

NOVOSTI O NANOCELULOZI IN POVRŠINSKIH MODIFIKACIJAH

NOVELTIES ON NANOCELLULOSE AND SURFACE MODIFICATION

Mojca BOŽIČ¹, Karin STANA-KLEINSCHEK¹

IZVLEČEK

V članku so predstavljene najnovejše raziskave o nanocelulozi, površinskih modifikacijah nanoceluloze ter njihove možnosti uporabe v papirni industriji. Tako sta predstavljena nanoceluloza kot utrjevalni, premazni ali izhodni material pri izdelavi papirja ali nanopapirja ter površinsko modificiranje nanoceluloze za pridobitev novih lastnosti, kot so (I) hidrofobnost za izdelavo posebnega papirja, kot je papir za cigarete, filtre, ultralahek papir za varnostne namene in bankovce ter embalažni papir s specifičnimi bariernimi lastnostmi, (II) protimikrobnost za izdelavo aktivnega embalažnega papirja, (III) negorljivost oz. zmanjšanje gorljivosti za izdelavo npr. stenskih tapet, igrač in papirja, za katerega je zahtevana nizka gorljivost, (IV) prevodnost za izdelavo zaslonov, zaslonov na dotik in interaktivnih papirjev ter (V) senzorjev.

Ključne besede: celulozni nanofibrili, celulozni nanokristali, površinska modifikacija, hidrofobnost, protimikrobnost, negorljivost, prevodnost, senzorji

ABSTRACT

The article presents the latest research on nanocellulose, the surface modification of nanocellulose, and its potential use in the paper industry. Nanocellulose is presented as a reinforcing, coating or starting material in the manufacture of paper or nanopaper. In addition, the article focuses on the surface modification of nanocellulose with the aim of acquiring new properties such as (i) hydrophobicity, which is very important in the manufacture of special paper, i.e. paper for cigarette filters, ultra-lightweight paper for security purposes and banknotes, and paper packaging with specific barrier properties, (ii) antimicrobial for the production of active antimicrobial packaging paper, (iii) flame-retardant or reducing the combustibility for the manufacturing of wall coverings, toys and paper with required low combustibility, (iv) conductivity for the production of displays, touch screens and interactive papers and (v) sensors.

Key words: cellulose nanofibrils, cellulose nanocrystals, surface modification, hydrophobicity, antimicrobial, incombustibility, conductivity, sensors

1 UVOD

Celulozna vlakna se že več kot 2000 let uporabljajo kot osnovna sestavina za izdelavo papirja. Papir, prisoten v vsakdanjem življenju, sestoji iz vlaken premerov nekaj deset mikrometrov. Z uporabo encimske ali kemične predobdelave in visokotlačne homogenizacije lahko mikrometer velika vlakna razvlaknimo na nanocelulozo s premerom med 20 in 100 nm in dolžine do 100 μm (Slika 1). Uporaba nanoceluloze v pripravi papirja ponuja izdelavo papirja nove generacije. Površinska modifikacija, tako nanoceluloze kot že izdelanega papirja, pa razširi možnosti uporabe papirja do danes neznanega (npr. organske solarne celice, elektronika, baterije, aktivni zasloni, biomedicinske naprave itd.) [1].

Nanoceluloza (NC) danes obstaja v številnih oblikah in njihovo poimenovanje še danes ni poenoteno. Tako lahko v literaturi zasledimo naslednja poimenovanja: (I) mikrofibrilirana celuloza (MFC), nanofibrilirana celuloza (NFC)

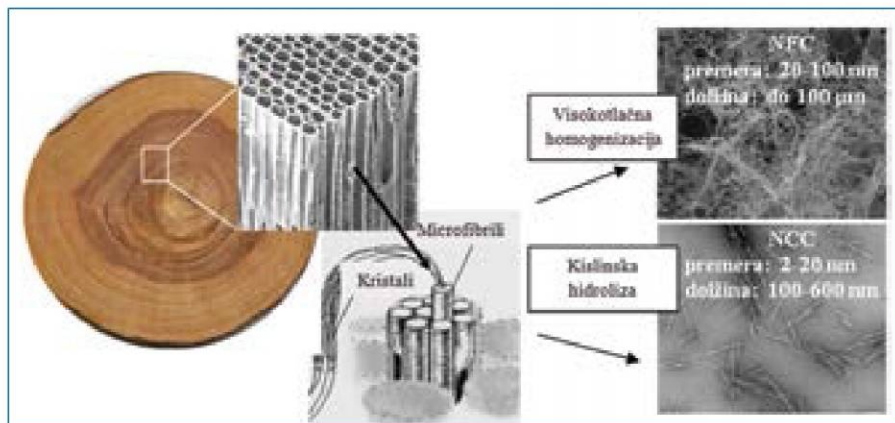
ali celulozni nanofibrili (CNF) premera 20–100 nm in dolžine do 100 μm , (II) kislinsko hidrolizirani fibrili znani kot nanokristalina celuloza (NCC) ali celulozni nanokristali (CNC) premera 2–20 nm in dolžine 100–600 nm (Slika 1) ter (III) bakterijska nanoceluloza (BNC) ali bakterijska celuloza (BC) premera 2–4 nm in dolžine 80–100 nm [2].

Vključitev NC v razne kompozitne materiale omogoča pridobitev posebnih lastnosti, ki se lahko popolnoma razlikujejo od lastnosti izhodnih materialov. Sem prištevamo posebne morfološke lastnosti, visoko specifično površino, spremenjene reološke lastnosti, izboljšane mehanske in barierne lastnosti, povečano površinsko kemično reaktivnost, biokompatibilnost, biorazgradljivost, netoksičnost itd. Zaradi prisotnega kristaliničnega dela v nanofibrilih imajo le-ti izredne mehanske lastnosti. Teoretični elastični moduli vzdolž verige popolnega kristala celuloze dosegajo vrednosti med 130 GPa in 250 GPa, kar je primerljivo z modulom Kevlarja (med 130 GPa in 179 GPa). Celulozni fibrili kot

celota zaradi prisotnosti amorfnega dela dosegajo nižje mehanske lastnosti, ki pa so še vedno zelo zadovoljive (tj. 114 GPa) [3].

Med druge pomembnejše lastnosti NC spada površinska reaktivnost. Naravni celulozni derivati imajo na površini množico hidroksilnih skupin in manjši delež karboksilnih ionskih skupin, ki prispevajo k visoki hidrofilnosti površine NC. Površinske hidroksilne skupine omogočajo različne kemijske in encimske modifikacije za pridobivanje novih površinskih funkcionalnosti. Kot primer, površinska funkcionalnost je pomembna, ker določa interakcije med samimi NC delci in NC z drugimi polimeri preko ionskih, vodikovih in hidrofobnih interakcij. Neobdelana NC je hidrofilna ter zato kompatibilna le z vodotopnimi polimeri. Pred pripravo polimernih nanokompozitov je zato potrebno površino NC primerno modificirati.

Tradicionalne kemične modifikacijske metode v večini zajemajo uporabo nevarnih katalizatorjev, kot so težke



Slika 1: Shematski prikaz proizvodnje nanoceluloze (NFC in NCC); NFC preko mehanske obdelave ter NCC preko kemijske obdelave

Figure 1: Schematic representation of nanocellulose production (NFC and NCC); NFC via mechanical processing and NCC via chemical treatment

kovine, kombinacije toksičnih kemikalij ter dolge reakcijske čase, ki močno omejujejo proizvodnjo.

Na Inštitutu za inženirske materiale in oblikovanje v Mariboru (<http://www.fs.uni-mb.si/podrocje.aspx?id=289>) že desetletja raziskujemo ekološko cilijane modifikacije/funkcionalizacije in pridelave inženirskih materialov, pri čemer polisaharidni materiali predstavljajo pretežni del raziskav, zato smo tudi aktivni člani evropske mreže odličnosti (EPNOE (<http://www.epnoe.eu/>) [4].

V tem prispevku bomo predstavili najnovejše raziskave uporabe NC v papirni industriji ter površinskih modifikacijah NC za doseg specialnih lastnosti končnih papirnih materialov.

2 NANOCELULOZA KOT UTRJEVALNI, PREMAZNI ALI IZHODNI MATERIAL PRI IZDELAVI PAPIRJA ALI NANOPAPIRJA

NC kot dodatek (k celulozni pulpi ali kot premazno sredstvo [5]) pri izdelavi papirja deluje predvsem kot »lepilo« med mikrovlakni, kar vodi do naslednjih učinkov: (I) povečanje nateznih pretržnih lastnosti, (II) zmanjšanje zračne prepustnosti, (III) zmanjšanje sipanja svetlobe in s tem znižanje motnosti oz. povečanje transparentnosti in (IV) povečanje gostote papirja [6]. Potencial NC kot ojačevalca papirja temelji na veliki površini NC, ki nudi nešteto mest za povezavo preko vodikovih vezi. Nedvomno ima NFC veliko prednost pred izbiro NCC kot utrjevalni dodatek k papirju. Fleksibilnost NFC omogoča boljše prilagodljivost s površino vlaken in tako večjo povezano območje preko vodikovih vezi. Poleg tega je cenovno NFC v veliki meri bolj ugodna kot NCC. Cena NFC pridobljene iz smreke znaša približno 2.250 USD na tono, kar je okoli 2,5-krat več od cene konvencionalne

celulozne pulpe [7]. Cena NCC pa znaša med 10.000 in 20.000 USD na tono [8]. Visoki stroški proizvodnje NCC kot tudi NFC predstavljajo trenutno precejšno omejitev pri sprejemanju NC materiala na trgu, zato so trenutne raziskave usmerjene v zmanjševanje energije v procesu pridobivanja NC s poudarkom na izboljšanju predobdelovalnega procesa s pomočjo encimov.

NC lahko služi tudi kot osnova za pripravo papirja, v tem primeru imenovanega nanopapir. Postopek priprave nanopapirja je analogen tradicionalnim postopkom izdelave papirja, in sicer najpogostejši uporabljeni metodi sta (I) postopek z uparjanjem in (II) filtracija, ki ji sledi stiskanje z ogrevanim valjem [9]. Številne študije poročajo o izdelavi nanopapirja iz NFC različnih virov, ki se vsi odlikujejo po odlični natezni trdnosti (med 120 MPa in 185 MPa) in visokih elastičnih modulih (med 6,5 GPa in 17,4 GPa) [9]. Po najnovejših poročanjih nanopapir izdelan iz NCC dosega slabše mehanske lastnosti (32,8 MPa natezne trdnosti in 4,3 elastičnega modula [9]) v primerjavi z nanopapirjem izdelanim iz NFC. Po drugi strani pa je z NCC mogoče doseči popolno transparentnost nanopapirja [9]. Te edinstvene lastnosti predstavljajo NC kot odlično osnovo pri izdelavi materialov prihodnosti, kot so filter papirji za odstranjevanje virusov, biorazgradljive elektronske naprave, tanki fleksibilni zasloni, visoko zmogljivi embalažni materiali itd.

Površinsko modificiranje NC

Primerna površinska modifikacija NC je kritičnega pomena za izboljšanje kompatibilnosti in homogene disperzibilnosti v posamezni polimerni matrici ali za pridobivanje novih funkcionalnih lastnosti. Prisotnost velikega števila hidroksilnih skupin na površini NC predstavljajo platformo za številne možne kovalentne in ionske modifikacije. Med kovalentne štejemo esterifikacijo, eterifikacijo, siliniranje,

sulfoniranje, aminiranje, vezava raznih polimerov itd. in vodijo do popolnoma novih lastnosti.

Hidrofobnost: NC filmi in kompoziti so po naravi močno hidrofilni in krhki, kar pogosto omejuje njihovo uporabo. V tem kontekstu so bili raziskani številni pristopi hidrofobiranja in »mehčanja« NC. Najpogosteje uporabljene metode so kovalentna vezava različnih hidrofobnih molekul na površino NC [10] preko esterifikacije [10], siliniranja, amidiranja itd. Acetiliranje je reakcija esterifikacije hidroksilnih skupin z acetilnimi skupinami, ki zmanjšajo polarnost NC, kar pomeni, da odvisno od stopnje acetiliranja lahko dosežemo delno ali visoko hidrofobnost [11]. Delno acetilirani CNF imajo velik potencial uporabe v papirništvu. Najnovejše raziskave prikazujejo, da lahko že z majhnim dodatkom delno acetiliranih CNF v papirno pulpo istočasno dosežemo znižanje absorpcije vode do 23 % ter očitno izboljšanje mehanskih in bariernih lastnosti papirja [12]. Kot takšna, delno acetilirana NC, amofilna NC, s hidrofilnimi in hidrofobnimi površinskimi lastnostmi, ima sposobnost homogenega dispergiranja v papirni izhodni pulpi in tako doprinese k popolnoma novim lastnostim končnega papirnega produkta. Acetilirana NC vlakna imajo svojo nišo v segmentu predelave posebnega papirja, kot je papir za cigarete, filtre, ultralahek papir za varnostne namene in bankovce ter embalažni papir s specifičnimi bariernimi lastnostmi.

Protimikrobna: Protimikrobna je lastnost, ki je še posebej zaželena pri embalažnih materialih za hrano, kjer tako imenovana »aktivna« embalaža deluje na hrano in/ali okolje hrane na način, ki podaljša rok trajanja ter ohranja prehranske vrednosti živila. Princip inovacije sloni na integraciji protimikrobno aktivnih spojin v/na embalažni papirni material. Protimikrobno modificirana NC predstavlja zaradi svoje velike površine in s tem številnih možnih mest modifikacije ekološko visoko učinkovito alternativo sintetičnim protimikrobnim reagentom. Že leta 2007 so izdelali visoko protimikrobno učinkovite filme na osnovi površinsko modificirane mikrofibrilirane celuloze z oktadecildimetil (3-trimetoksisililpropil) amonijevim kloridom (ODDMAC) [13]. Zaradi kovalentne vezave ODDMAC preko etrske vezi so se proizvedeni filmi izkazali kot visoko obstojni brez sproščanja protimikrobnih substanc v okolje. Že pri zelo nizki koncentraciji ODDMAC na površini mikrofibrilirane celuloze so filmi 99 % aktivni proti *E. coli* in *S. aureus*.

V zadnjih letih številni raziskovalci poročajo o različnih vezavah različnih protimikrobnih spojin na NC vseh oblik. Tako so na primer pred kratkim uspešno kovalentno vezali penicilin na mikrofibrilirano celulozo in iz nje izdelali filme s sposobnostjo uničenja *E. coli* in *S. aureus* [14]. Saini s sodelavci

[15] predstavlja površinsko modificirane NFC s kvarternim amonijem in proizvodnjo kontaktno aktivnih protimikrobnih površin. Na BNC so uspešno vezali amino alkinne skupine in s tem posnemali lastnosti hitozana, ki je naravno protimikrobno aktiven [16]. Z vezavo amino skupine je BNC-NH₂ sposobna istočasno uničiti *E. coli* in *S. aureus*, ni pa toksična za človeške matične celice. V drugi študiji so na površini NCC polimerizirali rodanin s pomočjo železovega klorida kot iniciatorja in oksidanta [17]. Novo sintetizirani kristalni delci, ki se lahko uporabljajo kot premazno sredstvo ali aditivi k papirni masi, uspešno zavirajo rast *E. coli* in *B. subtilis*.

Mikrofibrilirana celuloza lahko uspešno služi tudi kot nanoporozni premaz za papir, ki ima sposobnost postopnega sproščanja različnih protimikrobno delujočih molekul v okolje [18].

V zadnjih nekaj letih je močno naraslo število publikacij na temo anorganskega funkcionaliziranja NC za doseg protimikrobnih lastnosti. Anorganski nanodelci, kot so Ag, Au, MgO, ZnO, TiO₂ itd., se lahko na površino NC adsorbirajo fizično ali kemično vežejo. V primeru adsorpcije lahko prihaja do sproščanja nanodelcev v okolje, kar predstavlja nevarnost za zdravje ljudi in varnost okolja [19]. Z uporabo inovativnih tehnik različnih kemijskih vezav različnih anorganskih delcev na površino NC pa je možno proizvesti nanopapir, ki ima izredne protimikrobne lastnosti in obstojnosti [19].

Negorljivost oz. zmanjšanje gorljivosti:

Vsa celulozna vlakna različnih dimenzij so hitro vnetljiva in imajo nizko toplotno odpornost, kar močno omejuje uporabo celuloze v določenih aplikacijah, kjer se zahteva visoka odpornost na toploto oz. negorljivost. Da bi zmanjšali gorljivost, se na celulozna vlakna aplicirajo razni negorljivi reagenti, ki bazirajo na halogenih, fosfatnih, amonijevih, borovih in drugih spojinah [20]. Med naštetimi so najbolj učinkovite halogenske spojine, a so hkrati nevarne za okolje. Učinkovite so tudi borove spojine, ampak se zaradi dobre topnosti v vodi izredno hitro sperejo s površine. Za okolje manj nevarna je fosforilacija, ampak je potrebna precejšnja količina fosfatnih spojin za doseg zelenih lastnosti.

Fosforilacija celuloze pomeni vezavo ene ali več anionskih fosfornih skupin na celulozni monomer preko hidroksilnih skupin, ki doprinejo k novim lastnostim celuloznega materiala [21–23]. S fosforilacijo lahko znižamo gorljivost izhodnega materiala [21], zato je fosforilacija NC kot taka še posebej zanimava pri izdelavi stenskih tapet, igrač in papirja, za katerega je zahtevana nizka gorljivost [24].

Prevodnost: Tridimenzionalna prevodna struktura nanoceluloznega papirja predstavlja možnost shranjevanja

energije, predvsem v ultra-kondenzatorjih ali baterijah. Dodatno transparentnost prevodnega nanopapirja ponuja potencial uporabe v elektroniki in optoelektroniki, kot so zasloni, zasloni na dotik in interaktivni papir [25].

Za doseg prevodnosti celuloznega nanopapirja je potrebno NC predhodno modificirati s prevodnimi materiali, kot so kovinski oksidi [25] grafen [26], ogljikove nanocevke [25], prevodni polimeri itd. ali vnesti prevodne materiale v/na že izdelan nanopapir [27].

Senzorika: Nedavne ugotovitve so pokazale, da je mogoče uporabiti tehniko »layer by layer« (plast na plast) pri izdelavi NFC/polietilenimin kompozitnega filma, ki glede na relativno vlažnost spreminja barvo [28]. NFC/polietilenimin filmi imajo potencial uporabe v izdelavi vizualnih senzorjev vlage ali interaktivnih zaščitnih papirjev.

Senzorji za sledenje mehanskih obremenitev imajo ogromen potencial širše aplikacije v infrastrukturni in avtomobilski industriji pri spremljanju zdravja. Za izdelavo takšnega senzorja, z zmožnostjo detekcije visokih obremenitev so pred kratkim uporabili tridimenzionalen porozen nanopapir, sestavljen iz grafena in nanoceluloze v elastični matrici (definiran kot raztegljiva elektroda z vgrajenim prilagodljivim nanopapirjem) [29].

3 Zaključek

Najnovejše raziskave o uporabi nanoceluloze, še posebej nanofibrilne celuloze (CNF) kot utrjevalni dodatek za izboljšavo mehanskih lastnosti papirja, so pred kratkim vzbudile veliko zanimanja na področju papirne tehnologije. V bližnji prihodnosti se pričakuje povečana potreba po modificirani CNF, še posebej v embalažni industriji, kjer se zahtevajo materiali s funkcionalnimi lastnostmi. Izvorno površino in hidrofilitno CNF je možno modificirati z različnimi metodami, kot so esterifikacija, eterifikacija, siliniranje, sulfoniranje, aminiranje, vezava raznih polimerov itd. Te številne možnosti površinskih modifikacij odpirajo nove smeri morebitne uporabe CNF pri razvoju naprednih in funkcionalnih materialov, pri čemer predvsem razvoj okolju prijaznih modifikacij zagotovo predstavlja obetavno strategijo v okviru novih trajnostnih in okolju prijaznih izdelkov, pridobljenih iz obnovljivih virov.

LITERATURA IN VIRI

- [1] Hu L, Zheng G, Yao J, Liu N, Weil B, Eskilsson M, et al. Transparent and conductive paper from nanocellulose fibers. *Energy Environ Sci* 2013;6:513.
- [2] Charreau H, Foresti ML, Vazquez A. Nanocellulose patents trends: a comprehensive review on patents on cellulose nanocrystals, microfibrillated and bacterial cellulose. *Recent Pat Nanotechnol* 2013;7:56–80.

[3] Zimmermann T, Bordeanu N, Strub E. Properties of nanofibrillated cellulose from different raw materials and its reinforcement potential. *Carbohydr Polym* 2010;79:1086–93.

[4] Persin Z, Stana-Kleinschek K, Foster TJ, Van Dam JEG, Boeriu CG, Navard P. Challenges and opportunities in polysaccharides research and technology: The EPNOE views for the next decade in the areas of materials, food and health care. *Carbohydr Polym* 2011;84:22–32.

[5] Lavoine N, Desloges I, Khelifi B, Bras J. Impact of different coating processes of microfibrillated cellulose on the mechanical and barrier properties of paper. *J Mater Sci* 2014;49:2879–93.

[6] Hassan ML, Bras J, Mauret E, Fadel SM, Hassan E a., El-Wakil N a. Palm rachis microfibrillated cellulose and oxidized-microfibrillated cellulose for improving paper sheets properties of unbeaten softwood and bagasse pulps. *Ind Crops Prod* 2015;64:9–15.

[7] <http://www.stratereasearch.se/Documents/Strategiprocessen/NordicCountriesCaseStudies2014.pdf>, 9.9.2015). Nordic Countries OECD Working Party on Nanotechnology 1. 2014.

[8] Donnell SEO. Impact of Nanotechnology in Materials on Aviation 2003:1–5.

[9] Mtibe a, Linganiso LZ, Mathew AP, Oksman K, John MJ, Anandjwala RD. A comparative study on properties of micro and nanopapers produced from cellulose and cellulose nanofibres. *Carbohydr Polym* 2015;118:1–8.

[10] Sahaqui H, Zimmermann T, Tingaut P. Hydrophobic cellulose nanopaper through a mild esterification procedure. *Cellulose* 2014;21:367–82.

[11] Božič M, Vivod V, Kavčič S, Leitgeb M, Kokol V. New findings about the lipase acetylation of nanofibrillated cellulose using acetic anhydride as acyl donor. *Carbohydr Polym* 2015;125:340–51.

[12] Mashkour M, Afra E, Resalati H, Mashkour M. Moderate surface acetylation of nanofibrillated cellulose for the improvement of paper strength and barrier properties. *RSC Adv* 2015;5:60179–87.

[13] Andresen M, Stenstad P, Mørseth T, Langsrud S, Syverud K, Johansson LS, et al. Nonleaching antimicrobial films prepared from surface-modified microfibrillated cellulose. *Biomacromolecules* 2007; 8:2149–55.

[14] Saini S, Belgacem N, Mendes J, Elegir G, Bras J. Contact antimicrobial surface obtained by chemical grafting of microfibrillated cellulose in aqueous solution limiting antibiotic release. *ACS Appl Mater Interfaces* 2015;7:18076–85.

[15] Saini S, Falco CY, Belgacem MN, Bras J. Surface cationized cellulose nanofibrils for the production of contact active antimicrobial surfaces. *Carbohydr Polym* 2015;135:239–47.

[16] Fernandes SCM, Sadocco P, Alonso-Varona A, Palomares T, Ceiza A, Silvestre AJD, et al. Bioinspired antimicrobial and biocompatible bacterial cellulose membranes obtained by surface functionalization with aminoalkyl groups. *ACS Appl Mater Interfaces* 2013;5:3290–7.

[17] Tang J, Song Y, Tanvir S, Anderson WA, Berry RM, Tam KC. Polyrhodanine coated cellulose nanocrystals - a sustainable antimicrobial agent. *ACS Sustain Chem Eng* 2015;3:150708121704008.

[18] Lavoine N, Desloges I, Manship B, Bras J. Antibacterial paperboard packaging using microfibrillated cellulose. *J Food Sci Technol* 2015.

[19] Missoum K, Sadocco P, Causio J, Belgacem MN, Bras J. Antibacterial activity and biodegradability assessment of chemically grafted nanofibrillated cellulose. *Mater Sci Eng C* 2014;45:477–83.

[20] Thakur VK, Kessler MR. Green Biorenewable Biocomposites: From Knowledge to Industrial Applications - CRC Press Book. By Apple Acad Press 2015:346.

[21] Božič M, Liu P, Mathew AP, Kokol V. Enzymatic phosphorylation of cellulose nanofibers to new highly-ions adsorbing, flame-retardant and hydroxyapatite-growth induced natural nanoparticles. Cellulose 2014;21:2713–26.

[22] Kokol V, Božič M, Vogrinčič R, Mathew AP. Characterisation and properties of homo- and heterogenously phosphorylated nanocellulose. Carbohydr Polym 2015;125:301–13.

[23] Liu P, Borrell PF, Božič M, Kokol V, Oksman K, Mathew AP. Nanocelluloses and their phosphorylated derivatives for selective adsorption of Ag⁺, Cu²⁺ and Fe³⁺ from industrial effluents. J Hazard Mater 2015;294:177–85.

[24] Ghanadpour M, Carosio F, Larsson PT, Wågberg L. Phosphorylated Cellulose Nanofibrils: A Renewable Nanomaterial for the Preparation of Intrinsically Flame-Retardant Materials. Biomacromolecules 2015.

[25] Hu L, Zheng G, Yao J, Liu N, Weil B, Eskilsson M, et al. Transparent and conductive paper from nanocellulose fibers. Energy Environ Sci 2013;6:513–8.

[26] Wang Z, Tammela P, Strømme M, Nyholm L. Nanocellulose coupled flexible polypyrrole/graphene oxide composite paper electrodes with high volumetric capacitance. Nanoscale 2015;7:3418–23.

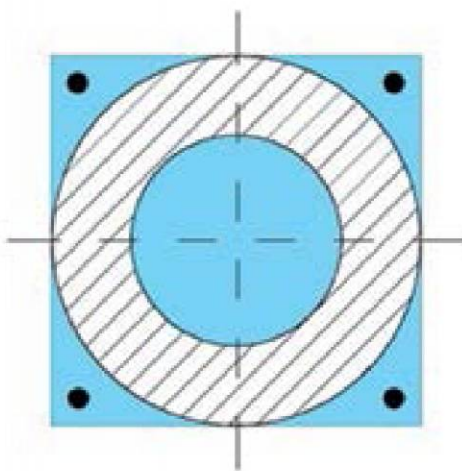
[27] Song Y, Jiang Y, Shi L, Cao S, Feng X, Miao M, et al. Solution-processed assembly of ultrathin transparent conductive cellulose nanopaper embedding AgNWs. Nanoscale 2015;7:13694–701.

[28] Granberg H, Coppel LG, Eita M, Mayolo EA de, Arwin H, Wågberg L. Dynamics of

moisture interaction with polyelectrolyte multilayers containing nanofibrillated cellulose. Nord Pulp Pap Res J 2012:496–9.

[29] Yan C, Wang J, Kang W, Cui M, Wang X, Foo CY, et al. Highly stretchable piezoresistive graphene-nanocellulose nanopaper for strain sensors. Adv Mater 2014;26:2022–7.

¹ dr. Mojca Božič in
prof. dr. Karin Stana-Kleinschek,
Inštitut za inženirske materiale in oblikovanje,
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru



KOVINO-SERVIS

Tone Žust s.p.

Zg. Besnica 1

1000 Ljubljana

GSM: 041/286-918

email: tone.zust@amis.net

Paper Coating Chemicals

Discover new dispersions
for your paper products



www.paper-chemicals.basf.com

150 years

BASF
We create chemistry