



Centrum pre rozvoj drevárskeho,  
nábytkárskeho a celulózo-  
papierenského priemyslu

# ZBORNÍK VÝSKUMNÝCH PRÁC

JANUÁR 2026

## Centrum pre rozvoj drevárskeho, nábytkárskeho a celulózo-papierenského priemyslu



- Centrum je neziskové, voľné, záujmové, dobrovoľné a nepolitické združenie. Členmi sú pracoviská výskumu a vývoja, podnikateľské a nepodnikateľské subjekty.
- Centrum bolo zapísané dňa 16. 08. 1998 na Krajskom úrade v Bratislave, odbore všeobecnej správy, podľa ustanovenia § 20i ods. 2 Občianskeho zákonníka do registra záujmových združení právnických osôb, vedeného na krajskom úrade.
- Centrum má svoje orgány: Rada riaditeľov, predseda Rady riaditeľov, podpredseda Rady riaditeľov, výkonný riaditeľ, revízori účtov.
- Centrum pre rozvoj drevárskeho, nábytkárskeho a celulózo-papierenského priemyslu spolupracuje s ostatnými Centrami založenými Ministerstvom hospodárstva SR.
- Centrum je rámcovo usmerňované Stanovami združenia.
- Cieľom je príprava strategických, koncepčných a rozvojových zámerov výskumu a vývoja, koordinácia spolupráce pri príprave, riešení a realizácii rozhodujúcich a integrovaných projektov vedy a techniky, súčinnosť pri rozvoji normalizácie a jej harmonizácii s EÚ, koordinovaný rozvoj skúšobníctva, podpora presadzovania systémov kvality, koncepčná a rozborová činnosť v odvetviach drevárskeho, nábytkárskeho a celulózo-papierenského priemyslu.



**MINISTERSTVO**  
**HOSPODÁRSTVA**  
**SLOVENSKEJ REPUBLIKY**



## Predslov

*Vážené dámy, vážení páni.*

*Aj v uplynulom období sme potvrdili svoju schopnosť reagovať na meniace sa technologické, ekonomické a spoločenské podmienky a naplňovať svoje poslanie prepájať vedecké poznatky s potrebami priemyselnej praxe. Zborník výskumných prác, ktorý sa Vám dostáva do rúk, sumarizuje výsledky vedecko-výskumnej a vývojovej činnosti VÚPC za uplynulý rok. Prezentované príspevky dokumentujú šírku odborného záberu ústavu – od optimalizácie výrobných procesov, zvyšovania kvality a funkčných vlastností papierenských a obalových materiálov, cez efektívne využívanie druhotných surovín a recyklovaných vlákien, až po vývoj nových materiálových riešení založených na lignocelulózovej biomase.*

*Osobitnú pozornosť si zaslúžia výsledky dosiahnuté v rámci budovania Centra excelentnosti LignoSilva, zameraného na komplexné a efektívne využitie lignocelulózovej biomasy, kde v budúcnosti majú byť vyvíjané a overované technologické postupy spracovania jednotlivých zložiek biomasy a hodnotené možnosti ich materiálového zhodnotenia. Schopnosť ústavu flexibilne reagovať na aktuálne spoločenské výzvy dokumentuje aj patentované riešenie v oblasti filtračných materiálov, ktoré vzniklo ako reakcia na mimoriadne okolnosti počas pandémie ochorenia COVID-19. Tento výsledok potvrdil, že odborné know-how VÚPC nachádza uplatnenie aj v oblastiach presahujúcich tradičný rámec papierenského priemyslu, vrátane ochrany zdravia a bezpečnosti.*

*Dosiahnuté výsledky sú výsledkom systematickej práce odborných kolektívov VÚPC, ako aj úzkej spolupráce s priemyselnými partnermi, univerzitami a výskumnými organizáciami doma i v zahraničí. Táto spolupráca zostáva kľúčovým predpokladom úspešného prenosu poznatkov do praxe a jednou z hlavných priorít ďalšieho rozvoja.*

*Na záver mi dovoľte všetkým kolegyniam, kolegom, partnerom a čitateľom popriať úspešný, inšpiratívny a zdravím naplnený nový rok, plný nových možností, zaujímavých projektov a spoločných úspechov. Nech je rok pred nami obdobím ďalších inovácií, spolupráce a naplnenia všetkých plánov a očakávaní.*



*Ing. Štefan Boháček, PhD.  
predseda Rady riaditeľov  
Centra pre rozvoj drevárskeho, nábytkárskeho  
a celulózo-papierenského priemyslu*

## ZBORNÍK VÝSKUMNÝCH PRÁC JANUÁR 2026

### OBSAH

1. Henrich Lübke: Procesy chladenia pri príprave drevotrieskových dosiek studeným lisovaním ..... 5
2. Vladimír Kuňa, Jozef Balberčák, Marta Páteková: Sledovanie vplyvu mletia na nábojovú hustotu vlákien a koloidných častíc vo vodách ..... 11
3. Vladimír Ihnát, Marta Páteková, Vladimír Kuňa: Hladká papierová lepenka s obsahom vlákniny z recyklovaných MDF ..... 21
4. Vladimír Ihnát, Rastislav Čerešňa, Jozef Martinka: Zvyšovanie požiarnej odolnosti dreveného recyklátu pri výrobe izolačných panelov pre difúzne otvorený systém drevostavieb ..... 26
5. Henrich Lübke: Porovnanie vlastností a použiteľnosti plastových a papierových tašiek ..... 34
6. Eduard Horban, Monika Stankovská: Analýza metód výroby bakteriálnej nanocelulózy ..... 41
7. Eduard Horban, Monika Stankovská: Analýza metódy enzýmovej hydrolýzy pri výrobe nanocelulózy ..... 52
8. Katarína Kalužná: Argumentačne orientované vyučovanie v prípravách budúcich učiteľov matematiky a informatiky ..... 64
9. Andrej Pažitný, Juraj Krišta, Alena Jandová: Vlastností papiera vyrobeného zo sekundárnych vlákien a šupiek z kukuričných zŕn ..... 70
10. Ján Talába, Elena Opálená, Štefan Boháček: Postupné uvoľňovanie minerálnych prvkov z peliet s nosičom z OCC – ako enviroabsorbentom ..... 79
11. Rastislav Čerešňa: Produktová línia vrstvených kompozitných dosiek z lisovaných drevených hoblín a papierenského kalu ..... 87
12. Daniela Majerčáková, Laura Caban: Umelá inteligencia v environmentálnej udržateľnosti ..... 93

## Procesy chladenia pri príprave drevotrieskových dosiek studeným lisovaním

Henrich Lübke\*

Výskumný ústav papiera a celulózy, Slovenský drevársky výskumný ústav, Bratislava  
[lubke.sdvu@vupc.sk](mailto:lubke.sdvu@vupc.sk)

### Abstrakt

V článku je popísaný spôsob chladenia pri príprave drevotrieskových dosiek (DTD) z prírodných aj recyklovaných triesok novou technológiou studeného lisovania po horúcom stlačení koberca podľa PCT/SK2023/000007 (ÚPV SR, 13.06.2023) s použitím polyvinylacetátového (PVAc) lepidla. Nový spôsob prináša skrátenie horúceho lisovania a zníženie lisovacích teplôt, pričom pripravené DTD uvoľnené spod lisovacieho tlaku už neodpružujú a vytvrdzujú v čase. Kinetika vytvrdzovania PVAc aj UF lepidla bola popísaná sledovaním pevnosti a modulu pružnosti v ohybe DTD v závislosti na čase po uvoľnení lisovacieho tlaku. Modelovanie procesu lisovania DTD na báze PVAc lepidla, ktorý pozostáva z prehriatia lisovaného prierezu dosky na 90°C a jeho následného chladenia v lise na teplotu, keď je doska už stabilná t.j. pod teplotu 70°C. Laboratórne testy potvrdili, že mechanické vlastnosti DTD sú v súlade s požiadavkami EN 312/3 pre trieskové dosky na vnútorné zariadenie, vrátane nábytku, na použitie v suchom prostredí.

**Kľúčové slová:** lisovanie drevotrieskových dosiek, plastifikácia triesok, studené lisovania, prírodné triesky, recyklované triesky.

### Úvod

Drevotrieskové dosky (DTD) sa vyrábajú z drevných triesok z prírodného dreva s možnosťou opätovného použitia určitého percenta triesok z odpadových aglomerovaných materiálov tak, aby boli splnené normou požadované fyzikálno-mechanické vlastnosti (Ihnát et al. 2018, Iždinský et al. 2020) a aby nebol prekročený povolený obsah voľného formaldehydu v pripravených DTD (Czarnecki et al. 2003). Na vysušené triesky sa nanáša lepidlo, triesky sa vrstvia do koberca a lisujú vo viacetážových diskontinuálnych lisocho alebo kontinuálnych lisocho pri teplote lisovacích platní až 250°C po dobu 8 až 15 s na 1 mm hrúbky dosky (de Mets 1981, Koehler 1995, Kroll 2003, Hse et al. 2008, Weinkotz 2011, 2015, Iždinský et al. 2020). Dosky po vylisovaní sú klimatizované za účelom vyrovnania teploty a vlhkosti v ich priereze. Pre výrobu uvedených dosiek sa používajú lepidlá na báze močovinoformaldehydových živíc (UF) (Iždinský et al. 2021) a melamín-močovino-formaldehydových živíc (MUF) (Hse et al. 2008) v rôznych modifikáciách s emisnou triedou formaldehydu E1. Pre DTD je povolená jednorazová emisia do 8mg/100g DTD, pričom priemerná emisia formaldehydu je do 6.5 mg na 100g DTD (DIN EN 120, 2011). Lepidlá na báze PVAc sú nepoužiteľné pre súčasnú technológiu výroby DTD založenú na UF lepidlách. Kvôli krátkym lisovacím časom by lepidlo v priebehu lisovania nevytvrdlo a pre vysoké teploty, ktoré by spôsobili roztavenie lepidla. Skúmané sú aj možnosti použitia novej hybridnej živice na báze polyméru metyléndifenyldiizokyanát/fenolformaldehydu (pMDI/PF) (Dukarska et al. 2017) alebo

udržateľné lepidlá na biologickej báze na zníženie formaldehydu (Antov et al. 2020). Navrhovaná technológia výroby DTD studením lisovaním podľa PCT/SK2023/000007 (Lübke et al. 2023) s použitím PVAc lepidla odstraňuje potrebu likvidácie starého UF lepidla pri použití až 100% recyklovaných triesok. V súčasnosti je staré lepidlo likvidované jeho hydrolyzou (Pfleiderer Unternehmensverwalt 1994, Lykidis a Grigoriou 2011, Riddiough a Kearley 2001). Navrhovaná technológia umožňuje použitie recyklovaného materiálu jednoduchým spracovaním starých DTD (Lübke et al. 2020).

Nová technológia využíva známe tepelné vlastnosti lignin-sacharidického komplexu, kedy sa lignín ohrevom plastifikuje (Bouajila et al. 2006), pričom tento proces je reverzibilný. Výhodou novej technológie je, že skrátením až odstránením horúceho lisovania v kontinuálnom lise sa výrazne obmedzí spotreba energie. V práci, podľa uvedeného patentu, je popísaná laboratórna príprava DTD hrúbky 16 mm studeným lisovaním z prírodných aj z recyklovaných triesok s použitím PVAc aj UF lepidla aj ich vzájomnej kombinácii. Dosiachnuté mechanické vlastnosti sú v súlade s požiadavkami EN 312-3 (2010) pre trieskové dosky na vnútorné zariadenie, vrátane nábytku, na použitie v suchom prostredí. Kinetika vytvrdzovania PVAc lepidla aj UF lepidla je popísaná sledovaním pevnosti v ohybe a modulu pružnosti v ohybe v závislosti na čase po uvoľnení lisovacieho tlaku studeného lisu. Pripravené DTD neodpružujú a sú schopné okamžitej manipulácie s nimi.

## **Materiál a metódy**

Prírodné drevné triesky povrchové aj stredové triesky boli získané z výrobného závodu. Získané triesky boli frakcionované sitovaním. Pre povrchové vrstvy sa použili triesky veľkosti 0,3 mm až 2 mm, pre stredové vrstvy sa použili triesky veľkosti 2 až 4 mm. Recyklované triesky boli získané dezintegráciou odpadových DTD lepených UF lepidlom s/bez povrchovej fólie. Recyklované triesky s/bez povrchovej fólie boli v experimente používané na povrchové aj stredové triesky v pomere 1:1.

### *Použité lepidlá*

Na prípravu DTD boli použité polyvinylacetátové (PVAc) lepidlo Duvilax D3 RS (Duslo a.s. Šaľa, SK) a močovino-formaldehydové lepidlo Kronores CB 1100 F (Diakol Strážske s.r.o., SK), s prídavkom 5% tužidla DAM 390 (Duslo a.s. Šaľa, SK) sušiny na sušinu lepidla. Podľa výrobcu PVAc lepidla lepenie s ohrevom sa môže uskutočniť do teploty 100°C. Uvedené vlastnosti PVAc lepidla vyhovujú technológii výroby DTD studeným lisovaním. Vodná disperzia polyvinylacetátu je nehorľavá, ľahko manipulovateľná pri výrobnom procese bez zdravotných a ekologických problémov, tiež pri používaní výrobkov z nich napr. nábytku.

## **Výsledky a diskusia**

Technologický proces výroby DTD studeným lisovaním po sušení triesok v sušiarňi sa na triesky naniesie PVAc lepidlo tak, aby výsledná teplota triesok s lepidlom bola 90-95°C. Koberec takýchto triesok sa stlačí v predlise na požadovanú hrúbku s následným prechodom do studeného lisu, kde sa lisovaná DTD schladí na teplotu pod 70°C. Po dosiahnutí požadovanej teploty sa lis otvorí a DTD prejde do karuselového chladiča dosiek v prostredí s vyhovujúcou vlhkosťou a teplotou prostredia. Proces chladenia DTD v lise závisí od teploty chladiaceho činidla a od prestupu tepla medzi chladiacou látkou a chladenou DTD. V laboratórnych

podmienkach bola DTD pripravená technológiou studeného lisovania chladená v lise o teplote oceľových platní 17,3°C.

Tab. 1: Chladenia DTD v studenom lise. Teplota DTD v strede dosky v závislosti na čase chladenia. Teplota platní studeného lisu je 17,3°C

Čas chladenia (s)	0	20	40	60	80	100	120	140	Čas ochladenia o 1°C
Teplota vzorky	93	91	88	84	80	75	70		120/23= 5,2 s

Drevotrieková doska sa ochladila na požadovanú teplotu 70°C za 120 s. Meranie bolo uskutočnené v strede prierezu dosky. Do stredu prierezu vzorky boli navŕtané dve diery o hĺbke 55 mm pre teplotné čidlá. Vzorka mala rozmer 150 x 200 mm o hrúbke 16,2 mm. Je zrejme že rýchlosť chladenia nie je v celom rozsahu sledovaných teplôt v strede dosky konštantná, poklesom teploty povrchových vrstiev v DTD sa zrýchľuje aj pokles teploty v strede dosky. Pre celkové zhodnotenie procesov chladenia a pre ich vzájomné porovnanie sme vypočítali čas za ktorý sa doska v mieste merania v strede hrúbky dosky ochladí o 1°C v celom rozsahu meraných teplôt. Pre tento uvedený prípad sa doska ochladí o 1°C za  $120/23= 5,2$  s.

Vzhľadom na skutočnosť, že nemáme lis, ktorým sa dá vzorke postupne znižovať teplota, uskutočnili sme chladenie DTD vzoriek chladenou vodou v igelitových sáčkoch. Igelitový sáčok naplnený chladenou vodou o zvolenej teplote sme priložili na povrch vzorky DTD s oboch strán. Za stáleho premiešavania vody v sáčku sme merali čas dosiahnutia v tabuľke uvedených teplôt. Po dosiahnutí teploty 70°C sme experiment ukončili.

Tab. 2: Chladenia DTD studenou vodou v igelitovom sáčku. Teplota DTD v strede dosky v závislosti na čase chladenia. Teplota chladenej vody 4,3°C, 8,8°C, 17,2°C

Čas chladenia (s)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	Čas ochladenia o 1°C
Chlad. voda 4,3°C Teplota vzorky	93	92	90	87	84	80	75	70	65		140/23=6,09" na 1°C
Chlad. voda 8,8°C Teplota vzorky	92	91	89	87	84	80	76	72	68	160/24 =6,7	180/27=6,7" na 1°C
Chlad. voda 17,2°C Teplota vzorky	92	91	90	88	85	82	79	76	72	68	180/24=7,5 na 1°C

Porovnanie hodnôt rýchlosti chladenia v lise o teplote 17,3°C a studenou vodou v igelitovom sáčku o teplote 17,2°C, je zrejme, že rýchlejšia výmena tepla je pri kontakte povrchu DTD s kovom lisovacích platní ako v pri kontakte studenej vody v igelitovom sáčku. V prípade lisu je odvod tepla zo vzorky DTD a tiež prenos tepla v kove lisu je rýchlejší ako v druhom prípade. V prípade chladenia v lise o teplote 17,3°C sa doska ochladí o 1°C za  $120/23= 5,2$  s, pri chladení vodou o teplote 17,2°C v igelitovom sáčku sa doska ochladí o 1°C za  $180/24 = 7,5$  s, čo je o 30,7% viac ako pri chladení v lise. Približne rovnaká rýchlosť chladenia vzorky DTD ako pri chladení v lise sa dosiahla pri chladení vodou v igelitovom sáčku o teplote 4,3°C. Z uvedeného môžeme usúdiť, že ak lis ochladíme na teplotu vody napr. na 4,3°C, ochladí sa vzorka DTD za 6,09 s o 30,7%, čo je 1,87 s menej, čo je 4,22 s, to znamená že vzorka DTD sa ochladí o 1°C za 4,22 s. Z 90°C na 70°C t.j. o 20°C sa ochladí za 84,4 s. To znamená, že proces lisovania by trval približne tento čas. V porovnaním so súčasnou

technológiou horúceho lisovania s horúcim lisovaním v dĺžke 180 s sa proces lisovania skrúti na polovicu, tým sa zvýši produktivita linky cca dvojnásobne.

V prípade použitia chladenia lisu studenou vodou o teplote 8,8°C ochladenie vzorky DTD o 20°C by trvalo  $6,7 - 2,06 = 4,64$  s x 20 = 92,8 s. Porovnanie s horúcim lisovaním sa proces lisovania skrúti o  $180 - 92,8 = 87,2$  s čo je 48,4% z pôvodného času lisovania:

Voda 4,3°C – 4,22 s sa ochladí o 1°C, o 20°C sa ochladí v lise za 84,4 s

Voda 8,8°C – 4,64 s sa ochladí o 1°C, o 20°C sa ochladí v lise za 92,8 s

Voda 17,3 – 7,5 s sa ochladí o 1°C, o 20°C sa ochladí v lise za 150 s

Ak je naša úvaha správna mal by sa podobný efekt dostaviť tiež pri obalení vzorky DTD do alobalu. Alobal sprostredkoval lepší prestup tepla s celým povrchom dosky ako voda v igelitovom sáčku. Hodnoty rýchlosti chladenia v tomto prípade sú lepšie – vzorka DTD sa rýchlejšie vychladí ako pri chladení samotnej DTD bez alobalu. Tieto hodnoty sa približujú k vypočítaným hodnotám pre chladenie v studenom lise.

Tab. 3: Teplota DTD v strede prierezu dosky pri obalení DTD alobalom pri chladení vodou. Teplota chladenej vody 4,3°C, 8,8°C, 17,2°C

Čas chladenia (s)	0	20	40	60	80	100	120	140	160	Čas ochladenia o 1°C
Teplo vzorky Teplota vody 4,3°C	93	90	86	82	77	73	68			120/25=4,8 na 1°C
Teplo vzorky Teplota vody 8,8°C	93	91	89	86	82	78	74	69		140/24=5,8 na 1°C
Teplo vzorky Teplota vody 17,2°C	93	91	89	87	84	81	78	74	69	160/24=6,7 na 1°C

Voda 4,3°C – za 4,8s sa ochladí o 1°C, o 20°C sa ochladí v lise za 96,04 s

Voda 8,8°C – za 5,8s sa ochladí o 1°C, o 20°C sa ochladí v lise za 116 s

Voda 17,3 – za 6,7s sa ochladí o 1°C, o 20°C sa ochladí v lise za 136 s

Uvedené hodnoty sú podľa našich predpokladov v rozmedzí hodnôt získaných chladením studenou vodou a vypočítaných pre lisovanie v studenom lise.

## Záver

Výsledky chladenia potvrdzujú kratší čas lisovania DTD v studenom lise oproti súčasnému stavu horúceho lisovania skrútený zhruba na polovičnú hodnotu. Čas lisovania sa skrúti na hodnotu okolo 90 s, v závislosti na teplote chladiaceho média. Technológia studeného lisovania tak umožní výrobcovi ušetriť energiu potrebnú na lisovanie za horúca. Skrútenie lisovacieho času na polovicu zároveň umožní tiež zvýšiť výrobnú kapacitu DTD. Pripravené DTD sú označované za ekologickejšie v porovnaní s DTD lepenými na báze UF a MUF lepidiel. Celkovo výroba DTD s použitím polyvinylacetátu (PVAc) je ekologická bez prítomnosti formaldehydu.

## Literatúra

1. AHRWEILER K.H., HEIMES B.,1992: Verfahrenzurherstellung von holzspanplattenu.dgl. und entsprechende doppelbandpressen. EP 0380527B1 Zborník výskumných prác Január 2024 ISBN 978-80-973573-6-8
2. ANTOV, P., SAVOV, V., NEYKOV, N., 2020: Sustainable bio-based adhesives for ecofriendly wood composites. A review. Wood Research 65(1): 51-62.
3. AVRAMIDIS, G., NOTHNICK, E., MILITZ, H., VIÖL, W., WOLKENHAUER, A., 2011: Accelerated curing of PVAc adhesive on plasma-treated wood veneers. European Journal of Wood and Wood Products 69: 329-332.
4. BOUAJILA, J., DOLE, P., JOLY, C., LIMARE, A., 2006: Some laws of a lignin plasticization. Journal of applied polymer science 102: 1445-1451.
5. CUI, H.W., 2007: Study on stability and filming of copolymerization emulsion PVAc-NMAurea. Journal of Nanjing forestry university 50(03): 83.
6. CZARNECKI, R., DZIURKA, D., LECKA, J., 2003: The use of recycled boards as the substitute for particles in the centre layer of particleboards. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, 6(2), 1.
7. DE METS, A., 1981: Continuous operation press. US patent No. 4420299 A. DIN EN 120, 2011: Wood-based panels. Determination of formaldehyde release. Extraction method (called perforator method).
8. DUKARSKA, D., CZARNECKI, R., DZIURKA, D., MIRSKI, R., 2017: Construction particleboards made from rapeseed straw glued with hybrid pMDI/PF resin. European Journal of Wood and Wood Products, 75, 175-184.
9. EN 310, 1993: Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength.
10. EN 312-3, 2010: Particleboards. Specifications.
11. EN 319, 1993: Particleboards and fibreboards. Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board.
12. HEINEMANN, C., MITTER, R., DUNKY, M., 2004: Thermokinetic simulation of a hot press cycle in the production of particleboard and MDF.
13. HSE, CH.Y., FU, F., PAN, H., 2008: Melamine-modified urea formaldehyde resin for bonding particleboards. Forest Products Journal 58(4): 56-61.
14. HUA, L.S., CHEN, L.W., GENG, B.J., KRISTAK, L., ANTOV, P., PEĐZIK, M., PIZZI, A., 2022: Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: A review. Journal of Materials Research and Technology 20(4630-4658).
15. IHNÁT, V., BORŮVKA, V., BABIAK, M., LÜBKE, H., SCHWARTZ, J., 2015: Straw pulp as a secondary lignocellulosic raw material and its impact on properties of insulating fiberboards. Part III. Preparation of insulated fiberboards from separately milled lignocellulosic raw materials. Wood Research 60(3): 441-450.
16. IHNÁT, V., LUBKE, 2017: Waste agglomerated wood materials as a secondary raw material for chipboards and fibreboards. Part I: Preparation and characterization of wood chips in term of their reuse. Wood Research. Vol.62(1). Pp.45-56.
17. IHNÁT, V., LÜBKE, H., RUSS, A., PAŽITNÝ, A., BORŮVKA, V., 2018: Waste agglomerated wood materials as a secondary raw material for chipboards and fibreboards.

- Part II: Preparation and characterization of wood fibers in term of their reuse. Wood Research. Wood Research 63(3): 431-442.
18. IHNAT, V., LÜBKE, H., BALBERČÁK, J., KUŇA, V., 2020: Size reduction downcycling of waste wood. Review. Wood Research 65: 205-220. Zborník výskumných prác Január 2024 ISBN 978-80-973573-6-8 16
  19. IQBAL, Z., QASIM, S., RAFI, N., 2021: Copolymerized urea formaldehyde based binder and their characterization. Journal of Chemistry and Chemical Sciences 11(12): 137-149.
  20. IŽDINSKÝ, J., VIDHOLDOVÁ, Z., REINPRECHT, L., 2020: Particleboards from recycled wood. Forests11(11): 1166.
  21. IŽDINSKÝ, J., REINPRECHT, L., VIDHOLDOVÁ, Z., 2021: Particleboards from recycled pallets. Forests12(11): 1597.
  22. KROLL D., 2003: Kontinuierlichearbeitendepresse, DE, EP 000001435288 B1. KOEHLER J., 1995: Presse Zumkontinuierlichenherstellen von bahnfoermigempressgut, DD 000000236484 A5.
  23. KRIŠŤÁK, Ľ., RÉH, R., 2021: Application of wood composites. Applied Sciences11(8): 3479.
  24. LYKIDIS, CH., GRIGORIOU, A., 2011: Quality characteristics of hydrothermally recycled particleboards using various wood recovery parameters. International Wood Products Journal 2(1): 38-43.
  25. LÜBKE, H., IHNAT, V., BOHÁČEK, Š., PAŽITNÝ, A., 2023: Method of production of wood agglomerated materials with reduced energy consumption. Pulp and Paper Research Institute in Bratislava. PCT/SK2023/000007 (ÚPV SR, 13.06.2023)
  26. LÜBKE, H., IHNAT, V., KUŇA, V., BALBERČÁK, J., 2020: A multi-stage cascade use of wood composite boards. Wood Research 65(5): 843-854.
  27. PFLEIDERER UNTERNEHMENSVERWALT, 1994: Method of recycling wood materials. Patent No. EP 0581039, DE 4224629.
  28. POPOVIĆ, M., MILJKOVIĆ, J., SIMENDIĆ, J.B., PAVLIĆEVIĆ, J., RISTIĆ, I., 2011: Curing characteristics of low emission urea-formaldehyde adhesive in the presence of wood. Wood Research 56(4): 589-600.
  29. RIDDIOUGH, S., KEARLEY, V., 2001: Wood based panels: real potential for recycling success. Pp. 321–327, Proceedings of the 5th Panel Products Symposium, Llandudno, Wales, UK.
  30. SITZLER, H.D., 1990: Pressanlage Zum Kontinuierlichen Pressen von Pressgutbahnen, DD 000000296883 A5.
  31. THOEMEN, H., HUMPHREY, P.E., 2003: Modeling the continuous pressing process for wood-based composites. Wood and Fiber Science35(3): 456–468.
  32. WEINKOTZ, S., 2015: Method for producing multi-layered lignocellulose materials having a core with special properties and at least one upper and one lower cover layer, DE, WO 002016091797 A1.

### Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy číslo APVV-21-0500.

## Sledovanie vplyvu mletia na nábojovú hustotu vlákien a koloidných častíc vo vodách

Vladimír Kuňa\*, Jozef Balberčák, Marta Páteková  
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.  
[kuna@vupc.sk](mailto:kuna@vupc.sk)

### Abstrakt

Článok je zameraný na sledovanie vplyvu mlecieho procesu na nábojovú hustotu vlákien a koloidných častíc vo vodách. V rámci riešenia boli testované štyri druhy buničín: dlhovláknitá borovicová buničina, krátkovláknitá eukalyptová buničina, krátkovláknitá listnáčová buničina breza a prechodová buničina. V rozsahu stupňa mletia od 14°SR do 35°SR bol vyhodnotený vplyv mletia na nábojovú hustotu vlákien vyjadrený ako zeta potenciál, nábojová hustota koloidných častíc, vyjadrená hodnotou PCD a vodivosť suspenzie papieroviny. Súčasťou článku je hodnotenie vplyvu mletia na fyzikálno-mechanické vlastnosti laboratórnych hárkov.

**Kľúčové slová:** buničina, mletie, nábojová hustota vlákien, zeta potenciál, PCD, fyzikálno-mechanické vlastnosti.

### Úvod

Na Slovensku sa v roku 2022 vyprodukovalo 124 000 ton hygienických papierov. Produkcia hygienických (tissue) papierov predstavovala z celkovej produkcie papierov 13,2%. Hygienické papiere tvoria významný exportný artikel, pričom až 91% produkcie sa vyváža. V roku 2022, bola špecifická spotreba elektrickej energie 700 kWh/t, špecifická spotreba tepla 17 GJ/t a špecifická spotreba vody 43 m<sup>3</sup>/t papiera. Rastúca konkurencia vo výrobe hygienických papierov, vytvára tlaky na ekonomizáciu a ekologizáciu výroby, teda aj na znižovanie nákladov na vstupné suroviny, vodu a energie (de Assis a kol. 2018, Balberčák a kol. 2022). Na základe stanovenia nábojovej hustoty vlákien a koloidných častíc v technologických vodách je možné optimalizovať aplikáciu papierenských pomocných prostriedkov, proces prípravy a spracovania vlákien, rýchlosť odvodnenia suspenzie na site papierenského stroja a spotrebu energie pri mletí vlákien a sušení papiera, k čomu má prispieť aj tento výskum.

Pri spracovaní vlákien hrajú hlavnú úlohu hydrodynamické mechanizmy, významnú úlohu zohrávajú chemické a koloidné faktory, ktoré významne ovplyvňujú správanie suspenzie vlákien a koloidných častíc. Povrch celulóзовých vlákien vo vode vykazuje negatívny elektrický náboj, ktorý vzniká ionizáciou karboxylových skupín a výmenou protónu hydroxylových skupín. Koloidné rozpustené častice vo vodných suspenziách nesú náboj, ak majú na povrchu disociovateľné funkčné skupiny alebo vykazujú adsorpciu iónov na povrchu častíc prostredníctvom Van der Walsových síl.

Zeta potenciál je elektrický náboj, ktorý vzniká vo fázových hraniciach medzi pevnými látkami a kvapalinami. Pri výrobe papiera predstavuje elektrokinetický potenciál, ktorý vzniká na rozhraní medzi povrchovou vrstvou vlákna alebo častice a okolitým vodným prostredím. Elektrický náboj vznikajúci na povrchu, je dôsledkom voľných elektrónov v roztoku, ktoré

majú schopnosť preskupovať sa do oblasti s nenulovým nábojom, ktorý existuje v blízkosti rozhrania vlákno-kvapalina.

Veľkosť zeta potenciálu udáva potenciálnu stabilitu koloidného systému. Ak majú všetky častice v suspenzii veľký negatívny alebo pozitívny zeta potenciál, potom budú mať tendenciu sa navzájom odpudzovať a častice nebudú mať tendenciu spájať sa. Ak však častice majú nízke hodnoty zeta potenciálu, potom nebude žiadna sila, ktorá by zabránila časticiam spojiť sa a flokulovať. Všeobecná deliaca čiara medzi stabilnými a nestabilnými suspenziami sa všeobecne berie buď pri +30 alebo -30 mV. Častice so zeta potenciálom pozitívnejším než +30 mV alebo negatívnejším než -30 mV sa normálne považujú za stabilné.

Nábojova hustota koloidných častíc rozpustených vo vodách sa vyjadruje mernou aniónovou alebo kationovou spotrebou, podľa toho, aký polyelektrolyt sa použil pri titrácii. Ako kationový polyelektrolyt sa zvyčajne používa polydiallyldimetylammóniumchlorid a ako aniónový polyelektrolyt sa používa polyvinylsulfát draselný (KPVS). Ak je sústava v elektrostatickej rovnováhe, je náboj koloidných častíc vyvážený opačným nábojom okolitého prostredia. Oddelenie protiiónov oscilačným pohybom, spôsobí porušenie nábojov, pričom dochádza ku elektrokinetickému javu – vzniká prúdový potenciál. Indukovaný prúdový potenciál závisí od mnohých faktorov ako sú merná vodivosť, veľkosť a tvar častíc, viskozita, hodnota pH a teplota. Veľkosť nábojovej hustoty sa meria nepriamo, polyelektrolytickou titráciou uvoľnených iónov štandardom s opačným nábojom. Aplikovaný polyelektrolyt neutralizuje náboj koloidných častíc, pričom vzniká polymérny komplex. Tento bod neutrálneho náboja sa nazýva izoelektrickým bodom a je zároveň koncom titrácie. Z množstva spotrebovaného štandardného polyelektrolytu, môžeme vypočítať mernú hustotu náboja koloidnej častice:

$$q = \frac{V \cdot c \cdot 1000}{v} \quad (\mu\text{eq/l}) \quad (1)$$

kde: V – objem spotrebovaného elektrolytu, c – koncentrácia polyelektrolytu ( $\text{mol/dm}^3$ ), 1000 – prepočítavací faktor, v – objem vzorky 10 ml.

## **Materiál a metódy**

### *Buničina*

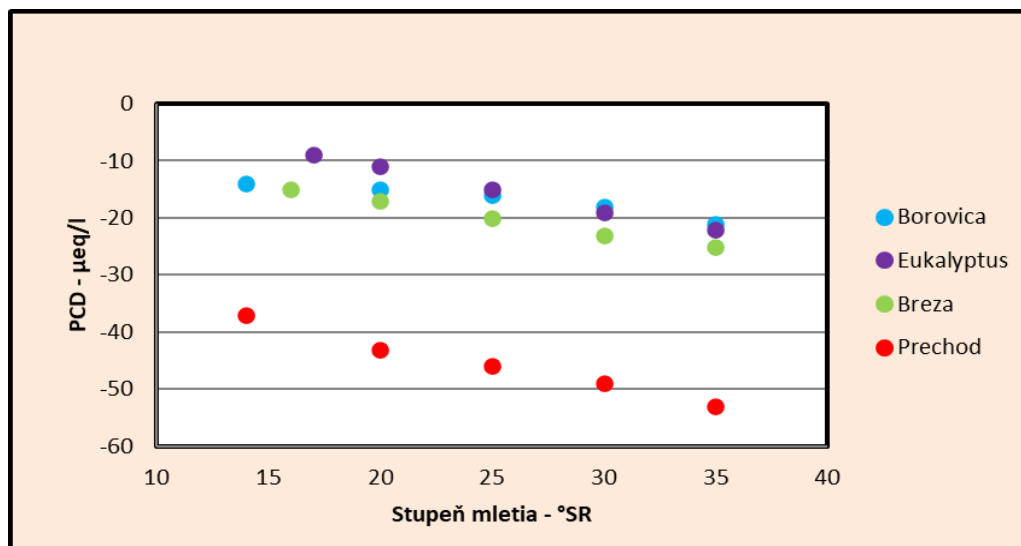
Na laboratórne testovanie boli vybrané buničiny, ktoré sa najčastejšie používajú v zanáške pri výrobe hygienických papierov. Vzorky buničín boli rozvláknené na laboratórnom rozvlákňovači Escher-Wyss za štandardných podmienok po dobu 5 min. Mletie buničín bolo vykonané na laboratórnom zariadení Valley holander, pri konzistencii 2% a objeme suspenzie  $22,5 \text{ dm}^3$ . Počas mletia boli pri dosiahnutí príslušného stupňa mletia odoberané vzorky suspenzie vodolátky na stanovenie hodnôt zeta potenciálu vlákien, nábojovej hustoty koloidných látok vo vodách PCD a vodivosti. Súčasťou hodnotenia kvality suspenzie vlákien, bolo stanovenie aritmetickej a váženej dĺžky vlákien na prístroji ADV3.

### *Použitie metódy*

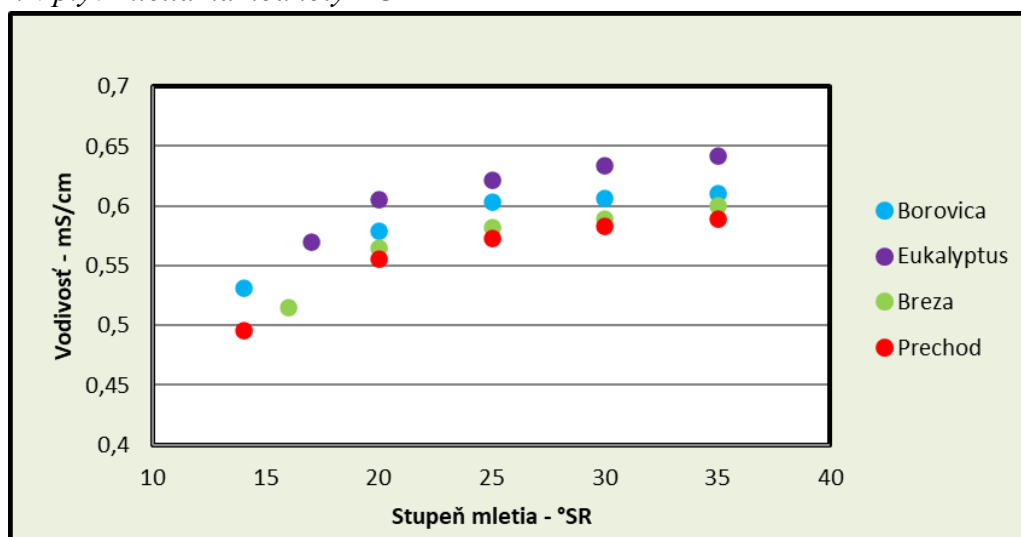
Z takto pripravenej suspenzie vlákien boli formované laboratórne hárky s plošnou hmotnosťou  $70 \text{ g/m}^2$  na hárkovači Rapid-Köthen podľa DIN 54358-1 (1981) a ISO 5269-2







Obr. 2: Vplyv mletia na hodnoty PCD



Obr. 3: Vplyv mletia na hodnoty vodivosti

#### Vyhodnotenie vplyvu mletia na nábojovú hustotu

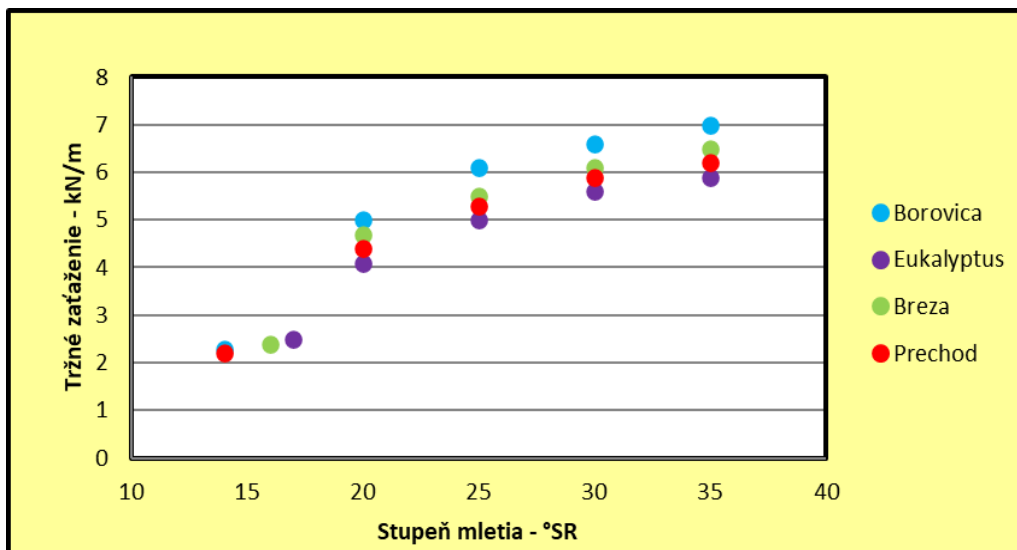
Z nameraných hodnôt vyplýva, že zvyšovaním stupňa mletia, rastie hodnota zeta potenciálu. Najväčší nárast je do stupňa mletia 25°SR, kedy je nárast hodnôt výrazný. Zvyšovanie stupňa mletia od 25°SR do 35°SR, spôsobilo už len minimálny nárast zeta potenciálu. Najnižšie hodnoty boli namerané u krátkovláknitej eukalyptovej buničine a najvyššie hodnoty u dlhovláknitej borovicovej buničine .

Nábojová hustota vlákien (hodnota PCD) zvyšovaním stupňa mletia klesá priamo úmerne. Najnižšie hodnoty boli namerané u prechodovej dlhovláknitej buničiny. Hodnoty PCD buničín eukalyptus, breza a borovica sa nachádzajú v rovnakej oblasti od -10,0 µeq/l do -25,0 µeq/l. Namerané hodnoty vodivosti sú v úzkej korelácii s nameranými hodnotami zeta potenciálu a so zvyšovaním stupňa mletia rastú.

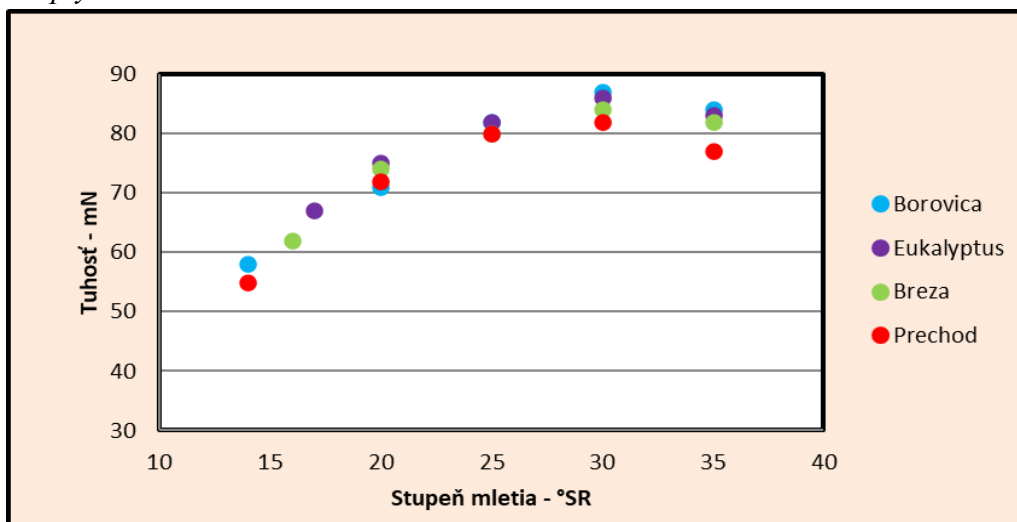
#### Vplyv mletia na fyzikálno-mechanické vlastnosti buničín

Vplyv stupňa mletia na hodnoty tržného zaťaženia je znázornený na obr.4. Z nameraných hodnôt vyplýva, že tržné zaťaženie všetkých štyroch buničín rastie v celom rozsahu mletia od

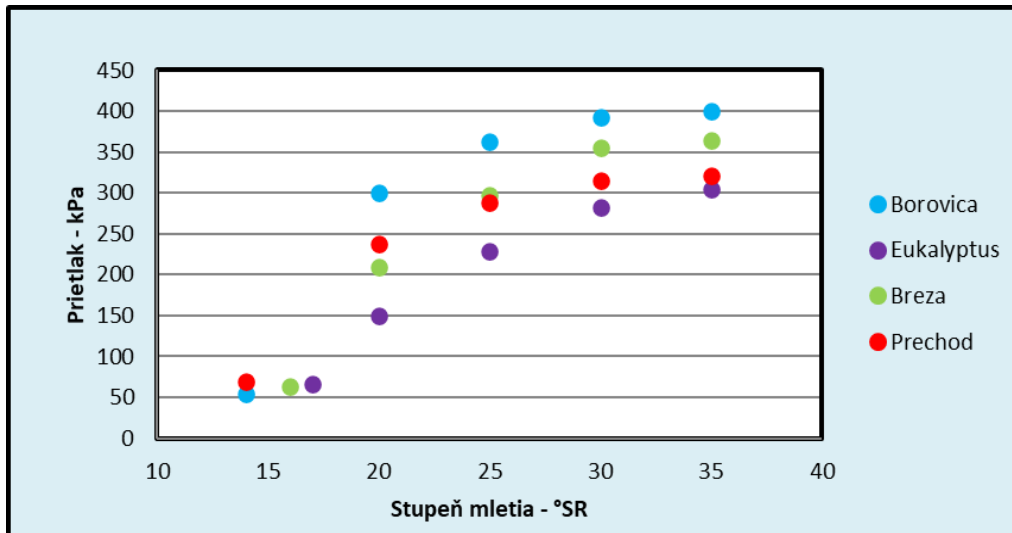
14°SR do 35°SR. Najvyššie hodnoty boli namerané u dlhovláknitej borovicovej buničiny. Najnižšie hodnota tržného zaťaženia dosahovala eukalyptová buničina. Vplyv stupňa mletia na hodnoty tuhosti, vybraných druhov buničín, je znázornená na obr. 5. Z nameraných hodnôt vyplýva, že tuhosť rastie do stupňa mletia 30°SR a potom má klesajúcu tendenciu. Najvyššie hodnoty tuhosti dosiahla dlhovláknitá borovicová buničina a najnižšie hodnoty prechodová buničina. Závislosť pevnosti v prietlaku od stupňa mletia, sledovaných buničín je znázornená na obr. 6. Krivka nárastu pevnosti v prietlaku je najstrmšia do stupňa mletia 30°SR. S ďalším zvyšovaním stupňa mletia je nárast parametrov miernejší. Najvyššie hodnoty pevnosti v prietlaku dosiahla dlhovláknitá borovicová buničina a naopak najnižšie hodnoty boli namerané u eukalyptovej buničiny.



Obr. 4: Vplyv mletia na tržné zaťaženie



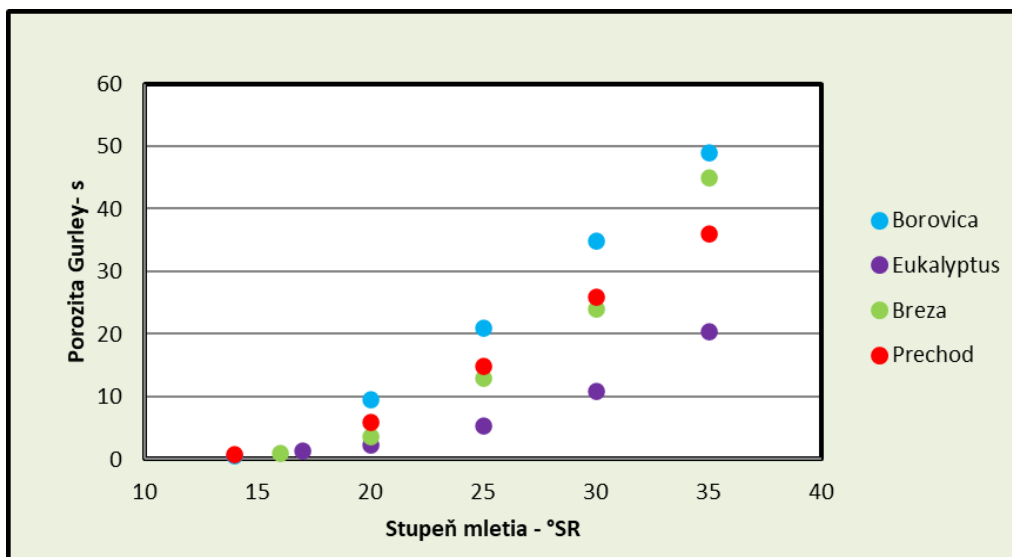
Obr. 5: Vplyv mletia na hodnoty tuhosti



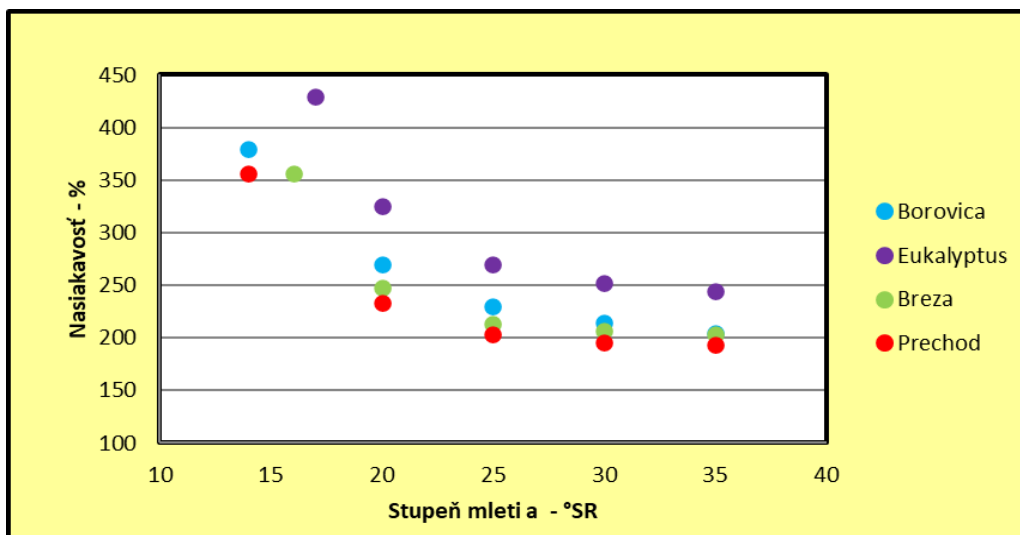
Obr. 6: Vplyv mletia na pevnosť v prietlaku

Priepustnosť laboratórných hárkov pre vzduch obr. 7, bola stanovená meraním porozity Gurley. So zvyšovaním stupňa mletia priepustnosť pre vzduch klesá, teda porosita Gurley rastie. Najvyššiu priepustnosť pre vzduch má krátkovláknitá eukalyptová buničina a najnižšiu dlhovláknitá borovicová buničina.

Schopnosť laboratórných hárkov adsorbovať vodu sa vyjadruje hodnotou nasiakavosti. Zvyšovaním stupňa mletia sa schopnosť buničín adsorbovať vodu znižuje obr. 8, pričom krivka znižovania je najstrmšia po stupeň mletia 25°SR potom je pokles hodnôt miernejší. Z analyzovaných buničín, vykazovala najvyššiu nasiakavosť eukalyptová buničina a najnižšiu prechodová buničina.

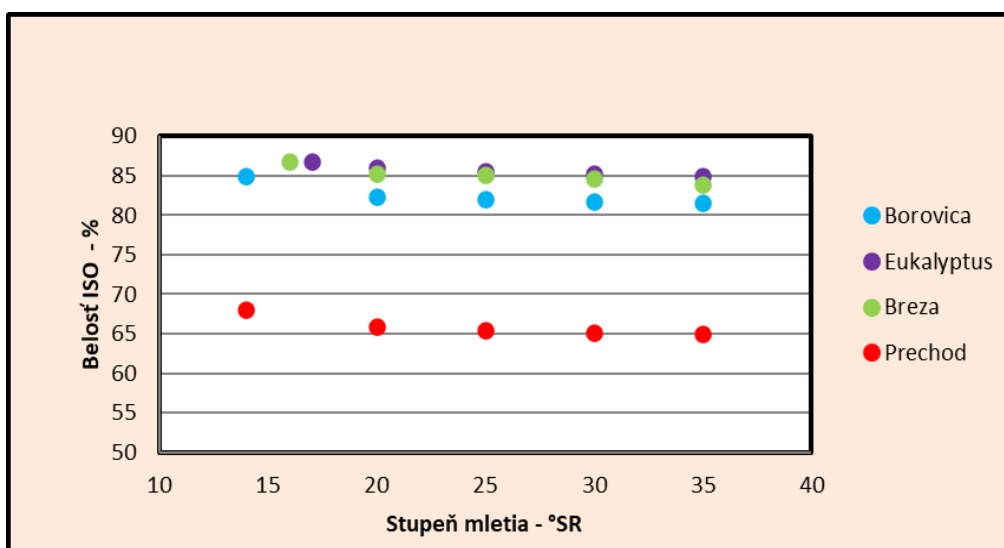


Obr. 7: Vplyv mletia na hodnoty porozity



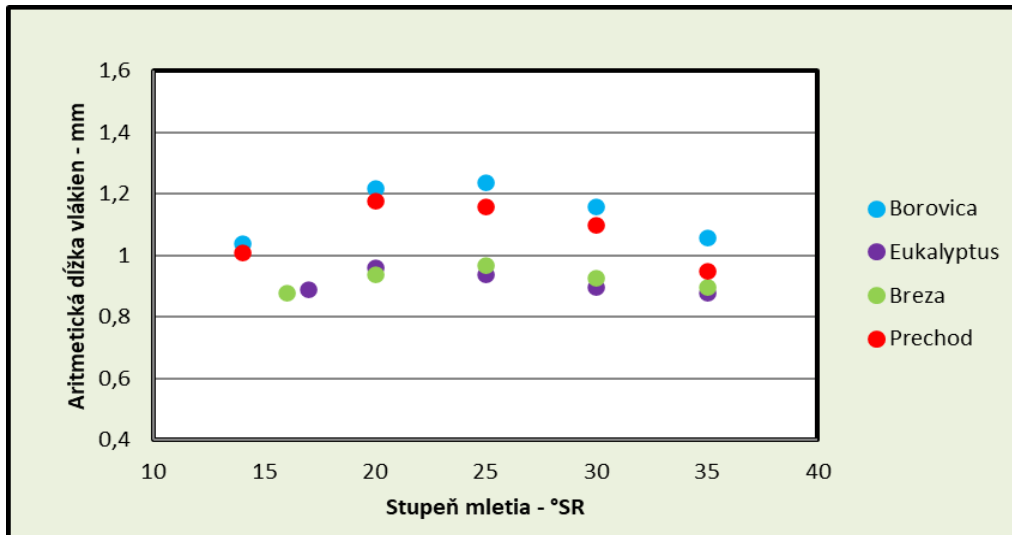
Obr. 8: Vplyv mletia na hodnoty nasiakavosti

Vplyv mletia na belosť laboratórných hárkov, je znázornená na obr. 9. So zvyšovaním stupňa mletia dochádza k znižovaniu belosti. Zo sledovaných buničín vykazovali najvyššiu belosť krátkovláknitá eukalyptová buničina a krátkovláknitá brezová buničina. Najnižšiu belosť mala prechodová buničina. V rozsahu sledovaného stupňa mletia, mala najvyšší pokles belosti dlhovláknitá buničina - borovica o 3,3%, prechodová buničina o 3%, krátkovláknitá brezová buničina o 2,9% a najmenší pokles bol u krátkovláknitej eukalyptovej buničiny 1,9%.

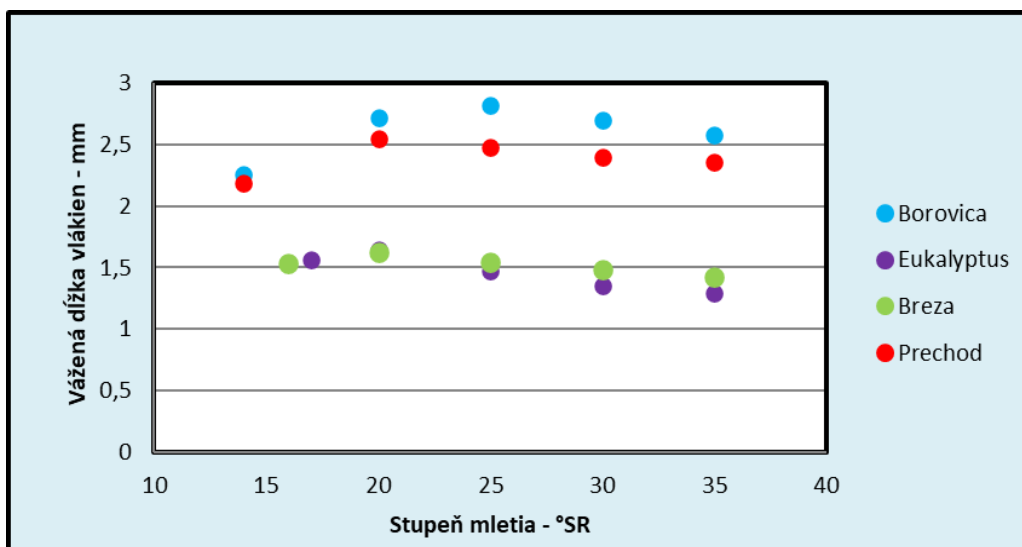


Obr. 9: Vplyv mletia na hodnoty belosti

Vplyv mlecieho procesu, na dĺžku vlákien analyzovaných druhov buničín, je znázornený na obr. 10 a obr. 11. Z nameraných výsledkov vyplýva, že v prvej fáze mletia buničín na zariadení Valley holander, dochádza hlavne k fibrilácii vlákien, čo sa prejavilo nárastom dĺžky vlákien do stupňa mletia 20 až 25°SR. ďalším mletím už dochádza ku kráteniu vlákien, čo sa prejavilo znižovaním hodnôt aritmetickej aj váženej dĺžky. Najväčšiu dĺžku vlákien, zo sledovaných buničín mala dlhovláknitá ihličnáčová buničina - borovica a najmenšiu dĺžku vlákien mala eukalyptová buničina.



Obr. 10: Vplyv mletia na aritmetickú dĺžku vlákien



Obr. 11: Vplyv mletia na váženú dĺžku vlákien

## Závery

V laboratórnych podmienkach, bol sledovaný vplyv mlecieho procesu na nábojovú hustotu vybraných druhov buničín a nábojovú hustotu koloidných častíc vo vodách. Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že zvyšovaním stupňa mletia, rastie hodnota zeta potenciálu. Najväčší nárast je do stupňa mletia 25°SR. Zvyšovanie stupňa mletia od 25°SR do 35°SR, spôsobilo už len minimálny nárast zeta potenciálu. Najnižšie hodnoty boli namerané u krátkovláknitej eukalyptovej buničine a najvyššie hodnoty u dlhovláknitej ihličnáčovej buničine - borovica. Nábojová hustota koloidných častíc vo vodách hodnota PCD, zvyšovaním stupňa mletia klesá. Najnižšie hodnoty boli namerané u prechodovej dlhovláknitej buničiny. Hodnoty PCD buničín eukalyptus, borovica a breza, v rozsahu stupňa mletia do 35°SR, sa nachádza v oblasti od -10,0  $\mu\text{eq/l}$  do -25,0  $\mu\text{eq/l}$ .

Z fyzikálno-mechanických vlastností vlákien a laboratórnych hárkov. Tržné zaťaženie a pevnosť v prietlaku, rastú v celom rozsahu mletia, kým tuhosť len do 30°SR a potom má klesajúcu tendenciu. Zo sledovaných buničín má najvyššie pevnostné parametre dlhovláknitá

borovicová buničina. Hodnoty porozity Gurley rastú v celom rozsahu mletia, čo znamená, že papier sa stane menej priepustným. Nasiakavosť buničín vplyvom mletia klesá, pričom najväčší pokles je do stupňa mletia 25°SR. Potom je pokles hodnôt miernejší. Vplyvom mletia sa belosť buničín znižuje. U sledovaných buničín, predstavuje pokles belosti v rozsahu mletia 1,9 až 3,3%.

Z nameraných hodnôt dĺžky vlákien vyplýva, že v prvej fáze mletia buničín na zariadení Valley holander, dochádza hlavne k fibrilácii vlákien, čo sa prejavilo nárastom dĺžky vlákien do stupňa mletia 20 až 25°SR. Ďalším mletím už dochádza ku kráteniu vlákien, čo sa prejavilo znižovaním hodnôt aritmetickej aj váženej dĺžky. Najväčšiu dĺžku vlákien, zo sledovaných buničín mala dlhovláknitá borovicová buničina a najmenšiu eukalyptová buničina.

### **Pod'akovanie**

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy číslo APVV-23-0623.

### **Použitá literatúra**

1. Balberčák, J., Kuňa, V., Boháček, Š., Ihnát, V., 2022: Reduction of the softwood long fibre pulp addition in tissue production. Case study. Wood Research 67(3): 447-459.
2. de Assis, T., Reisinger, L.W., Pal, L., Pawlak, J., Jameel, H., Gonzalez, R.W., 2018: Understanding the effect of machine technology and cellulosic fibers on tissue properties – A review. BioResources 13(2): 4593-4629.
3. DIN 54358-1, 1981: Testing of pulps; preparation of laboratory sheets for physical testing; Rapid-Köthen method.
4. ISO 5269-2, 2004: Pulps. Preparation of laboratory sheets for physical testing. Part 2: Rapid-Köthen method.
5. ISO 5264-3, 1979: Pulps. Laboratory beating. Part 3: Jokro mill method.
6. ISO 5637, 1989: Paper and board. Determination of water absorption after immersion in water.
7. ISO 5628, 2019: Paper and board. Determination of bending stiffness. General principles for two-point, three-point and four-point methods.
8. ISO 1924-2, 2008: Paper and board. Determination of tensile properties. Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min).
9. ISO 2758, 2014: Paper. Determination of bursting strength.

## Hladká papierová lepenka s obsahom vlákniiny z recyklovaných MDF

Vladimír Ihnát\*, Páteková, M., Vladimír Kuňa  
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s., Bratislava  
[ihnmat@vupc.sk](mailto:ihnmat@vupc.sk)

### Abstrakt

Predkladaný článok sa zaoberá spôsobom prípravy hrubších technických papierov z recyklovaných drevovláknitých materiálov bez použitia chemickej várky a recyklácie papiera, hlavne kartónov (OCC), ktoré sa pridávajú na zvýšenie väzbovosti vlákniiny z odpadového dreva. Hladká papierová lepenka plošnej hmotnosti 1150 g/m<sup>2</sup> a hrúbky 1,3 až 2,2 mm s obsahom vlákniiny z recyklovaných drevovláknitých materiálov pozostáva z 50% hm. vlákniiny získanej z recyklovaných drevovláknitých materiálov a 50% recyklovaných kartónov (OCC). Pripravuje sa štandardným mokrým spôsobom, ktorému predchádza spoločné miešanie alebo domieľanie drevnej vlákniiny a papieroviny za účelom dosiahnuť minimálne 16°SR (stupeň Schoper-Riegler). Fyzikálno-mechanické vlastnosti lepeniek boli stanovené podľa štandardov CEPI. Aplikované boli postupy pre tržné zaťaženie podľa ISO 1924-2 (2008), prietlak podľa ISO 2758 (2014), prieraz podľa ASTM D781-68(1973), absorpcia vody podľa ISO 5637 (1989) a porozita podľa TAPPI Test method T460.

**Kľúčové slová:** papierová lepenka, recyklácia, drevovláknité materiály, OCC, vlákniina, papierovina, stupeň Schoper-Riegler.

### Úvod

Strojné lepenky hladké sa zväčša vyrábajú z recyklovaných papierových materiálov o plošnej hmotnosti cca 300-600 g/m<sup>2</sup>. Vyrábajú sa mokrým spôsobom, vytlačením vody pomocou lisovacích valcov a následným sušením, pričom ich hrúbka závisí od plošného nánosu vlákna. Hladké lepenky s hrúbkou nad 1 mm je jednoduchšie vyrábať zlepovaním, práve kvôli problematickému odvodneniu lisovaného koberca a nízkej schopnosti recyklovanej papieroviny odpružiť. Lepenky väčšej hrúbky a vyššej objemovej hmotnosti sa vyrábajú kusovo v archoch.

Materiálová recyklácia drevovláknitých dosiek, hlavne polotvrdých nábytkových dosiek (MDF) je problematická a neumožňuje pridávanie väčšieho množstva recyklovaného vlákna do novej produkcie, ktorá by tak nespĺňala pevnostné požiadavky. Recyklované drevné vlákno je kratšie a menej pevné, má nižší pomer dĺžky k hrúbke, čo znamená nižšiu schopnosť sa vzájomne previazať pri tvorbe dosiek (Zimmer a Bachmann 2023). Avšak recyklovanú drevnú vlákniinu je možné ľahko získať varením aj za atmosférického tlaku a následným rozvláknením (Zeng a kol. 2018). Recyklovaná drevná vlákniina stále obsahuje lignín (25-35%) ako prírodné, prevažne ihličnaté drevo, z ktorého je vyrobená a tak väzbová schopnosť vlákna bez prídavku lepidla je nižšia ako je to u papierenských vlákniin.

Recyklácia kartónov (OCC) je technologicky nenáročná a uskutočňuje sa ich namáčaním vo vode a rozvláknovaním, ktoré pripomína skôr neustále miešanie, pričom sa jednotlivé vlákna

z polochemickej buničiny od seba samovoľne oddeľujú (Rahmaninia a Khosravani 2015). Takto rozvláknené OCC dosahuje 30-35°SH (Schopper- Riegler) a má dobrú väzobnú schopnosť. Odvodňovanie OCC o použiteľnej plošnej hmotnosti do 1200 g/m<sup>2</sup> pri hrúbke nad 1,5 mm je problematické a tak je výhodnejšie z toho vyrobenú hladkú lepenku zlepovať z tenších vrstiev.

V predmetnom článku je opísaný laboratórny spôsob výroby a testovania hárkov pripravených podľa prihlášky úžitkového vzoru PUV 50016-2025 (ÚPV SR, 24.04.2025), ktorého prihlasovateľom je Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s. v Bratislave. Podstatou technického riešenia je materiálové zhodnotenie ťažšie využiteľnej recyklovanej vlákničky z odpadových drevovláknitých materiálov, ktorej priemerná dĺžka vlákna je síce kratšia oproti pôvodnej, aj jeho pevnosť je nižšia, ale stále dosahuje pevnosti potrebné pre technický papier, ak sa mieša s OCC v množstve maximálne 50% hmotnostných, ktorý zabezpečuje potrebnú väzbovosť bez prídavku lepidiel. Miešaním s OCC je zároveň možné z recyklovaného dreveného vlákna tvoriť vlákničky koberec tenší ako 3 mm, čo sú najtenšie dostupné drevovláknité materiály. Výhodou je, že vláknička získaná z odpadových drevovláknitých materiálov je aj v tom v najhoršom prípade, po prvotnom varení a po defibrácii na diskovom rafineri, rozvláknená už na 12-16°SH v závislosti na použiteľnom lepidle (Ihnát a kol. 2018) a nie je potrebné jej domieľanie, čo šetrí energiu na to potrebnú. Vzájomné miešanie recyklovanej drevenej vlákničky a recyklovaných kartónov (OCC) je možné previesť laboratórne aspoň krátkym prechodom cez Valley holander alebo v prevádzke cez kuželové mlyny.

## **Materiál**

Odpadová drevovláknitá doska strednej hustoty (MDF) vo vzducho-suchom stave cca 667 kg/m<sup>3</sup> sa ponechala máčať vo vlažnej vode po dobu 24 hod. Množstvo 300 g a.s. sa mlelo vo vode 10 l vody v rozvláknovačom zariadení. Takýmto 10 min mletím sa dosiahlo 9°SR (stupeň Schopper- Riegler). Domieľanie na Valley holandri 450 g a.s. v 22,5 l vody po dobu 1 h zjemnilo vlákno a dosiahlo sa 11°SR. Rozvláknením OCC v rozvláknovači po dobu 10 min sa priamo dosiahlo 36°SR a nebola potrebná ďalšia úprava. Takto pripravená drevená vláknička a papierovina z OCC sa zmiešala v pomere 1:1.

Príprava laboratórnych hárkov Ø200 mm hladkej lepenky s požadovanou plošnou hmotnosťou 1150 g/m<sup>2</sup> sa uskutočnila tak, že navážka vlákna sa rozmiešala v 6 litroch vody. Za intenzívneho miešania sa voda vákuovo odfiltrovala cez sito. Odfiltrovaný hárok mal asi 5-7 mm a vyžadovalo sa dodatočné odstránenie vody. Hárok sa odvodnil za studena s filcami z obidvoch strán pomocou dištančných podložiek. Hárok sa vysušil lisovaním za tepla pri minimálne 100°C s dištančnými podložkami presnej hrúbky.

## **Metódy testovania**

Na stanovenie fyzikálno-mechanických vlastností sa použili testy podľa štandardov CEPI. Ako inšpiratívne, boli aplikované postupy pre tržné zaťaženie podľa ISO 1924-2, 2008, prietlak podľa ISO 2758 (2014), absorpcia vody podľa ISO 5637 (1989) a porozita podľa TAPPI Test method T460.

### *Meranie hrúbky a stanovenie plošnej hmotnosti*

Na meranie hrúbky sa použilo digitálne meracie zariadenie Lorentona a Wettreho (SE). Hrúbka (mm) sa merala a zaznamenala na hárkoch na vyznačených bodoch, tam kde sa neskôr merali vlastnosti (nedeštrukčne porozita a deštrukčne prietlak a prieraz). Hrúbka na skúšobných pásičkoch 15 mm x 160 mm určených pre stanovenie tržnej pevnosti sa merala v strede pre každú vzorku osobitne. Pre tieto skúšobné vzorky sa osobitne merala aj hmotnosť s presnosťou na tisícinu gramu. Ostatné hárky sa podobne ako pri meraní hrúbky vážili vcelku. Plošná hmotnosť ( $\text{g/m}^2$ ) bola definovaná ako podiel hmotnosti na štvorcový meter.

### *Meranie tržného zaťaženia, prietlaku a prierazu*

Meranie tržnej pevnosti sa uskutočnilo na zariadení INSTRON model 1011 s posunom 10 mm/min a vzdialenosťou medzi upínacími čeľustami 100 mm. Skúšobné vzorky boli vyhotovené na rozmer 15 mm x 160 mm. Zariadenie zaznamenáva silu potrebnú na pretrhnutie vzorky (N) a pomerné predĺženie vzorky do roztrhnutia (%). Tržné zaťaženie pre vzorku (vzdialenosť čeľustí 100 mm) vztiahnutá na 1 m dĺžky je určená podľa vzťahu (1). Index tržného zaťaženia je vyjadrený ako pomer tržnej pevnosti a plošnej hmotnosti.

$$\text{Tržné zaťaženie (N/m)} = \text{Tržná pevnosť (N)} / \text{Šírka pásika (0,015 m)} \quad (1)$$

$$\text{Index tržného zaťaženia (Nm/g)} = \text{Tržné zaťaženie (N/m)} / \text{Plošná hmotnosť (g/m}^2\text{)} \quad (2)$$

Na stanovenie prietlaku bolo použité zariadenie Lorentzen & Wettre Burst-O-Matic (SE). Zariadenie je nastavené podľa ISO 2758: 2014 Paper. Determination of bursting strength. Táto medzinárodná norma špecifikuje metódu merania pevnosti v roztrhnutí (prietlaku) papiera vystaveného zvyšujúcemu sa hydraulickému tlaku na malej kruhovej ploche, na ktorú tlačí membrána. Je použiteľná pre papier s pevnosťou v roztrhnutí v rozsahu 70 kPa až 1 400 kPa. Zariadenie meria a priamo zaznamenáva pevnosť v prietlaku (Burst strength) (kPa). Index prietlaku (Burst index) sa definuje ako podiel pevnosti v prietlaku a plošnej hmotnosti:

$$\text{Burst index (kPa.m}^2\text{/g)} = \text{Burst strength (kPa)} / \text{Plošná hmotnosť (g/m}^2\text{)} \quad (3)$$

Na meranie prierazu (J) podľa ASTM D781-68(1973): Standard Test Methods for Puncture and Stiffness of Paperboard and Corrugated and Solid Fiberboard bol použitý Lhomargy Puncture Tester. Zariadenie je pôvodne určené na meranie energie potrebnej na prerazenie vlnitej lepenky pomocou prerážacej hlavice v tvare lomeného trojuholníkového ihlana pripevneného k pevnému ramenu, ktoré sa pod zaťažením pohybuje oblúkom.

### *Meranie porozity Gurley a absorpcie vody*

Na meranie porozity (s) bol použitý Densometer Lorentzen & Wettre (SE) nastavený podľa TAPPI Test method T460 om-02 Air resistance of paper (Gurley method). Táto metóda sa používa na meranie odporu vzduchu približne  $6,45 \text{ cm}^2$  kruhovej plochy papiera s použitím tlakového rozdielu 1,22 kPa. Odporúčany rozsah prístroja s kvapalinovou kolónou je od 5 do 1800 s na 100 ml objem valca.

Absorpcia vody bola stanovená podľa ISO 5637 (1989) Paper and board. Determination of water absorption after immersion in water. Váha vzorky bola počiatočne odvážená ( $m_0$ ) a ponorená do vody na 10 s. Po 2 min bola vzorka prevážaná ( $m_1$ ). Prijem vody bol stanovený:

$$\text{Absorpcia vody (\%)} = \frac{m_1 - m_0}{m_0} * 100 \quad (4)$$

### Výsledky a diskusia

Takto pripravené hárky papiera (obr.1) dosiahli fyzikálno-mechanické vlastnosti podľa tab. 1. Sú podstatne hrubšie ako bežne strojovo vyrábaná lepenky (cca 0,4- 1,4 mm) a majú oproti nim výrazne nižšiu nasiakavosť. Nasiakavosť bežne strojovo vyrábaných lepeniek sa pohybuje od 120% aj do 150%. Lepenky s prídavkom dreveného vlákna predstavujú skôr medzistupeň k tvrdým drevovláknitým doskám a sú vhodné ako prekladové podložky alebo podkladový materiál v kombinácii s inými materiálmi.



Obr. 1: Hladké lepenky z OCC s prídavkom vlákna z recyklovaných drevovláknitých materiálov

Tab. 1: Základné mechanicko- fyzikálne vlastnosti pripravených hladkých lepeniek vyrobených z vlákna z recyklovaných drevovláknitých materiálov a recyklovaného OCC v pomere 1:1

Plošná hmotnosť (g/m <sup>2</sup> ) ISO 536:2019	Hrúbka (mm) ISO 534:2011	Index v ťahu (Nm/g) ISO 1924-2:2008	Index prietlaku (Burst) (kPa * m <sup>2</sup> /g) ISO 2758:2014	Prieraz (J) ASTM D781-68(1973)	Gurley prievzdušnosť (s) ISO 5636-5:2013	Nasiakavosť (%) ISO 5637:1989
<b>1150</b>	<b>1,3</b>	24,0	1,22	4,9	105	52
	<b>1,5</b>	22,1	1,05	5,0	90	58
	<b>2,0</b>	16,7	0,86	5,1	33	77
	<b>2,2</b>	14,2	0,77	5,2	27	92

\* V tabuľke sú uvedené priemerné namerané hodnoty

### Záver

Hladká papierová lepenka s obsahom vlákna z recyklovaných drevovláknitých materiálov predstavuje modifikáciu hladkých strojových lepeniek s tým, že sa vyznačuje väčšou hrúbkou (1,3 – 2,2 mm) dosiahnutou bez lepenia vrstiev pri dodržaní plošnej hmotnosti do 1200 g/m<sup>2</sup>. Je použiteľná, podobne ako hladká strojová lepenka, na výrobu krabíc, pri výrobe obalov na knihy, ako technický prekladový papier a pod. Takúto hladkú kalandrovanú lepenku

je možné povrchovo upravovať bežnými postupmi. Hladká papierová lepenka s obsahom vlákniny z recyklovaných drevovláknitých materiálov sa vyznačuje tým, že pozostáva z 50% hmotnostných drevnej vlákniny získanej z recyklovaných drevovláknitých materiálov a 50% hmotnostných z recyklovaných kartónov (OCC) a že mokrému spôsobu výroby, predchádza spoločné miešanie alebo domieľanie drevnej vlákniny a OCC na minimálne 16°SR (stupeň Schoper-Riegler) aspoň jedným prechodom cez domieľacie zariadenie.

### PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy číslo APVV-21-0500.

### Použitá literatúra

1. ASTM D781-68(1973): Standard test methods for puncture and stiffness of paperboard and corrugated and solid fiberboard.
2. Ihnát, V., Lübke, H., Russ, A., Pažitný, A., & Borůvka, V. (2018). Waste agglomerated wood materials as a secondary raw material for chipboards and fibreboards. Part II: Preparation and characterization of wood fibres in terms of their reuse. *Wood Res*, 63(3), 431-442.
3. ISO 5637, 1989: Paper and board. Determination of water absorption after immersion in water.
4. ISO 1924-2, 2008: Paper and board. Determination of tensile properties. Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min).
5. ISO 2758, 2014: Paper. Determination of bursting strength.
6. Rahmaninia, M., & Khosravani, A. M. I. R. (2015). Improving the paper recycling process of old corrugated container wastes. *Cellulose Chemistry and Technology*, 49(2), 203-208.
7. TAPPI Test method T460 om-02 Air resistance of paper (Gurley method).
8. Zeng, Q., Lu, Q., Zhou, Y., Chen, N., Rao, J., & Fan, M. (2018). Circular development of recycled natural fibers from medium density fiberboard wastes. *Journal of Cleaner Production*, 202, 456-464.
9. Zimmer, A., & Bachmann, S.A.L. (2023). Challenges for recycling medium-density fiberboard (MDF). *Results in Engineering*, 19, 101277.

## Zvyšovanie požiarnej odolnosti drevného recyklátu pri výrobe izolačných panelov pre difúzne otvorený systém drevostavieb

Vladimír Ihnát\*, Rastislav Čerešňa  
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s., Bratislava  
[ihnmat@vupc.sk](mailto:ihnmat@vupc.sk)

Jozef Martinka  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Materiálovotechnologická fakulta, Trnava

### Abstrakt

Drevostavby predstavujú zdravý spôsob bývania. Sú realizované z biologicky obnoviteľných materiálov a v porovnaní s inými stavbami majú najmenší dopad na zmenu klímy, hlavne kvôli minimálnym emisiám CO<sub>2</sub> pri výrobe a vysokému tepelnému odporu a z toho plynúcej úspore energií. Drevostavby majú v súčasnosti len niekoľko významných nevýhod, plynúcich z vlastností ich stavebných komponentov, konkrétne horľavosť a obmedzenú odolnosť voči vlhkosti a biologickým faktorom. Nárast počtu drevostavieb môže významne prispieť k riešeniu mnohých súčasných problémov spojených hlavne s úsporou energie. Požiadavky stanovené Smernicou EP a Rady (EÚ) 2012/27/EÚ v znení Smernice EP a Rady (EÚ) 2018/2002, pravdepodobne nebude bez zvýšenia počtu drevostavieb a s tým súvisiacej úspory energie možné v podmienkach Slovenskej republiky do roku 2030 dosiahnuť. Významnou príležitosťou pri výstavbe drevostavieb je využívanie recyklovaného dreva, ktoré by výrazne prispelo k zníženiu emisií CO<sub>2</sub>. Našou snahou v najbližšej budúcnosti je venovať sa vývoju difúzne otvoreného izolačného panelu so zníženou horľavosťou na úrovni triedy reakcie na oheň B, s vysokou odolnosťou voči vode a biologickým faktorom, vyrobeného z recyklovaného dreva.

**Kľúčové slová:** izolačný panel, horľavosť, recyklované drevo, retardéry horenia, tenkoplošné frakcie dreva, LC liner, drevodomy.

### Úvod

Naším zámerom je zvyšovať požiarnu odolnosť recyklovaného dreva vo forme hoblín, drevitej vlny a termo-mechanického vlákna, aby bola možná jeho vyššia valorizácia v podobe izolačných panelov so zníženou horľavosťou. Projektový zámer dobre reflektuje na aktuálnu výzvu HORIZON-JU-CBE-2024, ktorá vyzýva na cirkulárne riešenia s veľkým objemom pri výstavbe a renovácii budov, ktoré produkujú približne 40% svetových emisií CO<sub>2</sub>. Na uspokojenie rastúceho dopytu po udržateľných, energeticky účinných materiáloch je potrebné prijať nákladovo efektívne, environmentálne vhodné technológie a modernizovať tradičné techniky na zvýšenie cirkularity.

Náš návrh zahŕňa funkčné prvky, akými sú tepelnoizolačné panely a akustické panely. Riešenie vychádza z nových poznatkov získaných pri výskume retardérov horenia

aplikovaných na drevo a tlakovej impregnácie ich vodných roztokov pre synergický účinok s hydrofóbnymi prísadami a lepidlami použitými pri príprave izolačných materiálov. Aplikované budú aj vlastné poznatky z materiálovej úpravy kompozitných materiálov na báze dreva (Martinka et al. 2022, Ihnát a Lübke 2023). Očakáva sa, že takto upravené izolačné materiály na báze dezintegrovaného dreva opláštené tenkými linerami, budú predstavovať spoľahlivé riešenie pre samonosné izolačné panely so zníženou horľavosťou, využiteľné v panelových systémoch drevostavieb.

Tematika predkladaného výskumu sa v návrhu Stratégie výskumu a inovácií pre inteligentnú špecializáciu Slovenskej republiky 2021–2027 prelína hneď v niekoľkých prioritných oblastiach. Naša inovácia podporuje obehové riešenie na báze biomasy (Prioritná oblasť 5-2: Obehové produkčné systémy založené na biomase). Predkladané riešenie má navyše potenciál podporiť lokálne hospodárstvo. Dôležitým aspektom bude zlepšenie postavenia prvovýrobcu v hodnotovom reťazci tým, že sa umožní udržateľná výroba výrobkov s vyššou pridanou hodnotou z vybraných komodít, kde bolo drevo zaradené (Prioritná oblasť 1-2: Spracovanie surovín a polotovarov do výrobkov s vyššou pridanou hodnotou). Transferom výsledkov projektu do praxe sa vytvoria technologické možnosti zamerané na spracovanie, recykláciu odpadového dreva, kde SR v porovnaní s vyspelými európskymi krajinami zaostáva v kvalite. V Európe existuje všeobecná podpora zavádzania nových technológií recyklácie druhotných surovín, resp. nového alternatívneho využitia produktov pri transformácii na cirkulárnu ekonomiku (Prioritná oblasť 1-5: Efektívne odpadové hospodárstvo). V neposlednej miere sa konštrukčným návrhom presného uzatvoreného izolačného panelu sleduje priblížiť sa transformácii výroby s vysokým podielom ručnej práce na výrobu s vyšším stupňom automatizácie a robotizácie (Prioritná oblasť 1-1: Automatizácia a robotizácia priemyselnej výroby, priemysel 4.0). To v budúcnosti umožní vyšší stupeň autonómneho riadenia pri výrobe drevodomov, zvýšenie konkurencieschopnosti a zvýši podiel drevostavieb na trhu.

### **Východiskový stav poznania**

Aktuálnosť navrhnutého výskumu vyplýva zo súčasného zlého stavu zaobchádzania s drevným odpadom. Odpad sa stále zhodnocuje prevažne len energeticky aj keď nové triedenie podľa chemickej záťaže už umožňuje jeho lepšie zhodnotenie, napr. recykláciu, v zmysle kaskádového princípu. Príčinou neekonomického hospodárenia s odpadovou drevnou surovinou je aj skutočnosť, že okrem recyklovanej DTD, neexistuje jej valorizácia v podobe iných výrobkov s veľkým objemovým potenciálom (Ihnat a kol. 2020). Originalita myšlienky spočíva v tom, že zaužívaný spôsob prvotného predspracovania štiepkovaním je potrebné fragmentovať a priniesť nové systémové riešenia pre rozvoj novej bioekonomickej oblasti. Predkladaný projekt snahou založiť nový hodnotový reťazec (value chain) takto prispeje k napĺňaniu jedného zo zadaných strategických cieľov, ktorý je zameraný na vyšší stupeň valorizácie odpadového a menej hodnotného dreva. Klasifikácia odpadového dreva je zhrnutá v ECE/TIM/DP/91. Limity chemickej záťaže sú definované EPF štandardom: Creosote (benzo(a)pyrene) (0,5 mg/kg), PCP (5 mg/kg), As, Cr a Hg (25 mg/kg), Cu (40 mg/kg), Cd (50 mg/kg), F (100 mg/kg), Cl (1000 mg/kg). Tieto limity chemickej záťaže sa odporúčajú aj pre výrobu aglomerovaných materiálov (DTD, MDF, HDF a pod.), takže výrobcovia musia sledovať stav chemickej záťaže recyklovanej hmoty, ktorá sa pridáva k čerstvej hmote. Limity boli navrhnuté na základe odporúčaní CEN CR 13387, 1999.

Snaha zvýšiť objem využitia izolácii na báze dreva je dlhodobá záležitosť. Je celkom logické, že sa to žiada aspoň pri panelových drevostavbách, napriek tomu drvivá väčšina zateplovacích systémov pozostáva z vnútornej čadičovej izolácie a polystyrénovej povrchovej izolácie. Prípravou alternatívu k tradičným izolačným hmotám v drevostavbách, projekt podporí druhý zadefinovaný strategický cieľ, čím zároveň prispeje k percentuálnemu zvýšeniu objemu dreva použitého v drevostavbách. Na komerčnú úroveň sa podarilo dostať jedine izolácie na báze drevného vlákna. Napríklad pod značkou *Steicoflex* sa vyrábajú vláknité izolačné rohože z čerstvého ihličnatého dreva od  $60 \text{ kg/m}^3$  s garantovanou minimálnou hodnotou tepelnej vodivosti  $0,038 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  a triedou reakcie na oheň E podľa DIN EN 13501-1 (obr. 1a). Čerstvé drevo je podmienkou, aby bolo možné termo-mechanickým spôsobom vyrábať vlákno s požadovanou pružnosťou a štíhlostnými parametrami a aby sa tak dal vytvoriť kompaktný vláknitý koberec s čo najnižšou objemovou hmotnosťou. Riešením pre odpadové drevo je prvotná dezintegrácia na tenkoplošné frakcie, akými sú drevitá vlna a hobliny.

Drevené piliny a hobliny sa historicky používali na izoláciu drevených budov v USA, Škandinávii a Nemecku. Štúdie v Nórsku dospeli k záveru, že neexistuje väčšia šanca na hnilobu ako v prípade masívneho dreva, že pri správnom konštrukčnom riešení neexistuje žiadny dôkaz zvýšeného zamorenia hlodavcami a žiadne zvýšené nebezpečenstvo požiaru. Zistilo sa, že hobliny z mäkkého dreva poskytujú najnižšie hodnoty tepelnej vodivosti, čo sa dosahuje geometriou častíc a technikou fúkania pri cca  $100 \text{ kg/m}^3$ . Pri voľne sypanej izolácii vyrobenej zo smrekových hoblín, napr. HOIZ® Baufritz, ktorá je impregnovaná iba sódou a prírodnou srvátkou, výrobca deklaruje pri objemovej hustote  $70 \text{ kg/m}^3$  tepelnú vodivosť  $\lambda = 0.047 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  podľa DIN E ISO 10456 a rovnovážnu vlhkosť hoblín 13% nameranú v podmienkach  $20^\circ\text{C}/80\%$  relatívna vlhkosť vzduchu (obr. 1b). Všeobecne, súčiniteľ tepelnej vodivosti zlisovaných hoblín „ $\lambda \text{ (W/m}\cdot\text{K)}$ “ závisí od sily ich zlisovania, čiže od objemovej hustoty ( $\text{kg/m}^3$ ). Podľa výsledkov výskumu (Paszatory et al. 2021) pre voľne sypané hobliny bez lepidla získané rovinným frézovaním (hobl'ovaním) o priemernej hrúbke  $0,08 \text{ mm}$  sa súčiniteľ tepelnej vodivosti pohybuje v rozpätí  $\lambda = 0.05 - 0,06 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  pre objemovú hustotu (zlisovanú) od  $70 \text{ kg/m}^3$  až do  $140 \text{ kg/m}^3$  pričom má klesajúcu tendenciu. Stlačenie znižuje vzduchové priestory a prepojenia medzi nimi a spôsobuje tvorbu uzavretých vzduchových bublín, čo blokuje voľný pohyb vzduchu medzi hoblinami a znižuje ich tepelnú vodivosť.



a)



b)

Obr. 1: a) *Steicoflex 036*, b) sypaná izolácia v stenovom systéme *Baufritz AAA*

### Vývoj vlastných izolačných panelov z tenkoplošných frakcií recyklovaného dreva

Originalita riešenia oproti stavu súčasného poznania je uplatniť tieto poznatky, avšak pre samonosné izolačné panely s vlastným opláštením na rozdiel od hore uvedeného, kde sa pre voľne sypaný izolačný materiál vyžaduje samostatný drewný záklop. Samonosný panel s tuhým jadrom sa bude vyznačovať dobrou manipuláciou, bude schopný jednoduchého krátenia bežným rezaním, nebude sa drobiť a bude celý vyrobený z odpadového dreva (obr. 2). Z hľadiska uplatniteľnosti v praxi, kde sa vyžaduje značná flexibilita, alternatívu k primárnemu riešeniu bude predstavovať materiál na báze hoblín a strižnej drevitej vlny určený pre techniku fúkania medzi pripravené záklopy. Na výrobu hoblín z odpadového dreva sú, hlavne na čínskom trhu, k dispozícii kompletné výrobné linky vrátane triedenia, sušenia aj balenia. Zariadenia s jedným vretenom pri výkone okolo 20 kW sú schopné produkovať 500 kg hoblín za hodinu.



*Obr. 2: Úvodný model (multá verzia bez akejkoľvek úpravy) uzatvoreného izolačného panelu 100 mm s výplňou so smrekových hoblín  $50 \text{ kg/m}^3$ , s opláštením hrúbky 2 mm. Pri tvorbe modelu bolo použité PVAc lepidlo*

Predkladané riešenie podporuje dva strategické ciele: 1) Prispieť k založeniu nového hodnotového reťazca na báze dezintegrovaného dreva (zvýšenie valorizácie odpadového a menej hodnotného dreva) a 2) pripraviť alternatívu k tradičným izolačným hmotám v drevostavbách (zvýšiť objem dreva v drevostavbách). Zároveň definuje dva špecifické ciele, ktoré reflektujú na výskumnú časť riešenia: 1) Navrhnuť efektívne riešenie pre zníženie horľavosti za zvýšenej odolnosti proti vlhkosti dezintegrovannej drevnej hmoty a 2) navrhnuť materiálové a konštrukčné riešenie pre nové samonosné izolačné panely so zvýšenou požiarnou odolnosťou na báze dezintegrovaného dreva.

### **Metodika riešenia a metódy testovania**

Metodika riešenia vychádza z najnovších dnes známych vedeckých poznatkov z laboratórnych testov, poväčšine na rastlome dreve, a ich aplikácii na sledovaný drewný recyklát. Riešenie je zoskupené do 4 pracovných balíkov, pričom prvé dva predstavujú tzv. výskum v hmote recyklátu znižovaním jeho horľavosti známymi retardérmis horenia, ich nanášaním alebo impregnáciou, a tepelnou predúpravou hmoty. Inšpiráciou sú vedecké práce autorov Can et al. (2018), Kol et al. (2023), Tian et al. (2023), Bekhta et al. 2016. Riešenie

nadväzuje aj na vlastné, už dosiahnuté, poznatky (Martinka et al. 2022). Všeobecne sa očakáva veľmi významný vplyv modifikácie krycej vrstvy na znižovanie horľavosti izolačných panelov. Podobné experimenty, ale na iných druhoch kompozitných dosiek na báze dreva, uskutočnili Lin et al. (2023). Zušľachtovanie papierového lineru je relatívne nová téma (Szubert et al. 2024) a bude aplikované na variant panela s papierovou krycou vrstvou.

Na stanovenie základných mechanických vlastností samonosných izolačných panelov budú použité štandardné metódy zisťovania pevnosti v ohybe, modulu pružnosti v ohybe, pevnosti v ťahu a odtrhovej pevnosti a fyzikálnych vlastností (napúčanie 2h a 24h). Stanovenie tepelnej vodivosti sa uskutoční metódami: Guarded Hot Plate Method (metóda chránenej horúcej dosky), ktorá je upravená napr. ISO 8302:1991 a Transient Hot Wire Method (metóda prechodového horúceho drôtu). Stanovenie tepelnej kapacity metódou DSC. Z tepelnej vodivosti, tepelnej kapacity a hustoty sa stanoví teplotná vodivosť. Stanovenie kľúčových požiarных charakteristík sa uskutoční na kónickom kalorimetri podľa ISO 5660-1:2015. Stanovenie vzduchovej nepriezvučnosti (Sound Reduction Index) sa bude realizovať v akustickej komore a stanovenie súčiniteľa vodnej pary metódou wet cup.

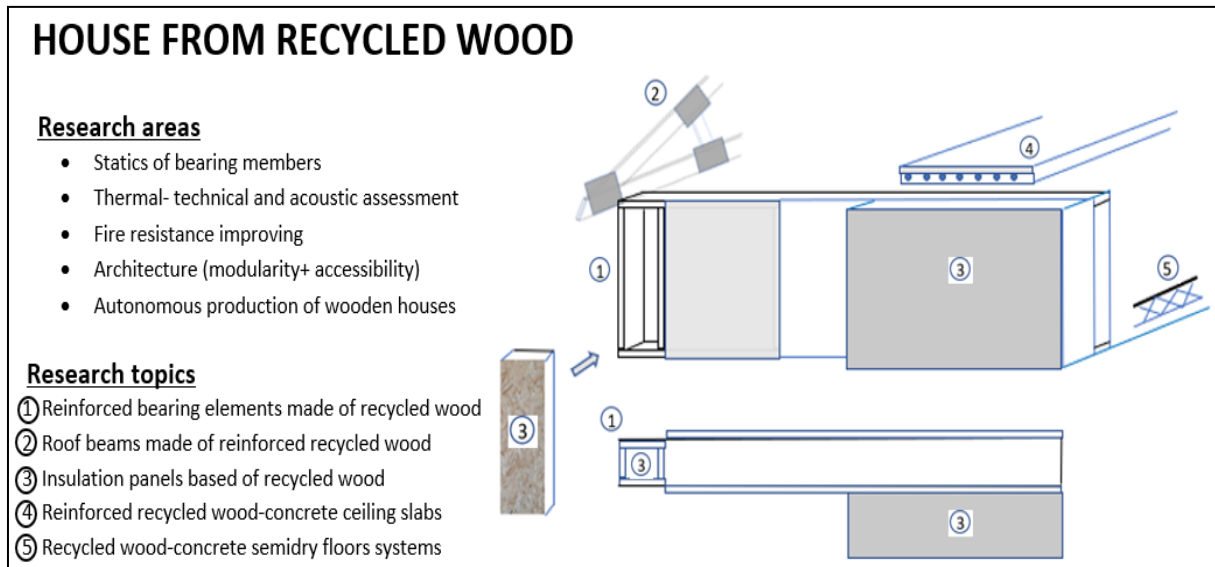
### **Dopady na rozvoj inovácií**

Výskumné aktivity budú zamerané na stanovenie základných fyzikálno-mechanických, tepelno-technických, akustických a protipožiarных charakteristík izolačných hmôt na báze dreva. Budú stanovené na vzorkách jednotnej hrúbky 100 mm. Tieto charakteristiky poslúžia na vývoj komerčných izolačných panelov, pričom sa predpokladá základný rozmer 500 x 3000 mm určených ako vnútorná izolácia do stĺpkového systému drevodomov. Minimálna hrúbka difúzne otvorených plášťov drevodomov sa pohybuje od 200 mm. Panely sa majú vyznačovať svojou presnosťou  $\pm 1$  mm kvôli znižovaniu vzduchovej priepustnosti pri difúzne otvorených systémoch, čo bude pre izolácie na báze dreva špecifické a zároveň, do budúcnosti, umožní autonómnu výrobu. Modifikovaná verzia panelov menších rozmerov vrátane omietkového systému bude vyvíjaná pre vonkajšie zateplenie plášťa. Na trhu sa bude jednať o nové produkty, ktoré sa nevyskytujú, panely budú plne recyklovateľné. Zrejme najviac podobné riešenie, ale s voľne sypanou izoláciou zo smrekových hoblín  $70 \text{ kg/m}^3$ , s ktorým bude možné porovnávať vlastné výsledky, predstavuje stenový systém Baufriz AAA, ktorý pri celkovej hrúbke steny 37 cm garantuje  $U = 0,20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  a pri 46 cm  $U = 0,14 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Podobne ako systém Baufriz aj navrhovaný systém bude spadať do kategórie označovanej ako ekologické stavby. Do tejto skupiny spadajú aj izolácie zo slamy a konope. Nami navrhované uzavreté opláštenie bude možné použiť ako alternatívny spôsob aj pre tieto produkty.

### **Rámcový výskum „Dom z recyklovaného dreva“**

Z dlhodobého hľadiska získané teoretické poznatky bude mať možnosť uplatniť v pripravovanom rámcovom výskume pod názvom „Dom z recyklovaného dreva“, ktorý bude zastrešovať Stavebná fakulta Technickej univerzity v Košiciach (obr. 3). Navrhované izolačné panely sú prvým krokom k naplneniu pripravovaného rámcového výskumu pod názvom „Dom z recyklovaného dreva“. Primárnou myšlienkou je zhodnotenie odpadového dreva zo zberných dvorov v čo najvyššej možnej miere v porovnaní so súčasným použitím vo výrobe DTD. V reáli by to znamenalo sústrediť sa na výrobu konštrukčných prvkov, z ktorých pozostáva drevostavba - vytvoriť nový hodnotový reťazec. Izolácie predstavujú značný percentuálny

podiel objemu drevostavieb, ktorý je riešený inými materiálmi ako drevo, práve kvôli jeho vyššej horľavosti. Tvorba celistvých uzatvorených izolačných panelov je logickou voľbou k súčasným sypaným systémom izolácií na báze prírodných materiálov, pričom obal zvyšuje požiarnu odolnosť, zlepšuje manipulateľnosť a umožňuje prechod na presnú výrobu s prvkami automatizácie.



Obr. 3: Rámcový výskum „Dom z recyklovaného dreva“

Cieľom je podporiť stimuláciu štrukturálnej zmeny výroby a propagácie drevených stavieb na Slovensku (hlavne drevodomov za účelom rezidenčného bývania) smerom k rastu a zvyšovaniu podielu na trhu s nehnuteľnosťami. Zvyšovaním výskumnej a inovačnej schopnosti má priniesť konkurenčnú výhodu v súlade s Víziou SK RIS3 2021+. Členom pripravovaného konzorcia je VUPC, a.s. Bratislava so svojou hlavnou úlohou zvyšovaním pridanej hodnoty produktov na báze dreva a kaskádového využívania dreva v zmysle aktivít už bežiaceho teamingového projektu LIGNOSILVA (Horizon Europe) v spolupráci s Fraunhofer WKI. Navrhnutá metodika riešenia tohto projektu prinesie širokú variabilitu vo vzťahu ku konečným produktom. Vznikne široká databáza výsledkov pre tri druhy izolácie, tepelne upravenými alebo upravenými retardérmí horenia, ktoré budú môcť byť nanášané alebo impregnované, s dvoma druhmi opláštenia, nerátajúc viaceré kombinácie v týchto skupinách. Zistené poznatky znižovania horľavosti budú uplatniteľné pri riešení požiarnej odolnosti aj ostatných sledovaných konštrukcií zamýšľaných z recyklovaného dezintegrovaného dreva (pol. 1-6, obr. 2), z ktorých niektoré nosné časti budú musieť byť vystužené v zmysle statických požiadaviek EN 1995-1-1.

### Pridaná hodnota riešenia

Odborná verejnosť si však zrejme málo uvedomuje, že problém už nie je v zbere dreveného odpadu ale v absencii spôsobov na jeho materiálové zhodnotenie (Lübke a kol. 2020, Balbercak a kol. 2017, 2018). Chýbajú systémové riešenia! Doterajší stav, keď staré drevené výrobky sa buď spaľovali alebo končia na skládkach tuhého komunálneho odpadu je už neudržateľný, najmä v súvislosti s koncepciou EU skončiť so skládkovaním tuhého komunálneho odpadu do

roku 2030. Staré drevené výrobky síce nie sú zahrnuté do systému separovaného zberu odpadov v zmysle Zákona o odpadoch č. 223/2001 Zb v znení Zákona č. 343/2012 Zb, ale trh sa so situáciou vyrovnáva sám a vznikajú špecializované zberné dvory, ktoré už sú schopné samostatnej existencie pomocou obchodovania s drevným odpadom. Minimálna pridaná hodnota, ktorú je potrebné dosiahnuť pri materiálovom zhodnocovaní odpadového dreva, sa dá určiť na základe porovnávania s energetickým zhodnocovaním, aby bolo materiálové zhodnocovanie pre spracovateľov lukratívnejšie ako energetické. Náklady na vstupnú drevnú surovinu pri výrobe vláknitých materiálov v drevárskom aj CELPAP priemysle všeobecne tvoria až 70%, vysoká je aj energetická náročnosť (aj do 20%). Rozdiely 5-10 Eur/tona pri mäkkom dreve a 14-23 Eur/tona pri tvrdom dreve majú byť rozhodujúcim akceleračným faktorom valorizácie odpadového dreva. Výsledky riešenia a jeho dopady majú vedecký, ekonomický, technologický ale aj environmentálny význam.

### **Záver**

Podľa Eurostatu sa odhaduje, že Európa ročne vyprodukuje okolo 65 mil ton dreveného odpadu. Väčšie krajiny ako Nemecko vyprodukujú okolo 8 mil, Francúzsko 6 mil ton ročne. Za Slovensko sa oficiálne prezentujú dáta, ktoré udáva Štatistický úrad SR, jedná sa asi o množstvo cez 400 tis ton ročne. Vo vyspelejších ekonomikách sa opätovne využíva okolo 70% a z týchto iba asi 1/3 na materiálovú recykláciu, zvyšok predstavuje energetické zhodnocovanie. Z pohľadu zloženia asi 36% opätovne použitého odpadu predstavuje konštrukčný a demolačný odpad, 23% zvyšky z opracovania dreva a 14% z obalov na báze dreva, zvyšok je nezatriedený drevný odpad. Z uvedeného vyplýva, že nevyužitý objemový potenciál dreveného odpadu, ktorý sa nevyužíva ani energeticky je značný.

### **Použitá literatúra**

10. Balbercak, J., Bohacek, S., Medo, P., Ihnat, V., Lubke, H., 2017: Chemical processing of waste wood based agglomerates. Part I: Evaluation of properties of fluting liners made of semichemical pulp obtained by a mildly alkaline sulphur-free cooking process. *Wood Research* 62(5): 715-726.
11. Balbercak, J., Bohacek, S., Pazitny, A., Ihnat, V., Lubke, H., 2018: Chemical processing of waste wood based agglomerates. Part II: Evaluation of properties of fluting liners made of semichemical pulp obtained by an alkaline cooking process. *Wood Research* 63(1): 35-44.
12. Bekhta et al. (2016). Effect of different fireretardants on birchplywoodproperties. *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen* 58(1), 59-66.
13. Can et al. (2018). Improving the fire resistance of heat treated wood by using environment-friendly substance. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 20(3), 519-524.
14. Ihnat, V., Lübke, H., Balberčák, J., Kuňa, V., 2020: Size reduction downcycling of waste wood. *Review. Wood Res*, 65, 205-220.
15. Ihnát, V., Lübke, H., 2023: Water retention of beech shavings heat-treated at lower temperatures. *Wood Research* 68(2): 257-267.
16. Kol et al. (2023). Thermal Conductivity Temperature Dependence of Heat-treated Wood at Different Moisture Content Levels. *BioResources*, 18(3), 5253-5268.

17. Lin et al. (2023). Phytic acid-silica system for imparting fire retardancy in wood composites. *Forests*, 14(5), 1021).
18. Lübke, H., Ihnát, V., Kuňa, V., Balberčák, J., 2020: A multi-stage cascade use of wood composite boards. *Wood Research* 65: 843-854.
19. Martinka et al. (2022). The effect of partial substitution of polyphosphates by aluminium hydroxide and borates on the technological and fire properties of medium density fibreboard. *Wood Material Science & Engineering*, 17(6), 720-726.
20. Pasztory et al. 2021: Investigation of thermal insulation panels made of wood shavings. *Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komunikaty*, 64, 207.
21. Szubert et al. (2024). Fire properties of paper sheets made of cellulose fibers treated with various retardants. *Materials*, 17(13), 3074.
22. TIAN et al. (2023). Effect of a layered combination of APP and TBC on the mechanics and flame retardancy of poplar strand boards. *Construction and Building Materials*, 401: 132881.

### **Pod'akovanie**

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy číslo APVV-24-0143.

## Porovnanie vlastností a použiteľnosti plastových a papierových tašiek

Henrich Lübke\*

Výskumný ústav papiera a celulózy, Slovenský drevársky výskumný ústav, Bratislava

[lubke.sdvu@vupc.sk](mailto:lubke.sdvu@vupc.sk)

### Abstrakt

Článok sa zameriava na vznik plastovej nákupnej tašky a na environmentálne problémy spojené s jej masovým používaním, ktoré sa naplno prejavili až s časovým odstupom. Poukazuje na to, že neexistuje jednoznačné a univerzálne riešenie v podobe jednoduchej náhrady plastovej tašky papierovou alternatívou. Práca porovnáva výhody a nevýhody plastových a papierových tašiek z hľadiska materiálových vlastností, životného cyklu, ekonomických aspektov a environmentálnej udržateľnosti. Zároveň sa venuje možnostiam výroby papierových tašiek z recyklovaného a odpadového dreva ako perspektívnemu riešeniu, ktoré by mohlo prispieť k zníženiu uhlíkovej stopy a k podpore princípov cirkulárnej ekonomiky.

**Kľúčové slová:** Papierové tašky, plastové tašky, ekologická stopa, degradácia, CO<sub>2</sub>, mikroplasty, odpadové drevo, recyklácia.

### Úvod

Plastová nákupná taška vznikla v roku 1959, keď švédsky inžinier Sten Gustaf Thulin patentoval jednoduchý spojený výlisok z polyetylénovej fólie, ktorý bol pevný, ľahký a určený na opakované použitie ako alternatíva k papierovým taškám, pri ktorých sa argumentovalo potrebou výrubu stromov. Masová industrializácia plastových tašiek prebehla v 70. a 80. rokoch 20. storočia a odvtedy sa stali globálnym symbolom pohodlia, pričom ich rozsiahle rozšírenie výrazne prispelo k nárastu plastového odpadu [1]. Koncom 20. storočia sa začali hromadiť vedecké dôkazy o tom, že jednorazové plasty pretrvávajú v životnom prostredí stovky rokov a postupne sa fragmentujú na mikro- a nanoplasty [2,3]. Súčasťou environmentálnych politík sa stali regulačné opatrenia, napríklad smernica EU 2015/720, ktorá ukladá členským štátom povinnosť znížiť spotrebu ľahkých plastových tašiek na 40 kusov na obyvateľa do roku 2025. Tlak na obmedzovanie plastového odpadu zároveň opätovne zvýšil záujem o papierové tašky, ktoré sú často prezentované ako „prírodnejšia“ alternatíva, hoci ich environmentálna výhodnosť závisí od celého životného cyklu výrobku [4]. Cieľom tohto článku je porovnať oba typy tašiek z hľadiska ich vlastností, životného cyklu, ekonomických aspektov a vplyvu na životné prostredie a zdravie človeka.

### Plastové tašky

#### *Chemické zloženie a výroba*

Najbežnejším materiálom je vysokohustotný (HDPE) alebo nízkohustotný polyetylén (LDPE) – dlhé reťazce monoméru etylénu (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub>, ku ktorému sa pri výrobe pridávajú plnivá (napr. TiO<sub>2</sub> pre belosť), farbivá a stabilizátory proti UV žiareniu. Fólia vzniká metódou

vyfukovania, energia spotrebovaná na jeden jednorazový plastový sáčok zodpovedá emisiám  $\approx 1,58$  kg CO<sub>2</sub>e. [5] Polyetylén sa vyrába krakovaním ropných frakcií; proces je síce energeticky relatívne efektívny, no z každého kilogramu vyrobeného HDPE vznikne priemerne 1,9 kg CO<sub>2</sub>e. Ropný pôvod tiež prináša riziko únikov uhl'ovodíkov a nevyriešenú otázku obnoviteľnosti zdrojov [1].

### *Rozklad a degradácia*

Na slnečnom svetle sa v polyetyléne tvoria karbonylové skupiny, materiál krehne a fragmentuje sa na častice  $<5$  mm (mikroplasty) a  $<1$   $\mu$ m (nanoplasty). Chemicky ide stále o uhl'ovodíkovú maticu; sporadicky sa tvoria krátke oxidované reťazce, no úplná mineralizácia na CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O je extrémne pomalá a môže trvať stovky rokov. [3,6]. Chemicky zostáva materiál prevažne uhl'ovodíkovou maticou a jeho úplná mineralizácia na CO<sub>2</sub> a H<sub>2</sub>O je extrémne pomalá, často trvajúca stovky rokov [3]. Mikroplasty sa nachádzajú vo vodnom, pôdnom aj ovzdušnom prostredí; novšie štúdie potvrdzujú ich prítomnosť v ľudskej krvi, pečeni a mozgu. Zvýšená koncentrácia mikroplastov v krvnom obehú bola spojená so zmenami koagulačných parametrov a zvýšeným rizikom kardiovaskulárnych príhod [7], čo potvrdzuje ich potenciálne systémové pôsobenie v ľudskom organizme.

### *Vplyv na zdravie*

Mikročastice polyetylénu boli preukázané v krvných vlásokniciach a experimentálne štúdie naznačujú, že môžu spôsobovať obštrukciu kapilár, zápal cievnej steny a poruchy zrážanlivosti krvi, vrátane rizika cerebrálnej trombózy [8]. Hoci presná kauzalita medzi expozíciou mikroplastom a klinickými prejavmi sa stále skúma, ich všadeprítomnosť zvyšuje tlak na preventívne opatrenia.

### *Recyklácia a likvidácia*

Plastová taška sa pri bežnom používaní prakticky neopotrebuje, dokáže uniesť násobky vlastnej hmotnosti a v životnom prostredí pretrváva celé desaťročia. Táto extrémna trvácnosť, pôvodne vnímaná ako výhoda, sa v prípade jednorazového použitia stáva významnou environmentálnou záťažou [9]. Zber a recyklácia tenkých fólií je logisticky náročná; v USA sa recykluje len  $\approx 10\%$  plastových tašiek, zvyšok končí na skládkach alebo v spaľovniach [10]. Dlhodobé hromadenie plastového odpadu predstavuje ekonomickú záťaž pre samosprávy a je súčasťou širšieho problému globálneho manažmentu plastového odpadu [1].

### *Zníženie uhlíkovej stopy pri plastových taškách*

Existuje niekoľko systémových riešení na zníženie uhlíkovej stopy spojenej s užívaním plastových tašiek a environmentálnym problémom s tým spojeným:

1. *Opakovane použiteľné tašky z recyklovaného plastu* pri dostatočnom počte cyklov použitia sa ich environmentálna bilancia výrazne zlepšuje. Štúdie založené na posúdení životného cyklu ukazujú, že pri 20 a viac použitiach môže opakovane použiteľná plastová taška dosiahnuť porovnateľnú alebo nižšiu uhlíkovú stopu než papierová taška pri rovnakom počte nákupov [4,8].
2. *Bioplasty na báze PLA (polylaktid) a PHA (polyhydroxyalkanoát)* sa za vhodných podmienok rozkladajú rýchlejšie než konvenčné PLA avšak spravidla vyžadujú

priemyselné kompostovanie. Ich celkové environmentálne hodnotenie je silne závislé od pôvodu vstupných surovín (cukry, škroby, rastlinné oleje) a od spôsobu nakladania s odpadom, čo môže v niektorých prípadoch viesť len k čiastočnému zníženiu uhlíkovej stopy [11,12].

3. *Systémy zálohovania a opakovane použiteľné obaly* (napr. textilné alebo pevnejšie PET tašky s vratnou zálohou) významne zvyšujú počet cyklov použitia a tým znižujú environmentálnu záťaž pripadajúcu na jeden nákup. Tento prístup je v literatúre považovaný za jeden z najefektívnejších nástrojov obehového hospodárstva [13].
4. *Politiky „pay-per-bag“ a zákazy rozdávania tašiek zdarma*, zavedené v mnohých mestách a štátoch, preukázateľne vedú k zníženiu spotreby jednorazových plastových tašiek a k zmene spotrebiteľského správania. Empirické analýzy potvrdzujú pokles dopytu po jednorazových obaloch krátko po zavedení týchto opatrení [14].

## **Papierové tašky**

### *Materiál a výrobný proces*

Papierová taška sa vyrába z kraftovej (sulfátovej) buničiny, predovšetkým z ihličnatých drevín bohatých na celulózu ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>. Výrobný proces zahŕňa štiepkovanie dreva, varenie buničiny v roztoku NaOH a Na<sub>2</sub>S, následné premývanie, bielenie a sušenie. Ide o technologický cyklus s vysokými nárokmi na spotrebu vody a energie [15]. Uhlíková stopa jednej bežnej papierovej tašky dosahuje v priemere približne 5,52 kg CO<sub>2e</sub>, čo predstavuje troj- až štvornásobne vyššiu hodnotu v porovnaní s jednorazovým plastovým vreckom [5,16].

### *Ekologická stopa v pôvode suroviny*

Buničina pochádza z obnoviteľného zdroja – dreva, avšak jeho ťažba ovplyvňuje biodiverzitu a vyžaduje využitie rozsiahlych plôch krajiny. Na výrobu 1 000 papierových tašiek sa spotrebuje viac než 3 800 litrov vody a približne 23 kg fosílnych palív, najmä v dôsledku energetickej náročnosti spracovania dreva a sušenia papiera [17].

### *Rozklad a degradácia*

Celulóza je biologicky odbúrateľný polymér a v kompostovacích podmienkach sa papierové tašky rozkladajú v priebehu niekoľkých mesiacov až rokov v závislosti od hrúbky materiálu a vlhkosti prostredia. Bielené papierové výrobky však môžu obsahovať alebo uvoľňovať stopy chlórovaných organických zlúčenín, ktorých environmentálny význam závisí od použitej technológie bielenia [18].

### *Recyklácia a likvidácia*

Papierové tašky dosahujú v EÚ recyklačné miery okolo 50 %, a to najmä vďaka dobre rozvinutej infraštruktúre zberu a spracovania papiera [19]. Pri energetickom zhodnocovaní spaľovaním vzniká energia s relatívne nízkym obsahom síry v emisiách, avšak s vyšším množstvom CO<sub>2</sub> na jednotku hmotnosti v porovnaní s plastmi, keďže celulóza obsahuje kyslík viazaný v molekule a vyšší podiel uhlíka sa oxiduje na CO<sub>2</sub> [18].

### *Vplyv na zdravie*

Pri správnej manipulácii a likvidácii papierové tašky spravidla nepredstavujú významné zdravotné riziko pre spotrebiteľa. Riziká sa môžu vyskytnúť najmä vo výrobnom procese, kde

prašnosť celulózy a chemikálie používané pri bielení môžu prispievať k lokálnym emisiám chlórovaných zlúčenín a k zvýšenej záťaži pracovného prostredia [18].

### Cena výroby

Výrobná cena papierovej tašky ( $\approx 0,15$  USD) je výrazne vyššia než cena jednorazovej plastovej tašky ( $\approx 0,01$  USD), čo vedie k prenášaniam nákladov na spotrebiteľa formou poplatkov [5]. Z pohľadu verejných financií však papierové zvyšky nepredstavujú takú dlhodobú a nákladnú záťaž ako plastový odpad, keďže sa v prostredí rozkladajú podstatne rýchlejšie.

### Porovnanie papierových a plastových tašiek

Tab. 1 obsahuje sumár výhod a nevýhod používania plastových a papierových tašiek z hľadiska udržateľnosti. Pri porovnávaní je potrebné kritéria hospodárnosti a ekologickosti posudzovať komplexne.

Tab. 1: Zhrnutie výhod a nevýhod plastových a papierových tašiek

Aspekt	Plastová taška (HDPE/LDPE)	Papierová taška (kraft)
<b>Ekonomika výroby</b>	Veľmi lacná surovina, nízka cena ( $\approx 0,01$ USD/ks).	Dražšia surovina, vyššia cena ( $\approx 0,15$ USD/ks).
<b>Ekonomika likvidácie</b>	Nákladné upratovanie a nízka recyklácia; externé náklady platí spoločnosť.	Recyklácia dostupná, čistenie lacnejšie.
<b>Uhlíková stopa</b>	1,5-2 kg CO <sub>2</sub> e/ks (jednorázová).	$\approx 5,5$ kg CO <sub>2</sub> e/ks, hlavne kvôli energii a drevnej vláknine.
<b>Voda &amp; pôda</b>	Minimálna spotreba vody; ropný pôvod.	Vysoká spotreba vody; zásah do lesov.
<b>Životnosť v prostredí</b>	Stovky rokov, mikro-/nanoplasty so zdravotnými rizikami.	Biologicky odbúrateľná v rámci mesiacov až rokov.
<b>Opakovateľné použitie</b>	Vysoká nosnosť, dlhá trvácnosť, ak ju človek používa opakovane.	Rýchlejšie sa trhá a vlhne; limit 3-5 použití.

### Možnosti výroby papierových tašiek z dreveného odpadu

Recyklácia dreva predstavuje významnú tému v kontexte obehového hospodárstva a vychádza zo smerníc EÚ, ako aj zo zákona č. 79/2015 Z. z. o odpadoch. Pod pojmom recyklovateľné drevo sa rozumie drevo po skončení doby používania bez povrchových úprav, ktoré bolo iba mechanicky opracované a počas používania len minimálne znečistené chemicky neškodnými látkami, napríklad prírodné masívne drevo. Takýto materiál je vhodný na ďalšie spracovanie bez významných technologických rizík [20].

Ako potenciálne zdroje dreveného odpadu pre výrobu papierových tašiek sa javia najmä odpadové drevotrieskové dosky zo starého nábytku, kompozity na báze termomechanických vlákien, drevovláknité dosky strednej hustoty (MDF) a nelisované drevovláknité dosky. Ich využitie však naráža na technologické obmedzenia vyplývajúce z prítomnosti chemických látok obsiahnutých v lepidlách a prídavných zložkách, ktoré boli pôvodne použité na ochranu materiálu proti vlhkosti, biologickým škodcom alebo na zvýšenie požiarnej odolnosti [21].

Z tohto dôvodu bola v praxi zavedená kategorizácia dreveného odpadu podľa miery jeho kontaminácie, ktorá však nie je v rámci EÚ jednotná. Príkladom národnej úpravy je Nemecko, kde je platné „Nariadenie spolkovej vlády o požiadavkách na zhodnocovanie a likvidáciu dreva

po skončení doby jeho používania“ z roku 2002. Toto nariadenie rozdeľuje odpadové drevo do piatich tried, pričom výrobky z aglomerovaných materiálov, ako sú drevotrieskové dosky (DTD), drevovláknité dosky (MDF) a konštrukčné OSB dosky, sú spravidla zaradované do triedy A II. Prítomnosť syntetických lepidiel v týchto materiáloch si vyžaduje separáciu chemickej záťaže, ideálne už počas recyklačného procesu spojeného s dezintegráciou odpadového materiálu [22].

### **Ekonomické aspekty využitia recyklovaného dreva**

Spracovanie odpadového dreva na vláknu, tzv. sekundárnu buničinu, je technologicky náročnejšie než spracovanie čerstvého dreva, avšak z ekonomického hľadiska môže prinášať viaceré výhody. Odpadové drevo je často dostupné za nízku cenu alebo bezplatne, keďže by inak končilo na skládkach alebo v spaľovniach. Zároveň sa znižujú náklady na ťažbu a dopravu suroviny, pretože recyklát je spravidla dostupný lokálne. Podľa údajov Confederation of European Paper Industries je energetická spotreba recyklovanej výroby papiera o približne 40–60 % nižšia v porovnaní s výrobou z primárnej buničiny [23]. Z ekonomického hľadiska by preto výroba papierových tašiek zo sekundárnej vlákny mohla byť výhodná najmä v krajinách s vysokými nákladmi na ťažbu dreva a jeho dovoz.

### **Zmeny v ekologickej záťaži**

Použitie recyklovaného dreveného odpadu pri výrobe papierových tašiek by viedlo aj k významnému zníženiu environmentálnej záťaže. Redukcia ťažby stromov prispieva k ochrane biodiverzity a k vyššej schopnosti lesných ekosystémov viazať uhlík. Recyklácia papiera spotrebuje v porovnaní s primárnou výrobou o 35–50 % menej vody a energie, čo významne znižuje tlak na prírodné zdroje [24].

Podľa environmentálnych analýz môže byť uhlíková stopa recyklovaného papiera až o 70% nižšia než uhlíková stopa papiera vyrobeného z čerstvej buničiny [25]. Okrem toho dochádza k odklonu dreveného odpadu zo skládok a spaľovní, čím sa maximalizuje jeho využitie v materiálovom obeh. Z ekologického hľadiska tak použitie recyklovaného dreva predstavuje perspektívnu možnosť, ako výrazne znížiť environmentálnu stopu papierových tašiek bez zásadného zníženia ich funkčných vlastností.

### **Záver**

Komplexné porovnanie papierových a plastových tašiek z viacerých hľadísk umožnilo formulovať niekoľko zásadných záverov. Porovnania založené výlučne na publikovaných hodnotách uhlíkovej stopy naznačujú, že pri viacnásobnom použití, často uvádzanom na úrovni viac ako 14 cyklov, môže hrubostenná plastová taška vykazovať priaznivejšie výsledky než papierová alternatíva, čo je argument často používaný výrobcami plastových tašiek [4,5]. Takéto hodnotenia však nezohľadňujú rozdiel medzi fosílnym a biogénnym uhlíkom ani štruktúru energetických zdrojov použitých pri výrobe. Po zahrnutí týchto aspektov sa rozdiel v environmentálnej bilancii výrazne mení v prospech papierových výrobkov. Významnú úlohu pritom zohráva energetický mix papierenského priemyslu, ktorý je v mnohých krajinách EÚ založený prevažne na obnoviteľných zdrojoch energie, pričom spotreba fosílnych palív je obmedzená [18,23]. Zároveň je potrebné zdôrazniť, že uhlíková stopa predstavuje len jeden z ukazovateľov environmentálneho vplyvu. Pri rozšírení hodnotenia o ďalšie aspekty, ako je

hromadenie dlhodobo nerozložiteľného odpadu s dobou pretrvávania v prostredí rádovo 100 až 250 rokov, znečistenie vodného prostredia a potenciálne zdravotné účinky mikroplastov, sa výsledný obraz výrazne mení [7,8]. Z hľadiska komplexného environmentálneho posúdenia tak papierová taška vykazuje podstatne nižší negatívny dopad na životné prostredie.

Aktuálny legislatívny rámec Európskej únie tieto zistenia ďalej podporuje. Z Nariadenia (EÚ) 2025/40 Európskeho parlamentu a Rady vyplýva, že hrubostenné plastové tašky síce môžu spĺňať kritériá opätovnej použiteľnosti, avšak na konci svojho životného cyklu nespĺňajú požiadavky na znižovanie produkcie obalového odpadu. Navyše, ich opakované pranie s cieľom predĺženia životnosti môže viesť k uvoľňovaniu ďalších mikroplastov do odpadových vôd [6,8]. Vývojové trendy v papierenskom priemysle naznačujú rastúci objem výroby papiera pri súčasnom znižovaní energetickej náročnosti a efektívnejšom využívaní všetkých frakcií biomasy. Tieto faktory, spolu s dobre fungujúcim systémom zberu a recyklácie papiera v Európskej únii, kde miera recyklácie dosahuje približne 85 %, budú zohrávať čoraz významnejšiu úlohu aj pri budúcich hodnoteniach uhlíkovej stopy [23–25]. V tomto kontexte sa papierové tašky javia ako perspektívnejšie riešenie z hľadiska dlhodobej environmentálnej udržateľnosti.

### Pod'akovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra pre projekt: Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu LignoSilva; (kód ITMS: 313011S735), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

### Literatúra

1. Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., 2017: Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3(7): e1700782.
2. Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., McGonigle, D., Russell, A.E., 2004: Lost at sea: Where is all the plastic? *Science* 304(5672): 838.
3. Andrady, A.L., 2011: Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 62(8): 1596–1605.
4. Van der Harst, E., Potting, J., Kroeze, C., 2014: Multiple data sets and conflicting results: The case of plastic shopping bags versus paper shopping bags. *Journal of Industrial Ecology* 18(6): 927–939.
5. Jones, M., 2024: Paper vs. Plastic: Which is More Sustainable? *Packaging Tech Today*, online: <https://www.packagingtechtoday.com/materials/sustainable/paper-vs-plastic-which-is-more-sustainable/> [August 7, 2024]
6. Sutkar, P.R., Gadewar, R.D., Dhulap, V.P., 2023: Recent trends in degradation of microplastics in the environment: A state-of-the-art review. *Journal of Hazardous Materials Advances* 11: 100343. DOI: 10.1016/j.hazadv.2023.100343
7. Lee, D.W., Jung, J., Park, S.A., et al., 2024: Microplastic particles in human blood and their association with coagulation markers. *Scientific Reports* 14: 30419. DOI: 10.1038/s41598-024-81931-9
8. Huang, H., Hou, J., Li, M., Wei, F., Liao, Y., Xi, B., 2025: Microplastics in the bloodstream can induce cerebral thrombosis by causing cell obstruction and lead to

- neurobehavioral abnormalities. *Science Advances*.  
DOI: 10.1126/sciadv.adr8243
9. Turner, R., 2025: How to Read a Plastic Bag. *Science History Institute*, online.
  10. Nicholas Institute for Energy, Environment & Sustainability, Duke University, 2025: *The social cost of plastic to the United States*. Duke University, Durham, USA.  
Online: <https://nicholasinstitute.duke.edu/publications/social-cost-plastic-united-states>
  11. Vink, E.T.H., Rabago, K.R., Glassner, D.A., Gruber, P.R., 2003: Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production. *Polymer Degradation and Stability* 80(3): 403–419.  
DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00372-5
  12. Shen, L., Worrell, E., Patel, M.K., 2010: Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources, Conservation and Recycling* 55(2): 260–274.  
DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.10.001  
(používané aj ako metodický základ pre hodnotenie bio-materiálov)
  13. Ellen MacArthur Foundation, 2016: **The** new plastics economy: Rethinking the future of plastics. EMF Report, online.
  14. Homonoff, T.A., 2018: Can small incentives have large effects? The impact of bag fees on consumer behavior. *American Economic Journal: Economic Policy* 10(4): 177–210.  
DOI: 10.1257/pol.20150261
  15. World Paper Mill, 2023: Kraft pulping process and paper production. *World Paper Mill*, online: <https://www.worldpapermill.com>
  16. Packaging Tech Today, 2024: Paper vs. Plastic: Which is More Sustainable? *Packaging Tech Today*, online:  
<https://www.packagingtechtoday.com/materials/sustainable/paper-vs-plastic-which-is-more-sustainable/>
  17. GreenMatch, 2023: Paper bags vs plastic bags – environmental impact. *GreenMatch*, online: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2019/04/paper-bags-vs-plastic-bags>
  18. Shen, L., Worrell, E., Patel, M.K., 2010: Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources, Conservation and Recycling* 55(2): 260–274.  
DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.10.001
  19. Natural Resources Council of Maine (NRCM), 2022: Recycling paper products in the EU and US. *NRCM*, online: <https://www.nrcm.org>
  20. European Parliament and Council, 2008: Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union.
  21. Shen, L., Worrell, E., Patel, M.K., 2010: Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources, Conservation and Recycling* 55(2): 260–274.  
DOI: 10.1016/j.resconrec.2010.10.001
  22. Bundesregierung, 2002: Ordinance on the Management of Waste Wood (Altholzverordnung). Federal Republic of Germany.
  23. Confederation of European Paper Industries (CEPI), 2021: Recycling and energy efficiency in the European paper industry. CEPI Report, online: <https://www.cepi.org>
  24. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), 2020: Advancing Sustainable Materials Management: Paper and Paperboard. EPA Report, online: <https://www.epa.gov/smm>
  25. World Wide Fund for Nature (WWF), 2021: Environmental impacts of paper production. WWF Report, online: <https://www.worldwildlife.org>

## Analýza metód výroby bakteriálnej nanocelulózy

Eduard Horban\*, Monika Stankovská  
Výskumný ústav papiera a celulózy, Bratislava  
[horban@vupc.sk](mailto:horban@vupc.sk)

### Abstrakt

Táto štúdia analyzuje a systematizuje existujúce metódy výroby bakteriálnej nanocelulózy (BNC) pre následnú syntézu tohto materiálu. Tento článok poskytuje komparatívnu analýzu rôznych kultivačných systémov (statických, miešaných a reaktorových). Skúma metódy zamerané na zvýšenie výťažnosti a zníženie výrobných nákladov, vrátane použitia alternatívnych a lacných kultivačných médií (napr. priemyselný odpad) a genetickej modifikácie producentov. Osobitná pozornosť sa venuje vplyvu kultivačných parametrov (pH, teplota, koncentrácia kyslíka a zloženie média) na morfológiu, stupeň kryštalinity a výťažok BNC.

**Kľúčové slová:** Bakteriálna nanocelulóza (BNC), kultivácia, optimalizácia, bioreaktory, médiá, výťažok, morfológia.

### Úvod

Skúmanie metód výroby nanocelulózy (BNC) je dôležitou a rýchlo sa rozvíjajúcou oblasťou na rozhraní biotechnológie a materiálových vied. BNC je exopolymér produkovaný rôznymi druhmi baktérií, ako napríklad *Komagataeibacter xylinus*. Tento materiál má jedinečné vlastnosti (Tab. 1), ktoré ho odlišujú od rastlinnej celulózy (RC). Vďaka tomu je BNC ideálnym materiálom pre širokú škálu aplikácií, vrátane biomedicínskeho inžinierstva (napr. umelá koža a krvné cievy), potravinárskeho priemyslu a výroby elektroniky, ako aj pre vývoj rôznych technologických produktov. Napriek svojim vynikajúcim vlastnostiam, široké komerčné využitie BNC je stále obmedzené vysokými výrobnými nákladmi. Je to spôsobené predovšetkým nutnosťou používať drahé živné médiá a tiež relatívne nízkymi výnosmi. Moderný výskum sa preto zameriava na optimalizáciu a vývoj nových, nákladovo efektívnejších výrobných metód. Zahŕňa to nielen hľadanie nových bakteriálnych kmeňov a genetickej modifikáciu existujúcich kmeňov, ale aj štúdium alternatívnych substrátov, ako sú priemyselné odpady a poľnohospodárske vedľajšie produkty.

Tab. 1: Porovnanie vlastností BNC a RC (Wang et al. 2019).

Properties	BC	PC	References
Tensile strength (MPa)	20 – 300	25 – 200	Feng et al., 2015; Gibson, 2012
Young's modulus (MPa)	Sheet: 20,000 Single fibre: 130,000	2.5 – 0.170	Lynd, Weimer, van Zyl, & Pretorius, 2002; Nishi et al., 1990
Water holding capacity (%)	> 95	25 – 35	Rebelo et al., 2018; Islam, Taous, & Joong, 2012; Boulos, Greenfield, & Wills, 2000; Goto & Yokoe, 1996
Size of fibers (nm)	20-100	micrometer scale	Monika, Justyna, & Artur, 2011; Genet et al., 2005
Crystallinity (%)	74 – 96	40 – 85	Park, Baker, Himmel, Parilla, & Johnson, 2010
Relative hydrophilicity (%)	40 – 50	20 – 30	Bishop, 2007
Purity (%)	> 99	< 80	Klemm et al., 2005
Degree of polymerization	14000 – 16000	300 – 10000	Tahara et al., 1997
Porosity (%)	> 85	< 75	Elham & Amir, 2013
Total surface area (m <sup>2</sup> /g)	> 150	< 10	Islam et al., 2012; Alexander, Ibon, & Jürgen, 2002

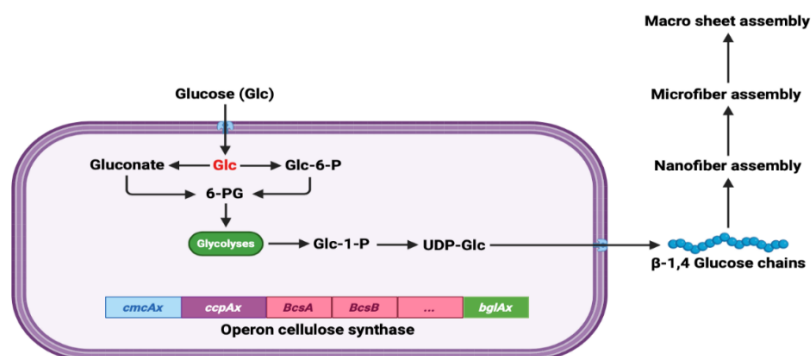
## Vlastnosti BNC

Hoci BNC a PC majú rovnaký chemický vzorec, existuje medzi nimi niekoľko významných rozdielov. Bakteriálna nanocelulóza neobsahuje žiadne iné lignocelulózne zložky, akými sú hemicelulóza, lignín, pektín atď., je teda veľmi čistá, a preto veľmi vhodná pre lekárske účely (Phanthong a kol. 2018, Trache a kol. 2020). Táto jedinečná vlastnosť mu umožňuje dosahovať vyšší stupeň polymerizácie a kryštalinity, čo mu zase poskytuje vynikajúce fyzikálne a mechanické vlastnosti, vďaka čomu je cenným materiálom aj pre high-tech aplikácie (Czaja a kol. 2007). BNC sa skladá z ultra-jemných vlákien s priemerom od 20 do 100 nm, ktoré sú približne 100-krát tenšie ako rastlinné celulózne vlákna, zoskupené do ultra-jemnej siete (Ross a kol. 1991).

Stojí za zmienku, že BNC má extrémny potenciál pre použitie v papierenskom a obalovom priemysle, pretože pridaním určitého množstva BNC do papierovej buničiny je možné vyrábať vysoko kvalitný papier so zvýšenou pevnosťou v ťahu a štyrikrát až päťkrát vyššou odolnosťou proti ohybu (Iguchi a kol. 2000).

## Proces syntézy BNC v baktériách

Celulóza je lineárny a extracelulárny homopolymér  $\beta$ -1,4-viazanej glukózy, ktorý je súčasťou bunkových stien rastlín a je ich hlavnou zložkou. Celulózu je možné vyrábať aj pomocou bakteriálnych kultúr (Obr. 1). BNC sa vyrába prostredníctvom enzýmových reakcií určitých druhov baktérií, vrátane gramnegatívnych druhov, ako sú *Acetobacter* (preklasifikovaný na *Komagataeibacter*), *Rhizobium*, *Agrobacterium*, *Pseudomonas*, *Salmonella* a *Alcaligenes*, ako aj grampozitívnych druhov, ako je *Sarcina ventriculi* (Brown 2004; Lin a kol. 2013).



Obr. 1: Schéma syntézy celulózy bakteriálnou bunkou so štyrmi po sebe idúcimi typmi balenia (začínajúc glukózovými reťazcami). Metabolická dráha syntézy celulózy z glukózy, upravená podľa Lee a kol. (2014), a komplex celulózovej syntázy. Schéma genetickej štruktúry operónu *Bcs* nachádzajúceho sa v *Komagataeibacter xylinus* a *Komagataeibacter europaeus* a niektorých ďalších génov nachádzajúcich sa vyššie a nižšie v reťazci, ktoré sa tiež podieľajú na syntéze celulózy, upravená podľa Tonouchi (2016). Skratky – Glc: glukóza; Glc-6-P: glukóza-6-fosfát; Glc-1-P: glukóza-1-fosfát; UDP-Glc: UDP-glukóza. Všeobecná schéma bola upravená podľa Barja (2021). Vytvorené pomocou BioRender.com

Keď sa glukóza používa ako zdroj uhlíka, syntéza BNC prebieha v štyroch kľúčových enzýmatických krokoch: (1) Fosforylácia glukózy na glukózo-6-fosfát (Glc-6-P) enzýmom glukokinázou; (2) Izomerizácia Glc-6-P na Glc-1-P enzýmom fosfoglucomutázou; (3) Syntéza uridín-difosfát-glukózy (UDP-glukózy), priameho prekursora celulózy, pomocou enzýmu

UDPG pyrofosforylázy; (4) Polymerizácia UDP-glukózy na  $\beta$ -1,4-glukánové reťazce pomocou enzýmového komplexu celulózovej syntázy.

V *K. europaeus*, rovnako ako v *K. xylinus*, sa celulózová syntáza skladá zo štyroch proteínových podjednotiek: BcsA, BcsB, BcsC a BcsD. Gény kódujúce tieto proteíny sú pod kontrolou jediného promotora. Toto vytvára operón nazývaný „bakteriálna celulózová syntáza“ (*bcs*): (1) BcsA je membránový proteín, katalytická podjednotka, ktorá syntetizuje BNC a tvorí transmembránový pór vo vnútornej membráne bakteriálnej steny. Skladá sa z ôsmich transmembránových segmentov a dvoch cytoplazmatických domén: katalytická doména  $\beta$ -1,4-glykoziltransferázy umiestnená medzi štvrtou a piatou transmembránovou špirálou a C-terminálny fragment obsahujúci doménu PilZ, ktorá sa viaže na cyklický druhý posol diguanosínmonofosfát (c-di-GMP); (2) BcsB je periplazmatický proteín ukotvený na vnútornej strane membrány bakteriálnej steny prostredníctvom jednej transmembránovej špirály interagujúcej s BcsA. Predpokladanou funkciou BcsB je vedenie polyméru cez periplazmu do vonkajšej membrány pomocou dvoch domén viažucich sacharidy (Morgan a kol. 2013); (3) BcsC je regulačný proteín podieľajúci sa na zostavovaní komplexu, pozostávajúci z beta-barelu vo vonkajšej membráne, pred ktorým sa nachádza periplazmatická doména obsahujúca tetratrikopeptidovú repetíciu. BcsC je potrebný pre syntézu celulózy *in vivo*, ale nie *in vitro* (Saxena a kol. 1994); (4) BcsD je periplazmatický proteín, ktorého prítomnosť nie je nevyhnutná pre aktivitu celulózovej syntázy. Existujú však štúdie, ktoré preukazujú závislosť mutácií v géne kódujúcom tento proteín od konečného množstva celulózy syntetizovanej v *K. xylinus* (Wong a kol. 1990).

Pred operónom *bcs* sa nachádzajú dva gény, ktoré hrajú dôležitú úlohu pri tvorbe celulózy v *A. xylinum*: *cmcAx* a *ccpAx*. (Standal a kol. 1994). (1) Gén *cmcAx* kóduje enzým karboxymetylcelulózu (CMCase) s endo- $\beta$ -1,4-glukanázovou aktivitou, ktorý rozkladá celulózu; (2) Gén *ccpAx* kóduje proteín s rovnakým názvom, ktorý je nevyhnutný pre biosyntézu celulózy *in vivo*, najmä v etape kryštalizácie. Pod operónom *Bcs* sa nachádza gén *bglAx*. Je zodpovedný za kódovanie enzýmu  $\beta$ -glukozidázy. Úloha tohto proteínu v biosyntéze celulózy je stále neznáma. Existujú však štúdie, ktoré preukazujú závislosť konečného množstva syntetizovanej celulózy od delécií v tomto géne (Deng a kol. 2013). Pri výstupe z bunky dochádza k procesom polymerizácie a kryštalizácie celulózy. Prvý krok zahŕňa polymerizáciu viacerých reťazcov  $\beta$ -1,4-glukánu. Následne sa vytvoria subfibrily (nanofibrily), ktoré pozostávajú z 10-15 reťazcov vznikajúcich glukánov. Tieto subfibrily sa potom zoskupujú a kryštalizujú, čím vytvárajú fibrily (mikrofibrily), ktoré sa potom spájajú a vytvárajú celulózové nanofibrily a mikrovlákna (makrovrstvy), pozostávajúce z približne 1000 jednotlivých glukánových reťazcov (Ross a kol. 1991).

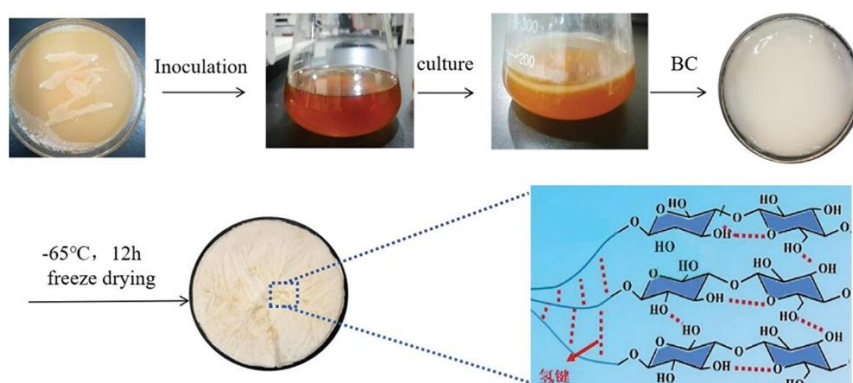
### Metódy syntézy BNC

V súčasnosti existujú tri hlavné techniky výroby BNC: statická, miešaná a kultivácia v bioreaktore. V závislosti od zvolenej technológie sa volí aj makromorfológia výslednej celulózy, ktorá určuje rôzne fyzikálno-chemické vlastnosti v dôsledku existencie rôznych typov celulózových zoskupení v nano- a mikroštruktúrach.

### Statická metóda kultivácie

Metóda statickej kultivácie je najbežnejší a najčastejší prístup k výrobe BNC (Obr. 2). Pri tejto metóde sa nádoby naplnia čerstvým kultivačným médiom a inkubujú sa 1–20 dní pri teplote 28–30°C a pH 4 < pH < 7. BNC získaný metódou statickej kultivácie je hydrogélová vrstva s vynikajúcou štruktúrou a vlastnosťami. Nasleduje proces čistenia horúcou vodou a hydroxidom sodným. Následne sa vzorky premyjú veľkým množstvom vody, až kým sa nedosiahne neutrálne pH (v tomto prípade sa BNC fólie zafarbia na bielo). Pri statickej kultivácii sa membrána BNC tvorí na rozhraní plynu (vzduchu) a kvapaliny (kultivačného média), kde sa v dôsledku bakteriálneho metabolizmu vytvára zachytený oxid uhličitý. Celulózové subfibrily sa nepretržite vytláčajú z lineárne usporiadaných pórov na povrchu *A. xylinum* a kryštalizujú do mikrofibril. Celulóza sa potom zhlukuje do hustej membrány na povrchu média (Czaja a kol. 2004; Wang a kol. 2019).

V tejto forme však táto metóda nie je vhodná pre veľkovýrobu v priemysle kvôli drahým syntetickým médiám, extrémne dlhým čakacím dobám a nízkym výťažkom syntézy BNC.



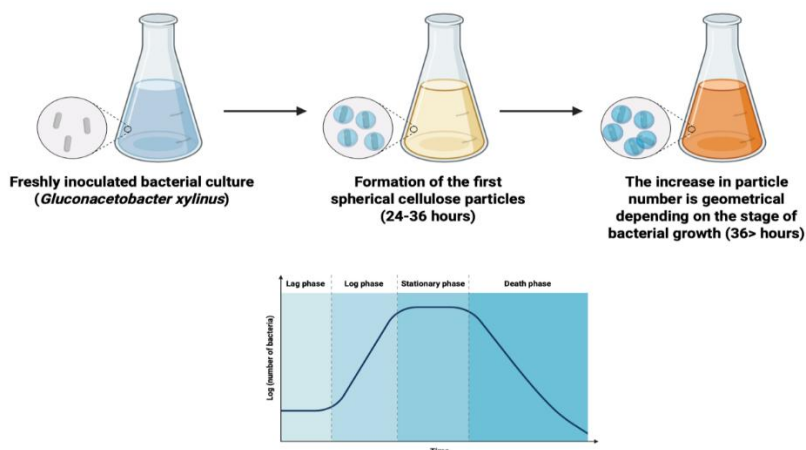
Obr. 2: Príklad ukážky hlavného postupu syntézy a rastu bakteriálnej celulózy pomocou statickej kultivačnej metódy. Kmeň – *A. xylinum*; dostupné kultivačné parametre: počiatočné pH tekutého kultivačného média < 7, inkubácia pri 27°C počas 3, 6, 9, 12 a 15 dní; parameter 2: počiatočné pH tekutého živného média = 7, inkubácia pri 20°C, 22°C, 24°C, 26°C, 28°C, 30°C a 32°C počas 10 dní; parameter 3: meranie pH kvapalného média na 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 a inkubácia pri 27°C počas 10 dní (Chen a kol. 2024).

### Metóda kultivácie s miešaním/trepaním

Hlavná koncepcia tejto metódy vychádza z mechanickej časti procesu, ktorá sa skladá zo stabilného miešania bakteriálnej kultúry na trepačke, čo vedie k zvýšenému prevzdušňovaniu alebo optimalizácii dodávky kyslíka baktériám. Ukázalo sa však, že nadmerná dodávka kyslíka vedie k zníženiu tvorby BNC (Wang a kol. 2019). Ako miešaná, tak aj statická kultúra vedú k tvorbe rovnakého množstva BNC za rovnaký čas. Niektoré štúdie však uvádzajú, že miešaná kultúra produkuje menej BNC ako statická metóda (Czaja a kol. 2004). Všeobecne však platí, že za daných podmienok nie sú medzi konečnou koncentráciou BNC získanou oboma kultivačnými metódami žiadne významné rozdiely (Czaja a kol. 2004).

Táto metóda umožňuje bakteriálnym kultúram syntetizovať BNC častice s priemerom od 10 µm do 10 mm, vrátane rôznych tvarov, ako sú guľové (1–9 mm), elipsoidné (3–5 mm), hviezdicové, vláknité a iné. Bolo preukázané, že veľkosť a tvar BNC ovplyvňuje rýchlosť otáčania, dĺžka kultivácie a typy prísad v kultivačnom médiu (Watanabe a kol. 1998). Táto metóda kultivácie zahŕňa rotačné miešanie, ktoré vytvára konštantnú strihovú silu. Toto je primárny faktor, ktorý formuje sférickú štruktúru. Dĺžka kultivácie je ďalším faktorom, ktorý

ovplyvňuje veľkosť a počet sférických BNC, kedy výsledné BNC sa zväčšujú s dĺžkou kultivácie. Po viac ako 60 hod už neboli pozorované žiadne ďalšie zmeny veľkosti (Czaja a kol. 2004; Hu a kol. 2013). Zistilo sa tiež, že koncentrácia baktérií môže ovplyvňovať veľkosť a množstvo BNC sfér. Čím vyššia je koncentrácia baktérií (čím dlhšia je logaritmickej fázy rastu), tým väčší je počet vyprodukovaných BNC sfér (Obr. 3, Hu a kol. 2013).



Obr. 3: Schematické znázornenie tvorby sférických BNC. Nižšie je znázornený graf rastu bakteriálnej kultúry. Upravené podľa Hu a kol. (2013). Vytvorené pomocou BioRender.com.

Rýchlosť otáčania počas miešania hrá v tejto metóde kľúčovú úlohu. Pri rýchlostiach otáčania pod 100 ot/min je ťažké zistiť akékoľvek sférické častice BNC. V práci Hu a kol. (Hu a kol., 2010) sa preukázalo, že sférický tvar BNC pri 125 ot/min. Zvýšenie rýchlosti otáčania na 150 ot/min viedlo k zmene tvaru a vytvoreniu štruktúry podobnej chvostu. Pri rýchlostiach nad 200 ot/min klesol počet sférických častíc BNC na nulu (Hu & Catchmark 2010). Medzi nevýhody tejto metódy patrí nestabilita bakteriálneho kmeňa v dôsledku fyzikálnych účinkov miešania, neneutronovské správanie počas miešania BNC a vysoké šmykové napätie. Okrem toho sa zhoršujú aj fyzikálno-chemické vlastnosti BNC, a to nízky stupeň polymerizácie, nízky index kryštalinity a horšie mechanické vlastnosti (Kouda a kol. 1998).

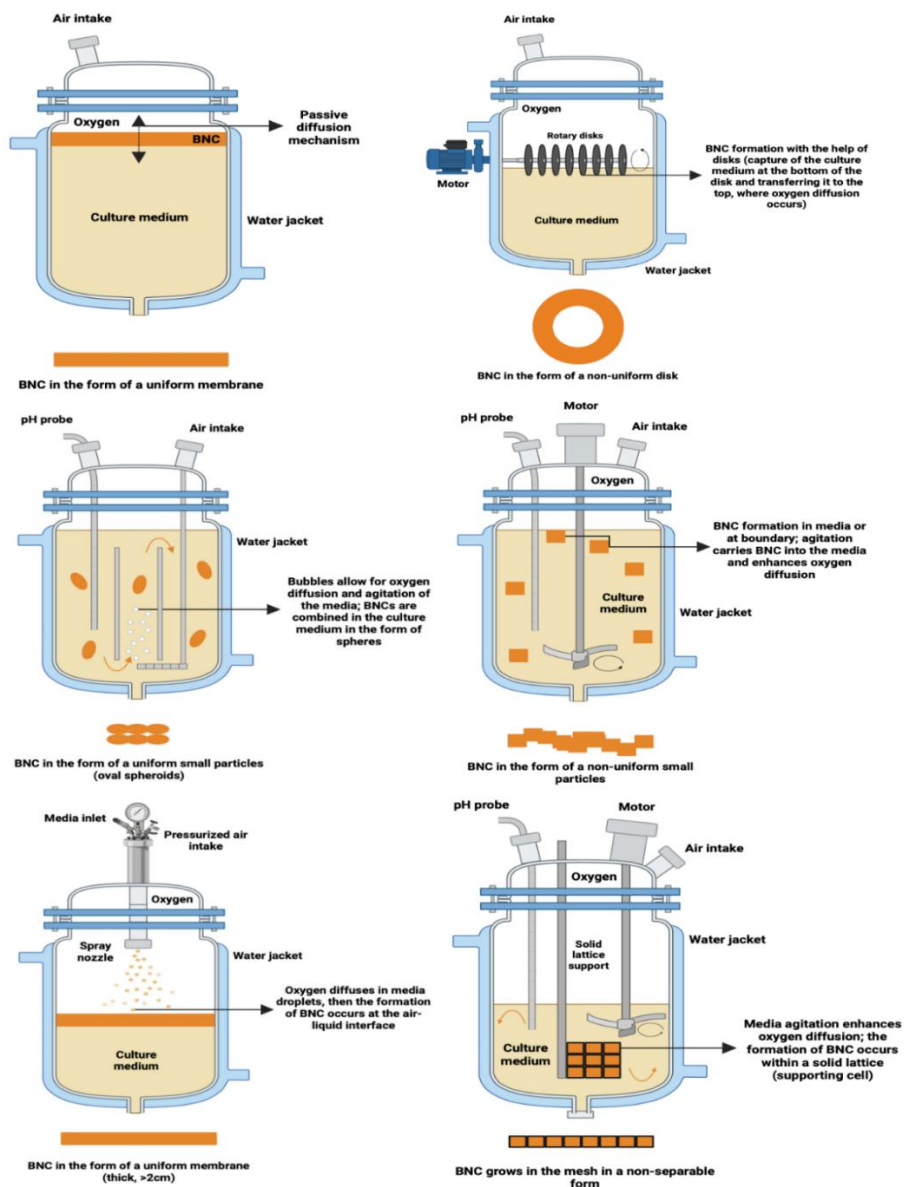
#### Metódy kultivácie v bioreaktore

Statické a miešané kultivácie v trepačke sú skôr experimentálnymi metódami výskumu a vývoja než metódami stabilnej výroby surovín. Na dosiahnutie priemyselného objemu výroby a rozšírenie použitia BNC je potrebné vyvinúť ekonomický výrobný proces s vysokou produktivitou, nízkymi nákladmi a krátkou dobou kultivácie. Výskum viedol k vývoju kultivácie v bioreaktore (Obr. 4, Tab. 2).

#### a) Bioreaktory obohatené kyslíkom

Táto metóda využíva bioreaktor so vzduchovým zdvihom. Pomocou bioreaktora so vzduchovým zdvihom sa počas 67 hod. kultivácie baktérií získalo 3,8 g biomasy. Následne sa použil reaktor so vzduchovým zdvihom upravený vnútornou slučkou, čím sa zvýšila účinnosť a umožnilo sa získať BNC v maximálnej koncentrácii 10,4 g/l. BNC získané týmto spôsobom malo zrnité zloženie podobné zloženiu získanému z kultúr s miešaním a malo nízku mechanickú pevnosť (Chao a kol. 2000). Následne bol vyvinutý reaktor s vnútorným okruhom

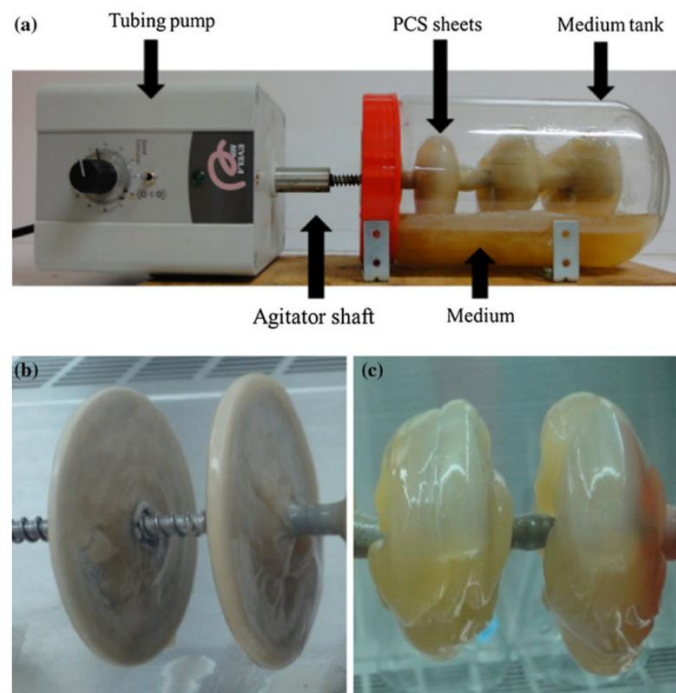
na štúdium vplyvu rôznych koncentrácií fruktózy na rýchlosť tvorby BNC. Pri použití vzduchu obohateného kyslíkom sa rýchlosť tvorby BNC zvýšila na 0,093 g/l/h a výťažok BNC sa zvýšil z 11% vo vzduchu na 18% (Chao a kol. 2001). Všetky tieto reaktory produkovali BNC s eliptickou morfológiou. BNC s vyššou schopnosťou zadržiavať vodu sa získal modifikáciou vzduchového bioreaktora s pravouhlými sieťovými platňami (alebo bunkami) (Wu & Li 2015), ktoré sa používali namiesto štandardnej výfukovej rúrky. Ďalšia úprava bioreaktora so vzduchovým prúdom zahŕňala inštaláciu bublinového stĺpca (Song a kol. 2009). Bioreaktor bol schopný produkovať BNC s vysokou priepustnosťou 2,27 g/l/deň, a mohol poskytovať nízke šmykové napätie a vysoký prietok kyslíka. Pri zavádzaní čistého kyslíka v podmienkach kultivácie v zväčšenom meradle sa získalo 5,6 – 6,8 g/l BNC.



Obr. 4: Typy bioreaktorov, ktoré sa používajú na výrobu BNC, a výsledné typy BNC. Zľava z hore: statické, rotačné diskové, miešacie nádrže, vzduchové, aerosólové a biofilmové reaktory. Upravené podľa Girard a kol. (2024). Vytvorené pomocou BioRender.com.

*b) Bioreaktory s rotujúcim diskom*

Prvá správa o BNC vyrobenom pomocou bioreaktora s rotujúcim diskom pochádzala z roku 2002 (Seráfica a kol. 2002). Princíp je založený na niekoľkých diskoch namontovaných na rotujúcej centrálnej hriadeľi. V bioreaktore s rotujúcimi diskami je možné priamo do média pridať mnoho rôznych druhov tuhých látok a vlákien a začleniť ich do celulózy s cieľom zlepšiť vlastnosti BNC (Mormino & Bungay 2003). Základom tohto mechanizmu je rotácia diskov a ich striedavá interakcia so vzduchom a kvapalnými médiami, kedy BNC, ktorý poskytuje dodatočnú mechanickú pevnosť, sa môže priľnúť k povrchu diskov. Existujú správy, ktoré dokazujú, že plastové kompozity (PCS) vyrobené z poľnohospodárskych odpadov môžu zlepšiť celkovú produktivitu etanolu, kyseliny octovej a pullulanu. Preto bol vyvinutý nový rotačný diskový bioreaktor využívajúci PK s cieľom zvýšiť výťažok BNC a následne znížiť náklady. Produktivita BNC v tomto bioreaktore dosiahla približne 0,24 g/l/deň. Výsledný bioreaktor BNC vykazoval nižšiu kryštalickosť a mechanické vlastnosti, ale podobný obsah vody a tepelnú stabilitu v porovnaní s bioreaktorom získaným pomocou statickej kultúry (Zahan a kol. 2016). Štandardné bioreaktory na výrobu BNC sú zvyčajne len čiastočne ponorené do kvapalného média. Takáto konštrukcia vyžaduje opätovné očkovanie po každej úprave. Na rozdiel od toho je bioreaktor s rotujúcim diskom z plastového kompozitu (PCS-RDB) (Obr. 5) úplne ponorený a jeho drsný povrch zabezpečuje vynikajúcu adhéziu baktérií, čo vedie k vysokým výťažkom BNC. Tento systém je vysoko efektívny, pretože môže pracovať v polokontinuálnom režime a udržiavať produktivitu najmenej päť cyklov bez potreby opätovného očkovania. Táto schopnosť výrazne zjednodušuje rozšírenie na komerčnú výrobu (Lin a kol. 2014).



*Obr. 5: Schéma systému PCS-RDB. Zahŕňa čerpadlo s hadicami, hriadeľ miešadla s pripojenými doskami PCS a zásobník média (a), porovnávaciu analýzu výťažnosti BNC, ktorá demonštruje morfológiu produktu získaného v polo-ponorenom systéme (SS-RDB) (b) a PCS-RDB (c) po piatich dňoch kultivácie s *G. xylinus* ATCC 700178 (Lin a kol. 2014).*

c) *Modifikované statické bioreaktory*

V dynamických kultúrach sa zistilo, že šmykové napätie (mechanické šmykové napätie) pôsobiace na baktérie počas kultivácie môže podporovať vznik mutácií s negatívnym účinkom negatívnych na celulózu, ktoré znižujú konečnú produkciu BNC. Preto sa na výrobu BNC predovšetkým používa statická kultivácia, ktorá je jednoduchá a vytvára minimálne šmykové napätie, napriek jej nízkej produktivite, vysokým nákladom (na hromadnú výrobu) a dlhým kultivačným časom. Ak je možné počas fermentácie kombinovať bioreaktor s obohatením kyslíkom, môže to úspešne viesť k tvorbe BNC. Na výrobu BNC sa preto používa aj reaktor s kvapkajúcim lôžom, teda typ zariadenia na výrobu octu. V porovnaní so statickou kultiváciou a metódami miešania/trepania môže reaktor s kvapkajúcim lôžom poskytovať vysoké koncentrácie kyslíka a nízke šmykové napätie (Lu & Jiang 2014).

Tab. 2: *Prehľad výhod väčšiny v súčasnosti používaných techník na výrobu BNC pomocou reaktorových zariadení (vrátane špecializovaných modifikácií) (Wang a kol. 2019).*

Advantages and production specification of different reactors for BC production.		
Modification	Advantages of airlift reactor for BC production Production specification and advantages	References
High oxygen concentration	BC concentration: 5.63 g/l in 28 h Productivity: 0.20 g/l Production deteriorated after 30 h <b>Advantages:</b> High oxygen transfer rate, low power requirement, higher productivity.	Chao et al., 1997
Internal loop airlift with enriched oxygen	Production: 3.8 g in 67 h culture or 0.116 g/l/h <b>Advantages:</b> Formed a unique ellipse, high volumetric oxygen transfer, high hydrodynamic characteristic	Chao et al., 2000
Internal loop airlift with controlled pH/ fresh and glucose medium	The highest production rate: 0.22 g/l/h The highest concentration: 10.4 g/l at 60-70 g/l fructose <b>Advantages:</b> Formed a unique ellipse, high volumetric oxygen transfer, high hydrodynamic characteristic, low mechanical strength	Chao et al., 2001
Shaking flask with controlled pH/ Hestrin & Schramm medium	Produced a membrane-type BC <b>Advantages:</b> High water holding capacity, Young's modulus could be manipulated by varying the number of net plates	Wu & Li, 2015
Bubble column with controlled pH Aeration rate:1.0 vvm (30 L/min)	<b>Advantages:</b> High production: 5.6-6.8 g/l/3 days Low mechanical properties: 17.15 to 11.66 MPa Low crystallinity: 86 to 79.6% Low molecular weight and degree of polymerization Low shear stress, high oxygen transfer rate Low concentrated solution state culture	Choi et al., 2009
Production specification of rotating disc bioreactors for BC production		
A rotating disk bioreactor	<b>A consistent product</b> Higher tensile strength; pore size of BC: 10-15 µm; cellulosic matrix remains intact and strong	Mormino & Bungay, 2003; Zahan, Pa'e, & Muhamad, 2016
Plastic composites supporting rotating disk bioreactor	<b>A semi-continuous process</b> Higher productivity: 0.24 g/l/day; lower crystallinity: 66.9%; lower mechanical property (Young's modulus of 372.5 MPa); water content and thermostability similar to that of BC obtained by static culture	Lin et al., 2014
Plastic composites supporting rotating disk bioreactor with different additions	<b>A semi-continuous process</b> No re-inoculation; concentration of fructose reduced from 50 to 10 g/l; oxygen concentration and disc rotation speed enhance the fermentation process; BC productivity: 0.64 g/slice; high water retention ability (98.6-99 %); similar strain but lower stress; highest BC production with 0.8% carboxymethylcellulose and avicel, respectively	Lin et al., 2016
Rotating magnetic field	Did not increase the number of mutants unable to produce cellulose Increased biochemical properties; positive impact on growth of bacteria; increased water molecules; obtained BC with altered micro-structure and degree of porosity.	Fijałkowski et al., 2015, 2016; Fijałkowski, Zywicka et al., 2017, 2017b
Production specifications of several other bioreactors for BC production		
Bioreactor equipped with a spin filter	High cell density Cel + cells can convert into Cel- mutants in abundance Higher BC productivity: from 0.55 to 1.61 g/l/day Cell mass: from 5.65 to 11.52 g/L (140 h)	Jung, Khan, Park, & Chang, 2007
Fed batch principle	High quality cellulose; Culture box: low cost BC slices or layer (3-4 cm); Best time interval: 6 h High tensile strength: 114 N, DP: 5200; Gradient of graph in load-displacement diagram: 34.7 N/10 mm	Hornung, Ludwig, & Schmauder, 2007
Biofilm reactor	High biomass density; High production: 7.05 g/L Higher crystallinity: 93%; Crystal size: 5.2 nm Better thermal performance; Water retention ability: 95 %	Cheng et al., 2009
Biofilm reactor with additives	High biomass density; Continuous BC production High production: 13 g/L; Lower crystallinity: 80% Crystal size: 4.2 nm; BC paper sheets: higher tensile strength and Young's modulus	Cheng et al., 2011

## Výsledky

Analýza metód výroby BNC ukazuje, že tento proces predstavuje veľmi sľubnú biotechnologickú cestu k výrobe nanomateriálu s jedinečnou fyzikálno-chemickou štruktúrou. BNC má vynikajúce vlastnosti, vrátane výnimočnej čistoty (bez lignínu a hemicelulózy), trojrozmernej nanovláknovej siete, vysokej kryštalinity, vynikajúcej tvarovateľnosti, biokompatibility, vysokej mechanickej pevnosti a vynikajúcej schopnosti zadržiavať vodu, čo ho robí ideálnym pre použitie v biomedicíne, papierenskom priemysle, elektronike a iných odvetviach.

Táto štúdia opisuje hlavné metódy výroby BNC pomocou rôznych kultivačných metód. Postupne sa vyvinulo množstvo prístupov na zníženie výrobných nákladov, optimalizáciu škálovania a zlepšenie priepustnosti. Statická kultivácia produkuje hustý, mechanicky pevný gél (film) s vysokým stupňom kryštalinity. Táto metóda je ideálna pre aplikácie, ktoré vyžadujú špecifický tvar a vysokú, v podstate nadradenú (v porovnaní s inými) kvalitu materiálu (napr. obvazy na rany), ale vyznačuje sa nízkym výťažkom a dlhou dobou fermentácie. Pomocou kultivácie s miešaním bolo možné výrazne zvýšiť výťažok BNC zlepšením prenosu hmoty a dodávky kyslíka baktériám. Výsledný produkt má však menej usporiadanú, voľnú alebo sférickú morfológiu, čo môže obmedziť jeho použitie v aplikáciách vyžadujúcich vysokú pevnosť. Vďaka svojim jedinečným výhodám sa sférické častice BNC môžu používať na bioseparáciu, ako adsorbenty ťažkých kovov, železa, oleja, počiatočného rozpúšťadla a proteínov a v imobilizovaných reakciách. Posledná trieda metód, fermentácia v bioreaktoroch, môže výrazne zvýšiť výťažnosť a skrátiť čas výroby BNC. Tieto metódy umožňujú výrobu BNC v priemyselnom meradle. Využívajú najširšiu škálu metód a techník, vrátane rôznych typov reaktorov, ako sú vzduchové bioreaktory, biofilmové bioreaktory, rotačné diskové bioreaktory a iné.

V dôsledku toho vykazujú BNC získané rôznymi kultivačnými metódami jedinečné štruktúry a vlastnosti, ktoré možno využiť v rôznych oblastiach. Napriek jedinečným vlastnostiam BNC je ich široké komerčné využitie obmedzované vysokými výrobnými nákladmi a nízkou efektívnosťou v priemyselnom rozsahu. Primárnym spôsobom zníženia nákladov je nahradenie drahých komerčných médií cenovo dostupnými a udržateľnými surovinami, ako sú agro-industriálne odpady (napr. ovocné zvyšky, koláče a zvyšky z výroby čaju). Optimalizácia zloženia média a kľúčových chemických parametrov (napr. pH) môže tiež výrazne zvýšiť výťažnosť produktu. Na zvýšenie výťažnosti a skrátenie výrobného času sú potrebné vylepšené technológie. Výskum v tejto oblasti by sa podľa autorov mal zamerať skôr na využívanie rôznych typov bioreaktorov (vrátane polo-kontinuálnych a kontinuálnych režimov) ako na zdokonaľovanie metód kultivácie bez reaktorov. Na zvýšenie produktivity sa navrhuje aj využívanie geneticky modifikovaných bakteriálnych kmeňov.

## PodĎakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na Základe Zmluvy č. APVV-21-0505.

## Literatúra

1. Brown, R. M. (2004). Cellulose Structure and Biosynthesis: What is in Store for the 21st Century. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 42, 487-495.
2. Chao, Y., Ishida, T., Sugano, Y., & Shoda, M. (2000). COMMUNICATION TO THE EDITOR Bacterial Cellulose Production by *Acetobacter xylinum* in a 50-L Internal-Loop Airlift Reactor.
3. Chao, Y., Sugano, Y., & Shoda, M. (2001). Bacterial cellulose production under oxygen-enriched air at different fructose concentrations in a 50-liter, internal-loop airlift reactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 55(6), 673–679.
4. Czaja, W. K., Young, D. J., Kawecki, M., & Brown, R. M. (2007). The future prospects of microbial cellulose in biomedical applications. *Biomacromolecules*, 8 (1), 1–12.
5. Czaja, W., Romanovicz, D., & Brown, R. M. (n.d.). Structural investigations of microbial cellulose produced in stationary and agitated culture. *Cellulose*, 11, 403-411.
6. Deng, Y., Nagachar, N., Xiao, C., Tien, M., & Kao, T. H. (2013). Identification and characterization of non-cellulose-producing mutants of *Gluconacetobacter hansenii* generated by Tn5 transposon mutagenesis. *Journal of Bacteriology*, 195(22), 5072–5083.
7. Hu, Y., & Catchmark, J. M. (2010). Formation and characterization of spherelike bacterial cellulose particles produced by *Acetobacter xylinum* JCM 9730 strain. *Biomacromolecules*, 11(7), 1727–1734.
8. Hu, Y., Catchmark, J. M., & Lawrence, D. L. (n.d.). Studies on sphere-like bacterial cellulose produced by *Acetobacter xylinum* under agitated culture written for presentation at the 2010 ASABE Annual International Meeting, Sponsored by ASABE.
9. Hu, Y., Catchmark, J. M., & Vogler, E. A. (2013). Factors impacting the formation of sphere-like bacterial cellulose particles and their biocompatibility for human osteoblast growth. *Biomacromolecules*, 14(10), 3444–3452.
10. Huang, Y., Zhu, C., Yang, J., Nie, Y., Chen, C., & Sun, D. (2014). Recent advances in bacterial cellulose. *Cellulose*, 21(1), 1–30.
11. Iguchi, M., YAMANAKA Ajinomoto Central Research, S., & Budhiono, J. A. (n.d.). Review Bacterial cellulose-a masterpiece of nature's arts. *Journal of Materials Science*, 35, 261-270.
12. Kouda, T., Naritomi, T. I., Yano, H., & Yoshinaga, F. (1998). Inhibitory effect of carbon dioxide on bacterial cellulose production by acetobacter in agitated culture. *Journal of Fermentation and Bioinformatics*, 85 (3), 318-321.
13. Lin, S. P., Hsieh, S. C., Chen, K. I., Demirci, A., & Cheng, K. C. (2014). Semi-continuous bacterial cellulose production in a rotating disk bioreactor and its materials properties analysis. *Cellulose*, 21(1), 835–844.
14. Lin, S. P., Loira Calvar, I., Catchmark, J. M., Liu, J. R., Demirci, A., & Cheng, K. C. (2013). Biosynthesis, production and applications of bacterial cellulose. *Cellulose*, 20 (5), 2191–2219.
15. Lu, H., & Jiang, X. (2014). Structure and properties of bacterial cellulose produced using a trickling bed reactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 172(8), 3844–3861.
16. Morgan, J. L. W., Strumillo, J., & Zimmer, J. (2013). Crystallographic snapshot of cellulose synthesis and membrane translocation. *Nature*, 493(7431), 181–186.

17. Mormino, R., & Bungay, H. (2003). Composites of bacterial cellulose and paper made with a rotating disk bioreactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 62(5–6), 503–506.
18. Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Xu, G., Abudula, A., & Guan, G. (2018). Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion*, 1(1), 32–43.
19. Ross, P., Mayer, R., & Benziman, M. (1991). Cellulose biosynthesis and function in bacteria. *Microbiological Reviews*, 55 (1), 35–38.
20. Saxena, I. M., Kudlicka, K., Okuda, K., & Malcolm Brown, R. (1994). Characterization of genes in the cellulose-synthesizing operon (acs Operon) of *Acetobacter xylinum*: Implications for cellulose crystallization. *Journal of Bacteriology*, 176 (18), 5735–5752.
21. Serafica, G., Mormino, R., & Bungay, H. (2002). Inclusion of solid particles in bacterial cellulose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 58(6), 756–760.
22. Song, H.-J., Li, H., Seo, J.-H., Kim, M.-J., & Kim, S.-J. (2009). Pilot-scale production of bacterial cellulose by a spherical-type bubble column bioreactor using saccharified food wastes. In *Korean Journal of Chemical Engineering*, 26 (1), 141–146.
23. Standal, R., Blatny, J. M., & Valla1, S. (1994). A new gene required for cellulose production and a gene encoding cellulolytic activity in *Acetobacter xylinum* are colocalized with the bes operon. *J of Bacteriology* 176 (3), 665–672.
24. Trache, D., Tarchoun, A. F., Derradji, M., Hamidon, T. S., Masruchin, N., Brosse, N., Hussin, M. H. (2020). Nanocellulose: From fundamentals to advanced applications. *Frontiers in Chemistry*, 8, 392.
25. Wang, J., Tavakoli, J., & Tang, Y. (2019). Bacterial cellulose production, properties and applications with different culture methods – A review. *Carbohydrate Polymers*, 219, 63–76.
26. Watanabe ã, K., Tabuchi, M., Morinaga, Y., & Yoshinaga, F. (n.d.). (1998) Structural features and properties of bacterial cellulose produced in agitated culture. *Cellulose*, 5, 187–200.
27. Wong, H. C., Fear, A. L., Calhoont, R. D., Eichinger, G. H., Mayer, R., Amikam, D., Benziman, M., Gelfand, D. H., Meade, J. H., Emerick, A. W., Bruner, R., Ben-Bassat, A., & Tal, R. (1990). Genetic organization of the cellulose synthase operon in *Acetobacter xylinum* (cellulose biogenesis/cloning/sequencing). *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 87 (20), 8130–8134.
28. Wu, S. C., & Li, M. H. (2015). Production of bacterial cellulose membranes in a modified airlift bioreactor by *Gluconacetobacter xylinus*. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 120(4), 444–449.
29. Zahan, K. A., Muhamad, I. I., Kelajuan, D., Cakera, P., Cakera Berputar, R., Selulosa, P., Khairul, B., Zahan, A., & Pa'e, N. (2016). An evaluation of fermentation period and discs rotation speed of rotary disc reactor for bacterial cellulose production. *Sains Malaysiana* 45 (3), 393–400.

## **Analýza metódy enzýmovej hydrolýzy pri výrobe nanocelulózy**

Eduard Horban\*, Monika Stankovská  
Výskumný ústav papiera a celulózy, Bratislava  
[horban@vupc.sk](mailto:horban@vupc.sk)

### **Abstrakt**

Nanocelulóza (NC), reprezentovaná nanokryštalickou celulózou (CNK) a celulózovými nanofibrilami (CNF), je mimoriadne dôležitá skupina biomateriálov, ktorá sa vyznačuje vynikajúcimi mechanickými, tepelnými a optickými vlastnosťami. Tradičná metóda výroby CNK, kyslá hydrolýza (KH), zostáva referenčným štandardom pre dosiahnutie vysokej kryštalinity, ale jej škálovateľnosť je obmedzená vplyvmi na životné prostredie spojenými s používaním agresívnych minerálnych kyselín a tvorbou toxických odpadových vôd.

V kontexte princípov „zelenej chémie“ sa však enzymatická hydrolýza (EH), ktorá je založená na pôsobení celulózových komplexov považuje za šetrnú a ekologickú alternatívu. EH je zameraná na selektívnu depolymerizáciu ľahko dostupných amorfných domén celulózy pri zachovaní vysoko usporiadaného kryštalického jadra, ako je opísané v tejto recenzii.

**Kľúčové slová:** Nanocelulóza (NC), nanokryštalická celulóza (CNK), celulózové nanofibrily (CNF), enzymatická hydrolýza (EH), optimalizácia, štruktúra.

### **Úvod**

S globálnym prechodom na cirkulárnu ekonomiku a udržateľný rozvoj sa osobitná pozornosť venuje biomateriálom pochádzajúcim z obnoviteľných zdrojov. NC spolu so svojimi derivátmi, ako sú CNK a CNF, patrí medzi najslubnejšie materiály 21. storočia. Je to vďaka jedinečnej kombinácii vlastností zdedených po prírodnom polyméri: vysoká mechanická pevnosť (blížiaca sa pevnosti ocele), nízka hustota, veľký špecifický povrch, vysoká chemická reaktivita a biokompatibilita. Tieto vlastnosti viedli k širokej škále potenciálnych aplikácií NC v biomedicíne, kompozitných materiáloch, elektronike, balení a systémoch na úpravu vody. V posledných rokoch sa EH aktívne skúma ako ekologická a šetrná alternatíva k agresívnemu chemickému spracovaniu. EH, ktoré využíva prírodné celulázy, umožňuje selektívnu degradáciu celulózových reťazcov za miernych podmienok (pH 4-6 a stredná teplota).

Táto štúdia poskytuje systematickú analýzu metódy EH v kontexte výroby nanocelulózy od roku 2000 do súčasnosti. Hlavným cieľom štúdie je posúdiť súčasné trendy a pokrok, identifikovať kľúčové technologické výzvy a určiť vyhliadky na škálovateľnosť procesu.

### **Vlastnosti celulózy**

Základnou štruktúrnou jednotkou celulózy je anhydroglukózová jednotka (AGJ), ktorá je D-glukopyranosylovým zvyškom. Tieto zvyšky sú sekvenčne spojené a vytvárajú reťazec prostredníctvom  $\beta$ -(1,4) väzieb. Priestorová konfigurácia reťazca je charakterizovaná striedaním monomérov otočených o 180 stupňov vzhľadom na seba, čo vedie k stabilnej konfigurácii 4C1 (Gopi a kol. 2019).

Chemická povaha celulózy, určená jej vnútromolekulárnymi a medzimolekulárnymi väzbami, určuje niekoľko jedinečných fyzikálno-chemických vlastností. Patrí medzi ne vysoká hydrofilnosť, chiralita (dôležitá pre mnohé optické aplikácie), ľahká chemická modifikovateľnosť a naopak, nerozpustnosť vo väčšine vodných rozpúšťadiel. Celulóza sa ďalej vyznačuje vysokou žiaruvzdornosťou (odolnosťou voči topeniu) (Habibi a kol. 2010).

Charakteristiky celulózy, vrátane jej fyzikálnych a chemických vlastností, priamo závisia od dĺžky polymérneho reťazca (stupňa polymerizácie), ktorá môže dosiahnuť 10 000 – 15 000 AGJ pre drevnú a bavlnenú celulózu. Okrem toho je prírodná celulóza zložená z usporiadaných kryštalických a menej hustých amorfných domén. Kryštalickosť, ktorá sa pohybuje v rozmedzí 40 – 70% v závislosti od zdroja a spôsobu spracovania, určuje reaktivitu materiálu, pretože amorfné oblasti sú prístupnejšie chemickej funkcionalizácii (Dufresne & Belgacem 2013; Tarchoun a kol. 2019).

Rozdielna stabilita dvoch fáz celulózy – kryštalickej a amorfnej – znamená, že amorfne oblasti sú náchylnejšie na chemickú, mechanickú a enzymatickú degradáciu. Okrem toho, v závislosti od orientácie molekúl a typu intermolekulárných interakcií, môže celulóza existovať v rôznych polymorfných formách (I, II, III<sub>I</sub>, III<sub>II</sub>, IV<sub>I</sub>, IV<sub>II</sub>), ktoré možno získať termochemickou alebo chemickou konverziou (Thakur 2015a,b).

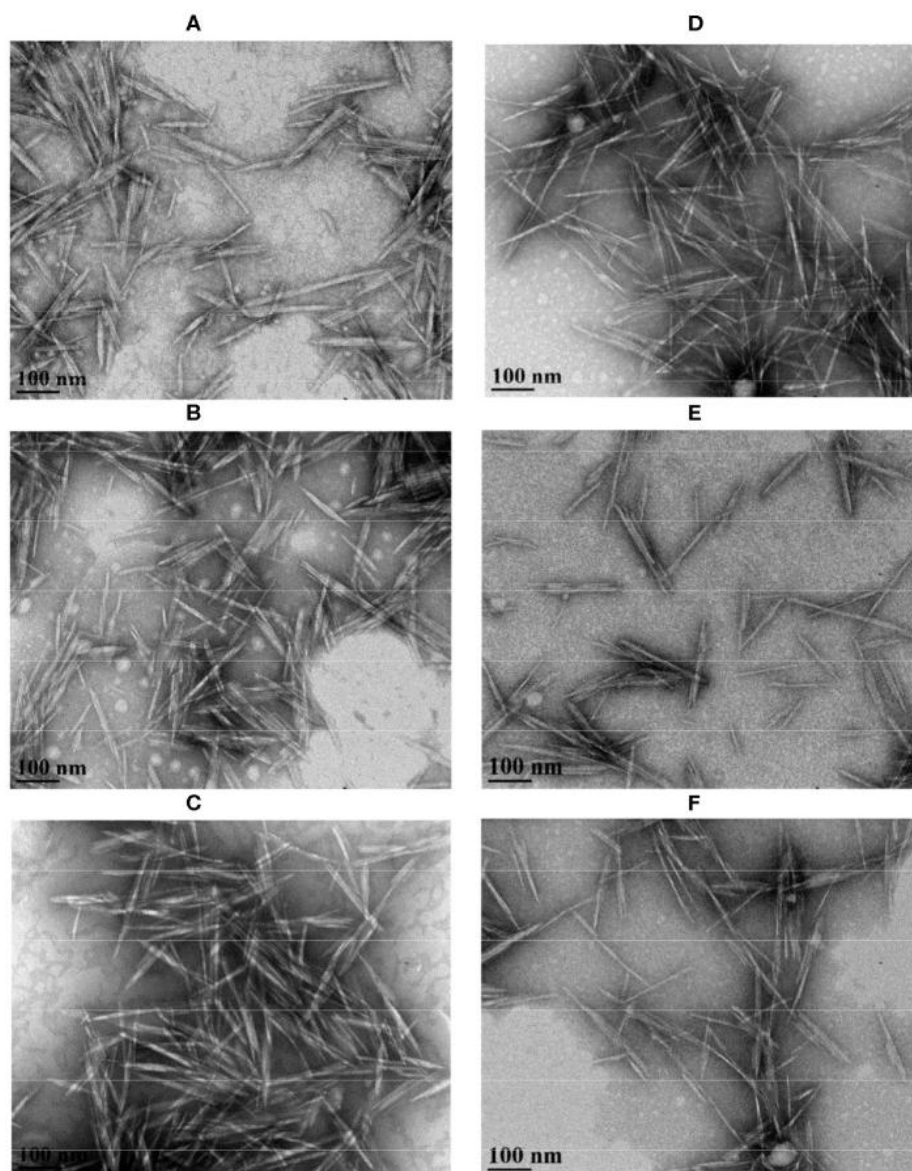
## Vlastnosti NC

Nanoštruktúry celulózy existujú v dvoch hlavných formách: CNK (Obrázok 1), ktoré sa zvyčajne vyrábajú pomocou KH, a CNF, ktoré sa syntetizujú mechanickým spracovaním celulózy. Všeobecné používanie synonymných pojmov si vyžaduje objasnenie: CNK sa môže označovať ako nanokryštalická celulóza alebo „(nano)whiskers“, zatiaľ čo CNF je tiež známa ako mikrofibrilovaná celulóza (Ballesteros a kol. 2018).

Typická metóda výroby CNK zahŕňa kyslé spracovanie počiatkovej celulózy. Tento proces, vykonávaný pomocou kyseliny sírovej, chlorovodíkovej alebo fosforečnej selektívne rozkladá amorfne oblasti a uvoľňuje vysoko kryštalické nanoštruktúry (Habibi a kol. 2010). Počas procesu KH sa pozoruje selektívna degradácia celulózy, kde amorfne oblasti podliehajú najskôr hydrolýze, zatiaľ čo vysoko usporiadané kryštalické oblasti vykazujú zvýšenú odolnosť voči pôsobeniu kyslej reakčnej zmesi (Brinchi a kol. 2013). Po KH sa proces zastaví prepláchnutím materiálu vodou, po ktorom nasleduje centrifugácia za účelom získania extraktu CNK. Ďalšie odstránenie zvyškových molekúl kyseliny sa vykonáva niekoľkodňovou dialýzou. Na zabezpečenie stability a homogénnosti suspenzie sa používa mechanické predspracovanie, najčastejšie sonifikácia, ktoré účinne disperguje nanokryštály. Záverečné kroky zahŕňajú meranie koncentrácie a sušenie suspenzie (Brinchi a kol. 2013).

CNK sa teda môže vyrábať z rôznych celulóзовých materiálov a rôznymi technologickými postupmi; hlavnými a najbežnejšími výrobnými metódami zostávajú KH s použitím kyseliny sírovej (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) a použitie dreva alebo bavlny ako suroviny (Reid a kol. 2017).

Syntéza CNF zahŕňa vysokoenergetické mechanické spracovanie delignifikovanej a bielennej celulózy. Na rozloženie celulóзовých vlákien na nanofibrily sa používajú rôzne zariadenia, vrátane vysokotlakových homogenizátorov, mikrofluidizérov, guľových mlynov, ako aj parnej explózie, vysokorýchlostného miešania, extrudovania a ultrazvuku (Klemm a kol. 2018).



*Obr. 1. Mikrografy CNK z transmisného elektrónového mikroskopu. Vzorky boli izolované z filtračného papiera (A–C) a drevnej buničiny (D–F) po enzymatickom spracovaní po 0 hod (A, D), 2 hod (B, E) a 10 hod (C, F). Z Beyene a kol. (2018). Distribuované pod licenciou CC BY, MDPI.*

### **Výroba NC metódou EH**

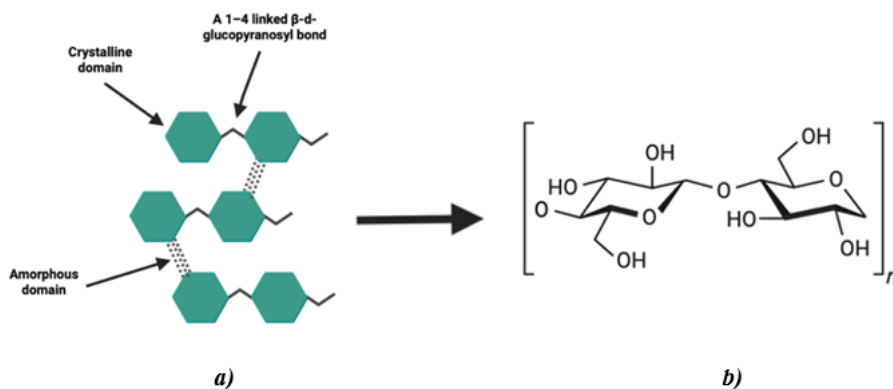
Voľba konfigurácie procesu závisí od povahy počiatočného substrátu a požadovanej morfológie produktu. Biotechnologická konverzná metodika sa v zásade skladá z dvoch fáz: frakcionácia biomasy a biokatalytická modifikácia. V prípade nespracovanej celulózovej suroviny je kritická implementácia krokov predbežnej úpravy – mechanická dezintegrácia alebo fyzikálno-chemické úpravy (autohydrolýza, alkalické, bielenie) zamerané na elimináciu amorfných nečistôt (hemicelulóza a lignín) a zvýšenie dostupnosti substrátu. Pri použití komerčne vysoko purifikovaných materiálov akými sú sulfátová buničina (Squinca a kol. 2020), bavlnený linter (Cui a kol. 2016), alebo mikrokryštalická (nano-) celulóza (Cui a kol. 2016)), nie je potrebná predbežná úprava. Pevné zvyšky celulózy potom prechádzajú kontrolovanou EH, ktorej mechanizmus sa líši v závislosti od špecifickosti použitých enzýmov.

Prvá fáza pozostáva z metód predbežnej úpravy, vrátane mechanických procesov (homogenizácia (Lourenço a kol. 2019), mikrofluidizácia (Espinosa a kol. 2019), vytlačanie

(Santucci a kol. 2016), a sonikácia (Ghafari a kol. 2020), okrem ostatných) v kombinácii s premývaním (Camargo a kol. 2016).

Druhou fázou syntézy NC je kontrolovaná enzymatická hydrolýza, alebo samotná EH. Predbežne upravená biomasa sa zavádza do pufrovacieho systému s pridaním celulytických enzýmov na fragmentáciu polyméru. Použitie enzýmových prípravkov s dominantnou endoglukanázovou aktivitou umožňuje „šetrný“ mechanizmus degradácie: dochádza k preferenčnému odstraňovaniu parakryštalických (amorfných) zón, zatiaľ čo vysoko usporiadané kryštalické oblasti (Obr. 2) vykazujú odolnosť voči enzymatickému pôsobeniu a zostávajú ako nanočastice (Josefsson a kol. 2008). Stabilná enzymová aktivita bola dosiahnutá použitím pufrovacích roztokov. Podľa relevantných zdrojov (Filson a kol. 2009; Martelli-Tosi a kol. 2016), hydrolýza sa vykonávala v mierne kyslom alebo neutrálnom prostredí (pH 4–7) za izotermických podmienok (45–50°C) a pri konštantnej homogenizácii. Trvanie enzymovej úpravy vykazovalo značnú variabilitu (1–72 hod), čo je pravdepodobne funkcia heterogenity celulózovej matice, podmienok miešania, zloženia komponentov a optimálneho výkonu enzýmových zmesí. Všetky tieto variácie vedú k rôznym nastaviteľným časovým parametrom, ktoré umožňujú hydrolyzovať materiál na výrobu NC (Börjesson & Westman 2015; Peng a kol. 2011; Spence a kol. 2011).

Protokol končí treťou fázou, ktorá zahŕňa frakcionáciu a čistenie po reakcii. Táto fáza zahŕňa diafiltráciu alebo viacnásobné preplachovanie na odstránenie rozpustných zložiek a následnú resuspenziu čisteného koncentráту celulózy. Fyzikálna dezintegrácia agregátov až na úroveň nanometrov sa dosahuje mechanickými homogenizačnými metódami. Tieto záverečné manipulácie sú kritické pre tvorbu NC, ktorá sa vyznačuje stabilnou koloidnou disperziou a úzkym rozložením morfológických parametrov častíc (Filson a kol. 2009; Song a kol. 2014; Teixeira a kol. 2015a).



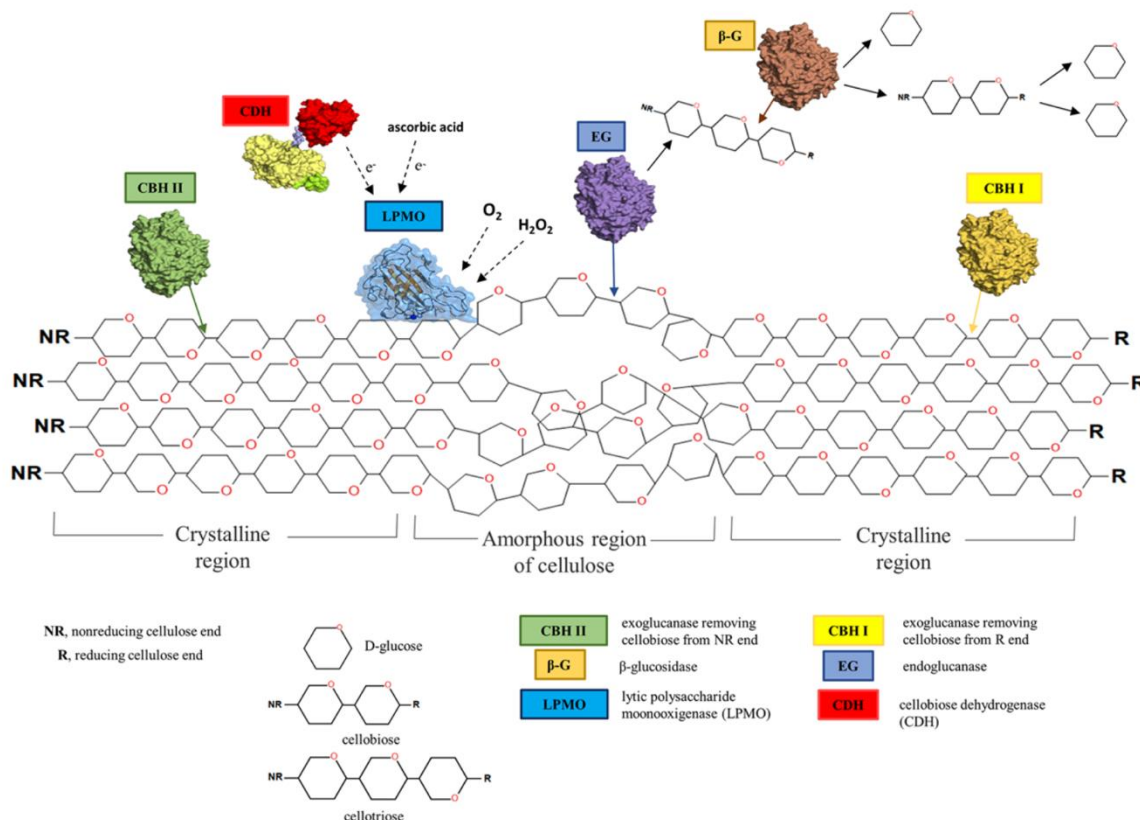
Obr. 2. a) Kryštalické a amorfné oblasti makroštruktúry celulózových vlákien a 1–4-viazaná β-D-glukopyranosylová väzba (alebo β-(1→4) glykozidová väzba); b) Chemická štruktúra (reťazec) molekuly celulózy.

### Princíp účinku enzýmov

Hoci sa na extrakciu a modifikáciu celulózy používajú rôzne triedy enzýmov, celulózy (EC 3.2.1.4) predstavujú dominantnú triedu v týchto procesoch. Všeobecný diagram enzýmov podieľajúcich sa na výrobe celulózy je znázornený na obr. 3. Ich charakteristické vlastnosti, akými sú vysoká substrátová špecifickosť a selektivita pre celulózové vlákna umožňujú rôzne typy štrukturálnych a funkčných modifikácií celulózy. Celulózy sú špecializovanou triedou hydroláz, ktoré priamo katalyzujú hydrolýzu β-1,4-glykozidových väzieb v celulóze

a premieňajú polymér na rozpustné, jednoduchšie cukry (glukózu). Biosyntéza týchto enzýmov je charakteristická pre celulólytické organizmy, vrátane členov rodov *Clostridium*, *Trichoderma* a *Aspergillus* (Pirich a kol. 2020).

EH celulózy závisí od synergie veľkého počtu celuláz kódovaných celulólytickými organizmami. Tieto enzýmy sa funkčne delia do dvoch hlavných skupín. Endoglukanázy (EG) sú zodpovedné za vnútorné náhodné štiepenie  $\beta$ -1,4-väzieb v amorfných oblastiach, čím vytvárajú nové konce reťazca. Exoglukanázy (EXG) potom postupne útočia na tieto konce a uvoľňujú celobiózu.  $\beta$ -glukozidázy dokončujú proces hydrolýzou celobiózy na glukózu (Segato a kol. 2014).



Obr. 3. Prehľadný diagram hlavných enzýmov podieľajúcich sa na katalytickom rozklade celulózy a následnej produkcii NC. Skratky: R (redukčný) a NR (neredukčný) koniec celulózy; EG (endoglukanáza) pre vnútorné rozštiepenie reťazca; CBH I (R-terminálna exoglukanáza) a CBH II (NR-terminálna exoglukanáza) pre odstránenie celobiózy;  $\beta$ -G ( $\beta$ -glukozidáza): pre konečnú hydrolýzu; CDH (celobióza dehydrogenáza); a LPMO (lytické polysaccharidové monooxygenázy) pre oxidačnú aktiváciu. Z Andlar et al. (2018).

Po celulázach sú xylanázy najžiadanejšou triedou enzýmov pri výrobe nanocelulózy. Ich mechanizmus pôsobenia je zameraný na rozklad xylánovej matice, ktorá chráni celulózu. Znížením tejto štruktúrálnej bariéry pôsobenia xylanázy výrazne zlepšujú proces extrakcie (Hu a kol., 2018). Xylanázy nielenže uľahčujú prístup k celulóze odstraňovaním hemicelulózovej matice, ale vykazujú aj synergickú aktivitu s celulázami. Táto synergia vzniká stimuláciou napučievania a zvýšením porézności vlákien, čím sa výrazne zvyšuje kontaktná plocha a dostupnosť mikrovlákien celulózy pre celulázy. Preto je začlenenie xylanáz do enzýmového kokteilu účinným prostriedkom na optimalizáciu mikroštruktúry substrátu (Hu a kol., 2011). Odstránenie xylánu je však kritickým parametrom, ktorý určuje konečné vlastnosti NC. Avšak úplné odstránenie zvyškov xylánu nie je úplne optimálne. Prítomnosť xylánu v nanomateriáli

môže zvýšiť jeho koloidnú stabilitu tým, že inhibuje agregáciu vlákien (Siqueira a kol., 2019). Predpokladá sa, že xylán pôsobí ako sterická bariéra, ktorá bráni nevratnej väzbe povrchových hydroxylových skupín na susedných celulóзовých vláknach (Laivins & Scallan 1993).

Ďalšou, avšak mimoriadne dôležitou triedou enzýmov, ktoré uľahčujú efektívnu produkciu celulózy, sú LPMO. Tieto enzýmy sa stali neoddeliteľnou súčasťou moderných zmesí celuláz používaných na hydrolýzu lignocelulóзовých surovín. Mechanizmus pôsobenia LPMO je založený na oxidačnom štiepení glykozidových väzieb v celulóзовých reťazcoch. Tento proces vedie k tvorbe oxidovaných glukózových jednotiek na rôznych pozíciách, čím sa celulóзовý substrát stáva prístupnejším pre ďalšiu hydrolýzu s primárnymi celulázami (Villares a kol. 2017). Štúdie o použití LPMO pri výrobe NC sú obmedzené. Práca Hu a kol. (2018) demonštruje potenciál rodiny AA9 LPMO v kombinácii s EG na spracovanie bielennej sulfátovej buničiny. Hoci sa makroskopické vlastnosti vlákien (veľkosť, morfológia) výrazne nezmenili, bolo pozorované výrazné zlepšenie vnútorných vlastností. Kľúčovým mechanizmom je oxidačná degradácia celulózy, ktorá vedie k tvorbe karboxylových kyselín a ketónových štruktúr. Tieto skupiny zase dramaticky zvyšujú záporný náboj povrchu vlákien, o čom svedčí zvýšenie zeta potenciálu. Zvýšenie zeta potenciálu je mimoriadne dôležité, pretože podporuje efektívnu nanofibriláciu a zabezpečuje vysokú stabilitu konečnej vodnej suspenzie NC.

### **Faktory enzymatických procesov**

Enzymatická výroba NC je komplexný proces, ktorý je citlivý na rôzne technologické a biochemické parametre. Účinnosť celulózy ovplyvňujú dobre preskúmané faktory, akými sú optimálne pH a teplota, ako aj ich špecifická afinita k celulóze. Vonkajšie faktory, ktoré menia mechanizmus enzýmového pôsobenia, sú však kľúčové pre dosiahnutie požadovaných vlastností NC. Napríklad voľba koncentrácie enzýmu alebo reakčného času určuje hĺbku a selektivitu pôsobenia enzýmu. V nasledujúcich troch podkapitolách budú diskutované kľúčové charakteristiky, ktoré ovplyvňujú konečný stupeň fibrilácie, morfológiu a, čo je najdôležitejšie, výťažnosť a funkčné vlastnosti konečného NC.

#### *Predbežná úprava a suroviny*

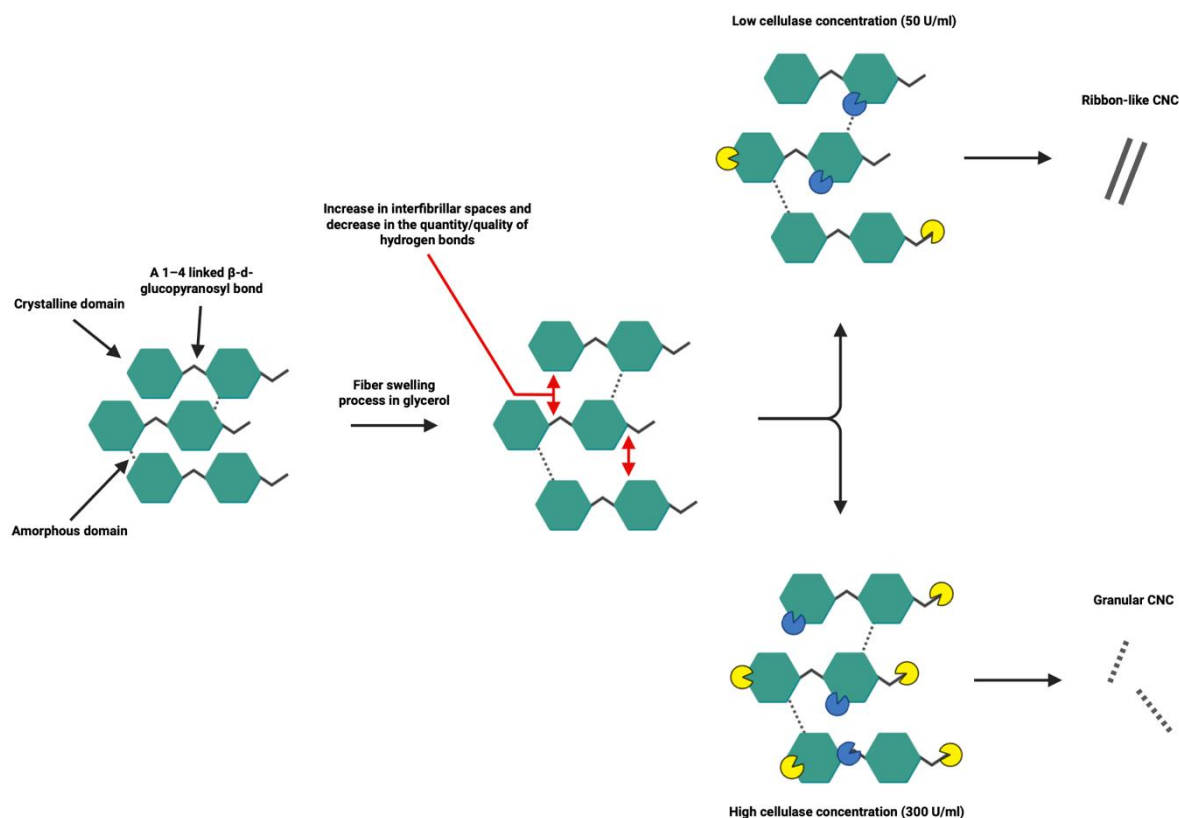
Surovina má mnohostranný vplyv na výrobu NC, predovšetkým vďaka svojej čistote. Prvým krokom je zabezpečiť čo najčistejší substrát efektívnym odstránením všetkých necelulóзовých zložiek (hemicelulóza, lignín a bielkoviny), pretože EH je vysoko selektívna a zameriava sa takmer výlučne na celulózu. Ak je surovina kontaminovaná, konečný produkt NC bude taktiež obsahovať nečistoty, pričom obzvlášť kritická je prítomnosť lignínu. Celulázy majú zo svojej podstaty vysokú afinitu k lignínu, čo vedie k nevratnej, neproduktívnej väzbe. Tento jav nielenže znižuje koncentráciu aktívneho enzýmu, ale vyžaduje aj dôkladnejšie predčistenie suroviny, aby sa maximalizovala účinnosť hydrolýzy a zabezpečila vysoká kvalita cieľového NC (Seo a kol. 2011). Hlavným problémom, s ktorým sa stretáva EH lignocelulóзовej suroviny, je neproduktívne viazanie celuláz. K tomuto javu dochádza, keď sa enzýmy adsorbujú na necelulóзовé zložky (najmä lignín), čím sa vylučujú z katalytického cyklu. Priamym dôsledkom tejto inhibície je potreba zvýšiť dávku enzýmov, aby sa udržala dostatočná rýchlosť reakcie. Zvýšená spotreba celuláz, ktoré sú jednými z najdrahších činidiel v procese, priamo zvyšuje výrobné náklady a ohrozuje ekonomickú stránku výroby NC (Saini a kol. 2016).

Ďalej je potrebné zohľadniť kritický faktor, a to rozptyl adsorpčného správania celuláz. Tento problém sa prejavuje v dvoch formách; na jednej strane enzýmy vykazujú rôznu afinitu k látkam rôzneho pôvodu, čo je spôsobené štruktúrou substrátu (Tu a kol. 2007). Na druhej strane, rôzne komerčné alebo experimentálne enzýmové prípravky môžu vykazovať odlišné afinity pri interakcii s rovnakým pevným substrátom (Gomes a kol. 2018). Kľúčom k úspešnému vývoju postupov hydrolýzy je pochopenie tejto dvojitej závislosti (na materiáli a na príprave). Táto variabilita v afinite celulázy k tuhým látkam je do veľkej miery výsledkom špecifickej väzby modulov viažucich sacharidy (MVS), ktoré sa bežne nachádzajú v celulázach húb. Moduly vykazujú rôznu afinitu k rôznym substrátom. Ukázalo sa najmä to, že afinita MVS k tuhej fáze priamo závisí od stupňa jej kryštalinity (McLean a kol. 2002).

#### *Enzymatické a hydrolytické parametre*

Účinnosť výroby NC závisí vo veľkej miere od rovnováhy medzi dávkou enzýmu a reakčným časom. Chen a kol., (2012) tvrdia, že zintenzívnenie hydrolýzy nemusí vždy viesť k zvýšeniu výťažnosti cieľového nanoproduktu. V ich experimente zvýšenie enzýmovej záťaže (10–19 FPU/g) korelovalo so zvýšením hladiny redukujúcich cukrov, čo naznačuje hlbokú depolymerizáciu. Maximálny výťažok CNK bol však pozorovaný pri strednom dávkovaní (13 FPU/g), po ktorom výťažok klesol, pravdepodobne v dôsledku nadmernej degradácie kryštalických oblastí. Podobný trend bol pozorovaný aj v prípade kinetiky procesu, kde sa ukázal ako optimálny čas dva dni.

Neskoršia štúdia (Tong a kol., 2020) potvrdila priamu koreláciu medzi podmienkami hydrolýzy a morfológickými charakteristikami CNK. Použitie nízkych koncentrácií enzýmov (1–20 U/ml) podporilo tvorbu tyčinkovitých štruktúr (dĺžka 600–800 nm a priemer 20–40 nm). Zvýšenie koncentrácie na 50 U/ml vyvolalo vznik sférickej frakcie (priemerný priemer 50 nm), ktorá koexistovala s tyčinkovitou formou. Pri extrémne vysokých koncentráciách (>300 U/ml) bola aj pri skrátenom čase hydrolýzy (5 hod) pozorovaná prevaha sférickej morfológie (Obr. 4). Potvrdila sa aj kinetická závislosť pri fixnej nízkej dávke (10 U/ml) viedlo zvýšenie času z 6 na 18 hod k zníženiu dĺžky tyčinkovitých častíc z 800–900 nm na 500–600 nm. V inej štúdii (X. Q. Chen a kol. 2019), kde sa použila 5-hod hydrolýza s dávkami 10–50 µg/ml vytvorili stuhovité CNK, ktorých veľkosť sa zmenšovala s rastúcou koncentráciou, zatiaľ čo hladiny 100–300 µg/ml viedli k tvorbe granulovaných foriem. Toto pozorovanie naznačuje, že pri vysokých koncentráciách sú EG schopné atakovať nielen amorfné, ale aj kryštalické oblasti, najmä počas napučania vlákien. Okrem toho bola preukázaná možnosť presnej kontroly veľkosti – kde pri 20 µg/ml zvýšenie času hydrolýzy z 5 na 11 hod plynulo znížilo dĺžku nanokryštálov z 400–500 na 250–400 nm.



Obr. 4. Schematický diagram mechanizmu výroby dvoch rôznych typov NC/CNK z bavlnených vlákien pomocou enzýmu celulázy. Modré kruhy predstavujú EG, žlté kruhy predstavujú EXG. Teória je taká, že EG, zložka celulázy, pôsobí na amorfnú oblasť celulózových vlákien, zatiaľ čo EXG pôsobí na konce R alebo NR polysacharidového reťazca celulózy. Zmena koncentrácie enzýmu však mení aj jeho funkčnú kapacitu. Napríklad pri vyšších koncentráciách celulázy EG skracovala celulózový reťazec nielen v amorfných oblastiach, ale aj v kryštalických oblastiach. Upravené podľa X.Q. Chen a kol. (2019).

### Parametre teploty a pH

Rovnako ako všetky proteínové katalyzátory, aj celulázy vykazujú maximálnu katalytickú aktivitu v rámci veľmi špecifického rozsahu pH a teploty. Tieto kritické parametre priamo súvisia s vnútornou termodynamickou stabilitou každého enzýmu; odchýlky od týchto parametrov môžu spôsobiť nevratnú denaturáciu, čo vedie k úplnej strate enzýmovej aktivity.

Regulácia pH je kritickým parametrom v procese EH. Je to kvôli jej priamemu vplyvu na adsorpčné/desorpčné mechanizmy celuláz na celulózovom substráte (Gomes a kol. 2015) a v dôsledku toho aj na celkovú účinnosť procesu. Bolo preukázané (Rodrigues a kol. 2012) že zvýšenie pH z 4,8 na 9–10 viedlo k významným konformačným zmenám v štruktúre enzýmu Cel7A. Dôležité je, že tieto zmeny boli reverzibilné a po návrate k pôvodnej hodnote pH 4,8 sa obnovili. Toto pozorovanie naznačuje, že hoci vystavenie celuláz suboptimálnym hodnotám pH má jasné štrukturálne dôsledky, v určitých prípadoch môžu byť tieto zmeny reverzibilné, čím sa zabráni trvalej strate enzýmov. V technologickom kontexte výroby NC prevláda rozsah pH medzi 4,0 a 5,8. Výnimky, ako napríklad použitie pH 7,0, boli taktiež zdokumentované (Li a kol. 2020; Pääkko a kol. 2007).

V oblasti EH syntézy NC je teplotný režim limitujúcim faktorom, ktorý sa zvyčajne pohybuje v prísne stanovenom rozmedzí 45–55°C. Možnosť rozšírenia tohto rozmedzia, ktorá má významný technologický význam, vyplýva z potreby využívať alternatívne biokatalytické systémy, ako sú enzýmy nehubového pôvodu alebo funkčné mikrobiálne konzorciá.

Výrazným príkladom prekonania termolability je štúdia Teixeira a kol. (2015b), v ktorej sa NC úspešne získalo pomocou EH za použitia etylénglykolu a  $\beta$ -glukozidázy izolovanej z hypertermofilných archeí *Pyrococcus horikoshii* a *Pyrococcus furiosus*. Tento prístup umožnil zmeniť reakčnú teplotu na 85°C. Okrem toho významný posun smerom k miernej termotolerancii dokazuje správa Ma a kol. (2009), kde sa komerčný enzýmový prípravok Giant A účinne použil pri 60°C, čo presne zodpovedá uvádzanej optimálnej teplote jeho katalytickej aktivity.

## Záver

Analýza potvrdzuje, že metóda EH je jednou z najslubnejších a najekologickejších stratégií na výrobu NC, vrátane CNK a CNF. Výhodou EH je schopnosť vykonávať proces za miernych podmienok, čím sa eliminuje použitie agresívnych činidiel typických pre tradičnú kyslú hydrolýzu, čím sa minimalizujú štrukturálne poškodenia polyméru. Použitie vysoko špecifických celuláz zabezpečuje vyššiu čistotu konečného produktu, ako aj kontrolu nad morfológiou a stupňom polymerizácie NC. Komerčné využitie metódy EH však brzdí niekoľko kritických faktorov. Hlavnými výzvami zostávajú vysoké náklady na priemyselné enzýmové prípravky, ich nízka tepelná stabilita a relatívne pomalá reakčná rýchlosť v porovnaní s KH. Okrem toho je účinnosť procesu vo veľkej miere závislá od výberu substrátu a jeho predbežnej úpravy, ktorej cieľom je zvýšiť dostupnosť amorfných oblastí pre pôsobenie enzýmov.

Perspektívy ďalšieho výskumu ležia v oblasti bioinžinierstva a vytvárania nových biokatalytických systémov. Patrí sem vývoj termotolerantných a vysoko aktívnych celuláz prostredníctvom cieleného vývoja alebo mutagénesis, ako aj hľadanie alternatívnych zdrojov enzýmov (napr. z hypertermofilných organizmov), ktoré sú schopné fungovať pri zvýšených teplotách, aby urýchlili reakčnú kinetiku. Súčasne je potrebné zamerať sa aj na optimalizáciu imobilizácie enzýmov pre ich opakované použitie a zníženie prevádzkových nákladov, ako aj na vývoj integrovaných procesov kombinujúcich efektívnu predúpravu biomasy s následnou kontrolovanou EH pre škálovateľnú a ekonomicky realizovateľnú výrobu nanocelulózy.

## Pod'akovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na Základe Zmluvy č. APVV-21-0505 ako aj Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence.

## Literatúra

1. Andlar, M., Rezić, T., Marđetko, N., Kracher, D., Ludwig, R., & Šantek, B. (2018). Lignocellulose degradation: An overview of fungi and fungal enzymes involved in lignocellulose degradation. In *Engineering in Life Sciences* (Vol. 18, Issue 11, pp. 768–778). Wiley-VCH Verlag.
2. Ballesteros, L.F., Michelin, M., Augusto, A., José, V., Teixeira, A., & Cerqueira, M.Â. (n.d.). *BRIEFS IN MOLECULAR SCIENCE BIOBASED POLYMERS Lignocellulosic Materials and Their Use in Bio-based Packaging*. www.epnoe.eu
3. Börjesson, M., & Westman, G. (2015). Crystalline Nanocellulose — Preparation, Modification, and Properties. In *Cellulose - Fundamental Aspects and Current Trends*. InTech.

4. Brinchi, L., Cotana, F., Fortunati, E., & Kenny, J.M. (2013). Production of nanocrystalline cellulose from lignocellulosic biomass: Technology and applications. In *Carbohydrate Polymers* (Vol. 94, Issue 1, pp. 154–169).
5. Camargo, L.A., Pereira, S.C., Correa, A.C., Farinas, C.S., Marconcini, J.M., & Mattoso, L.H.C. (2016). Feasibility of Manufacturing Cellulose Nanocrystals from the Solid Residues of Second-Generation Ethanol Production from Sugarcane Bagasse. *Bioenergy Research*, 9(3), 894–906.
6. Chen, X., Deng, X., Shen, W., & Jiang, L. (2012). Enzymolysis preparation of NCC. In *BioResources* (Vol. 7, Issue 3).
7. Chen, X.Q., Pang, G.X., Shen, W.H., Tong, X., & Jia, M.Y. (2019). Preparation and characterization of the ribbon-like cellulose nanocrystals by the cellulase enzymolysis of cotton pulp fibers. *Carbohydrate Polymers*, 207, 713–719.
8. Cui, S., Zhang, S., Ge, S., Xiong, L., & Sun, Q. (2016). Green preparation and characterization of size-controlled nanocrystalline cellulose via ultrasonic-assisted enzymatic hydrolysis. *Industrial Crops and Products*, 83, 346–352.
9. Dufresne, A., & Belgacem, M.N. (2013). Cellulose-reinforced composites: From micro-to nanoscale. In *Polimeros* (Vol. 23, Issue 3, pp. 277–286).
10. Espinosa, E., Rol, F., Bras, J., & Rodríguez, A. (2019). Production of lignocellulose nanofibers from wheat straw by different fibrillation methods. Comparison of its viability in cardboard recycling process. *Journal of Cleaner Production*, 239.
11. Filson, P.B., Dawson-Andoh, B.E., & Schwegler-Berry, D. (2009). Enzymatic-mediated production of cellulose nanocrystals from recycled pulp. *Green Chemistry*, 11(11), 1808–1814.
12. Ghafari, R., Scaffaro, R., Maio, A., Gulino, E.F., Lo Re, G., & Jonoobi, M. (2020). Processing-structure-property relationships of electrospun PLA-PEO membranes reinforced with enzymatic cellulose nanofibers. *Polymer Testing*, 81.
13. Gomes, D., Gama, M., & Domingues, L. (2018). Determinants on an efficient cellulase recycling process for the production of bioethanol from recycled paper sludge under high solid loadings. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1).
14. Gomes, D., Rodrigues, A.C., Domingues, L., & Gama, M. (2015). Cellulase recycling in biorefineries—is it possible? In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 99, Issue 10, pp. 4131–4143). Springer Verlag.
15. Gopi, S., Balakrishnan, P., Chandradhara, D., Poovathankandy, D., & Thomas, S. (2019). General scenarios of cellulose and its use in the biomedical field. In *Materials Today Chemistry* (Vol. 13, pp. 59–78). Elsevier Ltd.
16. Habibi, Y., Lucia, L. A., & Rojas, O.J. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, 110(6), 3479–3500.
17. Hu, J., Arantes, V., & Saddler, J.N. (2011). The enhancement of enzymatic hydrolysis of lignocellulosic substrates by the addition of accessory enzymes such as xylanase: Is it an additive or synergistic effect? *Biotechnology for Biofuels*, 4.
18. Hu, J., Tian, D., Renneckar, S., & Saddler, J.N. (2018). Enzyme mediated nanofibrillation of cellulose by the synergistic actions of an endoglucanase, lytic polysaccharide monoxygenase (LPMO) and xylanase. *Scientific Reports*, 8(1).

19. Josefsson, P., Henriksson, G., & Wågberg, L. (2008). The physical action of cellulases revealed by a quartz crystal microbalance study using ultrathin cellulose films and pure cellulases. *Biomacromolecules*, 9(1), 249–254.
20. Klemm, D., Cranston, E.D., Fischer, D., Gama, M., Kedzior, S.A., Kralisch, D., Kramer, F., Kondo, T., Lindström, T., Nietzsche, S., Petzold-Welcke, K., & Rauchfuß, F. (2018). Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science: Today's state. In *Materials Today* (Vol. 21, Issue 7, pp. 720–748). Elsevier B.V.
21. Laivins, G.V., & Scallan, A.M. (1993). The mechanism of hornification of wood pulps. In C. F. Baker (Ed.), *Trans. of the Xth Fund. Res. Symp. Oxford, 1993* (pp. 1235–1260). Fundamental Research Committee (FRC), Manchester.
22. Li, L., Zhuang, J., Zou, H., Pang, J., & Yu, S. (2020). Partition usage of cellulose by coupling approach of supercritical carbon dioxide and cellulase to reducing sugar and nanocellulose. *Carbohydrate Polymers*, 229.
23. *Lignocellulosic Polymer Composites*. (n.d.).
24. Lourenço, A.F., Gamelas, J.A.F., Sarmiento, P., & Ferreira, P.J.T. (2019). Enzymatic nanocellulose in papermaking – The key role as filler flocculant and strengthening agent. *Carbohydrate Polymers*, 224.
25. Ma, L., Zhang, Y., Cao, J., & Yao, J. (n.d.). CNCs from *Phyllostachys heterocycla*. In *BioResources* (Vol. 9, Issue 1).
26. Martelli-Tosi, M., Torricillas, M.D.S., Martins, M.A., Assis, O.B.G.De, & Tapia-Blácido, D.R. (2016). Using commercial enzymes to produce cellulose nanofibers from soybean straw. *Journal of Nanomaterials*, 2016.
27. McLean, B.W., Boraston, A.B., Brouwer, D., Sanaie, N., Fyfe, C.A., Warren, R.A.J., Kilburn, D.G., & Haynes, C.A. (2002). Carbohydrate-binding modules recognize fine substructures of cellulose. *Journal of Biological Chemistry*, 277(52), 50245–50254.
28. Pääkko, M., Ankerfors, M., Kosonen, H., Nykänen, A., Ahola, S., Österberg, M., Ruokolainen, J., Laine, J., Larsson, P.T., Ikkala, O., & Lindström, T. (2007). Enzymatic hydrolysis combined with mechanical shearing and high-pressure homogenization for nanoscale cellulose fibrils and strong gels. *Biomacromolecules*, 8(6), 1934–1941.
29. Peng, B.L., Dhar, N., Liu, H.L., & Tam, K.C. (2011). Chemistry and applications of nanocrystalline cellulose and its derivatives: A nanotechnology perspective. In *Canadian Journal of Chemical Engineering* (Vol. 89, Issue 5, pp. 1191–1206).
30. Pirich, C.L., Picheth, G.F., Fontes, A.M., Delgado-Aguilar, M., & Ramos, L.P. (2020). Disruptive enzyme-based strategies to isolate nanocelluloses: a review. In *Cellulose* (Vol. 27, Issue 10, pp. 5457–5475). Springer.
31. Reid, M.S., Villalobos, M., & Cranston, E.D. (2017). Benchmarking cellulose nanocrystals: From the laboratory to industrial production. In *Langmuir* (Vol. 33, Issue 7, pp. 1583–1598). American Chemical Society.
32. Rodrigues, A.C., Leitão, A. F., Moreira, S., Felby, C., & Gama, M. (2012). Recycling of cellulases in lignocellulosic hydrolysates using alkaline elution. *Bioresource Technology*, 110, 526–533.
33. Saini, J.K., Patel, A.K., Adsul, M., & Singhania, R.R. (2016). Cellulase adsorption on lignin: A roadblock for economic hydrolysis of biomass. *Renewable Energy*, 98, 29–42.

34. Santucci, B.S., Bras, J., Belgacem, M.N., Curvelo, A.A. da S., & Pimenta, M.T.B. (2016). Evaluation of the effects of chemical composition and refining treatments on the properties of nanofibrillated cellulose films from sugarcane bagasse. *Industrial Crops and Products*, 91, 238–248.
35. Segato, F., Damásio, A.R.L., de Lucas, R.C., Squina, F.M., & Prade, R.A. (2014). Genomics Review of Holocellulose Deconstruction by Aspergilli. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 78(4), 588–613. <https://doi.org/10.1128/mmbr.00019-14>
36. Seo, D.J., Fujita, H., & Sakoda, A. (2011). Effects of a non-ionic surfactant, Tween 20, on adsorption/desorption of saccharification enzymes onto/from lignocelluloses and saccharification rate. *Adsorption*, 17(5), 813–822.
37. Siqueira, G.A., Dias, I.K.R., & Arantes, V. (2019). Exploring the action of endoglucanases on bleached eucalyptus kraft pulp as potential catalyst for isolation of cellulose nanocrystals. *International Journal of Biological Macromolecules*, 133, 1249–1259.
38. Song, Q., Winter, W.T., Bujanovic, B.M., & Amidon, T.E. (2014). Nanofibrillated cellulose (NFC): A high-value co-product that improves the economics of cellulosic ethanol production. *Energies*, 7(2), 607–618.
39. Spence, K.L., Venditti, R.A., Rojas, O.J., Habibi, Y., & Pawlak, J.J. (2011). A comparative study of energy consumption and physical properties of microfibrillated cellulose produced by different processing methods. *Cellulose*, 18(4), 1097–1111.
40. Squinca, P., Bilatto, S., Badino, A.C., Farinas, C.S., & Nanotechnology, †. (n.d.). *Nanocellulose production in future biorefineries: an integrated approach using tailor-made enzymes*.
41. Tarchoun, A.F., Trache, D., & Klapötke, T.M. (2019). Microcrystalline cellulose from *Posidonia oceanica* brown algae: Extraction and characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 138, 837–845.
42. Teixeira, R.S.S., Da Silva, A.S.A., Jang, J.H., Kim, H.W., Ishikawa, K., Endo, T., Lee, S.H., & Bon, E.P.S. (2015a). Combining biomass wet disk milling and endoglucanase/β-glucosidase hydrolysis for the production of cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 128, 75–81.
43. Teixeira, R.S.S., Da Silva, A.S.A., Jang, J.H., Kim, H.W., Ishikawa, K., Endo, T., Lee, S.H., & Bon, E.P.S. (2015b). Combining biomass wet disk milling and endoglucanase/β-glucosidase hydrolysis for the production of cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*, 128, 75–81.
44. Tong, X., Shen, W., Chen, X., Jia, M., & Roux, J.C. (2020). Preparation and mechanism analysis of morphology-controlled cellulose nanocrystals via compound enzymatic hydrolysis of eucalyptus pulp. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(9).
45. Tu, M., Chandra, R.P., & Saddler, J.N. (2007). Evaluating the distribution of cellulases and the recycling of free cellulases during the hydrolysis of lignocellulosic substrates. *Biotechnology Progress*, 23(2), 398–406.
46. Villares, A., Moreau, C., Bennati-Granier, C., Garajova, S., Foucat, L., Falourd, X., Saake, B., Berrin, J.G., & Cathala, B. (2017). Lytic polysaccharide monoxygenases disrupt the cellulose fibers structure. *Scientific Reports*, 7.

## Argumentačne orientované vyučovanie v prípravách budúcich učiteľov matematiky a informatiky

Katarína Kalužná\*

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského v Bratislave

Katedra didaktiky matematiky, fyziky a informatiky

[katarina.janoskova@fmph.uniba.sk](mailto:katarina.janoskova@fmph.uniba.sk)

### Abstrakt

Tento článok sa zameriava na postoj budúcich učiteľov matematiky a informatiky na Univerzite Komenského v Bratislave k integrácii argumentácie do vyučovacieho procesu. Pozornosť je venovaná spôsobom, akými študenti učiteľstva počas prvého ročníka magisterského štúdia začleňujú argumentačné prvky do svojich príprav na vyučovanie. Analýza vychádza z rámca Conner a kol. [1], ktorý sa sústreďuje na kognitívnu náročnosť a štruktúru argumentačných praktík. Výsledky ukazujú, že hoci budúci učitelia dokážu do príprav zahrnúť otázky podnecujúce argumentáciu, tieto otázky často nedosahujú vyššiu úroveň kognitívnej náročnosti. Prevažujú otázky zamerané na základné porozumenie učiva namiesto podpory hlbšieho argumentačného uvažovania. Študenti učiteľstva informatiky kladú dôraz najmä na demonštráciu postupov a metód, zatiaľ čo študenti učiteľstva matematiky častejšie vyžadujú nápady od žiakov, avšak bez následných otázok, ktoré by rozvíjali ich uvažovanie. Článok poukazuje na potrebu systematického rozvoja zručností vyššej úrovne v oblasti argumentácie v príprave budúcich učiteľov.

**Kľúčové slová:** budúci učitelia, argumentácia, prípravy na vyučovanie, matematické vzdelávanie, informatické vzdelávanie.

### Úvod

Argumentácia predstavuje dôležitú súčasť vyučovania, keďže podporuje rozvoj kritického myslenia, logického uvažovania a schopnosti zdôvodňovať vlastné tvrdenia u žiakov. Zahŕňa proces vytvárania, prezentovania a obhajovania nárokov, ako aj posudzovanie alternatívnych názorov. Efektívne zapájanie argumentácie do vyučovania prispieva k rozvoju schopnosti riešiť problémy a k hlbšiemu porozumeniu učiva.

Argumentácia je v súčasnosti čoraz viac vnímaná ako kľúčový prvok efektívneho vyučovania matematiky a informatiky, najmä v kontexte snahy vzdelávacích systémov rozvíjať u žiakov hlbšie uvažovanie a kritické myslenie. V edukačnom prostredí zahŕňa argumentácia formulovanie a zdôvodňovanie tvrdení, posudzovanie alternatívnych pohľadov a zapájanie sa do diskusie založenej na dôkazoch [1]. Takéto postupy nielen podporujú porozumenie matematickým a informatickým konceptom, ale zároveň odrážajú spôsoby uvažovania typické pre odbornú prax v STEM oblastiach (Science (prírodné vedy), Technology (technológie), Engineering (inžinierstvo) a Mathematics (matematika)) [2].

Vo vyučovaní matematiky je význam argumentácie dlhodobo zdôrazňovaný v súvislosti s rozvojom konceptuálneho porozumenia. Výskumy ukazujú, že keď učitelia vytvárajú prostredie, v ktorom sú žiaci vedení k zdôvodňovaniu, hodnoteniu a kritickému posudzovaniu riešení, dochádza k rozvoju autonómneho a zmysluplného matematického uvažovania [3] [4]

[5]. Úspešná implementácia argumentácie si však vyžaduje ciele pedagógické stratégie, ktoré zohľadňujú nielen kognitívnu náročnosť úloh, ale aj sociálne a komunikačné aspekty triednej interakcie [6] [7].

Jedným z najvplyvnejších modelov využívaných pri analýze štruktúry argumentácie je Toulminov model, ktorý identifikuje šesť hlavných zložiek argumentu: tvrdenie, údaje, zdôvodnenie, oporu, modalitu a vyvrátenie [8]. Tento model bol v oblasti matematického vzdelávania široko aplikovaný pri skúmaní kvality argumentov žiakov aj učiteľov. Na jeho základoch následne Conner a kol. [1] vytvorila rámec Teacher Support for Collective Argumentation (TSCA - Podpora učiteľov pri skupinovej argumentácii), ktorý systematizuje učiteľské postupy podporujúce kolektívnu argumentáciu, ako sú podnecovanie rozvíjania odpovedí, hodnotenie tvrdení či validácia žiackych príspevkov do diskusie [9]. Tento analytický rámec sa využíva pri hodnotení realizovanej výučby aj písomných príprav na vyučovanie a poukazuje na význam plánovania vyučovacích situácií presahujúcich procedurálne otázky smerom k vyšším úrovňam argumentácie a zdôvodňovania [10].

Napriek rastúcemu dôrazu na význam argumentácie viaceré výskumy naznačujú, že budúci učelia matematiky a informatiky majú ťažkosti s ich zmysluplným uplatňovaním v prípravnej fáze vyučovania. Ich otázky často smerujú k reprodukcii poznatkov alebo k zvládnutiu algoritmických postupov, pričom len zriedka podporujú žiacke zdôvodňovanie alebo rozvíjanie argumentačných štruktúr [11] [9] [12]. V kontexte pripravovanej kurikulárnej reformy na Slovensku [13], ktorá od roku 2026 explicitne zdôrazňuje integráciu argumentácie do vyučovania matematiky a informatiky, je preto mimoriadne dôležité porozumieť tomu, ako budúci učelia argumentáciu chápu a ako ju premietajú do svojich prvých pedagogických plánov.

Táto štúdia sa zameriava na analýzu otázok obsiahnutých v prípravách na vyučovanie budúcich učiteľov na Univerzite Komenského v Bratislave, ktoré majú potenciál podporovať argumentáciu. Vychádzajúc z rámca TSCA, cieľom výskumu je identifikovať kognitívnu úroveň týchto otázok, ako aj ich didaktický zámer. Štúdia tak prispieva k širšej diskusii o skvalitňovaní prípravy učiteľov pre argumentačne orientovanú výučbu v oblasti STEM vzdelávania.

## **Metodológia**

Zvolený výskumný prístup má charakter kvalitatívnej prípadovej štúdie a umožňuje detailne preskúmať spôsoby, akými budúci učelia matematiky a informatiky plánujú podporu argumentácie prostredníctvom didaktických otázok v písomných prípravách na vyučovanie. Metodologické východiská nadväzujú na výskumný model aplikovaný v štúdiu Tataroğlu Taşdanovej a kol. [10], ktorý vychádza z rámca TSCA vytvoreného Conner a kol. [1]. Analýza sa zameriava na identifikáciu charakteru, kognitívnej náročnosti a didaktickej funkcie otázok začlenených do príprav na vyučovanie.

### *Výskumná vzorka*

Výskumnú vzorku tvorilo 21 študentov prvého ročníka magisterského štúdia učiteľstva matematiky alebo informatiky v kombinácii na Univerzite Komenského v Bratislave. Z tohto počtu bolo 15 študentov so zameraním na matematiku a 6 študentov so zameraním na informatiku. V rámci študijných plánov navštevovali účastníci buď kurz didaktiky

matematiky, alebo didaktiky informatiky, v ktorých vznikali analyzované písomné prípravy na vyučovanie.

### *Zber dát*

Zber dát prebiehal v rámci požiadaviek didaktických kurzov. Každý účastník, prípadne skupina účastníkov podľa vlastného rozhodnutia, vypracoval písomnú prípravu na vyučovaciu hodinu. Prípravy obsahovali definované vzdelávacie ciele, plánovaný priebeh vyučovania a očakávané interakcie medzi učiteľom a žiakmi.

### *Analýza dát*

Analýza dát bola realizovaná prostredníctvom analytického rámca TSCA [1], ktorý identifikuje viaceré kategórie učiteľských otázok a postupov podporujúcich argumentáciu. Konkrétne sa zameriava na otázky vyžadujúce faktické odpovede, podnecovanie generovania nápadov, zisťovanie postupov riešenia, rozvíjanie odpovedí a hodnotenie riešení. Tento rámec bol zvolený pre jeho schopnosť zachytiť nielen kognitívnu úroveň otázok, ale aj ich didaktickú funkciu pri podpore matematickej a informatickej argumentácie. Analýza spočívala v identifikácii jednotlivých otázok v prípravách, ich klasifikácii podľa TSCA kategórií a v interpretácii ich potenciálu podporovať argumentačné uvažovanie žiakov.

## **Výsledky**

Analýza písomných príprav na vyučovanie poukázala na výrazné rozdiely v tom, ako budúci učelia matematiky a informatiky pracujú s otázkami podporujúcimi argumentáciu, najmä z hľadiska štruktúry a rozvíjania žiackeho uvažovania. Zistenia sa sústreďujú na charakter otázok, ich frekvenciu a potenciál podnecovať argumentačný diskurz v triede.

### *Otázky v prípravách na vyučovanie*

Analýza príprav vypracovaných budúcimi učiteľmi matematiky a príprav budúcich učiteľov informatiky odhalila rozdiely v spôsobe využívania otázok ako didaktického nástroja, ako aj v miere explicitného začleňovania argumentácie do plánovania vyučovania. V matematických prípravách bolo identifikovaných celkovo 60 otázok, zatiaľ čo v informatických prípravách ich bolo 57. V priemere obsahovali matematické prípravy približne 15 otázok na jednu vyučovaciu hodinu, kým informatické prípravy obsahovali v priemere 9,5 otázky.

Tieto údaje poskytujú základný prehľad o frekvencii využívania otázok v plánovaní vyučovania. Niektoré matematické prípravy však išli nad rámec jednoduchého výpočtu otázok a obsahovali aj predpokladané žiacke odpovede alebo následné otázky, čím naznačovali snahu učiteľa cielene štruktúrovať triednu diskusiu a podporiť kolektívne uvažovanie. Takýto prístup poukazuje na čiastočné uvedomenie si úlohy učiteľa pri facilitácii argumentačného diskurzu.

Jedna z analyzovaných matematických príprav napríklad opisovala situáciu, v ktorej by vloženie čísla  $x$ ; ( $4 < x < 9$ ) do určitého miesta v úlohe viedlo k vzniku dvoch rovnakých susedných čísel, čo by znemožnilo zmysluplné sčítanie alebo odčítanie. V prípade otázky zo strany žiaka, prečo nie je možné konkrétnu hodnotu „ $x$ “ použiť, bola navrhnutá učiteľská reakcia smerujúca k prevereniu súladu riešenia so zadanými podmienkami. Tento príklad

ilustruje snahu o vedenie žiakov k overovaniu správnosti riešenia na základe argumentov, hoci rozsah takejto podpory zostával obmedzený.

Naopak, v informatických prípravách sa otázky alebo diskusné momenty často uvádzali len všeobecne, napríklad formou poznámky, že „môže nasledovať diskusia“. Konkrétne príklady možných žiackych odpovedí, typických chýb alebo plánovaných následných otázok sa v týchto prípravách nevyskytovali. Argumentácia bola síce miestami naznačená ako potenciálna súčasť vyučovania, avšak bez jasného didaktického ukotvenia a systematickej podpory.

### *Typy otázok a ich argumentačný potenciál*

Matematické prípravy obsahovali širšie spektrum otázok, ktoré poskytovali žiakom priestor na prezentovanie vlastných nápadov a uvažovania, najmä v kategóriách otázok zameraných na vyžadovanie nápadov, postupov a hodnotenia riešení. Tieto otázky naznačujú snahu vytvoriť priestor pre viacero riešení alebo pohľadov na daný problém. Hoci tieto otázky často neboli rozvinuté do ucelených argumentačných sekvencií, ich prítomnosť poukazuje na počiatkové uvedomenie si významu otázok pri podpore konceptuálneho skúmania učiva.

V informatických prípravách sa naopak dominantne objavovali otázky zamerané na faktické odpovede alebo správne vykonanie postupov. Väčšina otázok patrila do kategórií vyžadujúcich faktické znalosti alebo presné dodržanie algoritmických krokov, pričom dôraz bol kladený predovšetkým na správnosť riešenia. Hoci niektoré prípravy uvádzali možnosť diskusie, tieto momenty neboli podporené konkrétnymi otázkami, predpokladanými odpoveďami ani plánovanými následnými krokmi učiteľa. Argumentačný potenciál tak zostával vo veľkej miere nevyužitý.

Z porovnania oboch skupín vyplýva, že zámer podporovať argumentáciu bol výraznejší v matematických prípravách, aj keď jeho realizácia bola často neúplná. Otázky zamerané na generovanie a hodnotenie riešení len zriedkavo nadväzovali na ďalšie otázky, ktoré by rozvíjali alebo prehľbovali žiacke argumenty. V dôsledku toho sa argumentačný diskurz spravidla nerozvinul do ucelenej diskusie.

V prípade informatiky bola orientácia na presnosť a dokončenie úloh nadradená skúmaniu a zdôvodňovaniu riešení. Napriek tomu, že algoritmické uvažovanie a dekompozícia problémov ponúkajú prirodzený priestor pre argumentáciu, prípravy sa sústreďovali najmä na procedurálnu plynulosť. Argumentácia tak zostávala skôr implicitným než vedome plánovaným cieľom vyučovania.

### **Diskusia**

Výsledky analýzy písomných príprav na vyučovanie poukazujú na rozdiely v tom, ako budúci učitelia matematiky a informatiky pristupujú k podpore argumentácie už vo fáze didaktického uvažovania o vyučovaní. Tieto rozdiely naznačujú, že schopnosť integrovať argumentáciu do vyučovania nie je len otázkou všeobecného pedagogického presvedčenia, ale úzko súvisí so špecifikami jednotlivých predmetov, ako aj s tradíciami ich didaktiky.

V matematických prípravách sa argumentácia objavovala častejšie v podobe otázok vyžadujúcich žiacke nápady, vysvetlenia alebo hodnotenie riešení. Tento výsledok korešponduje so zisteniami výskumov, ktoré poukazujú na prirodzené prepojenie matematiky s procesmi zdôvodňovania, dokazovania a obhajovania riešení [3], [4], [6]. Zároveň však analýza ukázala, že aj keď budúci učitelia matematiky deklarujú záujem o podporu uvažovania, ich otázky často neboli systematicky rozvíjané následnými podnetmi. Argumentačný diskurz

sa tak len zriedkavo rozvinul do ucelenej výmeny názorov, čo je v súlade so zisteniami Psycharis a Potari [12], ktorí upozorňujú na ťažkosti budúcich učiteľov pri udržiavaní argumentácie v dynamickom vyučovacom kontexte.

V prípade informatiky bola argumentácia v prípravách prítomná výrazne menej a najčastejšie sa obmedzovala na implicitné odkazy na diskusiu bez konkrétneho didaktického ukotvenia. Dominancia procedurálnych a faktických otázok naznačuje, že budúci učelia informatiky vnímajú vyučovanie predovšetkým ako proces osvojovania si správnych postupov a techník. Tento prístup je síce zrozumiteľný vzhľadom na algoritmickú povahu informatiky, avšak môže viesť k potláčaniu príležitostí na rozvoj argumentačného uvažovania, ktoré je neoddeliteľnou súčasťou riešenia problémov v informatike. Podobné napätie medzi procedurálnou presnosťou a argumentačným uvažovaním identifikujú aj iné štúdie zamerané na učiteľské otázky a kognitívnu náročnosť úloh [8], [11].

Zistenia zároveň potvrdzujú význam analytického rámca TSCA ako nástroja na identifikáciu argumentačného potenciálu učiteľských otázok už v písomných prípravách. Skutočnosť, že mnohé otázky sa pohybovali na nižších úrovniach kognitívnej náročnosti, naznačuje, že budúci učelia síce rozpoznávajú argumentáciu ako dôležitý didaktický cieľ, no zatiaľ nemajú dostatočne rozvinuté stratégie na jej cielene plánovanie. Tento nesúlad medzi deklarovaným zámerom a jeho realizáciou bol identifikovaný aj v predchádzajúcich výskumoch zameraných na plánovanie vyučovania [10], [15].

V kontexte pripravovanej kurikulárnej reformy na Slovensku [13], ktorá explicitne posilňuje význam argumentácie vo vyučovaní matematiky a informatiky, nadobúdajú tieto zistenia osobitný význam. Diskusia naznačuje, že samotná zmena kurikula nemusí automaticky viesť k zmene pedagogickej praxe, pokiaľ nebude sprevádzaná systematickou podporou budúcich učiteľov v oblasti plánovania argumentačne orientovaného vyučovania. Osobitná pozornosť by mala byť venovaná rozvoju schopnosti anticipovať žiacke odpovede, pracovať s chybami a cielene nadväzovať otázky tak, aby argumentačný diskurz mohol prirodzene vznikáť a rozvíjať sa v triede.

## **Záver**

Predložený príspevok poukazuje na to, že hoci budúci učelia matematiky a informatiky vnímajú argumentáciu ako dôležitú súčasť vyučovania, jej systematické začleňovanie do príprav na vyučovanie zostáva obmedzené. Analýza písomných príprav ukázala rozdiely medzi oboma predmetmi, pričom matematické prípravy častejšie vytvárali priestor pre žiacke uvažovanie, zatiaľ čo informatické prípravy sa sústreďovali najmä na procedurálnu správnosť.

Zistenia naznačujú, že rozvoj argumentačne orientovaného vyučovania si vyžaduje cieľenú podporu už v príprave budúcich učiteľov, najmä v oblasti tvorby otázok vyššej kognitívnej náročnosti a nadväzujúcich didaktických podnetov. V kontexte pripravovaných kurikulárnych zmien na Slovensku je preto nevyhnutné venovať zvýšenú pozornosť rozvoju kompetencií, ktoré umožnia budúcim učiteľom efektívne prepájať obsah vyučovania s argumentačným a diskusným uvažovaním žiakov.

## **Použitá literatúra**

- [1] A. Conner, L. M. Singletary, R. C. Smith, P. A. Wagner a R. T. Francisco, „Teacher support for collective argumentation: A framework for examining how teachers support

- students' engagement in mathematical activities," *Educ Stud Math*, zv. 86, p. 401–429, 2014.
- [2] F. Cardetti a S. LeMay, „Argumentation: Building Students' Capacity for Reasoning Essential to Learning Mathematics and Sciences," *PRIMUS Special Issue: Interdisciplinary Conversations*, zv. 29, pp. 775-798, 2019.
- [3] W. F. Castro a J. A. Toro, „Mathematics teacher argumentation in a didactic perspective," *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, zv. 19, %1. vyd.9, p. em2322, 2023.
- [4] P. Cobb a E. Yackel, „Sociomathematical Norms, Argumentation, and Autonomy in Mathematics," *Journal for Research in Mathematics Education*, zv. 27, %1. vyd.4, p. 458, 1996.
- [5] G. Krummheuer, „The ethnography of argumentation," rev. *The emergence of mathematical meaning : interaction in classroom cultures*, P. Cobb a H. Bauersfeld, Ed., New York, Routledge, 1995, p. 229–269.
- [6] A. J. Stylianides, „Proof and Proving in School Mathematics," *Journal for Research in Mathematics Education*, zv. 38, %1. vyd.3, pp. 289-321, 2007.
- [7] M. Walshaw a G. Anthony, „Characteristics of Effective Teaching of Mathematics: A View from the West," *Journal of Mathematics Education*, zv. 2, %1. vyd.2, pp. 147-164, 2009.
- [8] G. Kulm a A. Sahin, „Sixth grade mathematics teachers' intentions and use of probing, guiding, and factual questions," *Journal of Mathematics Teacher Education*, zv. 11, %1. vyd.3, pp. 221-241, 2008.
- [9] S. E. Toulmin, *The Uses of Argument*, Cambridge: Cambridge University Press, 1958.
- [10] B. T. Taşdan, A. T. Dede a M. Y. Koyunkaya, „Examining pre-service mathematics teachers' argumentation-supported lesson plans and their noticing during planning," *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, zv. 55, %1. vyd.6, pp. 1309-1329, 2024.
- [11] C. Chin, „Teacher questioning in science classrooms: Approaches that stimulate productive thinking," *Journal of Research in Science Teaching*, zv. 44, %1. vyd.6, p. 815–843, 2007.
- [12] G. Psycharis a D. Potari, „Prospective Mathematics Teacher Argumentation While Interpreting Classroom Incidents," rev. *Educating Prospective Secondary Mathematics Teachers*, M. E. Strutchens, R. Huang, D. Potari a L. Losano, Ed., ICME-13 Monographs, Springer International Publishing AG, 2018, pp. 169-187.
- [13] Štátny pedagogický ústav, *Vzdelávacie štandardy – Matematika a informatika*, Bratislava: Ministerstvo školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky, 2023.
- [14] A. Sfard a C. Kieran, „Thinking as Communicating: Human Development, the Growth of Discourses, and Mathematizing," *Mind, Culture and Activity*, zv. 8, %1. vyd.1, pp. 42-76, 2008.
- [15] J. Remillard, „Examining Key Concepts in Research on Teachers' Use of Mathematics Curricula," *Review of Educational Research*, zv. 75, %1. vyd.2, pp. 211-246, 2005.

## Vlastnosti papiera vyrobeného zo sekundárnych vlákien a odpadov z kukuričných zŕn

Andrej Pažitný, Juraj Krišta, Alena Jandová  
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.  
[pazitny@vupc.sk](mailto:pazitny@vupc.sk)

### Abstrakt

Práca sa zameriava na monitorovanie vplyvu obsahu šupiek, resp. obalov kukuričných zŕn pridaných do OCC na hustotu, belosť, tržné zaťaženie, index pretrhnutia, absorpciu energie v ťahu, tržnú dĺžku, pevnosť v ťahu, relatívne predĺženie, odpor papierového hárku proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho a pevnosť v ťahu pri nulovej upínacej dĺžke. Bol testovaný obsah 40 % a 60 % šupiek kukuričných zŕn pridaných do sekundárnych vlákien na báze starých obalov z vlnitej lepenky. Suspenzie pripravené acidifikáciou a mletím boli podrobené chelatácii a trojstupňovému bieleniu. Metóda bielenia pozostávajúca z troch krokov bola aplikovaná v dvoch sériách – pri acidifikácii a mletí suspenzie buničiny so stupňom mletia Schopper-Riegler ( $^{\circ}\text{SR}$ ) na úrovni 72  $^{\circ}\text{SR}$ . Prvý krok bielenia zahŕňal peroxidové bielenie s prídavkom hydroxidu sodného, bielenie oxidom chloričitým a peroxidové bielenie v alkalickom prostredí. Bol skúmaný vplyv chemického a hydromechanického spracovania na výsledné fyzikálne a mechanické vlastnosti pripravených papierových hárkov.

**Kľúčové slová:** Fyzikálne vlastnosti, hydromechanické spracovanie, chemická úprava, OCC (staré obaly z vlnitej lepenky), šupky kukuričných zŕn.

### Úvod

Nedrevnatá biomasa s vysokým obsahom vlákniiny, alebo lignocelulózová sieť pozostávajúca prevažne z holocelulózy, ktorá nemá významné využitie v spracovateľskom priemysle, alebo sa používa na výrobu kŕmnych zmesí, ale nevyhnutne s pridaním živín, poskytuje nové možnosti spracovania na výrobu papiera zo sekundárnych vlákien na báze rozvláknených vlnitých kartónov, tzv. starých obalov z vlnitej lepenky (resp. OCC – anglická skratka pre Old Corrugated Containers – použité obaly z vlnitej lepenky) s významným prídavkom nevyužitej nedrevnej biomasy (Pažitný a kol. 2025a). Príkladom takejto nedrevnej biomasy je vedľajší produkt prvej generácie – liehovarnický odpad na báze kukuričného zrna alebo kukuričných otrúb. Prvé štúdie sa zaoberali využitím liehovarnického odpadu ako vedľajšieho produktu pri výrobe bioetanolu prvej generácie a spektrálnou analýzou papierových hárkov (Pažitný a kol. 2010, Pažitný a kol. 2011).

Niektoré štúdie sa zaoberajú spracovaním odpadového papiera na výrobu sekundárnych vlákien – sekundárnej buničiny, na výrobu novinového a baliaceho papiera v rámci obehového hospodárstva (Li a Ma 2015). Nedávne štúdie tiež preukázali potenciál celulózy extrahovanej z recyklovaného papiera vo funkčných kompozitoch a environmentálnych aplikáciách (Saberí a kol. 2025). Pokiaľ ide o recyklované alebo sekundárne vlákna, štúdie sa zaoberajú fyzikálnymi a mechanickými parametrami papierov, ako je hustota (Okino a kol. 2000), belosť (Sutcu a Sahin 2017), index pretrhnutia (Rezekinta a kol. 2024), absorpcia energie v ťahu

(Chung 1999), tržná dĺžka (Jirarotepinyo a kol. 2025), pevnosť v ťahu a pri pretrhnutí (Sutcu a Sahin 2017), relatívne predĺženie a odpor papierového hárku proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho (Potůček a kol. 2013). Ďalšou študovanou mechanickou vlastnosťou je pevnosť v ťahu pri nulovej upínacej dĺžke (Jirarotepinyo a kol. 2025). Bola vykonaná mikroskopická analýza papierových hárkov pomocou mikroskopu vybaveného digitálnym fotoaparátom (Kibirkštis a kol. 2013), ako aj kolorimetrické charakteristiky recyklovaných kartónov (Tikhomirova a kol. a kol. 2024).

## Material a metódy

Vzorka vzduchosuchého vlákna získaného zo šupky kukuričného zrna, ktoré bolo získané z výrobnjej prevádzky v Boleráze (Tate & Lyle Boleraz, s.r.o., SR), mala obsah sušiny 41,6 %. Staré obaly z vlnitej lepenky (OCC) boli získané zo zberných dvorov. Ich sušina po úprave rozvláknením na 72 °SR bola 22,1 %. Hydroxid sodný NaOH, kyselina sírová H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a heptahydrát síranu horečnatého MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O boli získané od spoločnosti Slavus s.r.o. (SR). Kyselina dietyléntriámín-pentaoctová (DTPA) bola získaná od spoločnosti E. Merck KG (DE). Peroxid vodíka H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> bol získaný od spoločnosti Mondí Štětí a.s. (ČR). Obsah H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> vo vodnom roztoku bol stanovený jodometricky s 0,1 N tiosíranom sodným Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na 459 gramov na liter. Vodný roztok oxidu chlórčitého ClO<sub>2</sub> s koncentráciou 8 g ClO<sub>2</sub> na liter roztoku bol získaný od spoločnosti Mondí Štětí a.s. (ČR).

### *Príprava suspenzie buničiny*

Suspenzia buničiny zložená z kukuričných vlákien a OCC v pomere 40:60 sa pripravila v laboratórnom mlyne Valley Holander podľa ISO 5264-1 pri konzistencii 2%. Hydromechanicky upravené vzorky buničiny sa odoberali v časových intervaloch 0, 20, 40 a 60 minút. Hodnoty stupňa mletia Schopper-Riegler (°SR) vzoriek buničiny sa merali podľa STN ISO 5267-1.

### *Acidifikácia suspenzií buničiny*

Acidifikácia suspenzie buničiny zloženej z kukuričných vlákien a OCC v pomere 60:40 sa uskutočnila v 7,5 litrovom laboratórnom reaktore (ČR) pri atmosférickom tlaku a konzistencii 10 %. Na okyslenie suspenzie sa použil 4 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Okyslenie sa uskutočnilo pri pH = 5,0, retenčnom čase 1 hodina a teplote 50 °C. Získaná vzorka sa použila ako referenčná vzorka na porovnanie mechanických vlastností s ostatnými vzorkami. Okyslenie sa vykonalo pre prvú sériu bez mletia (vzorka B0). Vzorka B1 mala opačný pomer kukuričných vlákien a OCC – 40:60 a bola mletá a následne okyslená. Obe vzorky sa premyli samostatne horúcou vodou pri dilučnom faktore DF = 3,5.

### *Chelatačný proces*

Odstránenie kovov sa uskutočnilo pomocou DTPA v 7,5 litrovom laboratórnom reaktore (ČR) pri atmosférickom tlaku a konzistencii 10 %. V chelatačnom procese sa použili okyslené a premyté vzorky B0 a B1. Chelácia sa uskutočnila pri pH = 5,0, retenčnom čase 3 hodiny a teplote 80 °C. Na okyslenie suspenzie s cieľom podporiť chelatačný proces sa použila 4 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a finálne vzorky sa premyli horúcou vodou pri DF = 2,5.

### *Peroxidové bielenie s prídavkom alkálií*

Prvým stupňom bielenia v kombinovanom bielení vzoriek B0 a B1 bolo peroxidové bielenie s prídavkom alkálií (roztoku NaOH) – stupeň P1 a bolo vykonané v 7,5 litrovom laboratórnom reaktore (ČR) pri atmosférickom tlaku, konzistencii 10 %, pH = 9,2, retenčnom čase 3 hodiny a teplote 90 °C. Na zabránenie degradácie celulózy bol pridaný  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  v množstve 1,8 kg bezvodého  $\text{MgSO}_4$  na 1000 kg zmiešanej buničiny. Množstvo  $\text{H}_2\text{O}_2$  bolo 10 kg na 1000 kg zmiešanej buničiny. Konečné vzorky boli premyté horúcou vodou pri DF = 2,8.

#### *Bielenie v D stupni*

Na bielenie upravených vzoriek B0 a B1 sa použilo bielenie oxidom chloričitým ako úplne bezchlórový proces. Použil sa ekvivalent 15 kg aktívneho chlóru na 1000 kg zmiešanej buničiny. Na okyslenie vodnej suspenzie sa použil 4 N  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Bielenie sa uskutočnilo v 7,5 litrovom laboratórnom reaktore (ČR) pri atmosférickom tlaku, konzistencii 10 %, pH = 3,8, retenčnom čase 70 minút a teplote 75 °C. Finálne vzorky sa premyli horúcou vodou pri DF = 3,0.

#### *Peroxidové bielenie v alkalickom prostredí*

Stupeň P2, známy ako peroxidové bielenie v alkalickom prostredí, bol realizovaný v prípade vzoriek B0 a B1 v 7,5 litrovom laboratórnom reaktore (ČR) pri atmosférickom tlaku, konzistencii 10 %, pH = 12,0, retenčnom čase 3 hodiny a teplote 90 °C. Na zabránenie degradácie celulózy bol pridaný  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  v množstve 2,0 kg bezvodého  $\text{MgSO}_4$  na 1000 kg zmiešanej buničiny. Množstvo  $\text{H}_2\text{O}_2$  bolo 20 kg na 1000 kg zmiešanej buničiny. Konečné vzorky boli premyté horúcou vodou pri DF = 2,5.

#### *Príprava laboratórnych hárkov*

Z vybraných vzoriek zmesovej buničiny boli pripravené vzorky papierových hárkov štandardným postupom na stroji Rapid-Köthen (Frank-PTI, Nemecko) podľa ISO 5269-2. Suspenzie zmesovej buničiny upravené na konzistenciu 0,5 % ako papierová hmota boli spracované v mokrej časti papierenského systému zahusťovaním v sacom valci so štandardným prierezom, do ktorého bolo naliate také množstvo vody, aby výsledná plošná hmotnosť papierového hárku bola  $60 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . Zahustený papierový hárok bol potom premiestnený na plšť alebo náhradu papiera aj s pomocným papierom umiestneným na druhej strane zahusteného papierového hárku. Výsledné papierové hárky boli sušené v sušiackej časti papierenského systému pri teplote 85 °C.

#### *Stanovenie fyzikálnych a mechanických vlastností*

Vybrané papierové hárky boli charakterizované fyzikálnymi a mechanickými vlastnosťami. Hustota bola stanovená podľa ISO 534 na základe hrúbky a plošnej hmotnosti. Belosť pripravených hárkov bola meraná prístrojom ELREPHO (Lorentzen & Wettre, Elrepho 950 ERIC®, Švédsko) pri difúznej modrej reflektancii pri vlnovej dĺžke 457 nm a osvetľovacím médiu C podľa ISO 2469 a ISO 2470. Tržné zaťaženie, index pretrhnutia, absorpcia energie v ťahu (resp. TEA – anglická skratka pre Tensile Energy Absorption), pevnosť v ťahu a relatívne predĺženie boli stanovené prístrojom Instron (Instron Corporation, USA) podľa ISO 1924. Pre zisťovanie priepustnosti vzduchu bola použitá štandardná metóda na stanovenie odporu papierových hárkov proti prieniku vzduchu podľa ISO 5636-5. Odpor papierových

hárkov proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho bol stanovený pomocou densometra Gurley (Lorentzen & Wettre, Švédsko). Pevnosť v ťahu pri nulovej upínacej dĺžke bola stanovená pomocou testera Z-Span 1000 (Pulmac Inc., Kanada) podľa TAPPI T-531.

## Výsledky a diskusia

### *Hlavné zložky kukuričnej vlákniny a OCC*

Kukuričné vlákno, resp. kukuričná vláknina má vizuálne podobné vlastnosti ako drevené materiály, hoci obsah extraktívnych látok je vyšší ako v ihličnatej sulfátovej buničine (Pažitný a kol. 2025b). Chemické zloženie kukuričného vlákna je v prípade niektorých zložiek porovnateľné s drevnou buničinou. Okrem toho, obsah holocelulózy (60,1 %) porovnateľný s ihličnatou sulfátovou buničinou (69,7 %) naznačuje podobné vlastnosti buničinovej suspenzie alebo buničiny využiteľnej pri výrobe papiera a tiež vlastnosti papierových hárkov. Chemické zloženie (Tab. 1) bolo diskutované a publikované v našom predchádzajúcom článku (Pažitný a kol. 2025b).

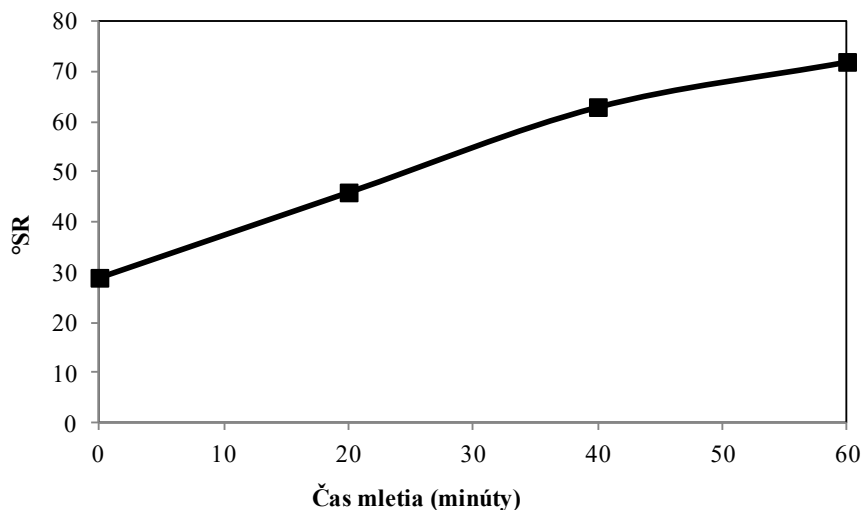
*Tab. 1: Rozdiely v holocelulóze, celkovom obsahu lignínu a obsahu ďalších vybraných zložiek v kukuričnom vlákne a ihličnatej sulfátovej buničine (Pažitný a kol. 2025b).*

Zložka	Zastúpenie zložky (% hm/hm a.s.)		Metóda
	Kukuričné vlákno	Sulfátová buničina	
Holocelulóza	60,10	69,69	Wise
Celulóza	19,90	41,90	ISO 692
Popol	1,67	0,25	ISO 1762
Extraktívne látky	2,91	2,70	ISO 624
*Klasonov lignín	6,84	27,17	Tappi T 222 om-98
Kyselinou vyluhovateľný lignín (ASL)	8,54	0,19	Tappi UM 250
Lignín spolu	15,38	27,36	-

Naproti tomu materiály na báze OCC obsahujú relatívne viac celulózy, keďže ide o spracovanú buničinu. Koç a kol. (2017) uviedli, že papier na báze OCC obsahuje 83,87 % holocelulózy, z čoho 74,62 % tvorí  $\alpha$ -celulóza. Je však zaujímavé, že obsah lignínu v papieri na báze OCC (15,40 %) je porovnateľný s obsahom lignínu v kukuričnom vlákne (15,38 %) a je takmer polovičný v porovnaní s ihličnatou sulfátovou buničinou.

### *Spracovanie suspenzie kukuričných vlákien a OCC mletím na Valley holandri*

Podobný obsah celulózy v kukuričných vláknach a OCC a takmer identický obsah lignínu, teda približne 15 %, môže zapríčiniť podobné vlastnosti a najmä možnosť výroby papierových hárkov z mletej buničinovej suspenzie. Obr. 1 znázorňuje časovú závislosť  $\sigma$ SR pre hydromechanicky upravené vzorky suspenzie zloženej z kukuričných vlákien a OCC v pomere 40:60.



Obr. 1: Časová závislosť °SR pre hydromechanicky upravené vzorky kukuričného vlákna a OCC v pomere 40:60 (séria B1).

Na obr. 1 je možné vidieť rastúci trend v časovej závislosti stupňa mletia. Hodnoty Schopper-Riegler (°SR) niektorých študovaných zmesí sa pohybujú od 43 do 97 (Koponen a kol. 2023). Avšak kvôli prítomnosti jemných častíc bolo prakticky neúčinné mlieť dlhšie na potenciálne vyššie °SR, pretože častice boli rovnomerne dispergované v celom objeme vodnej suspenzie buničiny.

#### *Vlastnosti papierových hárkov pripravených z kukuričných vlákien a OCC v pomere 40:60*

Tab. 2 zobrazuje vlastnosti papierových hárkov na báze hydromechanicky upravených vzoriek kukuričných vlákien a OCC v pomere 40:60. V literatúre sa uvádzajú hustoty recyklovaného papiera v rozmedzí od 620 do 700 kg.m<sup>-3</sup> a závisia od použitej suroviny (Cardoso a kol. 2012). Index pevnosti v ťahu, TEA a ďalšie fyzikálne a mechanické vlastnosti sú buď porovnateľné s údajmi od iných autorov alebo sú vyššie, napr. v porovnaní s niektorými buničinami na báze trávy kombinovanými s OCC (Cardoso a kol. 2012, Pažitný a kol. 2013). Avšak odpor pripravených papierových hárkov proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho je rádovo nižší v porovnaní s papierovými hárkami na báze trávy (Pažitný a kol. 2013). Naopak, belosť je porovnateľná, ako sa očakávalo (Pažitný a kol. 2013).

Tab. 2: Fyzikálne vlastnosti papierových hárkov z kukuričných vlákien a OCC v pomere 40:60.

Fyzikálna vlastnosť (jednotky)	Nameraná hodnota
Hustota (kg.m <sup>-3</sup> )	540
Belosť ISO 2469 and 2470 (%)	28,38 ± 0,14
Tržné zaťaženie (kN.m <sup>-1</sup> )	2,7
Index pretrhnutia (N.m.g <sup>-1</sup> )	43,6
Absorpcia energie v ťahu – TEA (J.m <sup>-2</sup> )	25,2
Tržná dĺžka (km)	4,4
Pevnosť v ťahu (MPa)	23,4
Relatívne predĺženie (%)	1,1
Odpor proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho (s)	28,9
Pevnosť v ťahu pri nulovej upínacej dĺžke (N.cm <sup>-1</sup> )	45,3

#### *Vlastnosti papierových hárkov pripravených z kukuričných vlákien a OCC v pomere 60:40*

Tab. 3 zobrazuje vlastnosti papierových hárkov na báze kukuričných vlákien a OCC v pomere 60:40. Vzorka bola ošetrovaná oxidáciou bez mletia na Valley holandri. Odpor pripravených hárkov proti prieniku vzduchu je nižší v porovnaní so vzorkou na báze mletých kukuričných vlákien a OCC v pomere 40:60, a tiež v porovnaní s výsledkami Pažitného a kol. (Pažitný a kol. 2013).

Tab. 3: Fyzikálne vlastnosti papierových hárkov z kukuričných vlákien a OCC v pomere 60:40 upravených acidifikáciou bez mletia.

Fyzikálna vlastnosť (jednotky)	Stanovená hodnota
Hustota (kg.m <sup>-3</sup> )	500
Belosť ISO 2469 and 2470 (%)	28,48 ± 0,37
Odpor proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho (s)	5,6
Pevnosť v ťahu pri nulovej upínacej dĺžke (N.cm <sup>-1</sup> )	33,6

#### *Vlastnosti hárkov pripravených z kukuričného vlákna a OCC za rôznych podmienok*

Vzorky série B0 boli podrobené acidifikácii, chelatačnému procesu, peroxidovému bieleniu s prídavkom alkálií, bieleniu v D stupni a peroxidovému bieleniu v alkalickom prostredí. Séria B0 nebola podrobená žiadnej hydromechanickej úprave na Valley Holandri. Naproti tomu séria B1 bola najprv podrobená mletiu na Valley Holandri. Až potom nasledovali chemické úpravy, ako je acidifikácia, chelatačný proces, peroxidové bielenie s prídavkom alkálií, bielenie v D stupni a peroxidové bielenie v alkalickom prostredí. Tento postup sa nám osvedčil a je súčasťou patentovej dokumentácie v podanej patentovej prihláške (Pažitný a kol. 2025a). Vyššie uvedený chelatačný proces je základným postupom na odstraňovanie kovov z bieliacich systémov. V našich experimentoch sme použili DTPA ako chelatačné činidlo – chelátor, pretože vytvára komplex s biologickými ligandmi v rámci nového, netoxického komplexu medzi kovovým iónom a chelátorom a vylučuje tento komplex z bieliaceho systému alebo živého tela (Blanusa a kol. 2005, Tominaga a kol. 2021). Po chelatačných procesoch zvyčajne nasleduje bieliaca sekvencia P1-D-P2, v ktorej sa striedajú zásadité a kyslé stupne (Starrsjö a kol. 2021). Cieľom bieliacej sekvencie P1-D-P2 je získať čo najčistejšiu celulózu, pretože celulóza v lignocelulózových materiáloch je najbežnejším biopolymérom na zemi (Pažitný 2019) a táto makromolekula tvorí veľmi silné vodíkové väzby, a tým zabezpečuje vysoké mechanické vlastnosti (Marinho 2025). Tab. 4 zobrazuje fyzikálne a mechanické vlastnosti papierových hárkov na báze bieleného kukuričného vlákna a OCC v dvoch pomeroch kukuričného vlákna a OCC. Prvý pomer chemicky upraveného a bieleného kukuričného vlákna a OCC – 60:40 tvorí sériu B0 bez mletia. Druhý pomer kukuričného vlákna a OCC tvorí sériu B1 s mletím na mlyne Valley Holander, avšak tento pomer kukuričného vlákna a OCC je opačný – 40:60. Podiel kukuričného vlákna sa v tomto prípade znížil v prospech OCC, pretože plánovaná priemyselná výroba zahŕňa pridávanie kukuričného vlákna v menšej miere v porovnaní s OCC.

Tab. 4: Fyzikálne vlastnosti papierových hárkov z chemicky upraveného kukuričného vlákna a OCC v pomere 60:40 (vzorka B0 bez hydromechanickej úpravy) a 40:60 (vzorka B1 so zahrnutou hydromechanicou úpravou).

Fyzikálna vlastnosť (jednotky)	Stanovená hodnota bielených vzoriek	
	B0	B1
Hustota (kg.m <sup>-3</sup> )	610	600
Belosť ISO 2469 and 2470 (%)	26,92 ± 0,89	33,08 ± 0,31
Tržné zaťaženie (kN.m <sup>-1</sup> )	2,7	3,2
Index pretrhnutia (N.m.g <sup>-1</sup> )	37,6	62,4
Absorpcia energie v ťahu – TEA (J.m <sup>-2</sup> )	14,6	38,0
Tržná dĺžka (km)	3,8	5,3
Pevnosť v ťahu (MPa)	23,0	31,2
Relatívne predĺženie (%)	0,65	1,40
Odpor proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho (s)	44,1	159,3
Pevnosť v ťahu pri nulovej upínacej dĺžke (N.cm <sup>-1</sup> )	41,8	54,4

Pri porovnaní hustoty a belosti papierových hárkov série B0 bez hydromechanickej úpravy a B1 so zahrnutou hydromechanicou úpravou sa hodnoty vlastností dramaticky nelíšia. Avšak pri baliacich papieroch a papieroch vyžadujúcich lepšie mechanické vlastnosti sú zaujímavejšie hodnoty parametrov, ako je tržné zaťaženie, index pretrhnutia, absorpcia energie v ťahu, tržná dĺžka, pevnosť v ťahu, relatívne predĺženie, odpor papierového hárka proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho a pevnosť v ťahu pri nulovej upínacej dĺžke. Najdramatickejší nárast je v prípade odporu papierového hárka proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho. Nárast tohto parametra medzi bielenou vzorkou bez hydromechanickej úpravy B0 a vzorkou so zahrnutou hydromechanicou úpravou B1 je viac než 261 %, čo predstavuje takmer štvornásobný nárast odporu papiera proti prieniku vzduchu zahrnutím hydromechanickej úpravy na Valley holandri. Ďalšie sledované mechanické parametre, ktoré sa dramaticky zvyšujú zahrnutím hydromechanickej úpravy, sú TEA – absorpcia energie v ťahu (zo 14,6 J.m<sup>-2</sup> na 38,0 J.m<sup>-2</sup>) a relatívne predĺženie (z 0,65 % na 1,40 %). TEA a relatívne predĺženie sa zvyšujú približne o 160 %, respektíve 115 %. Ostatné mechanické vlastnosti sa tiež zvyšujú zahrnutím hydromechanickej úpravy. Nárast však nie je až taký dramatický a je pod 100 %. Predpokladáme tu zanedbateľný vplyv rôznych pomerov kukuričných vlákien a OCC na fyzikálne alebo mechanické vlastnosti papierových hárkov pripravených zo suspenzií zmesových kukuričných vlákien a OCC. Vďaka uvedeným relatívne dobrým vlastnostiam hárkov možno kukuričné vlákno považovať za ďalší nedrevný lignocelulózový materiál na výrobu obalových druhov papiera.

## Záver

Suspenzie vyrobené z nedrevnej biomasy a sekundárnych vlákien boli použité na štúdium papierových hárkov pripravených z bienej zmesi kukuričných vlákien a OCC (staré obaly z vlnitej lepenky). Zloženie zmesi kukuričných vlákien a sekundárnych vlákien na báze OCC bolo hydromechanickejšie a chemicky modifikované, čo viedlo k zmenám mechanických a optických vlastností pripravených papierových hárkov. Predpokladáme zanedbateľný vplyv rôznych pomerov kukuričných vlákien a OCC na zmenu fyzikálnych vlastností papierových hárkov. Vlastnosti ako je hustota a optické vlastnosti študovaných papierových hárkov na báze bienej suspenzie s hydromechanicou úpravou v porovnaní so suspenziou bez takejto úpravy, sa zmenili veľmi málo alebo mierne. Naproti tomu mechanické vlastnosti, ako je odpor

papierových hárkov proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho, TEA – absorpcia energie v ťahu a relatívne predĺženie, sa zmenili dramaticky. Hodnota TEA sa zmenila zo 14,6 J.m<sup>-2</sup> na 38,0 J.m<sup>-2</sup> (približne o 160 %) a relatívne predĺženie sa zmenilo z 0,65 % na 1,40 % (približne o 115 %) po zahrnutí hydromechanickej úpravy suspenzie pred acidifikáciou. Najdramatickejší nárast bol v prípade odporu papierových hárkov proti prieniku vzduchu podľa Gurleyho. Zvýšenie odporu papierových hárkov proti prieniku vzduchu medzi bielenou vzorkou bez hydromechanickej úpravy a bielenou vzorkou so zahrnutou hydromechanicou úpravou bolo o 261 %. Predstavovalo to takmer štvornásobné zvýšenie odporu papierových hárkov proti prieniku vzduchu po aplikácii mletia na Valley holandri. Vďaka uvedeným relatívne dobrým mechanickým vlastnostiam pripravených papierových hárkov a relatívne vysokému obsahu holocelulózy je kukuričné vlákno z vedľajších produktov výroby škrobu vhodným nedrevným lignocelulóзовým materiálom na výrobu papiera, najmä na výrobu obalového papiera s požadovaným zlepšením mechanických vlastností.

### Pod'akovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV–23–0651.

### Literatúra

1. Blanus, M., Varnai, V.M., Piasek, M., Kostial, K., 2005: Chelators as antidotes of metal toxicity: therapeutic and experimental aspects. *Current Medicinal Chemistry* 12(23): 2771-2794.
2. Cardoso, M.T., Carneiro, A.D.C.O., Oliveira, R.C.D., Carvalho, A.M.M.L., Sousa Júnior, W.P.D., Martins, M.C., Santos, R.C.D., Silva, J.C.D., 2012: Physical and mechanical properties of recycled papers used for tube production. (Propriedades físicas e mecânicas de papéis reciclados utilizados para fabricação de tubetes). *Ciência Florestal*, Santa Maria 22(2): 403-411.
3. Chung, S.H., 1999: Process for making recycled paper having improving strength properties. US 6187135 B1 (28.04.1999).
4. Jirarotepinyo, N., Nguyen, J., Cross, A., Jameel, H., Venditti, R.A., 2025: Impact of multiple paper recycle loops on the yield and properties of wood fibers and of non-wood wheat straw fibers for packaging. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 27: 1901-1913.
5. Kibirkštis, E., Kabelkaitė, A., Markowski, L., Miliūnas, V., 2013: Microscopic analysis of recycled paper effect on print quality parameters. *Microscopy Research and Technique* 76(9): 890-892.
6. Koç, B.O., Gümüškaya, E., Erişir, E., Peşman, E., Kirci, H., 2017: Comparison of reinforced oxygen delignification methods for old corrugated board (OCC) fibres. *Drewno* 60(199): 47-64.
7. Koponen, A., Cecchini, J., Heiskanen, S., Selenius, M., Jäsberg, A., 2023: Vacuum-assisted water Removal from highly refined furnishes. *BioResources* 18(1): 1398-1419.
8. Li, Y., Ma, C., 2015: Circular economy of a papermaking park in China: a case study. *Journal of Cleaner Production* 92: 65-74.

9. Marinho, E., 2025: Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications. *Sustainable Chemistry for the Environment* 11: 100283.
10. Okino, E.Y.A., Santana, M.A.E., Souza, M.R.D., 2000: Utilization of wastepaper to manufacture low density boards. *Bioresource Technology* 73(1): 77-79.
11. Pažitný, A., 2019: Steam explosion of wood particles from fibreboard and particle board with indirect control by enzymatic hydrolysis. *Acta Chimica Slovaca* 12(2): 185-191.
12. Pažitný, A., Boháček, Š., Krišta, J., Páteková, M., 2025a: Method of producing paper from secondary fiber and corn grain packaging. (Spôsob výroby papiera zo sekundárnej vlákny a obalov kukuričného zrna). Pulp and Paper Research Institute, JSC, Bratislava. PP 00175 – 2025 (IPO SR, 10.12.2025).
13. Pažitný, A., Boháček, Š., Russ, A., 2010: Properties of paper prepared from by-products of bioethanol production. (Vlastnosti papiera pripraveného z vedľajších produktov výroby bioetanolu). *Papír a celulóza* 65(11): 336-339.
14. Pažitný, A., Boháček, Š., Russ, A., 2011: Application of distillery refuse in papermaking: Novel methods of treated distillery refuse spectral analysis. *Wood Research* 56(4): 533-544.
15. Pažitný, A., Krišta, J., Ihnát, V., 2025b: Corn kernel fiber – alternative source of fiber added to pulp in production of wrapping paper. Conference proceedings “Wood, Pulp & Paper Polygrafia Academica”, Pp. 150-155, Bratislava, Slovak Republic, March 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup>, 2025.
16. Pažitný, A., Russ, A., Boháček, Š., Bottová, V., Černá, K., 2013: Utilization of energetic grass fibre for modification of recovered fibre properties. *Wood Research* 58(2): 181-190.
17. Potůček, F., Češek, B., Milichovský, M., 2013: Effect of adding secondary fibers to kraft pulp on strength properties and air resistance. *Cellulose Chemistry and Technology* 47(5-6): 455-460.
18. Rezekinta, F.A., Kasim, A., Syafri, E., Ridwan, F., Chaniago, I., Ichiura, H., 2024: The Effect of Using Cellulose Nanofiber from Kapok (*Ceiba pentandra*, L) as Reinforcement on The Properties of Recycled Papers. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology* 8(4): 426-436.
19. Saberi, S., Abdeali, G., Bahramian, A.R., 2025: From waste to energy storage: Fabrication of shape-stabilized phase change composites using cellulose extracted from waste paper. *RSC Advances* 15(13): 10049-10073.
20. Starrsjö, S., Boman, M., Sevastyanova, O., Lindström, M.E., Fiskari, J., 2021: Assessment of Q(OP)D(PO) bleachability of softwood kraft pulp. *Nordic Pulp & Paper Research Journal* 36(4): 582-593.
21. Sutcu, A., Sahin, H.T., 2017: Chemical treatment of recycled pulp fibres for property development: Part 1. Effects on bleached kraft pulps. *Drewno* 60(200): 95-109.
22. Tikhomirova, E., Aleksandrov, D., Tofanica, B.M., Mikhailidi, A., 2024: Evaluation of Recycled Paperboard Properties and Characteristics. *Applied Sciences* 14(4): 1661.
23. Tominaga, T., Shimomura, S., Tanosaki, S., Kobayashi, N., Ikeda, T., Yamamoto, T., Tamura, T., Umemura, S., Horibuchi-Matsusaki, S., Hachiya, M., Akashi, M., 2021: Effects of the chelating agent DTPA on naturally accumulating metals in the body. *Toxicology Letters* 350: 283-291.

## Postupné uvoľňovanie minerálnych prvkov z peliet s nosičom z OCC – ako enviroabsorbentom

Ján Talába\*, Elena Opálená, Štefan Boháček  
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.  
[talaba@vupc.sk](mailto:talaba@vupc.sk)

### Abstrakt

Článok je zameraný na sledovanie postupného uvoľňovania minerálnych prvkov N, P, K, Ca a Mg, ktoré boli pridané do nosiča OCC vo forme dusičnanu amónneho s draselnou soľou, NPK hnojiva a drevného popola. Uvoľňovanie prvkov bolo sledované ich analytickým stanovením vo vodných filtrátoch počas ôsmich cyklov po troch dňoch. Z výsledkov vyplýva, že jednotlivé prvky sa uvoľňujú postupne s rôznym priebehom. Dusík a draslík vykazovali regresívny charakter, rýchlejší v prvých štyroch cykloch. Fosfor a horčík sa v prvom cykle uvoľnili viac v porovnaní s ostatnými cyklami, ktoré mali mierne klesajúci a potom mierne rastúci charakter. Vápnik sa uvoľňoval rovnomerne. Vo všetkých filtrátoch pri použití drevného popola bolo zistené alkalické pH s veľmi miernym poklesom pri jednotlivých cykloch. Minerálne prvky z drevného popola sa uvoľňovali pomalšie ako z klasických umelých hnojív. Uskutočneným výskumom boli potvrdené dobré vlastnosti OCC ako absorbenta/nosiča minerálnych látok s využitím na fertilizáciu pôdy.

**Kľúčové slová:** recyklovaný kartónový papier (OCC), drevný bukový popol, hnojivo NPK, liadok amónny, draselná soľ, absorbent, hnojivá s riadeným uvoľňovaním živín.

### Úvod

Materiálová recyklácia starých použitých kartónov (OCC) má množstvo environmentálnych výhod, akými sú znižovanie odpadov, redukcia skleníkových plynov, prevencia proti deforestrácii alebo aj úspora energie voči novej produkcii (Azman a Zulkefli 2024). Opätovné rozvlákňovanie OCC je jednoduché (Lee et al. 2004). OCC sa rozdrví na menšie kúsky a namáča vo vode, aby kartón zmäkol. Vlastnosti recyklovaného vlákna sú oproti pôvodnému vláknu redukované (Park et al. 2025). Takto recyklované OCC je možné použiť na výrobu nových linerov a flutingu (EbrahimpourKasmani et al. 2022) ale aj ako zdroj na získanie mikrofibrilovanej celulózy (González-Pérez et al. 2022).

Špecifické využitie predstavuje OCC ako nosič/absorbent minerálnych látok pre fertilizáciu pôdy. Vysoké koncentrácie, aplikácia a dlhá trvanlivosť obsiahnutých minerálov závisia na vhodnej formulácii nosičových materiálov, zvyčajne založených na mletej rašeline, íloch, ryži, otrubách, semenách alebo iných komplexných organických matriciach (Yardin et al. 2000). Výhoda OCC oproti týmto materiálom je ľahká kompostovateľnosť (White 1994, Oliver-Villanueva et al. 2025). Používanie hnojív s pomalým uvoľňovaním živín (slow-release fertilizers) má v porovnaní s bežnými hnojivami mnoho výhod, napr. znižujú poškodenie semien alebo sadeníc vysokou lokálnou koncentráciou solí, zabraňujú rýchlej nitrifikácii a strate dusíka alebo znižujú frekvenciu aplikácie hnojív, čím sa znižuje škodlivý vplyv na

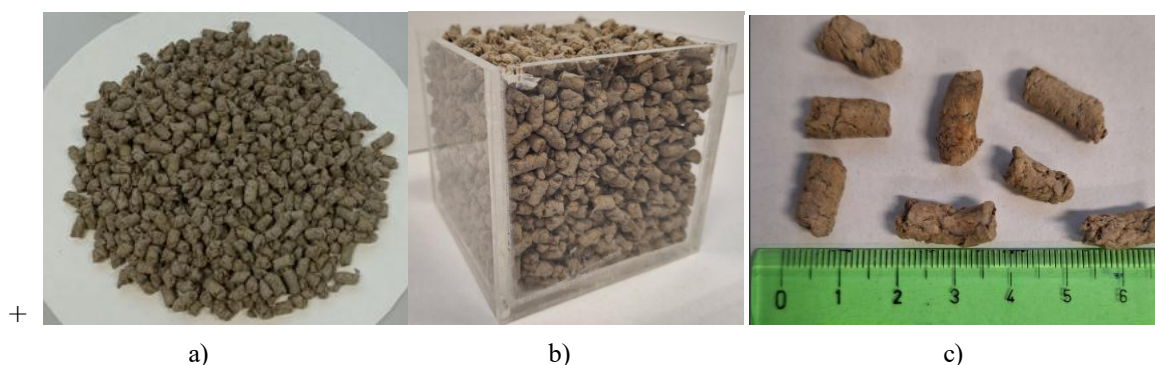
životné prostredie (Guo a kol. 2006). Minerálne hnojivá s pomalým uvoľňovaním sú najčastejšie na báze montmorillonitu, zeolitu, podvojného vrstevnatého hydroxidu a kaolinitu (Noh a kol. 2015) ale aj na báze dreveného uhlia (Chen a kol. 2022). Khan a kol. (2008) a Ahmad a kol. (2023) sa venovali hnojivám na báze odpadového papiera. Prehľad výrobných metód pre hnojivá s riadeným uvoľňovaním živín (controlled-release fertilizers), použitých materiálov, mechanizmov uvoľňovania živín, výhod a aspektov uvádza Asadu a kol. (2024).

Cieľom práce bolo potvrdiť postupné uvoľňovanie minerálnych prvkov z prírodného absorbentu OCC ako druhotného zdroja fytohmoty po aplikácii umelých fosílnych hnojív a prírodného hnojiva vo forme dreveného popola.

## Materiál a metódy

### Príprava peliet

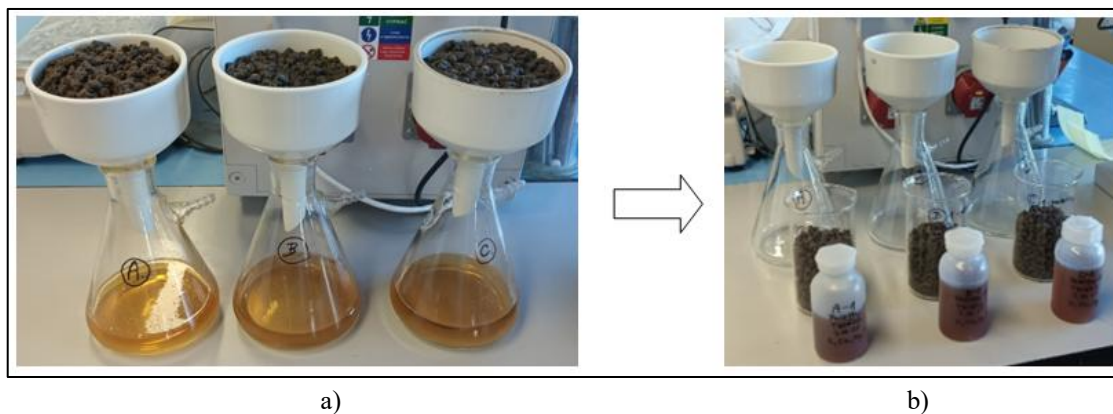
Zberový kartónový papier (OCC) v množstve 300 g so sušinou 93,15% sa rozvláknil po dobu 20 min na papierenskom rozvlákňovači typu Escher WYSS v 10 l vody pri laboratórnej teplote. Rozvlákněný materiál sa filtroval na sušinu 20%. Takýmto postupom sa pripravili celkovo 3 vzorky. Do prvej vzorky sa aplikoval dusičnan amónny (liadok amónny s dolomitom) a draselná soľ v množstve po 75 g v nasýtených roztokoch. Do druhej vzorky sa aplikovalo NPK hnojivo (NPK so zeolitom) v množstve 150 g v nasýtenom roztoku. Do tretej vzorky sa aplikoval drevený bukový popol v množstve 150 g vo vodnej suspenzii. Každá vzorka bola rozmixovaná a upravená na sušinu 18%, jemným drvením rovnomerne homogenizovaná a ponechaná samovoľnému sušeniu na sušinu cca 45%. Takto pripravené vzorky sa peletovali na laboratórnom peletovači. Pripravené peletky sa prirodzene dosušili na sušinu cca 92%. Sypná hmotnosť peletiek bola stanovená na 348 g/dm<sup>3</sup> (obr. 1).



Obr. 1: Dosúšanie peliet na požadovanú sušinu (a), stanovenie sypnej hmotnosti (b), peletky z OCC s prídavkom popola veľkosti Ø7 mm x 17 mm (c).

### Laboratórna simulácia postupného uvoľňovania minerálov

Postupné zalievanie vodou v množstve 300 ml sa uskutočnilo v Buchnerových lievnikoch cez filtračný papier (obr. 2a). Množstvo peletiek na zalievanie bolo 90 g. Získané filtráty na analytické stanovenie uvoľnených minerálnych prvkov sa odobrali na druhý deň po odkvapkaní (obr. 2b). Cyklus zalievania sa opakoval 8 krát a to vždy po 3 dňoch.



Obr. 2: Zalievanie peliet v Buchnerových lievikoch (a), získané filtráty (b).

#### *Analytické metódy stanovenia minerálov vo filtrátoch*

Obsah draslíka, vápnika a horčíka sa stanovil metódou atómovej absorpčnej spektrometrie s atomizáciou v plameni na prístroji SOLLAR M6. Obsah fosforu sa stanovil spektrometrickou metódou s molybdénom amónnym. Obsah dusíka sa stanovil na analyzátore Xpert s chemiluminiscenčným detektorom.

#### **Výsledky a diskusia**

##### *Analýza použitých hnojív*

Dusičnan amónny  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  ako liadok amónny obsahoval 26,86% dusíka, z ktorého polovicu tvorí rýchle prístupný dusičnanový dusík a polovicu pomalšie prístupný amoniakálny dusík. Draselná soľ ako chlorid draselný  $\text{KCl}$ , obsahovala 63,5% oxidu draselného  $\text{K}_2\text{O}$ , z toho samotný draslík mal zastúpenie 52,8%. Hnojivo NPK obsahuje 11% dusíka, z toho 4,6% vo forme  $\text{NO}_3$  a 6,4% vo forme  $\text{NH}_4$ , obsah fosforu je 13% ako rozpustný oxid fosforečný  $\text{P}_2\text{O}_5$  a obsah draslíka ako oxidu draselného  $\text{K}_2\text{O}$  je 7%. Použitý drevný popol z bukoveho dreva obsahoval 25,1% vápnika, 16,3% draslíka, 3,9% horčíka a 1,5% fosforu.

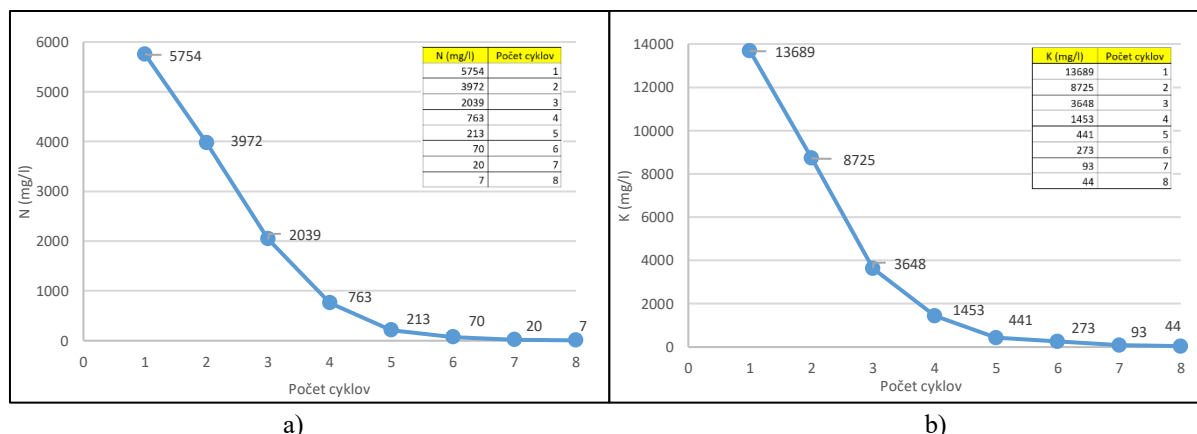
##### *Účinky minerálnych prvkov*

Vápnik pomáha zlepšovať pH pôdy, čím môže neutralizovať kyslé pôdy, stará sa o správny koreňový rast, posilňuje bunkové steny rastlín, zlepšuje štruktúru pôdy. Draslík je kľúčovým prvkom pre rast rastlín, podporuje kvitnutie a tvorbu plodov, výrazne posilňuje mrazuvzdornosť a odolnosť voči chorobám, pomáha hlavne zelenine prijímať vodu a živiny počas rastu, je dôležitý pri riadení fotosyntézy – premene slnečného svetla na energiu. Horčík je kľúčovým prvkom pre fotosyntézu, zúčastňuje sa na tvorbe chlorofylu ako zeleného farbiva pre rastliny (každá molekula chlorofylu obsahuje jeden atóm horčíka), je veľmi dôležitý pre rast rastlín. Fosfor je potrebný pre energiu v rastlinných bunkách, podieľa sa na tvorbe koreňov, semien, kvetov aj plodov. Dusík je veľmi dôležitý pre rast, je súčasťou chlorofylu nevyhnutného pre fotosyntézu (každá molekula chlorofylu obsahuje štyri atómy dusíka), ovplyvňuje obsah bielkovín v úrode.

#### **Peletky z OCC s prídavkom dusičnanu amónneho a draselnej soli**

Pri aplikácii rozpustených hnojív na rozvláknený OCC dochádza k napučievaniu vlákien buničiny. Celulóзовé vlákna sú zložené z fibríl a tie z mikrofibríl, ktoré sú dobrým absorbentom

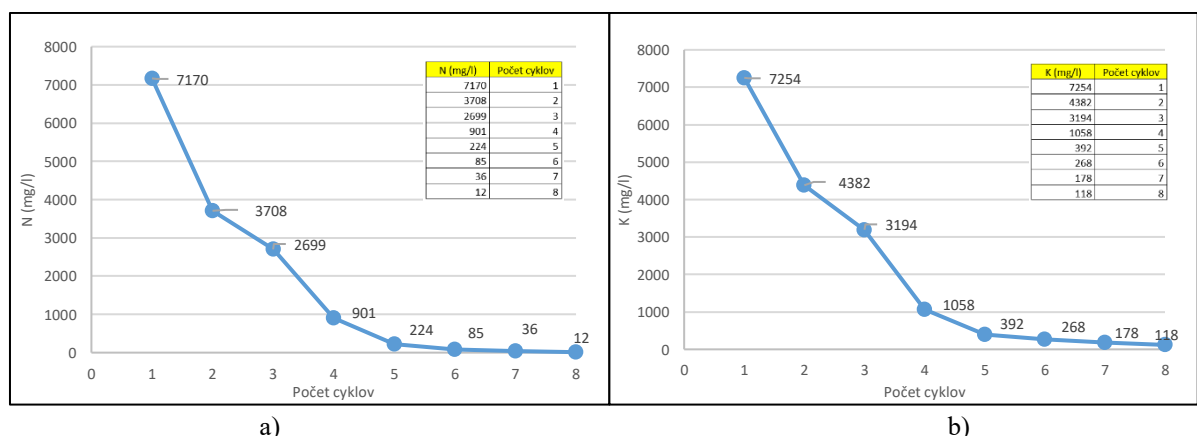
na ukotvenie minerálnych prvkov obsiahnutých v hnojivách (Hubbe 2013). Postupné uvoľňovanie dusíka a draslíka je znázornené na obr. 3, priebeh má degresívny charakter. Najväčšie množstvo sa uvoľnilo hneď v prvom cykle, pričom vo štvrtom cykle sa uvoľnilo už iba množstvo na úrovni 13,2% pri dusíku a 10,6% pri draslíku oproti množstvu uvoľnenému v prvom cykle.



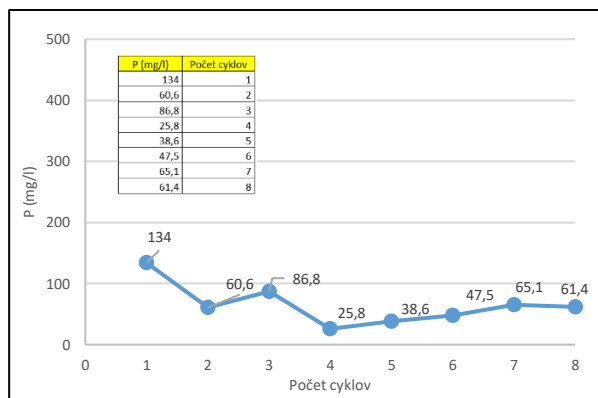
Obr. 3: Postupné uvoľňovanie dusíka(a), draslíka (b) v závislosti od počtu cyklov zalievania.

#### Peletky z OCC s prídavkom NPK hnojiva

Postupné uvoľňovanie dusíka a draslíka je znázornené na obr. 4. Priebeh má opäť degresívny charakter, množstvo uvoľnených prvkov je približne rovnaké. Po štvrtom cykle sa uvoľnilo množstvo o objeme 12,5% dusíka a 14,6% draslíka oproti množstvu uvoľnenému hneď v prvom cykle. Uvoľňovanie fosforu je rovnomerné (obr. 5). Uvoľnené množstvo v prvom cykle je v porovnaní s uvoľňovaním dusíka a draslíka na úrovni 1,8%, čo predstavuje 134 mg/l filtrátu, v ostatných cykloch sa uvoľňovanie dialo rovnomerne asi s polovičnou hodnotou.



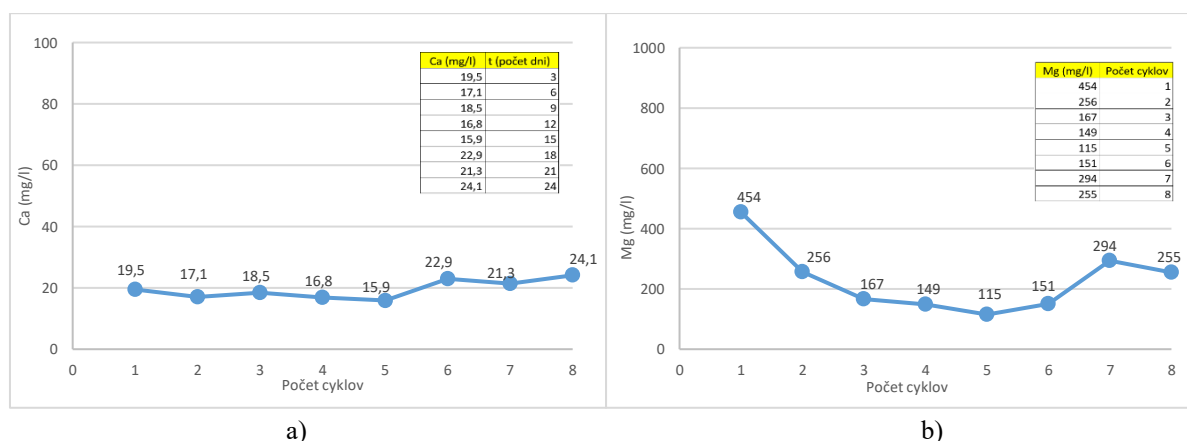
Obr. 4: Postupné uvoľňovanie dusíka (a), draslíka (b) v závislosti od počtu cyklov zalievania.



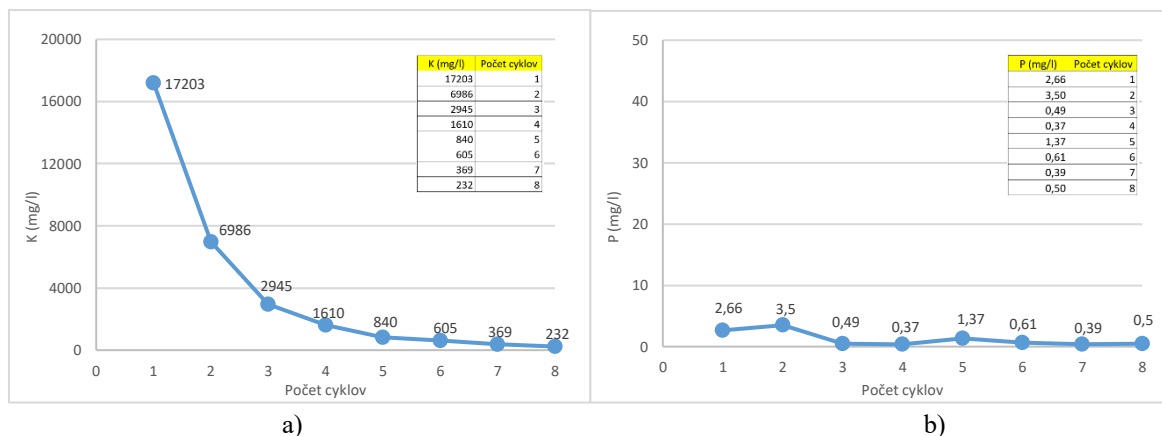
Obr. 5: Postupné uvoľňovanie fosforu v závislosti od počtu cyklov zalievania.

### Peletky z OCC s prídavkom dreveného popola

Samostatnú kapitolu tvorí drevený popol s obsahom veľmi priaznivých minerálov (Ca, Mg, K, P). Drevený popol je vďaka vysokému obsahu týchto minerálov výborným zásaditým hnojivom. Aplikáciou do peliet z OCC môže zlepšovať kvalitu kyslej a ílovitej pôdy. Môže predstavovať unikátne zásadité biohnojivo s pH = 9,5 až 10,5. Samotný popol má pH okolo 12. Postupné uvoľňovanie vápnika prebiehalo rovnomerne (obr. 6a). Vápnik sa z peliet uvoľňoval v podstate v rovnakých množstvách s priemernou hodnotou 19,5 mg/l filtrátu na jeden cyklus. Najviac horčíka a to 454 mg/l filtrátu sa uvoľnilo v prvom cykle (obr. 6b), v ostatných cykloch bol priebeh viac-menej rovnomerný s priemernou hodnotou 198g/l filtrátu, avšak s väčším rozptylom nameraných hodnôt s najprv mierne klesajúcim a potom mierne rastúcim charakterom. Draslík sa uvoľnil najviac v prvom cykle, v ostatných cykloch bolo jeho uvoľňovanie postupné až na hodnotu 1,35% z porovnania na prvý cyklus ( obr. 7a). Uvoľňovanie fosforu bolo rovnomernejšie, aj keď v prvom a druhom cykle sa uvoľnilo dvojnásobné množstvo ako vo zvyšných šiestich cykloch (obr. 7b). Fosfor sa viaže na celulózu prostredníctvom kovalentnej chemickej modifikácie (proces nazývaný fosforylácia), nie prirodzene. Tento proces zahŕňa reakciu hydroxylových (OH) skupín celulózy s fosforovými zlúčeninami za vzniku esterových väzieb. Fosfátové esterové väzby (P–O–C) sú odolnejšie spontánnej (neenzymatickej) hydrolýze za neutrálnych podmienok pH a miernych teplôt. Na základe viazanosti v organických a anorganických formách, ktoré sa rozkladajú postupne je uvoľňovanie fosforu pomalšie.



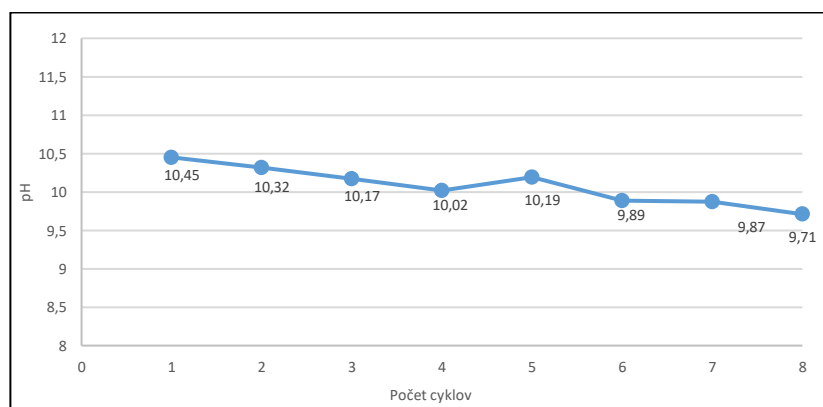
Obr. 6: Postupné uvoľňovanie vápnika (a), horčíka (b) v závislosti od počtu cyklov zalievania.



Obr. 7: Postupné uvoľňovanie draslíka (a), fosforu (b) v závislosti od počtu cyklov zalievania.

### Zmena pH vo filtrátoch

Grafické znázornenie zmien pH v jednotlivých cykloch je na obr. 8. Hodnota pH vykazovala stály zásaditý charakter aj po ôsmich cykloch. Výsledky testov dokazujú, že popol pomáha upravovať pH pôdy, čo je prospešné najmä pre kyslé pôdy, pretože ich dokáže zneutralizovať a sprístupniť živiny rastlinám. Zároveň zlepšuje štruktúru pôdy, zvyšuje jej priepustnosť pre vodu a vzduch, čo podporuje zdravý koreňový systém rastlín. Popol je zároveň biologicky rozložiteľný a posilňuje mikrobiálnu aktivitu. Niektoré minerály z popola môžu stimulovať rast prospešných pôdných mikroorganizmov. Mikroorganizmy v pôde potom zohrávajú dôležitú úlohu v dekompozícii a uvoľňovaní živín, najmä tých, ktoré sú viazané v organických zlúčeninách (Saarsalmi a kol. 2004).



Obr. 8: Grafické znázornenie priebehu pH vo filtrátoch vzorky peliet OCC s prídavkom popola v jednotlivých cykloch.

### Záver

V laboratórnych podmienkach bolo sledované postupné uvoľňovanie minerálnych prvkov N, P, K, Ca a Mg z peliet vyrobených z OCC (old corrugated cardboards). Minerálne prvky boli pridané do suspenzie OCC vo forme dusičnanu amónneho s draselnou soľou a NPK v množstve 100 g /300 g OCC a popola v množstve 150 g/300 g OCC. Uvoľňovanie prvkov bolo sledované ich analytickým stanovením vo vodných filtrátoch počas ôsmich cyklov. Jeden cyklus predstavoval zalievanie 90 g peletiek s 300 ml vody cez Buchnerov lievok, cykly sa opakovali po troch dňoch po preschnutí peletiek.

Z výsledkov laboratórnych testov vyplýva, že jednotlivé prvky sa uvoľňujú postupne s rôznym priebehom. Najväčšie množstvo uvoľneného prvku pri aplikácii umelých hnojív sa zistilo pri draslíku z peletiek z OCC s prídavkom dusičnanu amónneho a draselnej soli a to 13,689 g/l filtrátu hneď v prvom cykle. Dusík sa v prvom cykle uvoľnil v množstve 6,75 g/l. Dusík a draslík všeobecne vykazovali regresívny charakter, rýchlejší v prvých štyroch cykloch. Pri dusičnane amónnom a draselnej soli sa po štyroch cykloch uvoľnilo iba 13,2% dusíka a 10,6% draslíka oproti množstvu uvoľnenému v prvom cykle. Pri NPK sa v prvom cykle uvoľnil dusík v množstve 7,17 g/l a draslík v množstve 7,25 g/l. Po štyroch cykloch sa uvoľnilo 12,5% dusíka a 14,6% draslíka oproti prvému cyklu. Fosfor sa uvoľňoval v prvom cykle v dvojnásobnom množstve a to 134 mg/l oproti skoro konštantnému množstvu v ostatných cykloch. Pri aplikácii dreveného popola bolo najväčšie uvoľnenie pri draslíku v prvom cykle a to 17,2 g/l. V ďalších cykloch bolo uvoľnenie postupné s veľmi priaznivým charakterom postupného uvoľňovania. Vápnik sa uvoľňoval rovnomerne, v podstate v rovnakých množstvách, s priemernou hodnotou 19,5 mg/l filtrátu. Horčík sa uvoľnil v prvom cykle v množstve 454 mg/l, čo zodpovedalo dvojnásobnému množstvu v porovnaní s ostatnými cyklami, v ktorých uvoľňovanie prebiehalo s mierne klesajúcim a potom mierne rastúcim charakterom. Uvoľňovanie fosforu bolo vzhľadom na menšie namerané hodnoty plynulé, najviac sa uvoľnilo v prvých dvoch stupňoch a to s priemerom 3,08 mg/l

Postupné uvoľňovanie prvkov za použitia dreveného popola závisí od rôznych faktorov ako zloženie popola, pH, teplota, vlhkosť pôdy a klimatické podmienky. Tento proces môže byť veľmi prospešný a užitočný, keď sa aplikuje správne. Môže zlepšiť kvalitu pôdy a tým podporiť udržateľnosť poľnohospodárstva a lesníctva. Z našich výsledkov vyplýva, že minerálne prvky z dreveného popola sa uvoľňujú pomalšie ako za použitia klasických umelých hnojív a môže trvať niekoľko mesiacov až rokov. Tento proces prebieha postupnejšie a tým má priaznivejší vplyv na miernejšie znižovanie pH kyslých pôd a podporu mikrobiálnej aktivity rastu prospešných mikroorganizmov. Všetky tieto zákonitosti vedú k biologickej rozložiteľnosti použitého absorbentu OCC spolu s riadeným uvoľňovaním dôležitých živín potrebných pre obnovenie a rast bioflóry. Zvýšenou tvorbou prírastku listovej a stromovej zelene sa zvýši tvorba chlorofylu, ktorý ako jediný dokáže prírodne vyrobiť glukózu a kyslík potrebný na rast a život a dopriať každodenný slnečný kúpeľ pre každý živý organizmus. Malo by byť samozrejmosťou vrátiť prírode aspoň zlomok z toho, čo nám jej fytohmota neustále poskytuje. Tento článok je len začiatkom ďalšieho rozboru aplikácii a variant použitia prírodného absorbentu v synergii s dreveným popolom ako biohnojivom.

### **Použitá literatúra**

1. Ahmad, D.F.B.A., Wasli, M.E., Tan, C.S.Y., Musa, Z., & Chin, S.F. (2023). Eco-friendly cellulose-based hydrogels derived from waste papers as a controlled-release fertilizer. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 36.
2. Asadu, C.O., Ezema, C.A., Ekwueme, B.N., Onu, C.E., Onoh, I.M., Adejoh, T., ... & Emmanuel, U.O. (2024). Enhanced efficiency fertilizers: Overview of production methods, materials used, nutrients release mechanisms, benefits and considerations. *Environmental Pollution and Management*, 1, 32-48.
3. Azman, S.N.D.S.M., Othman, S.A., Amran, A.A., & Zulkefli, F.D. (2024). Innovation in Cardboard. *APS*, 137.

4. Chen, Z.S., Liu, T., Dong, J.F., Chen, G., Li, Z., Zhou, J.L., & Chen, Z. (2022). Sustainable application for agriculture using biochar-based slow-release fertilizers: a review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(1), 1-12.
5. Ebrahimpour Kasmani, J., Samariha, A., & Mahdavi, S. (2022). Investigation of the independent and combined effect of different additives on the properties of liner and fluting paper made from OCC. *Iranian Journal of Wood and Paper Science Research*, 37(3), 204-216.
6. Guo, Y., Zhang, M., Liu, Z., Zhao, C., Lu, H., Zheng, L., & Li, Y. C. (2020). Applying and optimizing water-soluble, slow-release nitrogen fertilizers for water-saving agriculture. *ACS Omega*, 5(20), 11342-11351.
7. González-Pérez, M.M., Manríquez-González, R., Robledo-Ortíz, J.R., Silva-Guzmán, J.A., de Muniz, G.I.B., & Lomelí-Ramírez, M.G. (2022). Old corrugated container (OCC) cardboard material: An alternative source for obtaining microfibrillated cellulose. *Journal of Natural Fibers*, 19(14), 9296-9308.
8. Hubbe, M.A., Ayoub, A., Daystar, J.S., Venditti, R.A., & Pawlak, J.J. (2013). Enhanced absorbent products incorporating cellulose and its derivatives: A Review. *BioResources*, 8(4).
9. Khan, M., Mingzhi, W., Lim, B., Lee, J. (2008). Utilization of waste paper for an environmentally friendly slow-release fertilizer. *Journal of Wood Science* 54(2), 158-161.
10. Lee, H.L., Youn, H.J., Lee, S.G., Kang, T.Y., & Heo, Y.D. (2004). Analysis of disintegration characteristics of OCC. *Palpu Chongi Gisul/Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 36(4), 1-8.
11. Noh, Y.D., Komarneni, S., & Park, M. (2015). Mineral-based slow release fertilizers: A review. *한국토양비료학회지*, 48(1), 1-7.
12. Oliver-Villanueva, J.V., A-Carbó, B., Lorenzo-Saéz, E., & Lerma-Arce, V. (2025). Sustainable environmental analysis of wooden boxes for fruit and vegetable packaging and transport in comparison with corrugated cardboard boxes. *Sustainability*, 17(2), 557.
13. Park, M.S., Kim, C.H., Park, H.H., Park, J.H., & Lee, J.S. (2025). Optimizing fiber quality in recycled old corrugated containers (OCC) using ultra-fine bar plate technology. *Applied Sciences*, 15(16), 9036.
14. Saarsalmi, A., Mälkönen, E., & Kukkola, M. (2004). Effect of wood ash fertilization on soil chemical properties and stand nutrient status and growth of some coniferous stands in Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(3), 217-233.
15. Yardin, M.R., Kennedy, I.R., & Thies, J.E. (2000). Development of high quality carrier materials for field delivery of key microorganisms used as bio-fertilisers and bio-pesticides. *Radiation Physics and Chemistry*, 57(3-6), 565-568.
16. White, R. (1994). Disposal of used packaging. In *food industry and the environment: Practical issues and cost implications* (pp. 318-346). Boston, MA: Springer US.

### Pod'akovanie

"The study was funded by the European Commission within the LignoSilva project [Grant Agreement #101059552] under the Horizon Europe Teaming for Excellence action."

"Táto štúdia bola financovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence."

## Produktová línia vrstvených kompozitných dosiek z lisovaných drevených hoblín a papierenského kalu

Rastislav Čerešňa\*

Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s., Bratislava

[ceresna@vupc.sk](mailto:ceresna@vupc.sk)

### Abstrakt

Článok je zameraný na tvorbu novej produktovej línie na báze technologických odpadov z drevospracujúcich a papierenských výrobných procesov a predstavuje spôsob materiálovej recyklácie s tvorbou vyššej pridanej hodnoty. Predstavené produkty – vrstvené kompozitné dosky - sa skladajú z dvoch rôznych typov vrstiev, t. j. z tuhej jadrovej platne z papierenského kalu a pružných povrchových vrstiev z lisovaných drevených hoblín. Na výrobu týchto dosiek postačujú niekoľkonásobne nižšie lisovacie tlaky oproti kompozitným doskám vyrobeným výlučne z lisovaných hoblín. Vlastnosti dosiek, ich štruktúra a textúra povrchu umožňujú ich použiť v nábytkárstve, v zariadení interiérov, ale aj v preprave predmetov a tovaru.

**Kľúčové slová:** kompozitná doska, papierenský kal, drevené hobliny, kyslý aerosól.

### Úvod

Celkový metrický objem vedľajších produktov vznikajúcich pri spracovaní dreva tvorí v SR asi 8,4% voči priemernej slovenskej ročnej ťažbe dreva (Slamka et al. 2024). Tento odhad nevytvára presne o celkovom percentuálnom podiele vyprodukovaného dreveného technologického odpadu spracovaním konkrétnej vytťaženej drevnej suroviny, pretože uvedený podiel sa zvyšuje so stupňom spracovania suroviny. Keďže vo výsledku to môže byť relatívne vysoké percento, je nutné technologické odpady zo spracovania dreva považovať za tzv. vedľajšie drevené produkty a presadzovať ich spracovanie na ďalšie produkty.

V príspevku je prezentovaná nová produktová línia vrstvených kompozitných dosiek na báze dvoch technologických odpadov z drevospracujúcich procesov: drevených hoblín a papierenského kalu. Navrhované riešenie predstavuje spôsob materiálovej recyklácie uvedených technologických odpadov s možnou vyššou pridanou hodnotou v porovnaní s ich súčasným využitím.

Drevené hobliny patria medzi najčastejšie vedľajšie produkty drevospracujúcich procesov, pričom v SR sa ročne vyprodukuje asi 14 tis. m<sup>3</sup> (2020) a z nich sú zhruba ¾ ďalej spracované na výrobu energie (Moravčík 2020). Alternatívne využitie drevených hoblín na výrobu tzv. hoblinovej dyhy navrhujú napr. Ihnát et al. (2024), kde sú hobliny zlepené PVAc lepidlom a lisované pri vysokom tlaku (25 MPa). Podľa dreveniny, z ktorej hobliny pochádzajú, sa dajú docieľiť farebné a textúrové variácie dyhy.

Papierenský kal je technologický odpad z výroby papiera, ktorý obsahuje vlákna príliš krátke nato, aby sa dal vrátiť späť do procesu výroby papiera v papierni. V roku 2003 bolo len v Európe vyprodukovaných viac ako 4,7 mil. ton papierenského kalu (v krajinách združených v

Confederation of European Paper Industrie – CEPI), z ktorého väčšina bola skládkovaná (69%) alebo spaľovaná (Likon 2012). Papierenský kal je čiastočne využívaný ako aditívum do betónov a tehliarskej hliny, príp. sa z neho vyrábajú pelety na absorpciu iných látok. Vyznačuje sa značnou tvrdosťou a pevnosťou, ak je vysušený na úroveň priemernej interiérovej vlhkosti vzduchu.

### **Materiál a metódy**

Vrstvená kompozitná doska sa skladá z dvoch rôznych typov vrstiev: a) tuhej jadrovej vrstvy zo suchého papierenského kalu a b) pružných povrchových vrstiev z lisovaných drevených hoblín. Použité boli smrekové hobliny, kde cca 90% hoblín malo hrúbku 0,49-0,54 mm a plošný rozmer od 8 x 8 mm do 20 x 20 mm.

### **Metóda výroby dosky s použitím PVAc lepidla**

Táto metóda je predmetom úžitkového vzoru č. SK 10456 (Čerešňa et al. 2025). Pružnosť a súdržnosť povrchových vrstiev vyrobených z hoblín je zabezpečená prídavkom PVAc lepidla do predsušených hoblín pred ich zlisovaním.

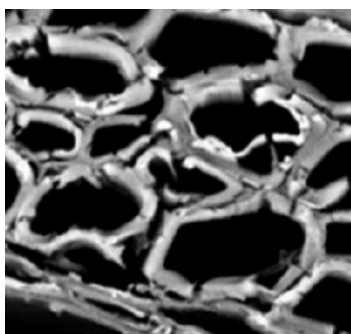
Výroba vrstvenej kompozitnej dosky pozostáva z týchto etáp: (1) príprava prvej vrstvy z predsušených hoblín s absolútnou sušinou 80-99% hm. s prídavkom 30-35% vodného roztoku PVAc lepidla v množstve 15-25% hmotnosti predsušených hoblín a táto zmes sa zamieša za účelom požadovanej distribúcie lepidla na povrchu hoblín, zmes sa potom zalisuje v lise s lisovacími platňami vyhriatymi na 180-210°C, pri tlaku 0,005-0,02 MPa (cca 0,05-0,2 bar) s lisovacou dobou 1-5 s; (2) po uvoľnení lisu sa na takto upravenú prvú vrstvu položí druhá, t. j. jadrová vrstva zo suchého papierenského kalu so sušinou 80-95% hm. tvaru platne s hrúbkou 14-55 mm, na plochách ktorej je tesne predtým štetcom, valčekom alebo nástrekom nanosená vrstva 30-35% vodného roztoku PVAc lepidla; (3) na druhú, jadrovú vrstvu, sa potom aplikuje tretia vrstva budúcej kompozitnej dosky (obr. 1), pozostávajúca zo zmesi predsušených hoblín so sušinou 80 - 99% hm., zmiešaných s 30-35% vodným roztokom PVAc lepidla v množstve 15-25% hmotnosti predsušených hoblín. Všetky tri vrstvy sa potom zalisujú v lise s lisovacími platňami vyhriatymi na 180-210°C najprv pri tlaku 0,005-0,02 MPa (cca 0,05-0,2 bar) s lisovacou dobou 1-5 s, a okamžite nato sa finálne lisujú v lise s lisovacími platňami vyhriatymi na 180-210°C pri tlaku 0,5-2 MPa (cca 5-20 bar) s lisovacou dobou 10-20 min, počas ktorej lepidlová para vytvorená z vodného roztoku PVAc lepidla ďalej distribuuje lepidlo po povrchu drevených hoblín, až do vyparenia vodnej zložky roztoku lepidla, t. j. do jeho vytvrdnutia, čím sa hobliny zlepia navzájom a tiež sa prilepia aj o jadrovú vrstvu. Po uplynutí tejto lisovacej doby sa vrstvená kompozitná doska vyberie z lisu a udržiava sa pri teplote 23°C a 55% relatívnej vlhkosti vzduchu počas 7 dní. Po kondicionovaní je kompozitná doska pripravená na prípadnú aplikáciu povrchových vodovzdorných ochranných náterov a na ďalšie použitie.



Obr. 1: Vrstvy kompozitnej dosky pred finálnym zlisovaním.

### Metóda výroby dosky s použitím roztoku $H_2SO_4$

Pri pôsobení tepla v kyslom prostredí sa mení povrchová štruktúra drevných štiepok tým, že sa rozpúšťa lignín a hemicelulóza, čo vedie k zvýšenej pórovitosti a sprístupňuje vláknitú štruktúru celulózy - odstránením hemicelulózy a lignínu sa zväčšuje povrchová plocha a objem pórov drevných štiepok (obr. 2), pričom pri teplote nad  $160^{\circ}C$  nastáva pri hydrotermálnom spracovaní rýchly rozklad drevného tkaniva (Shi et al. 2018). Hemicelulóza a lignín sú teda varnými činidlami odstraňované z povrchu a vnútra drevných štiepok, čím sa zvýši relatívny obsah celulózy, a tým aj drsnosť povrchu štiepky, čo prispieva k možnosti lepšieho mechanického spojenia (votknutia do seba) susediacich zlisovaných drevných štiepok v kompozite (Ziqiang Liu et al. 2022).



Obr. 2: Trhliny na bunkovej stene a na strednej lamele po tepelnom spracovaní s 1%  $H_2SO_4$  pri teplote  $100^{\circ}C$  (Shi et al. 2018).

Uvedený postup je možné použiť pri výrobe bezspojivových kompozitných dosiek (a iných objektov) horúcim lisovaním drevných častíc v aerosóle roztoku napr. kyseliny sírovej alebo horúcim lisovaním po predchádzajúcej úprave častíc v roztoku tejto kyseliny, prípadne ich kombináciou.

Výroba kompozitnej dosky pozostáva z týchto etáp: (1) príprava prvej vrstvy z predsušených hoblín s absolútnou sušinou 80-99% hm. s prídavkom 5% vodného roztoku  $H_2SO_4$  v množstve cca 85% hmotnosti predsušených hoblín, táto zmes sa zamieša za účelom rovnomernej distribúcie kyseliny v hoblinách a naparuje sa v zakrytom stave počas doby 15 min. Zmes sa potom zalisuje v lise s lisovacími platňami vyhriatymi na  $120-140^{\circ}C$  - teplota lisu nesmie presiahnuť  $160^{\circ}C$ , aby nedegradovalo drevné tkanivo hoblín. Tlak lisovania je 0,005-0,02 MPa (cca 0,05-0,2 bar) s lisovacou dobou 1-5 s; (2) po uvoľnení lisu sa na takto upravenú prvú vrstvu aplikuje vrstva z papierenského kalu so sušinou 70-80% hm. v množstve 600-2000% hmotnosti

predsušených hoblín (6-20 násobok hm. hoblín) vo forme granúl s priemerom cca 3-20 mm; (3) na vrstvu papierenského kalu sa aplikuje tretia vrstva budúcej kompozitnej dosky, pozostávajúca znovu zo zmesi predsušených hoblín s absolútnou sušinou 80-99% hm. s prídavkom 5% vodného roztoku  $H_2SO_4$  v množstve cca 85% hmotnosti predsušených hoblín, ktorá sa zamieša a napačuje v zakrytom stave počas doby 15 min. Všetky tri vrstvy sa potom zalisujú v lise s lisovacími platňami vyhriatymi na 120-140°C najprv pri tlaku 0,005-0,02 MPa (cca 0,05-0,2 bar) s lisovacou dobou 1-5 s, a hneď nato sa finálne lisujú v lise s lisovacími platňami vyhriatymi na 120-140°C pri tlaku 0,5-2 MPa (cca 5-20 bar) s lisovacou dobou 15-30 min, počas ktorej kyslý aerosól, vytvorený z vodného roztoku  $H_2SO_4$  nasiaknutého v hoblinách, narúša a tým zdrsňuje povrch hoblín, čo umožní lepšie vzájomné mechanické spojenie hoblín v povrchových vrstvách kompozitnej dosky a tiež ich spojenie s jadrovou vrstvou z papierenského kalu. Po uplynutí tejto lisovacej doby sa vrstvená kompozitná doska vyberie z lisu a suší sa v sušičke pri teplote 80°C až do dosiahnutia priemernej vlhkosti vzduchu, t. j. niekoľko hodín, v závislosti od hrúbky vrstvy papierenského kalu, ktorý sa má vysušiť. Doska sa môže ďalej kondicionovať pri teplote 23°C a 55% relatívnej vlhkosti vzduchu počas 7 dní.

## VÝSLEDKY A DISKUSIA

Príklad kompozitnej dosky s jadrom z papierenského kalu a povrchovými vrstvami z lisovaných drevených hoblín vyrobenej s použitím PVAc lepidla je na obr. 3, doska vyrobená s použitím 5% roztoku  $H_2SO_4$  je na obr. 4 a, b



Obr. 3: Vrstvená kompozitná doska vyrobená s použitím PVAc lepidla.



a)



b)

Obr. 4 a, b: Vrstvená kompozitná doska vyrobená s použitím roztoku  $H_2SO_4$ .

Obe vyrobené dosky sa vo všeobecnosti vyznačujú tuhosťou, ale aj pružnosťou ich povrchových vrstiev. Ich celková hrúbka môže byť v rozmedzí 18-60 mm, pričom hrúbka

jadrovej vrstvy z papierenského kalu je po vysušení 14-55 mm a hrúbka povrchových vrstiev z lisovaných drevených hoblín je 2-10 mm. Objemová hmotnosť dosiek je v rozmedzí 700-1000 kg/m<sup>3</sup>, čo zodpovedá objemovej hmotnosti tvrdého dreva. Z výrobného hľadiska majú obe dosky výhodu niekoľkonásobne nižších výrobných lisovacích tlakov (0,5-2 MPa) oproti kompozitným doskám na báze dreva dostupným na trhu (5,75 MPa - Iždinský et al. 2020), keďže pevnosť dosky je zabezpečená prirodzenou tuhosťou jej jadra z papierenského kalu. Pri metóde výroby dosky s použitím roztoku H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> bola použitá nižšia lisovacia teplota (na zabránenie masívnej degradácii drevného tkaniva), čo mohlo viesť k nižšej výslednej hustote hoblinových vrstiev dosky (obr. 4a), avšak zvýšením lisovacieho tlaku, príp. aj doby lisovania, sa dá dosiahnuť hustota hoblinových vrstiev rovnaká ako pri metóde s použitím PVAc lepidla (obr. 3).

Štruktúra a textúra povrchu dosiek je ovplyvnená frakciou hoblín a druhom drevín, z ktorých hobliny pochádzajú, pričom je možné kombinovať rôzne druhy drevín v ich povrchových vrstvách a to umožňuje značnú variabilitu ich vzhľadu. Dosky je možné použiť na dekoratívne obklady stien, reliéfne panely, zásteny, segmenty podhládov a pod., v stavebnom priemysle na výrobu interiérových montovaných priečok alebo ich častí, v nábytkárskom priemysle na výrobu nábytkových súčastí a interiérových prvkov, napr. stolov, skriň, políc, úložných priestorov, ale možné je ich použiť aj v preprave predmetov a tovaru ako obalový materiál, kde vďaka určitej pružnosti ich povrchových vrstiev znižujú potrebu použitia výstelkových materiálov (expandovaný polystyrén, plsť, penový polyetylén, penový polyuretán a pod.). Možné sú aj dizajnové aplikácie vo forme solitérnych interiérových predmetov. Materiálové zloženie dosiek umožňuje len aplikácie, kde nedochádza k styku s tlakovou alebo zrážkovou vodou, pričom vodoodolnosť zvýši povrchová úprava náterom alebo striekaním. Pri použití ekologicky nezávadnej povrchovej úpravy je doska po skončení svojej životnosti kompostovateľná alebo použiteľná na výrobu energie spaľovaním. Uvedené vrstvené kompozitné dosky predstavujú alternatívu k sadrovláknitým, drevovláknitým a plastovým lisovaným doskám. Predmetom ďalšieho vývoja v tejto oblasti môže byť výroba tvarovaných dosiek a iných objektov s krivými plochami.

## ZÁVER

Nová produktová línia vrstvených kompozitných dosiek z vedľajších drevných produktov z drevospracujúcich a papierenských výrobných procesov, ako sú napr. papierenský kal, drevené hobliny a i., predstavuje spôsob recyklácie lignocelulóзовých materiálov so zvýšením pridanej hodnoty oproti ich tradičnému druhotnému využitiu. Produktová línia zároveň umožňuje znižovať spotrebu primárnej drevnej suroviny príp. iných materiálov, a tiež znižovať množstvo skládkovaných technologických odpadov.

## Pod'akovanie

Tento príspevok bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja MŠVV SR v rámci projektu APVV-24-0666 „Produkty z bezspojivových aglomerovaných materiálov na báze recyklovaného dreva a dreveného odpadu“.

## Literatúra

1. ČEREŠŇA R., BOHÁČEK Š., IHNÁT V., ČEREŠŇOVÁ Z., PAŽITNÝ A. 2025. Pohľadová kompozitná doska s jadrom z papierenského kalu a povrchovými vrstvami

- z lisovaných drevených hoblín. Úžitkový vzor č. SK 10456, UPV Banská Bystrica, 15. 10. 2025.
2. IHNÁT et al. 2024. Hoblinová dyha. Úžitkový vzor č. SK 10161, UPV Banská Bystrica, 6.11.2024.
  3. IŽDINSKÝ, J., VIDHOLDOVÁ, Z., REINPRECHT, L. 2020: Particleboards from recycled wood. In: Forests 11(11), 1166.
  4. LIKON 2012. Recent Advances in Paper Mill 30 Sludge Management. In: Industrial Waste (book), 2012. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/221927329\\_Recent\\_Advances\\_in\\_Paper\\_Mill\\_Sludge\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/221927329_Recent_Advances_in_Paper_Mill_Sludge_Management).
  5. MORAVČÍK, M. 2020. Vyhodnotenie empirického prieskumu a aproximácia výsledkov pre podmienky SR. Štúdia. NLC, Zvolen, 18 s.
  6. SHI, J., LU, Y., ZHANG, Y., CAI, L., & SHI, S.Q. (2018). Effect of thermal treatment with water, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and NaOH aqueous solution on color, cell wall and chemical structure of poplar wood. Scientific Reports, 8(1), 17735.
  7. SLAMKA M., ŠEBEŇ V., BARKA I., VANČO M 2024. Posúdenie udržateľného využívania energetickej lesnej biomasy (štúdia). Národné lesnícke centrum, Zvolen, Jún 2024.
  8. ZIQIANG LIU et al. 2022: Study on wood chips modification and its application in wood-cement composites. In: Case Studies in Construction Materials, Volume 17, December 2022. Dostupné na: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01350>.

## Umelá inteligencia v environmentálnej udržateľnosti

Daniela Majerčáková\*, Laura Caban  
Univerzita Komenského v Bratislave  
Faculty of Mathematics, Physics and Informatics  
Department of Mathematical Analysis and Numerical Mathematics  
\*daniela.majercakova@fmph.uniba.sk

### Abstrakt

Za posledné desaťročie sa v podnikaní kladie čoraz väčší dôraz na udržateľnosť. Spoločnosti na celom svete sa čoraz viac usilujú fungovať zodpovednejšie voči životnému prostrediu, spoločnosti a svojim zamestnancom. V dôsledku toho sa princípy ESG (Environmental, Social, and Governance) stali kľúčovou súčasťou modernej podnikovej stratégie. Dnes už ESG nie je len otázkou imidžu alebo plnenia regulačných požiadaviek; mení sa na dlhodobú konkurenčnú výhodu. Zároveň sme svedkami rýchleho rozvoja umelej inteligencie (AI), ktorá transformuje prakticky každú oblasť podnikania. V rámci ESG sa AI stáva nevyhnutným nástrojom, podporujúcim všetko od spracovania rozsiahlych environmentálnych dát až po monitorovanie dodávateľských reťazcov a predpovedanie rizík súvisiacich s klimatickými zmenami. AI umožňuje firmám nielen efektívnejšie zhromažďovať a vyhodnocovať údaje potrebné pre ESG reporting, ale aj automatizovať procesy a odhaľovať vzorce, ktoré by inak zostali skryté. To organizáciám umožňuje znižovať svoju uhlíkovú stopu, optimalizovať spotrebu energie a účinnejšie reagovať na sociálne otázky, ako je rovnosť, diverzita či pracovné podmienky. Tento článok skúma prepojenie AI a ESG mapovaním kľúčových aplikácií, prístupov a trendov, ktoré sa objavili v posledných rokoch. Cieľom je ukázať, ako AI pomáha spoločnostiam nielen spĺňať regulačné požiadavky, ale aj skutočne prispievať k udržateľnejším a zodpovednejším podnikateľským praktikám.

**Kľúčové slová:** umelá inteligencia, ESG, zelená transformácia, udržateľné podnikanie.

### Úvod

V poslednom desaťročí sme svedkami narastajúceho dôrazu na udržateľnosť v podnikaní. Firmy po celom svete sa snažia fungovať zodpovednejšie voči životnému prostrediu, spoločnosti i svojim zamestnancom a práve preto sa čoraz častejšie opierajú o princípy ESG, teda environmentálne, sociálne a správčovské kritériá [1]. Burnaev at al. v štúdií [2] uvádzajú, že ESG nie je len o ochrane životného prostredia, ale aj o zodpovednom prístupe k spoločnosti a správe firmy. Koncept udržateľnosti a regulácie sa začal formovať už v 60. rokoch v oblasti investovania ako SRI a výraznejšiu pozornosť získal po roku 2015 s plánom Zelenej dohody.

ESG kritériá predstavujú spôsob, ako začleniť environmentálne, sociálne a správčovské faktory do investičných a podnikových rozhodovacích procesov. Pri hodnotení investícií alebo oceňovaní podnikov sa tak zohľadňujú aj nefinančné ukazovatele, ako sú emisie uhlíka, spotreba vody, rozmanitosť zamestnancov, pracovné podmienky, diverzita v predstavenstvách či odmeňovanie manažmentu v závislosti od jednotlivých atribútov E, S a G.

Nástroj pre vyhodnocovanie ESG skóre Endesa SA			Skóre	Dopad	Total Skóre
Environmentálna	Climatické Zmeny	Emisie uhlíka	3	9	2,7
		Uhlíková stopa produktu	3	9	2,7
	Prírodné zdroje	Nedostatok vody	2	4	0,8
		Využívanie pôdy	2	4	0,8
		Závislosť od surovín	3,5	5	1,75
	Znečistenie & Odpad		3	9	2,7
Environmentálne príležitosti		1	8	0,8	
Social	Ludské zdroje		1	7	0,7
	Zodpovednosť za kvalitu výroby		1	5	0,5
	Odpor Stakeholderov		2	5	1
	Sociálne príležitosti		1	1	0,1
Riadenie	Korporátne riadenie		1	9	0,9
	Správanie spoločnosti	Obchodná Etika	2	5	1
		Transparentnosť	2,5	7	1,75
			<b>ESG SCORE</b>		<b>8,7</b>

Vysvetlivky	
Skóre	1 až 10
Impact	1 až 10
ESG Skóre	Vysoké
	Stredné
	Nízke

Nástroj, resp. kalkulačka pre udržateľnosť počíta možný ekonomický dopad nedodrievania ESG kritérií	
Vysoké / stredné / nízke sa adaptuje podľa sektoru a priemyslu	

Obr. 1: Nástroj na vyhodnocovanie ESG skóre. Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Merchán (2023).

Cieľom stakeholderov je identifikovať a riadiť riziká aj príležitosti spojené s ESG aspektami, čím podporia dlhodobú výkonnosť investícií a celková udržateľnosť podnikov [3]. Možno povedať, že uplatňovanie environmentálnych, sociálnych a správcofských (ESG) kritérií sa dnes stalo nevyhnutnou súčasťou finančného sveta, pričom čoraz častejšie slúžia ako základ pri rozhodovaní o investíciách a tvorbe podnikových stratégií. Podľa Yébenes et al. [4], súčasný transparentný vplyv regulácií zdôrazňuje význam ESG ukazovateľov z pohľadu environmentálnych, sociálnych a riadiacich rizík (napr. CRSD – Európska smernica o vykazovaní informácií o udržateľnosti podnikov). ESG ukazovatele sa čoraz viac stávajú kľúčovým súborom informácií pre interných aj externých používateľov nefinančných údajov. CSRD tak zásadne mení spôsob, akým budú podniky prezentovať svoju sociálnu a ekologickú stopu v externom výkazníctve, čím sa zvyšuje zodpovednosť firiem voči zainteresovaným stranám. Popri tom, ako sa ESG princípy dostávajú do firemného rozhodovania, pozorujeme aj prudký rozvoj umelej inteligencie (AI), ktorá zasahuje do všetkých oblastí podnikania, a to najmä v kontexte globálnej digitalizácie a éry Industry 4.0. V oblasti udržateľnosti a ESG získava AI čoraz významnejšie postavenie – od spracovania rozsiahlych environmentálnych dát, cez monitorovanie dodávateľských reťazcov, až po predikcie klimatických rizík [1-2]. Integrácia a vývoj AI technológií prinášajú nové možnosti na zlepšenie ESG profilov firiem. Wang et al. [5] dopĺňajú záver, že kľúčové predpoklady dlhodobého udržateľného rastu patrí zintenzívnenie investícií do výskumu a vývoja a urýchlenie digitálnej transformácie.

### Prehľad odbornej literatúry

Vývoj prepojenia umelej inteligencie a ESG transparentnosti možno sledovať v niekoľkých etapách. V základnej technologickej rovine sa umelá inteligencia začína formovať už v polovici 20. storočia, pričom rané základy boli položené Turingom, McCarthym a ďalšími teoretikmi v oblasti výpočtovej techniky [6]. Významným medzníkom v diskusii o inteligencii strojov je Turingov test [7], ktorý skúma, či stroj dokáže viesť konverzáciu nerozoznateľnú od človeka. Vývoj AI možno rozdeliť do viacerých období –

od predhistorických myšlienok a prvých prototypov, cez optimistické začiatky a „temné roky“ stagnácie, až po komercializáciu a masové využitie v súčasnosti [5]. Hoci po počítačnom rozmachu nastal v 70. rokoch útlm financovania, koncom 20. a začiatkom 21. storočia sa AI vrátila do popredia, tentokrát s dôrazom na riešenie špecifických problémov a s využitím strojového a hlbokého učenia podporeného rýchlejšim výpočtovým výkonom a dostupnosťou veľkých dátových súborov [8]. Druhá línia vývoja súvisí s rozvojom koncepcie udržateľného rozvoja a ESG hodnotenia, ktoré sa do popredia dostávajú začiatkom 21. storočia, najmä po roku 2004, keď OSN podporila princípy zodpovedného investovania (PRI) a ESG faktory začali byť systematicky zahrňované do finančných rozhodnutí [9]. Od tohto obdobia sa rozvíja aj odborná literatúra, ktorá sa zaoberá prepojením výkonnosti firiem v oblasti ESG s ich finančnými výsledkami, reputáciou a prístupom ku kapitálu. Spomedzi významných autorov, ktorí najviac publikujú, vyberáme napr. Friede, G., Pedersen, A, a Robert G. Eccles.

Tretia vývojová línia, ktorá integruje AI do ESG rámcov, sa začína výraznejšie rozvíjať po roku 2015 – v čase, keď sa zvyšuje tlak na transparentnosť, dostupnosť dát a automatizáciu nefinančného reportingu [10]. Konvergencia umelej inteligencie a iniciatív v oblasti životného prostredia, spoločenskej zodpovednosti a riadenia (ESG), tak zásadne mení stratégie korporátnej udržateľnosti. AI už nie je len samostatnou technológiou, ale sa stáva neoddeliteľnou súčasťou ESG stratégií, čím zásadne mení prístup organizácií k environmentálnej, sociálnej a správcovskej zodpovednosti [11]. V oblasti životného prostredia AI umožňuje presnejšie monitorovanie a optimalizáciu spotreby zdrojov, napríklad znižovanie emisií, efektívnejšie využívanie energie a vody, či riadenie udržateľných dodávateľských reťazcov. Tieto prístupy podporujú environmentálnu udržateľnosť. Pri prehľade odborných článkov z aktuálne dostupnej literatúry, a ich záverov, sumarizujeme niektoré z uhlov pohľadov na danú tematiku či existujú výhody využívania AI pre podporu ESG regulácie a zodpovedného podnikania. Uvedením našej výskumnej otázky „Uvedte výhody použitia AI na podporu ESG regulácií“ sme prehľadali viac ako 126 miliónov akademických článkov z platformy Semantic Scholar. Získali sme 50 článkov, ktoré sú pre túto otázku najrelevantnejšie. Ako príklad vyberáme autorov Ferrato, G. et al. [12], ktorí potvrdzujú, že implementácia AI a ESG praktík umožňuje firmám efektívnejšie spravovať zdroje, znižovať uhlíkovú stopu a optimalizovať spotrebu energie. Ďalej Cucari et al. [13] a Ogunyemi et al. [14] prispievajú závermi, že AI zvyšuje transparentnosť a presnosť. Okrem toho pomáha nielen firmám, ale aj tvorcom politik pri rozhodovaní a optimalizácii udržateľných praktík. Ostatní autori ako napr. Plońska, Areiqat and Jaber, Suárez giri et al. doplnili svojimi štúdiami závery, z ktorých možno konštatovať, že umelá inteligencia podporuje dosahovanie ESG cieľov, najmä v oblasti dekarbonizácie a digitalizácie, urýchľuje analytické procesy a znižuje náklady.

Zároveň zvyšuje presnosť ESG reportov (17,67 %) a skraca čas ich vypracovania (58,33 %), pričom zlepšuje ich dôveryhodnosť a kvalitu. AI tiež prispieva k zvyšovaniu transparentnosti, optimalizuje presnosť, umožňuje monitorovanie v reálnom čase, zlepšuje riadenie rizík v uhlíkovom účtovníctve a pomáha predchádzať greenwashingu. V nasledujúcej tabuľke 1 sumarizujeme dostupnú literatúru ku vybraným kľúčovým slovám priradeným ku citovaným zdrojom v databázach vedeckých článkov.

**Tab. 1:** Dostupná literatúra podľa kľúčových slov vo vybraných knižniciach. Zdroj: Vlastné spracovanie podľa Lens. Org, CVTI, Wiley online library.

Databáza	Kľúčové slová	TOP autori	Obdobie	Počet článkov
Lens.org	ESG, AI	Kim Sheunghwan	2020-2025	389
	ESG Reporting	Moon Kyoungsoo	2025	81
	AI + sustainable business	Cella Ch. Howard	2024-2025	851
	ESG in finance	Arora Hemant	2024	92
CVTI SR knižnice E-Zdroje	ESG, AI	neuvádza	2020-2025	287
	ESG reporting	neuvádza	2024-2025	1215
	AI, ESG, SRI	neuvádza	2024-2025	12
	Sustainable Business, ESG	neuvádza	2020-2025	4798
Wiley online library	ESG, AI	Liu Yujie	2023-2025	1007
	ESG reporting	Preeti Narooka	2025	366
	AI + sustainable business, ESG	Nicola Cucari	2020-2025	870
	Sustainable Business, ESG	Zhang, Wang	2025	1581

## Metodológia výskumu

Výskum je teoretickej povahy a založený na prehľade relevantnej literatúry a empirických štúdií, pričom na získanie uceleného pohľadu na tému AI pre ESG sme využili metodológiu výskumu tvorby prehľadových štúdií. Pre našu štúdiu sme prepojili poznatky z viacerých akademických databáz, aby sme získali komplexný pohľad na využitie umelej inteligencie v podpore ESG regulácie. Do výberu boli zahrnuté zdroje, ktoré sa venovali konkrétnym aplikáciám umelej inteligencie alebo automatizovaných systémov v oblasti plnenia ESG regulácií. Zdroje, ktoré skúmali využitie technológií pri zbere, analýze alebo reportovaní žiadúcich dát a obsahovali empirické dôkazy či prípadové štúdie implementácie AI v rámci ESG rámcov. Niektoré zo zdrojov opisujú AI systémy pre hodnotenie rizík a monitorovanie dát. Ostatné literatúry sú zamerané na „know-how“ dodržiavania požiadaviek pre dosiahnutie cieľov Zelenej dohody. Zvyšné zahŕňali konkrétne komponenty AI alebo automatizovaných systémov (nie iba ESG regulácie samotné), a riešili AI implementáciu priamo v kontexte ESG regulácií, pričom prinášali pôvodné empirické dôkazy alebo dáta. Zároveň sme prihliadali na to, aby sa výskum zameriaval na ESG aplikácie a nie len všeobecnú regulačnú problematiku.

Pri posudzovaní sme brali do úvahy všetky tieto kritériá spoločne a na ich základe sme urobili celkové rozhodnutie o zaradení publikácie do skupiny podľa kľúčových slov. Databázy ako Scopus a Web of Science poskytujú overené vedecké články a recenzované štúdie, ktoré umožňujú získať relevantný teoretický základ. Semantic Scholar a Dimensions nám umožnili pristupovať k veľkému množstvu akademických prác vrátane konferenčných príspevkov a tzv. preprintov, čím sme získali aktuálne trendy v téme výskumu. Na základe štúdií evidujeme, že pre ESG sa už dnes vyžaduje aj využitie špecifických databáz, ako sú GRI, Sustainalytics, MSCI ESG alebo CDP, ktoré poskytujú detailné údaje o udržateľnosti, environmentálnych dopadoch a riadení rizík. Kombináciou využitia rôznych zdrojov sme tak mohli vytvoriť ucelený pohľad na aplikácie AI v ESG a ich praktickú relevantnosť pri budúcom výskume.

## Výsledky a diskusia

V rámci analýzy dostupných štúdií sa potvrdilo, že implementácia umelej inteligencie (AI) do procesov ESG prináša významné prínosy v oblasti zberu, spracovania a reportovania údajov.

Viaceré empirické práce napr. Chen, S.[15], Biere, M. et al. [16] alebo Antoncic, M. [17] zdôrazňujú schopnosť AI automatizovať validáciu dát, dopĺňať dátové medzery a znižovať závislosť od subjektívneho samoreportingu, čím sa zvyšuje dôveryhodnosť a úplnosť ESG výkazov. Osobitná pozornosť sa venuje riadeniu rizík a prevencii greenwashingu – AI technológie dokážu identifikovať (ne)konzistentnosti v dátach a poskytovať nezávislú verifikáciu. Významný prínos sa prejavuje aj v podpore regulačnej zhody. Štúdie Plońska, M. [18] alebo Chen, S. [15] ukazujú, že AI uľahčuje štandardizáciu a verifikáciu ESG reportingu a zároveň umožňuje automatizované monitorovanie emisií v reálnom čase a prediktívnu analytiku uhlíkovej stopy. Tieto prístupy sú kľúčové pre zosúladenie s legislatívnymi požiadavkami a pre podporu cieľov dekarbonizácie. Okrem toho AI zvyšuje prevádzkovú efektívnosť a optimalizuje procesy – skracuje čas potrebný na spracovanie a reporting údajov, znižuje náklady a umožňuje škálovanie ESG procesov [18]. V rámci prehľadu benefitov implementácie umelej inteligencie do procesov ESG možno identifikovať niekoľko kľúčových oblastí prínosov, ktoré sa opierajú o výsledky zahrnutých štúdií. Napríklad v oblasti kvality a presnosti dát využitie strojového učenia, spracovania prirodzeného jazyka a Big Data analytiky zlepšuje presnosť reportovania potrebných dát, znižuje riziko greenwashingu a zvyšuje dôveryhodnosť hodnotenia firiem. K implementácii sú potrebné vysokokvalitné dátové zdroje, technické know-how a jasne nastavená správa dát. V oblasti monitorovania v reálnom čase a automatizovaného reportingu umožňujú technológie ako Internet vecí, prediktívna analytika a prepojené dashboardy priebežné sledovanie zhody a emisií. AI nástroje pre business intelligence, modelovanie scenárov a blockchain podporujú štandardizáciu výkazníctva a urýchľujú plnenie regulačných povinností. Implementácia si vyžaduje integráciu so systémami prevádzky, infraštruktúru senzorov, automatizačné nástroje a bezpečné dátové toky.

Takýto komplexný súhrn zistení, podložený analýzou štúdií Chen, S. [15], Biere, M. et al. [16], Antoncic, M. [17] a Plońska, M. [18], ukazuje, že AI má potenciál významne zlepšiť ESG procesy z hľadiska kvality údajov, rýchlosti, štandardizácie, efektívnosti a spoľahlivosti reportingu. Myslíme si, že umelá inteligencia predstavuje strategickú investíciu a jej prepojenie so svetom ESG bolo určite veľmi dobrým nápadom, nakoľko prináša vyššiu kvalitu a dôveryhodnosť dát, zrýchľuje a zefektívňuje procesy, umožňuje plniť prísnejšie regulačné požiadavky, a zároveň podporuje proaktívne riadenie rizík vďaka prediktívnym modelom (pomocou NN) a algoritmom. Zároveň však vyžaduje štrukturálne zmeny v podobe zabezpečenia kvalitných dát, vhodne nastavenej digitálnej infraštruktúry a jasne definovaného etického rámca, bez ktorých sa potenciál týchto technológií nenaplní naplno. Celkovo vnímame AI v ESG ako faktor, ktorý môže rozhodnúť o úspechu firiem v novom regulačnom prostredí a v konkurenčnom boji.

**Tab. 2:** Zhrnutie výsledkov vybraných najrelevantnejších štúdií. Zdroj: Autor na základe platformy Elicit.com.

Štúdia	Zámer štúdie	Typ umelej inteligencie v štúdií	Hlavné zistenia
Antonic, M. 2020	Big Data/umelá inteligencia/spracovanie prirodzeného jazyka na meranie ESG/cieľov udržateľného rozvoja (SDGs)	Analytika veľkých dát, umelá inteligencia, spracovanie prirodzeného jazyka	Uvádza sa, že umelá inteligencia, Big Data a spracovanie prirodzeného jazyka pomáhajú bojovať proti skresleniu pri samohodnotení, odhaľovať skryté údaje a poskytovať kvalitné metriky ESG.
Plonńska, 2023	Umelá inteligencia podporujúca environmentálne, sociálne a riadiace (ESG) riadenie rizík a dekarbonizáciu	Regresné modely, analýza založená na pravidlách, strojové učenie, modelovanie scenárov	Uvádza sa, že inteligencia zlepšila dosahovanie cieľov ESG, najmä v oblasti dekarbonizácie a digitalizácie, a urýchlila analytiku a znižovanie nákladov.
Cucari et al., 2023	Mapovanie nástrojov umelej inteligencie pre riadenie ESG	Neuvedené	Uvádza sa, že mapovanie nástrojov umelej inteligencie podporilo riadenie ESG, pomáhajúc spoločnostiam a tvorcom politík.
Areiqat a Jaber, 2025	Umelá inteligencia v udržateľnom účtovníctve a ESG reportovaní	Neuvedené	Uvádza, že umelá inteligencia zlepšila presnosť reportov o 17,67 % a skrátila čas ich vypracovania o 58,33%.

Ferraro, G. et al. [12] uvádza dôležitý právny akt - smernica EÚ, ktorý štandardizuje a sprísňuje vykazovanie informácií od roku 2021 – CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive). Tento legislatívny rámec stanovuje povinnosť reportovať a uvádzať informácie podľa klasifikácie EU Taxonomy, pričom rozširuje povinnosti aj na SME – malé a stredné podniky v roku 2026. CSRD je potrebné, pretože po zavedení Európskeho zelenej dohody v roku 2019, ktorá stanovila za cieľ dosiahnuť klimatickú neutralitu Európy do roku 2050, umožňuje firmám korektné reportovať a naplňovať zásady ESG, čím prispievajú k udržateľnej a transparentnej podnikovej praxi. Pochopiť ESG a jeho praktickú implementáciu je náročné, pretože samotná definícia „udržateľnej investície“ nie je jednotná a pravidlá (napr. SFDR, RTS, CSRD) sa neustále menia [12]. Firmy musia sledovať aktualizácie, meniť klasifikácie fondov a prispôbovať reportovanie podľa nových požiadaviek, pričom existuje riziko nejednoznačnosti či greenwashingu. Niektorým z problémov v tomto kontexte sú: a) AI vie modelovať scenáre, ale nepozná politické rozhodnutia ani nové legislatívne zmeny skôr, než sú verejné. b) Môže analyzovať text smerníc, ale nedokáže sama určiť právnu povinnosť alebo interpretovať nejasné regulácie ako SFDR či CSRD. A veľmi podstatné, že c) ak sú údaje neúplné, nepresné alebo rozptýlené medzi rôznymi zdrojmi, výstupy AI môžu byť zavádzajúce [19]. Okrem toho Sulkowski et. al. [19] upozorňujú, že firmy by mali aktívne komunikovať s verejnosťou a regulátormi, aby mohli spoluvytvárať pravidlá pre AI a ESG. Autori Plonška, M. [18], Antonic, M. [17] a Biere et al. [16] ukázali, ako môže AI podporiť ESG reporting a prispieť k pozitívnej organizačnej zmene, ale veľmi kvalitne upozorňuje Sulkowski [19], že nedostatky v uchopení ESG prostredia – ako sú fragmentácia štandardov, nedostatočná

transparentnosť a neistota pravidiel – nie sú dôsledkom samotnej AI, a zodpovednosť za ne nesú skôr organizačné a regulačné systémy.

## Záver

V tejto štúdií sme analyzovali výsledky skúmania rôznych autorov, ktorí prispievajú svojimi poznatkami a závermi ku tejto inovatívnej oblasti 21. storočia. Možno povedať, že trendu zodpovedného podnikania nebude inak, a v budúcnosti očakávame kvalitu výsledkov, práve na základe spojenia umelej inteligencie a udržateľnosti. Aj napriek tomu, že implementácia metrik ESG a regulácie udržateľnosti je v podnikaní stále vo vývoji, veríme, že využívanie AI bude v tejto oblasti druhoradé pri prihladnutí na udržateľný rast. To znamená, že AI je podľa nášho názoru nástroj primárne na podporu globálnej perspektívy pre záchranu planéty a ochrany životného prostredia. Z našej analýzy vyplýva, že integrácia umelej inteligencie síce prináša významné prínosy v oblasti kvality dát, efektívnosti vykazovania a dodržiavania regulačných požiadaviek, ale neupozorňuje na stálu prítomnosť greenwashingu, ku ktorému prispieva spoločnosť vlastným podnikaním. Preskúmané štúdie preukázali merateľné zlepšenia, ako je vyššia presnosť ESG reportov, skrátenie času ich prípravy a posilnenie dekarbonizácie. Ďalší výskum by sa mal zamerať na vytvorenie mechanizmov, ktoré zabezpečia, že AI slúži ako nástroj skutočnej zmeny, a nie len ako prostriedok na sofistikovanejšie prezentovanie nezmenených praktík.

Plné využitie potenciálu AI zatiaľ potvrdiť nevieme, nakoľko transparentnosť ESG pod vplyvom rôznych dát, prihladajúc na štáty EÚ, je zatiaľ rôznorodé. Prístupy k ESG sa v jednotlivých krajinách Európy líšia v závislosti od národnej legislatívy, ekonomickej vyspelosti a úrovne spoločenskej zodpovednosti. Podľa autorov Panko et al. [20] doplníme, že Slovensko na rozdiel od globálnych trendov kladie dôraz na praktické a strategické využitie ESG kritérií v rámci zefektívňovania výkonnosti a riadenia organizácií, avšak má limity v zlepšovaní sa.

Podobne sú na tom štáty iné ako tie najlepšie „hospodáriace“ s udržateľným rastom napr. Nemecko, Dánsko, Švédsko alebo Nórsko. Výsledné stanovisko je pre nás potvrdené na základe časti – sumarizácia a našim názorom je, že pochopiť ESG a jeho praktickú implementáciu je náročné, pretože nie je jednotná a menej vyspelé štáty (podobne ako aj firmy) nemajú dostatočne efektívne rýchle reakcie na meniace sa pravidlá. Usudzujeme, že štáty s lepšou infraštruktúrou pre AI a silnejšími právnymi rámcami sú schopné efektívnejšie využiť AI pre ESG a vybudovať si silnú konkurenčnú výhodu.

Týmto záverom sumarizujeme, že AI predstavuje mocný nástroj pre zlepšenie ESG reportingovej praxe a podporu udržateľného rastu, avšak jej efektívnosť je podmienená kvalitnými dátami, legislatívnou jasnosťou a aktívnou spoluprácou medzi firmami, regulátormi a zainteresovanými stranami.

## Použitá literatúra

- [1] RANE, N. (2024): *Artificial intelligence-driven approaches to strengthening Environmental, Social, and Governance (ESG) criteria in sustainable business practices: a review*. Dostupné na: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4843215](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4843215)
- [2] BURNAEV, E. (2023): *Practical AI Cases for Solving ESG Challenges*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/17/12731>

- [3] BARBOSA, A. S. (2023): Integration of Environmental, Social, and Governance (ESG) criteria: their impacts on corporate sustainability performance. In: *Humanities and Social Communications*, vol.10(410). Dostupné na internete: <https://www.nature.com/articles/s41599-023-01919-0>
- [4] ÝBENES, M. O. (2024): Climate change, ESG criteria and recent regulation: challenge and opportunities. In: *Eurasian Economic Article*, Vol.14, pages 87-120, Published: 14 March 2024. Dostupné na internete: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40822-023-00251-x>
- [5] WANG, CH. et al. (2025): The impact of Artificial Intelligence on Enterprise ESG Performance: The Moderating Role of Digital Transformation. Preprint In: *Elsevier*. Dostupné na internete: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=5145104](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5145104)
- [6] CABAN, L. (2023): *Umelá inteligencia – implementácia v ekonómii*. Univerzita Komenského v Bratislave. Diplomová práca
- [7] TURING, A. M. (1950): *Computing Machinery and Intelligence*. Dostupné na internete: <https://courses.cs.umbc.edu/471/papers/turing.pdf>
- [8] LLNL (2025). *The birth of Artificial Intelligence (AI) research*. <https://st.llnl.gov/news/look-back/birth-artificial-intelligence-ai-research>
- [9] WANG, M. (2023): *Environmental, Social, and Corporate Governance: A History of ESG Standardization from 1970s to the Present*. Dostupné na internete: [https://sites.asit.columbia.edu/wp-content/uploads/sites/29/2023/05/Wang-Luna\\_thesis.pdf](https://sites.asit.columbia.edu/wp-content/uploads/sites/29/2023/05/Wang-Luna_thesis.pdf)
- [10] KULKARNI, A. V. (2023): Role of Artificial Intelligence in Sustainability Reporting by Leveraging ESG Theory into Action. In: *International Conference on Advancement in Computation & Computer Technologies (InCACCT)*, Gharuan, India, 2023, pp. 795-800. Dostupné na internete: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10141584> DOI:10.1109/InCACCT57535.2023.10141584
- [11] DOMINGO, R. (2025): The Impact of Artificial Intelligence on ESG: A Conceptual Framework for Practitioners and Policymakers. In: *Journal of Management for Global Sustainability*, Vol.13, Issue 1. Dostupné na internete: <https://archium.ateneo.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1269&context=jmgs>
- [12] FERRARO, G. et al. (2025): The impact of Artificial Intelligence and Sustainability Management on Fostering ESG practices and Competitive Perspectives Among SMEs. In: *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, Vol.32, Issue 5, pp.6641-6657. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.1002/csr.70051>
- [13] CUCARI, N. et al. (2023): *Artificial Intelligence and Environmental Social Governance: An Exploratory Landscape of AI Toolkit*. Dostupné na internete: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4629933](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4629933)
- [14] AREIQAT, A. et al. (2025): *AI and Sustainable Accounting: Balancing Innovation and Responsibility*. AI and Sustainable Accounting: Balancing Innovation and Responsibility. In: *Journal of Management World*, 2025(3), 10-16. Dostupné na internete: <https://doi.org/10.53935/jomw.v2024i4.1034>
- [15] CHEN, S. (2024): The Influence of Artificial Intelligence and Digital Technology on ESG Reporting Quality. In: *International Journal of Global Economics and Management*, Vol.3, Number 1. Dostupné na: <https://wepub.org/index.php/IJGEM/article/view/1732>

- [16] BIÉRE, M. et al. (2022): *Artificial Intelligence for Sustainable Finance: Why it May Help*. Dostupné na internete: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4252329](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4252329)
- [17] ANTONCIC, M. (2020): Uncovering Hidden Signals for Sustainable Investing Using Big Data: Artificial Intelligence, Machine Learning and Natural Language Processing. In: *Journal of Risk Management in Financial Institutions*, vol.13(2), pages 106-113, March. Dostupné na internete: <https://ideas.repec.org/a/aza/rmfi00/y2020v13i2p106-113.html>
- [18] PLONSKA, M. (2023): ESG Risk Management Supported by Artificial Intelligence Systems. In: *Scientific Papers of Silesian University of Technology Organization and Management Series No.172*: Dostupné na internete: <https://managementpapers.polsl.pl/wp-content/uploads/2023/06/172-P%C5%82o%C5%84ska-K%C4%85dzielawski.pdf>
- [19] SULKOWSKI, J. A. (2024): *AI, ESG, and Law: Potential, Limitations, and Strategies Concerning Artificial Intelligence in Sustainability Reporting*. Dostupné na internete: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4972787](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4972787)
- [20] PANKO et al. (2024): Global Trends and Slovak Republic Focus on Environmental, Social and Governance Research. In: *TEM Journal*, Vol.13(4). Dostupné na internete: [https://www.temjournal.com/content/134/TEMJournalNovember2024\\_2863\\_2874.pdf](https://www.temjournal.com/content/134/TEMJournalNovember2024_2863_2874.pdf)
- [21] MERCHÁN, E. et al. (2023): Bayesian optimization of ESG (Environmental Social Governance) financial investments. In: *Environmental Research Communications*, Vol. 5, No. 5, Published: 5 May 2023. [Online] Dostupné na internete: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/acd0f8>

**ZBORNÍK VÝSKUMNÝCH PRÁC**  
**Január 2026**

**Centrum pre rozvoj drevárskeho, nábytkárskeho  
a celulózo-papierenského priemyslu**



**EDITOR**

Marek Blín

**WEBOVÁ STRÁNKA**

Ing. Maroš Kováč

**Odporúčaná citácia:**

**In: Zborník výskumných prác. Január 2026. Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.,  
Bratislava, 100 str. Dostupné online na [www.centrumdp.sk](http://www.centrumdp.sk). ISBN 978-80-69204-02-7**

© Printed by Pulp and Paper Research Institute, Dúbravská cesta 14, 841 04, Bratislava

**ISBN 978-80-69204-02-7**

**EAN 9788069204027**