

# Možnosti pridobivanja nanoceluloze z ultra finim mletjem lesne biomase

Kramarič Luka<sup>1</sup>, Hrovatič Peter<sup>1</sup>, Osolnik Urša<sup>1</sup>, Poljanšek Ida<sup>1</sup>, Vek Viljem<sup>1</sup>, Oven Primož<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Katedra za kemijo lesa in drugih lignoceluloznih materialov

E-naslov: [luka.kramaric@bf.uni-lj.si](mailto:luka.kramaric@bf.uni-lj.si), [primoz.oven@bf.uni-lj.si](mailto:primoz.oven@bf.uni-lj.si)



## POUDARKI:

- Celuloza je najbolj razširjen organski polimer na Zemlji in predstavlja potencialen vir za kemijske spojine in materiale z visoko dodano vrednostjo, kot je npr. nanoceluloza
- Nanoceluloza je naraven obnovljiv material prihodnosti z izjemnimi lastnostmi in širokim področjem uporabe
- Znane oblike nanoceluloze so celulozni nanokristali (CNC), celulozne nanofibrile (CNF) in bakterijska nanoceluloza (BNC)
- Lignocelulozne nanofibrile (LCNF) so posebna oblika nanofibrilirane celuloze, pri katerih se lignin v veliki meri ohrani
- Z ultra finim mlinom Masuko je mogoče izolirati lignocelulozne nanofibrile LCNF iz lesne biomase in ostankov industrijske predelave lesa

## UVOD:

Gozd in les imata pomembno vlogo v razvoju sodobnega biogospodarstva. Les je obnovljiv vir, ki omogoča razvoj materialov z nižjim okoljskim odtisom in visoko dodano vrednostjo. Svetovni gozdovi, po podatkih Organizacije Združenih narodov za prehrano in kmetijstvo (FAO), letno ustvarijo velike količine ( $10^9$  m<sup>3</sup>) nove lesne biomase (FAO, 2025), in s tem iz ozračja vežejo več gigaton ogljika (FAO, 2025b). Ob tem neto prirast lesne in druge gozdne biomase ob trenutnih trendih še vedno pomembno presega globalno rabo lesa in lesnih proizvodov, kar pomeni tudi stalen naravni prirast celuloze kot osnovne strukturne komponente lesa. V kontekstu podnebnih sprememb in prehoda v podnebno nevtralno družbo to pomeni, da je celuloza eden redkih materialov, katerih obnavljanje poteka kontinuirano in na globalni ravni. Celulozo se zato umešča med ključne trajnostne surovine krožnega gospodarstva prihodnosti. Učinkovita raba celuloze ter njenih derivatov predstavlja pomemben prispevek k dolgoročni trajnostni rabi gozdnih virov in zmanjševanju odvisnosti od fosilnih surovin.

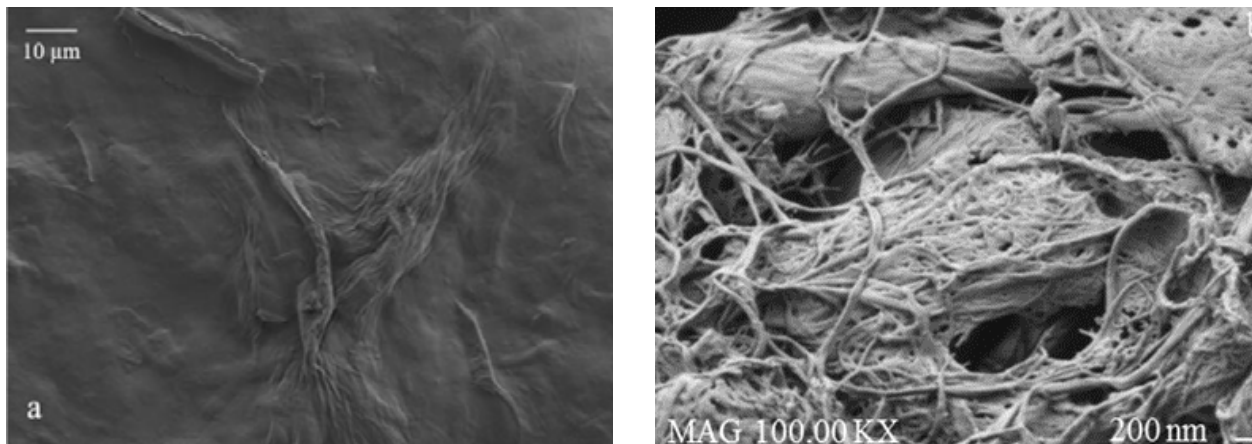
Eden izmed derivatov celuloze je nanoceluloza. Zaradi svoje izjemno majhne velikosti, velike specifične površine in dobrih mehanskih lastnosti je prepoznana kot perspektiven material prihodnosti (Dufresne, 2017). Širok potencial uporabe je poleg

lastnosti glavni razlog za vedno večjo komercialno zanimivost nanoceluloze. Po napovedih Global Market Insights (Nanocellulose Market Size & Share, Growth Analysis Report 2035, b. l.), se bo svetovni trg nanoceluloznih produktov iz zdajšnjih 967 mio. \$, do leta 2035 povečal na 9,5 mrd. \$.

Namen prispevka je predstaviti uporabnost in različne tipe nanoceluloze, postopke pridobivanja ter konceptualno prikazati možnost uporabe ultra finega mlina Masuko za proizvodnjo LCNF iz industrijske žagovine.

**Nanoceluloza** je skupno ime za materiale na osnovi celuloze, pri katerih je vsaj ena dimenzija v nanometriškem območju (Dufresne, 2017). Uporablja se na številnih področjih. V papirništvu izboljšuje mehanske ter barijerne lastnosti papirja, in zadrževanje polnil. V premazih in lepilih deluje kot naravni reološki modifikator. V farmaciji in zdravstvu se uporablja v obliki suspenzij, hidrogelov in aerogelov (Levanič in sod., 2020). Zaradi dobre biokompatibilnosti je primerna za nosilce zdravilnih učinkovin in tkivni inženiring (Nechyporchuk in sod., 2016). V kombinaciji z drugimi materiali predstavlja alternativo plastični embalaži, predvsem folijam za embalažo živil (Osolnik in sod., 2024). V zadnjem času se povečuje tudi zanimanje za uporabo nanoceluloze v gradbeništvu, kjer se preučuje njen vpliv na

**Slika 1:** a) Mikroskopska slika embalažnega filma z dodano LCNF (Osolnik in sod., 2024); b) Nanofibrilirana celuloza, (Žepič in sod., 2016)



mehanske lastnosti trajnostnih veziv, bioosnovanih kompozitov in izolacijskih materialov (Nechyporchuk in sod., 2016).

Glede na način pridobivanja in morfologijo razlikujemo več vrst nanoceluloze. Celulozni nanokristali (CNC) so kratki in togi delci z visoko kristaliničnostjo, premerom 3–35 nm in dolžino 200–500 nm. Pridobivajo se predvsem s kislinsko hidrolizo, pri kateri se odstranijo neurejeni-amorfni deli celuloznih verig. Bakterijsko nanocelulozo lahko po t.i. »ground up« principu sintetizirajo bakterijski mikroorganizmi, iz rodu Komagataeibacter oz. Gluconacetobacter. Sestavljena je iz zavitih rebrastih vlaken preseka 3-4 x 70-140 nm in dolžine več µm, ter je zelo čista, vendar proizvodno dražja (Dufresne, 2017). Celulozne nanofibrile (CNF) so dolge (več µm) in fleksibilne fibrile s premerom 5-50 nm, ki nastanejo z mehansko razgradnjo celuloznih makrofibril iz lesnih ali drugih vlaken, pogosto ob pomoči predobdelav (Nechyporchuk in sod., 2016). Imajo visoko razmerje med premerom in dolžino ter elastični modul kar 143 GPa (Dufresne, 2017). Posebno skupino predstavljajo lignocelulozne nanofibrile (LCNF), pri katerih je lignin v veliki meri ohranjen. Prisoten lignin vpliva

na površinske lastnosti materiala in omogoča energetsko ugodnejše postopke pridobivanja. Raziskovanju CNF in LCNF se intenzivno posvečamo na Katedri za kemijo lesa in drugih lignoceluloznih materialov na Oddelku za lesarstvo Biotehniške fakultete (Osolnik in sod., 2024). Predmet raziskav v teku je predvsem optimizacija procesa pridobivanja nanofibrilirane celuloze iz pogostih domačih lesnih vrst (npr. bukovina in smrekovina), kar bo na kratko predstavljeno v nadaljevanju.

Pridobivanje nanofibrilirane celuloze (NFC): Proces pridobivanja nanofibrilirane celuloze je sestavljen iz večih faz in poteka s kombinacijo kemičnih, encimskih in mehanskih postopkov (Nechyporchuk in sod., 2016), prikazanih na Sliki 2. Mehanski postopki predstavljajo ključni korak pri razvlaknjevanju celične stene. Različne kemične in encimske predobdelave izboljšajo morfologijo končnega produkta in zmanjšajo potrebno energijo za mehansko obdelavo (Nechyporchuk in sod., 2016). Sam proizvodni proces ima veliko parametrov, odvisnih od surovinskega vira in željenih končnih lastnosti CNF.

**Slika 2:** Shema proizvodnega procesa pridobivanja CNF



**Ultra fin mlin Masuko Supermasscolloider MKCA6-5J** (Slika 3 levo), je uporaben za mletje materialov v različnih industrijah, npr. v živilstvu in kemični industriji. Na področju nanoceluloze omogoča učinkovito mehansko fibrilacijo celuloznih in lignoceluloznih materialov brez intenzivnih kemičnih predobdelav (Nechyporchuk in sod., 2016). Primeren je za laboratorijsko delo in je sestavljen iz dveh neporoznih keramičnih diskov - rotorja in statorja (Slika 3 - desno). Diska imata rebra in utore, ki med vrtenjem rotorja ustvarjajo tlačne in strižne sile na vlakna, ter rušijo strukturo celične stene. Posledica teh sil je ločitev celuloznih vlaken iz strukture celičnih sten, in njihova cepitev po longitudinalni osi. Mletje se izvaja stopenjsko, pri hitrosti približno 1500 rpm, pri čemer se razmik med diski postopoma znižuje. Slednje omogoča postopno cepitev vlaken v nanofibrile z enakomernim premerom okrog 15nm.

Omenjeni mlin lahko predela tudi lesni prah, žagovino ter druge lesne ostanke do LCNF. Ohranjanje lignina zmanjšuje potrebo po kemičnih obdelavah, znižuje stroške procesa ter povečuje privlačnost postopka za industrijske obrate v gozdno lesni verigi.

## LITERATURA IN VIRI:

Dufresne A. 2017. Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials. V: Nanocellulose: From Nature to High Performance Tailored Materials. De Gruyter, <https://doi.org/10.1515/9783110480412>

FAO. 2025. Forest emissions and removals. Global, regional and country trends 1990–2025. Rome, Italy, FAO, <https://doi.org/10.4060/cd7163en>

Levanič J., Poljanšek I., Vek V., Narat M., Oven P. 2020. Chlorhexidine digluconate uptake and release from alkane-crosslinked nanocellulose hydrogels and subsequent antimicrobial effect. *BioResources*, 15, 2: 3458–3472, <https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3458-3472>

Nanocellulose Market Size & Share, Growth Analysis Report 2035. Global Market Insights Inc., <https://www.gminsights.com/industry-analysis/nanocellulose-market> (6. maj 2026)

Nechyporchuk O., Belgacem M. N., Bras J. 2016. Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances. *Industrial Crops and Products*, 93: 2–25, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.02.016>

Osolnik U., Vek V., Humar M., Oven P., Poljanšek I. 2024. (Ligno)Cellulose Nanofibrils and Tannic Acid as Green Fillers for the Production of Poly(vinyl alcohol) Biocomposite Films. *Polymers*, 17, 1: 16, <https://doi.org/10.3390/polym17010016>

**Slika 3:** Ultra fini mlin Masuko (levo), keramična diska za mletje (desno) v laboratoriju za biorafinacijo Katedre za kemijo lesa in drugih lignoceluloznih materialov.



Žepič V., Poljanšek I., Oven P., Čop M. 2016. COST-FP1105: Properties of PLA films reinforced with unmodified and acetylated freeze dried nanofibrillated cellulose. *Holzforschung*, 70, 12: 1125–1134, <https://doi.org/10.1515/hf-2016-0096>

## KLJUČNE BESEDE:

Lesna biomasa, Nanoceluloza, ultra fini mlin Masuko

## ZAHVALE:

Avtorji se zahvaljujemo za finančno podporo programski skupini P4-0015 – Les in lignocelulozni kompoziti, ki jo financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS). Prispevek je nastal v okviru CRP projekta V4-2512 Simulacija in optimizacija potencialnih načinov valorizacije lesa slabše kakovosti v Sloveniji, ki ga sofinancirata ARIS in Ministrstvo za gospodarstvo, turizem in šport (MGTŠ), BAPUR.

CC BY SA · DOI 10.20315/SFS.191.13