

## UPORABNOST HMELJEVINE ZA PROIZVODNJO CELULOZNIH VLAKEN IN PAPIRJA

Janja ZULE<sup>1</sup> in Ema FABJAN<sup>2</sup>

Izvirni znanstveni članek / original scientific article

Prispelo / received: 23. 10. 2020

Sprejeto / accepted: 28. 11. 2020

### Izvleček

V raziskavi smo ovrednotili tehnološki potencial hmeljevine za proizvodnjo papirja in embalažnih izdelkov. Določili smo kemijsko sestavo biomase, in sicer vsebnost celuloze, hemiceluloze, lignina, ekstraktivnih snovi in pepela. Delež celuloze se je v povprečju gibal med 30 in 35 %. Hmeljevino smo laboratorijsko delignificirali po sulfatnem oz. kraft postopku z 38 % izkoristkom. Dobljena vlakna smo pregledali pod mikroskopom in jim izmerili optične ter mehanske lastnosti. Vlakna so zelo temna (ISO belina 16,2 %), nehomogena in imajo slabšo jakost (utržna dolžina 2942 m pri stopnji mletja 39 °SR) kot lesna in konoplina. S primerno predobdelavo hmeljevine ter z optimiranjem delignifikacije in mletja lahko tudi na pilotnem nivoju proizvedemo vlakna in papir iz hmeljevine za embalažne namene.

**Ključne besede:** hmeljevina, kemijska sestava, delignifikacija, lastnosti vlaken, proizvodnja embalažnega papirja

## USE OF HOP BIOMASS FOR PRODUCTION OF CELLULOSE FIBERS AND PAPER

### Abstract

Technological potential of hop biomass for paper and packaging production has been evaluated. Chemical composition of raw biomass including cellulose, hemicellulose, lignin, extractives and ash has been determined. Average portion of cellulose has ranged between 30 and 35 %. Hop biomass has been delignified on laboratory level according to sulphate or kraft procedure with 38 % pulp yield. The produced fibers have been examined under microscope after which optical and mechanical properties have been determined. Fibers are very dark (ISO whiteness 16,2 %), inhomogeneous and have lower strength (breaking length 2942 m at 39 °SR drainability) compared to wood and hemp. By implementation of appropriate pretreatment of hop biomass as well as optimisation of delignification and refining

---

<sup>1</sup> Dr., Inštitut za celulozo in papir, Bogišičeva 8, 1000 Ljubljana,  
e-pošta: janja.zule@icp-lj.si

<sup>2</sup> Dipl. inž. kem. teh., Inštitut za celulozo in papir, Bogišičeva 8, 1000 Ljubljana,  
ema.fabjan@icp-lj.si

processes it is possible to produce fibers and paper for packaging purposes on pilot level.

**Key words:** hop biomass, chemical composition, delignification, fiber properties, packaging paper production

## 1 UVOD

Lignocelulozna biomasa, ki sestavlja različna rastlinska tkiva, predstavlja bogat vir tehnološko uporabnih komponent, ki so potencialna surovina za posamezne gospodarske panoge, kot so papirna, tekstilna, kemična in farmacevtska industrija. Najpomembnejši je sicer les, ki se uporablja v gradbeništvu, pohištveni industriji ter za proizvodnjo celuloze in papirja, vendar pa imajo podobno kemijsko sestavo tudi oleseneli deli drugih rastlin. V kmetijstvu nastajajo po žetvi kulturnih rastlin in obrezovanju sadnih dreves velike količine odpadne biomase, ki jo večinoma sežigajo, kompostirajo ali uporabijo za steljo in krmilo v živinoreji pri čemer surovinski potencial materiala ni optimalno izkoriščen (Ashori, 2006).

Lignocelulozno biomaso sestavljajo trije strukturni polimeri, in sicer celuloza, hemiceluloza in lignin, poleg teh pa najdemo v njej še nizkomolekularne ekstraktivne spojine ter anorganske soli. Prevladujoča komponenta je celuloza, ki je najbolj razširjena organska snov v naravi. Sestavljena je iz velikega števila glukoznih enot, ki se povezujejo v ravne verige, te pa preko vodikovih vezi v večje strukturne enote, imenovane fibrile, ki sestavljajo celične stene vlaken. Hemiceluloza je razvejan polisaharid, ki ga sestavljajo pentozne (ksiloza, arabinoza) in heksozne (glukoza, manoza, galaktoza) monomerne enote in se prav tako nahaja v celičnih stenah. Lignin je v nasprotju z ogljikovimi hidrati tridimenzionalni, aromatski polimer, ki veže posamezna vlakna v trdno strukturo. Sestavljajo ga fenil-propanske enote, ki se med sabo povezujejo preko različnih kemijskih vezi. Posamezne vrste lignocelulozne biomase vsebujejo različne vsebnosti omenjenih strukturnih komponent. Običajno prevladuje celuloza, in sicer znaša njena vsebnost od 25 do 55 %, koncentracija hemiceluloz se giblje od 25 do 50 % in lignina od 15 do 40 % v suhi masi snovi. Največji delež celuloze se nahaja v lesu, in sicer več kot 40 % (Fengel in Wegener, 1984; Stenius, 2000, Alen, R., 2011).

Celulozna vlakna oz. olesenele celice so osnovna surovina za proizvodnjo papirja. Vlakna izoliramo iz biomase s kemijskim postopkom delignifikacije, pri katerem se pri visoki temperaturi in tlaku ob dodatku ustreznih reagentov lignin pretvori v topno obliko in se izloči v obliki ligninske lužnice. Danes je v svetu najbolj razširjen tehnološki postopek pridobivanja celuloze alkalni sulfatni oz. kraft postopek, pri katerem se kot reagent uporablja zmes NaOH in Na<sub>2</sub>S. Ligninske molekule se med delignifikacijo cepijo v manjše fragmente, ki se v obliki natrijevih

soli raztopijo v lužnici. Pri delignifikaciji se običajno odstrani tudi velik del hemiceluloze in ekstraktivnih snovi. Pridobljeno surovo celulozno pulpo je treba še temeljito sprati, razvlakniti in prebrati, da ločimo trske od vlaken. Za proizvodnjo različnih vrst papirja se izvaja mletje oz. defibriliranje, pri čemer vlaknom povečamo aktivno površino in s tem omogočimo boljšo vezavo v papirno strukturo in višje mehanske lastnosti. Po potrebi vlakna tudi belimo. Ligninska lužnica se po zgostitvi običajno uporablja kot energent, je pa tudi vir aromatskih spojin, ki imajo visoko tržno vrednost (Gullichesen in Fogelholm, 1999; Kopania in sod., 2012; Ververis in sod., 2003).

Primernost odpadne biomase za proizvodnjo celuloznih vlaken ni odvisna zgolj od zadostnega deleža vlaken ampak tudi od njihovih morfoloških (dolžina, širina, debelina celične stene) in mehanskih (utržni, raztržni in razpočni indeks) lastnosti. Vlakna iglavcev, ki so najpomembnejša za proizvodnjo papirja so relativno dolga in ozka in bistveno vplivajo na mehansko jakost, medtem ko so vlakna listavcev krajša in širša zato prispevajo k voluminoznosti, mehko in hkrati izboljšujejo tiskovne lastnosti papirja. Običajno uporabljamo pri izdelavi papirja mešanico dolgih in kratkih vlaken, poleg teh pa tudi anorganska polnila, škrob, klejivo in druga ustrezna pomožna sredstva. Za proizvodnjo 1 tone papirja potrebujemo 3 tone lesa oz. 17 dreves, ki v povprečju postanejo primerna za sečnjo šele po 50 in več letih rasti. Zaradi počasnega prirasta lesne biomase in njenih omejenih zalog postajajo vse bolj zanimivi alternativni viri, npr. ostanke stebel po žetvi ali obiranju pridelka (Karlsson, 2006). Med take ostanke prištevamo tudi hmeljevino.

Hmelj (*Humulus lupulus* L.) pripada družini konopljev, pri katerih stebelno biomaso sestavljata dve vrsti vlaken, in sicer dolga likova (ličje) v skorji in kratka lesna v sredici. Ličje vsebuje visok odstotek celuloze (> 70 %) in malo lignina (< 10 %), medtem ko ima sredica podobno kemijsko sestavo kot les. Pri tehnološkem pridobivanju vlaken iz hmeljevine je obe vrsti zelo težko oz. skoraj nemogoče mehansko ločiti med seboj, zaradi kompaktne strukture stebel (Reddy in Yang, 2009; Gašparič in sod. 2012). Medtem, ko so vlakna sorodne konoplje tradicionalna surovina v papirništvu (Zule in sod., 2013), pa o uporabnosti hmeljevine v literaturi nismo našli relevantnih podatkov. Namen naše raziskave je bil karakterizacija kemijske sestave hmeljevine in ocena njenega tehnološkega potenciala za pridobivanje celuloznih vlaken in proizvodnjo papirja.

## 2 MATERIALI IN METODE

### 2.1 Vzorci

Vzorci hmeljevine smo prejeli direktno iz nasadov hmelja v Savinjski regiji, in sicer v mesecu septembru 2017, 2018 in 2019, takoj po žetvi stebelne biomase. Najprej smo odstranili listje, preostali del pa posušili na zraku. Nekaj stebel smo

narezali na 1 cm velike fragmente, ki smo jih nato zmleli v laboratorijskem mlinu RETSCH ZM 200 do velikosti delcev 0,5 mm, Tako pripravljene vzorce smo nato uporabili za določitev kemijske sestave. Pred delignifikacijo smo zračno suha stebela hmeljevine narezali na približno 5 cm velike fragmente.

## 2.2 Kemijska analiza

Določili smo vsebnost celuloze, hemiceluloze, lignina, lipofilnih in hidrofilnih ekstraktivov ter pepela. Analize smo izvajali v skladu s standardnimi ali uveljavljenimi gravimetričnimi metodami.

Suhoto smo določili v skladu s SIST EN 14346 s sušenjem zmletih vzorcev pri 105 °C do konstantne mase.

Pepel smo določili s sežigom suhih vzorcev pri 525 °C v skladu s TAPPI T211 om-12. Vsebnost pepela (anorganske snovi) smo podali kot % v suhi masi

Vsebnost ekstraktivov (heksanski in etanolni ekstrakt - lipofilni in hidrofilni ekstraktivi) smo določili v skladu s standardom TAPPI T204. 5 g vzorca smo 8 ur ekstrahirali s heksanom v Soxhlet ekstraktorju. Dobljeni ekstrakt smo posušili na vakuumskem uparjalniku in nato še pri 105 °C do konstantne mase in stehali. Ekstrakcijo smo nadaljevali z etanolom pri enakih eksperimentalnih pogojih. Vsebnost heksanskega ekstrakta (lipofilni ekstraktivi) in etanolnega ekstrakta (hidrofilni ekstraktivi) smo podali kot % v suhi masi.

Vsebnost celuloze smo določili s Kürschner –Hofferjevo metodo. 1 g vzorca, ki smo ga predhodno ekstrahirali z etanolom smo zmešali s 25 mL nitracijske zmesi (20 mL 65 % HNO<sub>3</sub> in 80 mL etanola) in 1 uro segrevali na vodni kopeli pod reflusom. Postopek smo ponovili trikrat z enakim volumnom nitracijske zmesi, na to pa zmes odstranili in dodali 100 mL destilirane vode in pustili vreti 30 minut. Po tem smo vzorec prefiltrirali skozi steklen filterni lonček srednje gostote, trden preostanek pa temeljito sprali z etanolom in vročo vodo, posušili pri 105 °C in stehali. Vsebnost celuloze smo izračunali kot % v suhi masi vzorca (Kürschner in sod., 1931).

Hemicelulozo smo določili v skladu s kloritno metodo. 0,5 g predhodno ekstrahiranega vzorca smo dodali 60 mL vode, 100 µL ledocetne kisline in 0,5 g natrijevega klorita in stresali 1 uro pri 70 °C. Po tem času smo dodali 100 µL ledocetne kisline in 0,5 g natrijevega klorita ter ponovno segrevali pri enakih pogojih z občasnim mešanjem. Po treh zaporednih ponovitvah smo zmes ohladili in trden preostanek (holoceluloza) prefiltrirali skozi steklen filterni lonček srednje gostote. Izolirano holocelulozo (celuloza + hemiceluloza) smo sprali z vročo vodo, posušili pri 105 °C in stehali. Vsebnost hemiceluloze smo izračunali tako, da smo

od vsebnosti holoceluloze odšteli predhodno določeno celulozo. Vrednost smo izrazili kot % v suhi masi (Wise in sod., 1946).

Lignin smo določili kot Klasonov lignin po predhodni ekstrakciji z etanolom, v skladu s TAPPI T222-om11. 1 g vzorca smo dodali 15 mL 72 % žveplene kisline, ki pri sobni temperaturi hidrolizira celulozo in hemicelulozo do enostavnih sladkorjev. Po 2 urah smo vzorcu dodali toliko vode, da se je koncentracija kisline znižala na 3 %. Zmes smo pustili vreti 4 ure, nakar smo jo prefiltrirali skozi steklen filterni lonček srednje gostote. Filterni preostanek smo sprali z vročo vodo, posušili pri 105 °C in stehtali. Vsebnost lignina smo podali kot % v suhi masi.

Vse analize smo izvedli v 3 paralelkah. Dobljeni rezultati so povprečne vrednosti vseh meritev.

Sestavo posameznih izoliranih frakcij smo preverjali s pomočjo FTIR spektroskopske analize.

Infrardeče spektre visoke ločljivosti smo posneli na aparatu Perkin Elmer Spectrum Two v ATR tehniki, in sicer v območju med 400 in 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

### **2.3 Delignifikacija biomase**

400 g suhe biomase smo v laboratorijskem delignifikatorju zmešali z 2 litra vodne raztopine NaOH in  $\text{Na}_2\text{S}$ , katerih koncentracija je bila 18 % in 6 % glede na suho maso vzorca. Delignifikacija je potekala pri 160 °C 3 ure pri tlaku 7 bar. Uporabili smo delignifikator proizvajalca UECIN s prostornino 5 litrov. Po končani delignifikaciji smo odstranili nastalo ligninsko lužnico, izolirano celulozno pulpo pa temeljito sprali z vodo, da smo odstranili ostanke kemikalij in lignina ter določili vlakninski izkoristek. Groba celulozna vlakna smo nato pomleli v Valley mlinu do ustrezne stopnje, ki smo jo določili po standardu ISO 5267-1.

### **2.4 Mikroskopija vlaken**

Vlakna smo pregledali pod optičnim mikroskopom Nikon pri 40 kratni povečavi.

### **2.5 Mehanske in optične lastnosti**

Stopnjo mletja smo določili iz vlakninske suspenzije po ISO 5267-1. Mehanske lastnosti smo določili iz vlakninskih listov, ki smo jih pripravili v skladu s standardom ISO 5269-2 na laboratorijskem oblikovalniku Rapid-Köthen. V skladu s standardnimi metodami smo ovrednotili naslednje parametre: gramaturo (ISO 536), debelino in specifični volumen (ISO 534), utržne lastnosti (ISO 1924-2), raztržni indeks (ISO 1974), razpočni indeks (ISO 2758), togost (2493-1), poroznost

(ISO 5636-3), gladkost (ISO 5627), hrapavost (8791-2), ISO belino (ISO 2470-1) in opaciteto (ISO 2471).

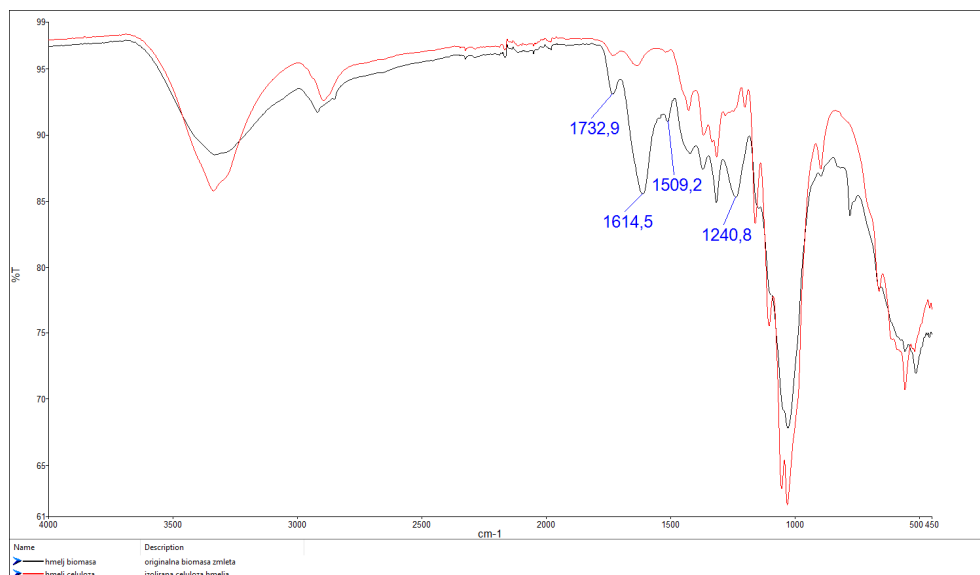
### 3 REZULTATI

Rezultati kemijske analize stebelne biomase so zbrani v preglednici 1. Prevladujoča komponenta je celuloza, katere vsebnosti so se gibale med 30 in 35 %, kar je v primerjavi z lesom (40 - 45 %) znatno manj. Nekoliko manj je tudi lignina, medtem ko so koncentracije pepela in ekstraktivnih komponent sorazmerno visoke. Med slednjimi prevladujejo hidrofilne, v etanolu topne nizkomolekularne spojine, med katerimi običajno najdemo tudi bioaktivne, fenolne komponente, ki predstavljajo zaščito tkiv proti mikrobom in insektom, medtem ko se v heksanskem ekstraktu olesenelih rastlinskih tkiv nahajajo predvsem maščobne kisline, steroli, voski in trigliceridi (Stenius, 2000). Natančnejše sestave ekstraktivnih snovi v sklopu projekta nismo določali.

*Preglednica 1. Kemijska sestava stebelne biomase hmelja*

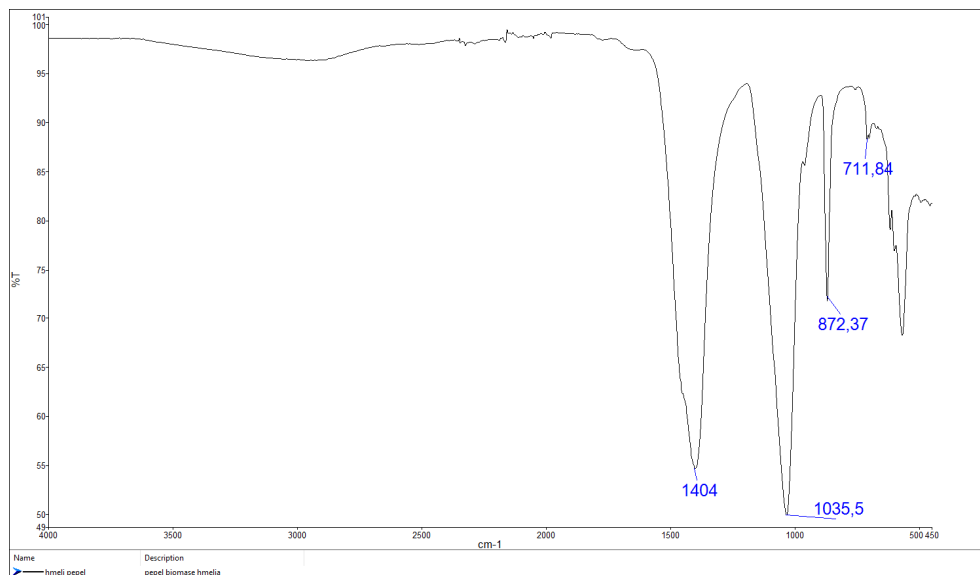
leto vzorčenja	suha snov (%)	pepel (%)	heksanski ekstrakt (%)	etanolni ekstrakt (%)	celuloza (%)	hemi-celuloza (%)	lignin (%)
2017	95	6,3±0,3	0,80±0,04	7,8±0,4	30±2	28±1	18±1
2018	95	5,4±0,3	0,55±0,03	7,9±0,4	35±2	32±2	20±1
2019	97	6,7±0,4	0,96±0,05	9,8±0,5	32±2	29±2	19±1

Vse omenjene komponente smo kvantitativno ovrednotili po izolaciji iz biomase. Čistost posameznih izoliranih frakcij smo preverjali s pomočjo FTIR spektrov. Slika 1 prikazuje spektra zmlete hmeljevine in izolirane celuloze. Prvi vsebuje karakteristične absorpcijske vrhove celuloze (897, 1031, 1054, 1160, 1104, 1315, 1368, 1428 in 1634  $\text{cm}^{-1}$ ), hemiceluloze (1732 in 1240  $\text{cm}^{-1}$ ) in lignina (1614 in 1509  $\text{cm}^{-1}$ ), medtem ko na spektru celuloze ni več absorpcijskih vrhov slednjih dveh (Xu in sod., 2013).



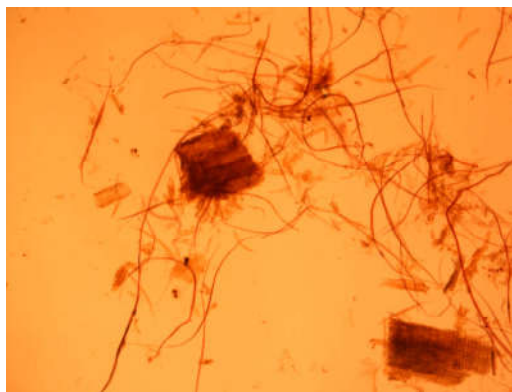
**Slika 1:** FTIR spektra hmeljevine in izolirane celuloze

Posneli smo tudi FTIR spekter pepela (slika 2), ki ima karakteristične absorpcijske vrhove kalcijevega karbonata ( $1404$ ,  $872$  in  $711$   $\text{cm}^{-1}$ ) in silikata ( $1035$   $\text{cm}^{-1}$ ) (Kalembkiewicz in sod., 2018).



**Slika 2:** FTIR spekter pepela hmeljevine

Pri delignifikaciji narezane, zračno suhe biomase smo dobili 38 % izkoristek surove celulozne pulpe. Pridobljena vlakninska masa je bila temno obarvana in zelo nehomogena. Vsebovala je precejšen delež zelo dolgih vlakninskih prepletov, zato običajen laboratorijski postopek nadaljnje obdelave, vključujoč razvlaknjevanje, prebiranje (ločba vlaken od trsk) in homogenizacijo, ni bil mogoč zaradi dolgih, nitastih struktur, ki jih je bilo nemogoče ločiti na posamezna vlakna. Material se zapleta na strojni opremi, zato je nadaljnje procesiranje zelo oteženo. Temeljito sprano celulozno pulpo smo v nadaljevanju mehansko obdelali v Valley mlinu z namenom zrahljanja omenjenih, kompaktnih struktur. Mikroskopski pregled je pokazal, da tako pripravljeno maso sestavljajo dolga nitasta vlakna, poleg teh pa tudi drugi delci, npr. prevodne celice s perforirano površino in posamezne trske oz. skupki (slika 3).



**Slika 3:** Mikroskopija (40x povečava)



**Slika 4:** Hmeljevina, pulpa in vlakninski list

Iz celulozne pulpe smo pripravili vlakninske liste (slika 4) in izmerili najpomembnejše mehanske in optične lastnosti. Rezultati so zbrani v preglednici 2.

Listi so bili temno obarvani, saj je bila izmerjena belina zgolj 16,2 % (lestvica od 1 do 100). Izmerjena utržna dolžina 2942 m pri srednji stopnji mletja 39 °SR nakazuje slabšo mehansko jakost vlaken kot v primeru lesnih vrst pri enaki stopnji mletja, kjer vrednosti presegajo 6000 m. Utržna dolžina je dolžina papirnega traku, pri kateri se trak pretrga zaradi lastne teže. Primerjava s sorodno konopljo pokaže, da ima ta pri skoraj enaki stopnji mletja (36°SR) utržno dolžino, ki presega 8000 m. Poleg tega ima konoplja tudi višji razpočni indeks (3,86 kPam<sup>2</sup>/g) a manjši raztržni indeks (2,47 mNm<sup>2</sup>/g) (Zule, 2016).



**Preglednica 2: Mehanske in optične lastnosti vlaken hmelja**

Parameter	Vrednost
stopnja mletja [ $^{\circ}$ SR]	39
gramatura [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]	65,5
debelina [ $\mu\text{m}$ ]	154
specifični volumen [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	2,35
utržni indeks [ $\text{Nm}/\text{g}$ ]	28,9
utržna dolžina [m]	2942
raztržni indeks [ $\text{mNm}^2/\text{g}$ ]	3,42
razpočni indeks [ $\text{kPam}^2/\text{m}$ ]	1,3
togost L&V, $15^{\circ}$ [mN]	63
gladkost Bekk [s]	6,8
poroznost Bendtsen [ $\text{mL}/\text{min}$ ]	902
hrapavost PPS [ $\mu\text{m}$ ]	5,92
ISO belina [%]	16,2
opaciteta [%]	100,9

Iz hmeljevine, ki vsebuje v povprečju okrog 33 % celuloze, je z delignifikacijo možno pridobiti surovo, vlakninsko pulpo. Zaradi žilavosti materiala in prepletenosti vlakninskih svežnjev, je po običajnem laboratorijskem postopku, ki sledi delignifikaciji, praktično nemogoče izolirati homogeno maso, ki bi jo sestavljala posamezna vlakna. Z alternativnim postopkom mletja v Valley mlinu lahko celulozno pulpo sicer delno razvlaknimo, vendar pa material še naprej ostaja precej nehomogen. V vsakem primeru bi bilo treba celoten laboratorijski postopek od priprave biomase za delignifikacijo do razbitja nitastih struktur v surovi pulpi in izolacije posameznih vlaken optimirati (Oggiano in sod., 1997; Mohieldin, 2014).

Prenos na pilotni nivo je zaradi kompaktnosti materiala dokaj zahteven, vendar izvedljiv. Predvsem je treba hmeljevino mehansko čim bolj razcepiti pred delignifikacijo, da zagotovimo večjo stično površino za reakcijo z delignifikacijskim sredstvom. Posebno pomembna je tudi energetska zahtevna faza mletja surove pulpe. Za izdelavo papirja moramo vlaknom hmeljevine dodati še komercialno celulozo, škrob, karbonatno polnilo in klejivo. Delež hmeljevine v vlakninski sestavi bi lahko znašal med 20 % in 40 %. Na osnovi naših izkušenj pri pilotni izdelavi papirja iz invazivnih rastlin, paradižnikovih stebel in jutovine predvidevamo, da bi bil papir iz hmeljevine uporaben predvsem za izdelavo embalažnih izdelkov, kot so podstavki, pladnji, vrečke in škatle (Verweris in sod., 2004). Na pilotnem papirnem stroju na Inštitutu za celulozo in papir lahko iz 1 tone suhe biomase proizvedemo okrog 0,9 tone papirja. Iz 1 kg papirja v povprečju izdelamo okrog 50 embalažnih vrečk srednje velikosti. Proizvodnja papirja iz

»odpadne« stebelne biomase je tipičen primer krožnega gospodarstva, saj lahko izdelke po uporabi tudi recikliramo.

#### 4 ZAKLJUČKI

Raziskava primernosti hmeljevine za proizvodnjo celuloznih vlaken in papirja je pokazala, da bi tudi hmeljevina lahko postala ena od alternativnih surovin za pilotno proizvodnjo embalažnih vrst papirja. Njena kemijska sestava je primerljiva s stebelno biomaso nekaterih poljščin, s povprečno vsebnostjo celuloze okrog 35 %. V primerjavi s slamo, koruzovino in konopljo ima hmeljevina bolj kompaktno strukturo stebel, ki jo je težje delignificirati in razvlakniti, medtem ko so izolirana vlakna zelo temne barve. Tehnološki potencial je možno izboljšati s pravilnim izborom vhodne surovine, ki naj bo čim bolj olesenela, z optimizacijo celotne proizvodne sheme in pravilnim izborom končnih produktov, kot so npr. manj zahtevne vrste embalaže.

**Zahvala.** Delo je bilo opravljeno znotraj razvojno-raziskovalnega programa CELKROG »Izkoriščanje potenciala biomase za razvoj naprednih materialov in bio-osnovanih produktov«, ki je sofinanciran s strani Republike Slovenije, Ministrstvo za izobraževanje, znanost in šport in Evropske unije, Evropski sklad za regionalni razvoj 2016-2020.

#### 5 LITERATURA

- Alen, R. Biorefining of Forest Resources. Book 20 (Papermaking Science and Technology), Paperi ja Puu Oy, Porvoo, Finland, 2011: 29-50
- Ashori, A. Nonwood fibers a potential source of raw material in papermaking. Journal of Macromolecular Science: Part D- Reviews in Polymer Processing. 2006; 45 (10): 1133-1136
- Fengel, D. in Wegener, G. Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1984: 66-226
- Gašparič, P., Urisk, Z., Križanec, A., Munda, M., Hribernik, S., Kurečič, M., Kreže, T., Sfiligoj Smole, M. Naravno obnovljiva rastlinska tekstilna vlakna. Tekstilec. 2012; 55(4): 302-313
- Gullichsen, J. in Fogelholm, C.J. Papermaking Science and Technology . Chemical Pulping 6A. Helsinki, Fapet Oy 1999: 493-573
- ISO 534: 2011 Paper and board - Determination of thickness, density and specific volume
- ISO 536: 2019 Paper and board - Determination of grammage
- ISO 1924-2: 2008 Paper and board - Determination of tensile properties -Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min)
- ISO 1974: 2012 Paper - Determination of tearing resistance - Elmendorf method
- ISO 2470-1: 2016 Paper, board and pulps - Measurement of diffuse blue reflectance factor Part 1: Indoor daylight conditions (ISO brightness)
- ISO 2471: 2008 Paper and board - Determination of opacity (paper backing) — Diffuse reflectance method

- ISO 2493-1: 2010 Paper and board - Determination of bending resistance - Part 1: Constant rate of deflection
- ISO 2758: 2014 Paper - Determination of bursting strength
- ISO 5267-1: 1999 Pulps - Determination of drainability - Part 1: Schopper-Riegler method
- ISO 5269-2: 2004 Pulps - Preparation of laboratory sheets for physical testing - Part 2: Rapid-Köthen method
- ISO 5627: 1995 Paper and board - Determination of smoothness (Bekk method)
- ISO 5636-3: 2013 Paper and board - Determination of air permeance (medium range) -Part 3: Bendtsen method
- ISO 8791-2: 2013 Paper and board - Determination of roughness/smoothness (air leak method)
- Kalembkiewicz, J., Galas, D., Sitarz-Palczak, E. The Physicochemical Properties and Composition of Biomass Ash and Evaluating Directions of its Applications. Polish Journal of Environmental Studies. 2018; 27 (6): 1-11
- Karlsson, H. Fibre Guide. Fibre analysis and process applications in the pulp and paper industry. 1. izd., Kista: AB Lorentzen & Wettre 2006: 5-120
- Kopania, E., Wietecha, J., Ciecanska, D. Studies on isolation of Cellulose Fibres from Wast Plant Biomass. Fibres and Textiles in Eastern Europe. 2012; 20, 6B (96): 167-172
- Kürschner, K., Hoffer, A. Eine Neue quantitative cellulosebestimmung. Chemiker Zeitung. 1931; 17, 161-168
- Mohieldin, S.D. Pretreatment Approaches in Non-wood Plants for Pulp and Paper Production: A Review. Journal of Forest Products & Industries. 2014; 3(2): 84-88
- Oggiano, N., Angelini, L.G., Cappepetto, P. Pulping and paper properties of some fibre crops. Industrial Crops and Products. 1997; 7 (1): 59-67
- Reddy, N. in Yang, Y. Properties of natural cellulose fibers from hop stems. Carbohydrate Polymers. 2009; 77 (4): 898-902
- SIST EN 14346: 2007 Karakterizacija odpadkov - Izračun suhe snovi z določitvijo suhega ostanka ali vode
- Stenius, P. Forest Products Chemistry, Book 3 (Papermaking Science and Technology), Fapet Oy, Jyväskylä, Finland, 2000: 59-107
- TAPPI T204 Solvent extractives of wood and pulp
- TAPPI T211 om-12 Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 °C
- TAPPI T222 om-02 Acid-insoluble lignin in wood and pulp
- Ververis, C., Georghiou, K., Christodoulakis, N., Santas, P., Santas, R. Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their suitability for paper production. Industrial Crops and Products. 2004; 19: 245-254
- Wise, L.E., Murphy, M., D'Addieco, A.A. Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and studies on the hemicelluloses. Paper Trade Journal. 1946; 122 (2): 35-43
- Xu, F., Yu, J., Tesso, T., Dowell, F., Wang, D. Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: A mini-review. Applied Energy, 2013, 104: 801-809
- Zule, J., Černič, M., Šuštaršič, M. Uporabnost konopljinih vlaken v papirništvu. Papir. 2013; 41(9): 34-36
- Zule, J. Uporaba vlaken iz odpadne konopljine biomase za proizvodnjo papirja. Poročilo projekta Poly4Emi. Inštitut za celulozo in papir, Ljubljana 2016