

Petra Gašparič, Zala Urisk, Andreja Križanec, Marko Munda,
Silvo Hribernik, Manja Kurečič, Tatjana Kreže, Majda Sfligoj Smole
Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Oddelek za tekstilne materiale in oblikovanje

Naravno obnovljiva rastlinska tekstilna vlakna *Sustainable Plant Textile Fibres*

Pregledni znanstveni članek/*Scientific Review*

Prispelo/*Received* 08–2012 • Sprejeto/*Accepted* 11–2012

Izvleček

Zaradi čedalje globlje ekološke ozaveščenosti in okoljevarstvenih zahtev obravnavamo v sodobnem času izdelavo, uporabo in odstranjevanje materialov veliko bolj kritično. Naravna celulozna vlakna so v tem pogledu izkazala svojo kakovost in popolnoma izpolnila vse ekološke kriterije. Naravna celulozna vlakna uporabljamo za tekstilne in tekstilnotehnične namene. To so vlakna iz ličja stebel, ki tvorijo vlaknate snopiče v notranjem ličju stebel dvokaličnic, in listna vlakna, ki tečejo po dolžini listov enokaličnic, ter semenska vlakna in vlakna iz plodov. Lan, konopljo, juto, ramijo, sisal ter kokos uporabljamo predvsem za tehnične namene.

V zadnjem času pa izjemno narašča zanimanje za obnovljive surovinske vire tudi na področju vlaken. V ospredju so vlakna rastlinskega izvora. Pri iskanju novih surovinskih virov se proučujejo številne rastline, ki ne spadajo med tradicionalne vire vlaken, da bi iz njihovih stebel ali listov izolirali vlakna uporabnih lastnosti.

Pri izolaciji vlaken pridobimo tehnična vlakna, kar pomeni, da so celulozna vlakna večcelične strukture, pri katerih so posamezne celice vezane v snopiče. Poleg konvencionalnih načinov izolacije vlaken se uporabljajo tudi številni sodobni postopki, kot so biotehnološki z uporabo encimov, itd. Način, kako vlakna izoliramo, vpliva na površinsko morfologijo vlaken. V prispevku so predstavljena nekatera vlakna, ki jih pridobivamo iz kmetijskih odpadkov, kot so slama žitaric, listi ananasa, sladkorni trs, hmeljeva stebela, kinoa, vlakna iz različnih trav itd.

Ključne besede: rastlinska vlakna, naravno obnovljiva vlakna, netradicionalna vlakna

Abstract

The manufacture, use and removal of traditional materials are now considered more critical due to increasing environmental consciousness and the demands of legislative authorities. Natural cellulose fibres have successfully proven their qualities when also taking into account an ecological view of fibre materials. Different cellulose fibres can be used for textile and technical applications, e.g. the bast or stem fibres which form fibrous bundles in the inner bark (phloem or bast) of the stems of dicotyledenous plants, the leaf fibres which run lengthwise through the leaves of monocotyledenous plants, and the fibres of seeds and fruits. Flax, hemp, jute, ramie, sisal and coir are mainly used for technical purposes.

Recently, the interest in renewable resources for fibres particularly of plant origin has increased. Therefore, several non-traditional plants are being studied with the aim to isolate fibres from plant leaves or stems.

A review of some untraditional fibres is given in the paper. Technical fibres are mainly obtained with fibre isolation, which means that cellulose fibres are multicellular structures with individual cells bound into fibre bundles. Different retting processes can be performed in both acid and alkaline mediums, respectively, and with an enzymatic treatment. The used procedure influences the fibre surface morphology.

Some biofibres from agricultural by-products, e.g. wheat straw, pineapple leaves, sugarcane bagasse, hop stems, Musaceae plants, quinoa etc are introduced. In addition, the fibres from different grass and legume species and from sea grass are presented in the article.

Keywords: plant fibres, sustainable fibres, untraditional fibres

Odgovorna avtorica/Corresponding author:

Dr. Majda Sfligoj Smole

Tel.: +386 2 220 7883

e-pošta:majda.sfligoj@uni-mb.si

Tekstilec, 2012, letn. 55, št. 4, str. 302–313

1 Uvod

V zadnjem času postaja čedalje pomembnejša uporaba različnih naravno obnovljivih vlaken s poudarkom na ekološki ozaveščenosti in iskanju alternativnih virov surovin kot nadomestilo omejenim fosilnim virom. Kriterij naravne obnovljivosti zadovoljujejo tista vlakna, ki vključujejo popolnoma obnovljive snovi (surovine, kemikalije ...) v svojo proizvodnjo, pri izdelavi in predelavi pa ne trošijo energije na osnovi fosilnih virov. Tako materiali izpolnjujejo doktrino trajnostnega razvoja.

Od leta 1980 se trajnostni razvoj (*sustainability*) povezuje z ohranjanjem človeštva na Zemlji, kar se odraža v najbolj razširjeni definiciji trajnostnega razvoja Združenih narodov iz leta 1987: »Trajnostni razvoj je razvoj, ki sledi zahtevam sedanjosti, ne da bi posegal v možnosti prihodnjih generacij, da bi zadovoljile svoje lastne potrebe in želje.« Ključno orodje za oceno naravne obnovljivosti izdelka je njegova ocena življenjskega cikla LCA (*Life Cycle Assessment*). Analiza zapisa LCA pomeni ocenitev vseh vhodnih in izhodnih snovi pri izdelavi in uporabi določenega proizvoda in se navadno izvaja na principu od zibelke do groba, pri tem pa je ključna prednost LCA možnost primerjalne presoje ustreznosti izdelka z drugimi konkurenčnimi proizvodi na trgu, omogoča pa tudi analizo morebitnih izboljšav.

Kadar izhajamo iz določil trajnostnega razvoja, so naravna celulozna vlakna v veliki meri dokazala svojo kakovost. Mednje spadajo vlakna iz ličja oz. stebelna vlakna, ki izvirajo iz snopov sklerenhimnih celic med primarnim in sekundarnim ličjem stebel dvokaličnic, listna vlakna, ki tečejo po dolžini listov enokaličnic, in semenska ter sadežna vlakna. Vlaknate sklerenhimne celice s celulozo bogato sekundarno steno dajejo tradicionalna vlakna, kot so juta, konoplja, lan, ramija, kenaf in podobni.

Ostri okoljevarstveni zakoni pa so le eden od vzrokov, da predvsem evropske države in ZDA razvijajo novo biotekstilno industrijo, oprto na kmetijstvo, biogoriva in biotehnologijo. Poznamo kar nekaj vrst naravno obnovljivih (polisaharidnih) virov netradicionalnih vlaken, ki so pretežno stranski proizvodi v kmetijstvu. To so pšenična slama, ananasovo listje, stebela sladkornega trsa, morske trave, koprive in podobno. Kot alternativni vir celuloze lahko uporabimo stranske proizvode pri pridelavi koruze, pšenice, riža, soje in drugih kmetijskih pridelkov.

2 Celulozna vlakna

Razen bombaža in kapoka tvorijo vsa celulozna vlakna skupki posameznih elementarnih celic. Rastlinska vlakna so ozke podolgovate sklerenhimne celice z odebeljeno sekundarno steno, ki jo sestavlja pretežno celuloza. V rastlinah tvorijo prevodna tkiva in dajejo mehansko oporo rastlini.

Vse rastlinske celice vsebujejo primarno celično steno. Na njej se navznoter med dozorevanjem rastline oblikuje sekundarna celična stena iz celuloznih fibrilov. Sekundarna celična stena nastaja z zaporednim nalaganjem plasti celuloznih fibrilov in jo lahko razdelimo v tri plasti (S1, S2 in S3). Za mehanske lastnosti vlaken je najpomembnejša srednja plast, ki je sestavljena iz vijačno oblikovanih celuloznih fibrilov. Pomemben parameter strukture sekundarne celične stene je kot, ki ga celulozni mikrofibrili tvorijo z osjo vlakna. Mikrofibrilarni kot je značilnost vrste vlaken, poleg tega pa je različen tudi v posamezni plasti sekundarne stene. Z oblikovanjem odebeljene sekundarne celične stene se lumen v notranjosti vlakna postopno zmanjšuje.

Celične stene niso homogena plast, temveč so kompozit, ki ga sestavljajo celulozni fibrili, vloženi v matriks lignina in hemiceluloz. Delež celuloze, hemiceluloz in lignina se v vlaknih razlikuje v odvisnosti od vrste rastline, izvora vlaken, kakovosti in razmer med rastjo.

Najpogostejše rastlinske vrste, ki se uporabljajo za pridobivanje vlaken, so iz razreda enokaličnic (*Monocotyledones*) in dvokaličnic (*Dicotyledones*), ki se uvrščajo med kritosemenke. Poleg tradicionalnih celuloznih vlaken, kot so bombaž, kapok, lan, konoplja, juta, ramija, kenaf, itd., so v zadnjem času znova v središču pozornosti različni netradicionalni viri, kot so bambus, žitna slama in sladkorni trs. Uporaba različnih netradicionalnih vlaken je bila poleg tradicionalnih lignoceluloznih vlaken v obdobju pred razvojem sintetičnih vlaken zelo razširjena. Izčrpen opis teh vlaken podajata F. Kočevar [32] in D. Kimovec [33].

Obetavne neolesenele rastlinske vrste za pridobivanje vlaken so tudi trave in druge enokaličnice, ki jih najdemo na travnikih. Te netradicionalne rastlinske vrste se trenutno uporabljajo pretežno za pridobivanje celulozne staničnine za tekstilna vlakna in proizvodnjo papirja ter za pripravo kompozitnih materialov. Poleg tega se raziskujejo tudi možnosti za uporabo drugih virov, kot je npr. hmelj.

2.1 Tradicionalna vlakna

To so vlakna, pridobljena iz tradicionalnih virov, kot so bombaževca, lan, konoplja, kenaf, abaka, sisal, juta, ramija in drugi. Njihova uporaba sega v prve začetke razvoja človeške civilizacije. Čeprav vlakna izvirajo iz različnih delov različnih rastlin, pa jih povezujejo podobne lastnosti. Ponašajo se z visoko stopnjo hidrofilnosti in visoko pretržno trdnostjo, vendar imajo nizko raztegljivost in elastičnost.

Bombažna vlakna (*Gossypium*) pridobivajo iz semenskih mešičkov grma bombaževca. Vlakna vsebujejo 95 % celuloze, 2 % hemiceluloz, 1 % lignina in 0,4 % ekstraktov [1]. Dolga so do 50 milimetrov, debela od 20 do 30 μm [2]. Barva vlakna sega od bele, rumene do sivkaste. Največ bombaža, kar 80 % vsega svetovnega pridelka, gojijo v ZDA, Rusiji, Južni Ameriki, na Kitajskem, v Indiji in Egiptu [3].

Lan (*Linum usitatissimum*) spada med vlakna iz ličja. Vlakna vsebujejo 71 % celuloze, 21 % hemiceluloz, 2 % lignina in 6 % ekstraktov [1]. Elementarna vlakna so daljša, med 20 in 70 mm, debela pa od 10 do 30 μm [4]. Vlakna so toga, ponašajo se z izjemno trdnostjo, ki v mokrem še naraste. So sive ali svetlo rjave barve. Pod mikroskopom opazujemo tehnična vlakna, ki so večcelična vlakna, sestavljena iz 10 do 50 elementarnih vlaken, ki imajo premer okrog 15 μm [4]. Elementarna vlakna so zlepljena med seboj s srednjimi lamelami iz pektinskih snovi. Na vlaknih opazimo vzdolžne črte in prečne premaknitve oziroma brazde. Prečni prerez elementarnih vlaken je navadno šesterokoten [5].

Tudi konoplja (*Cannabis sativa*) spada med vlakna iz ličja z visoko vsebnostjo celuloze, (70 %), hemiceluloz (21 %) in lignina (2 %) [1]. Tehnična vlakna so dolga od 100 do 200 cm [2] in debela od 4 do 8 mm, medtem ko so elementarna vlakna dolga od 4 do 10 mm. Tehnična vlakna sestavlja od 10 do 40 elementarnih vlaken mnogokotne in nepravilne oblike prečnega prereza. Vlakna so temne barve.

Juta (*Corchorus olitorius* ali *Corchorus capsularis*) prav tako spada med vlakna iz ličja in vsebuje 71 % celuloze, 14 % hemiceluloz, 13 % lignina in 2 % ekstraktov [1]. Rastlino gojijo predvsem v Bangladešu in Indiji. Tehnična vlakna so bele do rjave barve in dolga od 1 do 4 m. Nahajajo se v zunanjem ovoju stebela rastline.

Med tradicionalna celulozna vlakna prištevamo še ramijo (*Boehmeria nivea*), kenaf (*Hibiscus cannabinus*) in abako (*Musa textilis*). Ramija je zelnata trajnica. Vlakna ramije, ki so ena najstarejših vlaken, so dolga

od 20 do 40 mm [2]. Vsebujejo 76 % celuloze, 17 % hemiceluloz, 1 % lignina in 6 % ekstraktov [1]. Za izolacijo vlaken oz. degumiranje je potrebna kemična goditev. Največ ramije gojijo na Kitajskem. Spada med vlakna z najboljšimi pretržnimi lastnostmi, ki se v mokrem še izboljšajo. Po hidrofilnosti, gostoti in mikroskopski strukturi so vlakna podobna lanu.

Kenaf ima podobne lastnosti kot juta. Vlakna se nahajajo v stebelu rastline. Elementarna vlakna so dolga od 0,15 do 6 mm [2]. Vsebujejo 36 % celuloze, 21 % hemiceluloz, 18 % lignina in 2 % ekstraktov [1]. Rastlino gojijo v glavnem v Indiji, Bangladešu, ZDA, Indoneziji, Maleziji, Južni Afriki, Vietnamu, na Tajskem in v nekaterih predelih Afrike. V steblih rastline se nahajata dva tipa vlaken, groba vlakna v zunanji plasti in finejša v notranjem delu stebela.

Abako gojijo predvsem na Filipinih, v Ekvadorju in Kostariki. Spada med stebelna in trda vlakna, tako kot kokos ali sisal. Tehnična vlakna so groba in dolga od 2 do 3 m [2].

2.2 Netradicionalna celulozna vlakna

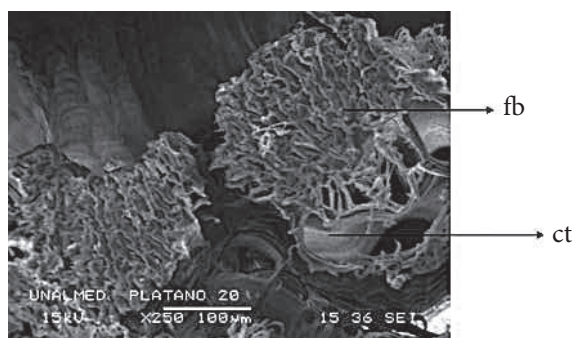
Kmetijski odpadki iz lignoceluloznih celic, ki jih najdemo v olesenelih rastlinah za ojačitev rastlin, so obetaven in donosen vir celuloznih vlaken. Zaradi kemijskih in fizikalnih lastnosti, kemijske sestave, biorazgradljivosti in naravne obnovljivosti so ta vlakna potencial za tekstilno in papirno industrijo. Odpadki enoletnih obnovljivih rastlin, kot so kuzuza, žito, riž, ječmen, sladkorni trs, ananas, banana itd., so odlična surovinska baza. Nekatere od teh rastlin so bile že v preteklosti uporaben vir vlaken, čeprav je bil njihov pomen pogosto le lokalni, danes pa v iskanju novih možnosti trajnostnega razvoja znova pridobivajo na pomenu.

2.2.1 Vlakna iz bananovca

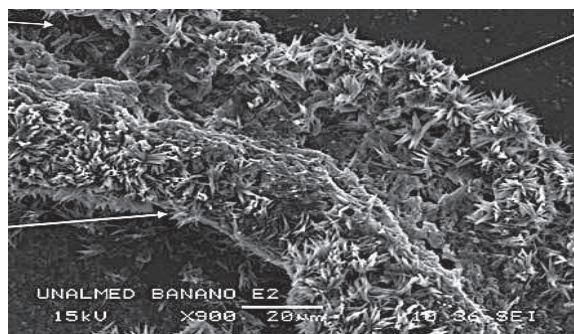
Med vlakna, ki so odpadki pri kmetijski predelavi, spadajo vlakna iz bananovca (*Musaceae*). Bananovci so majhna družina 40 vrst v dveh rodovih (*Musa* in *Ensete*), ki rastejo predvsem v vlažnih tropskih nižinah. Gojijo jih v glavnem zaradi sadežev banan in zaradi vlaken, manile, ki se uporabljajo za izdelavo vrvi. Bananovci so družina nelesenelih rastlin. So zelnate rastline z debelimi stebli. Listi, ki so zelo veliki, v spiralnem redu oplaščajo steblo. V Kolumbiji, kjer je najbolj razširjena pridelava te kulture, na leto proizvedejo več kot štiri milijone ton kmetijskih odpadkov pri gojenju bananovca za proizvodnjo hrane [6, 7].

Pridobivanje vlaken poteka s postopkom biološke goditve, elementarna vlakna pa izolirajo z alkalno obdelavo. Raziskovalci so odkrili dva različna tipa vlaknatih struktur (slika 1). Na mikroskopski ravni vlaknate celice tvorijo prevodna tkiva, snopi vlaken in elementarna vlakna, na nanoravni pa so celulozni mikrofibrili povezani v mikrofibrilarne snope. Premer elementarnih vlaken je od 10 do 20 μm , medtem ko je premer mikrofibrilarnih snopov od 40 do 60 nm in celuloznih mikrofibrilov od 5 do 10 nm [8]. Posebnost vlaken iz bananovca je prisotnost kristalnih struktur kalcijevih oksalatov na površini vlaken (slika 2).

Vlakna vsebujejo okrog 50 % celuloze z indeksom kristaliničnosti 39 % in okrog 17 % lignina. Sorpcijske lastnosti vlaken so zelo podobne lastnostim bombaža (8,5 %) [9].



Slika 1: Prerez zrelega stebela bananovca; fb – skupki vlaken, ct – prevodno tkivo [6] (z dovoljenjem avtorjev)

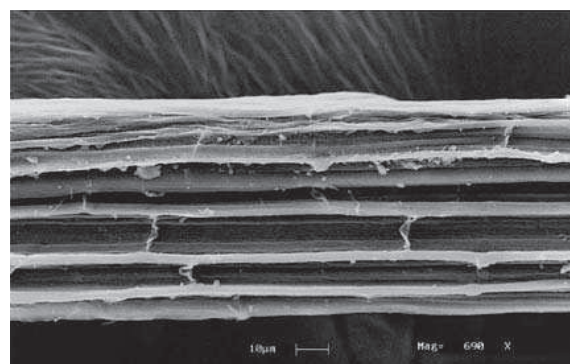


Slika 2: Kristali na površini snopov vlaken [6] (z dovoljenjem avtorjev)

2.2.2 Vlakna iz ananasovega listja

Ananas (*Anannus Comosus*) je zelnata trajnica, ki zraste do 1,5 metra visoko. Ima kratko, čokato steblo in debele, voščene liste. Vlakna se nahajajo v listih. Izolirajo jih z goditvijo v vodi, nato liste razrežejo in

iz njih izluščijo vlakna. Mogoča je tudi biološka goditev. Vlakna vsebujejo 70–82 % celuloze, 5–12 % lignina in 1,1 % pepela [12]. Stopnja kristaliničnosti celuloze v vlaknih je visoka. Povprečna debelina vlaken je med 45 in 205 μm , debelina vlakna pa se vzdolž vlakna spreminja (slika 3) [12]. Vlakna imajo nepravilno obliko prečnega prereza. Gostota vlaken je 1,32 g/cm^3 [13]. Celične stene vlaken so tanke [14]. Razlike v obliki vlakna in premeru lumna močno vplivajo na gostoto vlaken in na mehanske lastnosti [13].



Slika 3: SEM-posnetek vlaken iz stebel ananasovca [14] (z dovoljenjem avtorjev)

Vlakna se uporabljajo predvsem v dekorativne namene in za izolacijo. Že dolgo se uporabljajo na Filipinih, kjer jih ročno izolirajo iz ananasovih listov in iz njih tkejo svetlikajoče se, lahke tkanine z mehkim padom. Za uporabo v oblačilni industriji jih mešajo z drugimi vlakni, kot so svila, poliester ali druga.

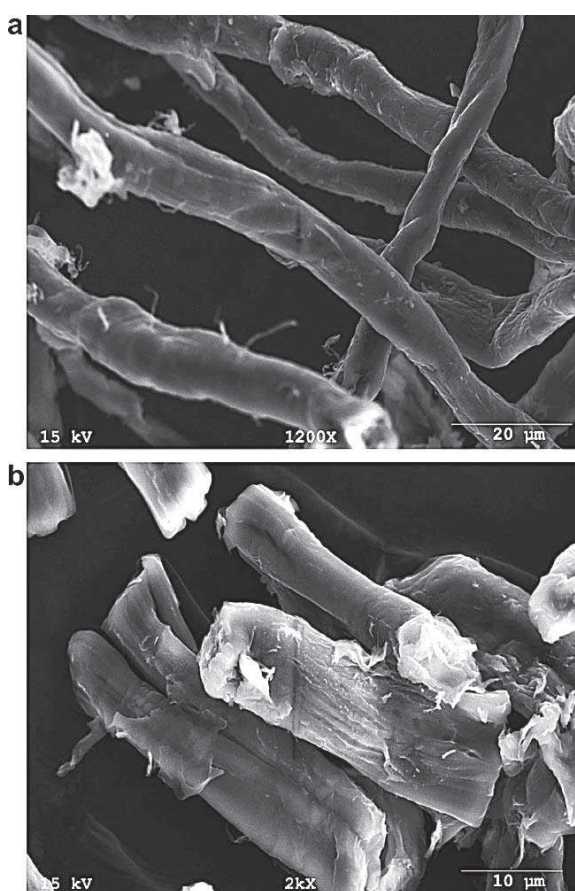
Vlakna pridobivajo še iz listov agav (družina *amaryllidaceae*), ki imajo velike mesnate liste, dolge od 0,5 do 1 m, z vlakni, ki so primerna za sukance, vrvice itd. Henequen je vlakno *agave fourcroydes*, za izolacijo vlaken pa so primerne še *agava cantala*, *agava tequilana* in *agava americane*, ki izvirajo iz Mehike, zdaj pa so razširjene že tudi drugod. Poleg teh spadata v skupino listnih vlaken še konoplja mauritius (*Furcraea foetida*) in vlakno aloja (*Aloa perfoliata*) [33].

2.2.3 Vlakna iz slame žitaric

Slama žitaric je kmetijski stranski proizvod, to so posušena stebela ječmena, ovsa, riža, rži in pšenice po odstranitvi zrnja in plev. Uporablja se kot gorivo, za steljo za živino, izdelovanje košar in drugo, poleg tega se lahko uporablja za tekstilnotehnične izdelke. Predvsem so izolirana vlakna uporabna kot ojačitvena

komponenta v biokompozitih. Ker so pri oblikovanju kompozita pogosto izpostavljena visokim temperaturam, morajo imeti vlakna, ki jih uporabimo kot polnilo v kompozitu, dobre toplotne lastnosti. Za celulozna nanovlakna, pridobljena iz pšenične slame, je temperatura toplotne razgradnje nad 290 °C, kar je zelo koristna lastnost pri izdelavi ojačenih polimernih kompozitov [10].

Vlakna iz pšenične slame vsebujejo 43 % celuloze, 34 % hemiceluloz in 22 % lignina [10]. Povprečna debelina vlaken je 10–15 μm, povprečna debelina snopov vlaken pa znaša 25–125 μm [10]. Slika 4 kaže celulozna vlakna z gladko površino iz pšenične slame.

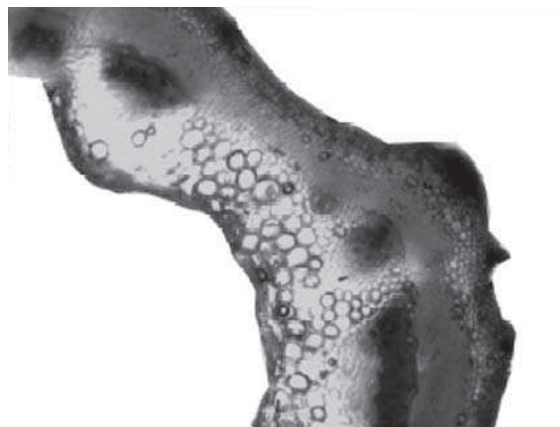


Slika 4: SEM-posnetek vlaken iz pšenične slame [10] (z dovoljenjem avtorjev)

2.2.4 Vlakna iz kopriv

Kopriva (*Urtica dioica* L.) je že dolgo znana in uporabna rastlina za pridobivanje vlaken. Tekstilije iz koprive so uporabljali že v bronasti dobi, pa vse do 17. stoletja, ko so jih zamenjali bombažni materiali. Znova so vlakna pridobila na pomenu med prvo

svetovno vojno v Nemčiji, ko je bilo občutiti pomanjkanje bombaža. V zadnjem času so koprive zanimive kot eden alternativnih virov za pridobivanje celuloznih vlaken. Kopriva je dvodomna rastlina z ostro nazobčanimi listi in bodečimi dlačicami. Zelo je razširjena na območjih z zmernim podnebjem. Vlakna iz koprive so mehka in odporna na zunanje vplive, imajo boljše mehanske lastnosti kot bombažna vlakna, vendar slabše kot lan [33] in so finejša od vlaken konoplje [11]. Elementarna vlakna iz koprive so bele barve, svilnata in dolga do 50 mm [11]. Sklerenhimne vlaknate celice se nahajajo v snopih v stebelu rastline in kot tehnična vlakna dosežejo dolžino do 90 cm in širino 40–125 μm. Prerez celic je mnogokotnik z zaokroženimi robovi, vlakna pa so večkrat zavita [33]. Na sliki 5, ki prikazuje prerez stebela koprive, so snopi vlaken dobro vidni. Steblo je na sredini votlo. Posebnost koprive je v tem, da je zelo uporabna rastlina v sistemu integriranega kmetijstva, ki je zasnovan tako, da ne proizvaja odpadkov.



Slika 5: Prerez stebela koprive, [11] (z dovoljenjem avtorjev)

2.2.5 Žuka

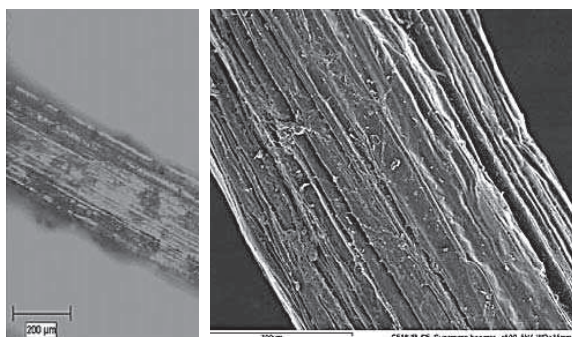
Žuka ali brnistra (*spartium junceum*) je večletni grm, ki uspeva samoniklo v sredozemskih državah. Posušena stebela vsebujejo 13–15 % tehničnih vlaken, ki dosežejo dolžino 5–12 cm in jih sestavljajo 3–16 mm dolge celice [33]. Vlakna, pridobljena iz gojenih rastlin, predejo sama ali v mešanicah z bombažem.

Vlakna pridobivajo še iz stebel kenafa, tropskih rastlin roselle (*hibiscus sabdariffa*), aramine (*urea lobata*), kitajske konoplje (*abutilon avicennae*), konoplje sun ali madras (*crotolaria juncea*), različnih svilnic

(*asclepias*), jerkuma (*calotropis gigantea*), kordije (*cordia latifolia*) itd. Tudi lipa (*tilia parvifolia*), vrba (*salix*) in murva (*morus*) dajejo vlakna za izdelavo grobih prej. Kendir (*apocynum sibiricum*) vsebuje 18–22 % vlaken poleg lateksa, ki ga uporabljajo za pridobivanje kavčuka. Elementarna vlakna so 12–18 mm dolga, njihova finost pa je 0,3 tex. [33].

2.2.6 Vlakna iz stebela sladkornega trsa

Sladkorni trs (*Saccharum officinarum*) je rastlina, katere steblo je robustno in vlaknato ter vsebuje zelo veliko sladkorja. V višino meri od 2 do 6 metrov. Za pridobivanje vlaken iz sladkornega trsa se uporabljajo rastlinski ostanki, ki so ostali pri proizvodnji sladkorja in etanola. To je najbolj množičen lignocelulozni ostanek v Braziliji. Leta 2006 so v Braziliji pridelali 127 milijonov ton odpadka sladkornega trsa in čeprav večino tega uporabijo kot biogoriva, je odpadek še vedno v presežku [15]. Zato so začeli raziskovati uporabo odpadkov sladkornega trsa za živalsko krmo, pridobivanje etanola, za papir, v živilski industriji in za vlakna. Vlaknati del sladkornega trsa sestavljajo tri glavne komponente, in sicer 30,3 % celuloze, 13 % lignina in 56,7 % hemiceluloze [16]. Povprečna debelina vlaken je okrog 400 μm [16] (slika 6).



Slika 6: Vzdolžni videz vlaken iz sladkornega trsa in SEM-posnetek vlaken iz sladkornega trsa [15,16] (z dovoljenjem avtorjev)

Na sliki 6 so dobro vidne morfološke značilnosti vlaken. Vlakna so večcelična, na njih pa so vidni ostanki neceluloznih snovi, ki vežejo vlakna z nevlaknatimi strukturami v stebelu.

Vlakna iz sladkornega trsa se pogosto uporabljajo kot vir celuloze za pridobivanje regeneriranih celuloznih vlaken. Za odstranitev lignina (delignifikacija), ki ga vlakna vsebujejo 13 %, se pogosto iščejo novi, okolju prijaznejši postopki.

2.2.7 Bambusova vlakna

Bambus (*Bambuseae*) je rastlina, ki raste na vseh celinah in spada v družino *Gramineae*, kamor uvrščamo tudi trave, žita, oves in koruzo. V višino lahko zraste tudi do 40 metrov. Uspeva predvsem na azijskem jugovzhodu ter v tropskem in subtropskem pasu (Kitajska, Malezija, Indonezija). Največ bambusa za predelavo v vlakna pridelata Kitajska.

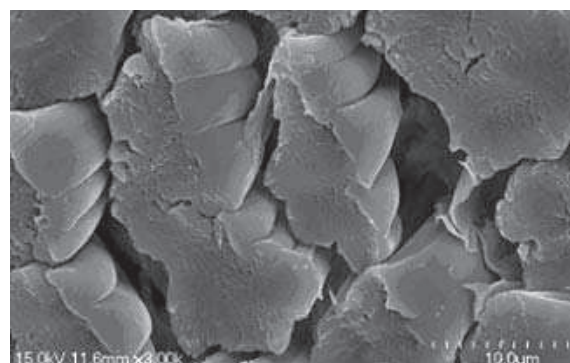
V vlaknih bambusa je več kot 70 % celuloze, hemiceluloz je 12,5 % in lignina 10,1 %. Zaradi lignina so vlakna groba [17].

Prerez elementarnega vlakna je okrogel z majhnim zaokroženim lumnom v sredini vlakna. Širina vlakna je 6–12 μm in dolžina 2–3 mm. [17]

V sekundarni steni vlakna so raziskovalci našli skoraj osno orientirane celulozne fibrile. Takšna fibrilarna ureditev maksimira vzdolžni modul elastičnosti vlaken, medtem ko lignifikacija vlaken poveča prečno togost. [17]

Celulozne celice bambusa najpogosteje uporabljajo za pridobivanje celuloze za proizvodnjo regeneriranih celuloznih vlaken. Celulozo za regenerirana celulozna vlakna pridobivajo iz tri do štiri leta starih rastlin, ki imajo najprimernejše lastnosti. Postopek izdelave ne onesnažuje okolja, vlakna pa so biorazgradljiva. Poudariti je treba še, da je pridelava bambusa okolju prijazna, saj ga ne napadajo nobeni škodljivci in tako ni potrebna uporaba pesticidov.

Posebnost bambusa je njegova naravna antibakterijska odpornost, ki se ohrani tudi pri izdelavi regeneriranih celuloznih vlaken. Regenerirana celulozna vlakna iz bambusove celuloze so tudi regulatorji toplote in fiziološko udoben material, ki omogoča vpijanje vlage in zračno prepustnost ter imajo dobre sorpcijske lastnosti. Prerez regeneriranih celuloznih vlaken iz bambusove celuloze kaže slika 7.



Slika 7: SEM-posnetek regeneriranih celuloznih vlaken iz bambusove celuloze [18] (z dovoljenjem avtorjev)

Mehanske lastnosti bambusovih vlaken so primerljive z lastnostmi konvencionalnih regeneriranih vlaken z nižjimi pretrznimi lastnostmi v mokrem.

2.2.8 Vlakna iz koruze

Masovni in obnovljivi kmetijski odpadki so tudi koruzna slama (*Zea mays* L.), ki je kombinacija koruznih stebel in listov in ki jo lahko načrtujemo kot poceni vir energije in kemikalij. Že od leta 1929 pa vlakna iz koruze proučujejo in uporabljajo za izdelavo staničnine v papirništvu [19].

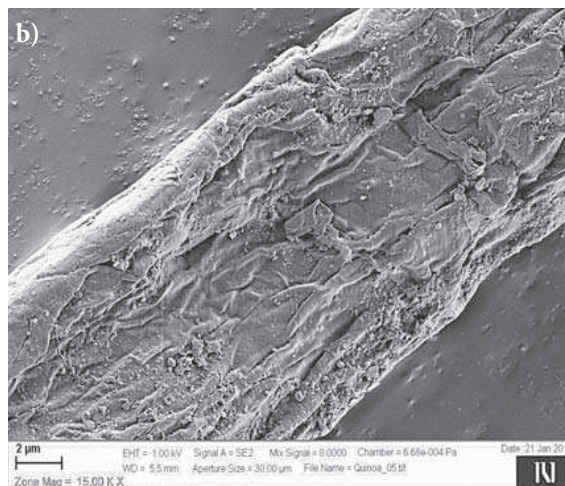
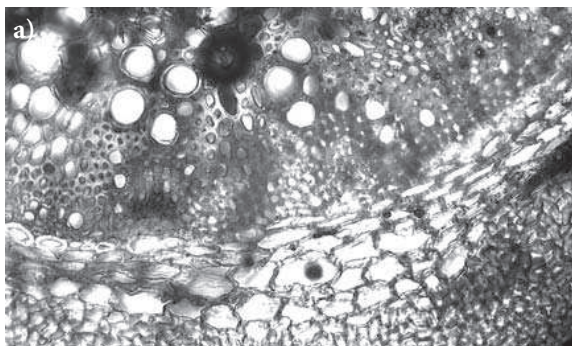
Vlakna, ki jih izoliramo iz stebel koruze, so iz posameznih celic, ki so medsebojno povezana v celične snopiče. Elementarna vlakna so dolga od 0,7 do 1,5 mm in imajo premer med 15 in 35 μm , kar je primerljivo z vlakni iz riževe ali pšenične slame. Vlakna vsebujejo 80 % celuloze, 8 % lignina in 8 % vlage. Ostanek so anorganske snovi in pektini. Celuloza se nahaja v kristalini obliki celuloze I, indeks kristaliničnosti je 52 %, mikrofibrilarni kot MFA pa okrog 11°. [19]

2.2.9 Vlakna iz stebel hmelja

Hmelj (*Humulus lupulus* L.) pripada družini *Cannabaceae* in rodu *cannabis*. Posamezne sklerenhimne celice v steblih hmelja so majhne. Dolžina celic je 2,0–3 mm in širina $16,5 \pm 5,5 \mu\text{m}$. Vlakna vsebujejo 84 % celuloze, 6 % lignina in 2 % pepela. Celuloza ima indeks kristaliničnosti okrog 44 % in MFA okrog 8°. Mehanske lastnosti vlaken so podobne mehanskim lastnostim vlaken konoplje, medtem ko so sorpcijske lastnosti vlaken primerljive z lastnostmi bombaža. [20]

2.2.10 Vlakna iz kinoe

Kinoa izvira iz Andov v Južni Ameriki in pripada družini *Chenopodiaceae* (*Chenopodium quinoa* Willd.). Rastline, ki uspevajo tudi drugod, pridelujejo zaradi užitnih semen, ki imajo pomembno prehransko vrednost in so čedalje bolj cenjene v kulinariki.



Slika 8: Prerez stebela kinoe (a) in SEM-posnetek izolirane vlakna (b)

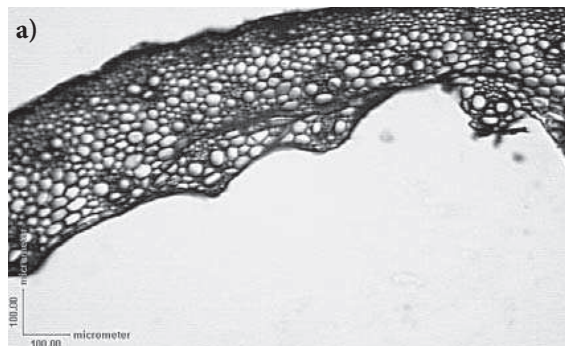
Vlakna je mogoče na kemijski ali biološki način izolirati iz stebel. Slika 8 kaže prerez stebela kinoe (a), v katerem so vidni skupki vlaken. Na sliki 8b so prikazane morfološke značilnosti vlaken. Na površini vlaknate celice so vidni ostanki pektinskih snovi, ki povezujejo posamezne celice v skupke.

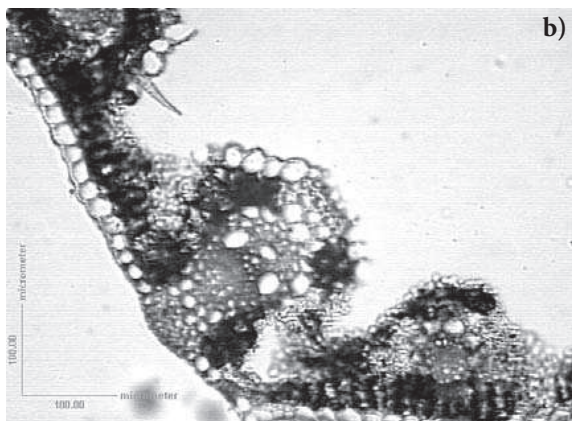
Finost izoliranih tehničnih vlaken je med 25 in 97 dtex, to je odvisno od postopka izolacije vlaken, njihov raztezek 1,4 % do 2,1 % in pretržna napetost med 14 in 32 cN/tex. Dobljene vrednosti so primerljive z mehanskimi lastnostmi nekaterih vlaken iz ličja, kot je npr. juta [21].

2.2.11 Vlakna iz trav

Različne trave so zaradi obsežnih količin, ki so na voljo, izjemen potencial. So enoletne rastline s skupki vlaknatih elementarnih celic, ki so medsebojno povezani s pektinskimi srednjimi lamelami.

Skupina trav ima številne predstavnike. Proučili smo vlakna iz ljujke (*Lolium perenne*), ki je ena pomembnejših vrst med travami. Slika 9 prikazuje





Slika 9: Del prereza stebela in lista trave

prerez stebela in prerez lista ljuljke. Delež vlaken v stebelu je 39,5 %. [22]

2.2.12 Vlakna iz morske trave

Poleg kopenskih rastlin tudi vodne ponujajo možnosti za pridobivanje vlaken oziroma celuloze. Morske trave (*Zostera Marina*) so cvetoče rastline, ki jih najdemo v večini oceanov, in edine cvetoče rastline, ki so se prilagodile na morsko okolje in stalno rast v plitkih vodah. Poznamo okrog 60 različnih vrst morske trave, *Zostera Marina* pa je med njimi najbolj razširjena vrsta na severni polobli (slika 10). Rastlina vsebuje vlakna z majhnim premerom

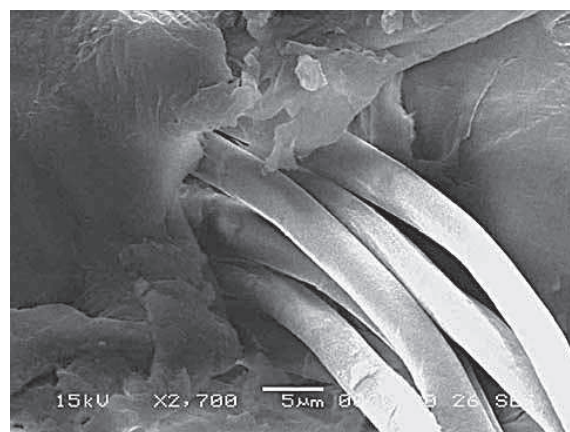


Slika 10: Morska trava, *Zostera Marina* [23] (z dovoljenjem avtorjev)

(okrog 5 μm). Je pomemben del morskega ekosistema, zato jo je prepovedano odstranjevati. V obdobjih po nevihtah pa je veliko naplavi na obalo, od koder jo je treba odstraniti, kar je njena uporabna možnost.

Naplavljenе rastline, ki jih poberejo z obale, posušijo ter mehansko izolirajo vlakna, saj postopek goditve brez poškodb vlaken še ni raziskan. Vlakna vsebujejo 57 % celuloze, 38 % neceluloznih polisaharidov (pretežno hemiceluloz) in 5 % preostalih snovi (lignin, itd.) [23]. Sestava celic je podobna sestavi celic kopenskih rastlin, ki so rasle v temi, kar je posledica razmer, v katerih morske trave rastejo.

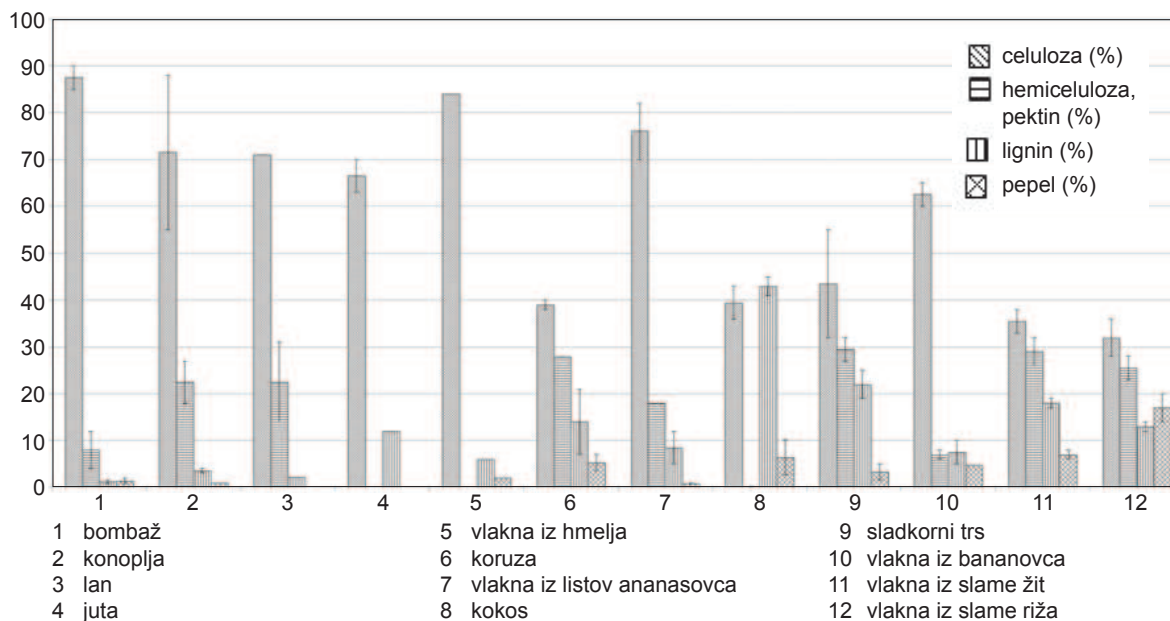
Rastline dosežejo dolžino od 1 do 2 m. Vlakna so večcelična in oblikovana iz snopov (slika 11). Oblika prečnega prereza vlaknatih celic je okrogla, premer pa med 4 in 5 μm . Vlakna sestavlja 57 % celuloze, 38 % neceluloznih polisaharidov (10 % pektin in 28 % hemiceluloze) in 5 % ostanka [23]. Zaradi odličnih mehanskih lastnosti vlaken (trdnost vlaken je 28 GPa) [46] in majhne gostote (1–1,5 g/m³) so perspektivno polnilo pri oblikovanju kompozitov, posebno tedaj, ko se zahteva biološka razgradljivost.



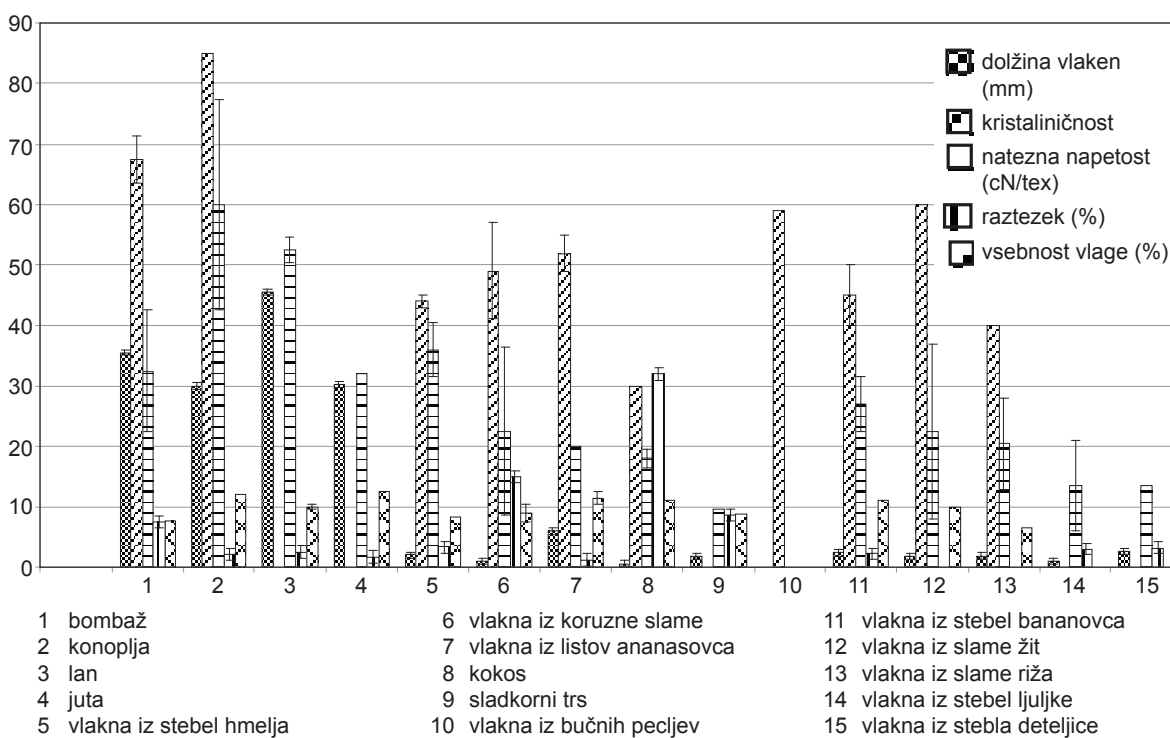
Slika 11: SEM-posnetek vlaken morske trave [23] (z dovoljenjem avtorjev)

3 Kemijska sestava in lastnosti lingoceluloznih vlaken

Kemijska sestava je odvisna od vrste in tipa vlaken, njihove zrelosti, izvora vlaken, razmer med rastjo in postopka izolacije. Na slikah 12 in 13 so zbrane lastnosti celuloznih vlaken različnega izvora in njihova kemijska sestava. [8, 9, 20, 22, 24–31]



Slika 12 : Kemijska sestava različnih rastlinskih vlaken



Slika 13: Lastnosti vlaken [8, 9, 20, 22, 24–31]

4 Uporaba lignoceluloznih vlaken

Glede na različne fizikalne lastnosti in vsebnost celuloze uporabljamo lignocelulozna vlakna za različne namene.

Značilna morfologija lignoceluloznih vlaken z lumom na sredini povečuje zvočno in toplotno izolacijsko sposobnost teh vlaken. Zato so vlakna primerna za pripravo kompozitnih materialov pri zvočni in toplotni izolaciji avtomobilov.

Poleg tega so vlakna uporabna v gradbeništvu. Slabosti nekaterih vlaken so njihov nizek modul elastičnosti, visoka sorpcijska sposobnost, razgradnja v alkalnem mediju, neodpornost na biološke vplive, spremenljive mehanske in fizikalne lastnosti. Vlakna konoplje z daljšo trajnostjo, kot jo imajo druga celulozna vlakna, so primernejša za takšno uporabo. V številnih raziskavah so dokazali uporabnost vlaken konoplje kot ojačitveno komponento pri gradbenih materialih na osnovi cementa [34].

Predvsem pa so lignocelulozna vlakna pomembna pri izdelavi kompozitov, kjer so ojačitvena komponenta v polimernem matriksu. Njihove prednosti so predvsem nizka cena, majhna gostota, dobre mehanske lastnosti in biološka razgradljivost [35]. Naravna vlakna prispevajo togost in trdnost in se zlahka reciklirajo.

Številni avtorji poročajo o kompozitih iz vlaken konoplje in polipropilena PP, polietilena PE, polistirena PS, poliestra itd. [36] in tudi biorazgradljivih polimerov (npr. polilaktidi PLA in drugi), [36].

Tudi številna druga naravna celulozna vlakna so (npr. vlakna iz sladkornega trsa, bambusova vlakna, vlakna bananovca itd.) primerna za pripravo kompozitov [37]. Tudi lignocelulozna vlakna iz *Helicteres isora* so uporabili pri pripravi kompozitov. Joshy s sodelavci je proučil vpliv predobdelave vlaken na lastnosti kompozita in potrdil, da predobdelava vpliva na količino vlaken v kompozitu, potrebnih za doseganje optimalnih lastnosti kompozita [38].

Netradicionalna rastlinska vlakna z dovolj visoko vsebnostjo celuloze uspešno nadomeščajo lesno staničnino v proizvodnji papirja in regeneriranih celulozних vlaken [39], [30].

V zadnjem času so veliko pozornosti ne le v raziskovalnih krogih, ampak tudi v industriji, pritegnila celulozna nanovlakna in nanokristali. S hidrolitično razgradnjo pri nadzorovanih pogojih se amorfna področja v celulozних vlaknih razgradijo, medtem ko ostanejo kristalina področja nepoškodovana in tvorijo kristaline nanodelce [40]. Dolžina nanokristalov je okrog 200 nm in premer okrog 3–5 nm [41]. Celulozne nanomateriale pridobivamo iz različnih virov, kot so na primer les in različne enoletne rastline, kot so listi ananasa, bananovca [40], lubje murve itd. [42].

5 Sklep

Lignocelulozna vlakna imajo dolgo tradicijo v proizvodnji tekstilij. Predvsem so pomembna za izdelavo

tehničnih tekstilij. V današnjem času njihov pomen znova narašča, poudarjajo se predvsem prednosti teh vlaken, kot so naravna obnovljivost, biorazgradljivost in nizka cena.

Izjemne možnosti ponujajo predvsem vlakna, ki jih izoliramo iz različnih kmetijskih odpadkov, saj v tem primeru ne posegamo v izrabo kmetijskih površin, ki bi jih uporabili za pridelavo hrane.

Njihova uporabnost je na področju priprave različnih tekstilnotehničnih proizvodov, na primer izolacij, ali kot polnila v kompozitih, v veliki meri pa tudi kot vir celuloze v papirništvu in proizvodnji regeneriranih celulozних vlaken.

6 Literatura

1. KLEMM, D., SCHMAUDER, H.-P., HEINZE, T. Cellulose. *Biopolymers online*, 2005, p. 275–312.
2. GOWDA, B. *Economic botany. Fibres, Rubber, Firewood, Timber and Bamboo*. Bangalore : Department of Botany, University of Agricultural Sciences Hebbal, 2000.
3. PROTO, M., SUPINO, S., MALANDRINO, O. Cotton: a flow cycle to exploit. *Industrial crops and products*, 2000, vol. 11, p. 173–178.
4. HAGSTRAND, P.-O., OKSMAN, K. Mechanical properties and morphology of flax fiber reinforced melamine-formaldehyde composites. *Polymer Composites*, 2001, vol. 22 (4), p. 568–578.
5. COOK, J. G. *Handbook of Textile Fibres*. Natural Fibres: Mellow Publishing, 1993.
6. ZULUAGA, R., PUTAUX, J. L., CRUZ, J., VELEZ, J., MONDRAGON, I., GANAN, P. Cellulose microfibrils from banana rachis: Effect of alkaline treatments on structural and morphological features. *Cellulose*, 2008, vol. 15, p. 131–139.
7. MUKHOPADHYAY, S., FANGUEIRO, R., ARPAC, Y., ŞENTÜRK, Ü. Banana fibers – variability and fracture behaviour. *Journal of engineered fibers and fabrics*, 2008, vol. 3, p. 39–45.
8. GAÑÁN, P., ZULUAGA, R., CRUZ, J., VELEZ, J. M., RETEGI, A., MONDRAGON, I. Elucidation of the fibrous structure of Musaceae mature rachis. *Cellulose*, 2008, vol. 15, p. 131–139.
9. GUIMARÃES, J. L., FROLLINI, E., DA SILVA, C. G., WYPYCH, F., SATYANARAYANA, K. G. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crops and Products*, 2009, vol. 30, p. 407–415.

10. ALEMDAR, A., SAIN, M. Isolation and characterization of nanofibers from agricultural residues – wheat straw and soy hulls. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99, p. 1664–1671.
11. PINELLI, P., IERI, F., VIGNOLINI, P., BACCI, L., BARONTI, S., ROMANI, A. Extraction and HPLC analysis of phenolic compounds in leaves, stalks, and textile fibers of *Urtica dioica* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, vol. 56, p. 9127–9132.
12. MUKHERJEE, P. S., SATVANARAVANA, K. G. Structure and properties of some vegetable fibres, part 2, Pineapple fibre (*Anannus Comosus*). *Journal of Materials Science*, 1986, vol. 21, p. 51–56.
13. MUNAWAR, S. S., UMEMURA, K., KAWAI, S. Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven non-wood plant fiber bundles. *The Japan Wood Research Society*, 2007, vol. 53, p. 108–113.
14. LUO, S. NETRAVALI, AN. Interfacial and mechanical properties of environment-friendly »green« composites made from pineapple fibers and poly(hydroxybutyrate-co-valerate) resin. *Journal of Materials Science*, 1999, vol. 34, p. 3709–3719.
15. RUZENE, D. S., SILVA D. P., VICENTE, A. A., TEIXEIRA, J. A., PESSOA DE AMORIM, M. T., GONÇALVES A. R. Cellulosic films obtained from the treatment of sugarcane bagasse fibers with N-methylmorpholine-N-oxide (NMMO). *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2009, vol. 154, p. 217–226.
16. JÚSTIZ-SMITH, N. G., VIRGO, G. J., BUCHANAN, V. E. Potential of Jamaican banana, coconut coir and bagasse fibres as composite materials. *Materials Characterization*, 2008, vol. 59, p. 1273–1278.
17. WANG, X., REN, H., ZHANG, B., FEI, B., BURGERT, I. Cell wall structure and formation of maturing fibres of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) increase buckling resistance. *J. R. Soc. Interface*, 2012, vol. 9 (70), p. 988–996.
18. JIANHUI, Y., XUHONG, G. J. Y. Effect of Alkali Treatment on Microstructure of Regenerated Bamboo Fiber. *China Textile Science*, 2011 (1), p. 22–25.
19. LI, Z.Y., ZHAI, H. M. ZHANG, Y., YU, L. Cell morphology and chemical characteristics of corn stover fractions. *Industrial Crops and Products*, 2012, vol. 37 (1), p. 130–136.
20. REDDY, N., YANG, Y. Properties of natural cellulose fibers from hop stems. *Carbohydrate Polymers*, 2009, vol. 77, p. 898–902.
21. SFILIGOJ-SMOLE, M. KREŽE, T. HRIBERNIK, S. KUREČIČ, M. STANA-KLEINSCHEK, K. Properties of Quinoa fibres; in preparation
22. SFILIGOJ-SMOLE M., KREŽE, T., STRNAD, S., STANA-KLEINSCHEK, K., HRIBERNIK, S. Characterisation of grass fibres. *Journal of Materials Science*, 2005, 40 (20), p. 5349–5353.
23. DAVIES, P., MORVAN, C., SIRE, O., BALEY, C. Structure and properties of fibres from sea-grass (*Zostera Marina*). *Journal of Materials Science*, 2007, vol. 42, p. 4850–4857.
24. KAMM, B., KAMM, M. Biorefinery – Systems. *Chem. Biochem. Eng. Q*, 2004, vol. 18 (1), p. 1–6.
25. KROMUS, S., WACHTER, B., KOSCHUH, W., MANDL, M., KROTSCHHECK, C. NARODOSLWSKY, M. The Green Biorefinery Austria – Development of an integrated system for green biomass utilization. *Chem. Biochem. Eng. Q*, 2004, vol. 18 (1), p. 7–12.
26. WACHTER, B., KROMUS, S., RINGHOFER, J., KOSHUH, W., MANDL, M., BOECHZELT, H., NARODOWSLAWSKI, M., SCHNITZER, H. The green biorefinery in Austria- an integrated, decentralized and sustainable technology system for green biomass utilization. *V Proceedings of the 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*. Rome, Italy 10–14 May, 2004.
27. WACHTER, B. *Green Biorefinery – Primary Processing and Utilization of Fibres from Green Biomass, Fabrik der Zukunft : Project Report*. BMVIT Austria, No. 20, 2003.
28. SMOLE, MS., KLEINSCHEK, KS., KREŽE, T., STRNAD, S., MANDL, M., WACHTER, B. Physical properties of grass fibres. *Chem. Biochem. Eng. Q*, 2004, vol. 18 (1), p. 47–53.
29. FECHNER, M., HERTWIG, F. Paper made of grass very much in the future. *Neue Landwirtschaft*, 1994, vol. 11, p. 29–31.
30. SAIJONKARI – PAHKALA, K. *Non-wood plants as raw material for pulp and paper : Dissertation*. Helsinki : University of Helsinki, Faculty of Agriculture and Forestry, 2001.
31. REDDY, N., YANG, Y. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. *Trends in Biotechnology*, 2005, vol. 23 (1), p. 22–27.

32. KOČEVAR, F. *Nauk o vlaknih*. Ljubljana : Univerza v Ljubljani, 1971.
33. KIMOVEC, K. *Tekstilne surovine, 1. del Naravne in kemične celulozne surovine*. Kranj : Tekstilni center Kranj, 1969.
34. JARABO, R., FUENTE, E., MONTE, M. C. Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production. Effect on flocculation, retention, drainage and product properties. *Industrial Crops and Products*, 2012, vol. 39, p. 89–96.
35. SREENIVASAN, V. S., RAVINDRAN, D., MANIKANDAN, V., NARAYANASAMY, R. Influence of fibre treatment on mechanical properties of short *Sansevieria cylindrica* / polyester composites. *Materials and Design*, 2012, vol. 37, p. 111–121.
36. SHAHZAD, A. Hemp fiber and its composites – a review. *Journal of Composite Materials*, 2012, vol. 46 (8), p. 973–986.
37. LI, X., TABIL, G. L., PANIGRAHI, S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites (A Review). *Journal of Polymers and the Environment*, 2007, vol. 15 (1), p. 25–33.
38. JOSHY, M. K., LOVELY, M., RANI, J. Studies on interfacial adhesion in unidirectional isora fibre reinforced polyester composites. *Composite Interfaces*, 2007, vol. 14 (7–9), p. 631–646.
39. GAÑÁN, P., ZULUAGA, R., CRUZ, J., VELEZ, J. M., RETEGI, A., MONDRAGON, I. Elucidation of the fibrous structure of Musaceae mature rachis. *Cellulose*, 2008, vol. 15, p. 131–139.
40. SHELAMI, R. M., ABDULLAH, I., AHMAD, I., DUFRESNE, A., KARGARZADEH, H. Extraction of cellulose nanocrystals from mengkuang leaves (*Pandanus tectorius*). *Carbohydrate Polymers*, 2012, vol. 88 (2), p. 772–779.
41. OKSMAN, K. Nanocelluloses and their use in composite materials. *eXpress Polymer Letters*, 2012, vol. 6 (9), p. 687.
42. LI, R., FEI, J., CAI, Y., LI, Y., FENG, J., YAO, J. Cellulose whiskers extracted from mulberry: A novel biomass production. *Carbohydrate Polymers* 2009, vol. 76, p. 94–99.