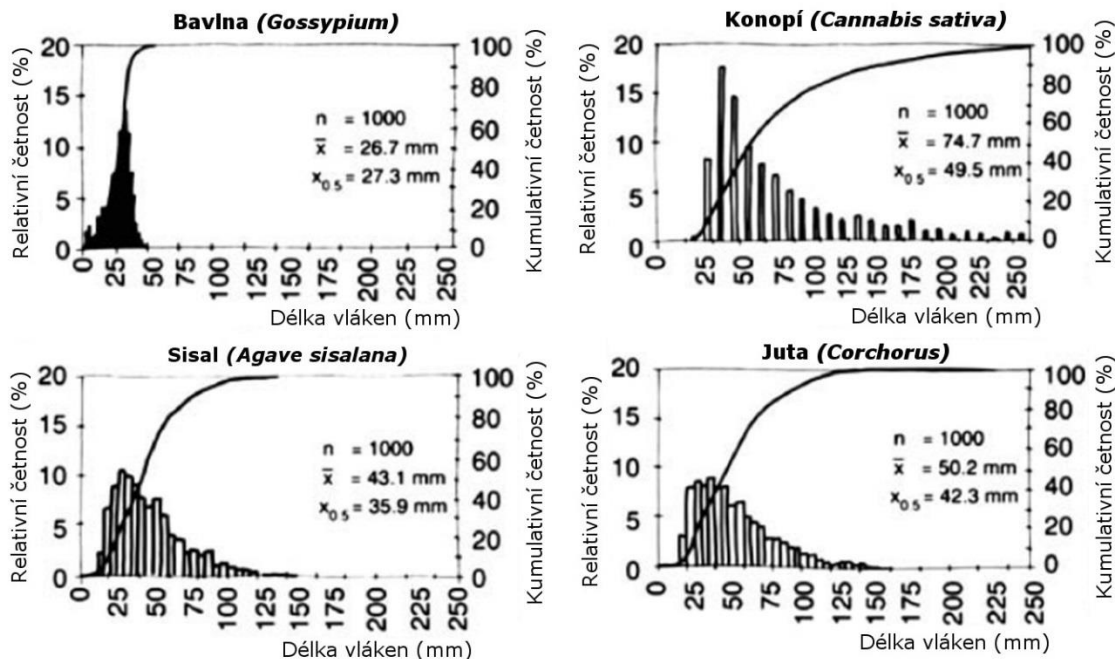


Obrázek 1.18: Schématické zobrazení dvou vláken se stejnou jemností (Militký, 2002)

K měření jemnosti vláken se používá přímo měření z definice, jde tedy o stanovení lineární hustoty: stanovení délky, počtu a hmotnosti vláken. Z toho se pak určí hmotnost na jednotku délky. Přírodní vlákna se tedy nařezou na určitou délku, spočítá se počet a stanoví se hmotnost na mikrovahách. Jiné metody využívají toku plynu přes svazek vláken a z odporu se vypočte střední průměr vláken. Další metody jsou tzv. vibroskopické metody, které jsou však vhodné spíše pro syntetická vlákna (Militký, 2002). Jemnost přírodních vláken se pohybuje v širokém rozmezí, od ultra jemných vláken (např. bavlna) až po vlákna s vyššími hodnotami jemnosti (Abaka).

1.3.2 Délka vláken

Vláknenné materiály nemají všechny stejnou délku, ale délku vláken charakterizujeme střední délkou a histogramem četností, který udává rozdělení četností vláken různé délky. Zastoupení jednotlivých délek můžeme vyjádřit pomocí četností jednotlivých délek vláken nebo váhovým podílem jednotlivých délek vláken. Obecně kratší měrné délky a rovnoměrné rozdělení dosahují vlákna ze semen, například bavlna (*Gossypium*). Naopak delší vlákna je možné získat z konopí (*Cannabis sativa L.*), sisalu (*Agave sisalana*) či juty (*Corchorus*). Je třeba také zmínit, že většina vláken se zkracuje záměrně během zpracování, aby měli vhodnou délku pro následující operace, například mykání. Proto je střední délka vláken výsledkem spíše technologického zpracování, než samotných vlastností vláken (Müssig et al., 2010). Rozdělení měrných délek vybraných typů vláken je uvedeno na obrázku 1.19.



Obrázek 1.19: Délky vláken bavlny (*Gossypium*), konopí (*Cannabis sativa* L.), sisalu (*Agave sisalana*), juty (*Corchorus*) (Müssig et al., 2010)

U přírodních vláken se nejčastěji stanovuje průměrná délka vláken l (rovnice 1.2)

$$l = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k l_j n_j \quad [\text{mm}] \quad (1.2)$$

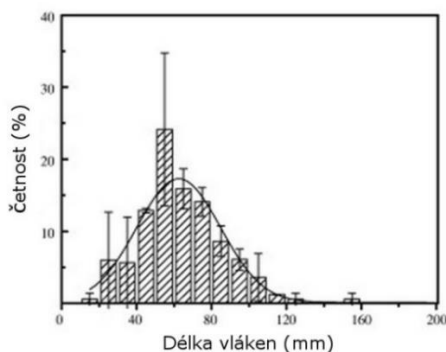
rozptyl s^2 (rovnice 1.3)

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k (l_j - l)^2 \cdot n_j \quad [\text{mm}^2] \quad (1.3)$$

a směrodatná odchylka s (rovnice 1.4)

$$s = \sqrt{s^2} \quad [\text{mm}] \quad (1.4)$$

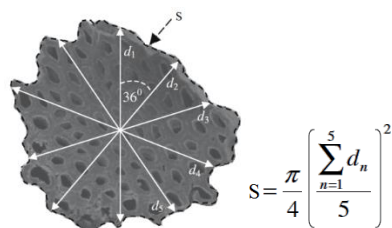
Z naměřených hodnot se následně sestavuje histogram četností (Militký, 2002). Na obrázku 1.20 je zobrazen typický příklad histogramu četnosti vláken různé délky, kde f je četnost a l je délka vláken.



Obrázek 1.20: Histogram četností délek vláken (Militký, 2002)

1.3.3 Příčný řez vláken

Tvar příčného řezu vláken je znázorněn na obrázku 1.21. Jeho plocha S je uzavřena obvodem p . V případě, že by průřez vlákna byl kruhový, platilo by $p/(\pi d) = 1$. Ve všech ostatních případech je hodnota výrazu $p/(\pi d) > 1$.



Obrázek 1.21: Tvar příčného řezu vláknem (Munawar et al., 2006)

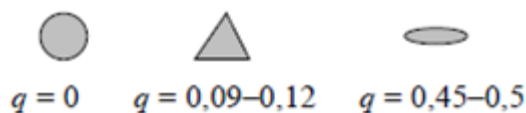
Tvarový faktor vlákna (rovnice 1.5) je definován vztahem

$$q = \frac{p}{\pi \cdot d} - 1 \quad [-] \quad (1.5)$$

U vláken se dále stanovuje kruhovost c (rovnice 1.6) jako poměr ploch příčného řezu S_v a příčného řezu ekvivalentního kruhového vlákna S_e mající stejný obvod

$$c = \frac{S_v}{S_e} = \frac{1}{(q+1)^2} \quad [-] \quad (1.6)$$

Pro čtvercová vlákna je bez ohledu na velikost strany kruhovost rovna $c = \pi/4 = 0,785$.

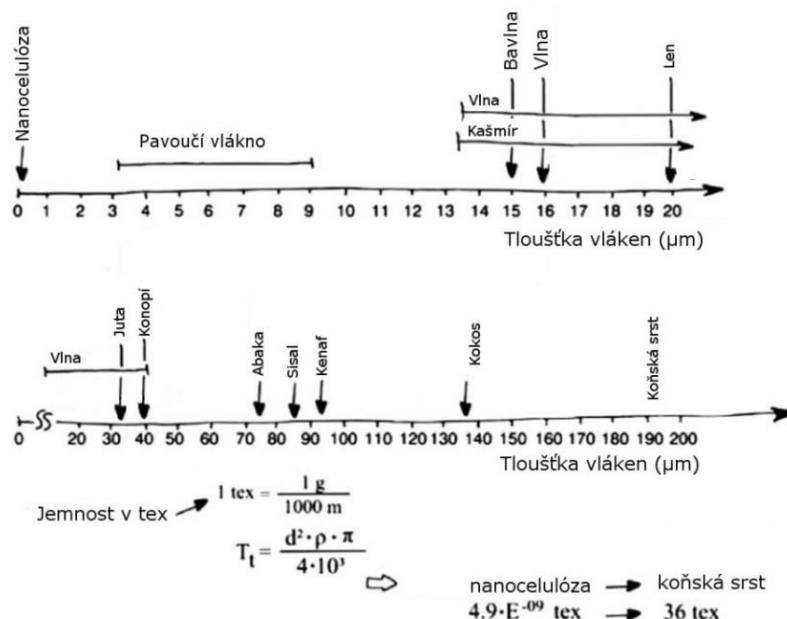


Obrázek 1.22: Faktory rozvinutosti tvaru (Militký, 2002)

Na obrázku 1.22 jsou zobrazeny tvary příčného řezu vláken odpovídající různým hodnotám faktoru rozvinutosti q . Je zřejmé, že jak c tak i q jsou pouze faktory úměrnosti s ohledem na kruhovost, ale necharakterizují obecně tvarové zvláštnosti. Není problém nalézt dva zcela odlišné tvary se stejnými c a q . Na druhé straně pro stejný tvar příčného řezu při samo – příbuzné transformaci (zmenšené nebo zvětšené v různých směrech různě) resultují různé tvarové faktory (Militký, 2002).

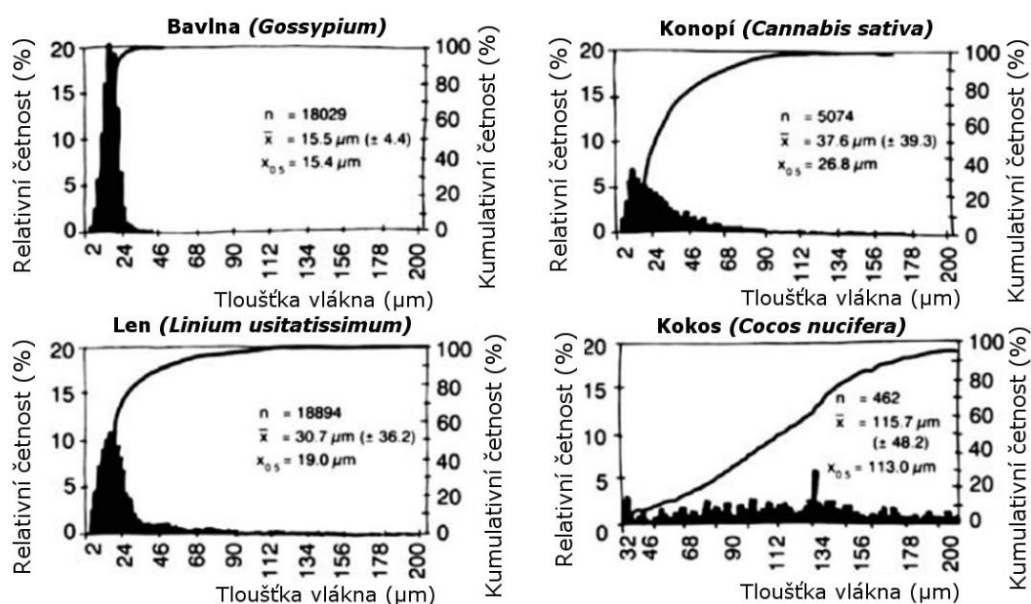
S různými druhy přírodních vláken dostáváme také různé průměry. Na obrázku 1.23 jsou zobrazeny průměry vybraných přírodních vláken. Velmi malých průměrů

dosahují vlákna ze semen. Naopak lýková vlákna jsou charakteristická vyššími hodnotami průměrů vláken.



Obrázek 1.23: Průměry rostlinných přírodních vláken (Müssig et al., 2010)

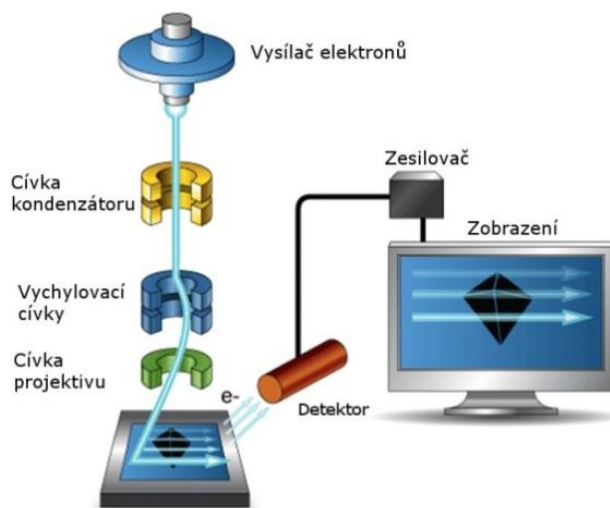
Distribuční křivka průměrů čtyř typů vláken je uvedena na obrázku 1.24. Z obrázku je zřejmé, že vlákna bavlny (*Gossypium*) vykazují úzký rozsah normálního rozdělení průměrů. Širší distribuční rozsah průměrů vláken byl stanoven u konopí (*Cannabis sativa L.*) a lnu (*Linium usitatissimum*). Nejširší rozsah naměřených průměrů vláken a tedy i distribučního rozdělení byl stanoven u vláken kokosu (*Cocos nucifera*) (Müssig et al., 2010).



Obrázek 1.24: Distribuční křivky průměrů vláken bavlny (*Gossypium*), konopí (*Cannabis sativa L.*), lnu (*Linium usitatissimum L.*) a kokosu (*Cocos nucifera*) (Müssig et al., 2010)

1.3.4 Morfologie vláken s využitím SEM

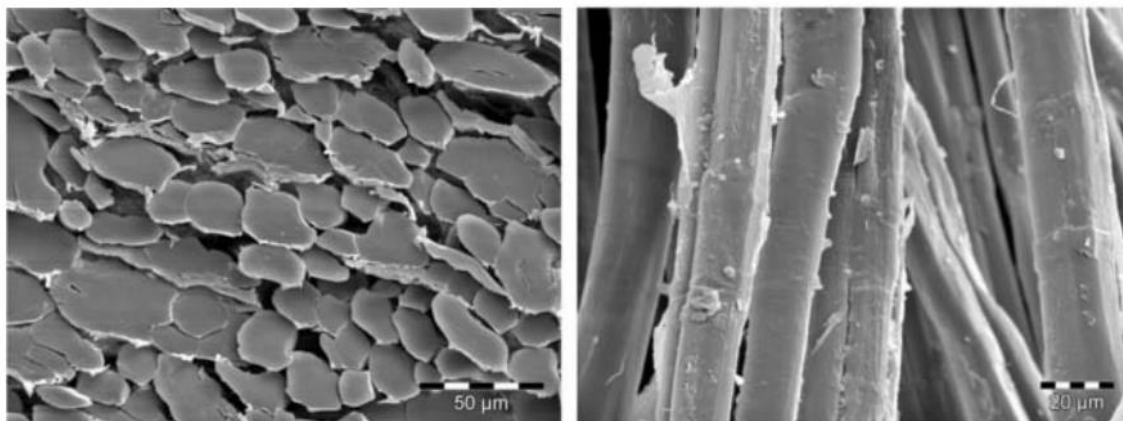
V posledních letech se stále více rozšiřuje využití elektronové mikroskopie pro studium vláknenných materiálů. SEM – rastovací elektronový mikroskop je následovník TEM – transmisního elektronového mikroskopu, který vynalezl kolem roku 1930 Ernst Ruska a Max Knoll (Berlín, Německo). Výhodou SEM technologie (obr. 1.25) je hloubka pole, která dovoluje vidět jemné detaily a rozlišitelnost mezi dvěma body, jejíž vzdálenost může být menší než 1 nm. Vzorek, který je umístěn ve vakuu, je snímán svazkem elektronů. Elektrické pole je nastaveno mezi anodou a katodou, což vede k urychlení elektronů směrem k anodě. Elektronový paprsek vytváří emise elektronů ze vzorku, které závisí na topografii a chemickém složení vzorku. Tyto elektrony jsou shromažďovány a zesíleny fotonásobičem a převedeny na signál viditelný na obrazovce monitoru. Primární elektronový paprsek proniká do materiálu a dochází k interakci s jádrem atomu. Vzhledem k této interakci vznikají různé signály, které jsou vytvořeny zpětným odražením elektronů, tzv. sekundárních elektronů. Rozlišení je závislé na velikosti elektronového paprsku. Černobílé SEM obrazy, vytvořené pomocí sekundárních elektronů obsahují různé odstíny šedé založené na různé emisi elektronů z materiálu (Slootmaker & Müssig, 2010).



Obrázek 1.25: Princip elektronového mikroskopu SEM
(<http://www.ammrf.org.au/myscope/sem/practice/principles/layout.php#detail>)

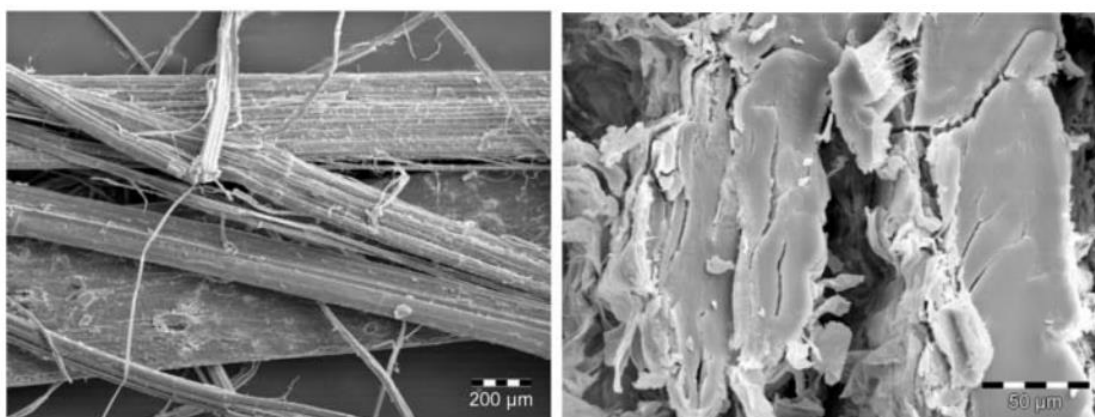
Příprava vzorků vláken pro elektronovou mikroskopii spočívá v nařezání tenkých vzorků vláken a následného poprášení tenkou vrstvou kovu (zlato, platina nebo grafit). Kovový povlak zabraňuje hromadění statické elektřiny. Při pozorování přírodních vláken při velkém zvětšení způsobuje vysoce energetický tok paprsku elektronů „pálení“ vláken, což určuje limity pro zvolené zvětšení a dobu skenování.

Na obrázku 1.26a je zobrazen svazek vláken lnu (*Linum usitatissimum*) z elektronového mikroskopu. Jedná se o řezu jednotlivých vláken v rozmezí 12 – 114 μm . Na obrázku 1.26b jsou zobrazena jednotlivá vlákna v podélném zobrazení. Vlákna jsou snadno oddělitelná s poměrně hladkým povrchem.



a) **b)**
Obrázek 1.26: SEM obraz vláken lnu (*Linum usitatissimum*): (a) řez vláken, (b) povrch vláken (Slootmaker & Müssig, 2010)

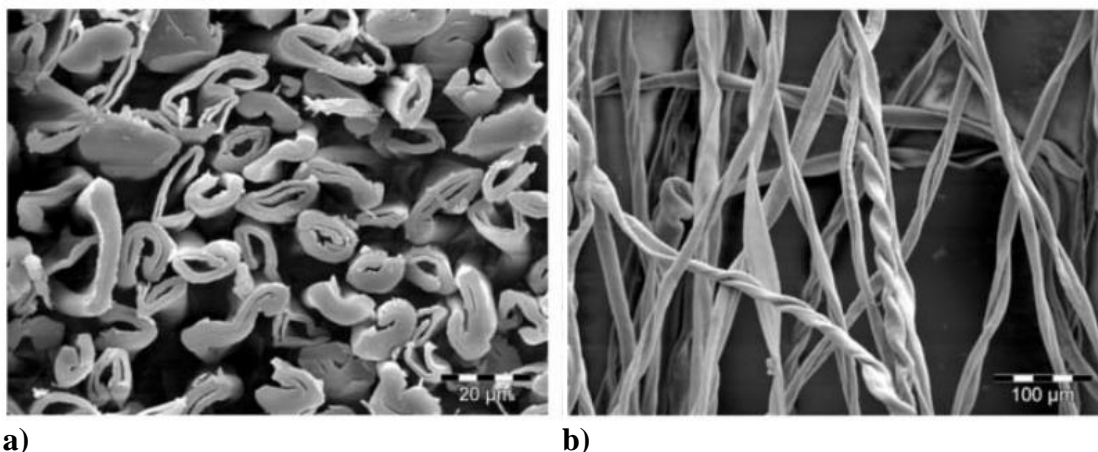
Svazky vláken konopí (*Cannabis sativa*) jsou umístěny na vnější části stonku. Jednotlivé svazky vláken mohou být z rostliny odděleny různými technikami. Na obrázku 1.27b jsou zobrazeny svazky vláken, které byly z rostliny odděleny mechanicky. Šířka jednotlivých vláken se pohybuje v rozmezí 5 – 40 μm . V podélném zobrazení (obr. 1.27a) je část vláken spojena ještě ve svazcích a je zde patrná velmi široká distribuce průměrů vláken.



a) **b)**
Obrázek 1.27: SEM obraz vláken konopí (*Cannabis sativa*): (a) v podélném zobrazení, (b) v řezu (Slootmaker & Müssig, 2010)

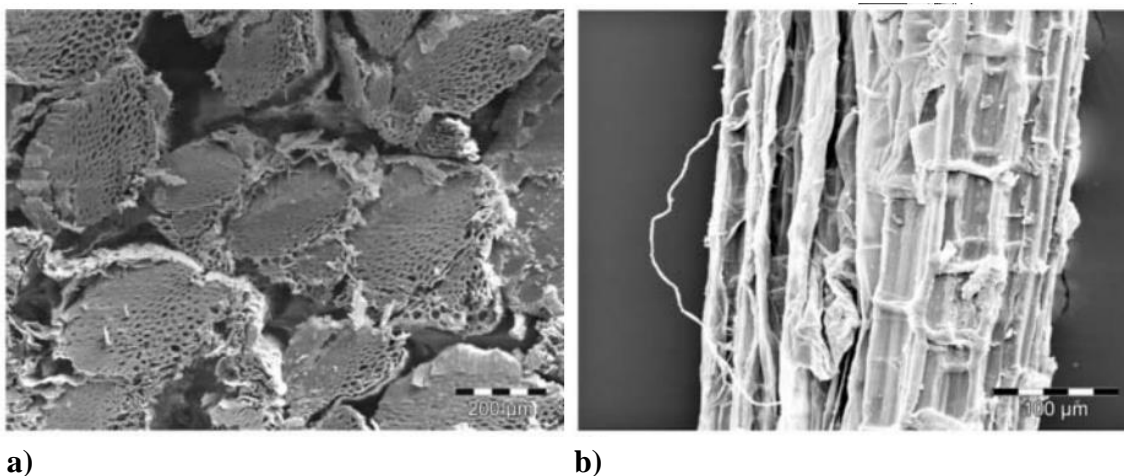
Snímky vláken bavlny (*Gossypium*) jsou uvedeny na obrázku 1.28. Jak je z obrázku patrné, bavlněná vlákna jsou ve tvaru U s průchodem uvnitř vlákna. Zákruty

vláken, tj. nepravidelné šroubovitě závity, jsou typické pro bavlnu a jsou viditelné při větším zvětšení povrchu (obr. 1.28b). Tvary vyzrálých vláken jsou téměř kruhové, zatímco nezralá vlákna vykazují zploštělý tvar. Tato nezralá vlákna mají tendence se do sebe zamotat a vytvářet tak nopky, což je nežádoucí v procesu předení. Tyto nopky jsou viditelné i na nekvalitně zpracovávaných textiliích z bavlny (Slootmaker & Müssig, 2010).



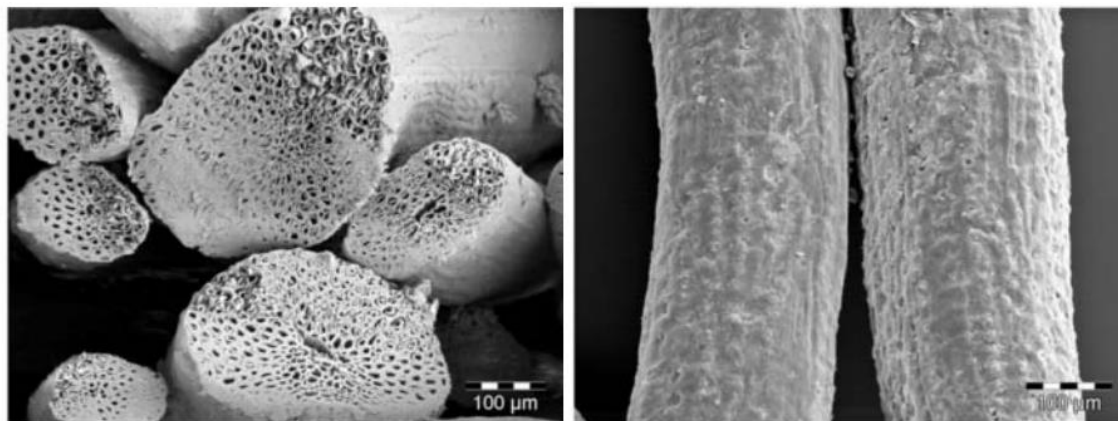
a) **b)**
Obrázek 1.28: SEM obraz vláken bavlny (*Gossypium*): (a) v řezu, (b) v podélném zobrazení (Slootmaker & Müssig, 2010)

Vlákna abaky (*Musa textillis*) jsou zobrazena na obrázku 1.29. Svazky vláken se získávají oddělením z listových pochev. Svazky vláken z vnější strany listové pochvy jsou obecně hrubší, než vlákna získaná z vnitřní části. Svazky (obr. 1.29a) jsou složeny z jednotlivých vláken, které mají mnohoúhelníkový tvar. Z podélného zobrazení je patrný poměrně strukturovaný povrch abaka vláken. Jednotlivá vlákna dosahují průměrů v rozsahu 45 – 180 µm.



a) **b)**
Obrázek 1.29: SEM obraz vláken abaky (*Musa textillis*): (a) v řezu, (b) v podélném zobrazení (Slootmaker & Müssig, 2010)

Vláknina kokosu (*Cocos nucifera*) tvoří dlouhé a hnědé svazky, které jsou odděleny od nezralých slupek plodů. Jak uvádějí autoři Latzke a Hesse (1988) povrch vláken je hladký s malými šikmými strukturami. Buněčné stěny jsou poměrně silné s nepravidelným tvarem. Průměr vláken je v rozsahu 90 – 430 μm . Snímky vláken kokosu (*Cocos nucifera*) z elektronového mikroskopu jsou uvedeny na obrázku 1.30.



a) **b)**
Obrázek 1.30: SEM obraz vláken kokosu (*Cocos nucifera*): (a) v řezu, (b) v podélném zobrazení (Slootmaker & Müssig, 2010)

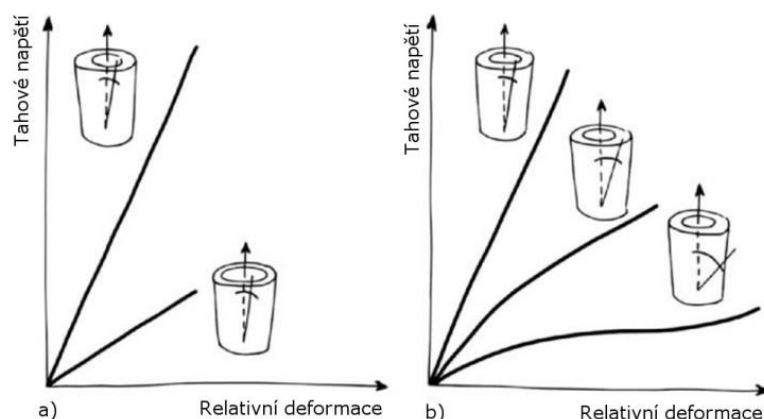
Využívání SEM technologie pro studium vláknenných materiálů přináší další poznatky do problematiky zkoumání povrchu a morfologie vláken a zjišťování jejich vlastností.

1.4 Mechanické vlastnosti

Obecná snaha výrobců a zpracovatelů přírodních vláken je poskytovat materiál s pokud možno homogenními vlastnostmi. Aplikace přírodních vláken v technické praxi vyžaduje co možná nejpřesnější popis vlastností vláken. Kvalita a vlastnosti vláken jsou v průběhu růstu a následného zpracování značně ovlivňovány. Snahou výrobců je zaručit homogenitu a kvalitu svých výrobků, což se výrazně projevuje do cen a ekonomiky pěstování vláken. Proto je velmi důležité hodnocení kvality a testování vlastností jednotlivých přírodních vláken.

Při posuzování měřitelných vlastností vláken je třeba rozlišovat mezi vlastnostmi samotných vláken a stavem vláken. Vlastnosti samotných vláken, jako například délka, pevnost, jemnost, barva jsou přímo spojeny s kvalitou materiálu. Naopak stav vláken, jako například obsah prachu, nečistot, bakteriální kontaminace, lepidlo, apod. jsou způsobeny nebo ovlivněny výrobou, dopravou či technologií zpracování (Müssig et al., 2010). Vzhledem k velkému počtu různých druhů a typů vláken jsou v následujícím textu uvedeny základní a běžně měřitelné vlastnosti vláken.

Mechanické vlastnosti jednotlivých přírodních vláken závisí především na molekulárních interakcích v jejich buněčných stěnách (Fratzl, Burgert, & Gupta, 2004; Burgert, 2006). Jak je uvedeno na obrázku 1.31, rozhodujícími parametry pro mechanické vlastnosti vláken jsou poměr buněčné stěny k dutině (hustota vláken) a úhel stoupání mikro fibril (MFA) v dominantních vrstvách vláken. Je zřejmé, že vlákna s větším poměrem (hustotou) dosahují vyšších sil při přetržení, neboť mechanické vlastnosti se vztahují k ploše průřezu vlákna (obr. 1.31a).



Obrázek 1.31: Schématická křivka tahového napětí – relativní deformace vláken: (a) s rozdílnou hustotou, (b) s rozdílným úhlem stoupání mikro fibril (MFA) (Eder & Burgert, 2010)

Vztah mezi úhlem stoupání mikro fibril a mechanickými vlastnostmi vlákna již tak jednoduchý není. Touto problematikou se zabývala celá řada autorů (Page & El-Hosseiny, 1983; Burgert, 2006; Groom, Mott, & Shaler, 2002). Schématické křivky na obrázku 1.31b ukazují, že modul pružnosti vláken závisí na úhlu stoupání mikro fibril. Malý úhel stoupání celulósových mikro fibril (orientace téměř s hlavní podélnou osou vlákna) vede k vysokým hodnotám modulu pružnosti. Tato vlákna se chovají jako velmi tuhá se sklonem ke křehkému lomu. Naopak u větších úhlů stoupání mikro fibril nabývá interakce mezi fibrilami a makromolekulami matrice většího významu na celkové mechanické chování buněčné stěny. Křivku napětí – deformace lze u těchto vláken rozdělit do dvou nebo tří fází (Page & El-Hosseiny, 1983; Bodig and Jayne, 1993; Navi, Rastogi, Gresse, Tolou, 1995; Martinschitz, Boesecke, Garvey, Gindl, & Keckes, 2008). Počáteční, poměrně krátkou fází elastické deformace pak nahrazuje dominantní fáze plastické deformace. Křivka tahového napětí těchto vláken vykazuje bod meze kluzu, kdy je překročena kritická hodnota smykového napětí v matrici, což má za následek viskózní tok matrice a kluz celulósových mikro fibril (Spatz, Köhler, & Niklas, 1999;

Keckes et al., 2003; Altaner & Jarvis, 2008). Mechanické vlastnosti vybraných přírodních vláken jsou uvedeny v tabulce 1.3.

Tabulka 1.3: Mechanické vlastnosti vybraných přírodních vláken (Müssig, 2010)

Vláčno	Tahové napětí při přetržení [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Tažnost [%]	Hustota [g/cm ³]
Abaka (<i>Musa textillis</i>)	980	12	3–10	3–10
Bambus (<i>Bambusa Shreb</i>)	140–230	11–17	–	0,6–1,1
Len (<i>Linium usitatissimum</i>)	345–1035	27,6	2,7–3,2	1,5
Konopí (<i>Cannabis sativa</i>)	690	70	1,6	1,48
Juta (<i>Corchorus</i>)	393–773	26,5	1,5–1,8	1,3
Kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i>)	930	53	1,6	–
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	511–635	9,4–22	2,0–2,5	1,5
Palma olejná (<i>Elaeis guineensis</i>)	248	3,2	25	0,7–1,55
Ananas (<i>Ananas comosus</i>)	400–627	1,44	14,5	0,8–1,6
Kokos (<i>Cocos nucifera</i>)	500–1150	11,8	3,7–4,3	1,4

1.4.1 Variabilita mechanických vlastností vláken

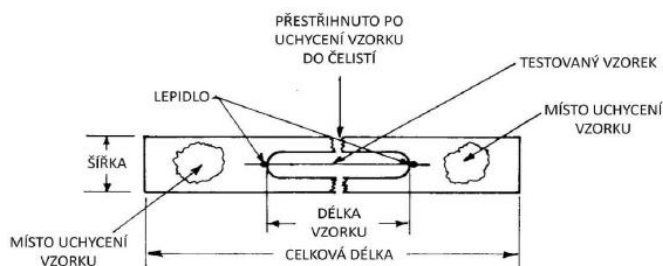
Jeden ze zásadních problémů při zavádění rostlinných vláken do technické praxe je variabilita jejich vlastností. Údaje o mechanických vlastnostech různých typů vláken z různých zdrojů jasně ukazují, proč existují zásadní obavy při zavádění rostlinných vláken do technické praxe. Mechanické vlastnosti vykazují velkou variabilitu nejen mezi jednotlivými typy vláken, ale také uvnitř jednoho druhu vlákna, což lze částečně vysvětlit přirozenou variací přírodních materiálů (Müssig, 2010). Dalším problémem ve variabilitě mechanických vlastností je také rozdílnost v metodice prováděných zkoušek a v terminologii pojmu „vlákno“. Někdy jsou totiž zkoumány svazky vláken, aniž by byly dostatečně popsány, na místo jednotlivých vláken. Porovnání výsledků svazků vláken s jednotlivými vlákny je pak poměrně problematické (Eder & Burgert, 2010).

Přirozená variabilita vlastností rostlinných vláken pochází také z adaptačního růstu rostlin. Rostliny mění v průběhu růstu mechanické vlastnosti svých vláken. Například stromy mění v průběhu růstu úhel stoupání celulóзовých mikro fibril v buněčných stěnách pro úpravu mechanických vlastností vláken (Lichtenegger,

Reiterer, Stanzl-Tschegg, & Fratzl, 1999). Velké změny úhlů mikro fibril podél vláken mohou ale také vést ke vzniku poruch, tj. dislokací.

1.4.2 Příprava zkušebních vzorků vláken

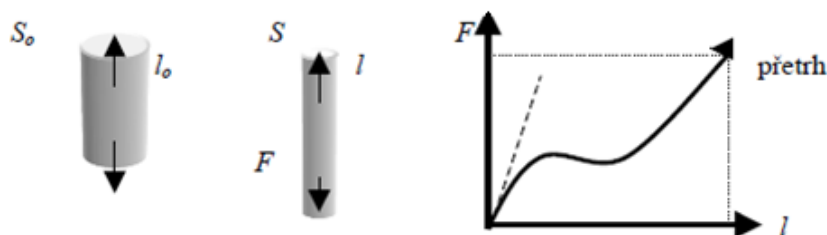
Tahové zkoušky vlákenných materiálů se provádí podle normy ASTM International D 3379-75. Při provádění tahových zkoušek u vlákenných materiálů je velmi důležitý způsob upnutí vlákna do zkušebního stroje tak, aby nedocházelo k posunu upnutých vláken v čelistech nebo naopak k přetržení vláken v čelistech stroje vlivem jejich poškození. Proto se k provádění tahových zkoušek vlákenných materiálů používá nosný papírový profil (obr. 1.32), na který se pomocí lepidla připevní vzorek vlákna. Lepidlo se umístí na okraj nosného papíru, aby byla přesně dodržena volná délka zkušebního vzorku vlákna $L_0 = 25$ mm. Následně se tento vzorek umístí do čelistí zkušebního stroje a před zahájením tahové zkoušky se přestříhne nosný papír, tak aby nedocházelo k ovlivňování výsledku měření. Výhoda spočívá v tom, že se zkoušené vlákno nedostává přímo do kontaktu s čelistmi zkušebního stroje. Je však nutné dbát na výběr vhodného lepidla, aby nedocházelo k ovlivňování výsledků měření.



Obrázek 1.32: Upevnění zkušebního vzorku vlákna k papíru dle normy ASTM International D 3379-75 (ASTM D 3379-75)

1.4.3 Tahové zkoušky vláken

Základním způsobem namáhání vláken je jednoosá deformace v tahu. V tomto režimu se zaznamenává vztah mezi silou a protažením vláken (tahový diagram) (obr. 1.33). Při namáhání v tahu nazýváme odezvu materiálu pevností v tahu.



Obrázek 1.33: Pracovní diagram vlákna (Militký, 2002)

Působí-li na vlákno postupně rostoucí síla, dochází k růstu prodloužení až do bodu přetrhu. Mezi základní hodnoty tahového diagramu patří počáteční modul pružnosti (derivace v počátku) a souřadnice bodu přetrhu, které se označují jako pevnost a tažnost. Vlákno původní délky l_0 a plochy příčného řezu S_0 je vlivem působení síly F prodlouženo na délku l a zúženo na plochu příčného řezu S . Místo absolutní síly F (N) se používá relativní síla F_r nebo napětí σ . Velmi často se u vlákenných materiálů přepočítává absolutní síla na veličinu, která je obrazem průřezu. Tím je u vláken jemnost (rovnice 1.1). Vyjádření napětí pro vlákna bychom mohli zapsat jako relativní sílu (rovnice 1.7) podle vztahu

$$F_r = \frac{F}{T} = \frac{F}{S \cdot \rho} \quad [\text{N.tex}^{-1}] \quad (1.7)$$

kde:

- F_r ... relativní síla $[\text{N.tex}^{-1}]$
- F ... síla při přetržení $[\text{N}]$
- T ... jemnost vlákna $[\text{tex}]$

Napětí je vyjádřeno jako síla na jednotku plochy příčného řezu (rovnice 1.8)

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\text{N.m}^{-2}] = [\text{Pa}] \quad (1.8)$$

kde:

- σ ... tahové napětí $[\text{Pa}]$
- F ... síla při přetržení $[\text{N}]$
- S ... plocha řezu vlákna $[\text{m}^2]$

Platí tedy:

$$\sigma = F_r \cdot \rho \quad \text{resp.} \quad F_r = \frac{\sigma}{\rho} \quad [\text{MPa}] = [\text{N.tex}^{-1}] \cdot [\text{kg.m}^{-3}] \quad (1.9)$$

kde:

- ρ ... hustota vlákna $[\text{Pa}]$

Je tedy zřejmé, že pro vlákna s vyšší hustotou vyjde při shodné relativní síle tahové napětí větší (rovnice 1.9). Naopak při shodném tahovém napětí vyjde pro vlákna o vyšší hustotě relativní síla menší. Při porovnání vláken pro technické použití je tedy třeba posuzovat údaje o pevnosti s ohledem na jejich hustotu (Militký, 2002). Také

místo absolutní hodnoty protažení Δl se používá relativního vyjádření pomocí dlouhíciho poměru. Běžně se však používá deformace definovaná jako (rovnice 1.10)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad [-] \quad (1.10)$$

kde:

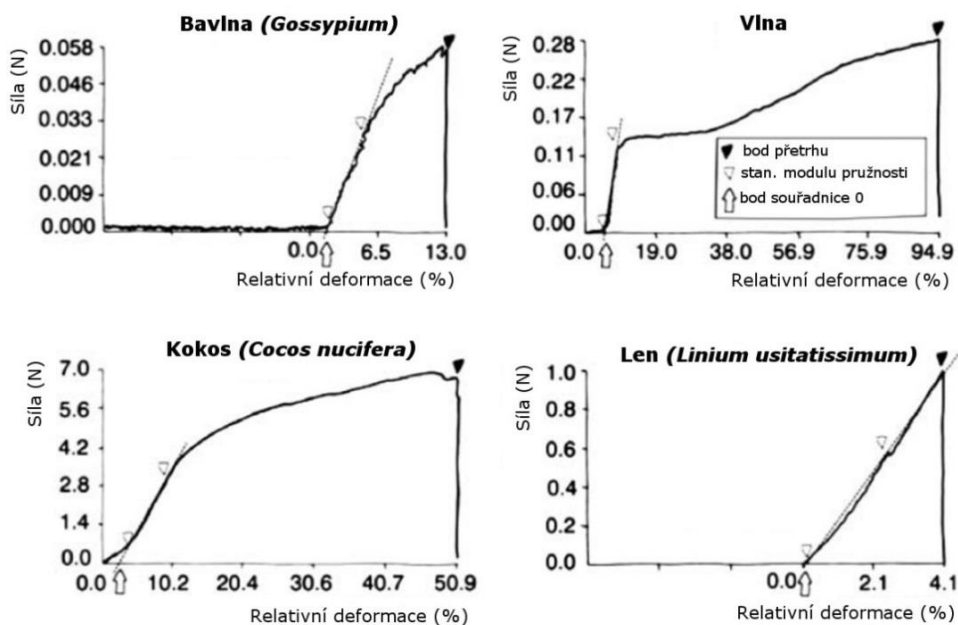
ε ... relativní deformace [-]

Δl ... prodloužení vlákna [mm]

l_0 ... počáteční délka vlákna [mm]

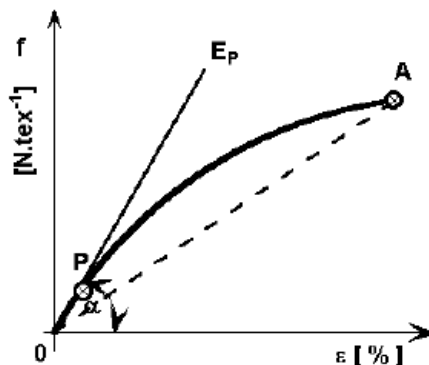
V některých případech se uvádí i tzv. pravá deformace $\varepsilon^* = \ln(l/l_0)$, která vychází z diferenciálního zápisu deformace. Pravá deformace ε^* je pro nenulové hodnoty menší než deformace ε . Relativní deformace do přetrhu vlákna se nazývá tažnost.

Tahové zkoušky vláken bavlny (*Gossypium*), lnu (*Linium usitatissimum*) a kokosu (*Cocos nucifera*) jsou uvedeny na obrázku 1.34. Jedná se o zobrazení sil při přetržení v závislosti na prodloužení. Len (*Linium usitatissimum*), který má malé hodnoty úhlu stoupání mikro fibril (MFA) v S2 sekundární stěně vykazuje téměř lineární elastické chování. Naproti tomu bavlna (*Gossypium*) a vlákna kokosu (*Cocos nucifera*) vykazují v první fázi lineární elastické chování, po kterém následuje druhá fáze s menším zvýšením síly, což má za následek mnohem vyšší celkové prodloužení při přetržení.



Obrázek 1.34: Tahové zkoušky vláken bavlny (*Gossypium*), lnu (*Linium usitatissimum*) a kokosu (*Cocos nucifera*) (Müssig, 2010)

Důležitým parametrem pro zjištění mechanických vlastností vláken je stanovení modulu pružnosti v tahu. U vlákenných materiálů se využívá definice, že modul pružnosti je první derivací funkce tahové křivky, tedy směrnici tečny ke křivce v počátku. Většinou se stanovuje graficky, změří se úhel α a vypočte se $\text{tg } \alpha$ (obr. 1.35). Z těchto důvodů se používá u vlákenných materiálů místo Youngův modul pružnosti pojem počáteční tangentový modul. Bod, kde tečna v počátku opouští tahovou křivku, pak definujeme jako mez pružnosti (Militký, 2002).



Obrázek 1.35: Modul pružnosti vlákna (Militký, 2002)

Modul pružnosti (rovnice 1.11) lze definovat pro vlákna vztahem

$$E_P = \frac{\sigma_P}{\varepsilon_P} = \frac{F_P \cdot l}{S \cdot \Delta l} \quad [\text{MPa}] \quad (1.11)$$

kde:

- E_P ... modul pružnosti vláken [MPa]
- σ_P ... tahové napětí v bodě P [MPa]
- ε_P ... relativní deformace v bodě P [-]

respektive tangentovým modulem pružnosti (rovnice 1.12)

$$E_T = \frac{f_P}{\varepsilon_P} \quad [\text{N.tex}^{-1}] \quad (1.12)$$

kde:

- E_T ... tangentový modul pružnosti [N.tex⁻¹]
- f_P ... měrná síla v bodě P [N.tex⁻¹]
- ε_P ... relativní deformace v bodě P [-]

V pracovním diagramu definujeme dále tzv. sekantový modul, což je spojnice dvou bodů na křivce. Pokud spojíme počátek a konec křivky (obr. 1.35) dostáváme tzv. tuhost vlákna H (rovnice 1.13)

$$H = \frac{F_A}{\varepsilon_A} \quad [\text{N.tex}^{-1}] \quad (1.13)$$

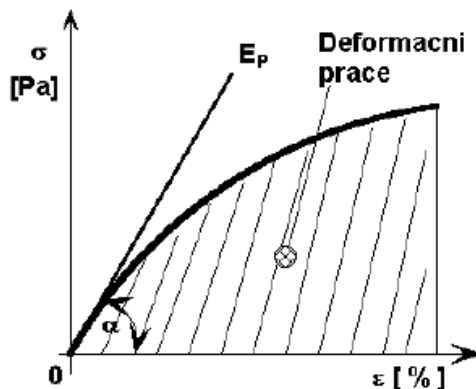
kde:

H ... sekantový modul pružnosti $[\text{N.tex}^{-1}]$

F_A ... relativní síla při přetržení $[\text{N.tex}^{-1}]$

ε_A ... relativní deformace při přetržení $[-]$

Plocha pod tahovou křivkou je definována jako deformační energie vláken (obr. 1.36).



Obrázek 1.36: Deformační energie vlákna (Militký, 2002)

Deformační energii vláken lze stanovit podle vztahu (rovnice 1.14)

$$A = \int_0^l F \cdot dl \quad [\text{J}] \quad (1.14)$$

kde:

A ... deformační energie vláken $[\text{J}]$

F ... tahová síla $[\text{N}]$

l ... deformace vlákna $[\text{m}]$

Deformační energii vláken lze přepočítat na měrnou deformační energii (rovnice 1.15) podle vztahu

$$a = \frac{A}{T} \quad [\text{J.tex}^{-1}] \quad (1.15)$$

kde:

a ... měrná deformační energie vláken $[\text{J.tex}^{-1}]$

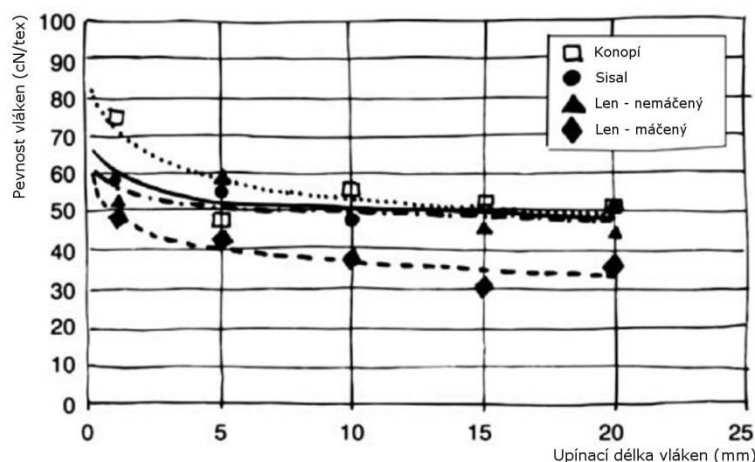
A ... deformační energie vláken $[\text{J}]$

T ... jemnost vláken $[\text{tex}]$

U přírodních vláken jsou však tyto všechny vlastnosti ovlivněny především vlhkostí materiálu, rychlostí deformace a teplotou (Faruk et al., 2012).

1.4.4 Vliv délky vláken

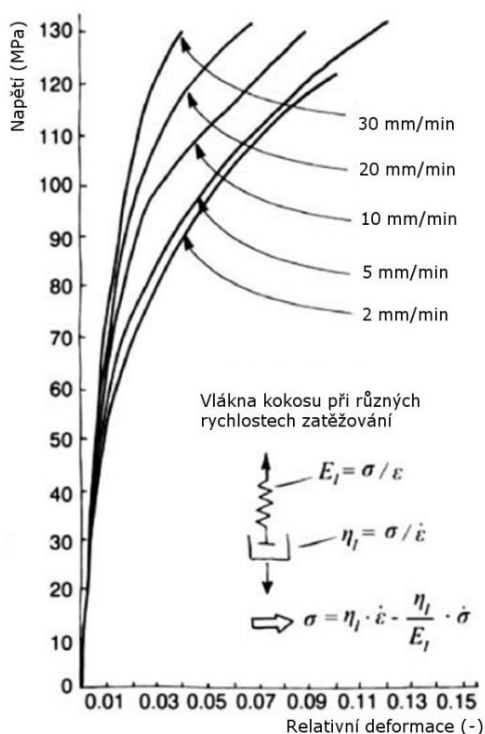
Upínací délka vláken při zkouškách tahem má zásadní vliv na pevnost vláken. Obecně souvisí s problematikou nejslabšího článku vlákna. S rostoucí délkou vláken roste pravděpodobnost vzniku trhlin a dislokací (vad) ve vlákně a tím dochází k oslabování struktury. S rostoucí upínací délkou tedy klesá maximální síla při přetržení. Vliv upínací délky kokosových vláken (*Cocos nucifera*) zkoumali například autoři Kulkarni, Satyanarayana, Sukumaran a Rohatgi (1981). Autoři Bos, Oever a Peters (2002) zjistili, že pevnost lněných vláken (*Linium usitatissimum*) o délce 5 mm je mnohem větší než u vláken délky 30 mm. Stanovili, že pevnost vláken v rozsahu délek 25 – 100 mm dosahuje téměř konstantní hodnoty okolo 500 MPa. Se snižující se upínací délkou pak pevnost vláken výrazně roste až na hodnotu 850 MPa při upínací délce vlákna 3 mm. Xia, Yu, Cheng, Liu a Wang (2009) zkoumali vliv délky u vláken juty (*Corchorus*). Tato vlákna vykazují změnu v pevnosti v rozsahu délek 5 – 20 mm. Pevnost vláken v závislosti na upínací délce je uvedena na obrázku 1.37.



Obrázek 1.37: Vliv délky vláken sisalu (*Linium usitatissimum*) na pevnost v tahu (Nechwatal, Mieck, & Reußmann, 2003)

1.4.5 Vliv rychlosti deformace vláken

Přírodní vlákna vykazují své viskoelastické vlastnosti. Výrazný vliv na chování vláken v tahu má tedy rychlost zatěžování. Vliv rychlosti zatěžování byl pozorován u vláken sisalu (*Agave sisalana*), kokosu (*Cocos nucifera*) a dalších přírodních vláken (Kulkarni et al., 1981). Na obrázku 1.38 je zobrazeno chování vláken kokosu (*Cocos nucifera*) v tahu při různých rychlostech zatěžování.



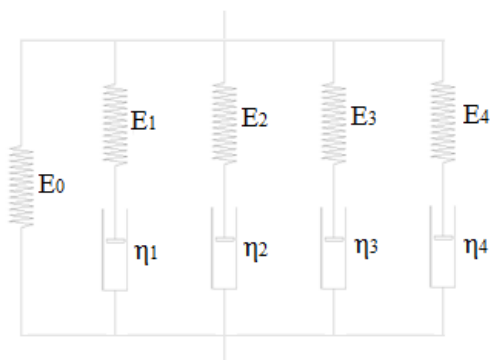
Obrázek 1.38: Vliv rychlosti zatěžování vláken kokosu (*Cocos nucifera*) v tahu (Kulkarni et al., 1981)

Na obrázku 1.38 jsou zobrazeny jednotlivé deformační křivky pro různé rychlosti zatěžování. Vyšší hodnoty relativní deformace vláken lze pozorovat u nižších rychlostí zatěžování. Přírodní vlákna mají jak krystalickou tak amorfni složku, což vysvětluje tvar tahových křivek. Pro křivky je charakteristická počáteční lineární fáze s následnou druhou fází, která vykazuje výraznou nelinearitu. Vlákna se chovají jako viskoelastický model složený z ideální pružiny a tlumiče. Při vyšších rychlostech zatěžování se vlákno chová více jako elastické těleso. Krystalická oblast přenáší působící zatížení, což má za následek vyšší hodnoty pevnosti. Při nižších rychlostech zatěžování se začne projevovat viskózní člen a dochází ke zvýšení relativní deformace a přenášení působící síly na amorfni složky vláken, což má za následek snížení pevnosti a modulu pružnosti vláken (Mukherjee & Satyanarayana, 1984). Autoři Kulkarni et al. (1983) zkoumali vliv rychlosti zatěžování u vláken banánovníku (*Musa sapientum*). V rozsahu rychlostí 0,5 – 100 mm.min⁻¹ docházelo ke zvýšení pevnosti a modulu pružnosti vláken.

1.4.6 Relaxace vláken

K popisu relaxačního chování se využívá generalizovaný Maxwellův model (obr. 1.39). Model tvoří jeden pružný element, který zajišťuje konečnou velikost

deformace a k němu dostatečný počet Maxwellových obecných modelů. Každý model má samozřejmě vlastní tuhost pružného členu E a viskozitu relaxačního členu η .



Obrázek 1.39: Generalizovaný Maxwellův model

Deformaci na první větvi Maxwellova modelu lze zapsat jako (rovnice 1.16)

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{E_1} + \varepsilon_{\eta_1} \quad [-] \quad (1.16)$$

kde:

\mathcal{E} ... celková relativní deformace modelu [-]

\mathcal{E}_E ... relativní deformace na elastickém členu [-]

\mathcal{E}_η ... relativní deformace na viskózním členu [-]

po provedení první derivace podle času a využití vztahů pro napětí lze napsat

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\dot{\sigma}_1}{E_1} + \frac{\sigma_1}{\eta_1} \quad [-] \quad (1.17)$$

kde:

σ_1 ... napětí na první větvi modelu [Pa]

E_1 ... modul pružnosti elastického členu [Pa]

η_1 ... viskozita viskózního členu [Pa.s⁻¹]

V případě relaxace je deformace ε konstantní, tedy rovnice 1.17 ($d\varepsilon/dt = 0$), pak platí

$$\sigma_1 = \sigma_{10} e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \quad [\text{Pa}] \quad (1.18)$$

s využitím superpozice všech Maxwellových větví pak dostáváme (Blahovec, 2008)

$$\sigma = \varepsilon \left[E_0 + \sum_i E_i e^{-\frac{E_i t}{\eta_i}} \right] \quad [\text{Pa}] \quad (1.19)$$

kde:

σ ... napětí modelu [Pa]

\mathcal{E} ... relativní deformace modelu [-]

E_0 ... modul pružnosti nultého elastického členu [Pa]

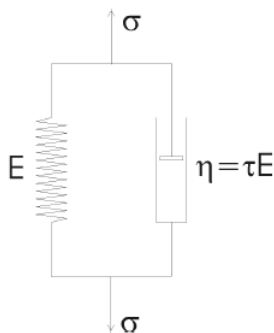
E_i ... modul pružnosti i-tého elastického členu [Pa]

η_i ... viskozita i-tého viskózního členu [$\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$]

t ... čas [s]

1.4.7 Kríp vláken

Kríp je jeden z nejdůležitějších parametrů u vlákněných materiálů. K popisu chování materiálu při konstantním zatížení se využívá nejčastěji Kelvinův model (obr. 1.40), který je složen z paralelního spojení pružného členu s vlastní tuhostí E a viskózního členu s viskozitou η .



Obrázek 1.40: Obecný Kelvinův model

Vztah pro výpočet napětí (rovnice 1.20) lze vyjádřit ve tvaru

$$\sigma(t) = \sigma_{\eta}(t) + \sigma_E(t), \quad [\text{Pa}] \quad (1.20)$$

kde:

$\sigma(t)$... napětí modelu [Pa]

$\sigma_{\eta}(t)$... napětí na viskózním členu [Pa]

$\sigma_E(t)$... napětí na elastické členu [Pa]

po vyjádření napětí v jednotlivých větvích Kelvinova modelu lze zapsat (rovnice 1.21)

$$\sigma(t) = \tau E \dot{\varepsilon}(t) + E \varepsilon(t). \quad [\text{Pa}] \quad (1.21)$$

kde:

τ ... časová konstanta [s^{-1}]

E ... modul pružnosti elastického členu [Pa]

\mathcal{E} ... relativní deformace modelu [-]

Pro creep platí konstantní napětí $\sigma = \sigma_0$, tedy z rovnice 1.21 se stává diferenciální rovnice 1.22

$$\sigma_0 = \tau E \dot{\varepsilon}(t) + E \varepsilon(t), \quad [\text{Pa}] \quad (1.22)$$

jejímž řešením je rovnice 1.23

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad [-] \quad (1.23)$$

Podělením výsledné rovnice 1.23 napětím σ_0 a zavedením poddajnosti jako reciproké hodnoty modulu pružnosti, resultuje vztah pro kríповou poddajnost (rovnice 1.24)

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{E} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad [\text{Pa}^{-1}] \quad (1.24)$$

kde:

D ... poddajnost [Pa^{-1}]

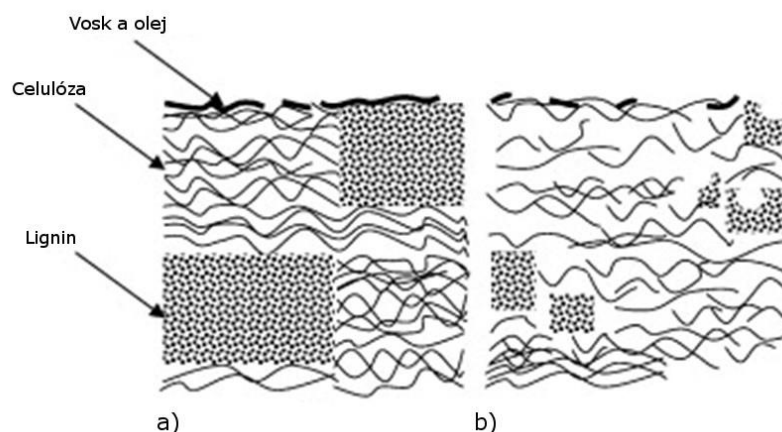
1.4.8 Chemická modifikace vláken

Obecně platí, že vlastnosti syntetických vláken lze v průběhu výroby určitým způsobem upravovat, tak aby splnily požadavky na různá použití. V případě přírodních vláken je nutné provést určité procedury s cílem poskytnout jim širokou škálu vlastností vhodných pro různé konečné použití. Například vlákna bavlny vyžadují před použitím chemickou modifikaci pro zlepšení vlastností, jako je barvitelnost, lesk a ošetření pro zlepšení struktury tkaniny. Přírodní vlákna mají velmi dlouhou historii používání a s ní je spojena také historie modifikací vláken. Jednou z prvních modifikací vláken bylo barvení, které zlepšovalo estetické vlastnosti vláken (Rippon & Evans, 2012).

Způsoby zlepšování vlastností vláken jsou založeny především na mokré technologii, ve které směs chemického činidla a vody reaguje s povrchem vláken. Tato reakce je jednoznačně heterogenní a otázky spojené s vniknutím činidla do vláken a jejich vzájemné reakce mají zásadní význam. Jednou z dalších technik modifikací vláken je využití plasmu, která se nejčastěji využívá právě v kombinaci s mokrou technologií pro zvýšení účinku. Nejčastějším důvodem modifikace vlastností přírodních

vláken je jejich použití v kompozitních materiálech. Rozhraní a kvalita spojení mezi matricí a povrchem vlákna mají zásadní význam. Mezifázové adheze určují převážnou část mechanických vlastností výsledného kompozitního materiálu. V případě nevhodné přilnavosti na mezifázovém rozhraní a slabý přenos sil má za následek zhoršené vlastnosti kompozitního materiálu (Wang, Panigrahi, Tabil, & Crerar, 2007). Zhoršená interakce mezi matricí a vláknem je dána v důsledku přítomností hydrofilních hydroxylových skupin. Tento hydrofilní charakter brání efektivní interakci s matricí. Kromě toho pektin a voskové látky na povrchu vláken působí jako bariéra pro spojení s matricí. Pro zlepšení vlastností na mezifázovém rozhraní musí být přírodní vlákna různými způsoby chemicky ošetřena. Správná chemická úprava snižuje hydrofilní tendenci vláken a výrazným způsobem zlepšuje mechanické vlastnosti výsledného kompozitního materiálu (Dash et al., 2000).

Jednou z nejrozšířenějších metod modifikace přírodních celulózových vláken je pomocí hydroxidu sodného (NaOH). Krystalické struktury celulózy se postupně mění na amorfni oblasti. To poskytuje lepší přístup k proniknutí chemikálií. Molekuly celulózy jsou v amorfni oblasti odděleny na větší vzdálenosti a mezery jsou vyplněny molekulami vody. Alkalicky citlivý hydroxyl OH skupiny reaguje s molekulami vody a odstraňuje je ze struktury vlákna. Navíc roztok hydroxidu sodného zvyšuje odolnost vlákna proti vlhkosti a odstraňuje část hemicelulózy, ligninu, pektinu a vosku, které pokrývají povrch vlákna (Li, Mai, & Ye, 2007; Mwaikambo, Tucker, & Clark, 2007). Z obrázku 1.41 jsou patrné strukturální rozdíly upraveného a neupraveného vlákna.



Obrázek 1.41: Typická struktura alkalicky: (a) neupraveného, (b) upraveného přírodního vlákna (Leonard & Martin, 2002)

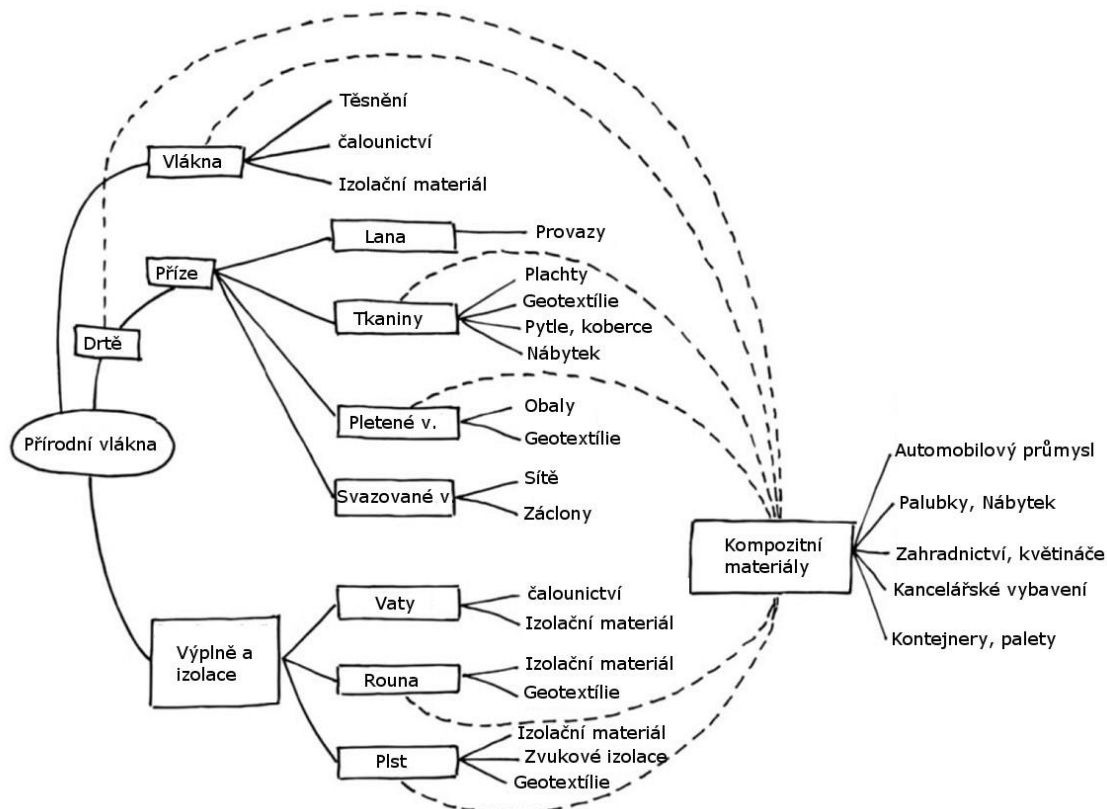
Další možností chemické modifikace přírodních vláken je využití chemické sloučeniny silanu. Silan tvoří chemickou vazbu mezi povrchem vlákna a matricí prostřednictvím siloxanového mostu. V průběhu procesu zpracování vlákna dochází k několika stupňům hydrolýzy, kondenzaci a tvorby vazeb. Silanoly se tvoří v přítomnosti vlhkosti. Při kondenzačním procesu jeden konec silanolu reaguje s celulózou a druhý konec s matricí (Kabir, Wang, Lau, & Cardona, 2012). Výsledkem je zvýšení adheze vláken v matrici a zlepšení mechanických vlastností kompozitního materiálu (Li et al., 2007). Silanem ošetřené vláknové kompozitní materiály vykazují lepší tahové vlastnosti a pevnost než v případě alkalického ošetření (Valadez, Cervantes, Olayo, & Herrera, 1999). Epoxidový kompozitní materiál vyztužený vlákny juty (*Corchorus*), které byly ošetřeny silanem, vykazoval o 12 % větší pevnost v tahu a o 7 % větší modul pružnosti v tahu než v případě ošetření vláken alkalickým roztokem (Seki, 2009).

Další možnou chemickou modifikací přírodních vláken je pomocí roztoku acetylové skupiny (CH_3CO). Acetylová skupina látek reaguje s hydrofilní hydroxylovou skupinou a odstraňuje z vláken vlhkost. Navíc tato úprava způsobuje, že povrch vláken je více strukturovaný a zlepšuje se tak styk vláken s matricí. Vlákna jsou máčena v kyselině octové za zvýšené teploty. Tím dochází k odstranění části hemicelulózy a ligninu z vláken. Polypropylenový kompozitní materiál vyztužený ošetřenými vlákny lnu (*Linum usitatissimum*) vykazoval o 25 % větší pevnost v tahu než v případě neošetřených vláken (Bledzki, Mamun, Lucka-Gabor, & Gutowski, 2008).

Mezi další, avšak méně rozšířené metody chemické modifikace přírodních vláken patří benzoylace, ošetření peroxidem, chloritanem sodným či izokyanátem (Li et al., 2007; Wang et al., 2007; Li, Panigrahi, & Tabil, 2009; Kabir et al., 2012).

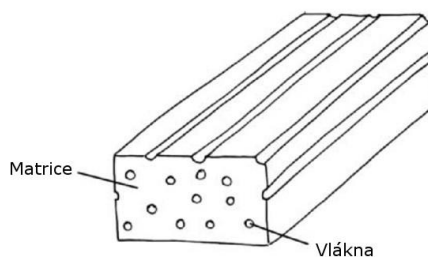
1.5 Využití přírodních vláken

V posledních letech je patrná stále rostoucí poptávka po přírodních vláknech. Vyčerpatelnost ropných zásob a povědomí o životním prostředí tvoří hybnou sílu pro zavádění přírodních vláken do technických aplikací. Poměrně velká variabilita fyzikálních a mechanických vlastností jednotlivých typů vláken vede k širokým možnostem uplatnění. Na obrázku 1.42 jsou uvedeny základní možnosti využití přírodních vláken v technické praxi.



Obrázek 1.42: Využití přírodních vláken v technických aplikacích (Graupner & Müssig, 2012)

Jedno z velmi rozšířených využití přírodních vláken je jako výztuž v kompozitních materiálech s polymerovou maticí. Zde je snaha postupně nahrazovat syntetická vlákna. Výhody přírodních vláken spočívají v jejich dobré pevnosti a nízké hustotě. Za nevýhody lze zmínit například citlivost na vlhkost, hořlavost a proměnlivá kvalita. Princip kompozitního materiálu vyztuženého vlákny je patrný z obrázku 1.43.



Obrázek 1.43: Princip kompozitního materiálu vyztuženého vlákny (Graupner & Müssig, 2012)

Velmi rozšířené využití kompozitních materiálů s přírodními vlákny je v automobilovém průmyslu. Počátky přírodních vláken v automobilovém průmyslu se datují k roku 1903, kdy automobil Ford model T využíval přírodní vlákna v bočnicích karoserie (Rosato & Rosato, 2005). První kompozitní materiál vyztužený přírodními vlákny z konopí (*Cannabis sativa*) byl vyroben právě automobilkou Ford v roce 1940

(Zoran, Guo, Javni, & Zhang, 2004). Ve stejných letech pak Henry Ford pomocí sekery veřejně zkouší pevnost fenolformaldehydových dílů karoserie vyztužených přírodními vlákny (obr. 1.44).



Obrázek 1.44: Henry Ford zkouší v roce 1940 pevnost dílů karoserie vyztužených přírodními vlákny (Baltazar & Sain, 2012)

V roce 1990 využívá automobilka Daimler vlákna kokosu (*Cocos nucifera*) v hlavových opěrkách, slunečních clonách a sedadlech. Kokosová vlákna (*Cocos nucifera*) mají velmi dobrou schopnost absorbovat vlhkost a následně ji opět uvolňovat (Suddell, 2008), proto jsou velmi vhodná pro výrobu automobilových sedadel. V následujících letech pak automobilka Daimler vyrobila polypropylenový kompozitní materiál vyztužený vlákny lnu (*Linium usitatissimum*), sisalu (*Agave sisalana*) a juty (*Corchorus*) použitý jako obložení interiéru osobních automobilů (Bledzki et al., 2008). Automobilka Lotus následně vyrábí vozidlo ECO Elise, kde byla celá řada dílů vyrobena z přírodních vláken, jako například: přední nárazník, panely karoserie, sedadla a další. Náhradou skelných vláken konopnými (*Cannabis sativa*) automobilka snížila hmotnost vozidla o 32 kg, především díky nižší měrné hustotě konopných vláken (Kozlowski, 2012). Dnešní automobilové díly z přírodních kompozitních materiálů jsou nejčastěji vyráběny na bázi polyesteru nebo polypropylenu a jsou vyztuženy vlákny lnu (*Linium usitatissimum*), konopí (*Cannabis sativa*) nebo sisalu (*Agave sisalana*). Zavádění přírodních vláken do automobilového průmyslu je vedeno především motivem ceny, snížením hmotnosti a marketingem, než technickými požadavky (Saravana & Kumar, 2010). Za lídra ve využití přírodních vláknových kompozitních materiálů lze označit Spolkovou republiku Německo (SRN). Němečtí výrobci automobilů Mercedes Benz, Bayerische Motoren Werke AG (BMW), Audi a Volkswagen vedou iniciativu při zavádění přírodních materiálů do interiéru a exteriéru vozidel (Kozlowski, 2012; Sanjay, Arpitha, Naik, Gopalakrishna, & Yogesha, 2016). Vzhledem k tomu, že

přírodní vlákna využívají především výrobci luxusních vozidel lze konstatovat, že se jedná také o ochranu životního prostředí a marketing a nikoliv pouze o snížení nákladů (Puglia, Biagiotti, & Kenny, 2004). Příkladem může být Mercedes Benz, který využívá epoxidové matrice vyztužené vlákny juty (*Corchorus*) ve svých luxusních E – třídách již od roku 1996. Na obrázku 1.45 jsou pak zobrazeny jednotlivé konstrukční díly luxusního automobilu BMW vyrobené z přírodních obnovitelných zdrojů.



Obrázek 1.45: Recyklovatelné díly automobilu BMW na bázi přírodních komponent
(Kozłowski, 2012)

Průmyslovému využití přírodních vláken je věnována stále větší pozornost v různých výrobních odvětvích. Přírodní vlákna lze nalézt nejen v automobilovém průmyslu, ale také ve stavebnictví, letectví, oděvním průmyslu, sportovním průmyslu a geotextilním průmyslu (Hao, Zhao, & Chen, 2013, Sanjay et al., 2016). Mohou být použity jako konstrukční kompozity, v nekompozitních strukturách, v geotextíliích, v obalové technice, jako sorbenty, filtry a různé lisované výrobky. Částečně rozšířené je také využití přírodních vláken ve stavebnictví. Izolační materiály z přírodních vláken poskytují dobré tepelné a akustické vlastnosti. Jejich problém však spočívá v nízké odolnosti proti hoření. Jsou přirozeně hořlavé, a proto je nutné přidávání různých inhibitorů hoření, jako jsou například boritany. Tato vlastnost výrazně omezuje použití přírodních vláken v oblastech s náročnými požadavky na požární normy. Vlákna kokosu (*Cocos nucifera*) se například využívají k výrobě multifunkčních panelů ve stavebnictví. Vlákna juty (*Corchorus*) se naopak používají při výrobě vodních nádrží, vnitřních prvků v oblasti bydlení či v již zmíněném automobilovém průmyslu. Vzhledem k jejich velmi dobrým izolačním parametrům se využívají jako panely oddělující prostor motoru a kabiny pro cestující (Khondker, Ishiaku, Nakai, & Hamada, 2005). Například vlákna konopí (*Cannabis sativa*) a kenafu (*Hibiscus cannabinus*) mají velkou pevnost v tahu a snižují rázovou pevnost čisté matrice. Tyto kompozitní

materiály jsou vhodné do konstrukčních částí, které vyžadují vysokou pevnost v tahu a tuhost. Příkladem mohou být díly nábytku či různé statické držáky součástí. Naopak vlákna bavlny (*Gossypium*) způsobují zvýšení rázové houževnatosti kompozitních materiálů, ale snižují pevnost a tuhost. Takovéto kompozitní materiály s dobrými vlastnostmi pro pohlcení rázové energie mohou být použity jako interiérové díly osobních automobilů nebo v ochranných přilbách (Sanjay et al., 2016).

Velmi rozšířeným typem využívání přírodních vláken je také jejich aplikace v oblasti výroby geotextilií. Nejčastější použití je jako ochrana svahů proti erozi (obr. 1.46). Pro výrobu geotextilií se využívají vlákna lnu (*Linium usitatissimum*), konopí (*Cannabis sativa*), kenafu (*Hibiscus cannabinus*) a kokosu (*Cocos nucifera*). Velmi důležitým parametrem pro určení vhodnosti přírodního vlákna na výrobu geotextilií je jejich chemické složení, především obsah ligninu. Lignin určuje odolnost vlákna proti mikrobiálnímu útoku (Kozłowski, 2012). Vysoký obsah ligninu (33 %) mají například právě vlákna kokosu (*Cocos nucifera*) (Jayasekara & Amarasinghe, 2010). Ve srovnání se syntetickými geotextiliemi mají přírodní materiály výhodu v jejich biologické rozložitelnosti. Poté co splní funkci a stabilizují svah, dokud se nevytvoří dostatečný kořenový systém rostlin, dojde k jejich biologickému rozkladu. Umožňují také přístup kořenového systému rostlin, bez omezení jejich funkce.



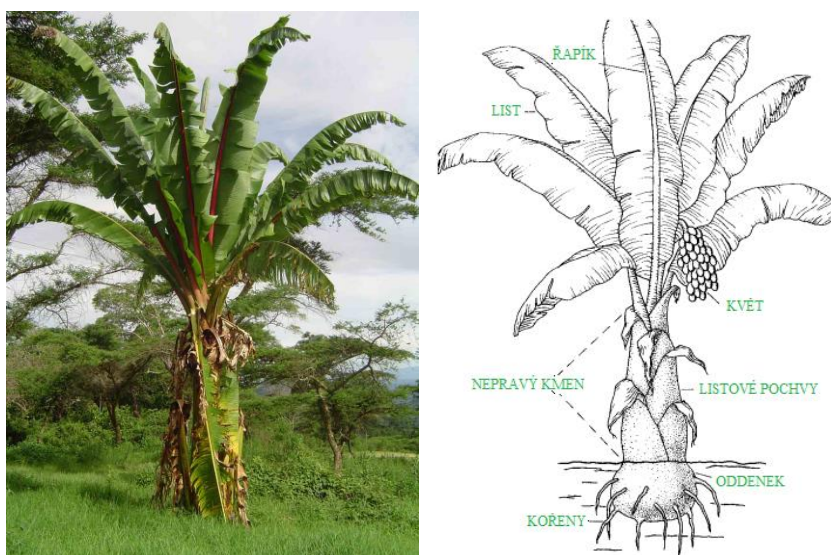
Obrázek 1.46: Přírodní geotextilie pro ochranu svahů proti erozi (Kozłowski, 2012)

1.6 Rostlina „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

1.6.1 Anatomie

Fyzikální struktura rostliny „falešného“ banánovníku se liší od běžně známého banánovníku rodu *Musa*. Rostlina dorůstá výšky 6 – 12 metrů. Základní část rostliny tvoří nepravý kmen (pseudostem), který dosahuje výšky 2 až 3 metrů a průměru do 1 metru a je tvořen z pevně se překrývajících listových pochev. Pseudostem (obr.

1.47) obsahuje jedlou dužinu a kvalitní vlákna a směrem ke spodní části rostliny se rozšiřuje. Z pseudostemu vyrůstají velké dlouhé listy, které mají tvar kopí s lososově růžovým řápkem. Listy jsou více vzpřímené než u běžného banánovníku a mohou být až 5 metrů dlouhé a téměř jeden metr široké. Vyrůstají ve tvaru spirály na okrajové části pseudostemu a postupně od spodní části pseudostemu odumírají. Na spodní část pseudostemu navazuje oddenek (corm)(Brandt et al., 1997).



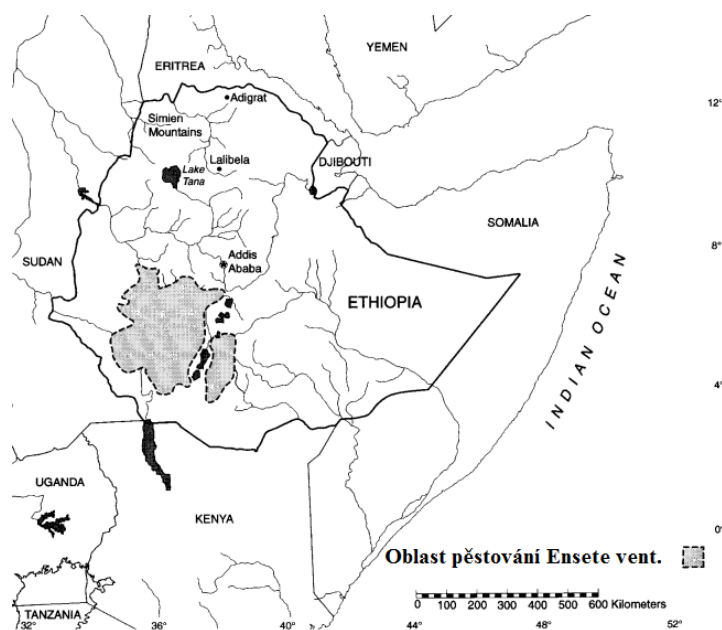
Obrázek 1.47: Rostlina „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) (Brandt et al., 1997)

Rostlina má obvykle na konci života pouze jeden květ, který je tvořen velkým hrozem, obvykle dosahujícím délky 1-2 metry a vyrůstajícím ze středu rostliny. Květ má pouze jeden okvětní lístek, který je obklopen velkým množstvím kaštanově zbarvených listenů. Kvetení nastává obvykle po osmém roce a probíhá v letních měsících. Po odkvětu se vytvoří malé plody podobné banánům, které nejsou jedlé. Plody jsou žlutě zbarvené s černými skvrnami a obsahují tvrdá černá semena o velikosti 1 cm. Po odkvětu rostlina odumírá. Většina rostlin se sklízí před nebo v rané fázi tvorby květu. Volně rostoucí rostliny *Ensete ventricosum* pochází ze semen. Naopak uměle pěstované rostliny na plantážích jsou nejčastěji rozmnožovány pomocí výhonů (Brandt et al., 1997).

1.6.2 Botanická klasifikace a oblast pěstování

Rostlina „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) patří do řádu *Scitamineae*, rodiny *Musaceae* a rodu *Ensete* (Simmonds, 1962). Rodina *Musaceae* je rozdělena na dva rody – *Musa* a *Ensete* (pozn. Běžně známé banánovníky, které produkují jedlé plody, jsou také z rodiny *Musaceae*, ale z rodu *Musa*). Nejčastěji se tato rostlina označuje jako

etiopský banánovník či „falešný“ banánovník, protože neprodukuje jedlé plody (Buzuneh, 1980). Je jedním ze čtyř hlavních zemědělských plodin v Etiopii a poskytuje zdroj potravy pro zhruba 13 mil. lidí, více než 20 % populace sídlící v jižní etiopské vrchovině (Yemataw, Mohamed, & Yeshitla, 2013). Jako volně šířený druh se pěstuje pouze v oblasti Etiopie (obr. 1.48), především v jižní, ale také ve střední a severní vrchovině, kolem jezera Tana a horských oblastí Simien (Brandt et al., 1997). Oblasti pěstování se nachází v nadmořských výškách od 1100 do 3000 m. n. m., s průměrným ročním úhrnem srážek 1100 až 1500 mm, s průměrnou teplotou 10-21 °C a průměrnou relativní vlhkostí vzduchu 63-80 % (Brandt et al., 1997). Rostlina je velmi odolná vůči období sucha, kde jsou jednoleté plodiny, např. obiloviny zcela poškozeny (Bayush, 1991). V sezóně 2010/11 se rostlina „falešného“ banánovníku pěstovala na ploše 3 020,143 km² s celkovým výnosem 690 tis. tun (Central Statistical Agency 2011).



Obrázek 1.48: Oblast pěstování rostliny *Ensete ventricosum* v Etiopii (Brandt et al., 1997)

1.6.3 Sklizeň a možnosti využití

Rostlina *Ensete Ventricosum* (obr. 1.47) se sklízí obvykle v době tvorby květu. K tvorbě květu dochází mezi 3 – 15 rokem, nejčastěji však kolem 6 nebo 7 let a je to závislé především na klimatických podmínkách. Zpracování je výhradně prací žen, které využívají tradiční nástroje. Z rostlin se nejprve odstraní staré listy. Následně se ve spodní části oddělí pseudostem od podzemního oddenku (cormu). Poté se sloupávají jednotlivé konkávní listové pochvy a nakrájí se na části o délce zhruba 1 metr. Následně se takto nakrájený materiál připevní na dřevěné prkno, které je upevněno pod úhlem

45° od země, a pomocí škrabky se sloupávají jednotlivé vrstvy. Mezi hlavní potravinové produkty, které rostlina *Ensete ventricosum* poskytuje, patří kocho, bula a amicho (Spring et al., 1996). Kocho [kočo] je částečně fermentovaný škrob, který se získává ze směsi loupaných listových pochev a nastrouhané podzemní části oddenku (cormu). Zpracováním kocho a pečením na otevřeném ohni se poté získává chleba, koláče, či různé druhy placek. Bula se získává podobně jako kocho škrábáním listových základů a strouháním podzemní části pseudostemu (corm). Následně se lisováním směsi odstraní voda bohatá na škrob. Ten se nechá usadit a vysušit na slunci. Výsledným produktem je poté bílý prášek, ze kterého se následně vyrábí palačinky, kaše či knedlíky. Amicho je uvařená podzemní část oddenku (cormu), která se využívá především u mladších rostlin.

Jako vedlejší produkt při škrábání listových pochev se získávají vlákna, která nacházejí uplatnění při výrobě lan, sáčků, pytlů, rohoží a jako stavební materiál (Brandt et al., 1997).

2 Cíle disertační práce

Cílem této disertační práce je v oblasti vědeckého poznání poskytnout nové dosud nepublikované poznatky zaměřené na mechanické vlastnosti vláken z rostliny „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*). Poznání dosud nepublikovaných mechanických vlastností těchto vláken a jejich co možná nejpřesnější matematický popis přináší konstruktérům další alternativu k běžným materiálům vyráběným z ropných produktů. Cíle této disertační práce mohou přinést nové poznatky nejen do oblasti konstruování z biologických materiálů. Hlavní cíl této disertační práce bude naplněn pomocí dosažení dílčích cílů:

1) Stanovení základních fyzikálních a mechanických vlastností vláken

V této části budou stanoveny základní geometrické, fyzikální a mechanické vlastnosti vláken. Bude stanovena jemnost vláken. Dále budou vytvořeny příčné řezy vláken zalité v parafínu a analyzovány s využitím mikroskopu (Zeiss Jenavert, Carl Zeiss, Jena, Německo). U příčných řezů vláken budou stanoveny rozměry, plocha průřezu a sestaveny histogramy četností průměrů. Dále bude zkoumána průměrná délka vláken, směrodatná odchylka rozptylu a sestaven histogram četností délek vláken. Z hlediska fyzikálních vlastností bude podle metody ASAE (ASAE S410.1 DEC97), (ASAE, 1998) stanovena vlhkost vláken a hustota vláken pomocí standardní gravimetrické metody. Pro provádění tahových zkoušek budou vytvořeny zkušební vzorky. Tahové zkoušky budou provedeny na měřicím zařízení pro univerzální tahové a tlakové zkoušky (Labortech, MPTest 5.050, Česká republika). Na základě tahových zkoušek bude určeno napětí při přetržení, relativní deformace, modul pružnosti a měrná deformační energie vláken.

2) Stanovení struktury řezu vláken s využitím SEM technologie

V této části práce budou analyzovány příčné řezy vláken pomocí elektronové mikroskopie. Na základě stanovené metodiky budou vytvořeny vzorky pomocí přípravného zařízení (Quorum Q150R ES, Velká Británie) a analyzovány pomocí elektronového mikroskopu (Tescan Mira3, Czech Republic). Získaná data budou zpracována pomocí programů pro obrazovou analýzu. Bude studována morfologie řezu vláken a struktura povrchu vláken.

3) Stanovení vlivu délky vláken na mechanické vlastnosti

V této části práce bude stanoven vliv volné délky vláken na napětí při přetržení, objemovou deformační energii a modul pružnosti vláken. Na základě stanovené metodiky budou vytvořeny vzorky pro tahové zkoušky pro různé upínací délky. Následně budou provedeny tahové zkoušky jednotlivých délek vláken na zařízení (Labortech, MPTest 5.050, Česká republika). Naměřená data budou s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu proložena vhodnou matematickou funkcí a bude vytvořen matematický model popisující vztah mezi délkou vláken a jich napětím při přetržení, objemovou deformační energií a modulem pružnosti. Vhodnost navrženého matematického modelu bude ověřena analýzou rozptylu (ANOVA).

4) Stanovení vlivu teploty a vlhkosti vláken na mechanické vlastnosti

V této části práce se bude experimentálně ověřovat vliv teploty a vlhkosti na napětí vláken při přetržení. Budou vytvořeny zkušební vzorky vláken dle zvolené metodiky. S ohledem na biologický materiál bude zvolen vhodný rozsah teplot a vlhkostí a budou provedeny tahové zkoušky. Dále bude zkoumán vliv vlhkosti vláken na relativní deformaci při tahovém zatížení. K provádění tahových zkoušek bude použito zařízení pro tahové zkoušky (Labortech, MPTest 5.050, Česká republika) vybavené teplotní komorou. Naměřená data budou vyhodnocena a ověřena pomocí statistických metod.

5) Stanovení viskoelastických vlastností vláken

V této části práce bude stanoven vliv rychlosti zatěžování vláken na tahové vlastnosti. Podle předem stanovených hypotéz bude vybrán vhodný rozsah deformačních rychlostí. Pro tahové zkoušky budou vytvořeny vzorky podle předem stanovené metodiky. Měření bude probíhat při standardních laboratorních podmínkách na zařízení pro provádění tahových zkoušek (Labortech, MPTest 5.050, Česká republika). Bude stanoven obecný matematický model popisující závislost mezi rychlostí zatěžování a modulem pružnosti vláken. Vhodnost navrženého matematického modelu bude ověřena analýzou rozptylu (ANOVA). Dále bude experimentálně zjištěno relaxační a kríповé chování vláken. Na základě naměřených dat budou sestaveny viskoelastické modely krípu a relaxace vláken s využitím obecných Maxwellových a Kelvinových modelů. Sestavené modely budou matematicky popsány a vyhodnoceny pomocí analýzy rozptylu (ANOVA).

6) Stanovení sušicích křivek a hygroskopických vlastností vláken

V této části práce budou stanoveny sušicí křivky a hygroskopické vlastnosti vláken. Sušení bude provedeno při různých teplotách sušicího vzduchu. Naměřená data změny hmotnosti vzorku vláken v závislosti na čase budou transformována do obecného matematického modelu popisujícího proces sušení vláken pro různé teploty sušicího vzduchu. Dále bude zkoumán proces absorpce vzdušné vlhkosti vláken a stanovena hodnota rovnovážné vlhkosti vláken.

3 Materiály a metody

3.1 Materiál

Všechny experimenty uvedené v kapitole Materiály a metody byly provedeny na vláknech z rostliny „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*). Vlákna byla původem z Etiopie z regionu Awassa, ležícího cca 270 km jižně od hlavního města Addis Abeba. Byla získána standardním způsobem, tedy ruční sklizní místními farmáři a následně přírodně sušena, tak aby byly splněny základní požadavky na skladovatelnost a transport vláken. Následně byl svazek vláken zabalen do PE obalu a letecky transportován do České republiky, do laboratoří Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze, kde byla provedena jednotlivá měření a experimenty. Vlákna byla v laboratorních podmínkách vakuově zabalena a skladována bez přístupu slunečního záření při teplotě 5 °C. Výjimkou jsou pouze vlákna, která byla použita pro stanovení vlivu vlhkosti, sušících křivek a hygroskopických vlastností. Tato vlákna byla odebrána ihned při sklizni a bez následného sušení byla s přírodní vlhkostí vakuově zabalena do PE obalu a bez přístupu slunečního záření byla skladována při teplotě 5 °C do následného transportu.

3.2 Stanovení fyzikálních vlastností

3.2.1 Stanovení délky

Délka vláken je definována jako vzdálenost konců vlákna napřímeného a bez obloučků a napětí. Délka vláken byla stanovena přímou metodou, při které se měří délky jednotlivých vláken. Pro měření délek vláken byla použita skleněná deska, na kterou byla nanesena v tenké vrstvě adhezní kapalina. Jako adhezní kapalina byl zvolen přírodní olej. Následně byla jednotlivá vlákna natahována na skleněnou desku a měřena pomocí milimetrového papíru. Jednotlivé délky vláken byly zařazovány do jednotlivých tříd. Celkem bylo měřeno 360 vzorků vláken. Z naměřených hodnot byla stanovena průměrná délka vláken podle rovnice 3.1

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k l_j n_j \quad [\text{mm}] \quad (3.1)$$

kde:

\bar{l} ... průměrná délka vláken [mm]

n ... počet vláken [-]

k ... počet tříd [-]
 l_j ... třídní znak [mm]
 n_j ... absolutní četnost [-]

Dále byl stanoven rozptyl délek vláken podle rovnice 3.2

$$s_l^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^k (l_j - \bar{l})^2 * n_j \quad [\text{mm}^2] \quad (3.2)$$

kde:

s_l^2 ... rozptyl délek vláken [mm²]

a směrodatná odchylka rozptylu (rovnice 3.3)

$$s = \sqrt{s^2} \quad [\text{mm}] \quad (3.3)$$

kde:

s ... směrodatná odchylka rozptylu [mm]

3.2.2 Stanovení jemnosti

Jemnost vláken je podle normy definována jako délková hmotnost, tedy poměrem mezi hmotností a délkou vláken (Militký, 2002). Jemnost vláken byla stanovena gravimetrickou metodou podle normy ČSN EN ISO 2060. Svazky vláken o délce 1 metr byly váženy na analytických vahách Kern AEJ 200-CM (Kern & Sohn GmbH., Balingen, Německo). Jemnost vláken pak byla následně stanovena podle rovnice 3.4

$$T_v = \frac{m_{Sv}}{l_{Sv} n_v} * 10^3 \quad [\text{mg/m}] = [\text{tex}] \quad (3.4)$$

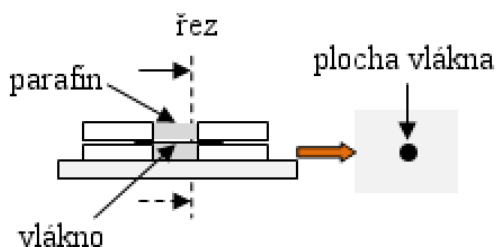
kde:

T_v ... jemnost vláken [tex]
 m_{Sv} ... hmotnost svazku vláken [mg]
 l_{Sv} ... odříznutá délka svazku vláken [m]
 n_v ... počet vláken ve svazku [-]

Jemnost vláken byla stanovena jako průměrná hodnota ze tří opakování.

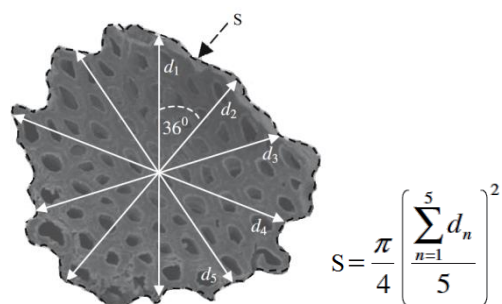
3.2.3 Stanovení příčného řezu

Pro stanovení plochy a tvaru příčného řezu byla vlákna natažena a uchycena pomocí speciálního přípravku (obr. 3.1) a následně zalita roztaveným materiálem Paraplast X-Tra, který byl tvořen směsí parafínu a nízkomolekulárních polymerů.



Obrázek 3.1: Schéma přípravku pro řezy vláken

Pomocí řezačky vzorků byly vytvořeny tenké řezy pro mikroskop. Vzorky vláken zalité do parafínu byly analyzovány pomocí optického mikroskopu (Zeiss Jenavert, Carl Zeiss, Jena, Německo). Schématický řez vláknem je uveden na obrázku 3.2.



Obrázek 3.2: Schématický příčný řez vláknem (Munawar et al., 2006)

Z naměřených hodnot byla stanovena plocha příčného řezu vlákna podle rovnice 3.5

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (3.5)$$

kde:

- S ... plocha příčného řezu vlákna [m^2]
- D ... ekvivalentní průměr vláken [m]

Z naměřených hodnot ekvivalentních průměrů vláken byl sestaven histogram četností. Jednotlivé třídy histogramu byly zvoleny s hodnotou 5 μm . Z naměřených a vypočtených hodnot byla stanovena kruhovost vláken c podle rovnice 3.6, jako poměr

ploch příčného řezu S_v a příčného řezu ekvivalentního kruhového vlákna S_e majícího stejný obvod (Militký, 2002).

$$c = \frac{S_v}{S_e} \quad [-] \quad (3.6)$$

kde:

c ... kruhovost vláken [-]

S_v ... plocha příčného řezu vlákna [m^2]

S_e ... plocha příčného řezu ekvivalentního vlákna se stejným obvodem [m^2]

3.2.4 Stanovení vlhkosti a hustoty

Vlhkost vláken byla stanovena podle normy ASAE (ASAE S410.1 DEC97, ASAE, 1998). Vzorky vláken o hmotnosti 100 g byly náhodně odebrány a váženy na elektronických vahách Kern (Kern 440-35, Kern & Sohn GmbH, Balingen, Německo). Vzorky byly sušeny v sušárně (Memmert UF 110, Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Německo) při teplotě 100 ± 3 °C po dobu 72 hodin. Po vysušení byly vzorky vyjmuty ze sušárny a opět váženy a byl stanoven obsah vlhkosti podle rovnice 3.7

$$w_h = \frac{m_w - m_d}{m_w} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.7)$$

kde:

w_h ... vlhkost vláken [%]

m_w ... hmotnost vláken před sušením [kg]

m_d ... hmotnost vláken po sušení [kg]

Výsledná vlhkost vláken byla stanovena jako průměrná hodnota ze tří opakování a byla stanovena směrodatná odchylka.

Hustota vláken byla stanovena gravimetrickou metodou s využitím sady na měření hustoty na elektronických vahách Kern (Kern 440-35, Kern & Sohn GmbH, Balingen, Německo). Vzorky vláken o známé hmotnosti byly zality do pečetního vosku. Nejprve byla stanovena hustota vzorků pečetního vosku bez vláken a následně s vlákny. Hustota jednotlivých vzorků byla stanovena podle známého vztahu 3.8

$$\rho = \frac{m \cdot (\rho_{vody} - \rho_{vzduch})}{m - m_1} + \rho_{vzduch} \quad [kg \cdot m^{-3}] \quad (3.8)$$

kde:

ρ ... hustota vzorku [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

m ... hmotnost vzorku na vzduchu [kg]

m_l ... hmotnost vzorku ponořeného ve vodě [kg]

ρ_{vody} ... hustota vody [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

ρ_{vzduch} ... hustota vzduchu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

Výsledná hustota vláken byla stanovena jako průměrná hodnota ze tří opakování a byla stanovena směrodatná odchylka.

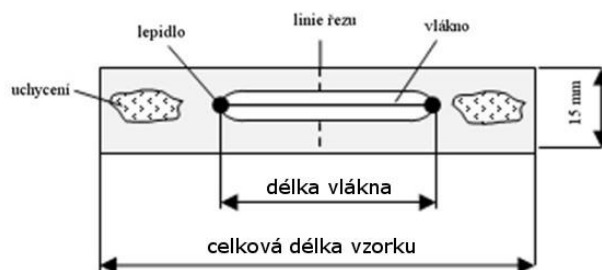
3.2.5 Stanovení struktury řezu s využitím SEM technologie

Struktura řezu vláken byla zkoumána pomocí elektronového mikroskopu MIRA 3 (Tescan, Tescan Orsay Holding a.s., Česká republika). Vzorky vláken byly pokoveny tenkou vrstvou stříbra (20 nm), aby splňovaly požadavky na SEM analýzu. Snímky byly pořízeny při napětí 5 kV a pracovní vzdálenosti 20 mm. Získané snímky byly vyhodnoceny v programovém prostředí elektronového mikroskopu.

3.3 Stanovení mechanických vlastností

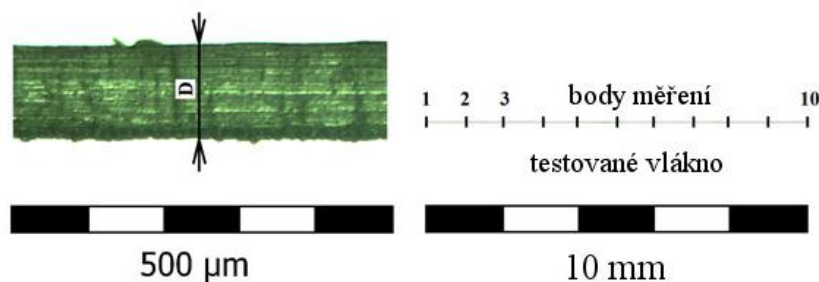
3.3.1 Stanovení tahových vlastností

Stanovení tahových vlastností vláken bylo provedeno podle normy ASTM International D3379-75. Jedná se o běžnou metodu pro provádění tahových zkoušek přírodních vláken. Například autoři Musanif & Thomas (1999) zkoumali pomocí této metody tahové vlastnosti kokosových vláken (*Cocos nucifera*). Pro provádění tahových zkoušek bylo náhodně vybráno 30 vzorků vláken. Upevnění vláken do testovacího stroje bylo provedeno pomocí nosného papíru (obr. 3.3) podle normy. Volná délka vláken pro tahové zkoušky byla 25 mm. Vlákná byla nalepena na papír pomocí dvousložkového lepidla GlueEpoxy Rapid. Po uplynutí potřebného času pro vytvrzení lepidla udávaného výrobcem byly jednotlivé vzorky vláken připraveny pro tahové zkoušky.



Obrázek 3.3: Nosný papír pro tahové zkoušky vláken (ASTM D 3379-75)

Pro zjištění průměru vláken bylo každé vlákno před provedením tahové zkoušky analyzováno pomocí optického mikroskopu Zeiss (Zeiss Jenavert, Carl Zeiss, Jena, Německo). Pro stanovení rozměrů vláken bylo vybráno 10 bodů v celé volné délce vlákna L_0 , jak je zobrazeno na obrázku 3.4. Ekvivalentní průměr vláken byl následně stanoven jako průměrná hodnota z 10-ti naměřených hodnot.



Obrázek 3.4: Stanovení ekvivalentních průměrů vláken

Pro zjišťování tahových vlastností byla vybrána vlákna s ekvivalentním průměrem $(205 \pm 10) \mu\text{m}$. Zjišťování tahových vlastností vláken bylo provedeno na zařízení pro provádění tahových zkoušek Labortech (MP Test 5.050, Labortech, Česká republika), které bylo osazeno snímačem síly AST (KAP-S 50N, AST, Německo). Připravené vzorky vláken nalepené na nosném papíře byly uchyceny do čelistí stroje a před zahájením tahové zkoušky byl nosný papír rozstřížen, tak aby neovlivňoval výsledky měření. Tahové zkoušky byly prováděny rychlostí $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ při laboratorní teplotě 22°C .

Zjištěné hodnoty tahových sil a deformací vláken byly transformovány na tahová napětí a relativní deformace pomocí rovnic (3.9) a (3.10).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad [\text{Pa}] \quad (3.9)$$

kde:

σ ... tahové napětí vlákna [Pa]

F ... tahová síla vlákna [N]

S ... plocha příčného řezu vlákna [m^2]

$$\varepsilon = \frac{x}{L_0} \quad [-] \quad (3.10)$$

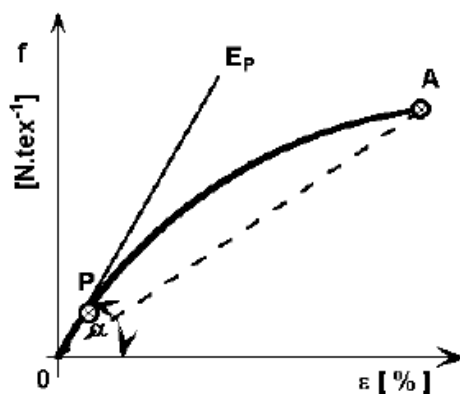
kde:

ε ... relativní deformace vlákna [-]

x ... prodloužení vlákna [m]

L_0 ... počáteční volná délka vlákna [m]

Z naměřených a vypočtených hodnot tahového napětí a relativní deformace byl stanoven počáteční tangentský modul E_P podle obrázku 3.5.



Obrázek 3.5: Počáteční tangentský modul vláken (Militký, 2002)

Deformační energie byla stanovena jako plocha pod křivkou tahového napětí a relativní deformace. Objemová deformační energie byla kalkulována pomocí rovnice 3.11

$$\lambda = \sum_{n=0}^{n=i-1} \left[\left(\frac{\sigma_{n+1} + \sigma_n}{2} \right) \cdot (\varepsilon_{n+1} - \varepsilon_n) \right] \quad [\text{J}] \quad (3.11)$$

kde:

λ ... deformační energie vlákna [J]

σ_n ... tahové napětí vlákna [Pa]

ε_n ... relativní deformace vlákna [-]

Deformační energie byla následně transformována na objemovou deformační energii vláken podle vztahu 3.12

$$\lambda_v = \frac{\lambda}{V} \quad [\text{Jm}^{-3}] \quad (3.12)$$

kde:

λ_v ... objemová deformační energie vlákna [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$]

λ ... deformační energie vlákna [J]

V ... objem vlákna [m^3]

3.3.2 Stanovení vlivu délky

Stanovení vlivu délky vláken na tahové vlastnosti bylo provedeno podle normy ASTM International D3379-75. Vlákná s ekvivalentním průměrem (205 ± 10) μm byla jednotlivě nalepena na nosný papír pomocí dvousložkového lepidla GlueEpoX Rapid. Volná délka vláken L_0 pro jednotlivé kategorie vzorků byla zvolena $L_0 = 10, 20, 40, 80, 160$ a 320 mm. Připravené vzorky vláken s různou počáteční délkou L_0 byly následně testovány pomocí zařízení pro provádění tahových zkoušek Labortech (MP Test 5.050, Labortech, Česká republika), které bylo osazeno snímačem síly AST (KAP-S 50N, AST, Německo). Před zahájením tahových zkoušek byl nosný papír přestřížen. Vlákná byla testována do destrukce – přetrhu vzorku rychlostí relativní deformace vláken $0,02 \text{ min}^{-1}$ při laboratorní teplotě $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Experiment byl opakován 20 krát pro každou volnou délku vláken L_0 . Pro stanovení plochy příčného řezu vláken byl použit optický mikroskop Zeiss (Zeiss Jenavert, Carl Zeiss, Jena, Německo). Rozměry vláken byly stanoveny na 10-ti bodech v celé volné délce vlákna L_0 . Naměřené hodnoty tahových sil a deformací byly převedeny pomocí rovnic 3.9 a 3.10 na tahová napětí a relativní deformace

Z naměřených a vypočtených hodnot tahového napětí a relativní deformace byl stanoven počáteční tangentový modul E_P podle obrázku 3.5. Objemová deformační energie byla stanovena jako plocha pod křivkou napětí a relativní deformace a byla kalkulována pomocí rovnic 3.11 a 3.12.

3.3.3 Stanovení vlivu teploty a vlhkosti

Pro stanovení vlivu teploty a vlhkosti vláken na tahové vlastnosti byly vytvořeny vzorky podle normy ASTM International D3379-75. Tahové zkoušky byly zvoleny obdobně jako v kapitole 3.3.1. Vzorky vláken o ekvivalentním průměru (205 ± 10) μm byly testovány při různých teplotách $T_0 = -20, 0, 20, 40, 60, 80, 100, 140, 180$ a $220 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. Experimenty byly prováděny na zařízení pro provádění tahových zkoušek Labortech (MP Test 5.050, Labortech, Česká republika), které bylo osazeno snímačem síly AST (KAP-S 50N, AST, Německo). Součástí zařízení byla teplotní komora Labortech (TH2700 Standard, Labortech, Česká republika), která umožňovala nastavení teplotního rozsahu. Všechna vlákna byla temperována 10 minut na příslušnou teplotu před provedením jednotlivé zkoušky, což bylo běžně použito i u ostatních autorů (Bourmaud & Baley, 2010). Tahové zkoušky byly prováděny do destrukce – přetrhu

vláken při rychlosti $0,5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Bylo provedeno 20 měření pro každou teplotu vláken.

Zjištění vlivu vlhkosti vláken na tahové vlastnosti bylo provedeno pro různé obsahy vlhkosti vláken $M_c = 10, 20, 40, 60, 80$ a $90 \pm 5\%$. Vlákná byla sklizena s přírodní vlhkostí a byla postupně sušena v laboratorní sušárně Memmert (Memmert UF 110, Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Německo) na stanovenou vlhkost. Vlákná s odpovídající vlhkostí a ekvivalentním průměrem (205 ± 10) μm byla vložena do čelistí testovacího stroje a byly provedeny tahové zkoušky. Celkem bylo provedeno 20 měření pro každý obsah vlhkosti vláken.

3.4 Stanovení viskoelastických vlastností

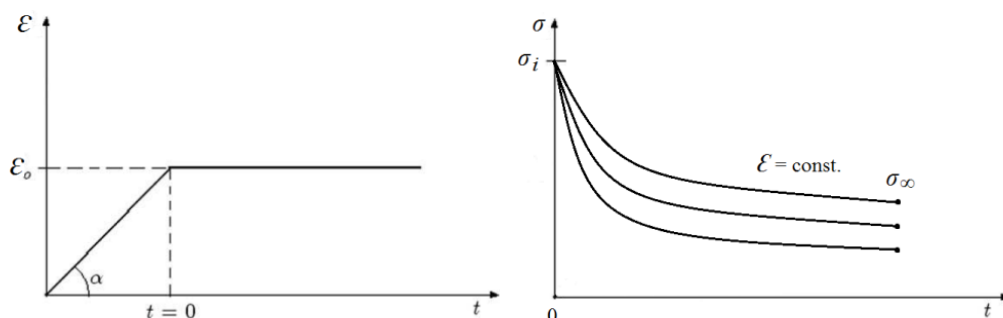
3.4.1 Stanovení vlivu rychlosti zatěžování

Pro stanovení vlivu rychlosti zatěžování byly vybrány vzorky vláken s volnou délkou $L_0 = 25 \text{ mm}$ a ekvivalentním průměrem ($205 \pm 10 \mu\text{m}$), které byly testovány při rychlostech deformace $v = 10, 30, 50, 100, 150$ a $300 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Naměřené hodnoty tahových sil a prodloužení vláken byly převedeny pomocí rovnic 3.9 a 3.10 na hodnoty tahových napětí a relativních deformací. Bylo provedeno 20 měření pro každou rychlost zatěžování. Z naměřených hodnot byly stanoveny počáteční tangentové moduly pružnosti vláken. Naměřené hodnoty byly proloženy pomocí Marquardt – Levenbergova algoritmu a byl stanoven matematický model popisující vztah mezi počátečním tangentovým modulem pružnosti vláken a rychlostí zatěžování. Navržený model byl ověřen pomocí analýzy rozptylu ANOVA.

3.4.2 Stanovení relaxace

Pro stanovení viskoelastických vlastností vláken bylo náhodně vybráno 20 vzorků s ekvivalentním průměrem vláken (205 ± 10) μm . Na každém vzorku vláken byla stanovena maximální síla F_{max} při přetržení. Testy relaxačního chování byly provedeny pro zatížení 15, 30, 45, 60, 75 a 90 % maximální síly v tahu F_{max} . Vzorky vláken s upínací délkou $L_0 = 100 \text{ mm}$ byly zatěžovány rychlostí 3,1 N/s až na limitní hodnotu konstantní relativní deformace ϵ_0 , která odpovídala zatížení 15, 30, 45, 60, 75 a 90 % maximální síly v tahu F_{max} . Naměřené hodnoty tahových sil byly převedeny na tahová napětí pomocí rovnice 3.9. Průběh zatěžování pro relaxaci vláken je patrný z obrázku 3.6. Vzorky vláken byly uchyceny do čelistí stroje pro provádění tahových

zkoušek Labortech (MP Test 5.050, Labortech, Česká republika) se snímačem síly AST (KAP-S 50N, AST, Německo). Relaxační testy byly prováděny pro čas $t = 600$ s.

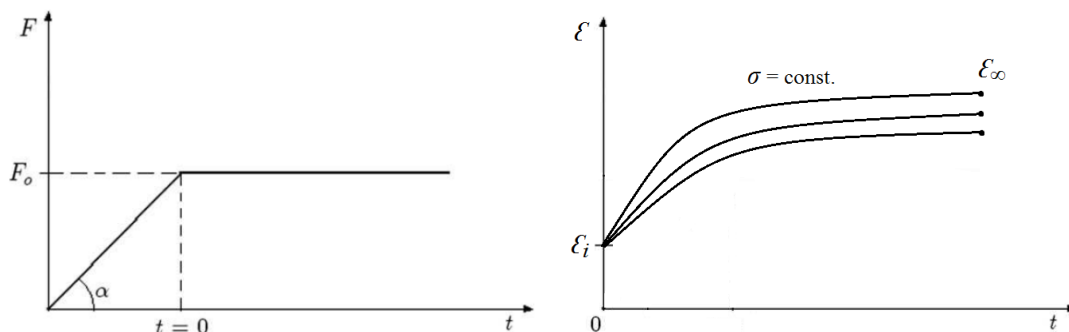


Obrázek 3.6: Standardní průběh zatěžování pro relaxaci a křivky relaxace napětí

Naměřené hodnoty relaxace napětí vláken byly proloženy pomocí exponenciální křivky s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu a byl sestaven matematický model relaxačního chování vláken. Navržený model byl ověřen pomocí analýzy rozptylu ANOVA.

3.4.3 Stanovení kríp

Pro stanovení kríповých vlastností bylo vybráno 20 vzorků vláken s ekvivalentním průměrem (205 ± 10) μm . Na každém vzorku vláken byla stanovena maximální síla F_{max} při přetržení. Testy kríповého chování byly provedeny pro zatížení 15, 30, 45, 60, 75 a 90 % maximální síly v tahu F_{max} . Vzorky vláken s upínací délkou $L_0 = 100$ mm byly zatěžovány rychlostí 3,1 N/s až na limitní hodnotu konstantní zatížení F_0 , což odpovídalo zatížení 15, 30, 45, 60, 75 a 90 % maximální síly v tahu F_{max} . Průběh zatěžování pro kríp vláken je patrný z obrázku 3.7a.



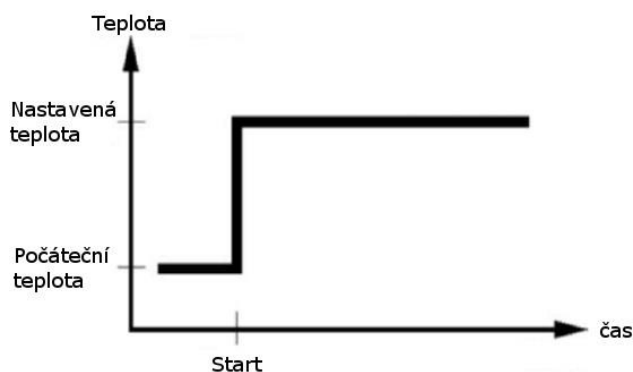
Obrázek 3.7: Standardní průběh zatěžování pro kríp a křivky krípu

Testy kríповého chování byly prováděny pro čas $t = 600$ s. Naměřené hodnoty krípu vláken byly proloženy pomocí křivky s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu

a byl sestaven matematický model kríповého chování vláken. Navržený model byl ověřen pomocí analýzy rozptylu (ANOVA).

3.5 Stanovení sušících křivek a hygroskopických vlastností

Pro stanovení sušících křivek byly vybrány vzorky vláken s přírodní vlhkostí, které byly ihned po ruční sklizni vakuově zabaleny do PE obalu a bez přístupu slunečního záření byly skladovány při teplotě 5 °C. U vzorků vláken byla stanovena vlhkost ($78,4 \pm 1,4$ %), podle metody uvedené v kapitole 3.2.4. Sušící experimenty byly provedeny na sušících vahách Radwag (Radwag, MA 50.R, Polsko). Sušící váhy byly vybaveny IR zářičem o výkonu 400 W a byly nastaveny na standardní režim sušení (obr. 3.8). Sušící křivky vláken byly stanoveny pro teploty sušení $T_d = 40, 60, 80$ a 100 ± 1 °C. Před sušením byla vlákna nastříhána na délku $L = 25$ mm. Vzorky vláken o hmotnosti (10 ± 1) g byly následně vloženy do sušících vah a postupně sušeny. Hmotnost vláken byla v pravidelných časových intervalech zaznamenávána do interní paměti měřicích vah.



Obrázek 3.8: Standardní režim sušení sušících vah Radwag

Naměřené sušící křivky byly proloženy pomocí exponenciální rovnice s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu a byl vytvořen obecný matematický model popisující proces sušení. Navržený model byl ověřen pomocí analýzy rozptylu (ANOVA).

Hygroskopické vlastnosti vláken byly zkoumány na vzorcích vláken o hmotnostech 100 g, které byly vloženy do sušárny a sušeny při teplotě 70 °C po dobu 72 hodin. Po vysušení byly vzorky vláken vloženy do vlhkostní komory Memmert (Memmert UF 110, Memmert GmbH + Co. KG, Schwabach, Německo), kde byla

nastavena relativní vlhkost vzduchu 60 a 90 ± 5 % a teplota vzduchu 25 °C. Pro každou relativní vlhkost vzduchu byla provedena tři opakování.

3.6 Analýza dat

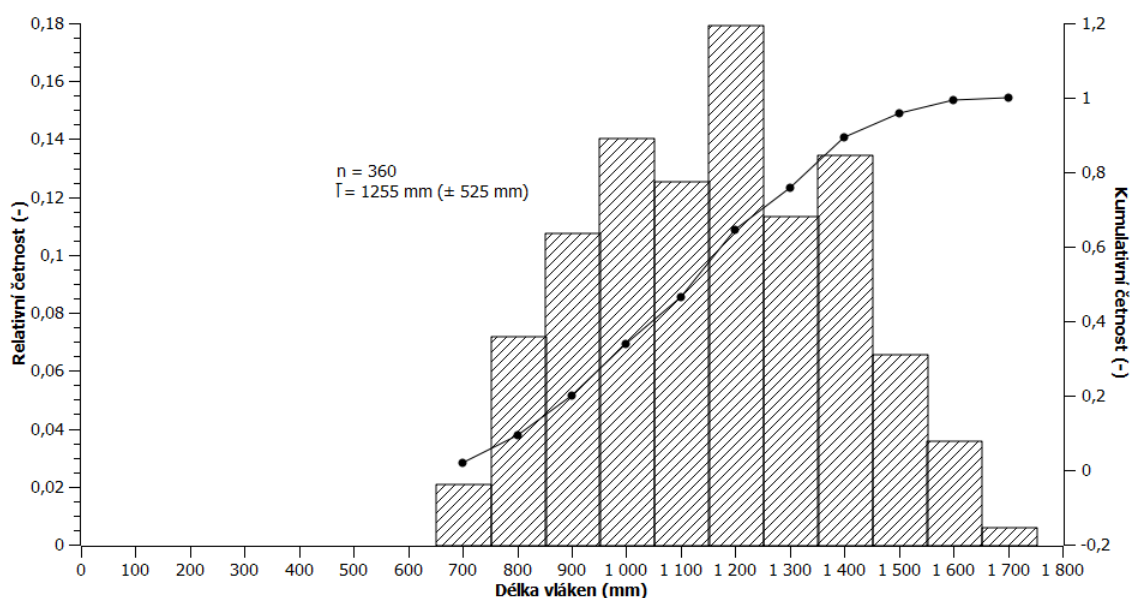
Všechny naměřené výsledky byly zpracovány pomocí počítačového programu Mathcad 14 (MathCAD 14, PTC Software, Needham, MA, USA)(Pritchard, 1998) s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu pro stanovení matematických modelů. Marquardt – Levenberg algoritmus je standardní technika k prokládání nelineárních funkcí metodou nejmenších čtverců. Jedná se o nelineární metodu, která opakovaně snižuje součet čtverců chyb mezi prokládanou funkcí a naměřenými datovými body prostřednictvím sekvence změn hodnot parametrů.

4 Výsledky a diskuse

4.1 Fyzikálních vlastností

4.1.1 Délka vláken

Průměrná délka vláken a směrodatná odchylka (1225 ± 525) mm byla stanovena podle rovnic 3.1 a 3.2. Z naměřených délek vláken byl sestaven histogram četností uvedený na obrázku 4.1. Z naměřených hodnot je zřejmé, že vlákna „falešného“ banánovníku vykazují poměrně velkou variabilitu v délce získaných vláken, což je typické pro přírodní vlákna (Faruk et al., 2012).



Obrázek 4.1: Histogram četností délek vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Délka přírodních vláken je dána částí rostliny, ze které byla získána a především také technikou zpracování, což zásadně ovlivňuje délku získaného vlákna (Müssig, 2010). Velmi podobné délky byly stanoveny také u vláken sisálu (*Agave sisalana*) či abaky (*Musa textillis*) (Müssig, 2010). Srovnatelné výsledky s vlákny abaky (*Musa textillis*) jsou dány především tím, že se získávala obdobným způsobem ze stejných částí rostlin.

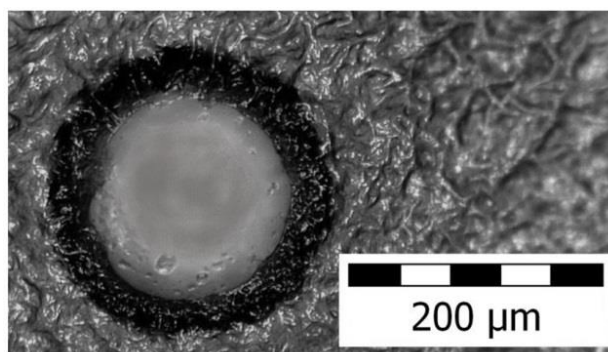
4.1.2 Jemnost vláken

Jemnost vlákna ($11,84 \pm 1,23$) tex byla stanovena gravimetrickou metodou a vypočtena podle rovnice (3.4). Při stejné jemnosti mají vlákna s větší hustotou materiálu menší poloměr. Obdobných hodnot jemnosti dosahovala vlákna konopí 14,9 tex při průměru vláken 114 μm (Mohanty, Misra, & Drzal, 2005). Vlákna banánovníku (*Musa*

textilis) dosahovala jemnosti 14 tex (Tholkappiyan, 2016). Velmi výrazný vliv na jemnost vláken má především chemická modifikace vláken. Například při chemické modifikaci vláken banánovníku roztokem 8% NaOH došlo ke snížení jemnosti ze 14 tex na 9 tex (Tholkappiyan, 2016).

4.1.3 Příčný řez vláken

Pomocí optického mikroskopu byly vyhotoveny snímky vláken v řezu (obr. 1.1). Z jednotlivých snímků vláken byly zjištěny geometrické parametry řezu vláken.



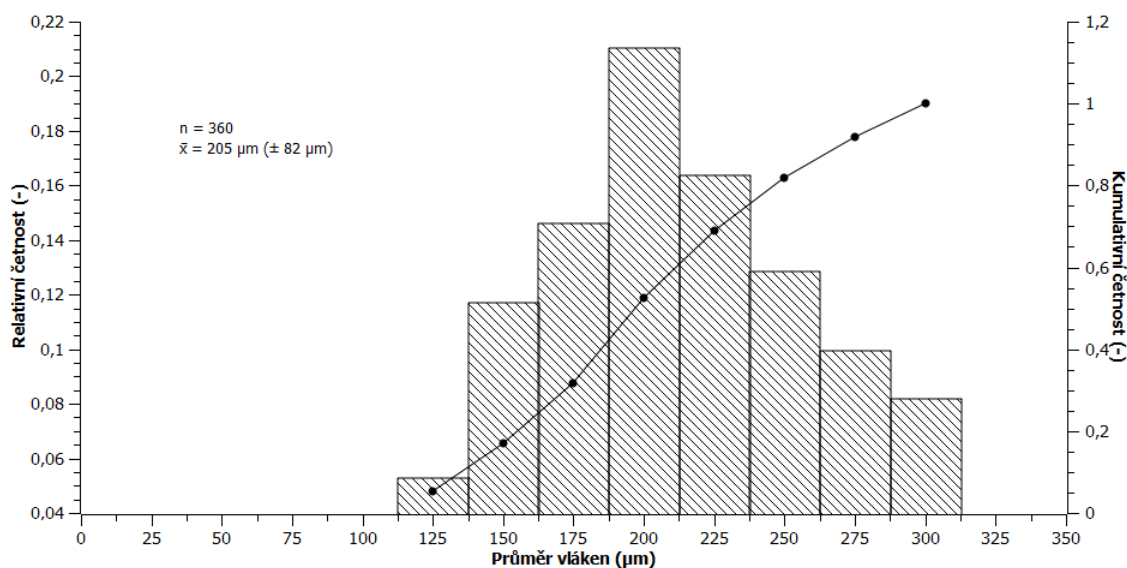
Obrázek 4.2: Zobrazení příčného řezu vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) zalitého v parafínu

Podle rovnice 3.5 byla stanovena plocha příčného řezu vláken. Naměřené a vypočtené hodnoty pro pět náhodně vybraných vláken jsou uvedeny v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1: Průměr a plocha průřezu vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*), data v tabulce uvedena se směrodatnou odchylkou

Vlákno	Ekvivalentní průměr D (μm)	Plocha příčného řezu S (μm^2)
1	$192,25 \pm 11,5$	29014 ± 2144
2	$169,24 \pm 5,42$	22484 ± 980
3	$167,98 \pm 3,84$	22151 ± 921
4	$214,14 \pm 12,5$	35997 ± 2340
5	$209,32 \pm 9,81$	34395 ± 2104

Ekvivalentní průměr vláken ($205 \pm 82 \mu\text{m}$) byl naměřen na 360 vzorcích vláken. Z naměřených hodnot ekvivalentních průměrů vláken byl sestaven histogram četností, který je uveden na obrázku 4.3. Histogram četností byl sestaven pro 360 náhodně vybraných vzorků vláken. Šířka tříd histogramu četností byla zvolena $25 \mu\text{m}$.



Obrázek 4.3: Histogram četností průměrů vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

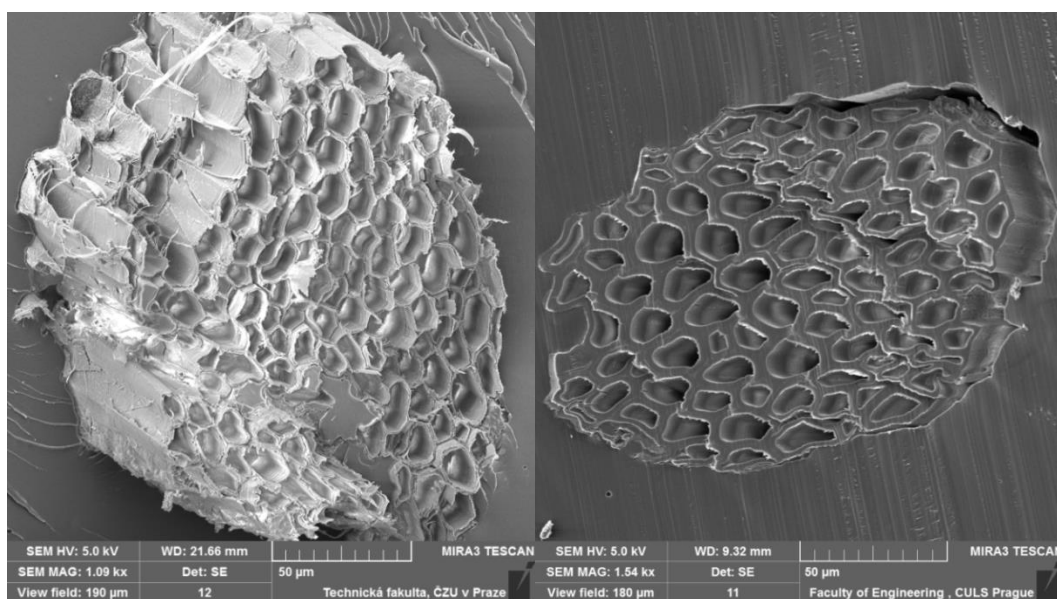
Naměřené hodnoty průměrů vláken a sestavený histogram četností ukazují, že získaná data dosahují velké variability naměřených hodnot, což je běžné u přírodních vláken (Faruk et al., 2012). Například přírodní vlákna z kokosu (*Cocos nucifera*) dosahují průměru vláken v rozsahu (100 – 400) μm (Ramakrishna & Sundararajan, 2005; Reis, 2006; Aggarwal, 1992). Vlákna banánovníku (*Musa textilis*) dosahují (80 – 250) μm , vlákna juty (*Corchorus olitorius*) (25 – 200) μm a vlákna konopí (*Cannabis sativa*) (10 – 50) μm (Zhai et al., 2012; Satyanarayana et al., 2007; Rao & Rao, 2007; Davies, Morvan, Sire, & Baley, 2007). Dále byla podle rovnice 3.6 stanovena kruhovost vláken ($0,69 \pm 0,06$).

4.1.4 Vlhkost a hustota vláken

Vlhkost vláken ($8,7 \pm 0,84$) % byla stanovena standardní gravimetrickou metodou a vypočtena pomocí rovnice 3.7. Vlhkost vláken představuje důležitý parametr pro skladovatelnost vláken. Obdobné hodnoty vlhkosti dosahují také ostatní přírodní vlákna. Například vlákna bavlny (*Gossypium*) dosahují běžné hodnoty vlhkosti 7,3 %, vlákna juty (*Chorchorus*) 12,1 % nebo vlákna lnu (*Linum usitatissimum*) 10,4 % (Faruk et al., 2012). Hustota vláken (690 ± 35) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ byla stanovena gravimetrickou metodou pomocí rovnice 3.8. Autoři Chandramohan & Marimuthu (2011) uvádějí hustotu sisalových vláken (*Agave sisalana*) (700 – 800) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, abakových vláken (*Musa textilis*) (750 – 950) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo vláken bambusu (*bambusoide Luerss*) (700 – 1100) $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Faruk et al., 2012).

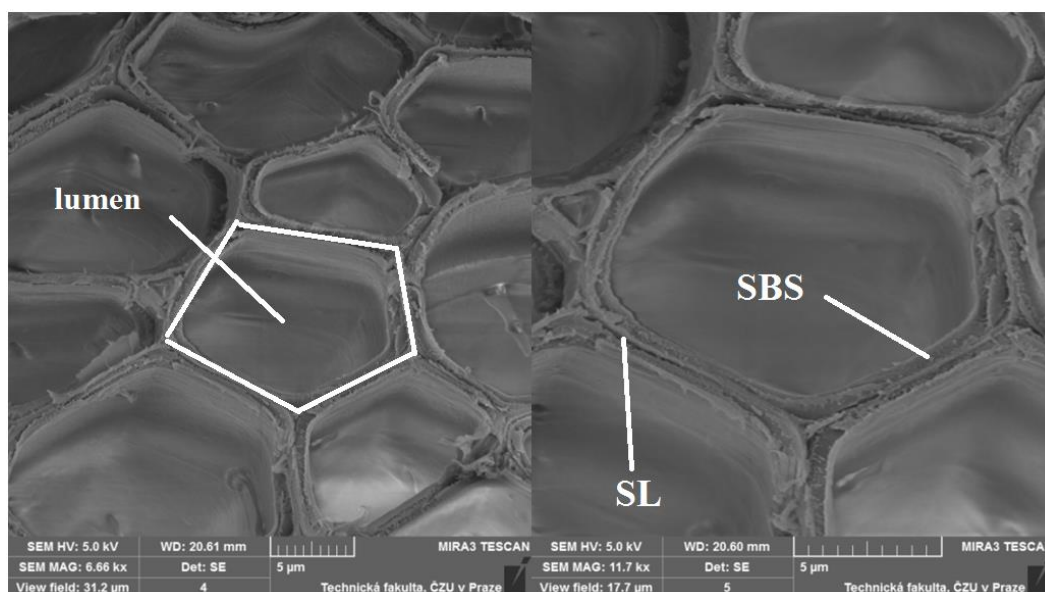
4.1.5 Struktura řezu vláken s využitím SEM technologie

Rostlinná vlákna mají obecně velmi podobnou morfologii. Skládají se z mnoha vláken – buněk, které jsou tvořeny primární a sekundární buněčnou stěnou a lumenem. Každá buňka je spojena s další buňkou pomocí střední lamely, která se skládá z ligninu a hemicelulózy. Rozdíly mezi jednotlivými přírodními rostlinnými vlákny jsou především v počtu buněk, velikosti buněk a tloušťce buněčných stěn, což způsobuje rozdílné charakteristiky a mechanické chování vláken (Fidelis, Pereira, Gomes, Silva, & Filho, 2013). Na obrázku 4.4 je zobrazen snímek vláken z elektronového mikroskopu.



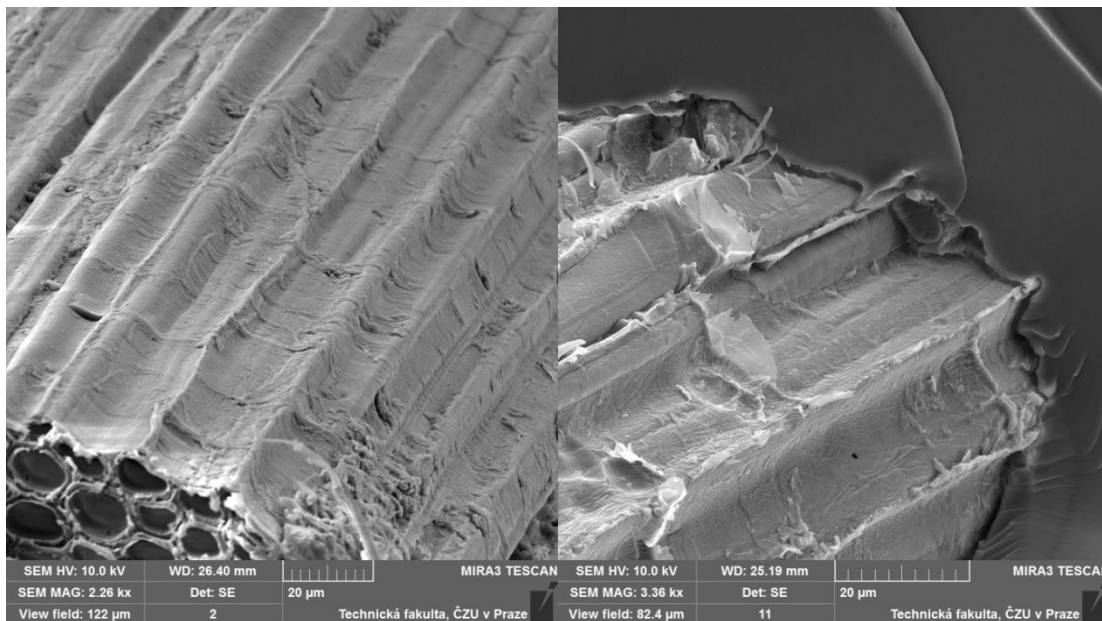
Obrázek 4.4: SEM analýza vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) z elektronového mikroskopu

Z obrázku 4.4 je patrné, že vlákno je tvořeno množstvím jednotlivých buněk.



Obrázek 4.5: SEM mikrostruktura řezu vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Na obrázku 4.5 jsou zobrazeny jednotlivé buňky vláken. Tvarem se nejčastěji jedná o pěti – nebo šesti – úhelníky, které jsou vzájemně spojeny pomocí střední lamely (SL). Jednotlivé buňky jsou tvořeny primární a sekundární stěnou (SBS), které mají zásadní vliv na mechanické chování vláken. Střední oblast buněk tvoří tzv. lumen.



Obrázek 4.6: SEM mikrostruktura povrchu vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

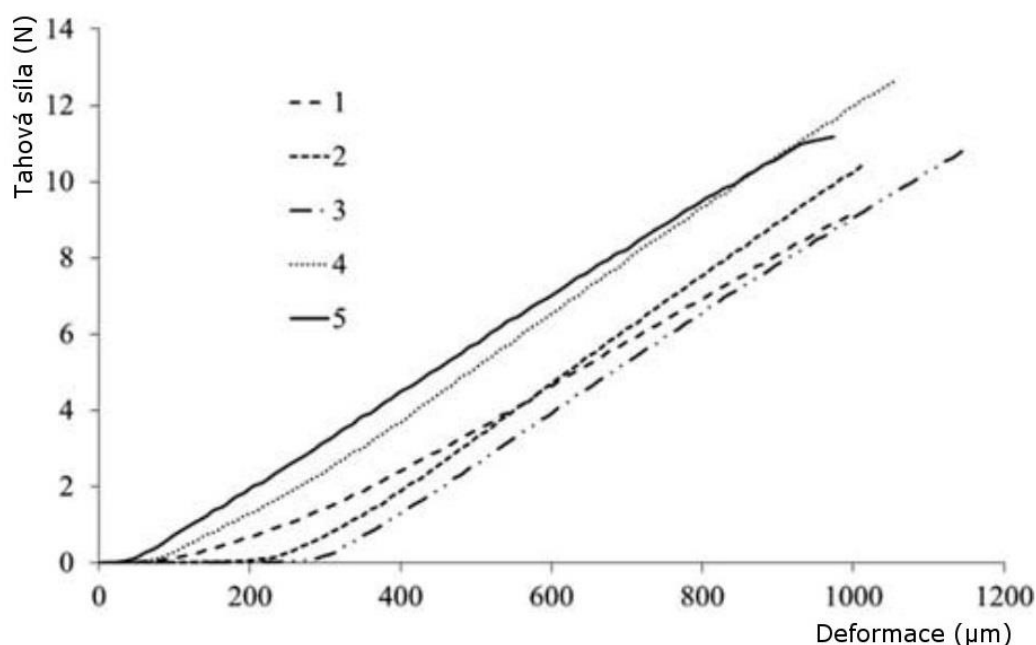
Průměr vláken falešného banánovníku (*Ensete ventricosum*) dosahuje (205 ± 82) μm . Rozměry jednotlivých buněk jsou v rozsahu 5 – 40 μm . Podobné hodnoty byly stanoveny také u vláken bambusu (*bambusoide Luerss*) či sisálu (*Agave sisalana*) (Eder & Burgert, 2010). Tloušťka buněčných stěn vláken je v rozsahu (2 – 4) μm .

Struktura povrchu vláken falešného banánovníku je patrná z obrázku 4.6. Vlákná vykazují členitý povrch s ostrými výstupky ve směru podélné osy vláken. Výrazně strukturovaný povrch vykazuje většina rostlinných vláken, na rozdíl od vláken živočišných, které jsou charakteristické naopak hladkým povrchem. Podobnou strukturu povrchu jako vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) vykazují vlákna kenafu (*Hibiscus cannabinus*) či abaky (*Musa textillis*) (Müssig et al., 2012).

4.2 Mechanické vlastnosti

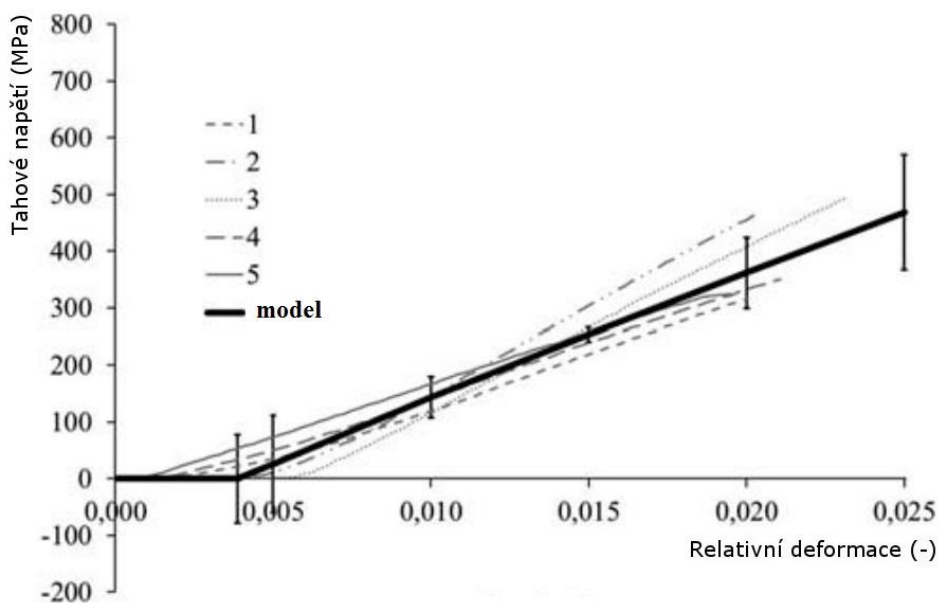
4.2.1 Tahové vlastnosti vláken

Pro stanovení základních mechanických vlastností byla vybrána vlákna, které mají podobné geometrické vlastnosti podél celé jejich délky, což je dáno koeficientem variace, který byl nižší než 6 %, což je běžná hodnota používaná pro biologické materiály (Blahovec, 2008; Mohsenin, 1970; Stroshine, 2000). Pro stanovení mechanických vlastností byla vybrána vlákna o stejném ekvivalentním průměru (205 ± 10) μm . Pro každé vlákno byl zaznamenáván vztah mezi tahovou silou a prodloužením vlákna. Vztah mezi tahovou silou a deformací – prodloužením pro pět náhodně vybraných vláken je uveden na obrázku 4.7.



Obrázek 4.7: Vztah mezi tahovou silou a prodloužením vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*). Číslo vyjadřují číslo vlákna.

Všechna vlákna byla testována s konstantní rychlostí deformace až do bodu přetrhu – destrukce vláken. Konce jednotlivých tahových křivek vláken zobrazené na obr. 4.7 představují body přetrhu vláken. Naměřená závislost mezi tahovou silou a prodloužením vláken byla transformována pomocí rovnic 3.9 a 3.10 na křivku tahového napětí a relativní deformace. Vypočtené hodnoty tahového napětí a relativní deformace pro pět vybraných vláken jsou uvedeny na obrázku 4.8.



Obrázek 4.8: Vztah mezi tahovou silou a relativní deformací vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*). Čísla vyjadřují číslo vlákna.

Vztah mezi tahovou silou a relativní deformací pro každé vlákno byl proložen přímkou s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu a jednotlivé rovnice spolu s koeficienty determinace jsou uvedeny v tabulce 4.3. Z obrázku 4.8 je zřejmé, že sklon přímky modelu vyjadřuje počáteční tangentský modul pružnosti vláken v tahu. Vhodnost použití jednotlivých lineárních modelů je dána vysokými hodnotami koeficientů determinace R^2 , které jsou uvedeny v tabulce 3.1. Objemová deformační energie pro každé zkoumané vlákno byla stanovena pomocí rovnice 3.12 a jednotlivé hodnoty energií jsou uvedeny v tabulce 4.2.

Tabulka 4.2: Mechanické vlastnosti vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*); data v tabulce uvedena se směrodatnou odchylkou \pm SD

Vlákno	Síla při přetržení F_B (N)	Napětí při přetržení σ_B (MPa)	Prodloužení ΔL_B (μm)	Relativní deformace ϵ_B (-)	Modul pružnosti E_B (MPa)	Objemová energie λ_B ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$)
1	9,19 $\pm 0,46$	316,75 \pm 23,77	1002 \pm 1	0,020 \pm 2 $\times 10^{-5}$	15334 \pm 1287	2,638 \pm 0,234
2	10,49 $\pm 0,52$	466,55 \pm 21,08	1013 \pm 1	0,020 \pm 2 $\times 10^{-5}$	23327 \pm 1425	3,532 \pm 0,206
3	10,92 $\pm 0,54$	492,99 \pm 21,32	1157 \pm 1	0,023 \pm 2 $\times 10^{-5}$	21434 \pm 2204	4,325 \pm 0,235
4	12,61 $\pm 0,63$	350,31 \pm 23,24	1053 \pm 1	0,021 \pm 2 $\times 10^{-5}$	16687 \pm 2287	3,320 \pm 0,239
5	11,18 $\pm 0,56$	325,05 \pm 20,38	974 \pm 1	0,019 \pm 2 $\times 10^{-5}$	17105 \pm 1879	3,149 \pm 0,189

Tabulka 4.3: Matematické modely tahového napětí vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Vláčno	Tahové napětí σ (MPa)	Koeficient determinace R^2 (-)
1	20138. ε - 80	0,93
2	31883. ε - 170	0,89
3	29816. ε - 180	0,91
4	18926. ε - 45	0,99
5	17719. ε - 10	0,99

Z tabulky 4.2 a obrázku 4.8 je zřejmé, že jednotlivá vlákna vykazují podobné mechanické vlastnosti a proto mohou být nahrazena obecným matematickým modelem, popisujícím mechanické chování vláken v tahu. Obecný lineární model popisující mechanické vlastnosti vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) v tahu je uveden na obrázku 4.8 a popsán pomocí rovnice 4.1

$$\sigma(\varepsilon) = 23696 \cdot \varepsilon - 97 \quad [\text{MPa}] \quad (4.1)$$

kde:

σ ... tahové napětí vlákna [MPa]

ε ... relativní deformace vlákna [-]

Konstanty rovnice 4.1 byly stanoveny jako hodnoty jednotlivých lineárních modelů uvedené v tabulce 4.3. Z obrázku 4.7 a z rovnice 4.1 je zřejmé, že mechanické chování vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) při tahovém zatížení může být rozděleno do dvou oblastí. První oblast je oblast „předpětí“, která je dána hodnotou relativní deformace vláken od nuly do 0,004. V této oblasti síla v počátku nevzrůstá lineárně s deformací. Projevuje se zakřivení způsobené tím, že uvnitř vlákna dochází vlivem reakce na zatěžující sílu ke strukturním změnám a reorganizaci (Neckář & Das, 2012). Podobné mechanické vlastnosti vykazují některá textilní vlákna (Sundaresan, Salhotra, & Hari, 1998), živočišná vlákna (Gloria, Causa, De Santis, Netti, & Ambrosio, 2007; Korhonen & Saarakkala, 2011) nebo přírodní vlákna (Miserez & Guerette, 2012). Druhá oblast (obr. 4.8), ve které vlákna vykazují lineární mechanické chování, nastává pro hodnoty relativní deformace od 0,004 až do hodnoty deformace při přetržení – destrukci vlákna.

Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 4.4) vyplývá, že naměřená data napětí – deformace a data získaná z obecného lineárního modelu (rov. 4.1) byly statisticky

ověřeny na hladině významnosti 0,05, což znamená, že hodnota F_{krit} (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byla vyšší než hodnota F (hodnota F -testu) pro všechna naměřená vlákna.

Tabulka 4.4: Statistická analýza ANOVA obecného lineárního modelu

ČV	F	F_{krit}	$P_{hodnota}$	R^2
1	1,291	3,922	0,258	0,89
2	0,211	3,914	0,647	0,88
3	0,427	3,906	0,521	0,88
4	0,019	3,893	0,882	0,87
5	3,411	3,931	0,069	0,82

Pozn. ČV, číslo vlákna; F, hodnota F -testu; F_{krit} , kritická hodnota porovnání dvou modelů; $P_{hodnota}$, hladina významnosti; R^2 , koeficient determinace.

Vhodnost modelu dokládají také hodnoty $P_{hodnota}$ (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné), které byly větší, než 0,05 což je také potvrzeno vysokými hodnotami koeficientů determinace R^2 (tab. 4.4). Z naměřených výsledků vyplývá, že průměrná síla při přetržení – destrukci vláken byla $(10,88 \pm 1,11)$ N, při odpovídajícím prodloužení (1039 ± 64) μm , napětí při přetržení $(390,33 \pm 21,96)$ MPa při ekvivalentním průměru vláken (205 ± 10) μm , relativní deformace $(0,021 \pm 2 \cdot 10^{-5})$, počáteční modul pružnosti (23470 ± 3328) MPa a objemová deformační energie $(3,39 \pm 0,22)$ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ (Mizera, Herak, Hrabe, Muller, & Kabutey, 2017). Z již publikovaných studií je zřejmé, že vlákna „falešného“ banánovníku dosahují velmi podobných hodnot pevnosti v tahu jako ostatní přírodní vlákna například z bambusu (*bambusoide Luerss*), kokosu (*Cocos nucifera*), banánovníku (*Musa textilis*) a agáve (*Agave sisalana*) (Rao & Rao, 2007; Brandt et al., 1997; Munawar et al., 2006; Sankari, 2000; Silva et al., 2008; Stamboulis et al., 2001; Zhai et al., 2012). V případě prodloužení, vlákna bambusu vykazují podobné deformační vlastnosti jako zkoumaná vlákna „falešného“ banánovníku. Naopak například již zkoumaná vlákna ze lnu (*Linum usitatissimum*) dosahují více než dvojnásobných hodnot relativní deformace při přetrhu oproti vláknům „falešného“ banánovníku (Wambua et al., 2003; Zhai et al., 2012). Je evidentní, že počáteční tangentový modul pružnosti je dán napětím při přetržení a relativní deformací při přetržení. Z toho vyplývá, že většina průmyslově využívaných přírodních vláken má menší hodnoty modulu pružnosti v tahu než vlákna falešného banánovníku (*Ensete ventricosum*). Například bambusová vlákna (*bambusoide Luerss*) dosahují hodnoty modulu pružnosti 18,03 GPa (Rao & Rao, 2007), jejich deformační křivky jsou odlišné, ale ne jako obvykle ve tvaru deformační křivky, ale v dosažených hodnotách napětí a relativní deformace a tím také mají rozdílné hodnoty deformační

energie, nižší než vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) (Li et al., 2000; Rao & Rao, 2007). Z publikovaných výsledků autorů Stamboulis et al., (2001) a Zhai et al., (2012) vyplývá, že vlákna lnu (*Linum usitatissimum*) nebo abaky (*Musa textilis*) (Brandt et al., 1997) mají podobné mechanické vlastnosti při tahovém zatížení jako vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*). Deformační charakteristiky lněných vláken (*Linum usitatissimum*) vykazují jiný tvar než deformační charakteristiky vláken „falešného“ banánovníku, nicméně získané hodnoty pevnosti při přetržení, modulu pružnosti a objemové deformační energie jsou srovnatelné s hodnotami stanovenými v této studii. Obecně je velmi zajímavé, že hustota vláken „falešného“ banánovníku je nižší než u ostatních přírodních vláken jako například bambusu (*bambusoide Luerss*) 1050 kg.m^{-3} , abaky (*Musa textilis*) 950 kg.m^{-3} nebo kokosu (*Cocos nucifera*) 1150 kg.m^{-3} (Faruk et al., 2012; Baley, 2002; Li et al., 2000; Sreekala et al., 1997; Stamboulis et al., (2001). Velmi důležitým údajem pro použití přírodních vláken je poměr mezi napětím vlákna při přetržení a hustotou, který dosahoval u vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) $0,61 \text{ MPa.kg}^{-1}.\text{m}^3$ nebo poměr mezi modulem pružnosti a hustotou $34,73 \text{ MPa.kg}^{-1}.\text{m}^3$ (Mizera et al., 2017). Tyto hodnoty jsou větší u vláken „falešného“ banánovníku, než u jiných dříve zkoumaných přírodních vláken (Majid, 2010; Rao & Rao, 2007; Wambua et al., 2003; Zhai et al., 2012).

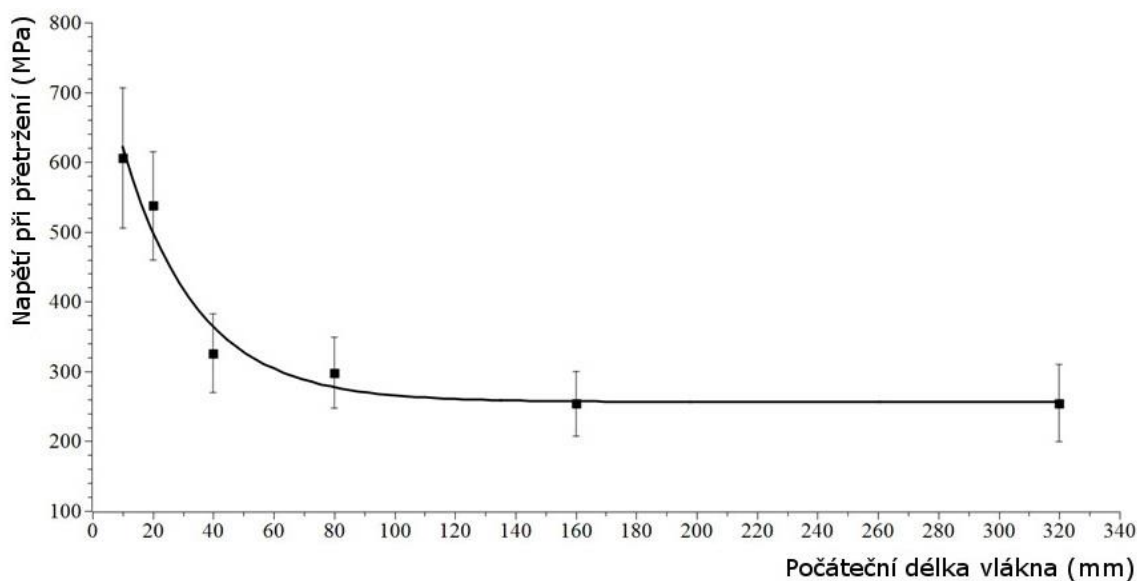
4.2.2 Vliv délky vláken na tahové vlastnosti

Pro stanovení vlivu délky vláken na tahové vlastnosti byla vybrána vlákna, která mají podobné geometrické vlastnosti podél celé jejich délky, což je dáno koeficientem variace, který byl nižší než 6 %, což je běžná hodnota používaná pro biologické materiály (Blahovec, 2008; Mohsenin, 1970; Strohshine, 2000). Pro každé vlákno byl zaznamenáván vztah mezi tahovou silou a prodloužením vlákna, který byl přepočten na tahové napětí a relativní deformaci pomocí rovnic 3.9 a 3.10.

Tabulka 4.5: Mechanické vlastnosti vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

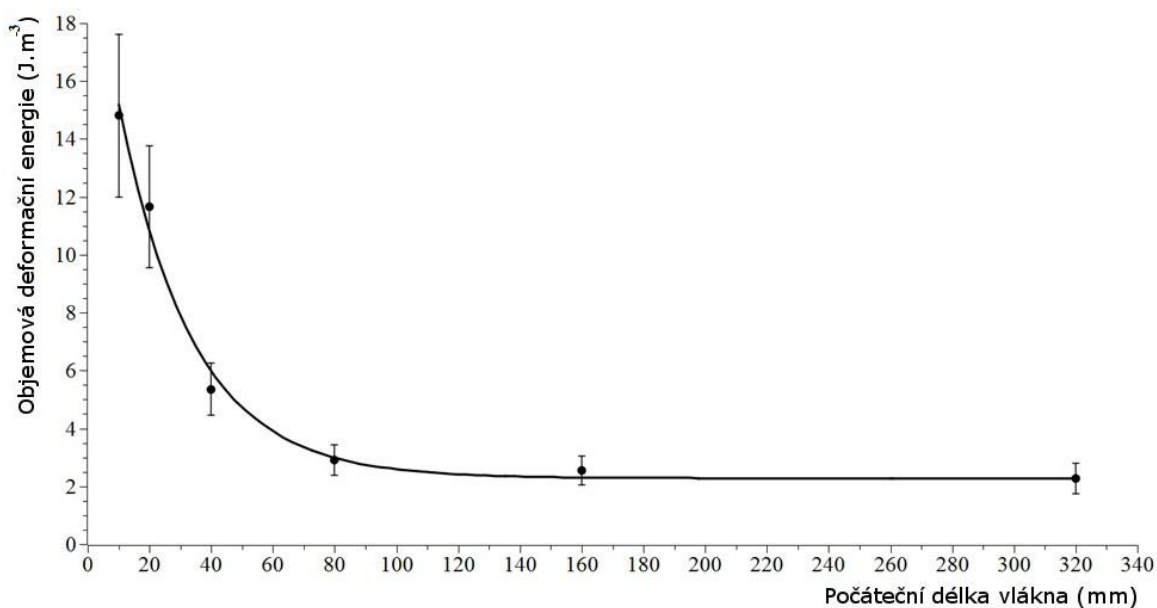
Délka vláken L_0 (mm)	Napětí při přetržení σ_F (MPa)	Relativní deformace vláken ε_F (-)	Počáteční modul pružnosti E_F (MPa)	Objemová def. energie λ_F (J.m^{-3})
10	$605,67 \pm 100,62$	$0,029 \pm 378.10^{-5}$	21696 ± 3688	$14,801 \pm 2,801$
20	$537,48 \pm 87,64$	$0,019 \pm 227.10^{-5}$	30471 ± 4452	$11,666 \pm 2,102$
40	$325,72 \pm 56,48$	$0,006 \pm 134.10^{-5}$	54272 ± 10977	$5,354 \pm 0,906$
80	$297,96 \pm 51,02$	$0,005 \pm 78.10^{-5}$	64551 ± 13097	$2,919 \pm 0,526$
160	$253,57 \pm 46,42$	$0,004 \pm 47.10^{-5}$	85755 ± 19678	$2,540 \pm 0,492$
320	$254,54 \pm 55,03$	$0,004 \pm 51.10^{-5}$	83374 ± 19921	$2,268 \pm 0,528$

Vypočtené hodnoty tahových napětí a relativních deformací pro každou volnou délku L_0 jsou uvedeny jako průměrné hodnoty v tabulce 4.5.



Obrázek 4.9: Vztah mezi napětím při přetržení a délkou vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Průměrné hodnoty tahových napětí pro každou volnou délku vláken L_0 jsou uvedeny na obrázku 4.9. Objemová deformační energie pro každé testované vlákno byla vypočtena pomocí rovnice 3.12 a jako průměrná hodnota pro jednotlivé volné délky je uvedena v tabulce 4.5.



Obrázek 4.10: Vztah mezi objemovou deformační energií a délkou vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Naměřené a vypočtené hodnoty tahového napětí (obr. 4.9) a objemové deformační energie (obr. 4.10) byly proloženy pomocí exponenciální křivky s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu, a jsou popsány pomocí rovnice 4.2 a 4.3.

$$\sigma_F(L_0) = A_1 \cdot e^{B_1 \cdot L_0} + C_1 \quad [\text{MPa}] \quad (4.2)$$

$$\lambda_F(L_0) = A_2 \cdot e^{B_2 \cdot L_0} + C_2 \quad [\text{Jm}^{-3}] \quad (4.3)$$

kde:

σ_F ... tahové napětí při přetržení [MPa]

λ_F ... objemová deformační energie [Jm^{-3}]

L_0 ... počáteční volná délka vlákna [mm]

$A_1; A_2$... první koeficienty exponenciální funkce [MPa; Jm^{-3}]

$B_1; B_2$... druhé koeficienty exponenciální funkce [mm^{-1} ; mm^{-1}]

$C_1; C_2$... třetí koeficienty exponenciální funkce [MPa; Jm^{-3}]

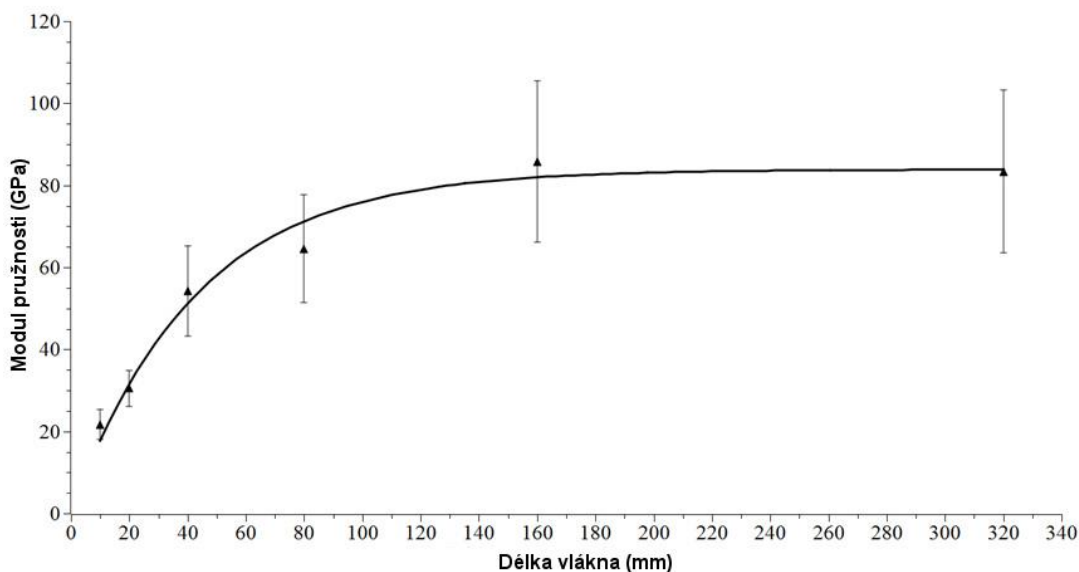
Individuální koeficienty z rovnice 4.2 a rovnice 4.3 jsou uvedeny v tabulce 4.6. Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 4.6) vyplývá, že naměřené hodnoty tahového napětí a objemové deformační energie a výsledky získané z obecných exponenciálních modelů (rovnice 4.2 a 4.3) jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty F_{krit} (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší než hodnoty F (hodnota F-testu) pro všechna měřená vlákna „falešného“ banánovníku a hodnoty P_{hodnota} (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace R^2 .

Tabulka 4.6: Statistická analýza ANOVA obecného lineárního modelu (rov. 4.2 a 4.3)

$\sigma_F(L_0) = A_1 \cdot e^{B_1 \cdot L_0} + C_1$	A_1 (MPa)	B_1 (mm^{-1})	C_1 (MPa)	F	F_{krit}	P_{hodnota}	R^2
$\sigma_F(L_0)$	548,165	-0,041	256,303	$-2,019 \cdot 10^{-14}$	4,965	0,99	0,969
$\lambda_F(L_0) = A_2 \cdot e^{B_2 \cdot L_0} + C_2$	A_2 (MPa)	B_2 (mm^{-1})	C_2 (MPa)	F	F_{krit}	P_{hodnota}	R^2
$\lambda_F(L_0)$	3,884	-0,049	0,476	$3,668 \cdot 10^{-15}$	4,965	0,99	0,989

Pozn. A_1, A_2 = první koeficienty exponenciální funkce, B_1, B_2 = druhé koeficienty exponenciální funkce, C_1, C_2 = třetí koeficienty exponenciální funkce, F , hodnota F-testu; F_{krit} , kritická hodnota porovnání dvou modelů; P_{hodnota} , hladina významnosti; R^2 , koeficient determinace.

Hodnoty počátečního tangentového modulu pružnosti pro jednotlivé volné délky vláken L_0 jsou uvedeny na obrázku 4.11.



Obrázek 4.11: Vztah mezi počátečním tangentovým modulem pružnosti a délkou vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Stanovené hodnoty modulu pružnosti byly proloženy pomocí exponenciální křivky s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu a jsou popsány pomocí rovnice 4.4

$$E_F(L_0) = A_3 \cdot (e^{B_3 \cdot L_0} - 1) \quad [\text{GPa}] \quad (4.4)$$

kde:

E_F ... modul pružnosti [GPa]

L_0 ... volná délka vlákna [mm]

A_3 ... první koeficient modulu pružnosti [GPa]

B_3 ... druhý koeficient modulu pružnosti [mm^{-1}]

Z obrázku 4.11 je zřejmé, že naměřené hodnoty modulu pružnosti mohou být popsány pomocí exponenciální rovnice 4.4, což je také potvrzeno statistickou analýzou rozptylu ANOVA (tab. 4.7) na hladině významnosti 0,05.

Tabulka 4.7: Statistická analýza ANOVA obecného lineárního modelu (rov. 4.4)

$E_F(L_0) = A_3 \cdot (e^{B_3 \cdot L_0} - 1)$	A_3 (GPa)	B_3 (mm^{-1})	F	F_{krit}	P_{hodnota}	R^2
$E_F(L_0)$	$-8,368 \cdot 10^4$	-0,024	0,000129	4,964	0,99	0,96

Pozn. A_3 = první koeficient modulu pružnosti, B_3 = druhý koeficient modulu pružnosti, F, hodnota F-testu; F_{krit} , kritická hodnota porovnání dvou modelů; P_{hodnota} , hladina významnosti; R^2 , koeficient determinace.

Z obrázku 4.9 je patrné, že tahové napětí při přetržení klesá s rostoucí délkou vláken. Tento poznatek je ve shodě s teorií o vláknenných materiálech, protože s rostoucí délkou vláken roste také pravděpodobnost vzniku poruch ve vláknech, což snižuje

hodnoty pevnosti vláken (Bledzki & Gassan, 1999; Neckar & Das, 2012; Trujillo et al., 2014). U vláken s menší délkou nebyla zjištěna pouze vyšší pevnost, ale také nižší hodnoty rozptylu naměřených hodnot (tab. 4.5). Z obrázku 4.9 a rovnice 4.2 je zřejmé, že mechanické vlastnosti vláken falešného banánovníku při tahovém zatížení závisí na délce vláken a lze je rozdělit do dvou oblastí. První oblast je dána délkou vláken do 40 mm. V této oblasti dochází s rostoucí délkou vláken k výraznému poklesu napětí při přetržení (Mizera, Herák, Hrabě, Müller, & Kabutey, 2016a). Podobné mechanické vlastnosti byly zjištěny také u vláken banánovníku (*Musa sapientum*) (Kulkarni et al., 1983). K výraznému snížení pevnosti v rozsahu do 40 mm došlo také u vláken ze lnu (*Linum usitatissimum*) a ananasu (*Ananas bracteatus*) (Mukherjee & Satyanarayana, 1986) a také u vláken z kokosu (*Cocos nucifera*) (Guo, Zhang, Chen, & Cheng, 2014). Druhý region je definovaný délkou vláken větší než 40 mm. V tomto regionu již nedochází ke statisticky významnému snížení napětí při přetržení, což je také patrné z obrázku 4.9. Tato oblast se často označuje jako „pevnostní limit“ a u vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) nastává při délce vláken 40 mm a více. U syntetických vláken je patrný tento „pevnostní limit“ u mnohem menších hodnot délek, což souvisí s rozdílnou distribucí vad v syntetických materiálech (Lim, Zheng, Masters, & Chen, 2011). S rostoucí délkou vláken „falešného“ banánovníku dochází také k poklesu objemové deformační energie, což je patrné z obrázku 4.10. Z obrázku 4.11 je zřejmé, že modul pružnosti zkoumaných vláken závisí na délce vlákna. Naměřené hodnoty modulu pružnosti rostou s rostoucí délkou vlákna (obr. 4.11) (Mizera et al., 2016a). Velmi obdobná závislost mezi délkou vláken a modulem pružnosti byla stanovena také u vláken z bambusu (*bambusoide Luerse*) (Defoirdt et al., 2010; Biswas, Ahsan, Verpoest, & Hasan, 2011) nebo juty (*Corchorus*) (Biswas et al., 2011).

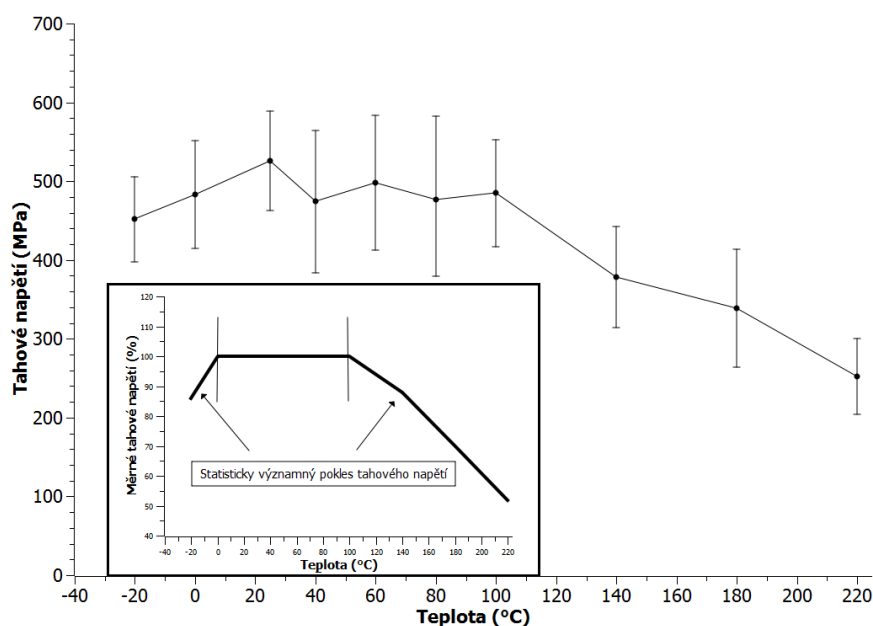
4.2.3 Vliv teploty a vlhkosti vláken na tahové vlastnosti

Pro stanovení vlivu teploty a vlhkosti vláken na tahové vlastnosti byla vybrána vlákna, které mají podobné geometrické vlastnosti podél celé jejich délky, což je dáno koeficientem variace, který byl nižší než 6 %, což je běžná hodnota používaná pro biologické materiály (Blahovec, 2008; Mohsenin, 1970; Stroshine, 2000). Pro každé vlákno byl zaznamenáván vztah mezi tahovou silou a prodloužením vlákna. Tento vztah byl následně transformován do tahového napětí a relativní deformace pomocí rovnic 3.9 a 3.10. Vypočtené průměrné hodnoty tahového napětí při přetržení pro různé teploty vláken jsou uvedeny v tabulce 4.8.

Tabulka 4.8: Vliv teploty na mechanické vlastnosti vláken „falešného“ banánovníku
(*Ensete ventricosum*)

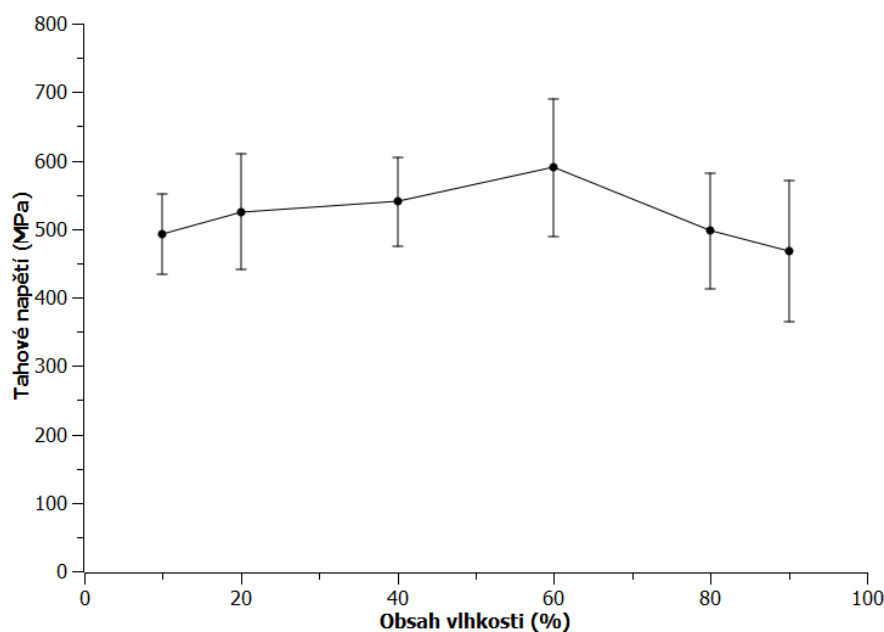
Teplota T (°C)	Napětí při přetržení σ_F (MPa)	Prodloužení při přetržení ΔL_F (mm)	Relativní deformace ε_F (-)
-20	452 ± 54	0,62 ± 0,14	0,031 ± 682.10 ⁻⁵
0	483 ± 68	0,44 ± 0,08	0,022 ± 418.10 ⁻⁵
25	526 ± 63	0,50 ± 0,13	0,025 ± 650.10 ⁻⁵
40	474 ± 90	0,42 ± 0,11	0,021 ± 525.10 ⁻⁵
60	498 ± 85	0,54 ± 0,12	0,027 ± 621.10 ⁻⁵
80	477 ± 105	0,66 ± 0,12	0,033 ± 594.10 ⁻⁵
100	485 ± 68	0,52 ± 0,11	0,026 ± 572.10 ⁻⁵
140	378 ± 64	0,40 ± 0,11	0,020 ± 540.10 ⁻⁵
180	339 ± 75	0,66 ± 0,20	0,033 ± 1023.10 ⁻⁵
220	252 ± 48	0,74 ± 0,13	0,037 ± 666.10 ⁻⁵

Průměrné hodnoty tahových napětí při přetržení v závislosti na teplotě jsou uvedeny na obrázku 4.12. Z obrázku 4.12 je zřejmé, že teplota má vliv na hodnotu tahového napětí vláken při přetržení. K poklesu tahového napětí dochází při záporných teplotách a při teplotě vyšší než 140 °C. Naopak v rozsahu teplot do 140 °C nedochází k významným změnám napětí při přetržení, což je také potvrzeno statistickou analýzou ANOVA na hladině významnosti 0,05. Výrazné snížení tahového napětí při přetržení nastává při vyšších teplotách, což je pravděpodobně způsobeno ztrátou vody ze struktury vláken (van Voorn, Smit, Sinke, & de Klerk, 2001).

Obrázek 4.12: Vliv teploty na tahové napětí při přetržení vláken (*Ensete ventricosum*)

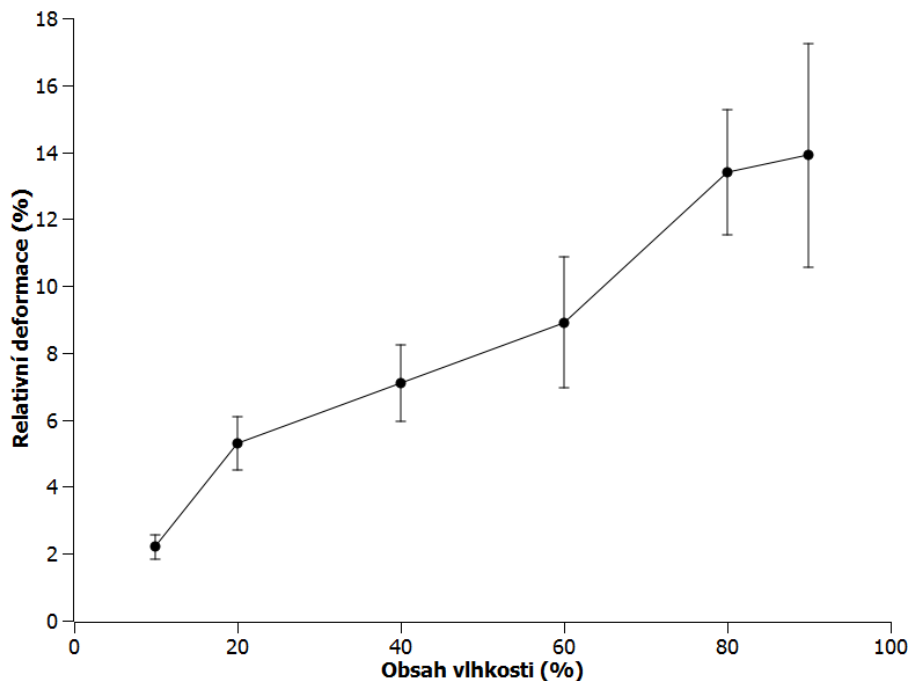
Ze získaných výsledků je zřejmé, že zkoumaná vlákna vykazují velmi dobrou teplotní stabilitu tahového napětí. Statisticky významný pokles tahového napětí při přetržení nastává při teplotách 140 °C. Při teplotách 140 °C, 180 °C a 220 °C došlo ke snížení tahového napětí při přetržení o 22,0 %, 30,1 % a 48,1 % v porovnání s hodnotami při laboratorní teplotě. Tento významný pokles mechanických vlastností přírodních vláken při vyšších teplotách byl studován mnoha autory a souvisí především se změnou struktury buněčné stěny. Například autoři Gassan & Bledzki (2001) a Placet (2009) zaznamenali degradaci struktury lněného vlákna (*Linum usitatissimum*) při teplotě 170 °C. Tyto změny ve struktuře přírodních vláken mohou být způsobeny přechodovými jevy v polymerech, které tvoří stěnu rostlinné buňky (Gourier, Le Duigou, Bourmaud, & Baley, 2014). Toto může být způsobeno postupnou a nevratnou změnou biochemické struktury, která je zodpovědná za interakci vody, pektinu, hemicelulózy a celulózy (Gourier et al., 2014). Autoři Gassan & Bledzki (2001) také potvrzují, že strukturní vlastnosti hemicelulózy, celulózy a pektinu mohou být výrazně degradovány vysokou teplotou.

Vliv vlhkosti vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) na jeho mechanické vlastnosti při tahovém zatížení je patrný na obrázcích 4.13 a 4.14. Tahové zkoušky vláken v rozsahu vlhkostí 10 – 90 % nevykazují statisticky významný pokles napětí při přetržení, což potvrzují také výsledky statistické analýzy ANOVA na hladině významnosti 0,05.



Obrázek 4.13: Vliv obsahu vlhkosti na tahové napětí při přetržení vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

V případě relativní deformace při přetržení je zde patrný výrazný vliv vlhkosti vláken (obr. 4.14). Placet (2009) také potvrzuje, že relativní deformace vláken konopí (*Cannabis sativa*) roste s rostoucí vlhkostí vláken.

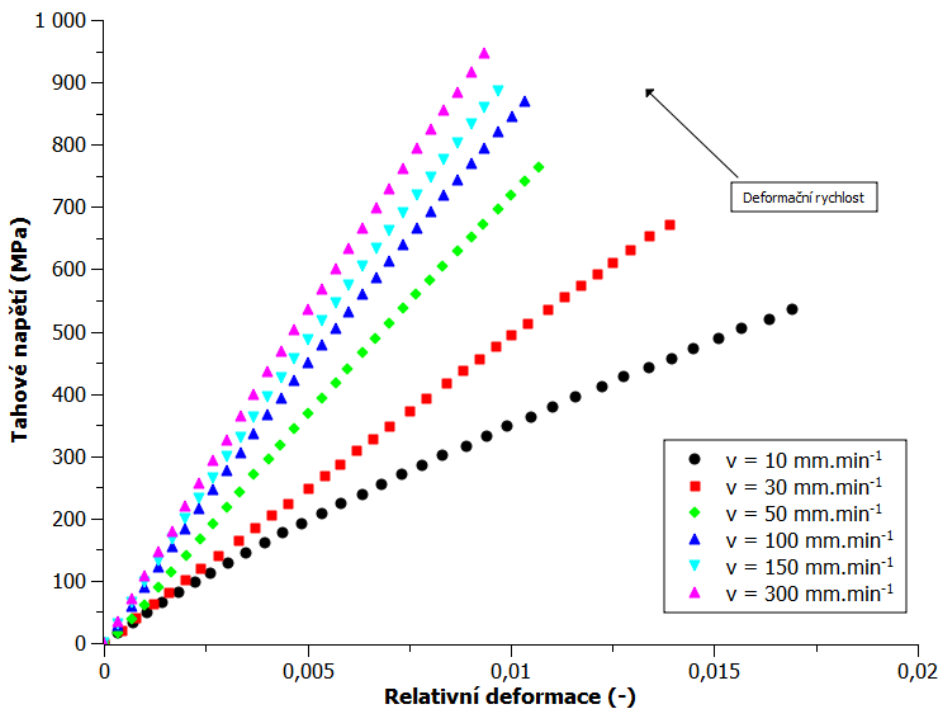


Obrázek 4.14: Vliv obsahu vlhkosti na relativní deformaci vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

4.3 Viskoelastické vlastnosti

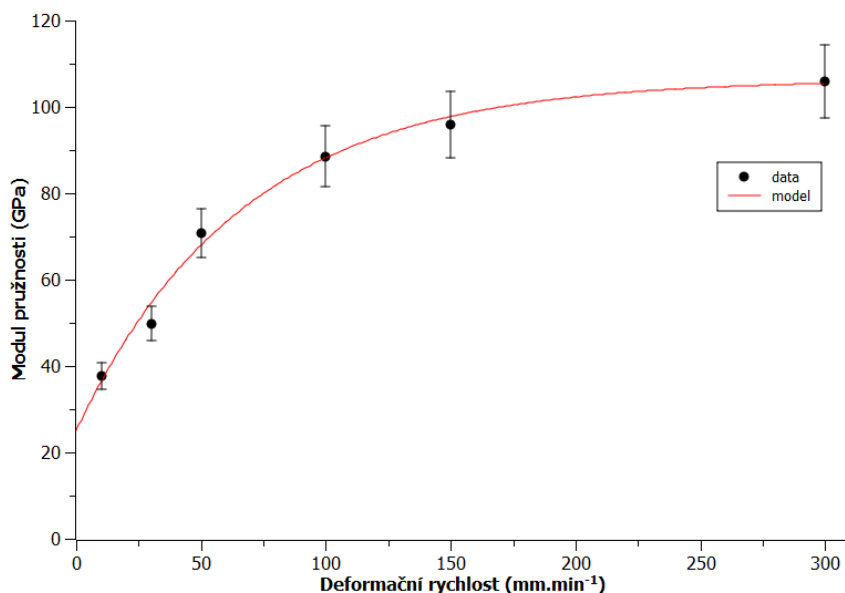
4.3.1 Vliv rychlosti zatěžování vláken na tahové vlastnosti

Pro stanovení vlivu rychlosti zatěžování vláken na tahové byla vybrána vlákna, které mají podobné geometrické vlastnosti podél celé jejich délky, což je dáno koeficientem variace, který byl nižší než 6 %, což je běžná hodnota používaná pro biologické materiály (Blahovec, 2008; Mohsenin, 1970; Strohine, 2000). Pro každé vlákno byl zaznamenáván vztah mezi tahovou silou a prodloužením vlákna. Tento vztah byl následně transformován do tahového napětí a relativní deformace pomocí rovnic 3.9 a 3.10. Závislost mezi tahovým napětím a relativní deformací pro různé rychlosti zatěžování je uvedena na obrázku 4.15. Z obrázku 4.15 je zřejmé, že rychlost zatěžování výrazným způsobem ovlivňuje mechanické chování vláken v tahu. Výsledky ukazují viskoelastické chování vláken, kdy s rostoucí rychlostí zatěžování roste napětí při přetržení a klesá hodnota relativní deformace. Vliv rychlosti zatěžování na mechanické chování v tahu byl zkoumán například u vláken sisalu (*Agave sisalana*), kokosu (*Cocos nucifera*) a banánovníku (*Musa sapientum*).



Obrázek 4.15: Křivky napětí – deformace pro různé rychlosti zatěžování vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Z naměřených hodnot byl stanoven počáteční tangentský modul pružnosti vláken, který je zobrazen na obrázku 4.16.



Obrázek 4.16: Vliv rychlosti zatěžování na počáteční tangentský modul pružnosti vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Naměřené a vypočtené hodnoty modulu pružnosti pro různé deformační rychlosti byly proloženy s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu a byl

vytvořen matematický model pro popis závislosti mezi modulem pružnosti vláken a rychlostí zatěžování, který lze zapsat pomocí rovnice 4.5

$$E(v) = E_0 + E_{\Delta} \cdot (1 - e^{-bv}) \quad [\text{GPa}] \quad (4.5)$$

kde:

- E ... modul pružnosti [GPa]
- E_0 ... první koeficient modulu pružnosti [GPa]
- E_{Δ} ... druhý koeficient modulu pružnosti [GPa]
- b ... koeficient směrnice v počátku [$\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]

Koeficienty modelu pro různé deformační rychlosti jsou uvedeny v tabulce 4.9.

Tabulka 4.9: Koeficienty modelu a ANOVA pro modul pružnosti vláken (rov. 4.5)

E_0	E_{Δ}	b	F	F_{krit}	P_{hodnota}	R^2
(GPa)	(GPa)	($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)	(-)	(-)	(-)	(-)
$2,514 \cdot 10^4$	$8,120 \cdot 10^4$	0,015	$1,061 \cdot 10^{-14}$	4,965	0,99	0,99

Pozn. E_0 = první koeficient modulu pružnosti, E_{Δ} = druhý koeficient modulu pružnosti, b = koeficient směrnice v počátku, F = hodnota F-testu; F_{krit} = kritická hodnota porovnání dvou modelů; P_{hodnota} = hladina významnosti; R^2 = koeficient determinace.

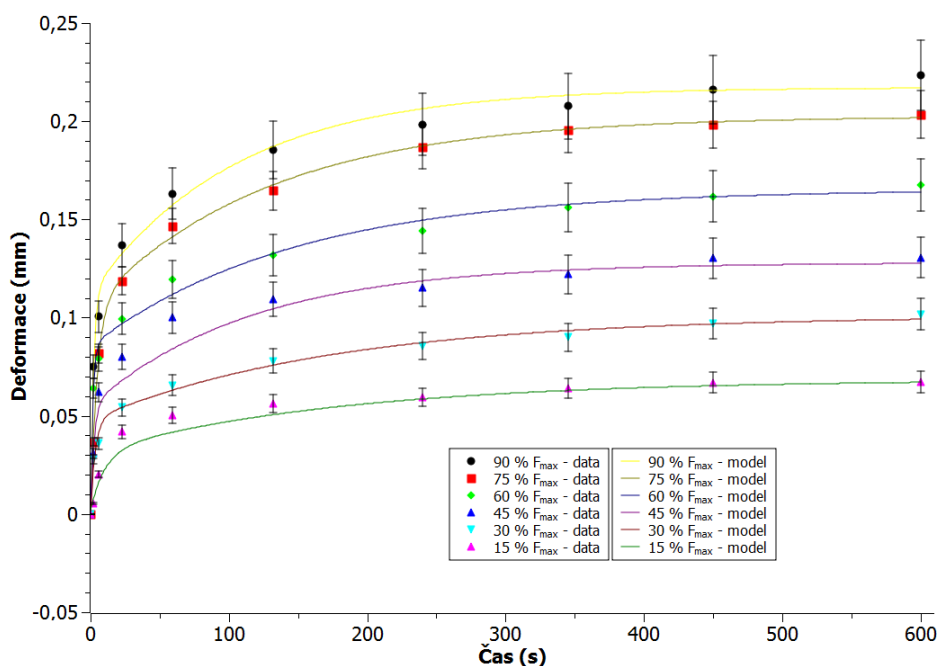
Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 4.9) vyplývá, že naměřené hodnoty krípkového chování vláken a výsledky získané z jednotlivých matematických modelů pro různá zatížení (rov. 4.5) jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty F_{krit} (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší než hodnoty F (hodnota F-testu) pro všechny deformační rychlosti a hodnoty P_{hodnota} (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace R^2 .

Vlákna mají krystalické a amorfní složky. U vláken sisalu (*Agave sisalana*) byla zjištěna počáteční lineární oblast, po které následuje značně nelineární průběh při malých deformačních rychlostech (Mukherjee & Satyanarayana, 1984). Toto je způsobeno viskoelastickými vlastnostmi, kdy při vyšších rychlostech deformace se vlákno chová více jako elastické těleso. To znamená, že zatížení je přenášeno především krystalickou oblastí, což má za následek vyšší hodnoty pevnosti. Při klesající rychlosti deformace se zatížení postupně začíná přenášet také přes amorfní oblast, což má za následek nižší hodnoty pevnosti. Při velmi nízkých hodnotách deformační rychlosti se vlákno chová více jako viskózní kapalina a hlavní část zatížení se přenáší přes amorfní

oblasti, což má za následek nižší hodnoty modulu pružnosti a pevnosti (Mukherjee & Satyanarayana, 1984). Autoři Kulkarni, Satyanarayana, Rohatgi, & Vijayan (1983) zkoumali vliv rychlosti na tahové vlastnosti banánovníkových vláken (*Musa sapientum*). Zjistili výrazný vliv deformační rychlosti v rozsahu 0,5 – 100 mm/min u vláken délky 25 mm, kde s rostoucí rychlostí rostla pevnost vláken a modul pružnosti, což bylo také potvrzeno u vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*).

4.3.2 Kríp vláken

Naměřené hodnoty krípu pro různá zatížení jsou uvedeny na obrázku 4.17.



Obrázek 4.17: Křivky krípu vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Naměřené hodnoty krípu vláken (obr. 4.17) byly proloženy s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu a byl vytvořen matematický model, který lze zapsat pomocí rovnice 4.6

$$\psi(c, t) = c_0 + c_1 \cdot (1 - e^{c_2 \cdot t}) + c_3 (1 - e^{c_4 \cdot t}) \quad [\text{mm}] \quad (4.6)$$

kde:

- ψ ... kríp vláken [mm]
- c_0 ... první koeficient pro kríp [mm]
- c_1 ... druhý koeficient pro kríp [mm]
- c_2 ... třetí koeficient pro kríp [min^{-1}]
- c_3 ... čtvrtý koeficient pro kríp [mm]
- c_4 ... pátý koeficient pro kríp [min^{-1}]

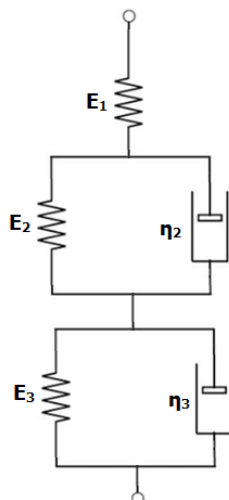
Koeficienty modelu krípu pro různá zatížení jsou uvedeny v tabulce 4.10.

Tabulka 4.10: Koeficienty modelů pro kříp vláken pro jednotlivá zatížení (rov. 4.6)

Z (%)	c ₀ (mm)	c ₁ (mm)	c ₂ (min ⁻¹)	c ₃ (mm)	c ₄ (min ⁻¹)
15	2,421.10 ⁻³	0,037	-5,529	0,029	-0,095
30	1,947.10 ⁻³	0,046	-3,290	0,053	-0,00565
45	0,01623.10 ⁻³	0,055	-4,090	0,073	-0,00858
60	0,3543.10 ⁻³	0,080	-6,780	0,085	-0,625
75	2,688.10 ⁻³	0,097	-7,707	0,103	-0,204
90	1,232.10 ⁻³	0,105	-9,470	0,111	-0,469

Pozn. Z = zatížení F_{max}, c₀ = první koeficient pro kříp, c₁ = druhý koeficient pro kříp, c₂ = třetí koeficient pro kříp, c₃ = čtvrtý koeficient pro kříp, c₄ = pátý koeficient pro kříp

Ze stanoveného matematického modelu křípevého chování vláken byl sestaven viskoelastický model (obr. 4.18), který je složen ze dvou větví Kelvinova modelu a je možné ho matematicky zapsat pomocí rovnice 4.7.



Obrázek 4.18: Viskoelastický model křípevého chování vláken (*Ensete ventricosum*)

$$x(t) = \frac{\sigma}{E_1} \cdot L + \frac{\sigma}{E_2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_2}}\right) \cdot L + \frac{\sigma}{E_3} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E_3 \cdot t}{\eta_3}}\right) \cdot L \quad [\text{mm}] \quad (4.7)$$

kde:

- x ... celková deformace modelu [mm]
- L ... počáteční délka [mm]
- σ ... napětí modelu [MPa]
- E₁ ... modul pružnosti pružiny 1 [MPa]
- E₂ ... modul pružnosti pružiny 2 [MPa]
- E₃ ... modul pružnosti pružiny 3 [MPa]
- η₂ ... viskozita tlumiče 2 [Pa.s⁻¹]
- η₃ ... viskozita tlumiče 3 [Pa.s⁻¹]

Konstanty jednotlivých prvků viskoelastického modelu kríповého chování vláken jsou uvedeny v tabulce 4.11.

Tabulka 4.11: Konstanty viskoelastického modelu kríповého chování vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) (rov. 4.7)

Z (%)	E₁ (MPa)	E₂ (MPa)	E₃ (MPa)	η₂ (Pa.s ⁻¹)	η₃ (Pa.s ⁻¹)
15	1,964.10 ⁶	1,270.10 ⁻¹⁴	1,637.10 ⁵	2,298.10 ⁷	1,730.10 ⁶
30	4,880.10 ⁶	2,073.10 ⁵	1,787.10 ⁵	7,158.10 ⁵	3,161.10 ⁷
45	8,780.10 ⁸	2,581.10 ⁵	1,944.10 ⁵	6,312.10 ⁵	2,266.10 ⁷
60	5,368.10 ⁷	2,375.10 ⁵	2,238.10 ⁵	3,504.10 ⁷	3,580.10 ⁵
75	8,845.10 ⁶	2,463.10 ⁵	2,301.10 ⁵	3,196.10 ⁷	1,128.10 ⁶
90	2,316.10 ⁷	2,727.10 ⁵	2,581.10 ⁵	2,879.10 ⁷	5,502.10 ⁵

Pozn. Z = zatížení F_{max}, E₁ = modul pružnosti pružiny 1, E₂ = modul pružnosti pružiny 2, E₃ = modul pružnosti pružiny 3, η₂ = viskozita tlumiče 2, η₃ = viskozita tlumiče 3

Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 4.12) vyplývá, že naměřené hodnoty kríповého chování vláken a výsledky získané z jednotlivých matematických modelů pro různá zatížení (rov. 4.7) jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty F_{krit} (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší než hodnoty F (hodnota F-testu) pro všechna zatížení vláken (*Ensete ventricosum*) a hodnoty P_{hodnota} (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace R².

Tabulka 4.12: Statistická analýza ANOVA modelů krípu vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) (rov. 4.7)

Z (%)	F (-)	F_{krit} (-)	P_{hodnota} (-)	R² (-)
15	-2,127.10 ⁻¹⁴	4,414	1	0,995
30	-2,127.10 ⁻¹⁴	4,414	1	0,998
45	-1,472.10 ⁻¹⁴	4,414	1	0,996
60	-1,472.10 ⁻¹⁴	4,414	1	0,995
75	-1,472.10 ⁻¹⁴	4,414	1	0,992
90	-1,472.10 ⁻¹⁴	4,414	1	0,993

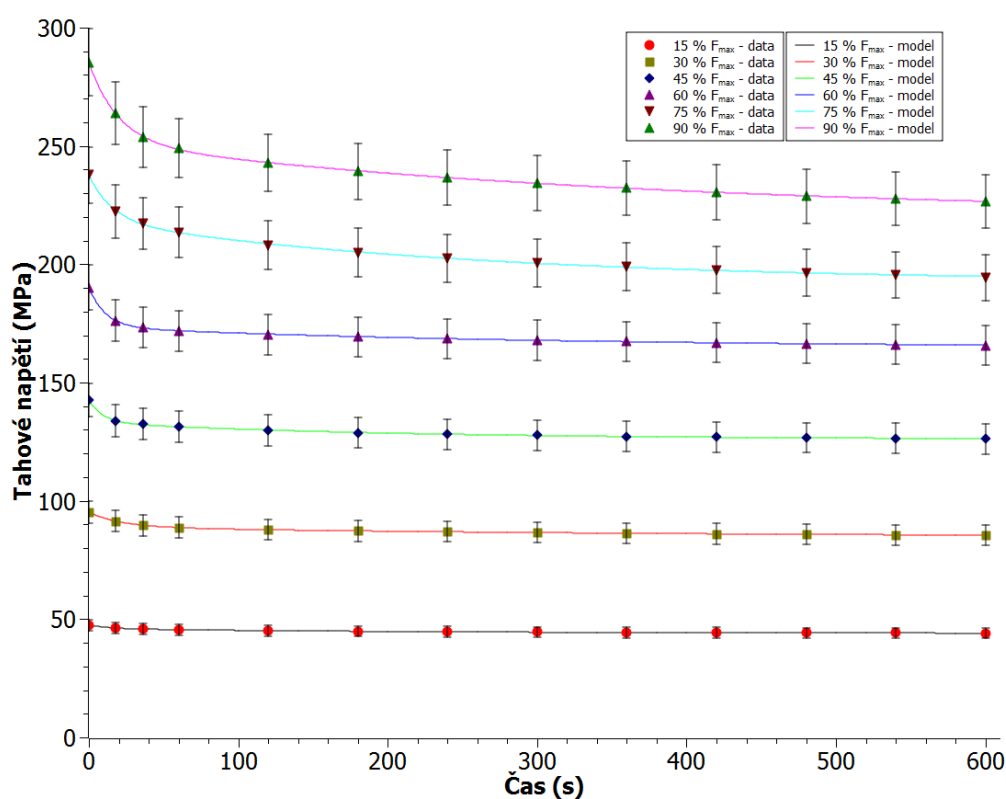
Pozn. Z = zatížení F_{max}, F = hodnota F-testu; F_{krit} = kritická hodnota porovnání dvou modelů; P_{hodnota} = hladina významnosti; R² = koeficient determinace.

Z naměřených dat je zřejmé, že vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) vykazují nižší hodnoty krípu oproti ostatním přírodním vláknům (Mizera, Herák, & Hrabě, 2016b). Při počátečním zatížení vláken dochází ke zpevňování

materiálu a velké rychlosti deformace, která se postupně snižuje. Následně nastává druhá fáze, charakteristická konstantní rychlostí deformace, při které dochází postupně k nevratné krystalizaci a poruchám molekulárních řetězců (Ferry, 1961). Řetězce celulózy leží v přírodních vláknech přibližně rovnoběžně s podélnou osou vlákna. V případě zatížení vlákna je napětí přenášeno z jednoho řetězce na druhý prostřednictvím mezimolekulárních sil. Tyto síly jsou největší právě v krystalických oblastech, kde řetězce leží navzájem v bezprostřední blízkosti (Ray, Das, & Mitra, 2009). Kríp závisí především na mobilitě řetězců v oblasti koncentrace napětí. Z tohoto důvodu bližší uspořádání molekulárních řetězců (vyšší krystalizace) snižuje kríp vláken (O'Shaughnessy, 1948).

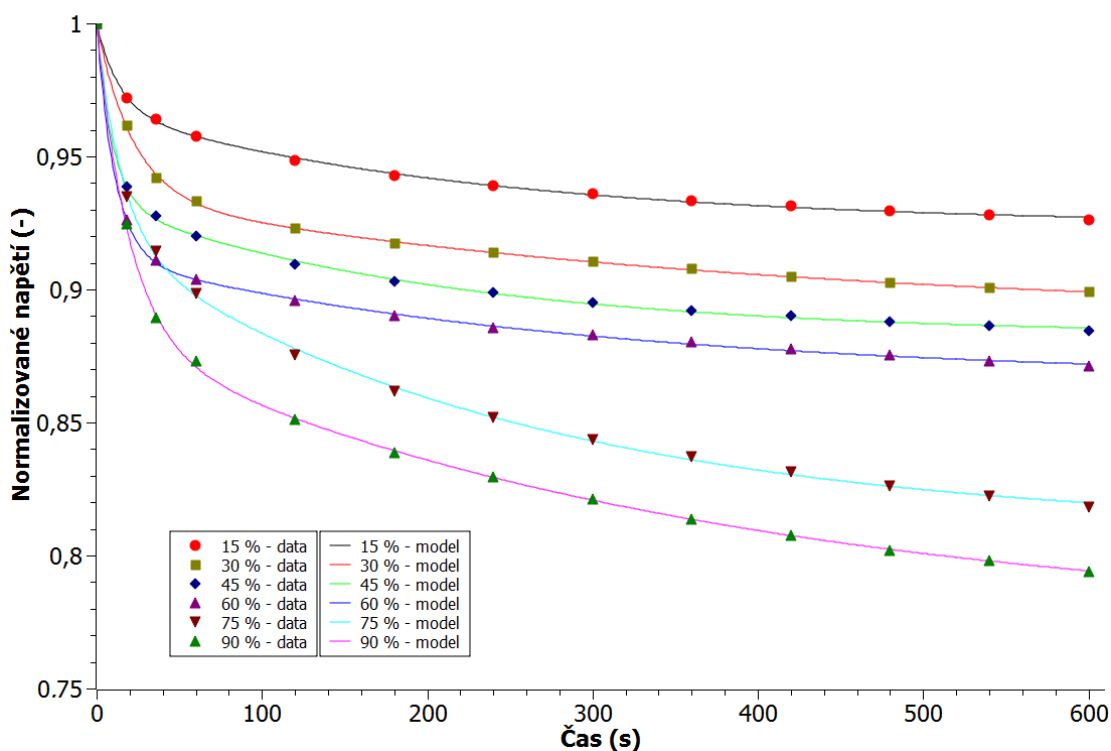
4.3.3 Relaxace vláken

Na obrázku 4.19 jsou zobrazeny křivky relaxace napětí vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*). Pro stanovení relaxace napětí byla vybrána vlákna, které mají podobné geometrické vlastnosti podél celé jejich délky, což je dáno koeficientem variace, který byl nižší než 6 %, což je běžná hodnota používaná pro biologické materiály (Blahovec, 2008; Mohsenin, 1970; Stroshine, 2000). Jednotlivé křivky relaxace napětí představují různé hodnoty konstantní relativní deformace vláken.



Obrázek 4.19: Relaxace napětí vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Naměřené hodnoty relaxace napětí byly převedeny na normalizované napětí a jsou zobrazeny na obrázku 4.20.



Obrázek 4.20 Normalizované napětí vláken při relaxaci (*Ensete ventricosum*)

Naměřené hodnoty relaxace napětí vláken „falešného“ banánovníku (obr. 4.19) byly proloženy exponenciální křivkou s využitím Marquardt – Levenbergova algoritmu a byl sestaven matematický model relaxačního chování vláken, který je popsán pomocí rovnice 4.8

$$\lambda(r, t) = r_0 + r_1 \cdot e^{r_2 \cdot t} + r_3 \cdot e^{r_4 \cdot t} \quad [\text{MPa}] \quad (4.8)$$

kde:

- λ ... relaxace napětí vláken [MPa]
- r_0 ... první koeficient pro relaxaci [MPa]
- r_1 ... druhý koeficient pro relaxaci [MPa]
- r_2 ... třetí koeficient pro relaxaci [min^{-1}]
- r_3 ... čtvrtý koeficient pro relaxaci [MPa]
- r_4 ... pátý koeficient pro relaxaci [min^{-1}]

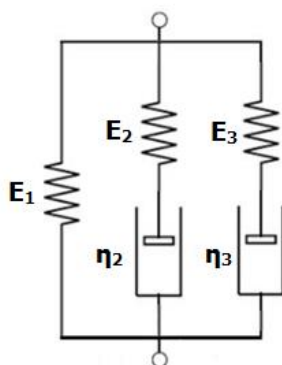
Jednotlivé koeficienty matematického modelu (rov. 4.8) pro různé úrovně zatížení vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) jsou uvedeny v tabulce 4.13.

Tabulka 4.13: Koeficienty modelu pro relaxaci vláken při jednotlivých zatíženích (rov. 4.8)

Z	r ₀	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄
(%)	(mm)	(mm)	(min ⁻¹)	(mm)	(min ⁻¹)
15	43,939	2,045	-4,424.10 ⁻³	1,562	-0,073
30	84,606	4,308	-2,596.10 ⁻³	6,196	-0,046
45	125,922	7,124	-4,811.10 ⁻³	9,612	-0,104
60	164,732	8,69	-3,428.10 ⁻³	16,770	-0,090
75	192,463	26,058	-3,968.10 ⁻³	19,174	-0,065
90	220,828	30,847	-2,794.10 ⁻³	33,641	-0,051

Pozn. Z = zatížení F_{max}, r₀ = první koeficient pro relaxaci, r₁ = druhý koeficient pro relaxaci, r₂ = třetí koeficient pro relaxaci, r₃ = čtvrtý koeficient pro relaxaci, r₄ = pátý koeficient pro relaxaci

Z naměřených hodnot byl sestaven viskoelastický model relaxačního chování (obr. 4.21), který je složen z pružin s modulem pružnosti E a tlumičů s viskozitou η .



Obrázek 4.21: Viskoelastický model relaxačního chování vláken (*Ensete ventricosum*)

Model je složen ze dvou větví obecného Maxwellova modelu. Vypočtené hodnoty jednotlivých prvků modelu jsou zobrazeny v tabulce 4.14. Viskoelastický model lze matematicky zapsat pomocí rovnice 4.9.

$$\sigma(t) = \varepsilon \cdot E_1 + \varepsilon \cdot E_2 \cdot e^{-\frac{E_2 \cdot t}{\eta_2}} + \varepsilon \cdot E_3 \cdot e^{-\frac{E_3 \cdot t}{\eta_3}} \quad [\text{MPa}] \quad (4.9)$$

kde:

- σ ... napětí modelu [MPa]
- E_1 ... modul pružnosti pružiny 1 [MPa]
- E_2 ... modul pružnosti pružiny 2 [MPa]
- E_3 ... modul pružnosti pružiny 3 [MPa]
- η_2 ... viskozita tlumiče 2 [Pa.s⁻¹]
- η_3 ... viskozita tlumiče 3 [Pa.s⁻¹]

Konstanty jednotlivých prvků viskoelastického modelu relaxačního chování vláken jsou uvedeny v tabulce 4.14.

Tabulka 4.14: Vypočtené hodnoty viskoelastického modelu relaxačního chování vláken

Z (%)	E₁ (MPa)	E₂ (MPa)	E₃ (MPa)	η₂ (Pa.s ⁻¹)	η₃ (Pa.s ⁻¹)
15	174,569	812,6	620,7	1,837.10 ⁵	8456,6
30	168,069	855,8	1230,8	3,297.10 ⁵	26559,3
45	166,762	943,4	1271,4	1,961.10 ⁵	12208,8
60	163,620	863,2	1665,6	2,518.10 ⁵	18510,2
75	152,931	2070,6	1523,6	5,218.10 ⁵	23326,3
90	146,225	2042,6	2227,6	7,311.10 ⁵	44001,7

Pozn. Z = zatížení F_{max}, E₁ = modul pružnosti pružiny 1, E₂ = modul pružnosti pružiny 2, E₃ = modul pružnosti pružiny 3, η₂ = viskozita tlumiče 2, η₃ = viskozita tlumiče 3

Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 4.15) vyplývá, že naměřené hodnoty relaxace vláken a výsledky získané z jednotlivých modelů pro různá zatížení (rov. 4.9) jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty F_{krit} (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší než hodnoty F (hodnota F-testu) pro všechna zatížení vláken (*Ensete ventricosum*) a hodnoty P_{hodnota} (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace R².

Tabulka 4.15: Statistická analýza ANOVA modelů relaxace vláken (*Ensete ventricosum*) (rov. 4.9)

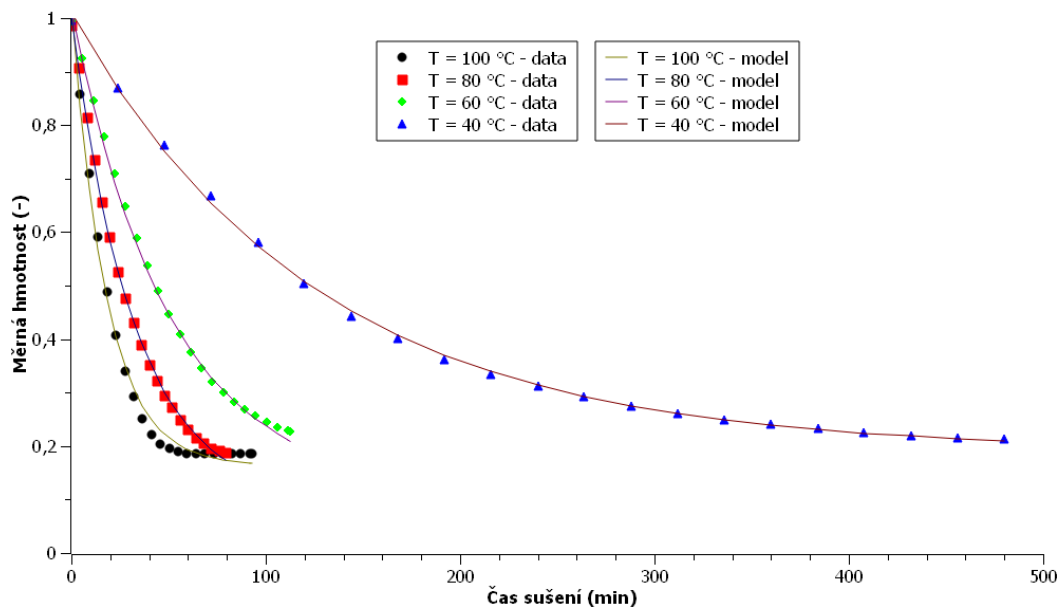
Z (%)	F (-)	F_{krit} (-)	P_{hodnota} (-)	R² (-)
15	-6,922.10 ⁻¹²	4,26	0,99	0,999
30	-3,792.10 ⁻¹²	4,26	0,99	0,998
45	-2,830.10 ⁻¹²	4,26	0,99	0,999
60	-2,675.10 ⁻¹²	4,26	0,99	0,999
75	-1,403.10 ⁻¹²	4,26	0,99	0,998
90	-0,803.10 ⁻¹²	4,26	0,99	0,998

Pozn. Z = zatížení F_{max}, F = hodnota F-testu; F_{krit} = kritická hodnota porovnání dvou modelů; P_{hodnota} = hladina významnosti; R² = koeficient determinace.

Míra relaxace vláken se zvyšuje s rostoucí mírou relativní deformace a dobou zatížení. Z obrázku 4.20 je patrné, že trend relaxace napětí má stejný průběh pro všechny typy zatížení, ovšem při vyšších hodnotách deformace nastává vyšší hodnota relaxace napětí. Hodnoty relaxace napětí u vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) jsou nižší než u ostatních přírodních vláken (Mizera, et al., 2016b), například z kokosu (*Cocos nucifera*). Vyšší hodnoty relaxace napětí dosahují také vlákna z juty (*Chorchorus*) a sisalu (*Agave sisalana*) (Gaston et al., 2010).

4.4 Sušicí křivky a hygroskopické vlastnosti

Na obrázku 4.22 jsou zobrazeny křivky sušení jako závislosti ztráty hmotnosti na čase pro teploty sušení 40 – 100 °C. Počáteční vlhkost čerstvě sklizených vláken byla stanovena na $(78,4 \pm 1,4 \%)$, což je běžná hodnota vlhkosti při sklizni přírodních vláken (Faruk et al., 2012).



Obrázek 4.22 Sušicí křivky vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Obrázek 4.22 zobrazuje, jak bylo očekáváno, že dobu sušení výrazně zkracuje rostoucí teplota sušícího vzduchu. Čas sušení pro snížení vlhkosti na 5 % byl stanoven na 473, 112, 77 a 51 minut pro teploty sušení 40, 60, 80 a 100 °C. Výsledky ukazují, že čas sušení při teplotě 40 °C byl v průměru 4 krát delší než požadovaný čas sušení při teplotě 60 °C. Čas sušení při teplotě 80 °C byl o 43 % kratší než čas sušení při teplotě 60 °C. Tato skutečnost je dána faktem, že vyšší teplota zvyšuje přenos tepla mezi sušícím vzduchem a vzorkem vlákna (Wang et al., 2017). Naměřené hodnoty sušících křivek byly fitovány s využitím Marquardt Levenbergova algoritmu a byl vytvořen matematický model sušení vláken, který lze zapsat pomocí rovnice (4.10)

$$\xi(d, t) = d_0 + d_1 \cdot e^{d_2 \cdot t} \quad [\text{g}] \quad (4.10)$$

kde:

ξ ... měrná hmotnost vzorku při sušení [-]

d_0 ... první koeficient sušení [-]

d_1 ... druhý koeficient sušení [-]

d_2 ... třetí koeficient sušení [min^{-1}]

Jednotlivé hodnoty koeficientů d_0 , d_1 a d_2 z rovnice 4.10 jsou uvedeny v tabulce 4.16.

Tabulka 4.16: Hodnoty koeficientů matematického modelu (rov. 4.10) sušení vláken (*Ensete ventricosum*)

T (°C)	d_0 (-)	d_1 (-)	d_2 (min^{-1})
40	0,192	0,8169	-0,00793
60	0,1158	0,9001	-0,02
80	0,0962	0,9082	-0,031
100	0,1632	0,8665	-0,056

Pozn. T = teplota sušení, d_0 = první koeficient sušení, d_1 = druhý koeficient sušení, d_2 = směrnice tečny z počátku

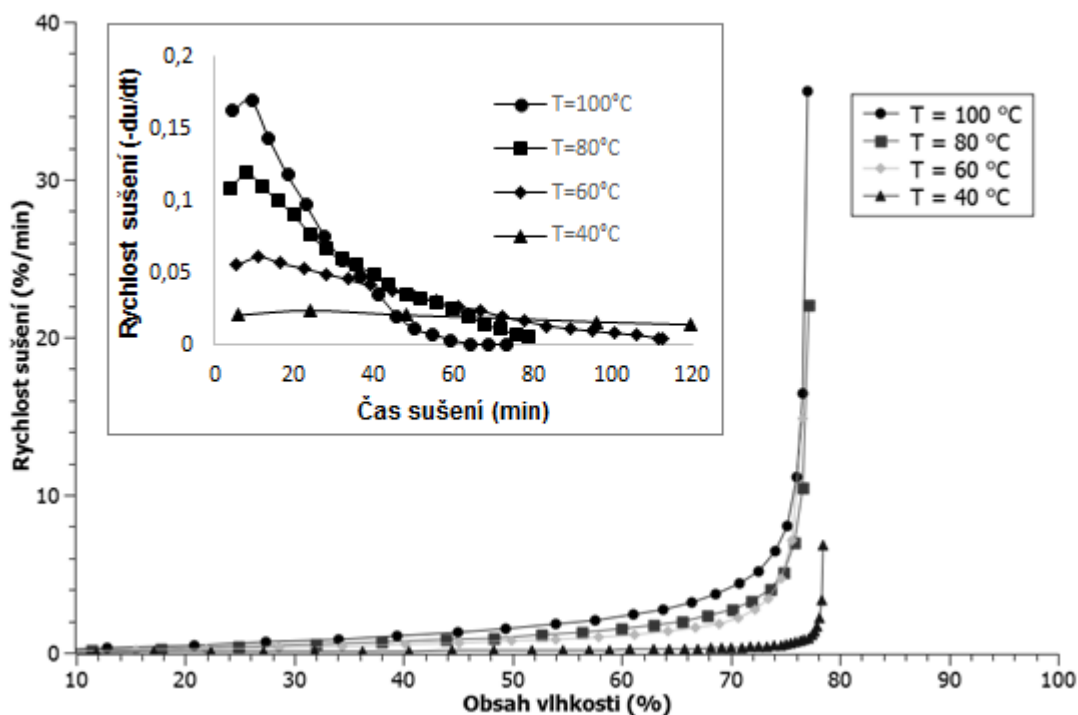
Ze statistické analýzy ANOVA (tab. 4.17) vyplývá, že naměřené hodnoty úbytku hmotností a výsledky získané z obecného exponenciálního modelu (rovnice 4.10) jsou statisticky shodné na hladině významnosti 0,05. To znamená, že hodnoty F_{krit} (kritická hodnota pro porovnání dvou modelů) byly vyšší než hodnoty F (hodnota F-testu) pro všechny teploty sušicího vzduchu a hodnoty P_{hodnota} (hladina významnosti pro zamítnutí hypotézy, že oba modely jsou rovnocenné) byly vyšší než 0,05, což je také potvrzeno velmi vysokými hodnotami koeficientu determinace R^2 .

Tabulka 4.17: Statistická analýza ANOVA obecného modelu sušení vláken

T (°C)	F (-)	F_{krit} (-)	P_{hodnota} (-)	R^2 (-)
40	$-1,147 \cdot 10^{-14}$	4,085	1	0,999
60	$-1,523 \cdot 10^{-14}$	4,073	1	0,998
80	$-1,798 \cdot 10^{-14}$	4,085	1	0,999
100	$-1,963 \cdot 10^{-14}$	4,073	1	0,994

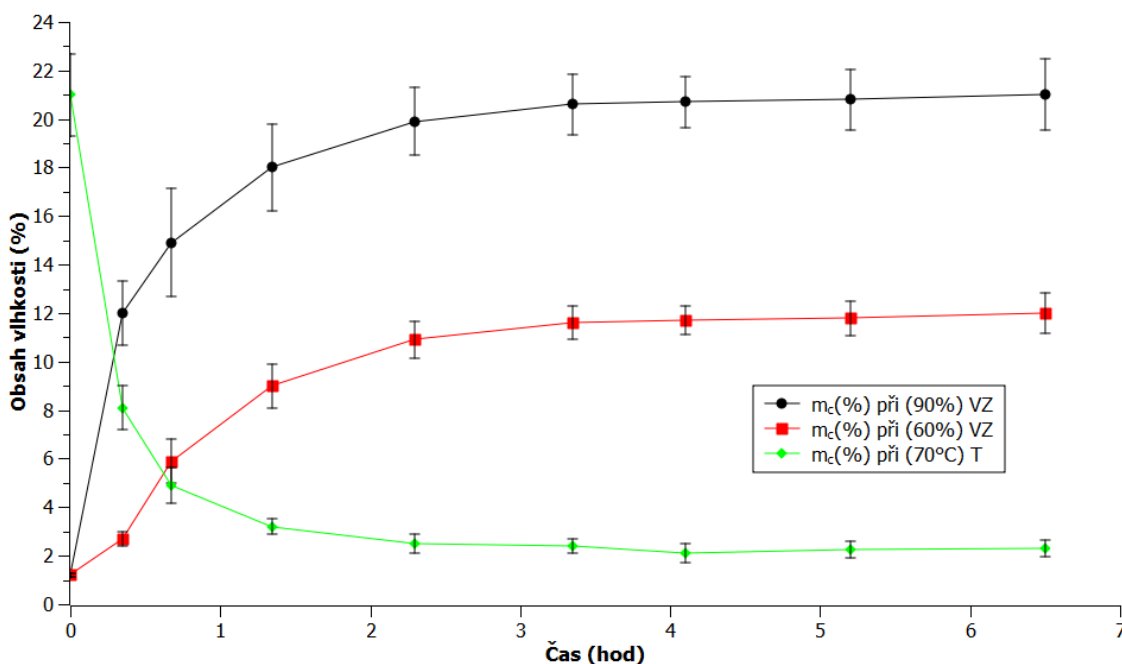
Pozn. T = teplota sušení, F = hodnota F-testu; F_{krit} = kritická hodnota porovnání dvou modelů; P_{hodnota} = hladina významnosti; R^2 = koeficient determinace.

Naměřené a vypočtené hodnoty rychlosti sušení v závislosti na obsahu vlhkosti jsou zobrazeny na obrázku 4.23. Z obrázku 4.23 je zřejmé, že rychlost sušení postupně klesá s poklesem vlhkosti vlákna. Trend poklesu rychlosti sušení ukazuje nekonstantní průběh sušení vlákna (*Ensete ventricosum*). Různá rychlost sušení je dána strukturou sušeného vzorku a mechanismu vnitřního transportu vody (Simović et al., 2016). Někteří autoři stanovili, difúze vlhkosti představuje dominantní fyzikální mechanismus mající vliv na pokles rychlosti sušení rostlinných produktů (Singh & Gupta, 2007; Xiao et al., 2010).

Obrázek 4.23: Rychlost sušení vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*)

Tento efekt je také viditelný u zkoumaného vlákna, kdy absence stálého transportu vody k povrchu vlákna postupně snižuje rychlost sušení, což je zřejmé z obrázku 4.23. Podobné hodnoty byly také stanoveny u ostatních přírodních vláken (Stamboulis et al., 2001). Sušení vláken bavlníku (*Gosypium hirsutum*) zkoumal např. Soomro (2014).

Obrázek 4.24 zobrazuje hygroskopické vlastnosti vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*), tedy vlhkost vláken jako funkci času při vzdušné vlhkosti 60 % a 90 %. Jak je patrné z obrázku 4.24, při laboratorní teplotě a vlhkosti dosahují vlákna 11,8 % obsahu vlhkosti (při 60 % vzdušné vlhkosti a 25 °C). Po sušení při teplotě 70 °C po dobu 6 hodin dosahuje vlhkost vláken 1,6 %, což je zbytková vlhkost, vázaná ve vlákně (Hatakeyama, Ikeda, & Hatakeyama, 1987). Ustálená hodnota vlhkosti 11,8 % je také známá jako rovnovážná vlhkost. Velmi podobné hodnoty rovnovážné vlhkosti byly stanoveny také u vláken juty (*Corchorus*), sisalu (*Agave sisalana*) a ananasu (*Ananas bracteatus*) (Rowell, 2008). Nižší citlivost k absorpci vody vykazují vlákna ze lnu (*Linum usitatissimum*) a bambusu (*bambusoide Luerss*)(7 – 9 %). Naopak vyšší citlivost na absorpci vody, tedy vyšší hodnota rovnovážné vlhkosti (15 – 16 %) byla zjištěna u vlákna abaky (*Musa textilis*) (Rowell, 2008).



Obrázek 4.24: Absorbce vlhkosti vláken při 25 °C a relativní vlhkosti vzduchu 90 % a 60 % po sušení při 70 °C a desorbce vlhkosti vláken při 70 °C po vlhčení 90% vlhkostí vzduchu

Obsah vlhkosti vláken je závislý na obsahu nekystalických částí a pórovitosti vláken (Faruk et al., 2012). Z obrázku 4.24 je zřejmé, že zpětná absorpce vody u vysušených vláken nastává při laboratorních podmínkách velmi rychle. V případě výroby kompozitních materiálů je zde pouze omezený časový prostor po vyjmutí vysušených vláken ze sušárny a vložení do matrice kompozitního materiálu. Tyto hygroskopické vlastnosti jsou obecně problémem při používání přírodních vláken jako pojiva ve výrobě kompozitních materiálů.

4.5 Souhrn poznatků

Naměřené výsledky uvedené v kapitole 4 ukazují, že vlákna rostliny „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) vykazují velmi zajímavé mechanické vlastnosti. Geometrický průměr vláken dosahuje (205 ± 82) μm . Pro srovnání vlákna abaky (*Musa textilis*) a vlákna juty (*Corchorus olitorius*) vykazují průměry vláken $(80 - 250)$ μm a $(25 - 200)$ μm . Geometrické průměry jednotlivých buněk vláken jsou v rozsahu $(5 - 40)$ μm a tloušťky buněčných stěn v rozsahu $(2 - 4)$ μm . Průměrná délka vláken dosahuje (1225 ± 525) mm, což jsou obdobné hodnoty, které byly stanoveny také u vláken sisalu (*Agave sisalana*) nebo abaky (*Musa textilis*) (Müssig et al., 2012). Vlhkost vláken při sklizni dosahuje $(78,4 \pm 1,4)$ %, která je následně procesem přírodního sušení snížena na hodnotu $(8,7 \pm 0,84)$ %, což je optimální hodnota pro

splnění základních požadavků na skladovatelnost vláken a ukazuje také citlivost vláken na pohlcování vzdušné vlhkosti. Jedná se o obdobné hodnoty, které byly stanoveny u vláken bavlny (*Gossypium*)(Faruk et al., 2012). Hustota vláken ($690 \pm 35 \text{ kg.m}^{-3}$) dosahuje nižších hodnot ve srovnání s ostatními přírodními vlákny. Například autoři Chandramohan & Marimuthu (2011) uvádějí hustotu sisalových vláken ($700 - 800 \text{ kg.m}^{-3}$), abakových vláken ($750 - 950 \text{ kg.m}^{-3}$) nebo vláken bambusu ($700 - 1100 \text{ kg.m}^{-3}$). Z hlediska struktury povrchu vykazují vlákna rostliny „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) výraznější nerovnosti, které jsou patrné také u ostatních rostlinných přírodních vláken. Členitý povrch s ostrými liniemi ve směru podélné osy vláken je poměrně výrazný. Z hlediska mechanického chování dosahují vlákna hodnoty síly při přetržení ($10,88 \pm 1,11$) N při odpovídajícím prodloužení (1039 ± 64) μm , napětí při přetržení ($390,33 \pm 21,96$) MPa při ekvivalentním průměru vláken (205 ± 10) μm a odpovídající relativní deformaci ($0,021 \pm 2.10^{-5}$). Počáteční tangentový modul pružnosti byl stanoven na hodnotu (23470 ± 3328 MPa) a objemová deformační energie ($3,39 \pm 0,22 \text{ J.m}^{-3}$)(Mizera et al., 2017). Obdobné pevnosti v tahu byly stanoveny také u vláken bambusu (*bambusoide Luerss*), kokosu (*Cocos nucifera*), banánovníku (*Musa textilis*) a agáve (*Agave sisalana*) (Rao & Rao, 2007; Brandt et al., 1997; Sankari, 2000). V případě prodloužení při přetržení dosahují zkoumaná vlákna mnohem menších hodnot, než vlákna ze lnu (*Linum usitatissimum*), která dosahují téměř dvojnásobných hodnot prodloužení při přetržení. Vzhledem k tomu, že počáteční tangentový modul pružnosti je dán napětím při přetržení a relativní deformací při přetržení, dosahují vlákna (*Ensete ventricosum*) vyšších hodnot modulu pružnosti, než většina ostatních rostlinných přírodních vláken. Například vlákna bambusu (*bambusoide Luerss*) dosahují hodnoty modulu pružnosti 18,03 GPa (Rao & Rao, 2007). S rostoucí délkou vláken klesá hodnota napětí při přetržení. Limitní délka vláken, při které dochází k výraznému poklesu napětí při přetržení, byla stanovena na hodnotě 40 mm (Mizera et al., 2016a). S dalším nárůstem délky vláken již nedochází k výraznému poklesu v hodnotách tahového napětí při přetržení. Toto chování obecně vykazuje většina ostatních přírodních vláken. Obdobných hodnot limitní délky vláken bylo stanoveno také u vláken banánovníku (*Musa sapientum*). Z hlediska citlivosti vláken na teplotu byla zjištěna stabilita mechanických vlastností vláken pro teploty do 140 °C. Při těchto teplotách začíná postupný proces degradace mechanických vlastností vláken. Tato degradace souvisí především se změnou struktury buněčné stěny (Gourier et al., 2014). Autoři Gassan & Bledzki (2001) stanovili degradaci struktury lněného vlákna (*Linum*

usitatissimum) při teplotě 170 °C. Z hlediska mechanického chování má výrazný vliv obsah vlhkosti na prodloužení při přetržení, resp. relativní deformaci při přetržení. S rostoucím obsahem vlhkosti vláken roste relativní deformace při přetržení. Z pohledu viskoelastického chování byl potvrzen vliv rychlosti zatěžování vláken na napětí při přetržení a relativní deformaci. Při zvýšení rychlosti zatěžování dochází také ke zvýšení počátečního modulu pružnosti vláken. Autoři Kulkarni et al., (1983) také zjistili výrazné zvýšení modulu pružnosti a napětí při přetržení u vláken banánovníku (*Musa sapientum*) při deformačních rychlostech v rozsahu (0,5 – 100) mm/min u vláken délky 25 mm. Z hlediska relaxačního chování vykazují vlákna nižší hodnoty relaxace napětí pro různé úrovně zatížení, než například vlákna z kokosu (*Cocos nucifera*) nebo juty (*Chorchorus*)(Gaston et al., 2010, Mizera et al., 2016b). Rovnovážná vlhkost vláken ($11,8 \pm 1,2$) % byla stanovena při vzdušné vlhkosti 60 % a teplotě 25 °C. Velmi obdobné hodnoty rovnovážných vlhkostí byly stanoveny také u vláken juty (*Chorchorus*), sisalu (*Agave sisalana*) a ananasu (*Ananas bracteatus*)(Rowell, 2008). Nižší citlivost na absorpci vody vykazují vlákna lnu (*Linum usitatissimum*) a bambusu (*bambusoide Luer*) s rozsahem rovnovážné vlhkosti (7 – 9) %. Naopak vyšší citlivost na absorpci vody, tedy vyšší hodnota rovnovážné vlhkosti (15 – 16) % byla zjištěna u vláken abaky (*Musa textilis*)(Rowell, 2008).

5 Závěr

Disertační práce byla věnována problematice mechanických vlastností přírodních vláken rostliny „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*), jako možného konstrukčního materiálu využitelného v technické praxi.

Teoretická část práce byla zaměřena na problematiku přírodních vláken, především z hlediska stavby a struktury vláken, chemického složení, vlastností a rozdělení přírodních vláken. Dále byly v této části práce uvedeny nejběžnější typy rostlinných vláken, jejich vlastnosti, botanické zařazení a způsoby využití. Fyzikální a mechanické vlastnosti jednotlivých typů vláken jsou také zahrnuty v teoretické části práce.

V experimentální části práce byly zkoumány vzorky vláken získané z rostliny „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*). Pro využití vláken v technické praxi je nutné znát celou řadu jejich vlastností. Počátek experimentální části práce byl věnován především fyzikálním vlastnostem vláken. Byla stanovena délka, jemnost, hustota a příčný řez vláken. Ze zjištěných délek a průměrů byly sestaveny histogramy četností. S využitím elektronového mikroskopu byly stanoveny snímky řezu a struktury povrchu vláken. Dále byly vytvořeny vzorky vláken a provedeny tahové zkoušky.

Z hlediska zjištěných výsledků je zřejmé, že vlákna rostliny „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) dosahují velmi dobrých mechanických vlastností v porovnání s ostatními přírodními vlákny. Například hodnoty tahového napětí při přetržení jsou v porovnání s ostatními průmyslově využívanými vlákny, jako například bambusu (*bambusoide Luerse*), kokosu (*Cocos nucifera*) či banánovníku (*Musa textilis*) srovnatelné. Zjištěné hodnoty relativní deformace při přetržení jsou poměrně nízké. Proto vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) dosahují vyšších hodnot modulu pružnosti v tahu, než některá ostatní přírodní vlákna. Velmi zajímavým parametrem je poměrně nízká hustota zkoumaných vláken. V kombinaci s velmi dobrými tahovými vlastnostmi se může jednat o velmi zajímavý konstrukční materiál, neboť poměry mezi tahovým napětím a hustotou nebo modulem pružnosti a hustotou jsou vyšší než u některých ostatních přírodních vláken. Z naměřených hodnot tahového napětí a relativní deformace byl sestaven obecný matematický model popisující mechanické chování vláken v tahu. Výrazný vliv délky vláken na tahové vlastnosti byl stejně jako u ostatních přírodních vláken také potvrzen. S rostoucí délkou vláken

dochází k velmi strmému poklesu tahového napětí při přetržení. Toto obecné chování je patrné u vláknenných materiálů, které je výraznější zvláště u biologických materiálů, což souvisí s rozdílnou distribucí vad v materiálu. S tímto trendem je třeba při využití vláken v technické praxi počítat. Proto byl sestaven obecný matematický model popisující tuto závislost, tedy vztah mezi upínací délkou vláken a napětím při přetržení. Pro využití vláken je také velmi důležitý vliv teploty a vlhkosti. Bylo potvrzeno, že vlákna „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) vykazují velmi dobrou stabilitu mechanických vlastností při běžné i zvýšené teplotě. K výraznému poklesu tahového napětí dochází při teplotě přesahující 140 °C, což souvisí především s degradací ligninu v buněčné stěně vláken. Naopak vliv vlhkosti vláken na napětí při přetržení nebyl potvrzen. Nicméně obsah vlhkosti vláken velmi výrazně ovlivňuje relativní prodloužení při přetržení a s tím související modul pružnosti vláken. Důležitým parametrem pro využití vláken je charakteristika jejich viskoelastických vlastností. Proto byl také stanoven vliv rychlosti zatěžování na tahové charakteristiky vláken a modul pružnosti vláken. Závislost modulu pružnosti na deformační rychlosti byla popsána obecným matematickým modelem. Relaxační chování bylo stanoveno pro různé konstantní hodnoty relativní deformace, což odpovídalo různým stupňům zatížení. Relaxační chování vláken bylo transformováno do obecného viskoelastického modelu, který byl tvořen dvěma větvemi obecného Maxwellova modelu. Sestavený model byl matematicky popsán a byl ověřen pomocí analýzy rozptylu ANOVA. Kríp vláken byl stanoven pro různá konstantní zatížení. Zjištěné hodnoty krípu byly transformovány do obecného viskoelastického modelu, který byl složen ze dvou větví obecného Kelvinova modelu. Sestavený model krípu byl matematicky popsán a rovněž ověřen pomocí analýzy rozptylu ANOVA. Velmi důležitým parametrem pro využití vláken v kompozitních materiálech je proces sušení a hygroskopické vlastnosti vláken. Obecně je známo, že přírodní vláknité materiály jsou velmi citlivé na vzdušnou vlhkost. Z tohoto důvodu byl tedy také zkoumán proces absorpce vzdušné vlhkosti do vláken. Pro různé teploty sušení byly stanoveny sušicí křivky. Z naměřených dat sušení byl sestaven obecný matematický model.

Ze získaných výsledků mechanických vlastností vláken rostliny falešného banánovníku (*Ensete ventricosum*) je zřejmé, že se jedná o velmi zajímavý konstrukční materiál využitelný v technické praxi. Požadavky spotřebitelů a tlak na životní prostředí jsou hnací silou ve vývoji nových materiálů na bázi obnovitelných zdrojů. V posledních

letech se stále více vědeckých prací zaměřuje na problematiku biologicky rozložitelných kompozitních materiálů, které jsou vyztužené přírodními vlákny. Nižší hmotnost kompozitních materiálů vyztužených přírodními vlákny pomáhá v automobilovém průmyslu snižovat hmotnost konstrukce vozidel a tím i spotřebu pohonných hmot. Kombinace specifických vlastností přírodních vláken a použité matrice řeší celou řadu technických problémů, které samotná vlákna představují. Z hlediska správné konstrukce kompozitního materiálu je nutné znát mechanické chování výztuže, tedy použitých přírodních vláken. V této práci navržené matematické modely mohou pomoci při návrhu nových přírodních kompozitních materiálů.

Z hlediska budoucího výzkumu by bylo velmi zajímavé zaměřit se na využití vláken falešného banánovníku (*Ensete ventricosum*) jako výztuže v kompozitních materiálech. Dalším krokem by mohla být snaha o nalezení vhodné přírodní matrice pro výrobu kompozitního materiálu. Velmi vhodná by byla taková matrice, která splňuje základní požadavky na mechanické vlastnosti a navíc by byla stejného geografického původu jako samotná vlákna. Tím by byly odstraněny náklady na transport a logistiku vláken a zvýšila by se konkurenceschopnost nově navrženého kompozitního materiálu. V kapitole 1.7.3 bylo zmíněno získávání škrobu při sklizni a zpracování rostliny falešného banánovníku (*Ensete ventricosum*). Jeden z možných budoucích směrů výzkumu by mohl být zaměřen na využití tohoto škrobového materiálu k výrobě přírodní matrice (pojiva) pro kompozitní materiály s vlákny z „falešného“ banánovníku. Výsledkem by mohl být přírodní kompozitní materiál vyrobený z jednoho druhu rostliny. Je zde ale na místě zmínit, že se jedná o pouhé nastínění cesty pro budoucí výzkum v této oblasti. Při využití škrobu na výrobu přírodní matrice zde neleží pouze technické otázky ohledně vhodnosti a mechanických vlastností nově získané matrice, ale také otázky dopadu na společnost a potravinovou bezpečnost místních obyvatel. Nicméně nalezení vhodné biodegradabilní matrice v kombinaci se specifickými mechanickými vlastnostmi vláken „falešného“ banánovníku (*Ensete ventricosum*) vytváří zajímavou výzvu k objevení možná velmi perspektivního kompozitního materiálu.

Cíle v této disertační práci přináší nové poznatky nejen do oboru konstruování z přírodních materiálů a mohou tak přispět ke globálnímu trendu a snaze stále více nahrazovat syntetické materiály přírodními. Zaměření se v oboru konstruování na přírodní materiály se zdá být do budoucna jako velmi perspektivní směr.

Literatura

- Aggarwal, L. K. (1992). Studies on cement-bonded coir fibre boards. *Cement and Concrete Composites*, 14, 63–69.
- Akin, D.E., Gamble, G.R., Morrison III, W.H., Rigsby, L.L., & Dodd, R.B. (1996). Chemical and structural analysis of fibre and core tissues from flax. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 72, 155–165.
- Akin, D.E. (1987). Association of rumen fungi with various forage grasses. *Animal Feed Science and Technology*, 16, 273–285.
- Akin, D.E. (2008). Plant cell wall aromatics: influence on degradation of biomass. *Biofuels, Bioproducts and Bioprocess*, 2, 288–303.
- Altaner, C.M., & Jarvis, M.C. (2008). Modelling polymer interactions of the ‘molecular Velcro’ type in wood under mechanical stress. *Journal of Theoretical Biology*, 253, 434–445.
- Alves, C., Ferrão, P. M. C., Silva, A. J., Reis, L. G., Freitas, M., Rodrigues, L. B., & Alves, D. E. (2010). Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites. *Journal of Cleaner Production*, 18, 313–327.
- Amaducci, S., & Gusovius, H.J. (2010). Hemp – Cultivation, Extraction and Processing. Industrial Applications of Natural Fibres, John Wiley & Sons, London.
- Andeme-Onzighi, C., Girault, R., His, I., Morvan, C., & Driouich, A. (2000). Immunocytochemical characterization of early-developing flax fibre cells. *Protoplasma*, 213, 235–245.
- Anderson, D.B., & Kerr, T. (1938). Growth and structure of cotton fiber. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 30, 48–54.
- Anandjiwala, R.D., & John, M. (2010). Sisal – Cultivation, Processing and Products. Industrial Applications of Natural Fibres, John Wiley & Sons, London.

- ASAE S410.1 DEC97. 1998. Moisture measurement of peanut. In: ASAE standards, 45th edition. 560–561.
- ASTM D 3379-75. 1989. Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials.
- Aziz, S., H., Ansell, M., P., Clarke, S., J., & Panteny, S., R. (2005). Modified polyester resins for natural fiber composites. *Composites Science and Technology*, 65, 525–535.
- Baley, C. (2002). Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33, 939–948.
- Baltazar, A.Y.J., & Sain, M. (2012). Natural fibres for automotive applications. *Handbook of Natural Fibres: Processing and Applications*, Woodhead Publishing, Philadelphia.
- Barker, S.G. (1933). COIR – report on the attributes and properties of coconut fiber. Her Majesty Stationery Office.
- Barnett, J.R., & Bonham, V.A. (2004). Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres. *Biological Reviews*, 79, 461–472.
- Bayush, T. (1991). Community Management of Crop Genetic Resources in the Enset Complex Farming System of Southern Ethiopia: *a Case Study from Sidama Region*. Agricultural University of Norway.
- Biswas, S., Ahsan, Q., Verpoest, I., & Hasan, M. (2011). Effect of Span Length on the Tensile Properties of Natural Fibers. *Advanced Materials Research*, 30, 445–450.
- Blahovec, J. (2008). *Agromaterials – study Guide*. Prague: Czech University of Life Sciences Prague.
- Blake, A.W., Marcus, S.E., Copeland, J.E., Blackburn, R.S., & Knox, J.P. (2008). In situ analysis of cell wall polymers associated with phloem fibre cells in stems of hemp, *Cannabis sativa* L. *Planta*, 228, 1–13.

- Bledzki, A.K., & Gassan, J. (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, 24, 221–274.
- Bledzki, A.K., Mamun, A.A., Lucka-Gabor, M., & Gutowski, V.S. (2008). The effects of acetylation on properties of flax fibre and its polypropylene composites. *Express Polymer Letters*, 2, 413–422.
- Bledzki, A., K., Mamun, A., A., & Volk, J. (2010). Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: the effect of fibre physical, chemical and surface properties. *Composites Science and Technology*, 70, 840–6.
- Bos, H.L., Van Den Oever M.J.A., & Peters, O.C.J.J. (2002). Tensile and compressive properties of flax fibres for natural fibre reinforced composites. *Journal of Materials Science*, 37, 1683–1692.
- Bourmaud, A., & Baley, C. (2010). Effects of thermo mechanical processing on the mechanical properties of biocomposite flax fibers evaluated by nanoindentation. *Polymer Degradation and Stability*, 95, 1488–1494.
- Brandt, S.A., Spring, A., Hiebsch, C., McCabe, J.T., Tabogie, E., Diro, M., Wolde-Michael, G., Yntiso, G., Shiegeta, M., & Tesfaye, S. (1997). The “Tree Against Hunger”: Enset- Based Agricultural Systems in Ethiopia. American Association for the Advancement of Science, Washington.
- Burgert, I. (2006) Exploring the micromechanical design of plant cell walls. *Am. J. Bot.*, 93, 1391–1401.
- Buzuneh, T. (1980). Morphology of Ensete embryo in vitro culture. *Ethiopian Journal of Agricultural Science*, 2, 23 – 28.
- Chandramohan, D., & Marimuthu, K. (2011). A Review on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 3, 5–9.
- Chaudhry, M.R. (2010). Cotton Production and Processing. Industrial Applications of Natural Fibres, John Wiley & Sons, London.

- Cheung, H., Ho, M., Lau, K., Cardona, F., & Hui, D. (2009). Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications. *Composites Part B: Engineering*, 40, 655–663.
- Cosgrove, D.J. (2005). Growth of the plant cell wall. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 6, 850–861.
- ČSN EN (1997). ISO 2060 Textilie - nitě na návinech - Zjišťování jemnosti (délkové hmotnosti) pásmovou metodou.
- Dash, B.N., Rana, A.K., Mishra, S.C., Mishra, H.K., Nayak, S.K., & Tripathy, S.S. (2000). Novel low-cost jute–polyester composite. II. SEM observation of the fracture surfaces. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 39, 333–350.
- Davies, P., Morvan, C., Sire, O., & Baley, C. (2007). Structure and properties of fibres from sea-grass (*Zostera marina*). *Journal of Materials Science*, 42, 4850–4857.
- Deblois, S. and Wiegel, J. (1990). Hemicellulases in lignocellulose degradation, in *Microbial and Plant Opportunities to Improve Lignocellulose Utilization by Ruminants*, ed. by Akin, D.E., Ljungdahl, L.G., Wilson, J.R. and Harris, P.J. Elsevier, New York.
- Defoirdt, N., Biswas, S., Vriese, L., Tran, L.Q.N., Acker, J.V., Ahsan, Q., Gorbatikh, L., Vuure, A.V., & Verpoest, I. (2010): Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre. *Composites: Part A*, 41, 588–595.
- Ecotech, A. (2013). Global Production Volume of Different Natural Fibres. Dostupné z <http://www.ecotechalliance.com/reinforced-concrete>.
- Eder, M., & Burgert, I. (2010). *Natural Fibres – Function in Nature. Industrial Applications of Natural Fibres*, John Wiley & Sons, London.
- Elsaid, A., Dawood, M., Seracino, R., & Bobko, C. (2011). Mechanical properties of kenaf fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 1991–2001.

- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37, 1552–1596.
- Ferry, J.D. (1961). *Viscoelastic Properties of Polymers*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Fidelis, M.E.A., Pereira, T.V.S., Gomes, O.F.M., Silva, F.A., & Filho, R.D.T. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology*, 2, 149–157.
- Fischer, H., Müssig, J., & Bluhm, C. (2005). Enzymatic modification of hemp fibres for sustainable production of high quality materials: influence of processing parameters. *Journal of Natural Fibers*, 3, 39–53.
- Focher, B. (1992). Physical characteristics of flax fibre, in *The Biology and Processing of Flax*, ed. by Sharma, H.S.S. and Van Sumere C.F., M. Publications, Belfast, UK.
- Focher, B., Marzetti, A., & Sharma, H.S.S. (1992). Changes in the structure and properties of flax fibre during processing in *The Biology and Processing of Flax*, ed. by Sharma, H. S. S. and Van Sumere C.F. M. Publications, Belfast.
- Fratzl, P., Burgert, I., & Gupta, H.S. (2004). On the role of interface polymers for the mechanics of natural polymeric composites. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 6, 5575–5579.
- Gassan, J., & Bledzki, A.K. (2001). Thermal degradation of flax and jute fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 82, 1417–1422.
- Gaston, M.F., Rodriguez, E.S., & Vázquez, A. (2010). Study of the Compaction Behavior of Natural Fiber Reinforcements in Liquid Composite Molding Processes. The 10th International Conference on Flow Processes in Composite Materials. Ascona.
- Gloria, A., Causa, F., De Santis, R., Netti, P.A., & Ambrosio, L. (2007). Dynamic-mechanical properties of a novel composite intervertebral disc prosthesis. *In Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 18, 2159–2165.

- Gourier, C., Le Duigou, A., Bourmaud, A., & Baley, C. (2014). Mechanical analysis of elementary flax fibre tensile properties after different thermal cycles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 64, 159–166.
- Graupner, N., & Müssig, J. (2012). Technical Applications of Natural Fibres: An Overview. *Industrial Applications of Natural Fibres*, John Wiley & Sons, London.
- Groom, L., Mott, L., & Shaler, S. (2002). Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part I. Determination and variability of stress–strain curves with respect to tree height and juvenility. *Wood and Fiber Science*, 34, 14–27.
- Guo, M., Zhang, T.H., Chen, B.W., & Cheng, L. (2014). Tensile strength analysis of palm leaf sheath fiber with Weibull distribution. *Composites: Part A*, 62, 45–51.
- Hao, A., Zhao, H.F., & Chen, J.Y. (2013). Polymer Composites for Automobile Accessories. *American Journal of Environmental Science*, 9, 494–504.
- Hatakeyama, T., Ikeda, Y., & Hatakeyama, H. (1987). Effect of bound water on structural change of regenerated cellulose. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 8, 1875–1884.
- Himmelsbach, D.S., Khalili, S. and Akin, D.E. (1998). FT-IR microspectroscopic imaging of flax (*Linum usitatissimum* L.) stems. *Cellular and Molecular Biology*, 44, 99–108.
- Islam, M.,N., Rahman, M.,R., Haque, M.,M., & Huque, M.,M. 2010. Physicomechanical properties of chemically treated coir reinforced polypropylene composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41,192–8.
- Jain, S., Kumar, R., & Jindal, U., C. (1992). Mechanical behaviour of bamboo and bamboo composite. *Journal of Materials Science*, 27, 4598–4604.
- Jarman, C.G., & Laws, V. (1965). The cell wall structure of coconut fibre. *Journal Royal Microscopical Society*, 84, 339–346.
- Jawaid, M., Abdul Khalil, H., P., S., Hassan, F., N., Dungani, R., Barres, A., & Fleury, E. (2013). 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*, 45, 619–624.
- Jayasekara, C., & Amarasinghe, N. (2010). Coir – Coconut Cultivation, Extraction and Processing of Coir. *Industrial Applications of Natural Fibres*, John Wiley & Sons, London.
- Kabir, M.M., Wang, H., Lau, K.T., & Cardona, F. (2012). Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview, Centre of Excellence in Engineered Fibre Composite (CEEFC), Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, Toowoomba, Australia.
- Kalia, S., Kaith. B.,S., & Kaur, I. (2011). *Cellulose fibers: bio- and nano-polymer composites*. New York: Springer.
- Kalia, S., Thakur, K., Celli, A., Kiechel, M. A., & Schauer, C. L. (2013). Surface modification of plant fibers using environment friendly methods for their application in polymer composites, textile industry and antimicrobial activities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1, 97–112.
- Keckes, J., Burgert, I., Frühmann, K., Müller, M., Kölln, K., Hamilton, M., Burghammer, M., Roth, S.V., Stanzl-Tschegg, S.E. and Fratzl, P. (2003). Cell-wall recovery after irreversible deformation of wood. *Nature Materials*, 2, 810–814.
- Khalil, H.P.S.A., Alwani, M.S., Ridzuan, R., Kamarudin, H. and Khairul, A. (2008) Chemical composition, morphological characteristics, and cell wall structure of Malaysian oil palm fibers. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 47, 273–280.
- Khondker, O.A., Ishiaku, U.S., Nakai, A., & Hamada, H. (2005). Fabrication and Mechanical Properties of Unidirectional Jute/PP Composites Using Jute Yarns by Film Stacking Method. *Journal of Polymers and the Environment*, 13, 2.
- Korhonen, R.K., & Saarakkala, S. (2011). Biomechanics and Modeling of Skeletal Soft Tissue. In V. Klika, *Theoretical Biomechanics*, 113–132.

- Kozłowski, R.M. (2012). Handbook of Natural Fibres. Volume1: Types, properties and factors affecting breeding and cultivation. Woodhead Publishing, Philadelphia.
- Kulkarni, A.G., Satyanarayana, K.G., Sukumaran, K., & Rohatgi, P.K. (1981). Mechanical-behavior of coir fibers under tensile load. *Journal of Materials Science*, 16, 905–914.
- Kulkarni, A.G., Satyanarayana, K.G., Rohatgi, P.K., & Vijayan, K. (1983). Mechanical properties of banana fibres (*Musa sepientum*). *Journal of Materials Science*, 18, 2290–2296.
- Latzke, P.M. & Hesse, R. (1988). Textile Fasern: Rasterelektronenmikroskopie der Chemie- und Naturfasern; Analysieren, Klassifizieren, Zitieren, Ordnen. Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, Germany.
- Leonard, Y.M., & Martin, P.A. (2002). Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization. *Journal of Applied Polymer Science*, 12, 2222–2234.
- Li, Y., Mai, Y., & Ye, L. (2000). Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. *Composites Science and Technology*, 60, 2037–2055.
- Li, X., Tabil, L.G., & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatment of natural fibre for use in natural fibre-reinforced composites: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15, 25–33.
- Li, X., Panigrahi, S., & Tabil, L.G. (2009). A study of flax fibre-reinforced polyethylene biocomposites. *Applied Engineering in Agriculture*, 25, 525–531.
- Lim, J., Zheng, J.Q., Masters, K., & Chen, W.W. (2011). Effects of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibers. *International Journal of Impact Engineering*, 38, 219–227.
- Lichtenegger, H., Reiterer, A., Stanzl-Tschegg, S.E., & Fratzl, P. (1999). Variation of cellulose microfibril angles in softwoods and hardwoods – a possible strategy of mechanical optimization. *Journal of Structural Biology*, 128, 257–269.

- Ljungdahl, L.G. (1990). Cellulases and the cellulosome concept, in *Microbial and Plant Opportunities to Improve Lignocellulose Utilization by Ruminants*, ed. by Akin, D.E., Ljungdahl, L.G., Wilson, J.R. and Harris, P.J. Elsevier, New York.
- Mahjoub, R., Yatim, J., M., Mohd Sam, A., R., & Hashemi, S., H. (2014). Tensile properties of kenaf fiber due to various conditions of chemical fiber surface modifications. *Construction and Building Materials*, 55, 103–113.
- Majid, A. (2010). Coconut Fibre – A Versatile Material and its Applications in Engineering. Conference proceeding. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies.
- Martins, M.A., & Joeques, I. (2003). Tire rubber–sisal composites: effect of mercerization and acetylation on reinforcement. *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 2507.
- Martinschitz, K.J., Boesecke, P., Garvey, C.J., Gindl, W., & Keckes, J. (2008). Changes in microfibril angle in cyclically deformed dry coir fibers studied by in-situ synchrotron X-ray diffraction. *Journal of Materials Science*, 43, 350–356.
- Maxwell, J.M., Gordon, S.G., & Huson, M.G. (2003). Internal structure of mature and immature cotton fibers revealed by scanning probe microscopy. *Textile Research Journal*, 73, 1005–1012.
- McCann, M., & Roberts, K.R. (1991). in *The Cytoskeletal Basis of Plant Growth and Form*, ed. by Lloyd, C.W. Academic Press, London.
- Militký, J. (2002). *Textilní vlákna*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. Liberec.
- Miserez, A., & Guerette, P.A. (2012). Integrating materials and life sciences toward the engineering of biomimetic materials. *Journal of the Minerals, metals, and Materials Society*, 64, 494–504.
- Mitra, B.C. (1999). *Data Book on Jute*. National Institute of Research on Jute and Allied Fibre Technology (NIRJAFT), Kolata, India.

- Mizera, Č., Herák, D., Hrabě, P., Müller, M., & Kabutey, A. (2016a). Effect of Length of False Banana Fibre (*Ensete ventricosum*) on Mechanical Behaviour under Tensile Loading. *Scientia Agriculturae Bohemica*, 47, 90–96.
- Mizera, Č., Herák, D., & Hrabě, P. (2016b). Relaxation and creep behaviour of false banana's fibre (*Ensete ventricosum*). *Agronomy Research*, 14, 1069–1077.
- Mizera, Č., Herák, D., Hrabě, P., Müller, M., & Kabutey, A. (2017). Mechanical Behavior of *Ensete ventricosum* Fiber Under Tension Loading. *Journal of Natural Fibres*, 14, 287 – 296.
- Mohanty, A.K., Misra, M., & Drzal, L.T. (2005). Natural Fibers, biopolymers and biocomposites, CRC Press, UK.
- Mohsenin, N.N. (1970). Physical properties of plant and animal materials. Gordon and Breach, New York.
- Mukherjee, P.S., & Satyanarayana, K.G. (1984). Structure and properties of some vegetable fibres – Part 1: Sisal fibre. *Journal of Materials Science*, 12, 3925–3934.
- Mukherjee, P.S., & Satyanarayana, K.G. (1986). Structure and properties of some vegetable fibres - Part 2 Pineapple fibre (*Anannus Comosus*). *Journal of Materials Science*, 21, 51–56.
- Munawar, S. S., Umemura, K., & Kawai, S. (2006). Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles. *Journal of Wood Science*, 53, 108–113.
- Musanif, I.S., Thomas, A. (2015). Effect of Alkali Treatments of Physical and Mechanical Properties of Coir Fiber. *Chemical and Materials Engineering*, 3, 23–28.
- Müssig, J. (2010). Industrial Applications of Natural Fibres. John Wiley & Sons, London.

- Müssig, J., Fischer, H., Graupner, N., Drieling, A. (2012). Testing Methods for Measuring Physical and Mechanical Fibre Properties (Plant and Animal Fibres). Industrial Applications of Natural Fibres, John Wiley & Sons, London.
- Müssig, J., & Sloomaker, T. (2010). Types of Fibre. Industrial Applications of Natural Fibres. John Wiley & Sons, London.
- Mwaikambo, L.Y., Tucker, N., & Clark, A.J. (2007). Mechanical properties of hemp fibre reinforced euphorbia composites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 292, 993–1000.
- Navi, P., Rastogi, P.K., Gresse, V. and Tolou, A. (1995) Micromechanics of wood subjected to axial tension. *Wood Science and Technology*, 29, 411–429.
- Nechwatal, A., Mieck, K.-P., & Reußmann, T. (2003). Developments in the characterization of natural fibre properties and in the use of natural fibres for composites. *Composites Science and Technology*, 63, 1273–1279.
- Neckar, B., & Das, B. (2012). Theory of structure and mechanics of fibrous assemblies. Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- Nelson, D.L., & Cox, M.M. (2000). Lehninger Principles of Biochemistry, 3rd edition. Worth Publishers, New York, NY.
- O'Shaughnessy, M.T. (1948). An Experimental Study of the Creep of Rayon. *Textile Research Journal*, 18, 263–280.
- Page, D.H., & El-Hosseiny, F. (1983). The mechanical properties of single wood pulp fibres. Part VI. Fibril angle and the shape of the stress–strain curve. *Journal of Pulp and Paper Science*, 9, 99–100.
- Placet, V. (2009). Characterization of the thermo-mechanical behaviour of Hemp fibres intended for the manufacturing of high performance composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 1111–1118.
- Poole, A. J., Church, J. S., & Huson, M. G. (2009). Environmentally sustainable fibers from regenerated Protein. *Biomacromolecules*, 10, 1–8.

- Pothan, L., A., Thomas, S., & Groeninckx, G. (2006). The role of fibre/matrix interactions on the dynamic mechanical properties of chemically modified banana fibre/polyester composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 1260–1269.
- Pritchard, P.J. (1998). Mathcad: A tool for engineering problem solving. McGraw-Hill Science Engineering, New York.
- Puglia, D., Biagiotti, J., & Kenny, J.M. (2004). A review on natural fibre-based composites. Part II: Application of natural reinforcements in composite materials for automotive industry, *Journal of Natural Fibres*, 1, 23 – 65.
- Rahman, S. (2010). Jute – A Versatile Natural Fibre. Cultivation, Extraction and Processing. Industrial Applications of Natural Fibres, John Wiley & Sons, London.
- Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2005). Studies on the durability of natural fibres and the effect of corroded fibres on the strength of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 27, 575–582.
- Rao, K. M. M., & Rao, K. M. (2007). Extraction and tensile properties of natural fibers: Vakka, date and bamboo. *Composite Structures*, 77, 288–295.
- Ray, D., Das, M., & Mitra, D. (2009). Influence of Alkali Treatment on Creep Properties and Crystallinity of Jute Fibres. *BioResources*, 4, 730–739.
- Reis, J.M.L. (2006). Fracture and flexural characterization of natural fiber-reinforced polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 20, 673–678.
- Ren, D., Yu, Z., Li, W., Wang, H., & Yu, Y. (2014). The effect of ages on the tensile mechanical properties of elementary fibers extracted from two sympodial bamboo species. *Industrial Crops and Products*, 62, 94–99.
- Rippon, J.A. & Evans, D.J. (2012). Improving the properties of natural fibres by chemical treatments. Handbook of natural fibres: Processing and applications, Woodhead Publishing, Cambridge, UK.

- Romhany, G., Karger-Kocsis, J., & Czigany, T. (2003). Tensile fracture and failure behavior of technical flax fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, *90*, 3638–3645.
- Rosato, D.V., & Rosato, D.V. (2005). ‘Reinforcements’, in D.V. Rosato and D.V. Rosato (eds.), *Reinforced Plastics Handbook*, Elsevier, Amsterdam.
- Rowell, R.M. (2008). *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*, 1 – Natural fibres: types and properties, Woodhead Publishing, USA.
- Rowell, R.M., Han, J.S., & Rowell, J.S. (2000). Characterization and factors affecting fibre properties, in *Natural Polymers and Agrofibres Composites*, ed. by Frollini, E., Leo, A.L. and Mattoso, L.H.C. San Carlos, Brazil, pp. 115–134.
- Saba, N., Paridah, M.T., & Jawaid, M. (2015). Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite. *Construction and Building Materials*, *76*, 87–96.
- Salleh, Z., Taib, Y., M., Hyie, K., M., Mihat, M., Berhan, M., N., & Ghani, M., A., A. (2012). Fracture toughness investigation on long kenaf/woven glass hybrid composite due to water absorption effect. *Procedia Engineering*, *41*, 1667–1673.
- Sanjay, M.R., Arpitha, G.R., Naik, L.L., Gopalakrishna, K., & Yogesha, B. (2016). Applications of Natural Fibers and Its Composites: An Overview. *Natural Resources*, *7*, 108 – 114.
- Sakai, T., Sakamoto, T., Hallaert, J., & Vandamme, E.J. (1993). Pectin, pectinase, and protopectinase: production, properties, and applications, in *Advances in Applied Microbiology*, ed. by Neidleman, S. and Laskin, A.I. Academic Press, New York.
- Sankari, H. S. (2000). Comparison of bast fibre yield and mechanical fibre properties of hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars. *Industrial Crops and Products*, *11*, 73–84.
- Santafé, H.P.,G., Da Costa, L.,L., Rodriguez, R.,J.,S., Lopes, F.,P.,D., & Monteiro, S., N. (2010). Mechanical behavior of epoxy composites reinforced with acetylation-treated coir fibers. TMS annual meeting, 335–42.

- Saravana, B.D., & Kumar, M.D. (2010). Potential Use of Natural Fiber Composite Materials in India. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 3600 – 3613.
- Sarkanen, K.V., & Ludwig, C.H. (1971). Lignins: Occurrence, Formation, Structure, and Reactions. Wiley-Interscience, New York.
- Satyanarayana, K., G., Guimaraes, J., L., Wypych, J., Charneau, Y., Barres, C., & Fleury, E. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38, 1694–1709.
- Seki, Y. (2009). Innovative multifunctional siloxane treatment of jute fibre surface and its effect on the mechanical properties of jute/thermoset composites, *Materials Science and Engineering: A*, 508, 247–252.
- Slootmaker, T. & Müssig, J. (2010). SEM Catalogue for Animal and Plant Fibres. Industrial Applications of Natural Fibres, John Wiley & Sons, London.
- Schnegelsberg, G. (1999). Handbuch der Faser – Theorie und Systematik der Faser. Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main, Germany.
- Schopfer, P. (2001). Hydroxyl radical-induced cell wall loosening in vitro and in vivo: implications for the control of elongation growth. *The Plant Journal*, 28, 679–688.
- Sreekala, M. S., Kumaran, M. G., & Thomas, S. (1997). Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 66, 821–835.
- Shahri, W., Tahir, I., & Ahad, B. (2014). Abaca Fiber: A Renewable Bio-resource for Industrial Uses and Other Applications. *Biomass and Bioenergy*, 47–61.
- Singh, B., & Gupta, A.K. (2007). Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. *Journal of Food Engineering*, 79, 459–470.

- Silva, F. de A., Chawla, N., & Filho, R. D. de T. (2008). Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers. *Composites Science and Technology*, 68, 3438–3443.
- Simmonds, N. (1962). *The evolution of bananas*. Longmans, London.
- Simović, D.Š., Šereš, Z., Maravić, N., Djordjević, M., Djordjević, M., Luković, J., & Tepić, A. (2016). Enhancement of physicochemical properties of sugar beet fibres affected by chemical modification and vacuum drying. *Food and Bioprocess Processing*, 100, 432–439.
- Sobhan, M.A. (2010). Jute agriculture. Paper accepted for a book on jute to be published by the International Jute Study Group (IJSJG), Dhaka, Bangladesh.
- Somerville, C., Bauer, S., Brininstool, G., Facette, M., Hamann, T., Milne, J., Osborne, E., Paredez, A., Persson, S., Raab, T., Vorwerk, S., & Youngs, H. (2004). Toward a systems approach to understanding plant cell walls. *Science*, 306, 2206–2211.
- Soomro, N. (2014). Effect of drying methods on quality of cotton fibers before ginning. *European Scientific Journal*, 10, 24.
- Spatz, H.C., Köhler, L., & Niklas, K.J. (1999). Mechanical behaviour of plant tissues: composite materials or structures?. *Journal of Experimental Biology*, 202, 3269–3272.
- Sponner, J., Toth, L., Cziger, S., & Franck R.R. (2005) Hemp, in *Bast and Other Fibres*, ed. by Franck, R.R. Woodhead Publishing, Cambridge, UK.
- Spring, A., Haile, B., Tesfaye, S., Abebe, Y., Amaldeng, A., Wolde-Michael, G., Tabogie, E., Surur, O., Tsegaye, A., Shimeles, S., Habte, T., Menjeye, T., & Tadesse, T. (1996). Enset farming system in Southern region, Ethiopia: Report on a rapid rural appraisal in Guragie, Hadiya and Sidama zones. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Germany.

- Stamboulis, A., Baillie, C. A., & Peijs, T. (2001). Effects of environmental conditions on mechanical and physical properties of flax fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32, 1105–1115.
- Stroshine, R.L. (2000). Physical properties of agricultural materials and products. Purdue University, West Lafayette.
- Struik, P.C., Amaducci, S., Bullard, M.J., Stutterheim, N.C., Venturi, G., & Cromack, H.T.H. (2000). Agronomy of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) in Europe. *Industrial Crops and Products*, 11, 107–118.
- Suddell, B. (2008). ‘Industrial fibres: Recent and current developments’, Proceedings of the symposium on natural fibres, Common Fund for Commodities and Food and Agriculture Organization, Rome.
- Sultana, C. (1992) Growing and harvesting flax, in *The Biology and Processing of Flax*, ed. by Sharma, H.S.S. and Van Sumere, C.F. M. Publications, Belfast.
- Sundaresan, G., Salhotra, K.R., & Hari, P.K. (1998). Strength reduction in sewing threads during high speed sewing in industrial lockstitch machine: Part II: Effect of thread and fabric properties. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 10, 64–79.
- Suradi, S., S., Yunus, R., M., Beg, M., D., H., Rivai, M., & Yusof, Z., A., M. (2010). Oil palm bio-fiber reinforced thermoplastic composites – effects of matrix modification on mechanical and thermal properties. *Journal Applied Science*, 10, 3271–3276.
- Tholkappiyan, E. (2016). A Preliminary Study for Improving the Banana Fibre Fineness using Various Chemical Treatments. *Global Journal of Researches in Engineering: J General Engineering*, 16, 22–29.
- Threepopnatkul, P., Kaerkitcha, N., & Athipongarporn, N. (2008). Polycarbonate with pineapple leaf fiber to produce functional composites. *Advances in Materials Research*, 47, 674–677.

- Tomlinson, P.B. (2006). The uniqueness of palms. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 151, 5–14.
- Trujillo, E., Moesen, M., Osorio, L., Van Vuure, A., W., Ivens, J., & Verpoest, I. (2014). Bamboo fibres for reinforcement in composite materials: Strength Weibull analysis. *Composites: Part A*, 61, 115–125.
- Tsegaye, A., & Struik, P. (2000). Influence of repetitive transplanting and leaf pruning on dry matter and food production of enset (*Ensete ventricosum* Welw. (Cheesman)). *Field Crops Research*, 68, 61–74.
- Valadez, G.A., Cervantes, J.M., Olayo, R., Herrera, P.J. (1999). 2. Chemical modification of henequen fibres with an organosilane coupling agent. *Composites Part B: Engineering*, 30, 321–333.
- van Voorn, B., Smit, H.H.G., Sinke, R.J., & de Klerk, B. (2001). Natural fibre reinforced sheet moulding compound, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 32, 1271–1279.
- Vincent, J.F.V. (2000). A unified nomenclature for plant fibres for industrial use. *Applied Composite Materials*, 7, 269–271.
- Wambua, P., Ivens, J., & Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology*, 63, 1259–1264.
- Wang, B., Panigrahi, S., Tabil, L., & Crerar, W. (2007). Pre-treatment of flax fibres for use in rotationally molded biocomposites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 26, 447–463.
- Wang, J., Fang, X.M., Mujumdar, A. S., Qian, J.Y., Zhang, Q., Yang, X.H., Liu, Y.H., Gao, Z. J., & Xiao, H.W. (2017). Effect of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) on drying and quality of red pepper (*Capsicum annuum* L.). *Food Chemistry*, 220, 145–152.

- Xia, Z.P., Yu, J.Y., Cheng, L.D., Liu, L.F. and Wang, W.M. (2009) Study on the breaking strength of jute fibres using modified Weibull distribution. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40, 54–59.
- Xiao, H.W., Pang, C.L., Wang, L.H., Bai, J.W., Yang, W.X., & Gao, Z.J. (2010). Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer. *Biosystem Engineering*, 105, 233–240.
- Yemataw, Z., Mohamed, H., & Yeshitla, M. (2013). Assessment of phenotypic variability in Enset (*Ensete ventricosum* (Welw.) Cheesman) accessions using multivariate analysis. *International Journal of Natural Sciences Research*, 7, 50 – 59.
- Zhai, S., Li, D., Pan, B., Sugiyama, & Itoh, T. (2012). Tensile strength of windmill palm (*Trachycarpus fortunei*) fiber bundles and its structural implications. *Journal of Material Science*, 47, 949 – 959.
- Zoran, S.P., Guo, A., Javni, I., & Zhang, W. (2004). *Plastics and composites from soybean oil, Natural Fibres, Plastics and Composites*, Kluwer Academic Publishers, New York.