

K O N F E R E N C I A



zborník odborných prác
z konferencie

Zvolen - 2026



CENTRE
OF EXCELLENCE
OF FOREST-BASED
INDUSTRY





Národné lesnícke centrum - Sekcia pre vedu a výskum

Výskumný ústav papiera a celulózy a.s.

Výskumný inštitút Fraunhofer

a

Odbor lesníctva Slovenskej akadémie pôdohospodárskych vied

LIGNOSILVA 2026



DIGITÁLNE TECHNOLOGIE PRI ZVYŠOVANÍ
PRIDANEJ HODNOTY V SORTIMENTÁCII,
DRUHOVANÍ A SPRACOVANÍ DREVA

DIGIWOOD



AGENTÚRA
NA PODPORU
VÝSKUMU A VÝVOJA

ZBORNÍK ODBORNÝCH PRÁC Z KONFERENCIE – LIGNOSILVA 2026

Názov: LignoSilva 2026

Zostavovatelia:

Ing. Radovan Gracovský, PhD.

Ing. Tomáš Gergeľ, PhD.

Redakčná rada:

Ing. Martin Bartko, PhD.

Ing. Štefan Boháček, PhD.

Vydavateľ: Národné lesnícke centrum - Sekcia pre vedu a výskum

Technická úprava: Ing. Radovan Gracovský, PhD.

Grafická úprava: Ľuboš Frič

Tlač: Národné lesnícke centrum

Náklad: 60 ks

Rozsah: 137 strán

Rok vydania: 2026

Vydanie: Prvé

Rukopis neprešiel jazykovou úpravou.

©Národné lesnícke centrum, Zvolen 2026

ISBN 978-80-8093-398-2

Obsah

INOVATÍVNE ZARIADENIE NA MERANIE VNÚTORNÉHO OBJEMU SUDOV POMOCOU OPTICKÝCH SUDOV.....	7
<i>Diana Zráková, Lukáš Halm, Tomáš Gergel'</i>	
VPLYV METÓDY URČENIA STREDU, FILTRÁCIE BODOVÝCH ÚDAJOV A TYPU PRIEREZU NA PRESNOŠŤ VÝPOČTU OBJEMU KMEŇA PRI LASEROVOM SKENOVANÍ.....	13
<i>Matej Ján Dominka, Patrik Kúdela, Maroš Sedliak</i>	
MODERNÉ METÓDY DETEKcie A KVALITATÍVNEHO HODNOTENIA SUROVÉHO DREVA PRE POTREBY DIGITÁLNE RIADENÉHO LESNÍCKODREVÁRSKEHO REŤAZCA – RÁMCOVÝ PROJEKT.....	19
<i>Emil Ješko</i>	
OD OBRAZU K HUSTOTE – CT SKENOVANIE STARÝCH DUBOVÝCH NOSNÍKOV.....	25
<i>Barbora Herdová, Branislav Priadka, Radovan Gracovský, Rastislav Lagaňa</i>	
IWOOD: BEZPEČNÁ E-AUKČNÁ PLATFORMA S DIGITÁLNYM PROFILOM GUĽATINY PRE TRANSPARENTNÉ OBCHODOVANIE A EFEKTÍVNEJŠIE SPRACOVANIE DREVA.....	32
<i>Peter Balogh, Igor Viszlai</i>	
VÝROBA BAKTERIÁLNEJ NANOCELULÓZY S VYUŽITÍM KOMAGATAEIBACTER XYLINUS DSM 46591 AKO MODELOVÉHO ORGANIZMU.....	37
<i>Eduard Horban, Petra Olejníková, Štefan Boháček, Albert Russ</i>	
BIODEGRADOVATEĽNÉ OBALY PRE POTRAVINÁRSKY PRIEMysel.....	45
<i>Tibor Pásztor, Daniela Majerčáková, Katarína Kalužná</i>	
POROVNANIE OBSAHOV MAKROŽIVÍN A MIKROŽIVÍN V RAŠELINE PO PRIDANÍ DREVNÉHO POPOLA.....	52
<i>Laura Korčoková, Jana Luptáková, Slávka Tóthová, Ivan Horvát, Elena Takáčová, Vladimír Mačejovský, Helena Hybská</i>	
INTELIGENTNÉ RIEŠENIE PRE ONLINE SPRÁVU ÚDAJOV V PAPIERENSKEJ VÝROBE.....	59
<i>Vendelín František Skokan, Patrik Pitka Kester</i>	
VYUŽITIE KUKURIČNEJ VLÁKNINY V PAPIERI AKO OBALOVOM MATERIÁLI SO ZLEPŠENÝMI MECHANICKÝMI VLASTNOSTAMI.....	68
<i>Andrej Pažitný, Marta Páteková, Juraj Krišta, Albert Russ, Vladimír Ihnát</i>	
BEZSPOJIVOVÉ AGLOMEROVANÉ MATERIÁLY Z DREVENÝCH HOBLÍN LISOVANÉ V KYSLOM A ALKALICKOM AEROSÓLE.....	74
<i>Rastislav Čerešňa</i>	
SLEDOVANIE VPLYVU PAPIERENSKÝCH POMOCNÝCH PROSTRIEDKOV NA NÁBOJOVÚ HUSTOTU VLÁKIEN A KOLOIDNÝCH ČASTÍC VO VODÁCH.....	80
<i>Vladimír Kuňa, Jozef Balberčák, Vladimír Ihnát, Štefan Boháček</i>	
VPLYV PRÍDAVKOV VYBRANÝCH ORGANICKÝCH ROZPÚŠŤADIEL NA ÚČINNOSŤ PREDSPRACOVANIA PŠENIČNEJ SLAMY POMOCOU PARNEJ EXPLÓZIE.....	86
<i>Albert Russ, Alena Jandová</i>	
ANALÝZA MOŽNOSTÍ ZVÝŠENIA EFEKTIVITY MERANÍ SKENOVACÍM ELEKTRÓNOMÝM MIKROSKOPOM.....	92
<i>Renáta Somogyiová, Daniela Majerčáková</i>	
TRENDY VO VYUŽITÍ RÔZNYCH DRUHOV SUROVÍN NA ZÍSKANIE NANOFIBRILOVANÝCH A NANOKRYŠTALICKÝCH VLÁKIEN CELULÓZY.....	98
<i>Monika Stankovská, Albert Russ, Marta Páteková</i>	

DIGITÁLNE TECHNOLOGIE PRI ZVYŠOVANÍ PRIDANEJ HODNOTY V SORTIMENTÁCII, DRUHOVANÍ A SPRACOVANÍ DREVA (DIGIWOOD).....	104
<i>Tomáš Gergeľ, Radovan Gracovský, Ondrej Vacek</i>	
MODELY BIOMASY STROMOVÝCH KOMPONENTOV BREZY PREVISNUTEJ PRVEJ VEKOVEJ TRIEDY.....	118
<i>Bohdan Konôpka, Vlastimil Murgaš, Jozef Pajtík, Vladimír Šebeň</i>	
UPLATNENIE UMELEJ INTELIGENCIE PRI DETEKCII CHÝB DREVA Z CT SKENOV (UITECH).....	124
<i>Ondrej Vacek</i>	
AUTOMATIZACE A KOMBINACE NEDESTRUKTIVNÍCH METOD PRO MODERNÍ LESNICKO-DŘEVAŘSKÝ KOMPLEX.....	129
<i>Matěj Šimek, Rostislav Berezjuk, Marek Provazník, Jan Tippner</i>	

ÚVODNÉ SLOVO

Konferencia LignoSilva 2026 nadväzuje na predchádzajúce ročníky ako dôležitá platforma prezentácie výsledkov výskumu, inovácií a odborného dialógu v oblasti lesníctva, drevárstva a spracovania obnoviteľných surovín. Aktuálny ročník má však osobitý charakter – vedome sa zameriava na vedecko-výskumné projekty, ktoré síce často stoja v tieni veľkých systémových iniciatív, no tvoria ich nevyhnutný odborný a obsahový fundament.

Centrum excelentnosti LignoSilva je dnes intenzívne spojené s realizáciou projektov strategického významu, akými sú Teaming LignoSilva a infraštruktúrny projekt LignoSilva. Tieto projekty zásadným spôsobom formujú budúcnosť pracoviska, jeho technické vybavenie, medzinárodnú viditeľnosť a inštitucionálnu stabilitu. Ich úspech by však nebol možný bez kontinuálnej práce na menších, cielene zameraných vedecko-výskumných projektoch, ktoré rozvíjajú konkrétne vedecké témy, metodiky a aplikované riešenia.

Práve na tieto projekty sa konferencia LignoSilva 2026 sústreďuje. Ide najmä o projekty financované grantovou schémou APVV, projekty realizované v rámci Plánu obnovy a odolnosti SR, ako aj o medzinárodné projekty programov LIFE, Interreg a medzinárodnej spolupráce. Tieto iniciatívy predstavujú flexibilnú a tvorivú zložku výskumného ekosystému – umožňujú rýchle reagovanie na nové výzvy, overovanie inovatívnych prístupov a zapájanie mladých výskumníkov do riešenia aktuálnych problémov praxe.

Menšie projekty majú v tomto kontexte nezastupiteľnú úlohu. Prinášajú konkrétne vedecké výstupy, pilotné technológie, nové metodické postupy a overené dáta, ktoré následne nachádzajú uplatnenie v širších systemických rámcoch. Zároveň vytvárajú most medzi základným výskumom, aplikovaným výskumom a praktickými potrebami lesníckeho a drevárskeho sektora.

Konferencia LignoSilva 2026 preto nie je len prehliadkou projektových prezentácií. Je predovšetkým potvrdením významu kontinuálneho vedeckého výskumu ako základného piliera dlhodobej udržateľnosti odboru, budovania expertízy a posilňovania konkurencieschopnosti lesnícko-drevárskeho sektora doma aj v medzinárodnom priestore. Vzájomné prelínanie rôznych projektových schém, tém a výskumných tímov vytvára synergický efekt, bez ktorého by nebolo možné naplňať ambiciózne ciele veľkých strategických iniciatív.

Veríme, že predkladaný zborník prispeje k lepšiemu porozumeniu rozsahu a významu týchto projektov, podporí odbornú diskusiu a zároveň potvrdí, že aj projekty menšieho rozsahu majú v rámci Centra excelentnosti LignoSilva zásadný a dlhodobo nezastupiteľný význam.

Ing. Tomáš Gergel, PhD.

INOVATÍVNE ZARIADENIE NA MERANIE VNÚTORNÉHO OBJEMU SUDOV POMOCO OPTICKÝCH SENZOROV

Zraková Diana, Halm Lukáš, Gergel' Tomáš

1 Úvod

Dubové sudy sú neoddeliteľnou súčasťou výroby vína, koňaku a whisky. Ich geometrické parametre – predovšetkým vnútorný objem – zásadne podmieňujú intenzitu extrakcie trieslovín a proces mikrooxygénácie, a tým aj výslednú kvalitu zrejúceho nápoja (Carpena et al., 2020). Presné stanovenie objemu má pritom nielen technologický, ale aj obchodný a daňový rozmer: už od 18. storočia podliehali sudové zásoby liehovín colnej kontrole, pričom v USA bola za týmto účelom zriadená osobitná funkcia gauger-a – colného úradníka povereného meraním sudov (Sechrist, 2022).

V praxi sa v súčasnosti používajú dve hlavné metódy merania objemu: mokrá metóda a výpočtová metóda. Mokrá metóda (fr. épalement) spočíva v naplnení suda vodou a zistení objemu kvapaliny vážením alebo prietokovým meraním. Pri správnej kalibrácii dosahuje presnosť do 1 litra, čo predstavuje odchýlku 0,29 – 0,44 % v závislosti od veľkosti suda (Chanson, 2023). Jej hlavnou nevýhodou je časová náročnosť: po meraní je nutné sud vysušiť, čo trvá minimálne sedem dní. Navyše môže dochádzať k napučaniu dreva a skresleniu výsledku. Výpočtová metóda využíva geometrické vzorce aplikované na namerané rozmery suda – dĺžku, priemery dna a brušiny. V praxi sa najčastejšie meria tzv. uhlopriečka suda od stredu otvoru po najvzdialenejší bod plášťa a objem sa odhaduje vzorcom $V = 0,625 \times C^3$. Metóda je rýchla, no jej presnosť silne závisí od pravidelnosti tvaru suda a skúsenosti merača.

Moderné technológie bezkontaktného merania – LiDAR, sonar, fotogrametria – zatiaľ nedokázali preniknúť do tohto segmentu výroby, pretože komerčne dostupné zariadenia sú príliš veľké na to, aby sa zmestili dovnútra suda cez otvor v brušine (Genty a Vicard, 2024). Oblasť výroby sudov tak zostáva jednou z mála v drevospracujúcom priemysle, kde princípy Industry 4.0 takmer absentujú. Cieľom tejto práce bolo navrhnúť, zostrojiť a otestovať prototyp zariadenia, ktorý túto medzeru vyplní: umožňuje rýchle, bezkontaktné a opakovateľné digitálne meranie vnútorného objemu sudov bez použitia akejkoľvek kvapaliny.

2 Materiál a metodika

2.1 Konštrukcia prototypu

BarrelScan je prototypové zariadenie, ktoré bolo vyvinuté a skonštruované na digitálne meranie vnútorného objemu sudov bez použitia kvapaliny. Zariadenie je navrhnuté tak, aby bolo mobilné, jednoducho použiteľné a vhodné pre meranie nových aj použitých sudov priamo v prevádzke. BarrelScan využíva systém inteligentných optických senzorov integrovaných do mechanicky riadeného meracieho zariadenia.

Zariadenie pozostáva z nasledujúcich hlavných komponentov:

- pevný rám,
- stabilná základňa s nastaviteľnými fixačnými nohami
- radiaca jednotka,
- výškovo nastaviteľné rameno s meracou sondou,
- snímací modul,
- sústava optických senzorov,
- softvér na spracovanie dát a výpočet objemu.

Celý systém je navrhnutý tak, aby bolo možné zariadenie vložiť cez hrdlo sudu a realizovať meranie v jeho vnútornom priestore. Počas merania sa sud umiestni tak, aby bol otvor zarovnaný s osou sondy. Sonda sa zasunie do vnútra, kde sa otáča okolo svojej pozdĺžnej osi a snímače zaznamenávajú vzdialenosti od osi rotácie k vnútornému povrchu suda v diskretných uhlových polohách. Meranie objemu je založené na digitálnom snímaní vnútorného priestoru suda pomocou optických senzorov. Zaznamenané vzdialenosti tvoria priestorové bodové mračno reprezentujúce vnútornú geometriu suda.

2.2 Princíp merania a spracovanie dát

Proces merania pomocou zariadenia BarrelScan prebieha v niekoľkých krokoch:

Vloženie zariadenia do suda - Zariadenie sa vloží cez hrdlo suda do jeho vnútorného priestoru.

Skenovanie - Sensory zaznamenávajú vzdialenosti a vytvárajú bodové mračno.

Spracovanie dát - Softvér spracuje namerané údaje a vytvorí 3D model suda.

Výsledok - Systém vypočíta a zobrazí výsledný objem suda.

Celý proces trvá približne 3 minúty, čo bolo aj požiadavkou z praxe, ktorá bola pri vývoji zariadenia na meranie vnútorného objemu suda zohľadnená.

Kalibrácia zariadenia bola vykonaná na certifikovanom nerezovom sude (INOX) so známym objemom 341,5 l. Kalibračný offset – korekčný faktor kompenzujúci systematické geometrické odchýlky súvisiace s umiestnením snímačov – je nastavovaný výhradne softvérovou pre každú veľkostnú kategóriu sudov osobitne, čím sa eliminuje variabilita spôsobená obsluhou.

2.3 Testovaný súbor sudov

Testovanie prebehlo v dvoch etapách. V prvej etape boli merania realizované v laboratórnych podmienkach na súbore siedmich dubových sudov rôzneho objemu a stavu: S1 (227,20 l), S2 (227,80 l), S4 (272,07 l), S5 (228,51 l), S6 (415,26 l), S7 (496,96 l) a S8 (400,64 l). Sudy pochádzali priamo z francúzskeho výrobného závodu a boli predtým používané na zrenie koňaku a ďalších liehovín; niektoré vykazovali výrazné usadeniny na stenách. Dva najmenšie sudy boli nové a nepoužívané. Referenčné objemy boli stanovené mokrou metódou.

V druhej etape bol optimalizovaný prototyp s novou generáciou senzorov testovaný priamo vo výrobnom závode vo Francúzsku. Spolu bolo vykonaných viac ako 1 000 meraní vrátane opakovaných meraní toho istého suda aj striedania rôznych sudov.

3 Výsledky

3.1 Merania s prvou generáciou senzorov

Prvá séria meraní odhalila výrazné rozdiely v presnosti v závislosti od uhlového kroku a stavu suda (tab. 1). Najvýraznejšiu odchýlku zaznamenali oba uhlové kroky pri sude S5 (228,51 l), ktorý bol zároveň najviac znečisteným sudom v súbore. Pri uhlovom kroku 3° dosiahla maximálna odchýlka 6,72 l; pri kroku 5° bola 3,89 l. Príčinou bola obmedzená schopnosť senzorov prvej generácie zachytiť vzdialenosti na kontaminovaných povrchoch: niektoré body mračna neboli vôbec zaznamenané, čo viedlo k skresleniu 3D modelu.

Tabuľka 1 Výsledky počiatočných meraní – rozsah nameraných hodnôt pri uhlových krokoch 5° a 3° (l)

Sud	Referenčný objem (l)	5° – min.	5° – max.	3° – min.	3° – max.	Max. odchýlka (l)
S1	227,20	227,19	228,18	228,01	228,46	1,26
S2	227,80	228,30	228,92	228,76	229,56	1,76
S4	272,07	271,60	271,85	272,14	272,77	0,70
S5	228,51	231,41	232,40	231,84	235,23	6,72
S6	415,26	416,20	417,60	416,88	418,78	3,52
S7	496,96	496,47	497,81	497,06	497,86	0,90
S8	400,64	398,95	401,89	398,89	402,28	1,64

Na základe týchto zistení boli senzory prvej generácie nahradené výkonnejšími jednotkami s vyšším pomerom signál/šum a lepšou odozvou na znečistených a nerovných povrchoch. Súčasne bol prepracovaný softvér – upravili sa kalibračné offsety pre jednotlivé veľkostné kategórie a zdokonalil sa algoritmus modelovania tvaru suda. Možnosť manuálneho výberu uhlového kroku bola odstránená a ako štandardná konfigurácia bol zvolený krok 5°, ktorý sa ukázal ako robustnejší naprieč rôznymi stavmi sudov.

3.2 Výsledky po optimalizácii zariadenia

Po hardvérovej a softvérovej optimalizácii bolo zariadenie podrobené rozsiahlejšiemu testovaniu, mimo iné aj na certifikovanom nerezovom sude INOX (341,5 l) počas siedmich meracích dní v septembri 2025 - spolu 33 meraní. Štatistická analýza bola predchádzaná overením predpokladov: Shapiro-Wilkov test nepreukázal odchýlku od normálneho rozdelenia ($W = 0,972$; $p = 0,522$) a Levenov test potvrdil homogenitu rozptylov ($F = 1,115$; $p = 0,376$).

Jednostranová analýza rozptylu (ANOVA) s faktorom dňa merania nepreukázala štatisticky významné rozdiely medzi dňami ($F = 1,855$; $p = 0,136$), čo potvrdzuje stabilitu zariadenia pri dlhodobjšom prevádzkovom nasadení. Súhrn štatistík je uvedený v tabuľke 2.

Tabuľka 2 Štatistiky opakovaných meraní kalibračného suda INOX ($n = 33$)

Parameter	Hodnota
Počet meraní (n)	33
Referenčný objem (l)	341,5
Priemerná odchýlka (l)	-0,004
Smerodajná odchýlka (l)	0,254
Koeficient variácie (%)	0,074
Min. odchýlka (l)	-0,46
Max. odchýlka (l)	+0,62
ANOVA F (p-hodnota)	1,855 ($p = 0,136$)
Shapiro-Wilk W (p)	0,972 ($p = 0,522$)

Priemerná odchýlka od referenčného objemu dosiahla len -0,004 l pri smerodajnej odchýlke 0,254 l, čo zodpovedá koeficientu variácie 0,074 %. Všetky merania zostali v rozmedzí -0,46 l až +0,62 l; jedno meranie (+0,62 l) mierne prekročilo priemyselnú toleranciu $\pm 0,5$ l. Priemyselný partner vyhodnotil dosiahnutú presnosť 0,2 l ako plne vyhovujúcu, keďže prevádzková tolerancia je stanovená na $\pm 0,5$ l. Požiadavka na dokončenie celého merania do 3 minút bola splnená pri každom meraní.

4 Diskusia

Dosiahnuté výsledky preukazujú, že digitálna metóda merania vnútorného objemu sudov pomocou optických senzorov dosahuje presnosť porovnateľnú s mokrou metódou, a to bez jej praktických nevýhod. Kľúčovým faktorom presnosti sa ukázala kvalita senzorov: prvá generácia zlyhávala pri znečistených povrchoch, zatiaľ čo vylepšené jednotky zvládali meranie aj v sťažených podmienkach. Voľba uhlového kroku 5° namiesto 3° sa javila ako vhodnejší kompromis medzi hustotou mračna bodov a robustnosťou voči chýbajúcim meraniam pri kontaminovaných stenách.

Vyvinuté zariadenie výrazne znižuje časové nároky: celý cyklus trvá pod 3 minúty oproti niekoľkým hodinám pri mokrej metóde vrátane sušenia. Eliminuje tiež potrebu manipulácie s vodou alebo liehovinami, čo je výhodou z hľadiska hygieny aj environmentálnej záťaže.

Súčasná obmedzenia prototypu zahŕňajú závislosť od manuálneho spúšťania merania, citlivosť na výrazné znečistenie interiéru suda pri použití menej výkonných senzorov a potrebu konfigurácie kalibračných dát pre rôzne veľkostné kategórie. Platnosť výsledkov je momentálne overená predovšetkým na referenčnom nerezovom sude a tiež na veľkom súbore dubových sudov priamo vo výrobnjej prevádzke vo Francúzsku, kde merania prebiehali intenzívne desiatky dní a výsledky boli porovnávané s meraniami v prevádzke využívanou mokrou metódou.

Z perspektívy priemyslu zariadenie predstavuje priekopnícky krok k digitalizácii v oblasti merania objemu sudov, kde princípy Industry 4.0 doposiaľ chýbali. Existujúce inovatívne riešenia v tomto odvetví sa zameriavajú predovšetkým na monitorovanie vnútorného prostredia sudov (napr. IoT zátky), nie však na meranie objemu. Integrácia optických senzorov s digitálnym spracovaním dát tak otvára nové možnosti pre kontrolu kvality a riadenie výroby v sudárstve.

5 Záver

Bol navrhnutý, zostrojený a otestovaný prototyp zariadenia na digitálne meranie vnútorného objemu dubových sudov. Po hardvérovej a softvérovej optimalizácii zariadenie dosahuje priemernú odchýlku $-0,004$ l pri smerodajnej odchýlke $0,254$ l ($CV = 0,074 \%$). Jednostranová ANOVA nepreukázala štatisticky významné rozdiely medzi meraniami v rôznych dňoch ($F = 1,855$; $p = 0,136$), čo potvrdzuje stabilitu a opakovateľnosť metódy. Meranie je možné dokončiť do 3 minút bez použitia akejkoľvek kvapaliny.

Medzi hlavné obmedzenia súčasného prototypu patrí potreba manuálneho spúšťania merania a citlivosť na výrazné znečistenie interiéru suda. Pre ďalší vývoj sa odporúča ešte séria testov na plastovom kalibrovanom sude pre porovnanie schopnosti merania objemu sudov a nádob aj z iných materiálov, zvýšenie počtu senzorov a rozšírenie uhlového pokrytia, plná automatizácia zasúvania sondy a spúšťania merania z dôvodu možného vplyvu ľudského faktora na výsledok merania, ale tiež rozšírenie validácie na väčší súbor sudov rôznych objemov, drevín a prevádzkových podmienok.

Zariadenie naplňa potenciál premeniť tradičné sudárstvo na odvetvie plne zlučiteľné s princípmi Industry 4.0, pričom prináša benefity pre výrobné podniky aj vedeckú komunitu.

Podakovanie

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

Literatúra

- CARPENA, M., Pereira, A. G., Prieto, M. A., Simal-Gandara, J., 2020: Wine aging technology: Fundamental role of wood barrels. *Foods*, 9(9): 1160.
- CHANSON, E., 2023: Détermination de la capacité totale d'un fût [online]. Dostupné na: <https://evelyne-chanson.fr/> [2025-11-28].
- CONDE-FERNÁNDEZ, A. et al., 2020: Geometrical study of the barrel as an element of the wine-making productive process. In: *Advances in Design Engineering – INGEGRAF 2019*. Springer, s. 115–122.
- GENTY, C., Vicard, J.-C., 2024: How to measure the volume of a wine barrel? From stereometry to the invention of the épaleur. In: *13èmes journées du GDR 3544 Sciences du bois*, Nantes. HAL Open Archive. Dostupné na: <https://hal.science/hal-04799494/> [2025-12-01].
- HAM, F. J., 1996: Measurement of Barrels and Estimation of Capacity. *The Technical Committee Journal*, 40 (May 1996), s. 1–18.
- KEPLER, J., 1615: *Nova stereometria doliorum vinariorum*. Linz.
- SECHRIST, T., 2022: Gauging a State. Diplomová práca. Columbia University, New York, 131 s.
- ZHANG, D., Jackson, W., Dobie, G., Macleod, Ch., Gachagan, A., 2024: Innovative non-invasive ultrasound method for whisky cask liquid level measurement. *Measurement*, 228: 114345.

Summary

Innovative Device for Measuring the Internal Volume of Barrels Using Optical Sensors.

Accurate determination of the internal volume of oak barrels is essential in the production of wine, cognac, whisky and other spirits, as it directly affects beverage-wood interaction, quality control, and inventory management. Traditional methods – the wet method (épalement) and the calculated method based on geometric formulas – suffer from significant time losses, risk of wood swelling, and measurement inaccuracies on irregular handcrafted surfaces. This paper presents an original prototype device that measures barrel internal volume using a dry digital method, thereby eliminating the shortcomings of conventional approaches.

The device employs an array of optical distance sensors mounted on a rotating probe inserted through the barrel bung hole. Sensors record distances from the rotation axis to the internal barrel surface at discrete angular positions (5° increments). The resulting spatial point cloud is processed by dedicated software to reconstruct a three-dimensional model of the barrel interior, from which the volume is determined by numerical integration. Calibration is performed against a certified stainless steel reference barrel (INOX, 341.5 L) and applied through software-defined offsets for each barrel size category.

The prototype was tested on seven oak barrels of varying volumes (227–497 L) and conditions, including contaminated barrels from active production. After hardware replacement of first-generation sensors and software optimization, statistical analysis of 33 repeated measurements on the INOX barrel yielded a mean deviation of -0.004 L, a standard deviation of 0.254 L, and a coefficient of variation of 0.074%. One-way ANOVA detected no significant day-to-day variability ($F = 1.855$, $p = 0.136$). The complete measurement cycle consistently completed within 3 minutes. The developed device represents a significant step towards Industry 4.0 digitalization of the cooperage sector.

Key words: oak barrels, volume measurement, optical sensors, digital method, Industry 4.0

Kľúčové slová: dubové sudy, meranie objemu, optické snímače, digitálna metóda, Industry 4.0

Kontaktná adresa

Ing. Diana Zraková, PhD.
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Národné lesnícke centrum
Sekcia pre vedu a výskum
T.G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovak Republic
diana.zrakova@nlcsk.org

Ing. Lukáš Halm, MA
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Národné lesnícke centrum
Sekcia pre vedu a výskum
T.G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovak Republic
Lukas.halm@nlcsk.org

Ing. Tomáš Gergel', PhD.
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Národné lesnícke centrum
Sekcia pre vedu a výskum
T.G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovak Republic
tomas.gergel@nlcsk.org

VPLYV METÓDY URČENIA STREDU, FILTRÁCIE BODOVÝCH ÚDAJOV A TYPU PRIEREZU NA PRESNOSŤ VÝPOČTU OBJEMU KMEŇA PRI LASEROVOM SKENOVANÍ

Matej Ján Dominka, Patrik Kúdela, Maroš Sedliak

1 Úvod

Metódy merania štrukturálnych charakteristík lesných porastov prešli v posledných desaťročiach dynamickým vývojom od konvenčných terénnych postupov k moderným technologickým prístupom. Tradičné metódy umožňujú získanie presných a priamych meraní, avšak za cenu vysokej časovej a finančnej náročnosti. Potreba rýchleho získavania údajov pri minimalizácii nákladov sa preto stáva jedným z hlavných impulzov rozvoja moderných metód zberu dát (Apostol et al., 2018).

Súčasná technológia pozemného laserového skenovania (TLS) a počítačovej tomografie (CT), v kombinácii s matematicko-štatistickými dendrometrickými metódami, umožňujú relatívne presnú kvantifikáciu objemu drevnej hmoty (Dassot et al., 2012; Kunz et al., 2017; Chianucci et al., 2020; Gergel' et al., 2022). Jednou z najpresnejších metód zberu priestorových údajov využiteľných v lesníctve je TLS (Wang et al., 2017), ktoré je v súčasnosti považované za jednu z najpokrokovejších metód získavania detailných terénnych údajov v lesných ekosystémoch (Zemánek et al., 2017). Zariadenia TLS sa využívajú predovšetkým v lokálnom meradle, kde umožňujú zachytiť jemné štrukturálne detaily jednotlivých objektov, najmä stromov a lesných porastov, s vysokou priestorovou presnosťou (Wang et al., 2017).

CT predstavuje neinvazívnu a nedeštruktívnu zobrazovaciu technológiu, pôvodne vyvinutú na diagnostické účely v medicíne (Kalender, 2000). Postupne bola implementovaná aj do ďalších vedeckých disciplín, pričom jej využitie v drevárskych vedách bolo po prvýkrát prezentované autorom Onoe et al. (1984).

Cieľom tejto práce bolo porovnať vplyv dvoch metód určenia stredu bodového mračna získaného laserovým skenovaním na výpočet objemu guľatiny. Zároveň bol hodnotený rozdiel medzi dvoma metódami výpočtu objemu – Huberovou metódou a metódou zrezaného kužeľa – z hľadiska ich vzájomnej dôležitosti a presnosti voči referenčnej hodnote objemu získanej pomocou CT skenovania. Doplnkovo bol analyzovaný aj vplyv vyhladzovania bodového mračna pomocou knižnice Open3D v programovacom jazyku Python na výslednú presnosť výpočtu objemu.

2 Metodika

2.1 Materiál

Pre našu analýzu boli vybrané údaje z kmeňov s/bez kôry uložených na sklade. Celkovo bolo vybraných 13 kmeňov o priemernej dĺžke 1 m, v ktorých bolo zastúpených 6 druhov drevín: *Paulownia* (Paulovnia), *Quercus sp. L.* (Dub), *Carpinus betulus L.* (Hrab obyčajný), *Picea abies (L.) H. Karst* (Smrek obyčajný), *Pinus silvestris L.* (Borovica lesná) a *Abies alba L.* (Jedľa biela).

2.2 Skenovanie

Kmene boli skenované pomocou trojrozmerného CT skenera od výrobcu Microtec. Postup je bližšie vysvetlený v práci autorov Gergel' et al. (2022). Objem kmeňa získaný ako výstup CT skeneru bol použitý ako referenčná hodnota, voči ktorej boli porovnávané vybrané metódy výpočtu objemu guľatiny.

V nasledujúcom kroku bol kmeň skenovaný pomocou skenovacieho zariadenia značky Gocator Laser Profiler, model 2670, pozostávajúceho z troch senzorov, ktoré súčasne snímali povrch kmeňa v kruhovom pričnom profile. Výsledkom skenovania boli samostatné mračná bodov generované každým senzorom s priestorovým rozlíšením 67 - 197 μm . Mračná bodov získané z jednotlivých senzorov boli následne zlúčené do jedného jednotného mračna, z ktorého bol vytvorený trojrozmerný model kmeňa. Výpočet objemu 3D modelu kmeňa bol realizovaný v prostredí programovacieho jazyka Python.

2.3 Spracovanie údajov

Stred získaného bodového mračna bol určený dvoma odlišnými prístupmi. Prvým prístupom bolo priame prevzatie stredu definovaného skenovacím zariadením, ktorý je daný priesečníkom smerových lúčov troch laserových senzorov. Druhým prístupom bolo určenie stredu výpočtovou metódou založenou na analýze hlavných komponentov (PCA).

Pre uskutočnenie ďalších výpočtov bolo nevyhnutné určiť obsah jednotlivých priečných rezov kmeňa. Keďže bodové mračno v priečnom reze, ohraničené obalovou krivkou, vytvára geometricky zložitý a nepravidelný tvar, boli zvolené dva zjednodušené prístupy k výpočtu obsahu prierezu.

Prvý prístup vychádza z použitia druhej mocniny aritmetického priemeru polomeru prierezu a je definovaný vzťahom:

$$S = \pi(E[r])^2 \quad (1)$$

Druhý prístup využíva kvadratický priemer polomeru, pričom obsah prierezu je vypočítaný podľa vzťahu:

$$S = \pi \mathbb{E}[r^2] \quad (2)$$

Kde: r predstavuje vzdialenosť jednotlivých bodov bodového mračna od osi kmeňa a $\mathbb{E}[\cdot]$ označuje strednú hodnotu.

Získané údaje boli následne očistené od štatistických vychýlení a šumu v prostredí programovacieho jazyka Python s využitím knižnice Open3D, ktorá je určená na spracovanie a filtráciu bodových mračen.

Na porovnanie presnosti výpočtu objemu kmeňa boli použité ďalšie štyri metódy, konkrétne Huberova metóda v dvoch variantoch a metóda zrezaného kužela v dvoch variantoch. Bodové mračno kmeňa bolo rozdelené na priečne rezy s hrúbkou 2 cm. Tieto rezy slúžili ako základná jednotka pre výpočet objemu jednotlivými metódami. Celkový objem kmeňa bol následne určený ako suma objemov všetkých rezov.

Pri huberovej metóde bol každý priečný rez reprezentovaný vlastným bodovým mračnom s vopred určeným stredom. Od stredu prierezu sa v dvojrozmernom priestore vypočítala vzdialenosť ku každému bodu bodového mračna a z týchto vzdialeností sa určila priemerná hodnota polomeru $\bar{r}$. Obsah kruhového prierezu bol vypočítaný dvoma spôsobmi:

$$A_1 = \pi(\bar{r})^2 \quad (3)$$

$$A_2 = \pi \bar{r}^2 \quad (4)$$

Kde: $\pi = 3,14$ a $\bar{r}$ predstavuje aritmetický priemer vzdialeností bodov od stredu prierezu. Objem jednotlivého prierezu bol následne vypočítaný vzťahom:

$$V_i = A_i \cdot L \quad (5)$$

Kde: A_i je obsah prierezu vypočítaný jedným z uvedených spôsobov a L je dĺžka prierezu v centimetroch.

Celkový objem kmeňa bol určený ako suma objemov všetkých priereзов:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (6)$$

Kde: V_i predstavuje objem i-teho prierezu.

Pri metóde zrezaného kužeľa bol každý priečný rez reprezentovaný bodovým mračnom s určeným stredom. Obdobne, ako pri Huberovej metóde, sa na začiatku aj na konci každého prierezu v dvojrozmernom priestore vypočítali vzdialenosti bodov od stredu a z nich priemerné polomery.

Objem jednotlivého rezu bol vypočítaný podľa vzorca pre objem zrezaného kužeľa:

$$V_i = \frac{L}{3} (A_{i1} + A_{i2} + \sqrt{A_{i1} \cdot A_{i2}}) \quad (7)$$

Kde: A_{i1} a A_{i2} sú obsahy priereзов na začiatku a na konci rezu vypočítané rovnakým spôsobom a L je dĺžka rezu v centimetroch.

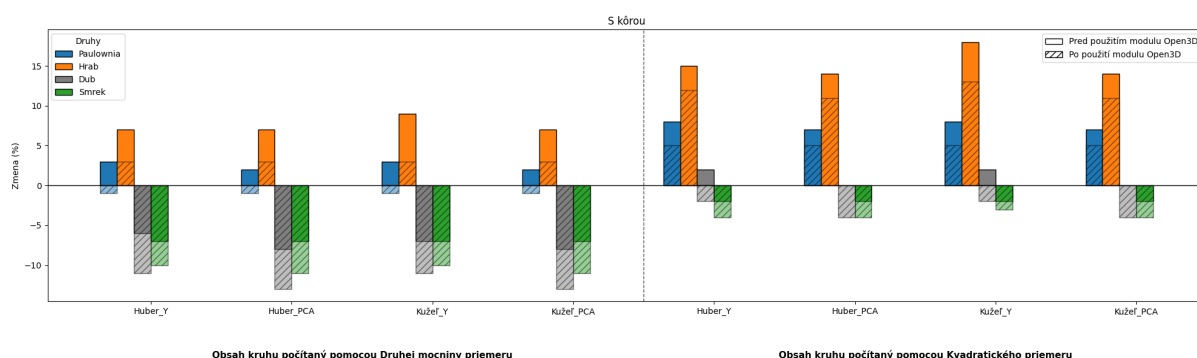
Celkový objem kmeňa bol určený ako suma objemov jednotlivých rezov:

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (8)$$

Kde: V_i predstavuje objem jednotlivých sekcií.

3 Výsledky

Obrázok 1. zobrazuje porovnanie objemu získaného huberovou metódou a metódou zrezaných kužeľov voči referenčnej hodnote získanej z CT - sken drevín s kôrou. V prvej polovici obrázku sú údaje počítané z obsahu prierezu získaného cez výpočet pomocou Druhej mocniny priemeru, v druhej polovici sú údaje počítané z obsahu prierezu získaného cez výpočet pomocou Kvadratického priemeru. Plný stĺpec predstavuje pôvodné údaje získané zo skeneru, čiarkovaný stĺpec predstavuje údaje po očistení od štatistických výchyliet pomocou knižnice Open3D v jazyku Python.



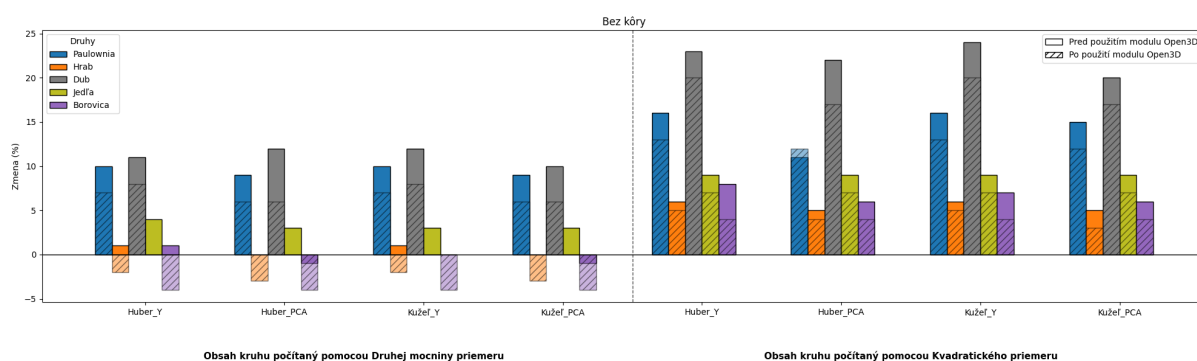
Obrázok 1. Porovnanie výsledkov skenovania s referenčnou CT hodnotou pre kmene s kôrou

Open3D systematicky prehlbuje podhodnotenie objemu pri výpočte obsahu prierezu metódou Druhej mocniny priemeru, a to priemerne až o 1 % pri všetkých analyzovaných drevinách aj pri oboch metódach výpočtu objemu. Naopak, pri použití Kvadratického priemeru dochádza po aplikácii Open3D k výraznej redukcii nadhodnotenia objemu (na úroveň do približne 2 %), čím sa výsledky približujú k referenčnej CT hodnote. Napriek rozdielnej absolútnej veľkosti odchýlok medzi jednotlivými drevinami zostáva znamienko systematickej chyby stabilné.

Pri použití Druhej mocniny priemeru dochádza vždy k podhodnoteniu objemu, zatiaľ čo pri Kvadratickom priemere k jeho nadhodnoteniu.

Porovnanie huberovej metódy a metódy zrezaných kužeľov ukazuje len malé rozdiely vo výsledných objemoch, spravidla v rozsahu do 1 %. Naopak, voľba spôsobu výpočtu obsahu prierezu predstavuje dominantný faktor ovplyvňujúci presnosť výpočtu objemu, pričom rozdiely medzi použitými prístupmi dosahujú 3 až 5 %. Určenie stredu kmeňa pomocou PCA vedie ku konzistentnému zníženiu vypočítaného objemu približne o 0,4 %. Tento efekt je stabilný naprieč všetkými drevinami a nezávislý od aplikácie Open3D.

Obrázok 2. zobrazuje porovnanie objemov vypočítaných Huberovou metódou a metódou zrezaných kužeľov voči referenčnej hodnote získanej z CT - sken pre kmene bez kôry. V prvej polovici obrázku sú zobrazené výsledky výpočtu obsahu prierezu pomocou Druhej mocniny priemeru, v druhej polovici pomocou Kvadratického priemeru.



Obrázok 2. Porovnanie výsledkov skenovania s referenčnou CT hodnotou pre kmene s kôrou

Pred aplikáciou modulu Open3D vykazovali výsledky vypočítané pomocou Druhej mocniny priemeru jednoznačné nadhodnotenie objemu voči referenčnej CT hodnote, s priemernou odchýlkou v rozmedzí 4,05 až 4,72 %. Po očistení bodových dát pomocou Open3D došlo k výraznej redukcii nadhodnotenia na hodnoty približne od 1,57 do 1,80 %, a to konzistentne naprieč všetkými analyzovanými drevinami. Použitie Kvadratického priemeru viedlo k výraznému zhoršeniu nadhodnotenia objemu, ktoré pred aplikáciou Open3D dosahovalo hodnoty od 6,64 do 7,31 %. Aplikácia Open3D mala v tomto prípade len obmedzený korekčný účinok, keďže nadhodnotenie sa znížilo len mierne, na úroveň približne 6,55 až 6,92 %.

Porovnanie huberovej metódy a metódy zrezaných kužeľov ukazuje len malé rozdiely vo výsledných objemoch a vo všetkých prípadoch sa ukázal ako druhoradý, pričom rozdiely medzi týmito prístupmi sa spravidla pohybovali do 1 %. Určenie stredu kmeňa pomocou PCA viedlo ku konzistentnému zníženiu vypočítaného objemu približne o 0,3 % v porovnaní so stredom určeným priamo zo skenovacích dát.

4 Záver

Výsledky ukázali, že prítomnosť kôry má zásadný vplyv na správanie systematickej chyby výpočtu objemu. Pri kmeňoch s kôrou spôsoboval výpočet obsahu prierezu pomocou Druhej mocniny priemeru systematické podhodnotenie objemu, ktoré sa po aplikácii filtrácie bodových údajov knižnicou Open3D ešte prehľbovalo. Naopak, pri použití Kvadratického priemeru sa objavovalo systematické nadhodnotenie objemu, ktoré bolo možné aplikáciou Open3D výrazne znížiť a výsledky tak priblížiť k referenčnej hodnote získanej z CT skenera.

Pri kmeňoch bez kôry sa správanie jednotlivých postupov líšilo. Výpočet pomocou Druhej mocniny priemeru viedol k systematickému nadhodnoteniu objemu, ktoré bolo možné efektívne znížiť filtráciou bodových údajov, čím sa dosiahla najnižšia odchýlka zo všetkých analyzovaných kombinácií. Použitie Kvadratického priemeru však v tomto prípade spôsobovalo výrazné a pretrvávajúce nadhodnotenie objemu, ktoré ani po filtrácii bodových údajov významne nekleslo, čo poukazuje na dominanciu modelovej chyby nad chybou spôsobenou kvalitou vstupných údajov.

Potvrdila sa vysoká presnosť laserového skenovania pri určovaní objemu dreva. Budúci výskum by mal smerovať k odvodeniu nových objemových rovníc pre vybrané druhy lesných drevín na základe bodového mračna, čo by umožnilo vývoj algoritmov pre rýchly výpočet objemu priamo v porastoch bez nutnosti dodatočného spracovania údajov. Výskum by mal smerovať aj k porovnaniu s metódami digitálnej fotogrametrie a pomocou nich odvodenými digitálnymi modelmi povrchu kmeňa (guľatiny), ktoré sú testované v rámci CT skenovacej linky. Voľba objemovej metódy, konkrétne Huberovej metódy alebo metódy zrezaného kužeľa, mala vo všetkých prípadoch len sekundárny vplyv na presnosť výpočtu objemu. Presnosť výpočtu objemu kmeňa je primárne ovplyvnená spôsobom výpočtu obsahu prierezu a stavom povrchu kmeňa (s kôrou alebo bez kôry), zatiaľ čo voľba objemovej metódy a spôsob určenia stredu majú len doplnkový význam.

Podakovanie

Táto štúdia bola financovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence a EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I01-03-V04-00095.

Literatúra

- Apostol B., Chivulescu S., Ciceu A., Petrila M., Pascu I.-S., Apostol E.N., Leca S., Lorent A., Tanase M., Badea O., 2018. Data collection methods for forest inventory: a comparison between an integrated conventional equipment and terrestrial laser scanning. *Ann. For. Res.* 61(2): 189-202.
- Dassot, M., Colin, A., Santenoise, P., Fournier, M., & Constant, T. (2012). Terrestrial laser scanning for measuring the solid wood volume, including branches, of adult standing trees in the forest environment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 89, 86-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.08.005>.
- Gergel', T., Bucha, T., Gracovský, R., Chamula, M., Gejdoš, M., & Veverka, P. (2022). Computed tomography as a tool for quantification and classification of roundwood—Case study. *Forests*, 13(7), 1042. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13071042>.
- Chianucci, F., Puletti, N., Grotti, M., Ferrara, C., Giorcelli, A., Coaloa, D., & Tattoni, C. (2020). Nondestructive tree stem and crown volume allometry in hybrid poplar plantations derived from terrestrial laser scanning. *Forest Science*, 66(6), 737-746. DOI: <https://doi.org/10.1093/forsci/fxaa021>.
- Kalender, W. A. (2011). *Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications*. John Wiley & Sons. ISBN 978-3-89578-317-3.
- Kunz, M., Hess, C., Raunonen, P., Bienert, A., Hackenberg, J., Maas, H. G., ... & Von Oheimb, G. (2017). Comparison of wood volume estimates of young trees from terrestrial laser scan data. *iForest: Biogeosciences and Forestry*, 10(2), 451-458. DOI: 10.3832/for2151-010.

Onoe, M., Tsao, J. W., Yamada, H., Nakamura, H., Kogure, J., Kawamura, H., & Yoshimatsu, M. (1984). Computed tomography for measuring the annual rings of a live tree. *Nuclear instruments and methods in physics research*, 221(1), 213-220. DOI: 10.1016/0167-5087(84)90202-3.

Wang, P., Bu, G., Li, R., & Zhao, R. (2017). Automated Low-cost Terrestrial Laser Scanner for Measuring Diameters at Breast Height and Heights of Forest Trees. *arXiv preprint arXiv:1702.02235*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.02235>.

Zemánek, T., Cibulka, M., Pelikán, P., & Skoupil, J. (2017). The use of terrestrial laser scanning for determining the driver's field of vision. *Sensors*, 17(9), 2098. DOI: 10.3390/s17092098.

Summary

Laser scanning is an advanced approach to timber volume estimation whose accuracy now matches or exceeds that of traditional forestry methods, enabling practical application in forest management. This study evaluates how stem volume estimation accuracy from point clouds is affected by stem surface condition (with and without bark), cross-sectional area calculation methods, point cloud filtering, and stem center determination. Results show that stem surface condition fundamentally controls the direction and magnitude of systematic errors. For stems with bark, cross-sectional area derived from the squared diameter caused systematic volume underestimation, which increased after filtering, whereas the quadratic mean diameter led to overestimation that was substantially reduced by filtering and approached reference values obtained from computed tomography. For debarked stems, the squared diameter method produced systematic overestimation that was effectively mitigated by filtering, while the quadratic mean diameter resulted in persistent overestimation. The volumetric method itself had only a secondary influence on accuracy. Volume estimation accuracy is primarily governed by cross-sectional area formulation and stem surface condition, with filtering and center determination acting as corrective factors. These findings confirm the high potential of laser scanning and emphasize the need for point-cloud-adapted computational models.

Kľúčové slová

počítačová tomografia, laserové skenovanie, bodové mračno, výpočet objemu

Kontaktná adresa autorov

Národné lesnícke centrum, Sekcia pre vedu a výskum, Odbor lesníckej politiky, manažmentu lesa a poľovníctva

T. G. Masaryka 2175/22

960 01, Zvolen, Slovenská republika

matej.dominka@nlcsk.org, patrik.kudela@nlcsk.org, maros.sedliak@nlcsk.org

MODERNÉ METÓDY DETEKČIE A KVALITATÍVNEHO HODNOTENIA SUROVÉHO DREVA PRE POTREBY DIGITÁLNE RIADENÉHO LESNÍCKO- DREVÁRSKEHO REŤAZCA – RÁMCOVÝ PROJEKT

Emil Ješko

1 Úvod

Lesné hospodárstvo má nepochybne svoje zastúpenie na Slovensku s lesnatosťou krajiny cez 41% celkovej výmery krajiny ako uvádzajú viaceré zdroje (Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, 2022). Výsledkami dlhoročnej lesníckej práce, ktorá pozostáva z výchovnej, pestovateľskej, ale aj ochrannárskej lesníckej činnosti, je produkcia drevnej hmoty. Nadväzujúca ťažbová činnosť s možnou sortimentáciou a následným predajom drevnej hmoty predstavujú kľúčové zdroje príjmov pre podniky a spoločnosti pôsobiace v tomto odvetví (Kovalčík, 2018). Drevo je najvýznamnejším zdrojom príjmov na zabezpečenie starostlivosti o lesy, s cieľom zachovania ich funkcií vrátane dodávok dreva pre drevospracujúci priemysel a udržanie zamestnanosti, tržieb a výnosov v celom lesnícko-drevárskom sektore (Ministerstvo pôdohospodárstva a rozvoja vidieka Slovenskej republiky & Národné lesnícke centrum, 2025). Digitalizácia lesnícko-drevárskeho reťazca a hodnotenia kvalitatívnych znakov surového dreva s minimalizáciou vplyvu ľudského faktora, na zvýšenie objektívneho triedenia guľatiny je nevyhnutná. Predovšetkým pozorovanými posťupne sa zvyšujúcimi nárokmi na výťaž, ktorá má priamy vplyv na finančné, kvantitatívne ale aj ekologické dôvody (Ondrejka et al., 2021) s rastúcim vplyvom princípov bioekonomiky hospodárstva (Slašťanová et al., 2023). Návrh prototypu aplikácie na automatizované hodnotenie kvalitatívnych tried guľatiny bez subjektívneho hodnotenia.

2 Problematika

Subjektívnosť hodnotenia a triedenia guľatiny zapríčinená ľudským faktorom sa spomína vo viacerých prácach. (Taube et al., 2020) v práci s názvom Vplyv stratégie triedenia guľatiny na prognózovanú hodnotu reziva po spracovaní borovicového dreva spomína porovnanie triedenia dreva pomocou troch scenárov kedy boli v prevádzke porovnané triedenie neskúseným pracovníkom, odborným pracovníkom s praxou a automatizovaným optickým skenerom. Na danej vzorke prišli k výsledkom kde neskúsený pracovník meraniami nedosiahol skutočný objem danej vzorky, kedy zanedbal niektoré znaky daných kmeňov v meranej vzorke. Odborný pracovník spolu s automatizovaným optickým skenerom boli schopní meraniami sa priblížiť skutočnému objemu danej vzorky. Rozdiely nastali pri zatriedení do kvalitatívnych tried guľatiny a čase potrebnom na rozhodovací proces zatriedenia guľatiny. Kým automatický optický skener bol štyrikrát rýchlejší ako odborný pracovník, jeho limity sa ukázali na zatriedení guľatiny do kvalitatívnych tried, čo bolo spôsobené výberom technológie a pravidiel hodnotenia kvality guľatiny. V publikácii Pokročilé metódy kvalitatívneho a kvantitatívneho hodnotenia dreva je možné určiť nedeštruktívnym spôsobom určenia viacerých vnútorných znakov dreva pomocou 3D CT tomografie (Gergel et al., 2025), ktorú medzi prvými opisoval talian Giudicendera v 2011. Liu a kolektív v 2024 uviedli vo svojej práci nasledovné, automatizované systémy v drevárskom sektore zlepšujú efektívnosť triedenia dreva, ale aj znižujú pracovné zaťaženie pracovníkov a náklady na triedenie dreva a pomáhajú rozvoju drevárskeho priemyslu. Nejednotnosť klasifikačných systémov sa prejavuje najmä pri obchode s drevom v cezhraničnom obchode alebo obchodovaní s veľkými subjektmi.

Medzi najvýznamnejšie používané alebo v lesnícko-drevárskom sektore nadväzujúce technické podmienky výroby sortimentov piliarskej guľatiny patria Slovenské technické normy – STN (2007), „Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v České republice 2008“, „Rakúske uzavieranie v obchode s drevom“, v Poľsku to sú technické podmienky GM-900-4/2014 a účinné od polroka 2014, pri veľkých subjektoch môžu byť napríklad: „Technické podmienky pre dodávky ihličnatého a listnatého dreva v š.p. Lesy Slovenskej republiky platné od 1.1.2012“, „Technicko - preberacie podmienky“ SLOVWOOD pre MONDI SCP 2025. Poznáme aj združujúce normy pre Európu využívajúce sa v našich podmienkach výnimočne, Európske normy – EN, ktoré doposiaľ nenašli využitie v našich podmienkach a existujú mnohé ďalšie najmä u súkromných subjektov (Gejdoš & Suchomel, 2012), (Petráš et al., 2025). Pre využívanie viacerých noriem/pravidiel v praxi chceme navrhnúť systém, ktorý bude schopný kategorizácie guľatiny na základe definovaných znakov vo viacerých normách/pravidlách súčasne. Strata hodnoty môže nastať v dôsledku nesprávneho triedenia do kvalitatívnych tried na základe kvalitatívnych znakov kde patria bežné vyskytujúce sa znaky (krivosť, zbíhavosť, počet hrč/bm a ďalšie) a menej časté (napríklad hrboľatosť kmeňa), ktoré sa posudzujú vonkajšou prehliadkou alebo meraním a zatriedujú sa na základe používanej metodiky – noriem/pravidiel/usmernení. Ako sme spomínali vyššie môže to byť spôsobené nedostatočnými skúsenosťami pracovníka čo môže viesť k nesprávnemu zatriedeniu alebo systematickou prípadne náhodnou chybou pri meraní pracovníkom. V prevádzkach s náročnými pracovnými podmienkami alebo pri veľkom objeme spracovávaného dreva môže prísť k opotrebeniu meracieho náradia (napr. skladovej priemerky) kedy je potrebné včas vykonať metrológiu prípadne náhradu za certifikované pomôcky bez opotrebenia. Pri osobnom rozhovore s pracovníkmi SGS Slovakia spol. s r. o. na základe viacerých dát potvrdili nesúlad výsledných objemov a kvalitatívnych tried pri konverzii metódy určenia objemu a zatriedenia daného surového dreva medzi rôznymi normami/pravidlami/usmerneniami najmä v cezhraničnom obchode, kedy môže dochádzať k odchýlkam v objeme alebo kvalite (Žák, 2025). Nedostatočná integrácia dát v lesnícko-drevárskom reťazci je značne v našich podmienkach zapríčinená konzervatívnym prístupom daného odvetvia. Aby sa zabezpečila konkurencieschopnosť, inovácie musia prichádzať postupne a byť prezentované cieľovej skupine drevospracovateľov

(Gergel et al., 2019). Technologické limity súčasných systémov a zaobstarávacie náklady na implementáciu pokročilých metód sú jednou z otázok viacerých lesníckych a drevo-spracovateľských subjektov. Nedeštruktívne metódy definoval Pellerin and Ross v 2002 ako: „Veda o identifikácii fyzikálnych a mechanických vlastností kusu materiálu bez zmeny jeho konečných možností použitia a následnom použití týchto informácií na rozhodovanie o vhodných aplikáciách.“ Nedeštruktívne technológie hodnotenia dreva pracujú pomocou metód založených na fyzikálnych princípoch.

V 2019 opisovali výskumníci viaceré technológie, s vhodnosťou použitia v laboratóriu alebo aj v teréne, ktorými sú: akustická, pilodyn, rezistografová, rigidimetrová, SilviScan, infračervená spektroskopia, radiálna vzorková akustika, DiscBot, počítačová tomografia – CT. Medzi významné a rozšírené spadajú práve skenovacie technológie (Schimleck et al., 2019). Tieto technológie (viditeľné svetlo, IR žiarenie, laser, akustické, röntgenové, mikro-vlnné, GPR) vzájomne porovnal v 2009 Osterberg a definoval vhodnosť na základe vybraných parametrov ako napr. náklady, bezpečnosť, uplatniteľnosť, cudzie predmety, praskliny a mnohé ďalšie. Práve veľmi vhodnou technológiou na detegovanie rôznych znakov dreva bol röntgenový CT skener, ktorý využijeme v práci ako jeden zo vstupov informácií. Potreba real-time spracovania dát pre efektívnosť lesnícko-drevárskeho reťazca a sledovateľnosť dreva je s aplikáciou EUDR viac než potrebná. Corrado Costa v 2015 v Helsinkách predstavil implementáciu RFID a QR do logistiky drevárskeho reťazca v Kalábrii.

Chceme nadviazať na túto metódu, ktorú skúmali aj naši výskumníci na Slovensku v projekte Digiwood a implementovali viaceré typy sledovacích zariadení (Sedliak et al., 2024) a implementovať do našej problematiky sledovania tokov v lesnícko-drevárskom reťazci.

3 Predpokladané ciele práce

Hlavným cieľom dopadu práce je podporenie automatizácie procesov v digitálne riadenom lesnícko-drevárskom reťazci surového dreva.

Čiastkové ciele práce

- 1) Návrh jednotného systému na detekciu vonkajších aj vnútorných znakov kvality a automatizovanú klasifikáciu, s integrovaným senzorických a výpočtových technológií – počítačové videnie, 3D modelovanie, CT skenovanie, inteligentné klasifikačné algoritmy.
- 2) Overenie opakovateľnosti detekcie znakov a klasifikácie tried guľatiny na zvýšenie objektivity a konzistentnosti triedenia guľatiny
- 3) Implementácia identifikácie jednotlivých kusov sortimentov technológiami RFID, QR
- 4) Návrh digitálneho modelu toku dreva pre optimalizáciu triedenia dreva - guľatiny pre potreby spracovania v lesnícko-drevárskom reťazci
- 5) Vytvorenie funkčného prototypu aplikácie na automatické hodnotenie kvalitatívnych tried guľatiny, ktorý dokáže eliminovať alebo výrazne obmedziť subjektívne faktory pri hodnotení, zvýši spoľahlivosť triedenia a podporí presné plánovanie výroby a logistiky v rámci celého lesnícko-drevárskeho reťazca

Kroky pre dosiahnutie cieľov

- Spracovať prehľad problematiky s využitím spektra domácich a zahraničných zdrojov.
- Analyzovať automatizované spôsoby kvalitatívneho hodnotenia dreva v prevádzkových podmienkach na Slovensku a v Zahraničí.
- Analyzovať technické a ekonomické podmienky nasadenia automatizovaných spôsobov a technológií kvalitatívneho hodnotenia dreva.
- Analyzovať skúmanú metódu kvalitatívneho hodnotenia surového dreva, v porovnaní s bežnými prevádzkovými metódami kvalitatívneho hodnotenia dreva.
- Vykonať paralelnú kvalitatívnu analýzu sortimentov surového dreva v zmysle platnej legislatívy.
- Vykonať návrh používateľského rozhrania prívetivého k operátorovi, identifikácia slabých miest a následné zapracovanie podnetov operátora
- Stanoviť odporúčania pre prevádzkovú prax pre optimalizáciu kvalitatívneho hodnotenia sortimentov surového dreva

4 Predpokladaná metodika práce

Pre výskum bude využité pracovisko NLC v lokalite Zvolen-Stráže, ktoré by malo obsahovať halu a linku optických a skenovacích zariadení pre kvalitatívne hodnotenie sortimentov surového dreva. V prvej fáze bude navrhnutie štruktúry jednotného databázového systému a využitie vyvíjaných aplikácií na detekciu znakov s implementáciou na prepojenie identifikačných technológií RFID, QR. Samotné vytvorenie aplikácie na základe vopred definovaných pravidiel hodnotenia kvality surového dreva ako sú najbežnejšie používané pravidlá na triedenie surového dreva u nás (STN - 2007; Technické podmienky Lesy SR - 2012).

V ďalšej fáze bude tréovanie a validácia modelov hodnotenia kvalitatívnych tried surového dreva na vytvorenej databáze a jej paralelné triedenie pomocou bežných prevádzkových metód na Slovensku. Simulácia lesnícko-drevárskeho reťazca a jej kvantifikácia ekonomických ukazovateľov. Metodika práce bude vychádzať priamo z implementácie uvedených projektov. Pre výskum bude využité pracovisko NLC v lokalite Zvolen-Stráže, ktoré by malo obsahovať halu a linku optických a skenovacích zariadení pre kvalitatívne hodnotenie sortimentov surového dreva. V prvej fáze navrhnutie štruktúry jednotného databázového systému a využitie vyvíjaných aplikácií na detekciu znakov s implementáciou na prepojenie identifikačných technológií RFID, QR. Samotné vytvorenie aplikácie na základe vopred definovaných pravidiel hodnotenia kvality surového dreva ako sú najbežnejšie používané pravidlá na triedenie surového dreva u nás (STN; EN).

Analýza bude zahŕňať tieto aspekty

- Hodnotenie výskytu a merania rozmerov jednotlivých kvalitatívnych znakov sortimentov surového dreva (v zmysle normy STN EN 1309-3)
- Hodnotenie vplyvu kvalitatívnych znakov na podiel sortimentov v jednotlivých akostných triedach (sortimentovú štruktúru)
- Hodnotenie a porovnanie zatriedenia sortimentov surového dreva našou aplikáciou a bežne používanými metódami podľa zvolených noriem (STN 48 0055; STN 48 0056; Technické podmienky pre dodávky ihličnatého a listnatého dreva v š.p. Lesy Slovenskej republiky platné od 1.1.2012)
- Ekonomické zhodnotenie sortimentov surového dreva zatriedených novou metódou v porovnaní s klasickým spôsobom kvalitatívneho hodnotenia sortimentov surového dreva. To bude spojené s kvantifikáciou jednotlivých akostných tried v syntéze s podielom a výskytom kvalitatívnych tried bežne používanými metódami na Slovensku.
- Štatistické vyhodnotenie moderných metód detekcie znakov a kvalitatívneho hodnotenia surového dreva pomocou softwarového riešenia – aplikáciou, oproti bežne používaným metódam

5 Predpokladané výsledky

- Definovanie podmienok pre zavádzanie optimalizačných technológií na detekciu a klasifikáciu triedenia kvalitatívnych tried surového dreva do prevádzkovej praxe.
- Zhodnotenie a porovnanie zvýšenia objektivity a spoľahlivosti triedenia sortimentov surového dreva do kvalitatívnych tried automatického triedenia v porovnaní s metódami v prevádzke
- Vplyv pre podporu presného plánovania výroby a logistiky v rámci lesnícko-drevárskeho reťazca
- Formulácia výstupov využiteľných pre lesnícko-drevársky komplex pri nasadzovaní progresívnych automatických metód kvalitatívneho hodnotenia sortimentov surového dreva.

PodĎakovanie

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

Literatúra

- COSTA, C., MENESATTI, P., SCRINZI, G., COLLE, G., BEZZI, M., PALLOTTINO, F., FIGORILLO, S., ANTONUCCI, F., & SCARASIA, G., 2015. *Agricultural engineering research unit (CREA-ING) Research unit for monitoring and forest planning (CREA-MPF) From digital to print: RFID and QR-code integration in Calabria (southern Italy) wood chain logistics*, Università TUSCIA.
- GEJDOŠ, M., & SUCHOMEL, J., 2012. Technické podmienky výroby sortimentov piliarskej guľatiny v SR a vybraných krajinách strednej Európy. *Trieskové a Beztrieskové Obrábanie Dreva 2012*, 8(1), s. 107–115.
- GERGEĽ, T., BUCHA, T., GEJDOŠ, M., & VYHNÁLIKOVÁ, Z., 2019. Computed tomography log scanning – high technology for forestry and forest based industry. *Central European Forestry Journal*, 65(1), s. 51–59. <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0003>
- GERGEĽ, T., SEDLIAK, M., GRÁCOVSKÝ, R., VACEK, O., GEJDOŠ, M., SAČKOV, I., VISZLAI, I., CZANNER, G., & ONDREJKA, V., 2025. Pokročilé metódy kvalitatívneho a kvantitatívneho hodnotenia dreva. Národné lesnícke centrum.
- GUIDICEANDREA, F., URSELLA, E., & VICARIO, E., 2011. *A high speed CT scanner for the sawmill industry*, s. 8, University of West Hungary.
- KOVALČÍK, M., 2018. Efficiency of the Slovak forestry in comparison to other European countries: An application of Data Envelopment Analysis. *Central European Forestry Journal*, 64(1), 46–54. <https://doi.org/10.1515/forj-2017-0026>
- LESY SR š.p., 2009. *Technické podmienky pre dodávky ihličnatého a listnatého dreva v š.p.*
- LIU, J., KONG, L., ZHENG, J., DING, Z., FENG, L., & Yanlu Lv., 2024. Automatic sorting system for wood diameter grades. *IEEE Access*, 12(1), 1–1. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3351482>
- MINISTERSTVO PÔDOHOSPODÁRSTVA A ROZVOJA VIDIEKA SLOVENSKEJ REPUBLIKY, & NÁRODNÉ LESNÍCKE CENTRUM., 2025. *Správa o lesnom hospodárstve v slovenskej republike za rok 2024*
- MINISTERSTVO ŽIVOTNÉHO PROSTREDIA SLOVENSKEJ REPUBLIKY, 2022. Stávajú sa sektory hospodárstva Slovenskej republiky zelenšími?, <https://www.enviroportal.sk/sprava/11701>, 23.11.2025
- ONDREJKA, V., GERGEĽ, T., BUCHA, T., & PÁSTOR, M., 2021. Innovative methods of non-destructive evaluation of log quality. *Central European Forestry Journal*, 67(1), s. 3–13. <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0021>
- P. ÖSTERBERG. (2009). Wood Quality and Geometry Measurements Based on Cross Section Images. In *Tampere University Research Portal*. Tampere University of Technology.
- PELLERIN, R. F., & ROSS, R. J., 2002. Nondestructive Evaluation of Wood. *Nondestructive Evaluation of Wood, Forest Products Society: Madison*.
- PETRÁŠ, R., MECKO, J., & PLACHETKA, S., 2025. *Uplatňovanie technických podmienok pre dodávky dreva* (LESmedium, Ed.). LesMedium 2025/09.
- SCHIMLECK, L., DAHLEN, J., APIOLAZA, L. A., DOWNES, G., EMMS, G., EVANS, R., MOORE, J., PQUES, L., VAN DEN BULCKE, J., & WANG, X., 2019. Non-Destructive Evaluation Techniques and What They Tell Us about Wood Property Variation. *Forests*, 10(9), 728. <https://doi.org/10.3390/f10090728>

SEDLIAK, M., DOMINKA, M. J., MURGAŠ, V., & GERGEL, T., 2024. Sledovanie tokov dreva v BP Stráž. In *Zborník odborných príspevkov z konferencie* (Vol. 4, Issue 1). Národné lesnícke centrum; Zvolen 2024.

SLAŠŤANOVÁ, K., PAROBK, J., & PALUŠ, H., 2023. Strategické zmeny vo financovaní lesov., s. 110-116, https://klep.tuzvo.sk/sites/default/files/02_zbornik_pvp_2023_0.pdf

SLOVWOOD.SK., 2022. *Zmluvné podmienky*. Slovwood. <https://www.slovwood.sk/obchodne-a-technicko-preberacie-podmienky.xhtml>, 22.11.2025

STN 48 0055 Kvalitatívne triedenie ihličnatej guľatiny.

STN 48 0056 Kvalitatívne triedenie listnatej guľatiny.

TAUBE, P., ORŁOWSKI, K., CHUCHAŁA, D., & SANDAK, J., 2020. The effect of log sorting strategy on the forecasted lumber value after sawing pine wood. *Acta facultatis xylologiae zvolen*, 62(1), s. 89–102. <https://doi.org/10.17423/afx.2020.62.1.08>

ŽÁK, M. (2025). *Pohyb dreva v lesnícko-drevárskom reťazci* [Silva-pro, s.r.o.; SGS Slovakia, s.r.o.].

Zhrnutie

Modern Methods for Detection and Qualitative Assessment of Raw Timber in a Digitally Managed Forestry–Wood Processing Chain

This dissertation proposal focuses on the development of modern methods for automated detection and qualitative assessment of raw timber within a digitally managed forestry–wood processing chain. The research addresses the limitations of traditional manual timber grading, particularly subjectivity, inconsistency, and inefficiency caused by human factors. The proposed framework integrates advanced technologies such as computer vision, 3D modelling, CT scanning, RFID and QR identification, and intelligent classification algorithms to improve the objectivity and reliability of timber evaluation. The project also aims to support real-time data processing, traceability, and optimization of logistics and production planning in the forestry sector. A functional prototype application for automated timber quality classification will be designed, validated, and compared with conventional grading methods under operational conditions in Slovakia.

Kľúčové slová

kvalitatívne hodnotenie surového dreva, digitálny lesnícko-drevársky reťazec, automatizované triedenie guľatiny

Kontaktná adresa

Emil Ješko

Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu LignoSilva

Sekcia pre vedu a výskum

Národné lesnícke centrum

T.G. Masaryka 2175/22

960 01 Zvolen, Slovak Republic

emil.jesko@nlcsk.org

OD OBRAZU K HUSTOTE – CT SKENOVANIE STARÝCH DUBOVÝCH NOSNÍKOV

Barbora Herdová, Branislav Priadka, Radovan Gracovský, Rastislav Lagaňa

1 Abstrakt

Príspevok sa zaoberá možnosťou využitia počítačovej tomografie pri neinvazívnom hodnotení hustoty starých dubových nosníkov určených na potenciálne opätovné použitie. Materiál pozostával z 50 kusov starého dubového reziva demontovaného z existujúcich konštrukcií v regióne stredného Slovenska. CT skenovanie bolo realizované pomocou skenera CT Log a získané snímky boli následne spracované v softvéri 3D Slicer. Hustota odvodená z CT obrazu bola stanovená na základe lineárnej závislosti medzi hodnotami DN a hustotou dreva, a následne porovnaná s hustotou určenou gravimetrickou metódou. Priemerné hodnoty hustoty stanovené gravimetrickou metódou ($\rho_G = 784,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a pomocou CT skenovania ($\rho_{CT} = 783,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) boli veľmi podobné. Párový t-test nepreukázal štatisticky významný rozdiel medzi spôsobmi stanovenia hustoty ($p = 0,933$). Výsledky poukazujú na potenciál CT skenovania ako doplnkovej metódy pri stanovení hustoty starého reziva, nakoľko rozdiely medzi priemernými hodnotami získanými obidvoma metódami boli veľmi malé a štatisticky nevýznamné. Táto neinvazívna metóda môže byť prínosná najmä v prípadoch materiálu s vysokou historickou hodnotou, alebo v prípade reziva, kde chceme minimalizovať zásahy a zachovať jeho pôvodný stav.

2 Úvod

Vzhľadom na narastajúce environmentálne výzvy a tlak na efektívne využívanie zdrojov sa opätovné využitie dreva stáva čoraz aktuálnejšou témou. Staršie drevo, ktoré už bolo použité v konštrukciách, môže pri správnom posúdení kvality nájsť svoje miesto v nových stavebných projektoch. Taktiež využitie konštrukčných prvkov v ich pôvodnom či upravenom stave znižuje spotrebu energie na výrobu nového materiálu (Llana et al. 2022). Avšak, jedným z problémov používania takéhoto materiálu je absencia špecializovaných firiem zameraných na triedenie a prípravu drevného „odpadu“ na ďalšie použitie alebo recykláciu (Asa et al. 2024).

Pre ďalšie využitie starého dreva v konštrukciách je potrebné najskôr spoľahlivo posúdiť jeho vybrané fyzikálne, mechanické a kvalitatívne vlastnosti. Takéto hodnotenie umožňuje lepšie odhadnúť stav materiálu, jeho vnútornú štruktúru a prípadné lokálne zmeny, ktoré môžu ovplyvniť jeho ďalšie použitie. V rámci tejto štúdie bola pozornosť zameraná na hustotu, ako jednu zo základných fyzikálnych vlastností dreva, pričom dôraz bol kladený najmä na možnosti jej neinvazívneho hodnotenia pomocou CT skenovania. CT (Computed tomography – počítačová tomografia) technológia sníma útlm röntgenového žiarenia pri jeho prechode materiálom z rôznych uhlov, pričom na základe týchto údajov rekonštruje priestorové rozloženie lineárneho koeficientu útlmu (Davis, Wells 1992). Drevo patrí medzi vysoko heterogénne materiály, čo sa prejavuje striedaním jarného a letného dreva, prítomnosťou hrčíc, reakčného dreva alebo lokálnej degradácie, ktorou je napríklad hniloba. Tieto faktory spôsobujú lokálne zmeny hustoty, ktoré sa v CT obraze prejavujú ako rozdiely v intenzite sivej. Tieto rozdiely tvoria základ pre identifikáciu vnútorných kvalitatívnych znakov dreva. CT technológia ďalej umožňuje lokalizovať tieto znaky v priestore s presnosťou preyšujúce klasické nedeštruktívne metódy (Gergel' et al. 2022). Inovácia piliarskej výroby o CT technológiu predstavuje nielen technický posun ale aj významný ekonomický nástroj, ktorý môže prispieť k zvýšeniu konkurencieschopnosti drevárskych podnikov (Rais et al. 2017).

Cieľom nášho výskumu bolo posúdiť využiteľnosť počítačovej tomografie pri neinvazívnom vyhodnotení hustoty starých drevených nosníkov. Pozornosť bola zameraná najmä na stanovenie hustoty skúmaných prvkov a na posúdenie rozdielov medzi gravimetrickou metódou a CT metódou s cieľom overiť mieru zhody medzi oboma prístupmi a zhodnotiť potenciál CT skenovania ako doplnkovej metódy pri hodnotení.

3 Materiál a metodika

Materiál pozostával z 50 kusov starého dubového reziva z regiónu stredného Slovenska, ktoré bolo demontované z existujúcich konštrukcií a analyzované, v rámci vhodnosti pre opätovné použitie v nosných konštrukciách. Rozmery testovaných nosníkov sa líši v závislosti od typu konštrukčného prvku (stojky, krokvy, hambálky, klieštiny a i., Obrázok 1).

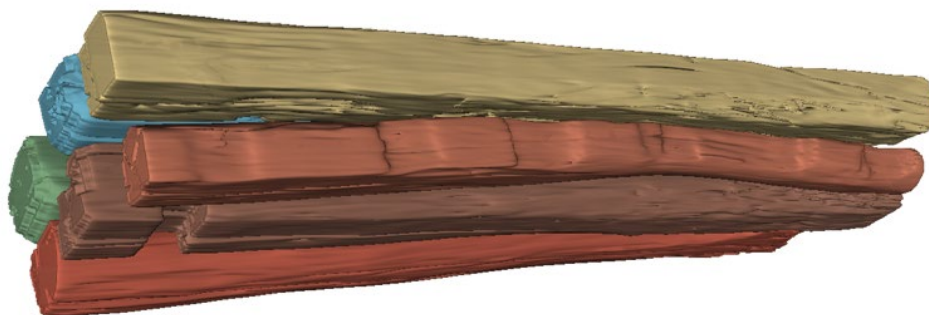


Obrázok 1. Dubové nosníky (archív autora)

CT skenovanie bolo realizované pomocou skenera CT Log (MiCROTEC, Bressanone, Taliansko), ktorý je súčasťou vybavenia Biotechnologického parku Stráže Národného lesníckeho centra vo Zvolene (Obrázok 2). Metodický postup skenovania nadväzuje na výskum Gejdoš et al. (2023 a 2025). Počas skenovania boli vzorky fixované pomocou sťahovacích popruhov, aby sa zabezpečila ich stabilná poloha na dopravníku a zabránilo sa ich posunu počas merania. Z každej skupiny vzoriek boli získané CT snímky, ktoré boli následne spracované a vyhodnotené v open-source softvéri 3D Slicer (Fedorov et al. 2012). V prvom kroku boli pre jednotlivé nosníky vytvorené samostatné segmenty (Obrázok 3). Následne boli pomocou funkcie Segment Statistics stanovené vybrané charakteristiky jednotlivých segmentov, konkrétne objem, povrch a priemerná hodnota DN intenzity. V ďalšom kroku bola využitá lineárna závislosť medzi intenzitou CT obrazu vyjadrenou v hodnotách DN (digital number) podľa autorov Freyburger et al. (2009) a Wang et al. (2019) a hustotou vzoriek stanovenou gravimetrickou metódou. Hodnoty DN predstavujú intenzitu CT obrazu v jednotlivých voxeloch CT rezov, a môžu byť použité ako podklad na odvodenie hustoty skúmaného materiálu.



Obrázok 2. Areál Biotechnologického parku Stráže NLC vo Zvolene so zariadením CT Log (archív autora)



Obrázok 3. Segmentovaný objem CT skenovaných nosníkov (archív autora)

Na výpočet hustoty zisťovanej pomocou CT skenovania sme použili lineárnu závislosť zistenú autormi Priadka et al. (2026).

$$y = 8,5716x - 587,57 \quad (1)$$

kde: y hustota dreva v $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
x intenzita CT obrazu DN

Následné štatistické spracovanie údajov bolo realizované v programe STATISTICA 14 (TIBCO Software Inc., Palo Alto, USA). V prvom kroku bola overená normalita rozdelenia sledovaných premenných pomocou Shapiro-Wilkovho testu. Keďže cieľom bolo porovnať hodnoty hustoty získané dvoma spôsobmi merania na rovnakých vzorkách, rozdiely medzi hustotou odvodenou z CT skenovania a hustotou stanovenou gravimetrickou metódou boli hodnotené pomocou párového t-testu. Okrem štatistických testov boli údaje posúdené aj graficky, prostredníctvom krabicových grafov.

4 Výsledky a diskusia

Prvým metodickým krokom bol Shapiro-Wilkov test na overenie, či sledované premenné podliehajú normálnemu rozdeleniu (Tab.). Test bol vykonaný samostatne pre hustotu stanovenú pomocou CT skenovania ρ_{CT} a pre gravimetricky stanovenú hustotu ρ_G .

Tabuľka 1. ShapiroWilkow test normality – porovnanie pre ρ_{CT} a ρ_G

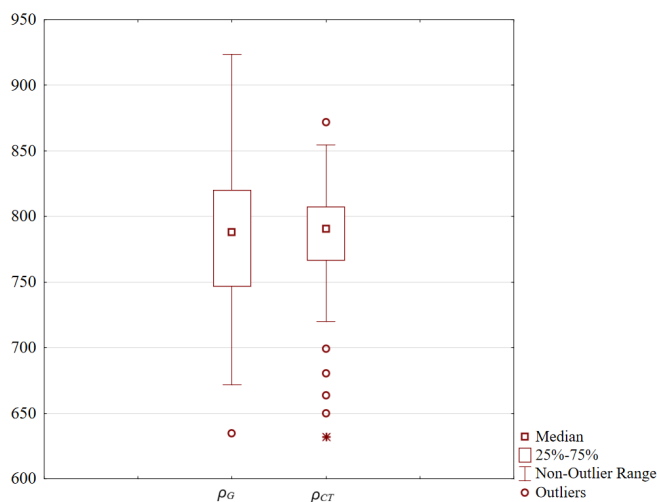
Parameter	n	W	p-hodnota	Výsledok
ρ_{CT} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	50	0,90312	0,00061	Normalita zamietnutá
ρ_G [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	50	0,99168	0,97725	Normalita nezamietnutá

Pri analýze hustoty pomocou deskriptívnej štatistiky boli dosiahnuté výsledky uvedené v Tab. 2. Priemerná hodnota hustoty bola pri oboch spôsoboch sledovania danej premennej približne rovnaká a to $\rho_{CT} = 783,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $\rho_G = 784,0$. Rozdiely sa prejavili najmä v rozptyle hodnôt. Smerodajná odchýlka pri gravimetrickej metóde dosiahla $56,88 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, zatiaľ čo pri hustote stanovenej pomocou CT skenovania iba $50,83 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Minimálna hodnota pri stanovovaní hustoty gravimetricky bola $634,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a pri CT skenovaní $631,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, čo predstavuje iba veľmi malý rozdiel. Väčší rozdiel bol však zistený pri maximálnej hodnote a to $\rho_G = 923,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a $\rho_{CT} = 871,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Dáta boli následne vyhodnotené párovým t-testom. Dosiahnutá hodnota $p = 0,933$ poukazuje na to, že medzi priemernými hodnotami hustoty stanovenými gravimetrickou metódou a skenovaním nebol zistený štatisticky významný rozdiel.

Tabuľka 2. Deskriptívna štatistika porovnanie ρ_{CT} a ρ_G

Premenná	n	min	max	mean	CV	SD
ρ_{CT} [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	50	631,8	871,9	783,5	6,488 %	50,83
ρ_G [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	50	643,3	923,7	784,0	7,255 %	56,88

Na porovnanie rozloženia hodnôt hustoty stanovenej gravimetrickou metódou a pomocou CT skenovania bol použitý krabicový graf (Obr. 4).



Obrázok 4. Krabicový graf porovnania hustoty ρ_G a ρ_{CT}

Z porovnania obidvoch súborov vyplýva, že hodnoty hustoty stanovené gravimetrickou metódou a pomocou CT skenovania sa nachádzali na podobnej úrovni. Rozdiel sa prejavil najmä v rozptyle hodnôt, pričom gravimetricky stanovená hustota vykazovala širší rozsah hodnôt. Hodnoty získané pomocou CT skenovania boli sústredenejšie, čo zodpovedá aj nižšej smerodajnej odchýlke a nižšiemu variačnému koeficientu v porovnaní s gravimetrickou metódou. Na podporu získaných výsledkov možno uviesť aj ďalšie štúdie autorov, ktorí sa zaoberali podobnou témou, teda využitím X-ray CT pri nedeštruktívnom hodnotení hustoty dreva. Aj v týchto prácach bola preukázaná silná lineárna závislosť medzi hodnotami získanými z CT obrazu a hustotou dreva, čo potvrdzuje potenciál tejto metódy pri hodnotení fyzikálnych vlastností dreva.

He a Qi (2013) sa zaoberali využitím X-ray počítačovej tomografie pri nedeštruktívnom stanovení hustoty a vlhkosti dreva. Skúmaným materiálom bolo drevo *Larix gmelinii*, pričom autori samostatne hodnotili jadrové a beľové drevo. Výsledky autorov poukázali na veľmi silné vzťahy medzi predikovanými a meranými hodnotami, pričom koeficient determinácie dosiahol pri hustote $R^2 = 0,94$ pre jadrové drevo a $R^2 = 0,97$ pre beľové drevo, čo potvrdzuje použiteľnosť CT skenovania pri odhade týchto fyzikálnych vlastností.

Wang et al. (2019) sa taktiež ako He a Qi (2013) zaoberali nedeštruktívnym stanovením hustoty a vlhkosti jadrového a beľového dreva pomocou X-ray počítačovej tomografie. Skúmaným materiálom boli dve dreviny, *Populus tomentosa* a *Pinus massoniana*. Pre vzťah medzi Hounsfieldovým číslom (H) a hustotou použili lineárny model, zatiaľ čo pre vzťah s vlhkosťou použili logaritmický model. Validácia modelov ukázala veľmi vysokú presnosť, keďže hodnoty R^2 boli pri predikcii hustoty vyššie ako 0,98 a pri predikcii vlhkosti vyššie ako 0,95.

Na základe uvedených poznatkov možno CT skenovanie vnímať ako perspektívny nástroj pre stanovenie hustoty dreva, pričom jeho význam spočíva najmä v možnosti získať informácie o materiáli neinvazívnym spôsobom a zároveň zachytiť aj jeho vnútornú variabilitu, ktorá pri bežnom stanovení hustoty nemusí byť dostatočne zohľadnená.

Záver

Z porovnania obidvoch súborov vyplýva, že hodnoty hustoty stanovené gravimetrickou metódou a pomocou CT skenovania sa nachádzali na podobnej úrovni. Rozdiel sa prejavil najmä v rozptyle hodnôt, pričom gravimetricky stanovená hustota vykazovala širší rozsah hodnôt. Hodnoty získané pomocou CT skenovania boli sústredenejšie, čo zodpovedá aj nižšej smerodajnej odchýlke a nižšiemu variačnému koeficientu v porovnaní s gravimetrickou metódou. Na podporu získaných výsledkov možno uviesť aj ďalšie štúdie autorov, ktorí sa zaoberali podobnou témou, teda využitím X-ray CT pri nedeštruktívnom hodnotení hustoty dreva. Aj v týchto prácach bola preukázaná silná lineárna závislosť medzi hodnotami získanými z CT obrazu a hustotou dreva, čo potvrdzuje potenciál tejto metódy pri hodnotení fyzikálnych vlastností dreva.

Podakovanie

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

Výstup bol podporený IPA internou projektovou agentúrou Technickej Univerzity vo Zvolene, Projekt č. 5/2026.

Zoznam použitej literatúry

- Asa, P. et al., 2024. Digital Technologies for Reuse and Recycling of Construction Timber: the Re-sawmill. Online. 2026. Dostupné na: https://pure.mpg.de/rest/items/item_3530563/component/file_3530564/content [zobrazené 2026-06-11].
- Davis, J., Wells, P. (1992). Computed tomography measurements on wood. *Industrial Metrology*. 2(3-4), 195-218. [https://doi.org/10.1016/0921-5956\(92\)80004-D](https://doi.org/10.1016/0921-5956(92)80004-D)
- Fedorov, A., et al. (2012). 3D Slicer as an image computing platform for the Quantitative Imaging Network. *Magnetic Resonance Imaging*. 30(9), 1323-1341. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2012.05.001>
- Gejdoš, M., Gergel', T., Lieskovský, M., Gracovský, R. (2025). Qualitative Assessment of Oak Logs: Traditional Method vs. Computer Tomography. *Forests*. 16(6), 918. <https://doi.org/10.3390/f16060918>
- Gejdoš, M., Gergel', T., Michajlová, K., Bucha, T., Gracovský, R. (2023). The Accuracy of CT Scanning in the Assessment of the Internal and External Qualitative Features of Wood Logs. *Sensors*. 23(20), 8505. <https://doi.org/10.3390/s23208505>
- Gergel', T., Buchta, T., Gracovský, R., Chamula, M., Gejdoš, M., Veverka, P. (2022). Computed Tomography as a Tool for Quantification and Classification of Roundwood—Case Study. *Forests*. 13(7). 1042. <https://doi.org/10.3390/f13071042>
- He, X.; Qi, D. (2013). Density and moisture content forecasting based on X-ray computed tomography. *European Journal of Wood and Wood Products*. 71(5), 647–652. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0722-3>
- Llana, D. F.; Íñiguez-González, G.; García Navarro, J.; Arriaga F., 2022. Circular Economy in Timber Construction. In: CIRMAT Symposium: Nuevos Desarrollos para una Economía Circular, proceedings. CIRMAT Symposium.
- Rais, A., Ursella, E., Vicario, E., Giudiceandrea, F. (2017). The use of the first industrial X-ray CT scanner increases the lumber recovery value: case study on visually strength-graded Douglas-fir timber. *Annals of Forest Science*. 74(2). 1-9. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0630-5>
- Wang, Q., Liu, X., Yang, S., Jiang, M., Cao, J. (2019). Non-destructive detection of density and moisture content of heartwood and sapwood based on X-ray computed tomography (X-CT) technology. *European Journal of Wood and Wood Products*. 77(6), 1053-1062. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01459-y>

Zhrnutie

The study deals with the potential use of computed tomography for the non-invasive evaluation of the density of old oak beams intended for potential reuse. The material consisted of 50 pieces of old oak timber dismantled from existing structures in the central Slovakia region. CT scanning was performed using a CT Log scanner, and the acquired images were subsequently processed in the 3D Slicer software.

The density derived from CT images was determined based on a linear relationship between DN values and wood density, and subsequently compared with density determined by the gravimetric method. The average density values determined by the gravimetric method ($\rho_G = 784.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) and by CT scanning ($\rho_{CT} = 783.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) were very similar. The paired t-test did not reveal a statistically significant difference between the two methods of density determination ($p = 0.933$).

The results indicate the potential of CT scanning as a complementary method for determining the density of old timber, as the differences between the mean values obtained by both methods were very small and statistically insignificant. This non-invasive method may be particularly beneficial in cases of materials with high historical value, or in situations where it is desirable to minimize interventions and preserve their original condition.

Kľúčové slová

Kľúčové slová: *Quercus robur* L.; CT skenovanie; hustota; konštrukčné rezivo

Keywords: *Quercus robur* L.; CT scanning; density; construction timber

Kontaktné adresy

Branislav Priadka
Technická Univerzita vo Zvolene
Drevárska fakulta
Katedra náuky o dreve
T. G. Masaryka 24
960 01 Zvolen, Slovensko
xpriadka@tuzvo.sk

Barbora Herdová
Technická Univerzita vo Zvolene
Drevárska fakulta
Katedra náuky o dreve
T. G. Masaryka 24
960 01 Zvolen, Slovensko
herdova@tuzvo.sk

Radovan Gracovský
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Národné lesnícke centrum
Sekcia pre vedu a výskum
T.G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovak Republic
radovan.gracovsky@nlcsk.org

Rastislav Lagaňa
Technická Univerzita vo Zvolene
Drevárska fakulta
Katedra náuky o dreve
T. G. Masaryka 24
960 01 Zvolen, Slovensko
lagana@tuzvo.sk

iWOOD: BEZPEČNÁ E-AUKČNÁ PLATFORMA S DIGITÁLNYM PROFILOM GUĽATINY PRE TRANSPARENTNÉ OBCHODOVANIE A EFEKTÍVNEJŠIE SPRACOVANIE DREVA

Peter Balogh, Igor Viszlai

1 Úvod

Lesnícko-drevársky sektor čelí rastúcej potrebe zvyšovať efektívnosť, transparentnosť a dôveru naprieč dodávateľsko-spracovateľským reťazcom. V praxi obchodovania s guľatinou pretrvávajú informačná asymetria: kupujúci sa často rozhoduje na základe obmedzených alebo neporovnateľných údajov o kvalite jednotlivých výrezov. To zvyšuje transakčné náklady, riziko sporov a môže viesť k neefektívnemu využitiu drevnej suroviny. Zároveň narastá tlak na rýchlejšie, dátovo podložené rozhodovanie, ktoré lepšie prepája kvalitu vstupnej suroviny s ekonomickým výsledkom spracovania.

V príspevku predstavujeme koncepciu a návrh platformy iWOOD, ktorá kombinuje elektronickú aukciu dreva s digitálnym profilom guľatiny, t. j. štandardizovaným súborom údajov doplneným o multimediálne podklady a voliteľné 3D/CT skeny vnútorných defektov. Cieľom je znížiť neistotu v rozhodovaní, zvýšiť porovnateľnosť ponúk a podporiť efektívnejšie spracovanie dreva.

2 Východiská a ciele riešenia

Koncept iWOOD vychádza z praktických potrieb predávajúcich (vlastníci lesov, správcovia majetku, obchodníci) aj spracovateľov dreva, ktorí potrebujú rýchlo vyhodnotiť ponuku a zároveň minimalizovať riziko nesúlady medzi deklarovanou a reálnou kvalitou sortimentu. Riešenie sleduje tri hlavné ciele: 1. štandardizovať opis aukčnej položky tak, aby boli ponuky medzi sebou porovnateľné, 2. zabezpečiť auditovateľný aukčný proces so záznamom kľúčových udalostí a 3. umožniť integráciu moderných skenovacích technológií na tvorbu digitálneho profilu guľatiny.

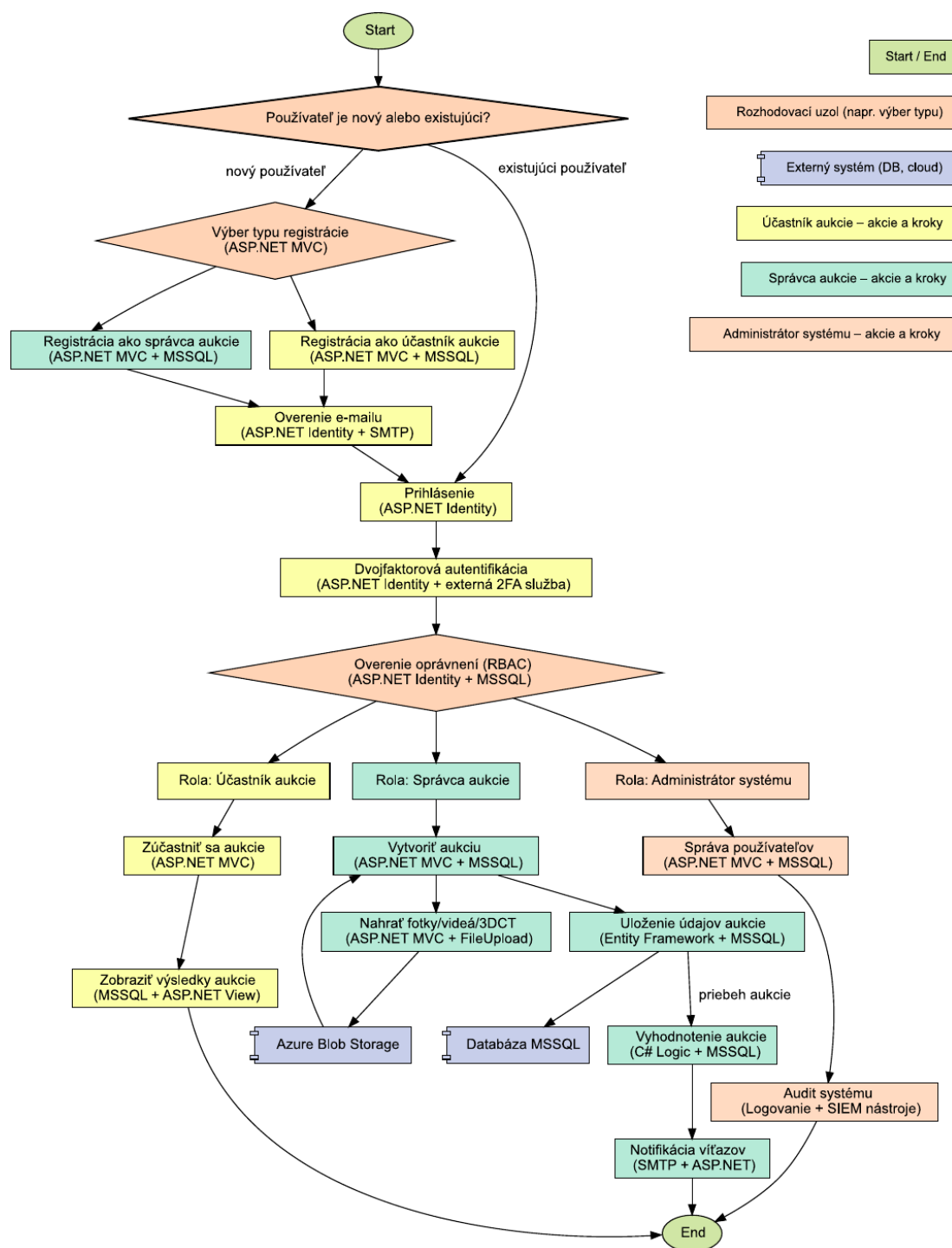
Očakávaným prínosom je zvýšenie transparentnosti a efektívnosti trhu s guľatinou, zníženie transakčných rizík, posilnenie dôvery medzi stranami a lepšie prepojenie kvality suroviny s rozhodnutiami v spracovaní (plánovanie výroby, optimalizácia výťažnosti a hodnoty produktu).

3 Digitálny profil guľatiny a 3D/CT skenovanie

Jadrom inovačného prístupu iWOOD je digitálny profil guľatiny – dátami podložený opis vybraných kvalitatívnych parametrov výrezu spolu s vizuálnymi podkladmi. Minimálny profil tvorí štruktúrovaný ponukový formulár (druh dreveniny, dĺžka výrezu, stredová hrúbka výrezu, objem výrezu s kôrou) doplnený o fotografie a/alebo video v preddefinovanom formáte a kvalite.

V prípade záujmu je možné profil rozšíriť o 3D CT sken každého výrezu. Počítačová tomografia umožňuje vytvoriť detailnú 3D rekonštrukciu vnútorných štruktúr a identifikovať defekty, ktoré nie sú z povrchu zrejmé (napr. vnútorné hrče, dutiny, trhliny, ...). Takéto údaje znižujú neistotu kupujúceho a zároveň poskytujú spracovateľovi informácie pre presnejšie plánovanie technologického postupu.

Ako doplnkovú službu je možné vyžiadať aj garančný certifikát kvality vystavený prevádzkovateľom domény, ktorý predstavuje overenie vybraných parametrov a podkladov (spoplatnená služba).



Obrázok 1 Zjednodušený tok registrácie, správy aukcie a vyhodnotenia v platforme iWOOD

Funkčný a procesný návrh aukčného prostredia

Pre doménu „NLCAukcie-dreva.com“ sa predpokladá dvojstupňový prístup: registrácia a následné prihlásenie. Používateľ vyplní registračný formulár a po overení údajov získa prístup do aukčného prostredia na generovanie elektronických aukcií dreva. Systém podporuje správu rolí (napr. predávajúci/organizátor aukcie, účastník aukcie, administrátor).

Organizátor aukcie vytvorí aukciu vyplnením ponukového formulára a priložením digitálnych podkladov. Po uložení aukcie systém vygeneruje jedinečný odkaz (link) platný počas definovaného času trvania aukcie. Tento odkaz organizátor elektronicky rozpošle vybraným potenciálnym záujemcom, čím sa umožní cielený predaj bez potreby zverejnenia aukcie pre celý trh.

Počas aukcie môžu oprávnení účastníci zadávať ponuky podľa stanovených pravidiel. Po ukončení aukcie systém automaticky vyhodnotí výsledky na základe vopred definovaných kritérií (napr. najvyššia cena, prípadne kombinované kritériá). Výsledky sú sprístupnené účastníkom a súčasne archivované pre potreby spätného overenia a auditu.

Tabuľka 1 Minimálne údaje ponukového formulára aukčnej položky

Pole	Jednotka / formát	Poznámka
Druh drevin	text	napr. smrek, buk
Dĺžka výrezu	m	meraná dĺžka sortimentu
Stredová hrúbka výrezu	cm	priemer v strede výrezu
Objem výrezu s kôrou	m ³	podľa zvolenej metodiky výpočtu
Fotografie	JPG/PNG	predvolená kvalita a rozlíšenie
Video	MP4	krátka vizualizácia povrchu
3D/CT sken (voliteľné)	3D/objemové dáta	indikácia vnútorných defektov

Technologická architektúra a bezpečnosť

Platforma iWOOD je navrhnutá ako webová aplikácia s modulárnou architektúrou. Backend je implementovaný v jazyku C# s použitím ASP.NET MVC v prostredí .NET Framework 4.8, pričom dátová vrstva je postavená na databáze Microsoft SQL Server. Multimediálne prílohy (fotografie, video, 3D/CT dáta) sú ukladané v oddelenom úložisku s riadeným prístupom a verziovaním.

Bezpečnosť a integrita dát sú kľúčovými požiadavkami. Komunikácia je chránená šifrovaním (SSL/TLS) a prístup do systému je podporený dvojfaktorovou autentifikáciou. Integrácie s externými systémami sú riešené prostredníctvom prístupových tokenov (napr. JWT/OAuth2) a oprávnenia používateľov sú riadené cez role-based access control (RBAC).

Súčasťou návrhu je logovanie dôležitých udalostí (registrácie, vytvorenie/úprava aukcie, podanie ponuky, ukončenie aukcie, vyhodnotenie), čo umožňuje spätnú kontrolu, audit a riešenie sporov. Archivácia údajov je realizovaná poskytovateľom služby; o rozsahu a podmienkach archivácie sú klienti informovaní pri registrácii.

Analytická podpora a automatizované vyhodnocovanie

Vyhodnocovanie ponúk je v iWOOD pravidlami riadené a automatizované. Pravidlá aukcie (kritériá, časové okno, podmienky účasti) sú definované pri založení aukcie a systém po ukončení aukcie vykoná vyhodnotenie bez potreby manuálneho zásahu. V ďalšom rozvoji sa počíta s analytickými nástrojmi na podporu cenových a nákupných rozhodnutí (prehľady historických cien, porovnanie podobných aukčných položiek, indikátory dopytu).

Overenie konceptu a pilotná demonštrácia

Vývoj prebieha v rámci Centra excelentnosti LignoSilva, ktoré poskytuje technologické zázemie (3D/CT skenovanie guľatiny) aj expertné kapacity na digitalizáciu procesov. Riešenie nadväzuje na overenie konceptu v relevantnom prostredí a smeruje k pilotnej demonštrácii v operačných podmienkach s aktérmi trhu (vlastníci lesov, obchodníci, drevospracovatelia).

Pilotná prevádzka umožní otestovať používateľské roly, proces tvorby aukcie, prácu s multimédiami a 3D/CT dátami, ako aj automatizované vyhodnotenie. Získané spätné väzby budú použité na úpravu používateľského rozhrania, spresnenie formátov podkladov a nastavenie služieb (napr. garančný certifikát kvality).

4 Diskusia

Elektronická aukcia dreva prináša oproti tradičným formám predaja úsporu času a nákladov a umožňuje osloviť širší okruh záujemcov. Pri drevnej surovine však zostáva kľúčovým faktorom kvalita a jej preukázateľnosť. Digitálny profil guľatiny v iWOOD zvyšuje porovnateľnosť ponúk a môže znižovať počet otáznikov pri nákupe. CT sken je nadstavbou k fotografiám a videu – predstavuje objektívny dôkazový materiál a dáva priestor na lepšie plánovanie spracovania.

Výzvou ostáva štandardizácia kvalitatívneho triedenia a interpretácie skenovacích výstupov v obchodnej praxi, ako aj ekonomická návratnosť doplnkových služieb. Vhodným smerovaním je postupné zavádzanie: od minimálneho digitálneho profilu až po voliteľné pokročilé dáta pre segmenty trhu, kde je pridaná hodnota najvyššia.

Záver

Platforma iWOOD predstavuje bezpečné online riešenie pre aukčný predaj guľatiny, ktoré prepája elektronické trhovisko s modernými technológiami tvorby digitálneho profilu. Štandardizované údaje, multimediálne podklady a voliteľné 3D/CT skeny môžu významne prispieť k transparentnosti obchodovania, znižovaniu rizík a k efektívnejšiemu spracovaniu dreva. Nasledujúcim krokom je pilotná demonštrácia s aktérmi trhu a vyhodnotenie dopadov na prax.

Podakovanie

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

Literatúra

- [1] STN 48 0055. Kvalitatívne triedenie ihličnatej guľatiny. Slovenská technická norma.
- [2] STN 48 0056. Kvalitatívne triedenie listnatej guľatiny. Slovenská technická norma.
- [3] ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements.

Zhrnutie

iWOOD: A secure e-auction platform with a digital log profile for transparent trading and more efficient wood processing

The forestry–wood sector increasingly requires efficient, transparent and auditable trading mechanisms for roundwood. However, buyers often decide based on limited or non-comparable information, which increases transaction costs and the risk of disputes. This paper introduces iWOOD, a secure online platform for auction-based log sales that links an electronic marketplace with modern scanning technologies. A key innovation is the digital log profile: standardized auction data (species, log length, mid-diameter and volume) enriched with photos and video and, optionally, 3D/CT scans. CT-derived outputs can indicate internal defects and provide objective evidence to reduce uncertainty and support processing planning. iWOOD is designed as a modular system with user registration and role management, auction creation, unique time-limited links for targeted invitations, rule-based automated bid evaluation, notifications and result archiving.

Emphasis is placed on data security and integrity through encrypted communication, two-factor authentication, token-based integrations and event logging for auditability. The solution is developed within the LignoSilva Centre of Excellence and is moving toward a pilot demonstration with market actors.

Kľúčové slová

elektronická aukcia; digitálny-profil-guľatiny; 3D/CT-skenovanie; transparentnosť-trhu

Keywords

e-auction; digital-log-profile; 3D/CT-scanning; market-transparency

Kontaktné adresy (autorov)

Peter Balogh, Igor Viszlai
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Sekcia pre vedu a výskum
Národné lesnícke centrum
T. G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovenská republika
peter.balogh@nlcsk.org
igor.viszlai@nlcsk.org

VÝROBA BAKTERIÁLNEJ NANOCELULÓZY S VYUŽITÍM *KOMAGATAEIBACTER XYLINUS* DSM 46591 AKO MODELOVÉHO ORGANIZMU

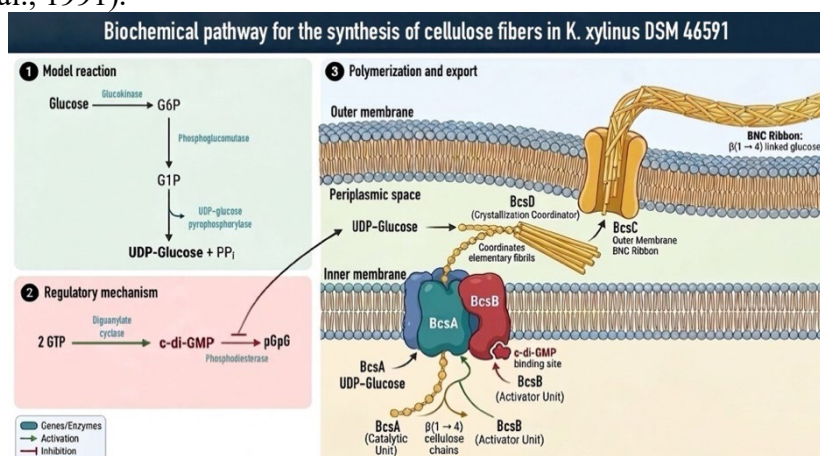
Eduard Horban, Petra Olejníková, Štefan Boháček, Albert Russ

1 Úvod

Jedným z perspektívnych obnoviteľných biopolymérov je bakteriálna nanocelulóza (BNC) – exopolysacharid syntetizovaný mikroorganizmami do extracelulárneho priestoru (prevažne rodu *Komagataeibacter*). Výroba celulózy baktériami je odôvodnená štruktúrnou jedinečnosťou. Trojrozmerná sieť nanovláken s priemerom 20–100 nm (Kumagai et al., 2011; Machfidho et al., 2023) zabezpečuje vysokú plochu merného povrchu a mechanickú pevnosť. Fyzikálno-chemické vlastnosti, vysoký stupeň kryštalinity až 80–90 % (Meza-Contreras et al., 2018; Pham & Tran, 2023; Sozcu et al., 2025), jedinečná schopnosť zadržiavať vodu (Gelin et al., 2007; Li et al., 2015) a biokompatibilita, čistota materiálu bez prímies minimalizujú imunitnú reakciu (Suryanto et al., 2023; Svensson et al., 2005). Cieľom tohto výskumu je získanie celulóзовých membrán BNC prostredníctvom *Komagataeibacter xylinus* DSM 46591 a potvrdenie fyzikálno-chemických vlastností naprodukovaných membrán.

2 Biosyntéza nanocelulózy baktériami *Komagataeibacter xylinus* DSM 46591

Syntéza celulóзовých vlákien (Obrázok 1) je viazaná na metabolizmus D-glukózy. Po transporte glukózy do bunky pomocou glukokinázy vzniká glukózo-6-fosfát (G6P). Enzým fosfoglykomutáza (Pgm) vykonáva reverzibilný prenos fosfátovej skupiny, pričom premieňa G6P na glukóza-1-fosfát (G1P). V záverečnej fáze reakcie enzým UDP-glukózopyrofosforyláza (UGPáza) katalyzuje reakciu G1P s UTP (uridintrifosfát), čím vzniká UDP-glukóza (UDP-Glc) – základná štrukturálna jednotka celulózy (Ha et al., 2011; Römling, 2002; Ross et al., 1991).



Obrázok 1: Biochemická cesta syntézy BNC. Blok 1 (modelová reakcia) ilustruje hlavnú dráhu transformácií vedúcich k UDP-Glc. Blok 2 (regulačný mechanizmus) vysvetľuje princíp regulácie syntézy prostredníctvom c-di-GMP (vrátane mechanizmu negatívnej spätnej väzby). Blok 3 (polymerizácia a export BNC z buniek) ilustruje rad proteínových systémov a reakčných ciest. G6P – glukóza-6-fosfát; G1P – glukóza-1-fosfát; PPi – anorganický pyrofosfát; GTP – guanozín trifosfát; c-di-GMP – cyklický diguanilát; pGpG – 5'-fosfoguanilyl-(3'→5')-guanózín; komplex Bcs (BcsA, BcsB, BcsD, BcsC) – komplex bakteriálnej celulózasyntázy. Vytvorené v súlade s Ha et al., 2011; Römling, 2002; Ross et al., 1991; Sondermann et al., 2012.

Syntézu polymérneho vlákna zabezpečuje mnohoproteínový komplex, ktorý pozostáva zo štyroch základných jednotiek: proteínových podjednotiek BcsA a BcsB, proteínov BcsD a BcsC. BcsA postupne pripája zvyšky glukózy z UDP-Glc. BcsB je stabilizujúcim faktorom rastúceho reťazca. BcsD koordinuje paralelné ukladanie niekoľkých elementárnych fibríl, čím zabezpečuje tvorbu vysoko usporiadaných kryštálov. V poslednej fáze sa vytvorené celulózoové vlákna vylučujú do okolitého prostredia cez póry vonkajšej membrány, ktoré vytvára proteín BcsC (Römling, 2002). Regulačný mechanizmus je založený na cyklickom diguaniláte (c-di-GMP). Za priaznivých podmienok enzým diguanilátcykláza (DGC) syntetizuje c-di-GMP z dvoch molekúl GTP. c-di-GMP pôsobí ako alosterický aktivátor celulózosyntázy (BcsA) za pomoci BcsB. Za vhodných podmienok sa molekula c-di-GMP viaže na BcsB, čo spôsobuje konformačné zmeny v katalytickej doméne BcsA, otvárajúc prístup UDP-Glc k aktívnemu centru enzýmu. Hladina c-di-GMP je kontrolovaná fosfodiesterázami (PDE), ktoré ju v prípade potreby štiepia na neaktívny lineárny dinukleotid pGpG, čo vedie k zastaveniu syntézy BNC (Römling, 2002; Sondermann et al., 2012).

3 Materiály a Metódy

D-glukóza; kvasničný extrakt; uhličitan vápenatý; agar; peptón; dodekahydrát hydrogenfosforečnanu sodného; monohydrát kyseliny citrónovej; HCl/KOH (úprava pH); deionizovaná voda; laboratórne sklo; SEM/ESEM (Thermo Scientific Prisma E); FTIR (Thermo Scientific Nicolet iS10); Venticell 22; Biosan Orbital Shaker–Incubator ES-20/60.

3.1. Kultivačné médium

Zloženie štartovacieho média 1 pre kultiváciu: destilovaná/deionizovaná voda – 1000,0 ml; D-glukóza – 100 g; kvasničný extrakt – 10 g; uhličitan vápenatý – 20 g; agar – 20 g (DSMZ GmbH, 2007).

Zloženie média Hestrin-Schramm (HS) pre syntézu BNC: destilovaná/deionizovaná voda – 1000 ml; D-glukóza – 50 g/l; kvasničný extrakt – 5 g/l; peptón – 5 g/l; dodekahydrát hydrogenfosforečnanu sodného – 2,7 g/l; kyselina citrónová monohydrát - 1,15 g/l (Costa et al., 2017; Hur, Choi, et al., 2020; Hur, Rhee, et al., 2020; S. Hestrin, 1954; Singhsa et al., 2018).

3.2. Príprava inokula

Štartovacie médium 1 pre *K. xylinus* DSM 46591 sa kultivovalo pri 28,5 °C, 7 dní, pH 7,0 pri statických aeróbných podmienkach. HS kultivačné médium sa pripravilo podľa vyššie uvedeného protokolu. Hodnota pH roztoku sa nastavila na 5,0 pomocou HCl/KOH. Kultivačné médium sa sterilizovalo pri 121 °C a 1–1,5 bar počas 20 minút. Tri 250 ml sterilné banky (Fisher Brand) sa naplnili 100 ml vychladeného čerstvého kultivačného média HS. Aktívne rastúce čisté kultúry baktérií na agarom živnom médiu sa inokulovali do 5 ml čerstvého HS živného média (McFarland = 1). Následne sa 5 ml inokulovaného živného média prenieslo do 100 ml kultivačného média (5 % inokulum). BNC sa produkovala v inkubátore pri 28,5 °C 15 dní pri statických aeróbných podmienkach.

3.3. Odber, purifikácia a príprava BNC

Vyprodukované BNC membrány sa sterilne odobrali z kultivačného média a umiestnili na predčistenie do Petriho misiek s destilovanou vodou. Vo vodnom prostredí sa membrány inkubovali 15 hodín pri 28,5 °C v statických podmienkach. Membrány sa v ďalšom kroku čistili intervalovým čistením 0,1 M roztokom NaOH pri nasledujúcich parametroch: termostát na 80 °C, 6 sérií po 30 minút (pri každej ďalšej sérii sa roztok NaOH nahradil čerstvým). Po šiestej sérii sa teplota roztoku NaOH znížila na 26 °C (izbová teplota) a membrány sa uchovali 24 hodín v roztoku NaOH. Po dokončení čistenia sa membrány umiestnili do destilovanej vody na jeden deň do chladničky, 4 °C.

Následne sa membrány 6-krát premyli destilovanou vodou a zmeralo sa ich pH. Premývanie membrán sa realizovalo v sériách po 10 minút, vždy s čistou destilovanou vodou. Pripravené membrány boli umiestnené do sterilnej destilovanej vody a uložené v chladničke pri teplote 4 °C. Každá membrána sa sterilnou čepeľou rozrezala na štyri časti. Následne bola jedna štvrtina (1/4) každej tejto časti vysušená v sušiarňi po dobu 15 hodín pri teplote 30 °C. Vysušené vzorky boli použité na analýzu FTIR/SEM. Zvyšné časti (3/4) natívnej (never dried) membrány boli umiestnené do sterilnej destilovanej vody v chladničke pri teplote 4 °C na skladovanie. Natívne (never dried) časti boli tiež použité na FTIR analýzu.

3.4. Štatistické vyhodnotenie

Priemer hrúbky naprodukovaných vlákien celulózovej membrány sa identifikoval pomocou SEM (ESEM) mikroskopie. Na zabezpečenie štatistickej reprezentatívnosti získaných údajov bol 95 % interval spoľahlivosti (CI) vypočítaný pomocou Studentovho t-rozdelenia (Student, 1908). Táto metóda sa použila na základe 15 nameraných vlákien v každej z troch membrán ($n = 15$; podľa podmienky $n < 30$ – malá vzorka). Výpočet štandardnej chyby priemeru (SE), ktorá udáva presnosť odhadu priemernej hodnoty celej generálnej populácie vlákien membrány bol prevedený podľa vzťahu:

$$SE = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

kde: s – výberová štandardná odchýlka; $\sqrt{n}$ – koreň z rozsahu vzorky.

Kritická hodnota Studentovho koeficientu ($t^* = 2,145$) bola určená pre hladinu spoľahlivosti $P = 0,95$ a počet stupňov voľnosti $df = n - 1$ (pre $n = 15$). CI priemeru vlákien je definovaný ako:

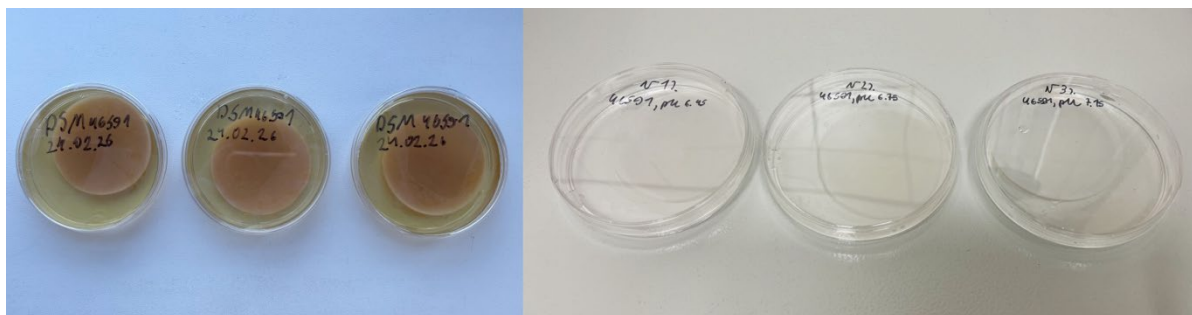
$$CI = \bar{x} \pm (t^* \times SE) \quad (2)$$

kde: $\bar{x}$ – výberový priemer; $t^* \times SE$ – chybová miera vzorky.

4 Výsledky a diskusia

4.1. Analýza natívnej (never dried) BNC pomocou FTIR

Po 15-dňovej kultivácii sa na povrchu tekutého živného média vytvorili membrány (Obrázok 2). Membrány sa zo živného média sterilne oddelili a premyli. Po kultivácii sa stanovilo pH produkovaných membrán, ktoré predstavovalo hodnoty: 6,45, 6,75 a 7,15.



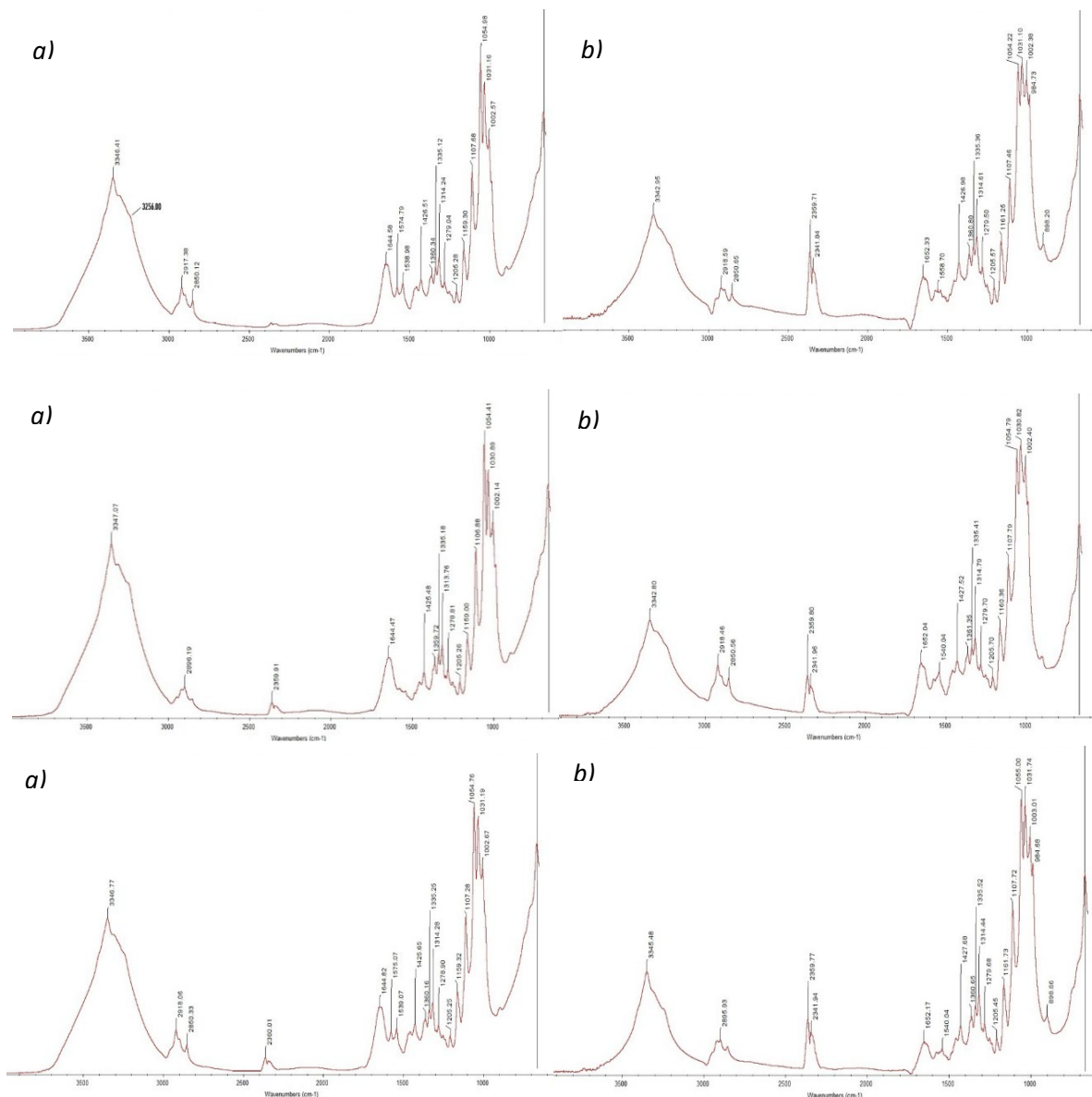
Obrázok 2: Získané membrány BNC. Na ľavom obrázku sú zobrazené membrány pred čistením, na pravom obrázku po čistení.

Tri nevysušené (never dried) membrány BNC v pôvodnom stave (Obrázok 3a) boli podrobené FTIR analýze. Vo vysokofrekvenčnej oblasti spektra dominuje široký a intenzívny pík pri 3346 cm^{-1} , spôsobený valenčnými kmitmi O–H. Podľa Marchessaulta (1962) poloha tohto píku poukazuje na prítomnosť rozvinutého systému vnútramolekulárných vodíkových väzieb. Vrchol pri frekvencii 3256 cm^{-1} (pridaný ako príklad v manuálnom režime na Obrázku 3a (I)) svedčí o prítomnosti Celulózy Ia. Tento typ je charakteristický tvorbou s pomocou mikroorganizmov (baktérií) (Wiederschain, 2007). Približne $2917\text{--}2850\text{ cm}^{-1}$ sa pripisuje valenčným kmitom C–H všetkých uhl'ovodíkových zložiek v polysacharidoch (Hospodarova et al., 2018). Osobitný význam má pás pri 1644 cm^{-1} . Interpretuje sa ako deformačné kmitanie H–O–H molekúl adsorbovaných na povrchu nanovláken (Smith, 1998). Pásky v oblasti 1574 a 1538 cm^{-1} sa klasifikujú ako deformačné výkyvy N–H a valenčné C–N (zvyšky bakteriálnych bielkovín) (Shezad et al., 2010; Sun et al., 2007). Indikátorom kryštálovej štruktúry je pík pri 1426 cm^{-1} , ktorý zodpovedá symetrickým deformačným (nožnicovým) kmitom skupiny H–C–H pri šiestom atóme uhlíka (C6) (Nelson, 1964; Tiboni et al., 2012). Ďalej nasledujú tri píky pri $1360\text{--}1365\text{ cm}^{-1}$ (ploché deformačné kmitania C–H), 1335 cm^{-1} (vnútroplaché deformačné kmitania O–H) a 1314 cm^{-1} (kmitania skupín H–C–H) (Grube et al., 2016; Nelson, 1964; Tiboni et al., 2012). Píky pri 1279 a 1205 cm^{-1} predstavujú deformačné kmitania C–H a pravdepodobne aj O–H (Garcia et al., 2022; Higgixs et al., 1961). Druhý vibračný marker je najvýraznejší v rozmedzí $1160\text{--}1030\text{ cm}^{-1}$. Pík pri $1159\text{--}1160\text{ cm}^{-1}$ sa vzťahuje na asymetrické valenčné kmitanie mostíkovovej väzby C–O–C, čo je $\beta(1\rightarrow4)$ -glykozidová väzba. To potvrdzuje celulóзовú (polysacharidovú) štruktúru membrány. Ďalšie pásky pri 1054 a 1031 cm^{-1} zodpovedajú valenčným kmitom väzieb C–O a C–C v primárnych a sekundárnych alkoholoch (Altunordu et al., 2025; Smith, 1998; Tiboni et al., 2012). Vrchol 1107 cm^{-1} je zodpovedný za antisymetrický synfázový režim rozt'ahovania kruhu (Marchessault, 1962). Vrchol pri 1002 cm^{-1} je výsledkom valenčných kmitov C–O a C–C (Smith, 1998).

4.2. Analýza vysušenej BNC pomocou FTIR

Pri druhej FTIR analýze troch vysušených membrán BNC (Obrázok 3b) sa pre každú z nich získali spektrá s nasledujúcimi charakteristikami. Vo vysokofrekvenčnej oblasti spektra vysušených vzoriek je pozorovateľný intenzívny pík valenčných kmitov hydroxylových skupín (O–H) s posunom maxima k $3342\text{--}3343\text{ cm}^{-1}$. Pásky valenčných kmitov C–H metylénových skupín sa zaznamenávajú pri 2918 a 2850 cm^{-1} (Oh et al., 2005). Za zmienku stojí výskyt výrazných artefaktov absorpcie atmosférického CO_2 v rozsahu $2342\text{--}2360\text{ cm}^{-1}$, ktoré nesúvisia so zložením membrány. V oblasti absorpcie prítomnej vlhkosti sa vrchol posúva k 1652 cm^{-1} . Je to typické pre silne viazané molekuly vody, ktoré zostávajú v nanopóroch BNC (Atykyan et al., 2020). Pás 1558 cm^{-1} je dôkazom prítomnosti bielkovinových molekúl (skupina Amide II) (Kim et al., 2011). Oblasť kryštalickej štruktúry je reprezentovaná jasným píkom pri $1426\text{--}1427\text{ cm}^{-1}$ (H–C–H). Nasledujú pásky pri $1360\text{--}1361$ a 1335 cm^{-1} (deformačné C–H a vnútroplánové O–H, v uvedenom poradí). Pík 1314 cm^{-1} predstavuje rotačné kmitanie H–C–H na 6. atóme uhlíka (Liu et al., 2023). Vrchol 1279 cm^{-1} sa vzťahuje na ohybové kmitanie väzieb C–H v pyranózovom kruhu, zatiaľ čo 1205 cm^{-1} sa vzťahuje na deformácie v rovine skupín O–H (Garcia et al., 2022; Higgixs et al., 1961). Glykozidové väzby $\beta(1\rightarrow4)$ sa prejavujú asymetrickými kmitmi pri $1160\text{--}1161\text{ cm}^{-1}$, zatiaľ čo kostrovité vibrácie pyranózového kruhu – intenzívnym dupletom v oblasti $1054\text{--}1030\text{ cm}^{-1}$. Pík pri 1107 cm^{-1} predstavuje antisymetrický synfázový režim rozt'ahovania kruhu (Marchessault, 1962).

Piky pri 1002 cm^{-1} a 984 cm^{-1} predstavujú valenčné kmitanie C–O/C–C v kryštalickej fáze a kmitanie C–O (Cleveland et al., 2025). Výskyt minimálneho, ale rozoznateľného ramienka v oblasti 898 cm^{-1} svedčí o kolísaní amorfných oblastí (Bodea et al., 2021).

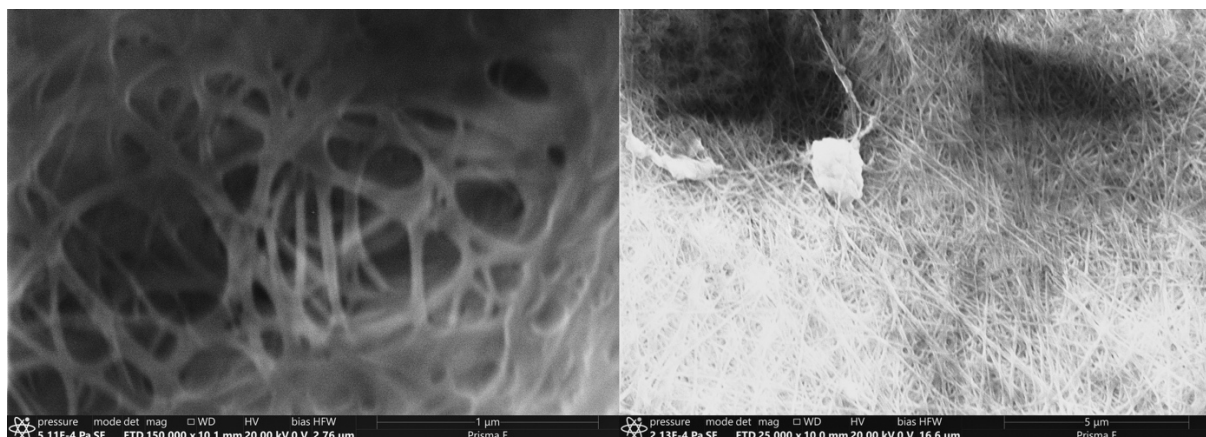


Obrázok 3: FTIR spektrá troch natívnych (never dried) membrán (a) a troch vysušených membrán (b).
Parametre: 64 skenov na vzorku, rozlíšenie 4 cm^{-1} , rozsah vlnových čísel $4000\text{--}500\text{ cm}^{-1}$.

4.3 SEM (ESEM) analýza vysušenej BNC

V rámci analýzy troch vysušených membrán pomocou SEM (ESEM) mikroskopie (Obrázok 4) sa identifikovali a štatisticky vyhodnotili rozmery vlákien. Morfometrická analýza nanofibrilárnej siete, vypočítaná pomocou CI pre priemerný priemer vlákna pre prvú, druhú a tretiu membránu, je uvedená v Tabuľke 1. Tieto výsledky zodpovedajú základnej klasifikácii bakteriálnej nanocelulózy ako siete páskovitých mikrovláken s priemerom, ktorý zvyčajne dosahuje 20 až 100 nm (Klemm et al., 2011). Horná hranica intervalu spoľahlivosti vo všetkých troch prípadoch (68,20 nm; 60,59 nm; 34,81 nm) zostáva výrazne pod hranicou 100 nm.

To poskytuje štatistické potvrdenie zaradenia týchto membrán ako nanomateriálu v súlade s normou ISO/TS 20477: 2023.



Obrázok 4: Snímky vlákien získané pomocou SEM (ESEM) Prisma E. Parametre sú uvedené v spodnej časti obrázku. Skratky: SE (režim) – sekundárne elektróny; ETD – Everhart-Thornleyho detektor; mag – zväčšenie; WD – pracovná vzdialenosť; HV – vysoké napätie (kV); HFW – šírka horizontálneho poľa.

Tabuľka 1: Morfometrická analýza nanofibrilárnej siete.

Membrána	95% Interval spoľahlivosti priemeru vlákien (nm)	Dolná hranica (nm)	Horná hranica (nm)
1	$58,85 \pm 9,35$	49,50	68,20
2	$52,53 \pm 8,06$	44,47	60,59
3	$30,63 \pm 4,18$	26,45	34,81

Podakovanie

„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

- Altunordu, H., Kayra, N., Kalkan, M., Üstün-Aytekin, Ö., Nikerel, E., & Aytekin, A. Ö. (2025). Enhancing Bacterial Cellulose Yield and Quality Through Controlled Stress Conditions in *Komagataeibacter xylinus* Fermentation. *Polymers for Advanced Technologies*, 36(5).
- Atykian, N., Revin, V., & Shutova, V. (2020). Raman and FT-IR Spectroscopy investigation the cellulose structural differences from bacteria *Gluconacetobacter sucrofermentans* during the different regimes of cultivation on a molasses media. *AMB Express*, 10(1).
- Bodea, I. M., Beteg, F. I., Pop, C. R., David, A. P., Dudescu, M. C., Vilău, C., Stănilă, A., Rotar, A. M., & Cătunescu, G. M. (2021). Optimization of moist and oven-dried bacterial cellulose production for functional properties. *Polymers*, 13(13).
- Cleveland, D., Nayak, R., Joseph, F., & Nguyen, T. A. (2025). Characterization of sustainable bacterial cellulose from Indigenous Vietnamese biomass for potential textile applications. *Scientific Reports*, 15(1).
- Garcia, E. L., Mojicevic, M., Milivojevic, D., Aleksic, I., Vojnovic, S., Stevanovic, M., Murray, J., Attallah, O. A., Devine, D., & Fournet, M. B. (2022). Enhanced Antimicrobial Activity of

Biocompatible Bacterial Cellulose Films via Dual Synergistic Action of Curcumin and Triangular Silver Nanoplates. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(20).

Grube, M., Shvirksts, K., Denina, I., Ruklisa, M., & Semjonovs, P. (2016). Fourier-transform infrared spectroscopic analyses of cellulose from different bacterial cultivations using microspectroscopy and a high-throughput screening device. *Vibrational Spectroscopy*, 84, 53–57.

Higgixs, H. G., Stewart, C. R., & Harringtons, K. J. (1961). Infrared Spectra of Cellulose and Related Polysaccharides. In *JOURNAL OF POLYMER SCIENCE* (Vol. 51).

Hospodarova, V., Singovszka, E., & Stevulova, N. (2018). Characterization of Cellulosic Fibers by FTIR Spectroscopy for Their Further Implementation to Building Materials. *American Journal of Analytical Chemistry*, 09(06), 303–310.

International Organization for Standardization. (2023). Nanotechnologies — Standard terms and definitions for cellulose nanomaterials (ISO/TS 20477:2023).

Kim, J., Cai, Z., Lee, H. S., Choi, G. S., Lee, D. H., & Jo, C. (2011). Preparation and characterization of a Bacterial cellulose/Chitosan composite for potential biomedical application. *Journal of Polymer Research*, 18(4), 739–744.

Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. In *Angewandte Chemie - International Edition* (Vol. 50, Number 24, pp. 5438–5466).

Liu, X., Cao, L., Wang, S., Huang, L., Zhang, Y., Tian, M., Li, X., & Zhang, J. (2023). Isolation and characterization of bacterial cellulose produced from soybean whey and soybean hydrolyzate. *Scientific Reports*, 13(1).

Marchessault, R. H. (1962). The Infrared Spectra of Crystalline Polysaccharides. VIII. Xylans. In *JOURNAL OF POLYMER SCIENCE* (Vol. 59).

Nelson, M. L. (1964). Relation of Certain Infrared Bands to Cellulose Crystallinity and Crystal Lattice Type. Part 11. A New Infrared Ratio for Estimation of Crystallinity in Celluloses I and 11*. In *JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE* (Vol. 8).

Oh, S. Y., Yoo, D. Il, Shin, Y., & Seo, G. (2005). FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide. *Carbohydrate Research*, 340(3), 417–428.

Shezad, O., Khan, S., Khan, T., & Park, J. K. (2010). Physicochemical and mechanical characterization of bacterial cellulose produced with an excellent productivity in static conditions using a simple fed-batch cultivation strategy. *Carbohydrate Polymers*, 82(1), 173–180.

Smith, B. (1998). *INFRARED SPECTRAL INTERPRETATION: A Systematic Approach*.

Student, B. (1908). *BIOMETRIKA. THE PROBABLE ERROR OF A MEAN*.

Sun, D., Zhou, L., Wu, Q., & Yang, S. (2007). Preliminary research on the structure and properties of nano-cellulose. *Journal Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*, 22(4), 677–680.

Tiboni, M., Grzybowski, A., Passos, M., Barison, A., Lião, L. M., Campos, F. R., Pontarolo, R., & Fontana, J. D. (2012). The use of dyed bacterial cellulose to monitor cellulase complex activity. *Cellulose*, 19(6), 1867–1877.

Zhrnutie

Production of bacterial nanocellulose using *Komagataeibacter xylinus* DSM 46591 as a model organism. The goal is to obtain bacterial nanocellulose membranes using *Komagataeibacter xylinus* DSM 46591 and confirm the specific physicochemical properties of the membranes (confirmation/determination of the cellulose type, proof of the nanoscale size of the fibers, etc.) using analytical methods such as Fourier transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy, supported by statistical analysis. The theoretical and practical parts of this work will be used as the basis for subsequent research in this area.

Kľúčové slová

Bakteriálna nanocelulóza (BNC), *Komagataeibacter xylinus* DSM 46591, syntéza BNC, membrána BNC, vysušená membrána BNC, natívna (never dried) membrána BNC, FTIR, SEM (ESEM).

Kontaktné adresy

Eduard Horban, Štefan Boháček, Albert Russ
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.
Dúbravská cesta 14, Bratislava
841 04, Slovak Republic
horban@vupc.sk

Petra Olejníková
Slovenská technická univerzita v Bratislave
Fakulta chemickej a potravinárskej technológie (FCHPT)
Ústav biochémie a mikrobiológie
ÚBM FCHPT, Radlinského 9, 81237 Bratislava
petra.olejnikova@stuba.sk

BIODEGRADOVATEĽNÉ OBALY PRE POTRAVINÁRSKY PRIEMYSEL

Tibor Pásztor, Daniela Majerčáková, Katarína Kalužná

1 Úvod

Vzhľadom na regulačný tlak na zníženie spotreby plastov, zvýšenie recyklovateľnosti obalov a podporu obehového hospodárstva si obalový priemysel, najmä v oblasti potravín, vyžaduje vývoj škálovateľných bariérových obalov na biologickej báze, ktoré budú biologicky odbúrateľné a zároveň recyklovateľné [4]. Rastúci dopyt po plastových obalových materiáloch vyvolal vážne environmentálne aj ekonomické obavy, najmä v súvislosti s hromadením nebiologicky rozložiteľného odpadu a spotrebou neobnoviteľných zdrojov. Okrem toho sa čoraz viac diskutuje aj o možnom prenose mikroplastov do potravinového reťazca, čo ďalej zvyšuje záujem o alternatívne materiály na báze obnoviteľných zdrojov.

Všetky polyméry vykazujú určitú mieru priepustnosti pre plyny a vodnú paru, preto je pri hodnotení obalových materiálov nevyhnutné sledovať ich bariérové vlastnosti. Pre priepustnosť kyslíka je rozhodujúcim parametrom rýchlosť priepustnosti kyslíka (OTR), zatiaľ čo pre prestup vodnej pary sa používa rýchlosť priepustnosti vodnej pary (WVTR). Tieto dva parametre významne ovplyvňujú schopnosť obalu chrániť potravinu a tým aj jej trvanlivosť [2]. Obr. 1 znázorňuje rozdelenie obalových materiálov podľa bariérového stupňa na základe hodnôt OTR a WVTR spolu s príkladmi materiálových štruktúr [2]. V prípade bežne používaných polymérnych obalových materiálov sú požiadavky na bariéru proti kyslíku a vodnej pare dôležité najmä pri produktoch, ako sú mäso, mliečne výrobky, pivo alebo oleje. Naša výskumná úloha sa pritom nezameriava na extrémne náročné bariérové požiadavky citlivých elektronických výrobkov, ale na požiadavky relevantné pre potravinárske obaly.

Pri potravinárskych obaloch je potrebné súčasne zohľadniť viacero funkcií materiálu, pretože samotná bariéra proti kyslíku alebo vodnej pare nestačí. Obal musí zabezpečiť aj dostatočnú mechanickú pevnosť, spracovateľnosť, možnosť uzatvárania, vhodné správanie pri kontakte s potravinou a v ideálnom prípade aj priaznivý profil z pohľadu recyklácie alebo kompostovateľnosti [1], [9]. Práve preto sa v súčasnosti ako najrealistickejší prístup nejaví hľadanie jedného univerzálneho materiálu, ale návrh viacvrstvových štruktúr, v ktorých jednotlivé vrstvy zabezpečujú rozdielne funkcie.

Bariérový stupeň	Data OTR a WVTR	Príklad štruktúry materiálu
Vysoká bariéra	≤1.0	Tradice: PA/AL/PA/PE Recyklovateľné: BOPP/MBOPP/PP
Střední bariéra	1.0-10	Tradice: PET/AL203-PET/PE Recyklovateľné: MDOPE/EVOH-LLDPE Kompostovateľné: Celulóza/PBS (PLA)
Žádná bariéra	> 10	Tradice: PET/PE Recyklovateľné: MDOPE/LLDPE, BOPP/PP Kompostovateľné: papír/PBS (PLA)

Obrázok 1 - Bariérové stupne, Zdroj: [2]

2 Ktoré produkty potrebujú obaly z bariérového materiálu?

Produkty ako káva, snacky, proteínové prášky, tablety alebo vybrané suché ingrediencie môžu byť výrazne ovplyvnené prístupom vzduchu a vlhkosti do obalu. Vhodne zvolená bariérová fólia alebo bariérová vrstva preto umožňuje predĺžiť trvanlivosť výrobku a zachovať jeho kvalitu počas skladovania a distribúcie [2].

Tradičným materiálom na biologickej báze je papier a obaly odvodené od celulózy, ktoré sú biologicky degradovateľné, kompostovateľné a z environmentálneho hľadiska priaznivé. Papier, najmä Kraft papier, sa vyznačuje dobrou pevnosťou a odolnosťou proti roztrhnutiu, jeho nevýhodou je však zníženie pevnostných vlastností vo vlhkom prostredí a zároveň slabšia bariéra proti vode, vodnej pare a plynom.

Jednou z najslubnejších ciest na prekonanie týchto nedostatkov je tvorba viacvrstvových štruktúr, v ktorých papier slúži ako nosný podklad a požadované funkčné vlastnosti zabezpečujú ďalšie nanosené vrstvy. Tie môžu byť tvorené opakovaným nanosením rovnakého materiálu alebo kombináciou viacerých typov povlakov, napríklad disperzných, polymérnych alebo bio-bariérových vrstiev [1], [5]. Práve viacvrstvová konštrukcia sa ukazuje ako účinný spôsob, ako zlepšiť bariérové vlastnosti celulóзовých materiálov bez potreby použitia konvenčných, ťažšie recyklovateľných plastových laminácií [1].

Dosiahnutie veľmi vysokých bariérových vlastností pomocou výlučne biodegradovateľných materiálov zostáva stále výzvou, avšak v posledných rokoch bol v tejto oblasti zaznamenaný výrazný pokrok. Perspektívne sú najmä systémy založené na nanocelulóze, pri ktorých možno vhodným usporiadaním štruktúry a znížením pórovitosti významne obmedziť prestup plynov. Významnú skupinu predstavuje aj PLA, ktorý síce v čistej forme nedosahuje dostatočné bariérové vlastnosti pre náročnejšie aplikácie, no jeho funkčnosť možno zlepšiť vhodnou modifikáciou alebo použitím vo forme povlaku na papieri [3]. Prakticky dôležitý je aj fakt, že práve vodné PLA disperzie predstavujú jednu z ciest k príprave hydrofóbných bariérových vrstiev aplikovateľných na papierové substráty [3]. Ďalšou zaujímavou skupinou sú prírodné polyméry a kompozitné systémy, pri ktorých sa kombinuje výhoda obnoviteľného pôvodu s možnosťou cielene upravovať bariérové a povrchové vlastnosti materiálu [1], [5].

Význam bariérového materiálu pritom závisí od charakteru výrobku. Pri suchých a hygrokopických produktoch je kľúčová najmä ochrana pred vlhkosťou, pretože aj relatívne malý prestup vodnej pary môže negatívne ovplyvniť sypanosť, textúru alebo stabilitu produktu. Naopak pri výrobkoch citlivých na oxidáciu je rozhodujúca najmä bariéra proti kyslíku, ktorá ovplyvňuje zachovanie chuti, vône, farby a celkovej stability výrobku. V praktických aplikáciách preto býva dôležité optimalizovať nielen jednu bariérovú veličinu, ale celý súbor vlastností obalu podľa konkrétneho typu balenej potraviny [2], [9].

Zároveň sa ukazuje, že papier ako samostatný materiál zriedkavo postačuje pre náročnejšie obalové aplikácie, no v kombinácii s vhodným náterom alebo tenkou funkčnou vrstvou môže vytvárať materiálový systém s podstatne vyššou pridanou hodnotou. Takýto prístup je zaujímavý aj z pohľadu budúcej priemyselnej implementácie, pretože umožňuje zachovať papierový charakter obalu a súčasne cielene upravovať jeho výkonové parametre.

Takto formulovaný prístup ukazuje, že budúci vývoj biologicky odbúrateľných obalov nebude založený na jednom ideálnom materiáli, ale skôr na vhodnej kombinácii viacerých vrstiev a funkčných zložiek, ktoré spolu zabezpečia potrebnú ochranu baleného produktu a zároveň umožnia priaznivejší environmentálny profil obalu.

3 Bariérový disperzný náter na papier

Bariérové povlaky predstavujú odpoveď výrobcov na potrebu obalového hodnotového reťazca hľadať nové riešenia, ktoré by nahradili plasty a fluorochemikálie používané v papierových, kartónových a tvarovaných vláknitých materiáloch. Vysokovýkonné bariérové povlaky poskytujú ochranu proti tuku, oleju, vode a vlhkosti pri potravinárskych aplikáciách a zároveň môžu prispieť k vývoju recyklovateľných a znovu rozvlákňiteľných obalových materiálov [5].

Viacvrstvové povrchové úpravy na celulóзовých substrátoch sa pritom ukazujú ako účinný spôsob zlepšenia bariérových vlastností bez úplného opustenia papierového nosiča [1]. Techniky nanášania disperzných polymérnych vrstiev sú rôzne a ich výber závisí od zloženia disperzie, požadovanej hrúbky vrstvy a typu podkladu. Pre náš výskum sa orientujeme na technológie flexografie a hĺbkotlače, ktoré sú relevantné aj z hľadiska priemyselnej škálovateľnosti.

Pri disperzných náteroch je dôležité, aby výsledná vrstva vytvorila na povrchu papiera dostatočne kompaktný a homogénny film. Keďže papier je prirodzene pórovitý materiál, výsledný bariérový účinok nezávisí len od chemického zloženia náteru, ale aj od interakcie medzi náterom a podkladom, od schopnosti vyplniť povrchové nerovnosti a od miery prenikania disperzie do vláknej štruktúry. Aj preto môžu dve formulácie s podobným chemickým základom vykazovať na odlišných papierových substrátoch rozdielne výsledky.

Výhodou flexografie a hĺbkotlače je, že ide o technológie kompatibilné s kontinuálnym spracovaním flexibilných materiálov. V prípade flexografie je výhodou najmä priemyselná rozšírenosť, relatívne jednoduchá integrácia do tlačových liniek a možnosť nanášať tenké vrstvy s dobrou produktivitou. Hĺbkotlač naopak umožňuje veľmi presné dávkovanie náterovej hmoty a dobrú kontrolu nad nanosenou vrstvou, čo môže byť výhodné pri formuláciách vyžadujúcich vyššiu homogenitu povlaku [10].

4 Súčasný stav technológie

V súčasnosti je stále náročné dosiahnuť veľmi nízke hodnoty priepustnosti pre kyslík aj vodnú paru pri použití výlučne biodegradovateľných materiálov v priemyselnom meradle. Ako najperspektívnejší prístup sa javí kombinácia rôznych biodegradovateľných materiálov vo viacvrstvových štruktúrach, v ktorých každá vrstva plní špecifickú funkciu a prispieva k celkovej bariérovej účinnosti [1]. Výskum v tejto oblasti rýchlo napreduje a ukazuje, že významné zlepšenie bariérových vlastností možno dosiahnuť vhodným návrhom štruktúry aj zloženia náterových systémov [1], [3].

Z pohľadu recyklovateľnosti papierových obalov je dôležité minimalizovať podiel nevláknitých zložiek. Odporúčania pre papierové obaly uvádzajú, že podiel náteru by mal zostať čo najnižší, ideálne približne do 10 % hmotnosti obalu, pričom do budúcnosti sa preferujú ešte nižšie hodnoty, aby sa uľahčilo rozvláknenie a následná recyklácia [6]. Recyklovateľnosť obalov je zároveň prísne sledovaná aj európskou legislatívou. Nariadenie (EÚ) 2025/40 o obaloch a odpade z obalov nadobudlo účinnosť 11. februára 2025 a vo všeobecnosti sa uplatňuje od 12. augusta 2026. Toto nariadenie zavádza požiadavky na udržateľnosť obalov vrátane recyklovateľnosti a smeruje k tomu, aby všetky obaly uvádzané na trh boli recyklovateľné [4].

Súčasný stav technológie preto ukazuje určitý kompromis medzi funkčnosťou a udržateľnosťou. Materiály s veľmi dobrými bariérovými vlastnosťami často využívajú zložitejšie štruktúry alebo anorganické vrstvy, zatiaľ čo jednoduchšie a ľahšie recyklovateľné systémy spravidla nedosahujú najvyššie úrovne bariérovej ochrany. Kľúčovou úlohou výskumu je preto hľadať také riešenia, ktoré umožnia priblížiť sa požadovaným funkčným parametrom bez neúmerneho zhoršenia recyklovateľnosti, kompostovateľnosti alebo ekonomickej realizovateľnosti materiálu [9].

Za dôležitý aspekt treba považovať aj technologickú reprodukovateľnosť. Výborný laboratórny výsledok ešte neznamená, že rovnakú kvalitu bude možné dlhodobo dosahovať aj pri kontinuálnom priemyselnom nanášaní.

Prechod z laboratórnych podmienok do pilotného alebo priemyselného meradla je preto jednou z hlavných výziev pri vývoji nových bariérových systémov na báze papiera a biodegradovateľných polymérov.

5 Biodegradovateľné polymérové fólie

Pri hľadaní čo najtenších priemyselne vyrobiteľných biodegradovateľných polymérových fólií sa medzi perspektívne materiály zaraďujú najmä PLA, PHB a PHBV, PBS, PCL, termoplastický škrob a vybrané celulóзовé materiály. Tieto polyméry sa odlišujú nielen spracovateľnosťou a mechanickými vlastnosťami, ale aj úrovňou bariérových parametrov a citlivosťou na vlhkosť. V súčasnej praxi patrí PLA medzi najviac využívané biopolyméry pre obalové aplikácie a jeho využitie vo forme vodných disperzií pre hydrofóbne povlaky na papier predstavuje jednu z perspektívnych ciest vývoja bariérových vrstiev [3].

Vyrobená tenká biodegradovateľná fólia z nami doteraz dostupných surovínových zdrojov s hrúbkou 14 μm dosiahla bariérové vlastnosti $\text{OTR } 3250 \text{ cm}^3/\text{m}^2.\text{deň}$ a $\text{WVTR} > 100 \text{ g}/\text{m}^2.\text{deň}$, čo zodpovedá veľmi vysokým hodnotám z pohľadu náročnejších obalových aplikácií. Na základe toho možno predpokladať, že takáto fólia by v súčasnej podobe neplnila funkciu hlavnej bariérovej vrstvy, ale skôr tesniacej alebo spojovacej vrstvy vo viacvrstvovom systéme. Na trhu však existujú obalové fólie s výrazne lepšími bariérovými vlastnosťami, ktoré tieto parametre dosahujú využitím viacvrstvových technológií a funkčných nebiodegradovateľných alebo anorganických vrstiev.

Tento výsledok je však pre výskum dôležitý, pretože ukazuje reálne limity samostatnej biodegradovateľnej fólie pri malej hrúbke. Z hľadiska konštrukcie obalu totiž nie je vždy nevyhnutné, aby každá vrstva plnila všetky funkcie súčasne. Aj materiál s nedostatočnou bariérou môže mať v štruktúre význam ako tesniaca, spojovacia, mechanicky stabilizačná alebo technologická vrstva. Z tohto pohľadu môže byť aj takáto fólia zaujímavou súčasťou viacvrstvového systému, ak bude doplnená o ďalšiu vrstvu zabezpečujúcu požadovanú bariérovú ochranu.

Jednou z možností je použitie metalizačných alebo oxidických vrstiev, ktoré dokážu výrazne znížiť prestup kyslíka a vodnej pary cez obalový materiál. Pri potravinárskych obaloch sa často využívajú najmä vrstvy na báze hliníka, oxidu hlinitého (AlOx) alebo oxidu kremičitého (SiOx), pričom AlOx vrstvy sú známe tým, že aj pri veľmi malej hrúbke významne zlepšujú bariérové vlastnosti substrátu [7]. Fólie alebo funkčné vrstvy sa na povrch nosného papiera aplikujú najmä laminovaním, extrúziou alebo povlakovaním. V prípade metalizačných vrstiev sa ako najbežnejšie priemyselné postupy používajú vákuové depozičné techniky. Z pohľadu nášho výskumu sa preto ako uvažovaná cesta javí jednovrstvová metalizačná alebo oxidická vrstva na báze AlOx alebo hliníka pripravená vákuovým nanášaním z pary [7].

Výhodou oxidických vrstiev, ako je AlOx alebo SiOx , je najmä možnosť dosiahnuť vysoký bariérový účinok pri veľmi malej hrúbke povlaku. Zároveň však ide o vrstvy citlivé na technologické spracovanie a následné konverzné operácie, ako sú navíjanie, rezanie, tlač, laminácia alebo ďalšie povlakovanie. Výsledný výkon bariérového systému preto nezávisí len od samotného depozičného procesu, ale aj od toho, ako si vrstva zachová integritu pri ďalšom spracovaní materiálu [7], [11].

Pokiaľ ide o kompostovateľnosť, túto vlastnosť nemožno posudzovať iba podľa prítomnosti jednej zložky, ale podľa správania celého materiálového systému. Certifikácie OK compost HOME a OK compost INDUSTRIAL vychádzajú z požiadaviek na biodegradáciu, rozpad a ekotoxicitu, preto bude potrebné pri navrhovaných obalových systémoch overovať nielen

bariérové vlastnosti, ale aj ich kompostovateľnosť [8]. Z dôvodu recyklovateľnosti je však stále výhodnejšie, ak materiál obalu obsahuje čo najmenej komponentov. Rozvláknenie papierovej buničiny je technologicky zvládnutý proces, zatiaľ čo viacvrstvové kombinácie s polymérnymi alebo anorganickými vrstvami zvyšujú nároky na separáciu jednotlivých zložiek. Aj preto preverujeme možnosť vytvárania funkčných vrstiev dostupnejšími technológiami, napríklad pomocou ultrazvuku. Ultrazvukové techniky sa však v súčasnosti skôr považujú za doplnkové alebo experimentálne riešenia, nie za plnohodnotnú náhradu štandardných vákuových metalizačných procesov pri vysoko-bariérových potravinárskych obaloch.

Z pohľadu ďalšieho smerovania výskumu sa preto ako kľúčové javia tri vzájomne prepojené oblasti. Prvou je optimalizácia samotnej bio-degradovateľnej vrstvy tak, aby bola technologicky spracovateľná pri čo najmenšej hrúbke. Druhou je vývoj funkčnej bariérovej vrstvy, ktorá výrazne zníži OTR a WVTR bez výrazného zhoršenia recyklovateľnosti alebo kompostovateľnosti celého systému. Treťou je overenie, či možno tieto vrstvy nanášať technológiami, ktoré budú ekonomicky a technicky realizovateľné aj mimo laboratórnych podmienok.

6 Záver

Na základe doterajších poznatkov možno konštatovať, že vývoj biologicky odbúrateľných bariérových obalov na papierovej báze predstavuje perspektívny, ale technologicky náročný smer výskumu. Samotný papier neposkytuje dostatočné bariérové vlastnosti pre náročnejšie potravinárske aplikácie, preto je potrebné jeho vlastnosti zlepšovať pomocou funkčných povlakov a viacvrstvových štruktúr.

Doterajšie výsledky zároveň ukazujú, že dosiahnutie veľmi nízkych hodnôt OTR a WVTR výlučne pomocou biodegradovateľných materiálov je stále obmedzené, najmä pri priemyselne realizovateľných riešeniach. Ako perspektívna sa preto javí kombinácia papierového substrátu s tenkými funkčnými vrstvami, v ktorej jednotlivé vrstvy plnia rozdielne úlohy.

Ďalší výskum by sa mal zamerať na optimalizáciu bariérových vrstiev, výber vhodnej technológie nanášania a zároveň na posúdenie recyklovateľnosti a kompostovateľnosti výsledného obalového systému.

PodĎakovanie

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

Literatúra

- [1] WANG, W., GU, F., DENG, Z., ZHU, Y., ZHU, J., GUO, T., SONG, J., XIAO, H. (2021): Multilayer surface construction for enhancing barrier properties of cellulose-based packaging. In: *Carbohydrate Polymers*, 255, 117431. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.117431.
- [2] DXC Pack: Přehled bariérových vlastností OTR & WVTR flexibilních obalů. Dostupné na: dxcpack.com/cs/overview-of-barrier-properties-otr-wvtr-of-flexible-packaging/. Citované 21. 4. 2026.
- [3] CALOSI, M., D'IORIO, A., BURATTI, E., CORTESI, R., FRANCO, S., ANGELINI, R., BERTOLDO, M. (2024): Preparation of high-solid PLA waterborne dispersions with PEG-PLA-PEG block copolymer as surfactant and their use as hydrophobic coating on paper. In: *Progress in Organic Coatings*, 193, 108541. doi: 10.1016/j.porgcoat.2024.108541.

- [4] Nariadenie (EÚ) 2025/40 Európskeho parlamentu a Rady z 19. decembra 2024 o obaloch a odpade z obalov, ktorým sa mení nariadenie (EÚ) 2019/1020 a smernica (EÚ) 2019/904 a zrušuje smernica 94/62/ES. *Úradný vestník Európskej únie*, 2025.
- [5] Kemira: Barrier coatings. Dostupné na: kemira.com/products/barrier-coatings/. Citované 21. 4. 2026.
- [6] EUROSAC, CEPI Eurokraft (2023): *Paper Sacks – Design for Recyclability Guidelines*. Dostupné na: eurosac.org/fileadmin/pdf/esg_end_of_life/2023-08_EUROSAC_CEPI-Eurokraft_Design-Recyclability-Guidelines.pdf. Citované 21. 4. 2026.
- [7] STRULLER, C. F., KELM, V., ROTH, S., SCHMID, M. (2014): Aluminum oxide barrier coatings on polymer films for food packaging applications. In: *Surface and Coatings Technology*, 241, 130–137. doi: 10.1016/j.surfcoat.2013.12.011.
- [8] TÜV AUSTRIA: OK compost HOME; OK compost INDUSTRIAL. Dostupné na: okcert.tuvaustria.com. Citované 21. 4. 2026.
- [9] JAHANGIRI, F., SHARMA, M., GHAFAR, S. H., SADEGHI, M., et al. (2024): Sustainable biodegradable coatings for food packaging. In: *Green Chemistry*, 26. doi: 10.1039/D3GC02647G.
- [10] SHARBAFIAN, F., BAUER, F., SCHMID, M. (2024): Investigation and Comparison of Alternative Oxygen Barrier Coatings for Flexible PP Films as Food Packaging Material. In: *Coatings*, 14(9), 1086.
- [11] STRULLER, C. F., KELM, V., SCHMID, M. (2019): Conversion of aluminium oxide coated films for food packaging applications. In: *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 162–170.

Zhrnutie

Biodegradable Packaging for the Food Industry, Biodegradable packaging for the food industry has become increasingly important due to the need to reduce plastic waste and improve environmental sustainability. This paper focuses on biodegradable barrier materials for food packaging, especially their oxygen transmission rate (OTR) and water vapor transmission rate (WVTR), which strongly influence product shelf life. Paper and cellulose-based materials are biodegradable and recyclable, but they usually have insufficient barrier properties and low moisture resistance. The study reviews promising materials such as PLA, chitosan, nanocellulose, and multilayer structures that can improve packaging performance. It also highlights that current biodegradable films still do not reach the barrier values required for highly sensitive food products. Therefore, combining paper substrates with additional coating or functional layers appears to be the most suitable solution for future development.

Kľúčové slová

Biodegradovateľné obaly, rýchlosť priepustnosti kyslíka (OTR), rýchlosť priepustnosti vodnej pary (WVTR), Biodegradovateľná fólia, Metalizačná vrstva,
Biodegradable packaging, oxygen transmission rate (OTR), water vapor transmission rate (WVTR), biodegradable film, metallized layer

Kontaktné adresy

Tibor Pásztor
Výskumný ústav papiera a celulózy a.s.
Dúbravská cesta 14
841 04 Bratislava 4, Slovak Republic
pasztor@vupc.sk

Daniela Majerčáková, Katarína Kalužná
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského
Mlynská dolina F1
842 48 Bratislava
daniela.majercakova@fmph.uniba.sk

POROVNANIE OBSAHOV MAKROŽIVÍN A MIKROŽIVÍN V RAŠELINE PO PRIDANÍ DREVNÉHO POPOLA

Laura Korčoková, Jana Luptáková, Slávka Tóthová, Ivan Horvát, Elena Takáčová, Vladimír Mačejovský, Helena Hybská

1 Úvod

Drevný popol, účinný zdroj minerálov, sa vyrába čiastočným spaľovaním dreva, ktoré obsahuje organické a anorganické zlúčeniny (BALOCH, S. B., et al., 2024). Ročná produkcia drevného popola sa odhaduje na približne 480 – 500 miliónov ton (SZOSTEK, M., et al., 2023). Drevný popol sa často považuje za odpadový produkt a veľká časť vyrobeného drevného popola sa preto ukladá na skládky (BANG-ANDREASEN, T., et al., 2017). Skládkovanie zaberá pôdu, ovplyvňuje krajinu a tým aj životné prostredie (LUPTÁKOVÁ, J., TÓTHOVÁ, S., 2024). Preto je potrebné nájsť vhodné spôsoby recyklácie drevného popola za účelom zníženia jeho skládkovania podľa princípov cirkulárnej ekonomiky (LUPTÁKOVÁ, J., et al., 2025). Popol z dreva produkovaný spaľovaním je obzvlášť sľubný, pretože zvyšuje pH pôdy a poskytuje živiny, ako je vápnik, horčík, draslík a fosfor (RODRÍGUEZ, Y., et al., 2019). Vysoký obsah vápnika a draslíka niekedy aj sodíka zabezpečuje charakteristickú zásaditosť (pH 7,8 – 13,5) drevného popola, preto sa používa na zmiernenie kyslosti pôdy (ASARE, M. O., HEJCMAN, M., 2022). Zloženie živín v drevnom popole do značnej miery závisí od použitého druhu stromu, či už pochádza z kôry alebo dreva, ako aj od účinnosti procesu spaľovania (BALOCH, S. B., et al., 2024). Recyklácia popola z biomasy môže zabezpečiť využitie popola, čo by mohlo vyriešiť problémy s jeho likvidáciou a znížiť spotrebu komerčných hnojív, ktoré sa používajú na plodinách. Využitie drevného popola je napríklad v stavebníctve, pri úprave pôdy alebo kompostovaní (KORČOKOVÁ, L., et al., 2025).

V Národnom lešníckom centre prebieha medzinárodný projekt Upgrade LignoSilva (Horizon Europe). Tento projekt sa venuje recyklácii živín z drevného popola v agrolesníctve. Demonštračné ukážky, ktoré boli založené v rámci projektu, sa nachádzajú v Biotechnologickom parku Stráž (BTP Stráž) a vo Výskumnej stanici v Gabčíkove (VS Gabčíkovo). V Biotechnologickom parku Stráž sa založili tri ukážky. V prvej ukážke bola zmiešaná rašelina s drevným popolom v dvoch rôznych pomeroch. Do zmiešanej výslednej zmesi boli zasadené tri dreviny, borovica lesná, smrekovec opadavý a buk lesný, ktoré sú pestované vo fóliovníku. V druhej ukážke bol drevný popol aplikovaný na pole, v dvoch rôznych množstvách, kde boli zasadené rovnaké tri dreviny. V tretej ukážke sa postupovalo rovnako ako pri prvej ukážke, ale popol bol nahradený celulóзовým kalom. Aj vo Výskumnej stanici v Gabčíkove boli založené tri ukážky. Pri prvej ukážke sa postupovalo rovnako ako pri založení prvej ukážky v BTP Stráž, ale dreviny tam boli vysadené – dub letný, lipa malolistá a brest väzový. V druhej ukážke boli tieto isté dreviny vysadené na pole v areáli VS v Gabčíkove a následne boli aplikované zmesi drevného popola a rašeliny. V tretej ukážke sa uskutočňuje kompostovanie použitím štiepky, pokosenej trávy a drevného popola.

Cieľom práce je posúdiť vplyv zmeny pH substrátov na dostupnosť makroživín a mikroživín pre rastliny.

2 Materiál a metódy

2.1 Materiál

Popol použitý v demonštračnej ukážke bol získaný z prevádzky spaľujúcej drevnú štiepku za účelom výroby energie, nachádzajúcej sa v Hriňovej (Hriňovská energetická s. r. o.) na Slovensku. Použitý bol iba roštový popol, ktorý síce obsahuje menej výživových prvkov, ale aj menej rizikových prvkov. Na tento druh popola získal producent povolenie, že môže byť použitý ako pôdna pomocná látka. Na prípravu substrátov bola použitá komerčne dostupná rašelina od producenta Gramoflor GmbH & Co KG. Substráty boli pripravené zmiešaním v plastovej nádobe v dvoch pomeroch, a to 0,5 kg drevného popola na 1 kg rašeliny (RPM) a 0,75 kg drevného popola na 1 kg rašeliny (RP+). Tieto substráty boli naplnené do sadbovačov, umiestnené do plnoautomaticky zavlažovaného fóliovníka a následne boli zasadené semená borovice lesnej.

Z drevného popola a rašeliny boli odobraté po štyri vzorky pred aplikáciou popola. Ďalšie vzorky boli odobraté z pripravených substrátov po aplikácii drevného popola po cca 1,5 mesiaci a následne v cca mesačných intervaloch vždy v štyroch replikátoch.

3 Metódy

3.1 Predúprava vzoriek

Vzorky boli po prijatí do laboratória predupravené podľa ČSN ISO 11464 (2011). Tento postup zahŕňa sušenie, drvenie a sitovanie vzoriek. Všetky analýzy boli vykonané z takto predupravených vzoriek.

3.2 Stanovenie obsahov prvkov

Prístupné obsahy prvkov boli stanovené vo výluhu Mehlich III., ktorý bol pripravený podľa Zbírka (2010). Celkové obsahy prvkov boli stanovené v mineralizáte lúčavky kráľovskej pripravenom podľa STN ISO 11466 (2001). Výluhy a mineralizáty boli následne zmerané na ICP-AES 725 Varian (STN EN ISO 11885). Získané výsledky boli vyhodnotené softwarom ICP Expert II 1.1.3.263 a prerátané na sušinu, ktorá bola získaná sušením vzoriek v sušiarňi VENTI-line 180 Prime pri teplote 105 ± 5 °C do konštantnej hmotnosti podľa STN ISO 11465 (2001).

3.3 Štatistické vyhodnotenie

Základné popisné štatistiky boli vypočítané v programe MS Excel 2016. Následne bola na štatistické zhodnotenie výsledkov použitá jednofaktorová analýza rozptylu (ANOVA) a Duncanov test mnohonásobných porovnaní použitím Tibco Statistica 14. Ako hodnotiace kritérium bola použitá hladina významnosti 95 % ($p = 0,05$).

4 Výsledky a diskusia

Vo vzorkách drevného popola a rašeliny boli stanovené obsahy makroživín a mikroživín. Následne boli stanovené obsahy prvkov aj v zmesiach drevného popola a rašeliny. Získané výsledky sú zhrnuté v Tabuľke 1. a Tabuľke 2. Drevný popol použitý v tejto demonštračnej ukážke mal vysoký obsah vápnika, draslíka, horčíka a fosforu. Pri prvkoch horčík, vápnik, sodík, meď a zinok pozorujeme nízky pomer celkových a prístupných prvkov v drevnom popole a naopak pri prvkoch draslík, fosfor, železo a mangán pozorujeme vyšší pomer. Z tabuliek môžeme vidieť, že pomery celkového a prístupného horčíka, vápnika, sodíka, medi, zinku a železa v čistom drevnom popole, čistej rašeline a aj v ich zmesiach v časovom období signifikantne klesajú (p -hodnota Duncanovho testu $< 0,05$). Pomer celkového a prístupného draslíka signifikantne stúpa (p -hodnota Duncanovho testu $< 0,05$).

V substráte RP+ pomer celkového a prístupného fosforu a mangánu signifikantne klesá (p -hodnota Duncanovho testu $< 0,05$) a pri substráte RPM pomer fosforu a mangánu signifikantne stúpa (p -hodnota Duncanovho testu $< 0,05$).

Dostupnosť niektorých živín pre rastliny závisí od pôdnej reakcie. Drewný popol je zásaditý s pH zvyčajne 10 – 12. Po jeho aplikácii do rašeliny pri príprave substrátov došlo k postupnému zvyšovaniu ich pH. Pri zmene pH sa mení podiel formy živín prístupnej pre rastliny. Podľa literatúry, ak sa pH pôdy zvýši z 5,5 na 7,5, môže obsah výmenného horčíka stúpnuť aj o viac ako 50 % (DASH, M., et al., 2023). Najväčší podiel vápnika je dostupný pri neutrálnom pH, draslíka pri kyslom pH, sodíka pri zásaditom pH (IRABOR, E. E. I., et al., 2023). Podobne je pH 6,5 – 7,5 rozmedzie, v ktorom je fosfor ľahko dostupný pre rastliny (PARAMISPARAM, P., et al., 2021). Podľa našich výsledkov sa pomer celkového a prístupného horčíka, vápnika, sodíka, medi, zinku a železa v substrátoch znižoval s postupným zvyšovaním pH, čiže sa zvyšoval obsah prístupných prvkov, pomer celkového a prístupného draslíka mal opačný trend, čo je v zhode s týmito štúdiami. V kyslých pôdach železo a hliník fixujú fosfor, čím sa fosfor stáva nedostupným pre rastliny, na druhej strane, pri vysokom pH sa tvoria vápenaté fosfáty (JOHAN, P. D., et al., 2021).

Táto interakcia fosforu s vápnikom môže vysvetliť pozorované trendy v substrátoch rašeliny a drewného popola. Pri pH pôdy vyššom ako 7,5 sa znižuje množstvo prístupných mikroživín ako sú železo, mangán, zinok a meď z dôvodu tvorby nerozpustných hydroxidov a uhličitanov (KHALED, F., SAYED, A., 2023). Niektoré z týchto zlúčenín sú nerozpustné aj v lúčavke kráľovskej (GAUDINO, S., et al., 2007), čo môže vysvetliť pozorované zníženie ako aj celkových obsahov týchto prvkov, tak aj prístupných obsahov v pripravených substrátoch.

Tabuľka 1. Pomer obsahu celkových a prístupných makroživín v drewnom popole, rašeline a ich zmesiach

	Horčík pomer	Vápnik pomer	Draslík pomer	Fosfor pomer	Sodík pomer
Drewný popol	8,81 ± 0,18	7,96 ± 0,26	24,42 ± 0,42	19,85 ± 0,56	5,23 ± 0,08
Rašelina	0,75 ± 0,03	0,86 ± 0,02	1,68 ± 0,09	15,67 ± 1,07	1,98 ± 0,11
RPM 25.3.24	4,58 ± 0,11	3,73 ± 0,11	8,28 ± 0,10	11,54 ± 0,22	13,51 ± 0,42
RPM 9.4.24	4,18 ± 0,02	4,11 ± 0,02	11,38 ± 0,05	12,94 ± 0,14	5,20 ± 0,03
RPM 7.5.24	5,48 ± 0,06	6,36 ± 0,04	14,93 ± 0,08	16,39 ± 0,10	5,99 ± 0,06
RPM 10.6.24	5,51 ± 0,10	6,15 ± 0,13	15,25 ± 0,27	16,03 ± 0,19	4,44 ± 0,05
RPM 11.7.24	3,65 ± 0,03	4,02 ± 0,03	13,87 ± 0,08	14,63 ± 0,16	3,88 ± 0,07
RPM 20.8.24	3,59 ± 0,06	4,50 ± 0,07	18,81 ± 0,18	15,39 ± 0,29	3,73 ± 0,06
RPM 19.9.24	3,60 ± 0,03	4,49 ± 0,03	18,83 ± 0,20	15,17 ± 0,32	3,46 ± 0,05
RPM 11.11.24	3,71 ± 0,02	4,48 ± 0,02	20,63 ± 0,13	15,85 ± 0,20	4,17 ± 0,03
RP+ 25.3.24	5,60 ± 0,12	4,08 ± 0,04	9,78 ± 0,17	15,26 ± 0,17	12,44 ± 0,53
RP+ 9.4.24	4,83 ± 0,02	4,15 ± 0,03	10,90 ± 0,04	14,13 ± 0,11	5,00 ± 0,13
RP+ 7.5.24	5,04 ± 0,12	6,45 ± 0,06	14,09 ± 0,27	16,53 ± 0,42	5,18 ± 0,05
RP+ 10.6.24	5,27 ± 0,09	6,10 ± 0,10	13,12 ± 0,15	17,11 ± 0,26	4,51 ± 0,07
RP+ 11.7.24	4,03 ± 0,03	4,19 ± 0,05	16,02 ± 0,19	12,67 ± 0,14	4,04 ± 0,02
RP+ 20.8.24	3,91 ± 0,05	4,49 ± 0,02	15,03 ± 0,28	11,59 ± 0,18	4,07 ± 0,06
RP+ 19.9.24	3,82 ± 0,05	4,71 ± 0,02	15,25 ± 0,30	12,08 ± 0,12	3,44 ± 0,02
RP+ 11.11.24	4,25 ± 0,05	4,70 ± 0,03	18,41 ± 0,50	13,26 ± 0,13	4,27 ± 0,02

Tabuľka 2. Pomer obsahu celkových a prístupných mikroživín v drevnom popole, rašelini a ich zmesiach

	Meď pomer	Zinok pomer	Železo pomer	Mangán pomer
Drevný popol	9,23 ± 0,24	5,50 ± 0,34	80,48 ± 1,86	26,53 ± 0,78
Rašelina	3,19 ± 0,15	1,27 ± 0,02	1,83 ± 0,03	1,71 ± 0,04
RPM 25.3.24	4,81 ± 0,16	2,27 ± 0,08	25,12 ± 0,32	8,63 ± 0,31
RPM 9.4.24	6,37 ± 0,18	3,53 ± 0,02	21,35 ± 0,39	8,25 ± 0,07
RPM 7.5.24	7,71 ± 0,24	4,58 ± 0,05	27,64 ± 0,17	10,48 ± 0,13
RPM 10.6.24	6,50 ± 0,09	2,96 ± 0,03	28,55 ± 0,11	9,69 ± 0,10
RPM 11.7.24	6,29 ± 0,04	2,25 ± 0,05	22,11 ± 0,15	11,12 ± 0,10
RPM 20.8.24	6,61 ± 0,02	2,90 ± 0,06	21,23 ± 0,31	11,23 ± 0,19
RPM 19.9.24	5,10 ± 0,09	2,59 ± 0,03	21,26 ± 0,11	8,85 ± 0,13
RPM 11.11.24	5,75 ± 0,04	2,66 ± 0,02	26,92 ± 0,21	10,10 ± 0,07
RP+ 25.3.24	5,50 ± 0,20	3,83 ± 0,22	35,43 ± 0,88	10,54 ± 0,13
RP+ 9.4.24	6,27 ± 0,09	1,99 ± 0,02	41,19 ± 0,34	8,63 ± 0,08
RP+ 7.5.24	5,56 ± 0,06	2,98 ± 0,05	34,39 ± 0,67	9,20 ± 0,30
RP+ 10.6.24	10,21 ± 0,38	2,87 ± 0,04	34,15 ± 0,18	9,80 ± 0,11
RP+ 11.7.24	6,47 ± 0,14	2,81 ± 0,01	23,70 ± 0,16	10,18 ± 0,08
RP+ 20.8.24	5,65 ± 0,07	2,70 ± 0,05	25,40 ± 0,32	9,87 ± 0,21
RP+ 19.9.24	4,63 ± 0,02	2,51 ± 0,07	25,60 ± 0,24	8,25 ± 0,20
RP+ 11.11.24	6,29 ± 0,03	2,86 ± 0,05	34,77 ± 0,22	10,24 ± 0,10

Záver

V tomto príspevku boli sledované zmeny pomerov obsahov celkových a prístupných makroživín a mikroživín v drevnom popole, rašelini a ich zmesiach. Drevný popol, ktorý bol použitý pri demonštračných ukážkach bol získaný z prevádzky spaľujúcej drevnú štiepku za účelom výroby energie nachádzajúcej sa v Hriňovej (Hriňovská energetická s. r. o.). Zmesi rašeliny a popola boli pripravené zmiešaním v plastovej nádobe v dvoch pomeroch, a to 0,5 kg drevného popola na 1 kg rašeliny (RPM) a 0,75 kg drevného popola na 1 kg rašeliny (RP+). V oboch zmesiach RP+ 1 : 0,75 a RPM 1 : 0,50 sa pomery signifikantne zmenili už po prvom mesiaci po pridaní popola do rašeliny. Drevný popol použitý v tejto demonštračnej ukážke mal vysoký obsah vápnika, draslíka, horčíka a fosforu. V pravidelných intervaloch sa vzorky naďalej odoberajú a budú z nich urobené ďalšie analýzy. Taktiež budú vyskúšané aj iné pomery zmiešania drevného popola s rašelinou.

Podakovanie

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

Literatúra

- ASARE, M. O., HEJCMAN, M. 2022. Effect of tree species on the elemental composition of wood ashes and their fertilizer values on agricultural soils. In *GCB Bioenergy*, 14, s. 1321 – 1335.
- BALOGH, S. B., ALI, S., BERNAS, J., MOUDRÝ, J., KONVALINA, P., MUSHTAQ, Z., MURINDANGABO, Y. T., ONYEBUCHI, E. F., BALOGH, F. B., AHMAD, M., SAEED, Q., MUSTAFA, A. 2024. Wood ash application for crop production, amelioration of soil acidity and contaminated environments. In *Chemosphere*, 357, 141865.
- BANG-ANDREASEN, T., NIELSEN, J. T., VORISKOVA, J., HEISE, J., RONN, R., KJOLLER, R., HANSEN, H. C. B., JACOBSEN, C. S. 2017. Wood Ash Induced pH Changes Strongly Affect Soil Bacterial Numbers and Community Composition. In *Frontiers in Microbiology*, 8.

ČSN ISO 11464:2011. Kvalita pudy – Úprava vzorku pro fyzikálne-chemické rozboru.

DASH, M., THIYAGESHWARI, S., SELVI, D., ANANDHAM, R., RAJAN, K., MADURAIMUTHU, D., SINGH, S. K., MUTHUMANI, J., SINGH, S., PRAMANICK, B. 2023. Unravelling the Release Kinetics of Exchangeable Magnesium in Acid Soil of Nilgiris. In *Sustainability*, 15, 9848.

GAUDINO, S., GALAS, CH., BELLI, M., BARBIZZI, S., ZORZI, P. D., JACIMOVIC, R., JERAN, Z., PATI, A., SANSONE, U. 2007. The role of different soil sample digestion methods on trace elements analysis: a comparison of ICP-MS and INAA measurement results. In *Accred Qual Assur*, 12, s. 84 – 93.

IRABOR, E. E. I., ESANUKPE, L., IMAFIDON, M. I., OGBEIDE, O. K., OKUNZUWA, I. G., UNUIGBE, CH. A., OMORUYI, U. 2023. Evaluation of the Influence of pH on the Release of Exchangeable Cations from a Mixed Clay Mineral Deposit for Replenishment of Soil Nutrients. In *Walisongo Journal of Chemistry*, Vol. 6, Issue 1, s. 87 – 96, ISSN: 2621-5985.

KHALED, F., SAYED, A. 2023. Soil pH and its influence on nutrient availability and plant health. In *International Journal of Advanced Chemistry Research*, 5 (2), s. 61 – 63.

JOHAN, P. D., AHMED, O. H., OMAR, L., HASBULLAH, N., A. 2021. Phosphorus Transformation in Soils Following Co-Application of Charcoal and Wood Ash. In *Agronomy*, 11, 2010.

KORČOKOVÁ, L., LUPTÁKOVÁ, J., TÓTHOVÁ, S., HORVÁT, I., MAČEJOVSKÝ, V., TAKÁČOVÁ, E., HYBSKÁ, H. 2025. Vplyv aplikácie drevného popola na obsah uhlíka, dusíka a síry v rašeline. In *Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin 2025 – Ústav ekológie lesa Slovenskej akadémie vied*, v. v. i., 17. – 18.9.2025, s. 110 – 115, ISBN: 978-80-89408-39-9.

LUPTÁKOVÁ, J., KORČOKOVÁ, L., TÓTHOVÁ, S., HORVÁT, I., MAČEJOVSKÝ, V., TAKÁČOVÁ, E., HYBSKÁ, H. 2025. Zmeny obsahov makroživín a mikroživín v rašeline po pridání drevného popola. In *Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin 2025 – Ústav ekológie lesa Slovenskej akadémie vied*, v. v. i., 17. – 18.9.2025, s. 105 – 109, ISBN: 978-80-89408-39-9.

LUPTÁKOVÁ, J., TÓTHOVÁ, S. 2024. Zmeny vybraných ukazovateľov v rašeline po pridání drevného popola. In *Vliv abiotických a biotických stresorů na vlastnosti rostlin 2024 – Ústav ekológie lesa Slovenskej akadémie vied*, v. v. i., 11.–12.9.2024, s. 53 – 57, ISBN: 978-80-89408-38-2.

METSON, A. J. 2012. Some factors governing the availability of soil magnesium: A review. In *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, Vol. 2.

PARAMISPARAM, P., AHMED, O. H., OMAR, L., CH'NG, H. Y., JOHAN, P. D., HAMIDI, N. H. 2021. Co-Application of Charcoal and Wood Ash to Improve Potassium Availability in Tropical Mineral Acid Soils. In *Agronomy*, 11, 2081.

RODRÍGUEZ, Y., MAUDIER, B., ZAGAL, E., HERNÁNDEZ, P. 2019. Effects of Wood Ash on Nutrients and Heavy Metal(oid)s Mobility in an Ultisol. In *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16 (7), 1246.

STN EN ISO 11885:2009. Kvalita vody. Stanovenie vybratých prvkov optickou emisnou spektrometriou s indukčne viazanou plazmou (ICP-OES).

STN ISO 11465:2001, Kvalita pôdy. Stanovenie obsahu sušiny a hmotnostného obsahu vody. Gravimetrická metóda.

STN ISO 11466:2001. Kvalita pôdy. Extrakcia stopových prvkov rozpustných v lúčavke kráľovskej.

SZOSTEK, M., SZPUNAR-KROK, E., ILEK, A. 2023. Chemical Speciation of Trace Elements in Soil Fertilized with Biomass Combustion Ash and Their Accumulation in Winter Oilseed Rape Plants. In *Agronomy*, 13 (3), 942.

ZBÍRAL, J., HONSA, I. ET AL., 2010. *Analýza půd I, Jednotné pracovní postupy*. 3. vydanie. Brno: Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský. 290 s. ISBN 978-80-7401-031-6.

Zhrnutie

Comparison of macroelements and microelements contents in peat after application of wood ash. In this article, changes in the contents of total and accessible macroelements and microelements in wood ash, peat and their mixtures were monitored. The wood ash used in the demonstration cases was obtained from a wood chip burning plant for energy production located in Hriňová (Hriňovská energetická s. r. o.). The mixtures of peat and wood ash were prepared by mixing in a plastic container in two ratios: 0.5 kg of wood ash per 1 kg of peat (RPM) and 0.75 kg of wood ash per 1 kg of peat (RP+). In both mixtures, RP+ 1:0.75 and RPM 1:0.50, the ratios changed significantly after the first month after adding wood ash to the peat. The wood ash used in this demonstration cases had a high content of calcium, potassium, magnesium and phosphorus. Samples will continue to be taken at regular intervals, and further analyses will be performed on them. Other mixing ratios of wood ash to peat will also be tested.

Kľúčové slová

recyklácia, drevný popol, rašelina, makroživiny, mikroživiny
recycling, wood ash, peat, macroelements, microelements

Kontaktné adresy

Ing. Laura Korčoková, RNDr. Jana Luptáková, PhD.
Centrálné lesnícke laboratórium
Sekcia pre vedu a výskum
Národné lesnícke centrum
T.G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovak Republic
laura.korcokova@nlcsk.org, jana.luptakova@nlcsk.org

RNDr. Slávka Tóthová, PhD.
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Sekcia pre vedu a výskum
Národné lesnícke centrum
T.G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovak Republic
slavka.tothova@nlcsk.org

Ing. Ivan Horvát, Ing. Elena Takáčová, Ing. Vladimír Mačejovský, PhD.
Kontrola lesného reprodukčného materiálu
Sekcia pre vedu a výskum
Národné lesnícke centrum
T.G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovak Republic
ivan.horvat@nlcsk.org, elena.takacova@nlcsk.org, vladimir.macejovsky@nlcsk.org

doc. Ing. Helena Hybská, PhD.
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 01 Zvolen, Slovak Republic
hybska@tuzvo.sk

INTELIGENTNÉ RIEŠENIE PRE ONLINE SPRÁVU ÚDAJOV V PAPIERENSKEJ VÝROBE

Vendelín František Skokan, Patrik Pitka Kester

1 Úvod

Tento príspevok predkladá analýzu papierenského priemyslu, pričom sleduje jeho evolúciu a taktiež súčasnú éru pokročilej produkcie riadenej umelou inteligenciou (AI). Ústredným motívom textu je transformačný vplyv umelej inteligencie (AI) na toto priemyselné odvetvie. V kontexte rastúcich nákladov, prísnych environmentálnych regulácií a zvyšujúcich sa nárokov na kvalitu a udržateľnosť využívajú výrobcovia papiera nástroje AI na optimalizáciu procesov, zvýšenie uniformity produktov a zníženie množstva odpadu. Integrácia pokročilých senzorov a analytiky založenej na AI umožňuje monitorovanie procesov v reálnom čase, prediktívnu údržbu a adaptívne riadenie. To umožňuje výrobným závodom pohotovo reagovať na meniace sa podmienky a predchádzať nákladným prestojom.

Práca charakterizuje kľúčové funkcie papierenských strojov, kritickú úlohu senzorov, vrátane technológií blízkej infračervenej spektroskopie (NIR) a výzvy spojené s tradičným riadením procesov, ako sú vysoká spotreba energie, variabilita kvality a spoľahlivosť zariadení. Ilustruje, ako AI tieto výzvy rieši odhaľovaním komplexných vzťahov v rámci procesov, čím umožňuje rozhodovanie založené na dátach a uľahčuje nepretržitú, autonómnou optimalizáciu.

Okrem toho sa príspevok zaoberá ekonomickými faktormi adopcie AI, najmä potrebou maximalizovať výkon a efektivitu v rámci fixných nákladových štruktúr, a strategickým významom digitálnej transformácie pre udržanie konkurencieschopnosti. Očakáva sa, že tieto inovácie prinesú zlepšenie v oblasti presnosti, efektívnosti a udržateľnosti, čím podporia pokračujúcu modernizáciu sektora výroby papiera.

V súhrne tento text poskytuje strategický rámec pre využitie AI a pokročilej automatizácie s cieľom smerovať papierenský priemysel k vyššej konkurencieschopnosti, odolnosti a environmentálnej zodpovednosti.

2 Úvod do AI

Moderné systémy riadenia strojov sa stávajú čoraz komplexnejšími, nakoľko pracujú v dynamickom, prepojenom a často nepredvídateľnom prostredí. Tradičné prístupy k riadeniu, hoci sú v jasne definovaných scenároch spoľahlivé, narádzajú na svoje limity pri narastajúcej variabilite systémov, vyšších požiadavkách na výkon a dopyte po väčšej miere autonómie (Åström, 2010; Dorf, 2011).

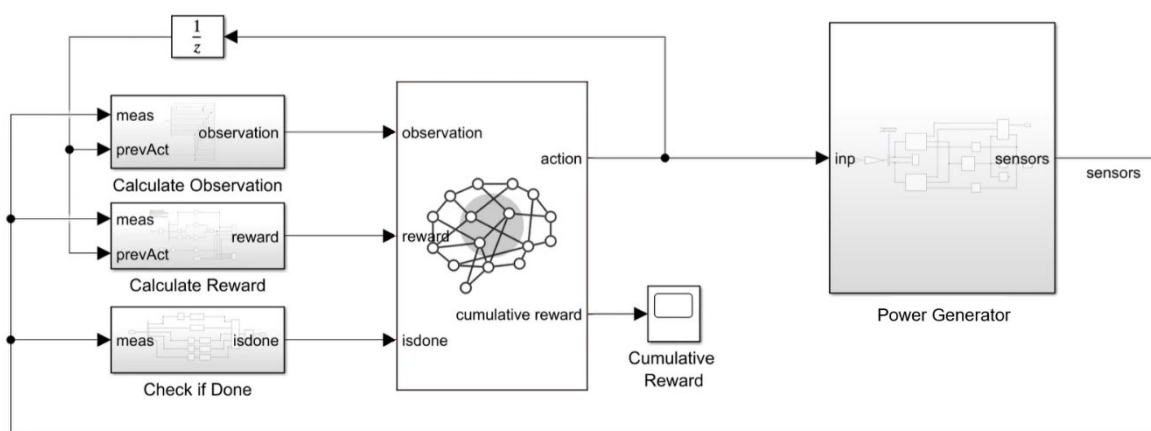
Súčasný priemyselný procesy často zahŕňajú rýchle zmeny prevádzkových podmienok, vykazujú prevažne nelineárne správanie systémov a generujú veľké objemy senzorových dát, ktoré presahujú možnosti konvenčných regulátorov založených na pevne stanovených pravidlách. V dôsledku toho sa zdokonaľovanie systémov riadenia strojov stalo nevyhnutným predpokladom na zaistenie bezpečnosti, efektívnosti a adaptability v širokom spektre aplikácií.

Umelá inteligencia (AI) ponúka súbor technológií schopných tieto obmedzenia efektívne riešiť. Prostredníctvom pokročilého rozpoznávania vzorov dokáže AI analyzovať heterogénne vstupy zo senzorov a detegovať jemné trendy, ktoré klasické riadiace jednotky môžu prehliadnuť (Goodfellow, 2016). To umožňuje vytvárať robustnejšie stratégie riadenia, a to aj v neistých alebo len čiastočne známych prostrediach.

Algoritmy strojového učenia umožňujú rozhodovanie v reálnom čase prostredníctvom neustálej adaptácie na nové informácie. Táto schopnosť je kritická pre autonómne stroje, robotické platformy a vysokorýchlostné výrobné systémy (Sutton, 2018). Okrem toho sa prediktívna údržba riadená AI ukázala ako silný nástroj na skracovanie prestojov. Modely totiž dokážu predpovedať zlyhania komponentov ešte pred ich vznikom, čo umožňuje optimalizovať plány údržby a výrazne znižovať prevádzkové náklady (Zhang, 2020).

2.1 Aplikácia a význam AI v priemysle

Integrácia AI do riadiacich systémov je kľúčová pre modernizáciu strojov na výrobu papiera, robotiku a energetiku. V papierenskom priemysle a automatizácii umožňujú AI regulátory vznik flexibilných línii, ktoré zvládajú variabilitu produktov bez nutnosti preprogramovania. V doprave zas podporujú autonómne riadenie a optimalizáciu tokov (Thrun, 2005). AI tak transformuje statické riadiace systémy na adaptívne rámce schopné neustáleho učenia.



Obrázok 1. Náčrt schémy použitia AI pre riadenie generátora

Z pohľadu Slovenska a EÚ je zavádzanie AI do riadenia strojov v súlade so stratégiami Priemysel 4.0 a 5.0, ktoré sa zameriavajú na kyberneticko-fyzikálne systémy a dátovú optimalizáciu (Kagermann, 2013; EK, 2021). Pre Slovensko, s jeho silným priemyselným zázemím, je modernizácia technológií nevyhnutná pre udržanie konkurencieschopnosti a efektivity zdrojov. Vývoj inteligentnejších riadiacich systémov preto nepredstavuje len technologickú výzvu, ale aj strategickú prioritu, ktorá tvorí základ pre autonómnu a udržateľnú priemyselnú budúcnosť Európy (Mittal, 2018).

2.2 Obmedzenia tradičných riadiacich systémov

Tradičné riadenie strojov sa spolieha na matematicky podložené techniky, ktoré však v modernom, dynamickom a na dáta bohatom prostredí narážajú na svoje limity. PID regulátory sú pre svoju jednoduchosť stále rozšírené, no ich účinnosť klesá pri nelineárnych systémoch s rýchlymi zmenami alebo dlhými dopravnými oneskoreniami (Åström, 2010). Modelové prediktívne riadenie (MPC) síce lepšie zvláda obmedzenia a viacrozmerné procesy, je však vysoko závislé od presných modelov a vyžaduje značný výpočtový výkon (Camacho, 2007). Metódy robustného riadenia, ako H_∞ or μ -syntéza, síce garantujú stabilitu pri neistotách modelu, v komplexných priemyselných systémoch však často vedú k príliš konzervatívnemu správaniu (Zhou, 1996). Tieto nedostatky podnecujú rastúci záujem o prístupy riadené AI, ktoré sa dokážu učiť priamo z dát a adaptovať sa na neurčitnosť prostredia.

3 Metódy riadenia založené na umelej inteligencii

Metódy riadenia založené na umelej inteligencii ponúkajú vyššiu mieru flexibility vďaka využitiu algoritmov strojového učenia, ktoré dokážu modelovať komplexnú dynamiku systémov a prispôbiť sa predtým nepoznaným alebo nenaučeným podmienkam (Hunt, 1992). Regulátory založené na neurónových sieťach môžu napríklad aproximovať nelineárne vzťahy medzi vstupom a výstupom a poskytovať plynulé riadiace zásahy aj v prípadoch, keď sú základné modely systému neúplné (Goodfellow, 2016). Tieto problémy možno riešiť aj pomocou posilňovaného učenia, ktoré preukázalo sľubné výsledky pri autonómnych systémoch vyžadujúcich nepretržitú adaptáciu, ako sú roboty a tiež pokročilé riadenie procesov (Kiumarsi, 2018; Levine, 2016). Adaptívne a samočinné regulátory využívajú online učenie na aktualizáciu svojich váh a identifikáciu predtým neznámych vzorcov v reálnom čase, čo umožňuje stabilnú prevádzku v nežiaducich alebo neistých podmienkach, ako aj pri degradácii komponentov. Existuje tiež napodobňovacie učenie, ktoré skracuje čas tréningu a zvyšuje bezpečnosť tým, že trénuje regulátory na základe predtým známych a funkčných riadiacich algoritmov.

Spomínané techniky umelej inteligencie sa čoraz častejšie zavádzajú do reálnych priemyselných aplikácií. Príkladom je CNC obrábanie a robotické ramená, kde adaptívne neurónové regulátory upravujú rýchlosti posuvu, dráhy nástrojov a trajektórie klbov. V strojoch na výrobu papiera sa riadiace systémy vylepšené o AI aplikujú na reguláciu napätia materiálu, optimalizáciu sušiacich sekcií a detekciu skorých známkov mechanického opotrebovania valcov a ložísk, čím sa zvyšuje presnosť a kompenzujú sa vonkajšie poruchy. Autonómne vozidlá sa spoliehajú na riadenie založené na učení pri navigácii, plánovaní trajektórie a vyhýbaní sa kolíziám vo vysoko dynamických prostrediach (Thrun, 2005). V priemyselnej výrobe prediktívna údržba s podporou AI identifikuje anomálie, odhaduje zostávajúcu životnosť zariadení a predchádza neplánovaným odstávkam (Zhang, 2020). Inteligentné výrobné systémy integrujú tieto technológie do kyberneticko-fyzikálnych výrobných liniek, kde zvyšujú kvalitu kontroly, zlepšujú plánovanie a optimalizujú spotrebu energie (Lee, 2015).

Momentálne využitie umelej inteligencie v strojárskom priemysle

Zatiaľ čo samotné monitorovanie spotreby energie poskytuje cenné vstupné údaje, skutočný prielom nastáva až pri aplikácii umelej inteligencie a strojového učenia, ktoré umožňujú tieto dáta interpretovať v širokom meradle. Pridaná hodnota AI v tomto kontexte spočíva predovšetkým v pokročilej detekcii anomálií, kde modely umelej inteligencie – najmä tie, ktoré využívajú analýzu časových radov a neurónové siete – dokážu identifikovať bežné prevádzkové vzorce jednotlivých zariadení. Po natrénovaní tieto modely nepretržite porovnávajú reálnu spotrebu energie s očakávanými normami, a ak systém zachytí odchýlky, dokáže automaticky označiť zariadenia na kontrolu ešte predtým, než dôjde k samotnej poruche.

Okrem samotnej detekcie umožňujú pokročilé algoritmy AI aj klasifikáciu chýb a analýzu ich koreňových príčin tým, že korelujú špecifické vzorce spotreby so známymi typmi porúch. Napríklad postupný a stabilný nárast odberu energie môže naznačovať opotrebovanie ložísk, zatiaľ čo prudké a nepravidelné špičky môžu signalizovať elektrické problémy. Prepojením historických záznamov o údržbe s údajmi o výkone dokáže systém AI často presne určiť pravdepodobnú príčinu, čo umožňuje údržbárskym tímom vykonať cielenejší zásah.

Tento prístup nakoniec umožňuje prechod od reaktívnej k prediktívnemu plánovaniu údržby. Vďaka predpovedaniu pravdepodobného času zlyhania zariadenia na základe historických trendov a aktuálnych anomálií môžu priemyselné podniky efektívnejšie plánovať opravy počas plánovaných odstávok, čím sa minimalizuje narušenie prevádzky. Takáto stratégia nielenže predlžuje životnosť zariadení vďaka včasnému riešeniu problémov, ale zároveň výrazne znižuje náklady na materiál a prácu, keďže k výmene dielov dochádza len vtedy, keď je to skutočne nevyhnutné.

Úvod do výroby papiera

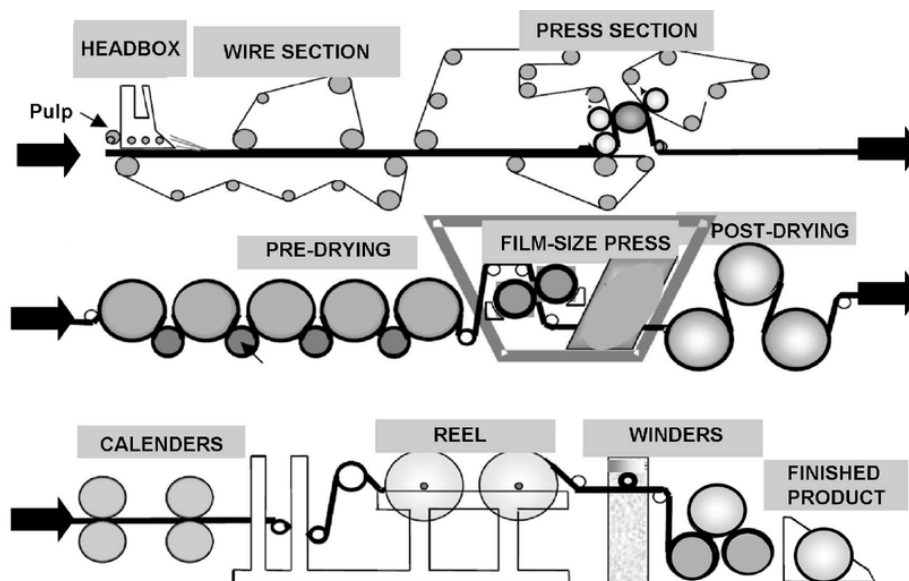
Papierenská výroba je komplexný proces, pri ktorom sa vo viacerých štádiách transformujú rastlinné suroviny na hotový papier, ktorý musí spĺňať prísne parametre kvality. Kľúčovým faktorom určujúcim vlastnosti papiera je voľba vstupnej suroviny, ktorú možno rozdeliť do troch základných kategórií podľa ich pôvodu a charakteru spracovania. Prvou z nich je drevo, pričom sa využíva mäkké drevo s dlhšími vláknami, ktoré dodáva výslednému papieru pevnosť, a tvrdé drevo s kratšími vláknami, ktoré slúži na jeho zjemnenie. Druhou kategóriou, ktorá sa využíva čoraz viac, je recyklovaný papier, čo výrazne zlepšuje udržateľnosť v papierenskom priemysle. Na recykláciu sú vhodné kancelárske papiere, noviny, časopisy, katalógy, zošity, rôzne druhy kartónu či papierové tašky. Naopak, nevhodný je papier znečistený od masnoty alebo kávy, hygienický papier a papier s pridanou hliníkovou či plastovou fóliou. Posledná kategória alternatívnych surovín sa týka najmä krajín, kde je klasické drevo obmedzeným zdrojom. Ako jeho náhrada sa tu využíva predovšetkým bambus, konope a zvyšky cukrovej trstiny (bagasa).

Ďalším krokom je premena prírodných materiálov na buničinu, čo sa nazýva rozvlákňovanie. Buničina je v podstate riedka suspenzia celulózových vlákien rozptýlených vo vode. Rozvlákňovanie môže prebiehať mechanicky, chemicky alebo polochemicky. Pri mechanickom rozvlákňovaní dochádza k oddeľovaniu vlákien ich fyzickým drvením pomocou brúsnych kameňov. Tento postup síce prináša vysoký výťažok, no pre vyšší obsah lignínu sa vyznačuje nižšou pevnosťou a belosťou. Pri chemickom rozvlákňovaní sa do vody s drevom pridávajú chemikálie, ako sú hydroxid sodný a sulfid sodný (sulfátová alebo Kraftova metóda) alebo siričitan sodný (siričitanová metóda). Týmto procesom sa získa pevnejší a svetlejší papier. Polochemická metóda je založená na princípe získavania buničiny kombináciou mechanického a chemického postupu (Smook, 2016).

Buničina sa najprv zmieša s vodou a následne sa v rovnomernej vrstve nanáša na pohybujúce sa formovacie sito. Na tomto mieste sa voda pomocou gravitácie a systému podtlakov sčasti odsaje, čo spôsobí, že sa vlákna navzájom prepleťú a vytvoria tenký, no stále mokrý pás papiera. Rovnomernosť sformovania tohto pásu je v danej fáze absolútne kľúčová, nakoľko od nej priamo závisí výsledná pevnosť a vizuálny vzhľad konečného produktu (Editors).

Mokrý pás papiera následne postupuje do lisovacej časti, kde prechádza lisovacími štrbinami tvorenými ťažkými valcami. Tie z pásu mechanicky vytlačia vodu, čím sa vlákna ešte viac zlisujú k sebe a zvýši sa tak pevnosť listu. Čiastočne odvodnený pás papiera potom vstupuje do sušiacej časti, kde sa pomocou sústavy valcov vyhrievaných parou odparuje zvyšná vlhkosť. Táto fáza je rozhodujúca pre dosiahnutie konečného obsahu vlhkosti papiera a jeho rozmerovej stálosti (Columbia).

Pás papiera následne prechádza procesom kalandrovania. Ide o proces, pri ktorom pás prechádza cez sústavu hladkých valcov, čím sa vyhladí jeho povrch a dosiahne sa požadovaná hrúbka i lesk. Ďalej môže nasledovať povrchové natieranie kaolínom (hlinkou), latexom alebo inými prísadami, ktoré výrazne zlepšujú potlačiteľnosť a celkové vlastnosti papiera. Hotový produkt sa na záver nareže na požadovaný formát, navinie na kotúče a zabalí na expedíciu.



Obrázok 2. Ukážka schémy papierenského stroja

Výzvy v tradičnom procese výroby papiera

Napriek vysokej technologickej vyspelosti čelí dnešný papierenský priemysel viacerým dlhodobým výzvam, ktoré sú spôsobené zložitou samotnej výroby a jej premenlivými faktormi. Zvládnutie týchto problémov predstavuje kľúčový krok k zefektívneniu prevádzky, zvyšovaniu kvality finálnych produktov a podpore princípov udržateľného rozvoja v celom odvetví.

Udržanie kontinuálnej kvality predstavuje v papierenskej výrobe neustálu výzvu. Odchýlky vo vstupných surovinách, z ktorých sa vyrába buničina (napríklad typ vlákna a jeho vlhkosť), môžu viesť k nekonzistentnostiam, ktoré sa následne prejavujú na vlastnostiach výsledného produktu, akými sú hrúbka, farba či pevnosť. Tradičnými metódami sú manuálny odber vzoriek a následná laboratórna analýza. Hoci laboratórne testovanie v súčasnosti zabezpečuje kontrolu kvality, ide o časovo náročný proces, ktorý nedokáže zachytiť všetky okamžité variácie vo vlastnostiach papiera. Pri laboratórnych testoch sa vzorky nezbierajú v takých krátkych intervaloch, ako by to dokázal merací systém v reálnom čase. Kolísanie kvality tak môže viesť k vzniku nadmerného odpadu, ekonomickým stratám a nespokojnosti zákazníkov.

Spotreba energie a správa odpadov

Výroba papiera je energeticky náročný proces, a to najmä vo fázach rozvlákňovania, lisovania a sušenia. Sušiacia časť spotrebuje podstatný podiel celkovej energie využitej v papierni, čo často predstavuje až 60 % celkového energetického dopytu. Vysoké náklady na energiu a tlak na znižovanie emisií uhlíka vyvolávajú potrebu efektívnejšieho riadenia spotreby a celkovej optimalizácie procesov (Bajpai, 2016).

Pri výrobe papiera vzniká široké spektrum odpadových produktov. Patrí sem tuhý odpad, napríklad kôra, papierenské kaly a nevyužiteľné vlákna, ako aj tekuté výluhy plné chemických a organických zlúčenín. Prísna legislatíva v oblasti ochrany prírody vyžaduje, aby mali závody implementované spoľahlivé mechanizmy na spracovanie a recykláciu odpadu. Neefektívny manažment odpadov sa tak priamo premieta do vyšších prevádzkových výdavkov a zároveň so sebou prináša ekologické riziká.

Vplyv neplánovaných prestojov a procesnej variability na produkciu

Zložitost' papierenských strojov a ich kritických systémov so sebou prináša vysoké riziko neplánovaných prestojov. Takéto výpadky vážne narúšajú výrobné plány a predražujú prevádzku. Zaužívané metódy plánovanej a reaktívnej údržby navyše nedokážu plne eliminovať nečakané havárie, čo automaticky vedie k nižšej výrobe a dodatočným nákladom na opravy.

Akákoľvek nestálosť v kľúčových parametroch, či už ide o teplotu, tlak, prietok alebo presné dávkovanie chemikálií sa priamo odráža na kolísavej kvalite papiera a zníženej efektívite výroby. Závislosť od manuálneho nastavovania a nedostatočný prehľad o procesných podmienkach v reálnom čase takmer znemožňujú konzistentné udržanie optimálneho chodu linky.

Monitorovacie systémy v papierenskom stroji

V modernom papierenskom stroji sa nachádza množstvo senzorov, ktoré snímajú vlastnosti papiera v jeho jednotlivých sekciách. Tieto merania sú nevyhnutné pre plynulé riadenie procesu a precíznu kontrolu kvality výsledného produktu.

Senzorika v procese prípravy a úpravy surovín

Hoci ide o vstupnú fázu, už pri triedení zberového papiera sa čoraz častejšie využívajú moderné optické senzory na báze blízkeho infračerveného žiarenia (NIR). Tieto bezkontaktné zariadenia dokážu v zlomku sekundy automaticky rozpoznať a pomôcť vytriediť nežiaduce plasty či iné kontaminanty z recyklovateľného papiera, čím chránia ďalšie zariadenia linky.

V nasledujúcej fáze je nevyhnutné sledovať a upravovať parametre zmesi pred jej vstupom na papierenský stroj, nakoľko to tvorí absolútny základ kvality hárku. Kľúčovú úlohu tu zohrávajú snímače konzistencie, ktoré pomocou optických alebo mikrovlnných princípov merajú strihovú silu a presne určujú hustotu vlákien vo vode. Pre posúdenie výkonu a intenzity mletia v rozvlákňovačoch sa využívajú snímače zaťaženia mlynov, fungujúce na báze merania krútiaceho momentu. Celkový tok materiálu je neustále monitorovaný prietokomermi využívajúcimi magnetické alebo elektromagnetické polia, zatiaľ čo tlakové snímače zabezpečujú stabilný chod sústavy. Pre správne dávkovanie chemikálií a optimálne riadenie retencie sa v zmesi využívajú analytické prístroje, predovšetkým snímače pH, vodivosti a snímače potreby náboja (prúdiaceho prúdu).

Riadenie procesov vo formovacej časti

Keď sa zriedená buničina dostáva na formovacie sito, preberajú dôležitú úlohu snímače tlaku v nátokovej skrini. Tie spolu so snímačmi prietoku a riadenia zabezpečujú rovnomerné rozloženie a správnu rýchlosť výtoku látky. Teplotné snímače a senzory konzistencie bielej (podsitovej) vody poskytujú riadiacemu systému dôležité dáta o účinnosti odvodňovania a prepade vlákien. Pre plynulé odstránenie vody z formujúceho sa listu sú v sacích skriniach umiestnené vákuové snímače, ktoré nepretržite merajú a regulujú potrebný podtlak. Ďalšou čatou tejto sekcie sú aj snímače ťahu formovacieho sita, ktoré dbajú na plynulý chod bez rizika poškodenia pásu.

Diagnostika lisovacej a sušiackej sekcie

V lisovacej sekcii sa o dokonalé mechanické odvodnenie starajú snímače prítlaku v štrbine, merajúce hydraulický tlak, ktorým valce pôsobia na mokrý papier. Dopĺňajú ich snímače vlhkosti a podtlaku v lisovacom plstenci, ako aj infračervené (IR) snímače vlhkosti umiestnené priamo na výstupe z lisu. Synchronizáciu zabezpečujú snímače krútiaceho momentu pohonov a snímače ťahu plstenca i samotného papierového pásu. Následne v sušiackej časti preberajú kontrolu nad profilom papiera skenery vlhkosti pracujúce na báze infračerveného alebo mikrovlnného žiarenia.

Teplotné a energetické podmienky sušenia sú prísne monitorované snímačmi povrchovej teploty sušiacich valcov, snímačmi tlaku pary, hladiny kondenzátu a komplexnými senzormi, ktoré vyhodnocujú teplotu a vlhkosť odvádzaného vzduchu v kryte stroja.

Kontrola spracovaného produktu

Vo finálnej fáze výroby zohrávajú primárnu úlohu senzory zamerané na povrchové vlastnosti a geometriu produktu. Snímače prítlaču a teploty v štrbine kalandra zabezpečujú požadované vyhladenie a lesk povrchu. Na meranie optických a hmatových vlastností slúžia špecializované prístroje, ako sú leskomery a snímače drsnosti povrchu. Kľúčovým prvkom celkovej kontroly kvality sú skenery hrúbky pásu (caliper scanners), ktoré zaručujú rovnomerný profil naprieč celou šírkou stroja. Samotný proces finálneho navijania sa riadi pomocou snímačov ťahu navíjača, senzorov merajúcich narastajúci priemer kotúča a snímačov polohy hrany, ktoré spoločne garantujú presné a bezpečné namotanie papiera pripraveného na expedíciu.

NIR senzor

Senzory na báze blízkeho infračerveného žiarenia (NIR) detegujú a analyzujú svetlo v elektromagnetickom spektre s vlnovou dĺžkou približne 780 nm až 2 500 nm. Ich fungovanie je založené na tom, že špecifické molekulárne väzby (ako sú O–H vo vode, C–H v celulóze alebo N–H) absorbujú presné vlnové dĺžky tohto žiarenia. Keďže NIR žiarenie preniká do materiálov hlbšie ako viditeľné svetlo, umožňuje nedeštruktívne meranie vlhkosti, chemického zloženia a fyzikálnych vlastností (Tsuchikawa, 2015).

Využitie týchto senzorov v našom procese je momentálne ešte vo fáze vývoja. Teoreticky by nám však táto technológia umožnila rýchlo, s vyššou presnosťou a najmä bezkontaktné merať viacero parametrov súčasne, napríklad vlhkosť, obsah lignínu či distribúciu náteru. Senzory by sme vedeli umiestniť vo formovacej časti, kde by nám poskytovali dáta o distribúcii vlákien a počiatkovej vlhkosti, čo je nevyhnutné pre skorú detekciu chýb. V lisovacej sekcii budeme môcť sledovať zostatkovú vlhkosť a zhutnenie pásu s cieľom optimalizovať prítlak a ušetriť energiu pri následnom sušení. Pri konečnom spracovaní následne plánujeme otestovať schopnosť NIR senzorov vyhodnocovať kvalitu povrchu a rovnomernosť nanosených náterov.

Záver

Spojenie pokročilej senzorickej siete a umelej inteligencie predstavuje pre papierenský priemysel zásadný posun k autonómnej optimalizácii celého výrobného procesu. Zatiaľ čo NIR senzory poskytujú v reálnom čase hĺbkový vhľad do materiálových vlastností a vlhkosti, algoritmy AI tieto dáta okamžite interpretujú a vykonávajú presné riadiace zásahy. Táto technologická synergia umožňuje podnikom radikálne znížiť množstvo odpadu vďaka včasnej detekcii odchýlok a výrazne ušetriť náklady na energie optimalizáciou sušiackej sekcie.

Implementácia inteligentných systémov navyše prináša vyššiu ziskovosť nielen zefektívnením spotreby surovín, ale aj vďaka prediktívnej údržbe, ktorá eliminuje drahé neplánované prestoje. V kontexte moderných environmentálnych požiadaviek a rastúcej globálnej konkurencie sa tak integrácia AI a NIR senzoričky stáva strategickou nevyhnutnosťou. Takto modernizovaný priemysel dokáže pružne reagovať na premenlivosť vstupných materiálov a smerovať k udržateľnej, vysoko efektívnej produkcii v súlade s princípmi Priemyslu 5.0.

Podakovanie

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

Literatúra

- [1] ÅSTRÖM, K. J. (2010). FEEDBACK SYSTEMS: AN INTRODUCTION FOR SCIENTISTS AND ENGINEERS. DANIHELOVÁ, A. 2005. Tajomstvá výroby huslí a charakteristiky dreva použitého pri ich výrobe - 2. časť. In *Technológia vzdelávania*. ISSN 1335-003X, 2005, roč. 13, č. 7, s. 10 – 12.
- [2] Dorf, R. C. (2011). Modern control systems (12th ed.). Prentice Hall.
- [3] Goodfellow, I. B. (2016). Deep learning. MIT Press.
- [4] Sutton, R. S. (2018). Reinforcement learning: An introduction (2nd ed.). MIT Press.
- [5] Zhang, W. Y. (2020). Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal*, 14(3), 2213–2227.
- [6] Thrun, S. (2005). Probabilistic robotics. *Communications of the ACM*, 45(3), 52–57.
- [7] Kagermann, H. W. (2013). Recommendations for implementing Industry 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group. German National Academy of Science and Engineering (acatech).
- [8] Mittal, S. K. (2018). Smart manufacturing: Characteristics, technologies, and enabling factors. *International Journal of Production Research*, 56(1-2), 508–528.
- [9] Camacho, E. F. (2007). Model predictive control. Springer.
- [10] Zhou, K. D. (1996). Robust and optimal control. Prentice Hall.
- [11] Hunt, K. J. (1992). Neural networks for control systems - A survey. *Automatica*, 28(6), 1083–1112.
- [12] Kiumarsi, B. V. (2018). Optimal and autonomous control using reinforcement learning: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 29(11), 5238–5253.
- [13] Levine, S. F. (2016). End-to-end training of deep visuomotor policies. *Journal of Machine Learning Research*, 17(39), 1–40.
- [14] Lee, J. B.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- [15] Smook, G. A. (2016). Handbook for Pulp & Paper Technologists (4th ed.). TAPPI Press.
- [16] Editors, B. (n.d.). Fourdrinier machine. (Encyclopædia Britannica, Inc.) Retrieved from <https://www.britannica.com/technology/Fourdrinier-machine>
- [17] Columbia, U. o. (n.d.). Papermaking PAPER MACHINE – DRYING. Retrieved from <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https%3A%2F%2Fwww.fibrelab.ubc.ca%2Ffiles%2F2013%2F01%2FTopic-15-Papermaking-Drying-text.pdf>
- [18] Bajpai, P. (2016). Green Chemistry and Sustainability in Pulp and Paper Industry. Springer Cham. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-18744-0>
- [19] Tsuchikawa, S. &. (2015). A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science*, 61, 213–220. doi:<https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x>

Zhrnutie

Intelligent solution for online data management in paper production. This paper explores the digital transformation of the paper industry through Artificial Intelligence (AI) and advanced sensing. Traditional control methods often fail to manage the high variability of raw materials and the complex, non-linear nature of production. By integrating Machine Learning with NIR (Near-Infrared) spectroscopy, manufacturers can achieve real-time, non-destructive monitoring of moisture and chemical composition.

This synergy is critical for optimizing the drying section—which accounts for 60% of energy consumption—and implementing predictive maintenance to prevent costly downtime. Ultimately, these intelligent systems align the industry with Industry 5.0 standards, ensuring global competitiveness through increased efficiency, sustainability, and superior product quality.

Kľúčové slová

Papierenský priemysel, strojové učenie, optimalizácia procesov, NIR spektroskopia, energetická efektívnosť, senzorická sieť

Paper industry, machine learning, process optimization, NIR spectroscopy, energy efficiency, sensor network

Kontaktné adresy

Vendelín František Skokan, Patrik Pitka Kester
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.
Dúbravská cesta 14, Bratislava
841 04, Slovak Republic
skokan@vupc.sk, kester@vupc.sk

VYUŽITIE KUKURIČNEJ VLÁKNINY V PAPIERI AKO OBALOVOM MATERIÁLI SO ZLEPŠENÝMI MECHANICKÝMI VLASTNOSTAMI

Andrej Pažitný, Marta Páteková, Juraj Krišta, Albert Russ, Vladimír Ihnát

1 Úvod

Súčasným trendom v rámci celulózo-papierenského priemyslu je orientácia výroby na obalové materiály, kde sa vo veľkej miere rozvíja používanie nedrevných substrátov. Jedným z takýchto substrátov popri lignocelulózových materiáloch ako sú vlákna trávy – bambus a ryžová slama alebo konopné a bavlnené vlákna (WU, Y., A KOL., 2021, DAULAY, I.R.S., A KOL., 2024, CHAUDHARY, U., A KOL., 2024, FENG, Y., A KOL., 2024, WEN, Q., A KOL., 2017) je kukuričná vláknina, prípadne kukuričné mláto z výroby škrobu (PAŽITNÝ, A., A KOL., 2024, PAŽITNÝ, A., A KOL., 2025A, 2025B). Uvedenú kukuričnú vlákninu je vhodné kombinovať so sekundárnou vlákninou na báze dreva, keďže podľa nášho navrhovaného patentu má prídavok kukuričnej vlákniny s podielom v rozmedzí 40 % a.s. až 60 % a.s. v papierovine významný vplyv na zlepšenie mechanických vlastností výsledného papiera (PAŽITNÝ, A., A KOL., 2025A). Ako sekundárna vláknina sa využíva vo veľkej miere lignocelulózová surovina z dezintegrovaných lepeniek, teda OCC (Old Corrugated Containers), čo sú staré obaly z vlnitej lepenky (ARAFAT, K.M.Y., A KOL., 2025, PAŽITNÝ, A., A KOL., 2025A, 2025B). V posledných rokoch je neustály dopyt po sekundárnej buničine, resp. recyklovaných papierových vláknach aj z iných typov papiera ako sú staré časopisy alebo novinový papier, keďže papierenský priemysel často využíva sekundárne vlákna ako alternatívny zdroj lignocelulózových vlákien (AKBARPOUR, I., A KOL., 2023). Prídavok a využívanie takýchto substrátov však vyžaduje monitorovanie fyzikálnych vlastností papiera, keďže drevné aj nedrevné vlákna počas recyklačných procesov zhoršujú svoje vlastnosti, pričom nastáva najmä strata pevnosti v ťahu (LI, M., A KOL., 2023). To vyvoláva obavy, že papierové výrobky vyrobené z recyklovaných vlákien nemusia spĺňať kvalitatívne požiadavky, avšak vhodnou kombináciou úprav a zvolenou zanáškou surovín tomu možno zabrániť.

2 Materiál a metódy

Lignocelulózovým materiálom na báze kukuričného zrna bola kukuričná vláknina dodaná od spoločnosti Tate & Lyle Boleraz, s.r.o. v Boleráze (SR). Tento typ odpadového lignocelulózového materiálu na báze kukurice ako vedľajšieho produktu škrobárenskej výroby mal sušinu v priemere 42 %. Staré obaly z vlnitej lepenky (OCC) boli získané zo zberných dvorov v Bratislavskom kraji. Kukuričná vláknina bola mletá spolu s rozvlákneným substrátom z OCC počas 60 minút v laboratórnom mlyne Valley holander. Pomer recyklovaných vlákien na báze OCC ku kukuričnej vláknine bol 60:40 na suchú hmotu zmesi lignocelulózových substrátov vo vodnej suspenzii. Stupeň mletia vodnej suspenzie zmesi sa zisťoval počas celej doby mletia s odbermi vzoriek v čase 20, 40, a 60 minút podľa normy ISO 5264-1. Pre odobrané vzorky lignocelulózových substrátov boli následne stanovené hodnoty WRV (Water Retention Value – schopnosť lignocelulózového substrátu zadržiavať vodu) a stanovil sa tiež stupeň mletia podľa normy STN ISO 5267-1 (hodnota °SR – Schopper-Riegler). Pre každú vzorku, resp. meranie boli vypočítané aj odchýlky merania WRV v %.

Výsledky pre stupeň mletia ($^{\circ}\text{SR}$) boli vo všetkých prípadoch korigované na absolútne suchý zostatok lignocelulózovej hmoty na sitku. Hodnota WRV bola vypočítaná podľa vzorca (1):

$$\text{WRV} = \frac{m_{\text{mokr á}} - m_{\text{suc há}}}{m_{\text{suc há}}} \times 100 \% \quad (1)$$

kde: WRV – Water Retention Value [%]

$m_{\text{mokr á}}$ – hmotnosť vlhkej/mokrej vzorky lignocelulózového materiálu [g]

$m_{\text{suc há}}$ – hmotnosť absolútne suchej vzorky lignocelulózového materiálu [g]

Získaná suspenzia bola podrobená acidifikácii podľa nami navrhovaného patentu (PAŽITNÝ, A., A KOL., 2025A). Podľa postupov uvedených v navrhovanom patente bol tiež ďalej aplikovaný chelatačný proces s DTPA (kyselina dietyléntriámín-pentaoctová), peroxidové bielenie s prídavkom alkálií a bielenie oxidom chloričitým. Posledným chemickým stupňom aplikovaným na suspenziu s lignocelulózovým substrátom z predchádzajúcich chemických úprav bolo peroxidové bielenie v alkalickom prostredí. Po každej z uvedených chemických úprav bol aplikovaný prací medzistupeň. Následne boli zo suspenzie postupmi podľa navrhovaného patentu pripravené papierové hárky. Výsledná plošná hmotnosť každého papierového hárku bola 60 g.m^{-2} . Pre vybrané papierové hárky boli stanovené niektoré fyzikálne a mechanické vlastnosti. Belosť pripravených hárkov bola meraná prístrojom ELREPHO (Lorentzen & Wettre, Elrepho 950 ERIC®, Švédsko) pri difúznej modrej reflektancii pri vlnovej dĺžke 457 nm a osvetľovacím médiom C podľa ISO 2469 a ISO 2470. Pevnosť v ťahu a relatívne predĺženie papierových hárkov boli stanovené prístrojom Instron (Instron Corporation, USA) podľa ISO 1924.

3 Výsledky a diskusia

Pri mletí za mokra v laboratórnom mlyne Valley holander dochádza k zmene fyzikálnej štruktúry zmesi OCC a kukuričnej vlákniny ako pri iných lignocelulózových materiáloch (PAŽITNÝ, A., A KOL., 2024, CHRVALOVÁ, L., A KOL., 2025). V porovnaní s iným typom mletia sa menia aj parametre mletej suroviny, avšak všeobecne platí, že mechanická alebo hydromechanická úprava mletím zlepšuje vlastnosti lignocelulózovej biomasy znížením stupňa polymerizácie, znížením kryštalinity a zvýšením prístupného povrchu (ZHENG, Y., A KOL., 2017, SANT'ANA JÚNIOR, D.B., A KOL., 2025). Napriek tomu môžu takéto typy predúprav produkovať teplo, ktoré vedie k tepelnej degradácii zložiek biomasy, čo si vyžaduje starostlivú reguláciu trvania a intenzity (ZHENG, Y., A KOL., 2014). Tomuto sme však zabránili mletím za mokra pri nízkej koncentrácii vodnej suspenzie lignocelulózovej zmesi kukuričnej vlákniny a OCC. Rozťažnosť papiera, a viaceré mechanické veličiny papierových hárkov získaných z príslušnej vodnej suspenzie lignocelulózovej zmesi súvisia s napučiavacou schopnosťou vlákien, teda s WRV (WRV – Water Retention Value). Podobne ako hodnoty WRV, možno vhodným spôsobom mletia meniť aj hodnoty stupňa mletia. Získané hodnoty retencie vody (WRV), a tiež hodnoty stupňa mletia – $^{\circ}\text{SR}$ (Schopper-Riegler) pre každú mlecíu periódu mletia, po ktorej boli odobrané vzorky suspenzie zmesi kukuričnej vlákniny a OCC sú uvedené v Tab. 1, kde sú zaznamenané aj príslušné odchýlky merania od stanovených hodnôt retencie vody v percentuálnom vyjadrení.

Tabuľka 1. Časová závislosť stupňa mletia a WRV pre zmes kukuričnej vlákniny a OCC.

Označenie vzorky	Čas mletia [min]	°SR	WRV [%]	Odchýlka merania WRV [%]
0/M011	0	29	122,4	2,15
20/M011	20	46	142,1	3,28
40/M011	40	63	160,3	4,45
60/M011	60	72	174,1	3,57

Ako ukazuje Tab. 1, hodnoty retencie vody (WRV) sa s narastajúcim časom mletia zvyšujú, teda vlákna sa lepšie uschopňujú pre napučiavanie. Najvyššia odchýlka merania bola dosiahnutá pri 40. minúte mletia. Mletie v čase 0 minút je zaznamenané tesne pred začiatkom mletia, pričom hodnoty °SR ako aj WRV sú podľa očakávania najnižšie. Pre ďalšie aplikácie do papiera postačuje mletie vodnej suspenzie počas 60 minút, nakoľko hodnoty WRV a °SR sú vyhovujúce a ďalšie mletie by bolo neefektívne.

Ďalší postup zahŕňa chemické úpravy vodnej suspenzie zmesi kukuričnej vlákniny a OCC pomocou acidifikácie podľa nami navrhovaného patentu (PAŽITNÝ, A., A KOL., 2025A), pričom je aplikovaný aj chelatačný proces s DTPA, peroxidové bielenie s prídavkom alkálií a bielenie oxidom chloričitým. Posledným chemickým stupňom aplikovaným na suspenziu s lignocelulózovým substrátom z predchádzajúcich chemických úprav je peroxidové bielenie v alkalickom prostredí. Po každom kroku je zahrnutý prací medzistupeň. Papierové hárky pripravené z príslušnej vodnej suspenzie bez aplikácie chemických úprav sú charakterizované v Tab. 2.

Tabuľka 2. Vlastnosti papiera pripraveného z mletej vodnej suspenzie OCC a kukuričnej vlákniny v pomere 60:40 bez aplikácie chemických úprav.

Fyzikálna vlastnosť	Merná jednotka	Stanovená hodnota
Belosť ISO 2469 and 2470	%	28,38 ± 0,14
Pevnosť v ťahu	MPa	23,4
Relatívne predĺženie	%	1,1

Tab. 3 sumarizuje vlastnosti finálnych papierových hárkov pripravených z príslušnej vodnej suspenzie zmesi kukuričnej vlákniny a OCC s postupnou aplikáciou chemických úprav a prací medzistupňov.

Tabuľka 3. Vlastnosti papiera pripraveného z mletej vodnej suspenzie OCC a kukuričnej vlákniny v pomere 60:40 s aplikáciou chemických úprav.

Fyzikálna vlastnosť	Merná jednotka	Stanovená hodnota
Belosť ISO 2469 and 2470	%	33,08 ± 0,31
Pevnosť v ťahu	MPa	31,2
Relatívne predĺženie	%	1,4

Porovnaním stanovených hodnôt bol zistený mierny nárast belosti papierových hárkov v priemere o 17 %. Významnejšie zvýšenie je v prípade mechanických vlastností papierových hárkov. Pevnosť v ťahu sa zvýšila z úrovne 23,4 MPa na úroveň 31,2 MPa, čo je zvýšenie o 33 %. Podobná situácia nastala aj v prípade relatívneho predĺženia, ktoré sa zvýšilo z úrovne 1,1 % na úroveň 1,4 %, čo predstavuje nárast tohto mechanického parametra o viac než 27 %.

Predpokladáme, že podobné zlepšovanie mechanických vlastností nastane aj v prípade papierových hárkov s inou plošnou hmotnosťou, čo si však vyžaduje ďalší výskum v tejto oblasti. Výsledky výskumu však ukazujú, že pripravené papierové substráty s obsahom kukuričnej vlákniny zo škrobárenskej výroby možno použiť ako základ pre výrobu obalových materiálov so zlepšenými mechanickými vlastnosťami.

Záver

Vodné suspenzie na báze zmesi kukuričnej vlákniny a OCC boli študované pre účely porovnávania mechanických vlastností finálnych papierových hárkov. Bol využitý postup v nami navrhovanom patente, ktorý zahŕňal chemické úpravy vodnej suspenzie zmesi kukuričnej vlákniny a OCC – acidifikáciu, chelatačný proces s DTPA, peroxidové bielenie s prídavkom alkálií, bielenie oxidom chloričitým a peroxidové bielenie v alkalickom prostredí so zaradením príslušných prácí medzistupňov. Papiere s plošnou hmotnosťou 60 g.m^{-2} vykazovali zlepšenie mechanických vlastností aplikáciou hydromechanických a chemických úprav v porovnaní s papiermi, ktoré boli pripravené bez aplikácie chemických úprav. Najvýznamnejší nárast bol v prípade pevnosti v ťahu, ktorá sa zvýšila z úrovne 23,4 MPa na úroveň 31,2 MPa, čo je zvýšenie o 33 %. Spomedzi fyzikálnych vlastností bola tiež porovnávaná belosť papierových hárkov, kde bol nárast 17 % v prospech hárkov s hydromechanickou a chemickou úpravou. Získané výsledky možno využiť ako základ pre výrobu obalových materiálov so zlepšenými mechanickými vlastnosťami a mierne zlepšenými optickými vlastnosťami v porovnaní s východiskovými substrátmi.

PodĎakovanie

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

Literatúra

- AKBARPOUR, I., 2023. Surface characterization of pulp fiber from mixed waste newspaper and magazine deinked-pulp with combined cellulase and laccase-violuric acid system (LVS). Bioresource Technology Reports 23, 101551.
- ARAFAT, K.M.Y., SALEM, K.S., BERA, S., JAMEEL, H., LUCIA, L., PAL, L., 2025. Surfactant-modified recycled fibers for enhanced dewatering and mechanical properties in sustainable packaging. Cleaner and Circular Bioeconomy 12, 100179.
- DAULAY, I.R.S., ARIYANTA, H.A., KARIMAH, A., FITRIA, SANTOSO, E.B., CAHYANA, A.H., BUKHARI, M.N.S.S., BAKSHI, M.I., DUNGANI, R., HANIFA, T.Z., KARLIATI, T., FAROBIE, O., ISWANTO, A.H., FATRIASARI, W., 2024. Preparation of superhydrophobic biomedical pulp from rice straw coated with a stearic acid-cellulose composite. Bioresource Technology Reports 25, 101781.
- FENG, Y., XU, T., SHI, X., HU, Y., NI, C., CHU, Z., YANG, Z., 2024. Multifunctional coatings fabricated from Chinese hemp-derived superhydrophobic micro-nanocellulose. International Journal of Biological Macromolecules 263, Part 2, 130430.
- CHAUDHARY, U., MALIK, S., RANA, V., JOSHI, G., 2024. Bamboo in the pulp, paper and allied industries. Advances in Bamboo Science 7, 100069.

CHRALOVÁ, L., JANČÍKOVÁ, V., SKOTNICOVÁ, I., JABLONSKÝ, M., ŠUTÝ, Š., 2025: A More Environmentally Friendly Method for Pulp Processing Using DES-like Mixtures: Comparison of Physical Properties with Oxygen Bleached Pulp. Processes 13(6), 1930.

LI, M., HU, K., SHAO, S., 2023. Tensile strength estimation of paper sheets made from recycled wood and non-wood fibers using machine learning. Cogent Engineering 10, 2116828.

PAŽITNÝ, A., BOHÁČEK, Š., KRIŠTA, J., PÁTEKOVÁ, M., 2025A. Spôsob výroby papiera zo sekundárnej vlákniny a obalov kukuričného zrna. Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s. v Bratislave, PP 00175-2025 (ÚPV SR, 10.12.2025), TRL 4.

PAŽITNÝ, A., KRIŠTA, J., STANKOVSKÁ, M., IHNÁT, V., 2025B. Nové možnosti využitia a spracovania odpadov z výroby kukuričného škrobu ako alternatívy drevných surovín v papierenskom priemysle. Zborník výskumných prác Centra pre rozvoj drevárskeho, nábytkárskeho a celulózo-papierenského priemyslu, Výskumná správa, s. 73-84 (Bratislava, 121 strán, január 2025), ISBN 978-80-973573-7-5. Dostupné na internete: <<https://www.centrumdp.sk>>

PAŽITNÝ, A., KRIŠTA, J., WESZELOVSZKÁ, E., 2024. Alternatívne zdroje vlákien pridávaných do obalového papiera. Kukuričné vlákno. Zborník odborných prác z konferencie LignoSilva 2024, s. 7-13 (Zvolen, 100 strán, december 2024), ISBN 978-80-8093-369-2. Dostupné na internete: <https://www.lignosilva.eu/wp-content/uploads/2024/12/Zbornik-PDF-bez-obsahu-2024_A4.pdf>

SANT'ANA JÚNIOR, D.B., KELBERT, M., HERMES DE ARAÚJO, P.H., DE ANDRADE, C.J., 2025. Physical Pretreatments of Lignocellulosic Biomass for Fermentable Sugar Production. Sustainable Chemistry 6(2), 13.

WEN, Q., GUO, F., YANG, F., GUO, Z., 2017. Green fabrication of coloured superhydrophobic paper from native cotton cellulose. Journal of Colloid and Interface Science 497, 284-289.

WU, Y., ZHAO, W., WU, X., GAN, J., ZHANG, H., CAI, Y., 2021. A Superhydrophobic Moso Bamboo Cellulose Nano-fibril Film Modified by Dopamine Hydrochloride. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology 9, 756839.

ZHENG, Y., SHI, J., TU, M., CHENG, Y.S., 2017. Principles and Development of Lignocellulosic Biomass Pretreatment for Biofuels. Advances in Bioenergy 2, 1-68.

ZHENG, Y., ZHAO, J., XU, F., LI, Y., 2014. Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. Progress in Energy and Combustion Science 42, 35-53.

Summary / Zhrnutie

Utilization of corn fiber in paper as a packaging material with improved mechanical properties. The effect of hydromechanical and chemical treatment applied to water suspension of corn fiber and OCC on physical characteristics of final paper sheets was investigated. The time dependence of WRV and °SR was monitored on sample of beaten mixture of the lignocellulosic materials. A water suspension sample was used to make paper sheet series according to our patent proposal. Residual part of the sample was chemically treated by acidification, chelation, peroxide bleaching with added alkali, bleaching with chlorine dioxide and peroxide bleaching in alkaline environment. After each chemical step the water suspension was washed. Physical characteristics of the paper sheets made from water suspensions were determined. The most significant increase was observed in case tensile strength (33 %) when sequence of chemical treatments was used after hydromechanical treatment. Meanwhile, brightness after ISO 2469 and 2470 was increased by 17 %.

The obtained results can be applied in the production of packaging materials with improved mechanical properties and slightly improved optical properties as compared to the starting substrates – mixture of corn fiber and OCC.

Kľúčové slová

kukuričná vlákna, OCC (Old Corrugated Containers), papierový hárok, pevnosť v ťahu, relatívne predĺženie

Keywords

corn fiber, OCC (Old Corrugated Containers), paper sheet, tensile strength, relative elongation

Kontaktné adresy

Andrej Pažitný, Marta Páteková, Juraj Krišta, Albert Russ, Vladimír Ihnát
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.
Dúbravská cesta 14
841 04 Bratislava
Slovenská republika
pazitny@vupc.sk

BEZSPOJIVÉ AGLOMEROVANÉ MATERIÁLY Z DREVENÝCH HOBLÍN LISOVANÉ V KYSLOM A ALKALICKOM AEROSÓLE

Rastislav Čerešňa

1 Úvod

Tenkoplošné drevné častice, t. j. hobliny patria medzi najčastejšie vedľajšie produkty drevospracujúcich procesov a v SR sa ich ročne vyprodukuje asi 14 tis. m³ (2020), z nich zhruba ¾ sú ďalej spracované na výrobu energie (Moravčík 2020).

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 vlákňitú štruktúru celulózy - odstránením hemicelulózy a lignínu sa zväčšuje povrchová plocha a objem pórov drevných štiepok, pričom pri teplote nad 160 °C nastáva pri hydrotermálnom spracovaní rýchly rozklad drevného tkaniva (Shi et al. 2018). Aj alkalickými varnými činidlami sú hemicelulóza a lignín 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 drevných štiepok zlisovaných v kompozite (Ziqiang Liu et al. 2022). Uvedené postupy, t. j. pôsobenie kyselín alebo alkálií na povrch drevných častíc, je možné využiť pri výrobe bezspojivových kompozitných dosiek, plátov alebo dýh horúcim lisovaním drevných častíc v aerosóle roztoku napr. kyseliny sírovej alebo horúcim lisovaním drevných častíc po ich zvlhčení v roztoku tejto kyseliny. Podobne to platí pri horúcom lisovaní s použitím roztoku hydroxidu sodného.

2 Materiál a metódy

Na prípravu vzoriek bezspojivových aglomerovaných (kompozitných) materiálov boli použité smrekové hobliny, kde cca 90% hoblín malo hrúbku 0,49-0,54 mm a plošný rozmer od 8x8 mm do 20x20 mm.

Vzorky boli vyrobené pomocou aparatury pozostávajúcej z týchto častí: (1) zásobník (nádoba) na zvlhčenie drevených hoblín v kyslom/alkalickom vodnom roztoku pred ich lisovaním, (2) lis s ohrevom lisovacích platní a (3) sušička na dosušanie vyrobených výliskov. Samotné lisovanie prebiehalo v lisovacej forme, vyrobenej z tepelne odolného plastu, hliníku alebo oceľového plechu (hr. min 3 mm). Na všetky plochy formy bolo nanesené (nastriekané) suché mazivo z PTFE (teflon), slúžiace na ochranu povrchu formy proti kyslému/alkalickému aerosólu, a tiež na oddielovanie budúceho výlisku od formy. Forma bola umiestnená v uzavretej lisovacej komore, vytvorenej z dvoch do seba sa zasúvajúcich kvádrových nádob s bočnými stenami z PTFE (teflonu) a podstavami z kyselinoodolnej / žieravínoodolnej oceli (antikor A4 316). Tieto nádoby boli voči sebe umiestnené zrkadlovo, čím vytvorili lisovaciu komoru medzi platňami lisu. Lisovacia komora bola utesnená proti úniku kyslého/alkalického aerosólu pomocou kyseliny odolnej a tepelne odolnej vazelíny, ktorá zároveň uľahčovala vzájomný pohyb oboch nádob. Lisovacia komora mala pretlakový výpusť s ventilom z oceli A4 316 ústiacim do hadice z EPDM (etylén-propylén-diénový kaučuk) na odvod výparov z lisovacej komory do chladeného plastového zásobníka (z HDPE) na zachytávanie a kondenzáciu kyslého/alkalického aerosólu.

Výroba vzoriek pozostávala z týchto fáz: (1) príprava zmesi zo 60g predsušených hoblín s absolútnou sušinou 80-99 % hmot., do ktorých bol na prípravu troch typov vzoriek pridaný 5% vodný roztok H_2SO_4 alebo 5% vodný roztok NaOH alebo pH neutrálna voda (referenčná vzorka), vždy v množstve cca 85 % hmotnosti predsušených hoblín, táto zmes sa zamiešala za účelom rovnomernej distribúcie kyslého alebo alkalického roztoku alebo pH neutrálnej vody v hoblinách a potom sa zmes naparovala v zakrytom stave počas doby 30 min pri 20°C. (2) aplikácia zmesi do lisovacej formy s dorazom nastaveným na min. hrúbku výlisku 2,5 mm a zlisovanie v lise s lisovacími platňami vyhriatymi na 115-125°C, pričom teplota lisu nesmela presiahnuť 160°C, aby nedegradovalo drevné tkanivo hoblín. Pri lisovaní všetkých troch typov vzoriek bol tlak lisovania 2 MPa (cca 20 bar) a lisovacia doba 5 min. (3) sušenie výlisku v sušičke pri teplote 70 °C, až kým výlisok dosiahol priemernú vlhkosť vzduchu (doba 15-20 min). Vzorka bola potom kondicionovaná pri teplote 23 °C a 55% relatívnej vlhkosti vzduchu počas 7 dní.

Pre všetky tri typy vzoriek sme určili ohybovú tuhosť podľa normy ISO 5628, ktorá sa najčastejšie používa v papierenskom a obalovom priemysle na meranie odporu materiálu voči ohýbaniu, je to jeden z kritických parametrov pre obalové materiály. Predpokladáme, že vyvíjané aglomerované materiály by mohli mať významné využitie vo výrobe obalov. Ohybová tuhosť podľa uvedenej normy je vyjadrená v jednotkách mNm (a násobných) a vypočíta sa podľa vzorca (1):

$$s = \frac{19,1 \cdot F \cdot L^2}{\phi \cdot b} \quad (1)$$

kde: F [N] je ohýbacia sila, L [mm] je ohýbaná dĺžka vzorky, ϕ [°] je uhol vychýlenia a b [mm] je šírka ohýbanej vzorky. Na meranie sme použili prístroj L&W Bending Tester 160.

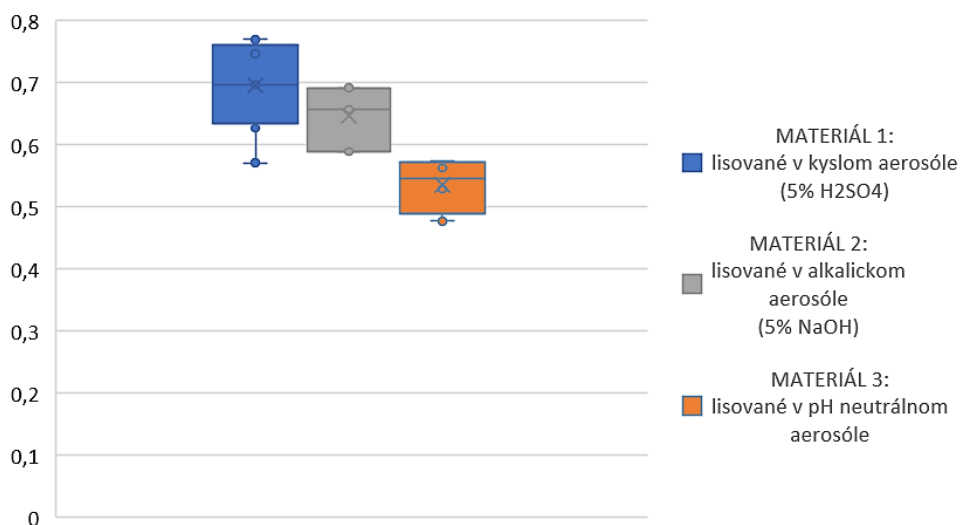
3 Výsledky a diskusia

Vyrobili sme tri typy vzoriek bezspojivového aglomerovaného materiálu zo smrekových hoblín, t. j. pláty s hrúbkou 2,5 - 3 mm (obr. 1). V prípadoch, keď boli hoblíny zmáčané vodným roztokom H_2SO_4 resp. NaOH, vznikali z roztokov pôsobením tepla v uzavretej lisovacej komore počas doby lisovania kyslý resp. alkalický aerosól, ktorý narúšal, a tým zdršňoval povrch hoblín, čím bolo umožnené lepšie vzájomné mechanické spojenie hoblín v rámci výlisku. Prípad, keď boli hoblíny zmáčané pH neutrálnou vodou, slúžil ako referenčná vzorka.

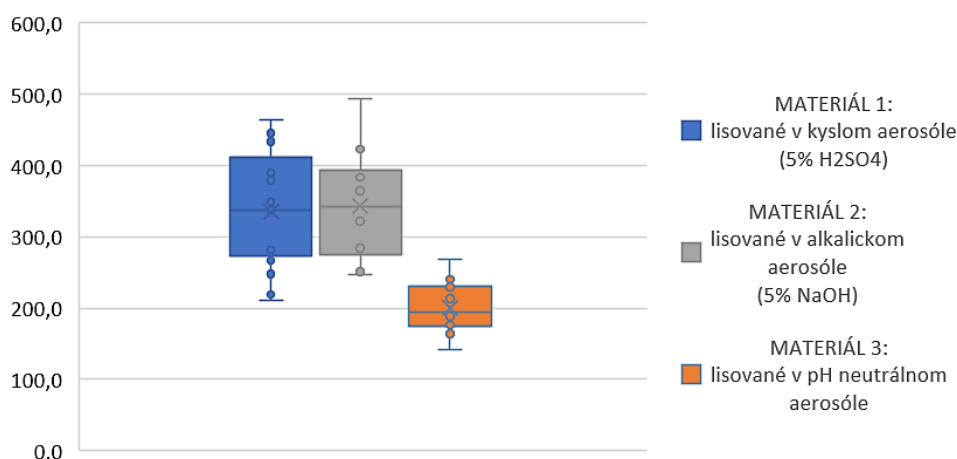


Obrázok 1. Bezspojivé aglomerované materiály zo smrekových hoblín lisované v aerosóle (zľava) 5% vodného roztoku H_2SO_4 ; 5% vodného roztoku NaOH; pH neutrálnom aerosóle. Na farebnosť povrchovej vrstvy výlisku má vplyv použitie kyslého / alkalického / pH-neutrálneho aerosólu pri rovnakých ostatných podmienkach v procese lisovania (obr. 1). Na výslednú farbu povrchu majú samostatne vplyv aj lisovacia teplota a čas – čím je ich hodnota vyššia, tým má výlisok tmavší odtieň.

Porovnali sme hustotu a ohybovú tuhosť materiálov u všetkých troch typov vzoriek, t. j. lisovaných v kyslom, alkalickom a pH-neutrálnom aerosóle (obr. 2 a 3):



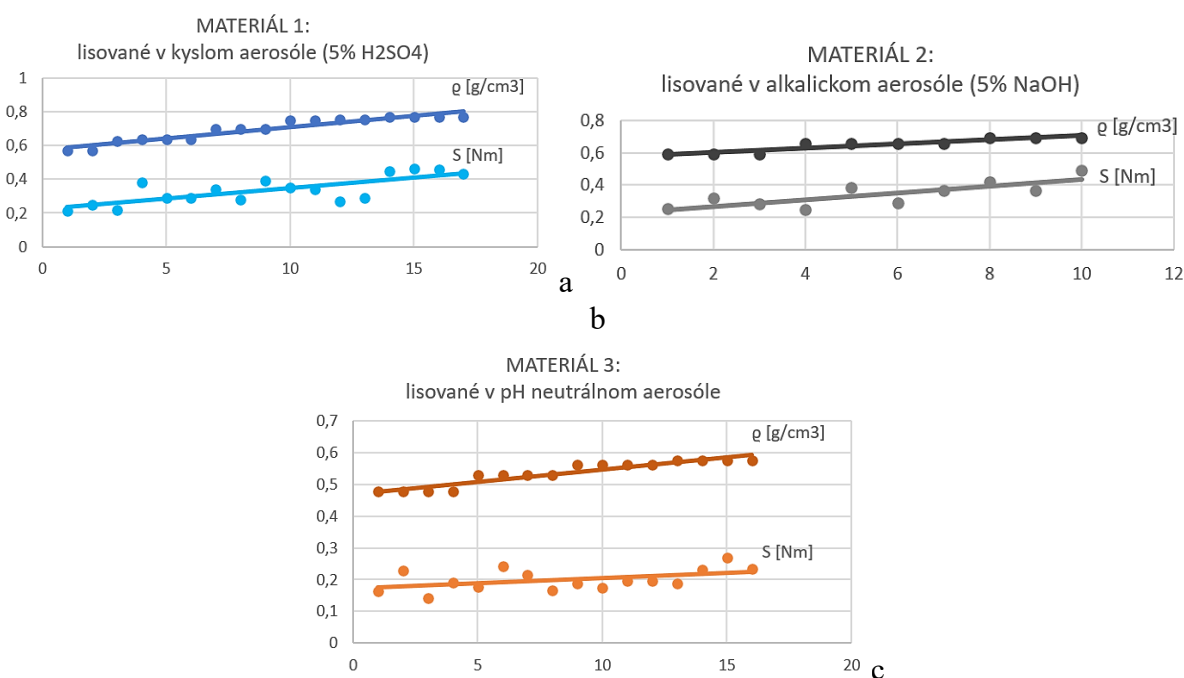
Obrázok 2. Hustota [$g \cdot cm^{-3}$] bezspojivových aglomerovaných materiálov zo smrekových hoblín



Obrázok 3. Ohybová tuhosť [mNm] bezspojivových aglomerovaných materiálov zo smrekových hoblín

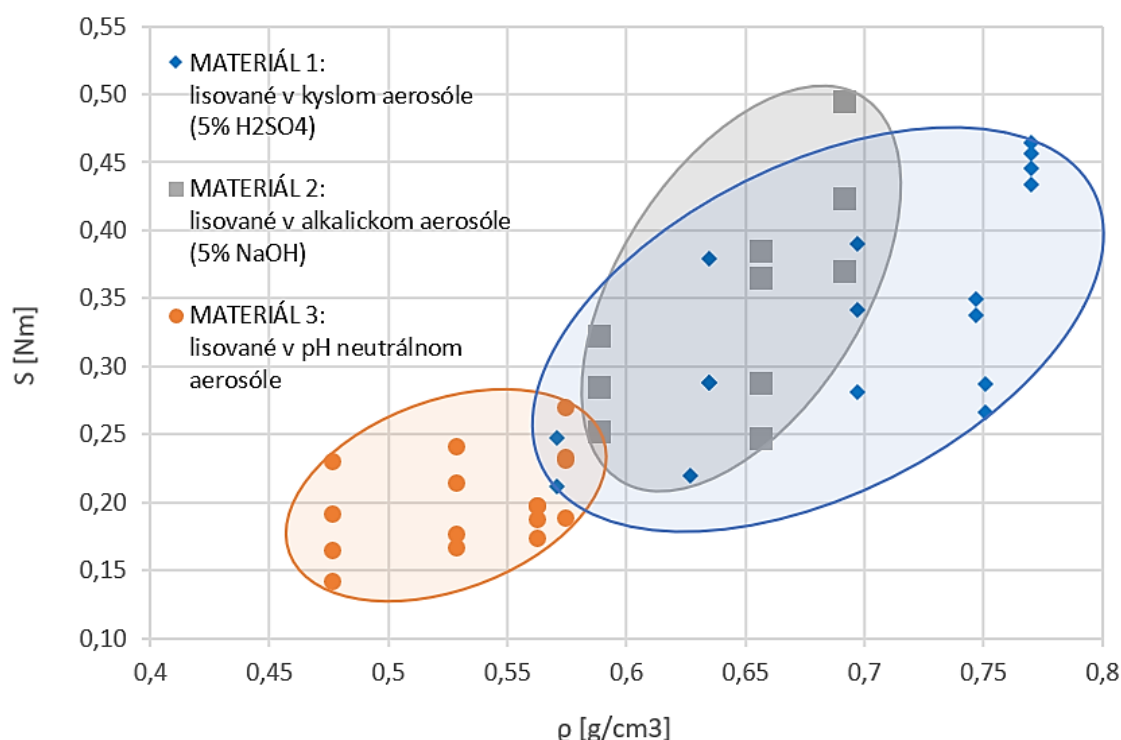
Vzorky lisované v kyslom alebo alkalickom aerosóle majú vyššiu hustotu, tzn. hobliny sa pri danom tlaku, teplote a čase lisovania dokázali zhnúť viac než pri lisovaní v pH neutrálnom aerosóle. Je to spôsobené pravdepodobne tým, že H₂SO₄ resp. NaOH narušali štruktúru hoblín, a tie sa potom dokázali viac zdeformovať pri lisovaní. Taktiež nameraná ohybová tuhosť je vyššia pri lisovaní v kyslom alebo alkalickom aerosóle zrejme z dôvodu, že narušená štruktúra hoblín zapríčinila väčšiu drsnosť ich povrchu, a tým lepšie mechanické spojenie jednotlivých hoblín v súčinnosti s ich deformáciou pri lisovaní. Vzorky lisované v kyslom alebo alkalickom aerosóle majú ohybovú tuhosť podobnú ako má biely papierový kartón (0,3 Nm – Yoshihara et al. 2023) a vzorky lisované v pH neutrálnom aerosóle majú ohybovú tuhosť podobnú ako šedý papierový kartón (0,17 Nm – ibid.).

Existuje korelácia medzi hustotou bezspojivových aglomerovaných materiálov zo smrekových hoblín ρ [g/cm³] a ich ohybovou tuhosťou S [Nm] – obr. 4 a,b,c:



Obrázok 4. a,b,c: Korelácia medzi hustotou a ohybovou tuhosťou bezspojivových aglomerovaných materiálov zo smrekových hoblín

Súhrnný prehľad materiálových vzoriek lisovaných v kyslom, alkalickom a pH neutrálnom aerosóle z hľadiska ich hustoty a ohybovej tuhosti je znázornený v diagrame na obr. 5.



Obrázok 5. Porovnanie vyrobených bezspojivých aglomerovaných materiálov

Vlastnosti bezspojivých aglomerovaných materiálov z drevených hoblín (hustota, ohybová tuhosť a farebnosť povrchu) sú ovplyvnené variantnými postupmi horúceho lisovania, t. j. v horúcom aerosóle chemikálií s rôznym pH. Na vizuálne vlastnosti, t. j. štruktúru, textúru a farebnosť materiálového povrchu vplyva taktiež veľkosť a tvar lisovaných drevených hoblín a druh dreveniny, z ktorej hobliny pochádzajú. Z hľadiska aplikácie týchto materiálov je možné účelovo variovať ich vlastnosti, ktoré sú podmienené uvedenými faktormi. Dajú sa docieľiť farebné resp. textúrové variácie povrchu výlisku pri návrhu budúcich produktov, t. j. dosiek, tabúl, tvaroviek, dekoračných panelov, segmentov podhládov atď. pre nábytkárstvo, produktový dizajn a tvorbu interiéru. Dosky z týchto materiálov by mohli byť použité aj na výrobu prepravných obalov. Pre zvýšenie odolnosti povrchu je odporúčaná úprava náterom alebo striekaním. Po skončení životnosti produktov a odstránení prípadných polutantov z povrchovej vrstvy, je možné ich kompostovať alebo použiť na výrobu energie spaľovaním.

Záver

Nové bezspojivé aglomerované materiály vyrobené z lignocelulózových technologických odpadov, napr. z drevených hoblín, môžu predstavovať spôsob recyklácie technologických odpadov s vyššou pridanou hodnotou než pri ich súčasnom druhotnom využití, a tiež je možné takto znížiť množstvo skládkovaných odpadov, ako aj spotrebu primárnej drevnej suroviny, príp. iných materiálov.

PodĎakovanie

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

Literatúra

1. MORAVČÍK, M. 2020. Vyhodnotenie empirického prieskumu a aproximácia výsledkov pre podmienky SR. Štúdia. NLC, Zvolen, 18 s.
2. SHI, J., LU, Y., ZHANG, Y., CAI, L., & SHI, S.Q. (2018). Effect of thermal treatment with water, H₂SO₄ and NaOH aqueous solution on color, cell wall and chemical structure of poplar wood. Scientific Reports, 8(1), 17735.
3. YOSHIHARA, H., YOSHINOBU, M. AND MARUTA, M. (2023). Bending stiffness and moment capacity of cardboard obtained from three-point and elastica bending tests. In: Nordic Pulp & Paper Research Journal, vol. 38, no. 1, 2023, str. 73-85.
4. 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.

Summary

The article is focused on new material lines based on technological waste from woodworking processes and represents a method of material recycling with creation of higher added value. Hot pressing of wood particles in acidic or alkaline aerosol, using a solution of H₂SO₄ or NaOH, allows the production of binderless agglomerated (composite) materials, with higher density and bending stiffness than when pressed in pH neutral aerosol, at the same temperature, pressure and pressing time. Regarding the application of binderless agglomerated materials, it is possible to purposefully use the differences in properties that are conditioned by variant production processes, i.e. by pressing them in a hot aerosol of chemicals with different pH. The characteristic structure and texture of the surface and the bending stiffness of these materials allow their use in furniture making, in product design, in interior design, but also in packaging production.

Kľúčové slová

drevené hobliny, kyslý aerosól, alkalický aerosól, bezspojivový aglomerovaný materiál, ohybová tuhosť

Keywords

wood shavings, acidic aerosol, alkaline aerosol, binderless agglomerated material, bending stiffness

Kontaktné adresy

Ing. Rastislav Čerešňa, PhD.,
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s., úsek SDVÚ
Dúbravská cesta 14, 841 04 Bratislava, SR
ceresna@vupc.sk

SLEDOVANIE VPLYVU PAPIERENSKÝCH POMOCNÝCH PROSTRIEDKOV NA NÁBOJOVÚ HUSTOTU VLÁKIEN A KOLOIDNÝCH ČASTÍC VO VODÁCH

Vladimír Kuňa, Jozef Balberčák, Vladimír Ihnát, Štefan Boháček

1 Úvod

Rastúca konkurencia vo výroby 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. V jeho prvej časti Kuňa a kol. (2026) sme sa venovali sledovaniu vplyvu mletia na nábojovú hustotu vlákien a koloidných častíc vo vodách. Výskum je opodstatnený, keďže na Slovensku sa v roku 2022 vyprodukovalo 124 000 ton hygienických papierov. Produkcia tzv. 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 m³/t papiera.

V druhej časti výskumu, ktorý popisuje tento článok, sme na suspenzii vodolátok stanovovali hodnoty Zeta potenciálu, PCD a vodivosti. Pri spracovaní vlákien totiž hlavnú úlohu hrajú hydrodynamické mechanizmy, ktoré významne ovplyvňujú správanie suspenzie vlákien a koloidných častíc. Veľkosť Zeta potenciálu udáva potenciálnu stabilitu koloidného systému. Nábojová hustota koloidných častíc rozpustených vo vodách sa vyjadruje mernou aniónovou alebo kationovou spotrebou, podľa toho, aký polyelektrolyt sa použil pri titracii.

2 Experimentálna časť

Na laboratórne testovanie boli vybrané zmesi buničín, ktoré sa najčastejšie používajú v zanáške pri výrobe hygienických papierov na PS1 a PS2. Vzorky buničín boli rozvláknené na laboratórnom rozvlákňovači Escher-Wyss za štandardných podmienok po dobu 5 minút. Buničiny boli mleté separátne na laboratórnom zariadení Valley holander, pri konzistencii 2% a objeme suspenzie 22,5 dm³. Jednotlivé buničiny boli mleté na stupeň mletia 25°SR, kedy dosahujú najvhodnejšie parametre pre výrobu hygienických papierov. Takto pripravené buničiny boli zmesované a homogenizované po dobu 10 minút.

V priebehu laboratórnych skúšok, bol otestovaný vplyv nasledujúcich chemikálií a ich kombinácií: prostriedok pre zvýšenie pevnosti papiera za sucha, Acefloc DSR CS1 (biopolymer na báze škrobu), prostriedok na zvýšenie pevnosti papiera za mokra Kymene 217 LXE (epichlórhydrínová živica) a dvojzložkový retenčný systém Acefloc 20902LB a Acefloc SA540, pozostávajúci z kationického polyméru s dlhým reťazcom a nízkym nábojom na báze polyakrylamidu a kationického mikropolyméru s vysokým nábojom a krátkym reťazcom na báze polyamínu.

Nábojová hustota vlákien bola vyjadrená stanovením hodnoty Zeta potenciálu a nábojová hustota koloidných častíc stanovením hodnoty PCD. Zeta potenciál sledovaných vzoriek bol stanovený na prístroji Fiber Potential Analyzer a hodnota PCD bola stanovená na prístroji Charge Analyzing System CAS-II od firmy AFG Analytic GmbH.

3 Vyhodnotenie

Výsledky laboratórneho testovania vplyvu papierenských pomocných prostriedkov na nábojovú hustotu vlákien a koloidných častíc vo vodách sú zhrnuté v tab. 1 až tab. 3.

Tabuľka 1. Zmes 1; 50% DV Borovica (25°SR) + 50% KV Breza (25°SR)

Vzorka	Zeta potenciál (mV)	Vodivosť (mS/cm)	PCD (µeq/l)	Dávka
1 DSR	-22,2	0,8	-17	1kg/t CS1
2 DSR	-20,9	0,795	-16	2kg/t
3 DSR	19,4	0,79	-15	3kg/t
4 DSR	18,4	0,785	-14	4kg/t
5 DSR	-17,5	0,78	-13	5kg/t
10 KYM	-17,3	0,79	-11	10kg/t 217LXE
20 KYM	-12,6	0,8	-10	20kg/t
30 KYM	-6,2	0,81	-8	30kg/t
40 KYM	0,6	0,82	-6	40kg/t
50 KYM	7,7	0,83	2	50kg/t
				A20902LB ASA540
100 RET	-21,7	0,74	-15	100g/t 200g/t
150 RET	-21,5	0,755	-15	150g/t 200g/t
200 RET	-21,3	0,77	-15	200g/t 200g/t
250 RET	-21,1	0,78	-14	250g/t 200g/t
300 RET	-21	0,79	-14	300g/t 200g/t

Tabuľka 2. Zmes 2; 50% DV Borovica (25°SR) + 50% Eukalyptus (25°SR)

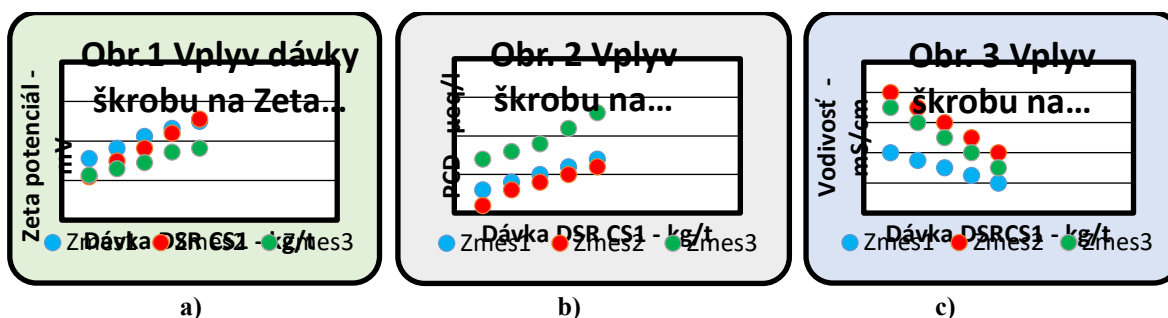
Vzorka	Zeta potenciál (mV)	Vodivosť (mS/cm)	PCD (µeq/l)	Dávka
1 DSR	-24,5	0,84	-19	1 kg/t
2 DSR	-22,5	0,83	-17	2kg/t
3 DSR	-20,9	0,82	-16	3kg/t
4 DSR	-19	0,81	-15	4kg/t
5 DSR	-17,2	0,8	-14	5kg/t
10 KYM	-16,2	0,8	-12	10kg/t
20 KYM	-8,9	0,81	-11	20kg/t
30 KYM	-0,6	0,82	-9	30kg/t
40 KYM	4	0,83	-4	40kg/t
50 KYM	12,4	0,85	3	50kg/t
				A20902LB ASA540
100 RET	-24,8	0,79	-15	100g/t 200g/t
150 RET	-24,6	0,8	-14	150g/t 200g/t
200 RET	-24,4	0,81	-14	200g/t 200g/t
250 RET	-24,3	0,82	-14	250g/t 200g/t
300 RET	-24,2	0,83	-14	300g/t 200g/t

Tabuľka 3. Zmes 3; 50% KV Breza (25°SR) + 50% Prechodová (25°SR)

Vzorka	Zeta potenciál (mV)	Vodivosť (mS/cm)	PCD (µeq/l)	Dávka	
1 DSR	-24,3	0,83	-13	1 kg/t	
2 DSR	-23,5	0,82	-12	2kg/t	
3 DSR	-22,7	0,81	-11	3kg/t	
4 DSR	-21,4	0,8	-9	4kg/t	
5 DSR	-20,9	0,79	-7	5kg/t	
10 KYM	-20,6	0,78	-13	10kg/t	
20 KYM	-15,6	0,79	-12	20kg/t	
30 KYM	-9,9	0,8	-11	30kg/t	
40 KYM	-1	0,81	-9	40kg/t	
50 KYM	2,3	0,82	-4	50kg/t	
				A20902LB	ASA540
100 RET	-26,7	0,81	-17	100g/t	200g/t
150 RET	-26,4	0,815	-16	150g/t	200g/t
200 RET	-26,1	0,82	-15	200g/t	200g/t
250 RET	-26	0,825	-14	250g/t	200g/t
300 RET	-25,9	0,83	-14	300g/t	200g/t

3.2 Sledovanie vplyvu prostriedku pre pevnosť za sucha na nábojovú hustotu

Na zvýšenie pevnosti hygienických papierov za sucha sa používa bio-polymér na báze škrobu. Podľa druhu výrobného programu a plošnej hmotnosti vyrábaného papiera sa používa v množstve od 1,0 kg/t do 5,0 kg/t papiera. Výsledky laboratórnej aplikácie prostriedku Acefloc DSR CS1 na rôzne suspenzie buničín a jeho vplyv na Zeta potenciál, hodnotu PCD a vodivosť je znázornená na obr. 1.



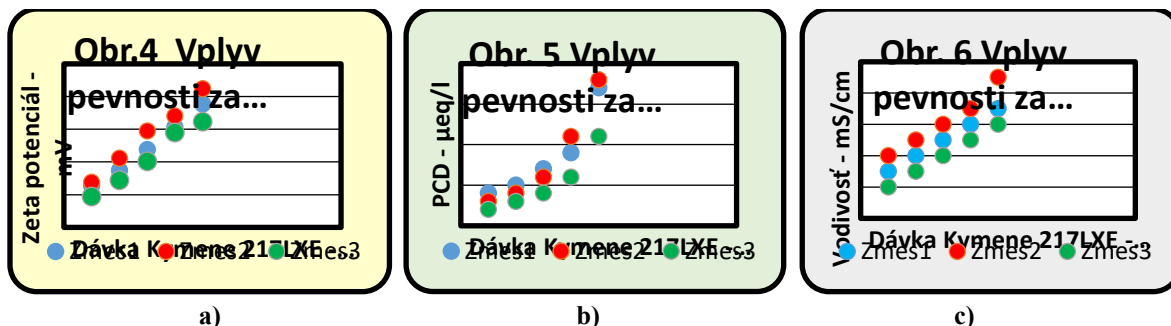
Obrázok 1: Vplyv dávky škrobu na Zeta potenciál (a), hodnotu PCD (b) a vodivosť (c)

3.3 Vyhodnotenie vplyvu škrobu na vlastnosti suspenzie vlákien

Vplyvom prídavku prostriedku pre zvýšenie pevnosti za sucha na báze škrobu dochádza k zvýšeniu Zeta potenciálu vlákien (obr. 1a). U vzorky s označením Zmes1, v danom rozsahu dávkovania škrobu, narastla hodnota Zeta potenciálu o 4,7 mV, u vzorky s označením Zmes2 o 7,3 mV a u vzorky Zmes3 o 3,4 mV. Nábojová hustota koloidných častíc, vyjadrená ako hodnota PCD, zvyšovaním dávky škrobu rastie, pričom najvyšší nárast bol u vzoriek s označením Zmes2. Hodnoty vodivosti, zvyšovaním prídavku škrobu klesajú. Je to spôsobené tým, že škrob vychytáva z vôd anionické rušivé látky a viaže ich na vlákna buničín.

3.4 Sledovanie vplyvu prostriedku pre pevnosť za mokra na nábojovú hustotu

Na zvýšenie pevnosti hygienických papierov za mokra sa používajú epichlórhydrínove živice. Podľa druhu výrobného programu a plošnej hmotnosti vyrábaného papiera sa pohybuje ich dávkovanie v rozmedzí od 10,0 kg/t do 50,0 kg/t papiera. Pri laboratórnom testovaní sme použili, ako prostriedok pre zvýšenie pevnosti za mokra, Kymene 217LXE. Výsledky laboratórnej aplikácie na rôzne suspenzie buničín a jeho vplyv na Zeta potenciál, hodnotu PCD a vodivosť sú znázornené na obr. 2.



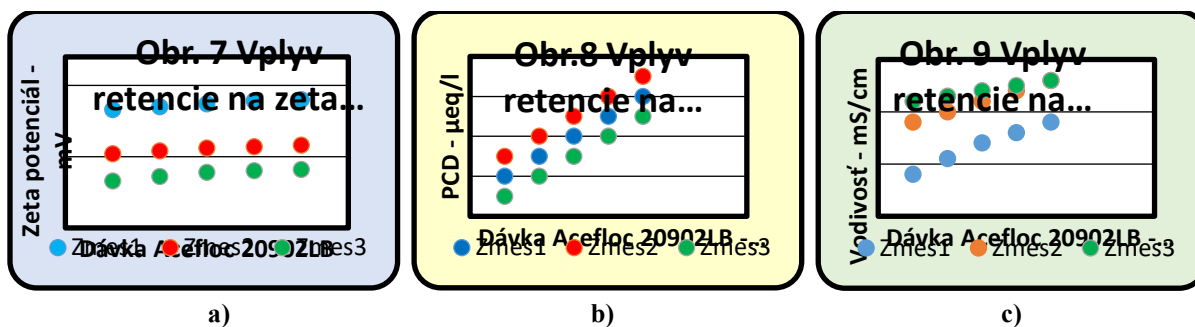
Obrázok 2. Vplyv pevnosti za mokra na Zeta potenciál (a), hodnotu PCD (b) a vodivosť (c)

3.5 Vyhodnotenie vplyvu pevnosti za mokra na vlastnosti suspenzie vlákien

Vplyvom prídavku prostriedku pre zvýšenie pevnosti za mokra (PPzP), dochádza k zvýšeniu hodnôt Zeta potenciálu vlákien (obr. 2a). Pri dávke PPzP nad 40 kg/t buničiny, dochádza k zmene Zeta potenciálu zo zápornej na kladnú hodnotu. Nábojová hustota koloidných častíc vo vodách PCD zvyšovaním prídavku PPzP rastie a pri dávke 50 kg/t buničiny, prechádza do kladnej oblasti. Zvyšovaním prídavku PPzP rastie aj vodivosť vôd. Je to spôsobeným tým, že na vlákna sa viaže len časť PPzP a druhá časť zostáva rozpustená vo vodách. Vodivosť jednotlivých zmesí buničín, narástla v rozsahu 0,04 - 0,05 mS/cm.

3.6 Sledovanie vplyvu retenčného systému na nábojovú hustotu

Bol použitý dvojzložkový retenčný systém, pozostávajúci z mikropolyméru Acefloc SA540 a polyméru s dlhým reťazcom a nízkou nábojovou hustotou Acefloc 20902LB (obr. 3). Dávka mikropolyméru bola konštantná 200 g/t buničiny a dávka polymeru s dlhým reťazcom sa menila v rozsahu od 100 g/t do 300 g/t.



Obrázok 3. Vplyv retencie na Zeta potenciál (a), hodnotu PCD (b) a vodivosť (c)

3.7 Vyhodnotenie vplyvu retenčného systému na vlastnosti suspenzie vlákien

Vplyv dvojzložkového retenčného systému na nábojovú hustotu vlákien je len minimálny a teda len mierne zvyšuje Zeta potenciál. Pri suspenzii s označením Zmes1 predstavuje nárast len 0,7 mV, pri suspenzii s označením Zmes2, bol nárast 0,6 mV a pri suspenzii Zmes3 predstavoval nárast Zeta potenciálu 0,8 mV. Nábojová hustota koloidných častíc vo vodách, vyjadrená hodnotou PCD, vplyvom zvyšovania dávky retenčného systému rastie mierne. Nárast hodnoty PCD predstavoval pri danom rozsahu dávkovania 4 $\mu\text{eq/l}$. Vplyvom zvyšovania dávky retenčného systému rástli aj hodnoty vodivosti suspenzie vlákien. Nárast hodnôt vodivosti bol len minimálny. Pri vzorke Zmes1, bol nárast 0,05 mS/cm, pri vzorke Zmes2 bol 0,03 mS/cm a pri vzorke Zmes3 bol 0,02 mS/cm.

Záver

V rámci laboratórneho testovania vplyvu papierenských pomocných prostriedkov na nábojovú hustotu vlákien a koloidných častíc vo vodách, boli na troch druhoch zanášok vlákien: Zmes 1: 50% dlhovláknitá ihličnáčová buničina borovica + 50% krátkovláknitá listnáčová buničina breza, Zmes 2: 50% dlhovláknitá ihličnáčová buničina borovica + 50% krátkovláknitá eukalyptová buničina a Zmes 3: 50% krátkovláknitá listnáčová buničina breza + 50% prechodová listnáčová buničina otestované tri druhy chemikálií: prostriedok pre zvýšenie pevnosti papiera za sucha: Acefloc DSR CS1, bio-polymér na báze škrobu, rozsah dávkovania od 1 kg/t buničiny do 5 kg/t buničiny, prostriedok na zvýšenie pevnosti papiera za mokra: Kymene 217 LXE, epichlórhydrínová živica, rozsah dávkovania od 10 kg/t buničiny do 50 kg/t buničiny a dvojzložkový retenčný systém: Acefloc 20902LB a Acefloc SA540, pozostávajúci z kationického polyméru na báze polyakrylamidu a kationického mikropolyméru na báze polyamínu, rozsah dávkovania od 100 g/t buničiny do 300 g/t buničiny.

Na suspenzii vodolátok, opracovanými vybranými druhmi a kombináciami chemikálií, boli stanovené hodnoty Zeta potenciálu, PCD a vodivosti. Zo sledovaných systémov, najvýznamnejšie vplýva na hodnoty nábojovej hustoty prostriedok pre zvýšenie pevnosti papiera za mokra. Pri vysokých dávkach, nad 40 kg/t buničiny, dochádza ku zmene Zeta potenciálu a hodnoty PCD zo zápornej hodnoty na kladnú. Nadbytočné množstvo PPzP sa už neviaže na vlákna, ale zostáva rozpustená vo vodách, čo potvrdzuje aj nárast hodnôt vodivosti. Prostriedok pre zvýšenie pevnosti za sucha, zvyšuje Zeta potenciál vlákien a hodnotu koloidných častíc, ale podstatne menej ako PPzP. V sledovanom rozsahu dávkovania škrobu zostali sledované hodnoty v zápornej oblasti. Hodnoty vodivosti, zvyšovaním prídavku škrobu klesajú. Je to spôsobené tým, že škrob vychytáva z vôd anionické rušivé látky a viaže ich na vlákna buničín. Najmenej významný vplyv na nábojovú hustotu vlákien a koloidných častíc, zo sledovaných systémov, mal dvojzložkový retenčný systém. Nakoľko sa jedná o kationický systém, jeho vplyvom došlo k miernemu nárastu Zeta potenciálu, hodnoty PCD a vodivosti vôd.

PodĎakovanie

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

Literatúra

- [1] BALBERČÁK, J., KUŇA, V., BOHÁČEK, Š., IHNÁT, V. 2022: Reduction of the softwood long fibre pulp addition in tissue production. Case study. In *Wood Research* 67(3), s. 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. In *BioResources* 13(2), doi:10.15376/biores.13.2.DeAssis, s. 4593-4629.
- [3] KUŇA, V., BALBERČÁK, J., PÁTEKOVÁ, M. 2026: Sledovanie vplyvu mletia na nábojovú hustotu vlákien a koloidných častíc vo vodách. In: *Zborník výskumných prác. Január 2026*. Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s., Bratislava, ISBN 978-80-69204-02-7, s. 11-20.

Zhrnutie

Investigating the Impact of Papermaking Auxiliaries on the Charge Density of Fibres and Colloidal Particles in Process Water. The article focuses on monitoring the effects of various papermaking auxiliaries on the charge density of fibres and colloidal particles in process waters. The influence of chemicals on the charge density was monitored on three pulp mixtures: 50% long-fibre softwood pulp Pine + 50% short-fibre hardwood pulp birch, 50% long-fibre softwood pulp Pine + 50% short-fibre eucalyptus pulp and 50% short-fibre hardwood pulp birch + 50% change-over pulp. Zeta potential, PCD, and conductivity were determined for pulp suspensions treated with various chemicals. Among the systems, the wet-strength agent (WSA) had the most significant impact; at dosages exceeding 40 kg/t, both Zeta potential and PCD values shifted from negative to positive. Excess WSA remains dissolved in process water, as evidenced by increased conductivity. Conversely, the dry-strength agent and starch increased Zeta potential to a lesser extent, with values remaining negative. Notably, starch addition decreased conductivity by scavenging anionic trash and binding it to fibres. The two-component retention system showed the least influence, causing only a slight increase in Zeta potential, PCD, and water conductivity.

Kľúčové slová

Papierenské pomocné prostriedky, nábojová hustota vlákien, koloidné častice vo vodách, vodivosť, retenčný systém

Kontaktné adresy

Vladimír Kuňa, Jozef Balberčák, Vladimír Ihnát, Štefan Boháček
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Výskumný ústav papiera a celulózy a.s.
Dúbravská cesta 14, Bratislava
841 04, Slovak Republic
kuna@vupc.sk

VPLYV PRÍDAVKOV VYBRANÝCH ORGANICKÝCH ROZPÚŠŤADIEL NA ÚČINNOSŤ PREDSPRACOVANIA PŠENIČNEJ SLAMY POMOCOU PARNEJ EXPLÓZIE

Albert Russ, Alena Jandová

1 Úvod

Parná explózia je progresívna metóda na predspracovanie biomasy, pri ktorej základným princípom je ohrev biomasy impregnovanej vodou (cca 15% hm.) pri vysokom tlaku a následná dekompresia zmesi, pričom dôjde k mechanickému rozrušeniu lignocelulózového komplexu parou, čo vedie k výraznému zlepšeniu prístupnosti celulózy a hemicelulóz hydrolytickým enzýmom. Teplota pri parnej explózii sa zväčša pohybuje okolo 200°C. Organické a anorganické kyseliny, napr. kyselina octová a kyselina sírová môžu priaznivo ovplyvniť predspracovanie biomasy počas parnej explózie. Známa je aj dvojstupňová parná explózia s prídavkom 2-naftolu, pomocou ktorého sa podarilo zvýšiť výťažok etanolu z pôvodných 74% na 90%. Výsledky priniesla aj nová hybridná organosolv metóda, kde sa zefektívnila parná explózia. Predspracovanie brezy sa vykonávalo pri 200°C pri rozsahu prídavku etanolu medzi 50-70%, času pôsobenia 15-60 min a prídavku kyseliny sírovej 0-1%. Zistilo sa, že najefektívnejšie podmienky predspracovania zodpovedajú prídavku 60% etanolu a 1% kyseliny sírovej. Pomocou chemikálií sa dosahuje vyššia efektivita predspracovania aj pri parnej extrúzii, sú použité napríklad alkálie (Gigac et al. 2017, Stankovská et al. 2018) alebo môže byť aj v kombinácii s vsádzkovými predúpravami, aby sa dosiahla vyššia úroveň dostupnosti holocelulózy (Pažitný et al. 2019).

Cieľom tohto výskumu bolo porovnanie vplyvu priemyselne najbežnejších organických rozpúšťadiel, konkrétne kyseliny octovej, acetónu a acetaldehydu. Hodnotenie sa uskutočnilo nepriamo stanovovaním výťažkov monosacharidov po enzymatickej hydrolýze použitím osvedčených komerčných enzymatických prípravkov.

2 Závislosť efektivity predspracovania pšeničnej slamy od prídavku acetónu na základe teploty a koncentrácie

V prvej časti výskumu sme skúmali vplyv prídavku acetónu na efektivitu predspracovania lignocelulózového materiálu na základe koncentrácie monosacharidov v hydrolyzátach bez a s prídavkom acetónu na úrovni 5%, 10% a 20% pri konštantnej teplote. Experimenty boli uskutočnené pri 160°C, 170°C, 180°C a 190°C. Výsledky sú zhrnuté v Tab. 1.

Z výsledkov vyplýva, že na rozdiel od použitia kyseliny octovej v predošlej štúdii v rámci projektu nedosahujú výsledky pri prídavku acetónu tak pozitívne miery predspracovania pšeničnej slamy ani pri nižších teplotách parnej explózie. Ako vyplýva z hodnôt uvedených v Tab. 1, najväčší nárast koncentrácie monosacharidov v hydrolyzátach pri pridanom acetóne bol zaznamenaný pri najnižšej teplote tj. 160°C. Tu je možné sledovať relatívne významný nárast koncentrácie monosacharidov z 35,3 g/l v prípade čistej vody až na úroveň 50,3 g/l v prípade použitia 5% acetónu. Ďalší nárast koncentrácie monosacharidov pri vyššom prídavku acetónu je už ale malý až zanedbateľný. Zvyšujúcou sa teplotou parnej explózie sa postupne rozdiely medzi koncentraciami monosacharidov v hydrolyzátach znižujú porovnaním parnej explózie vo vode a v roztokoch acetónu. Od teploty 170°C je jednoznačná zvýšená koncentrácia monosacharidov len v prípade 5% roztoku acetónu použitom na parnú explóziu pšeničnej slamy.

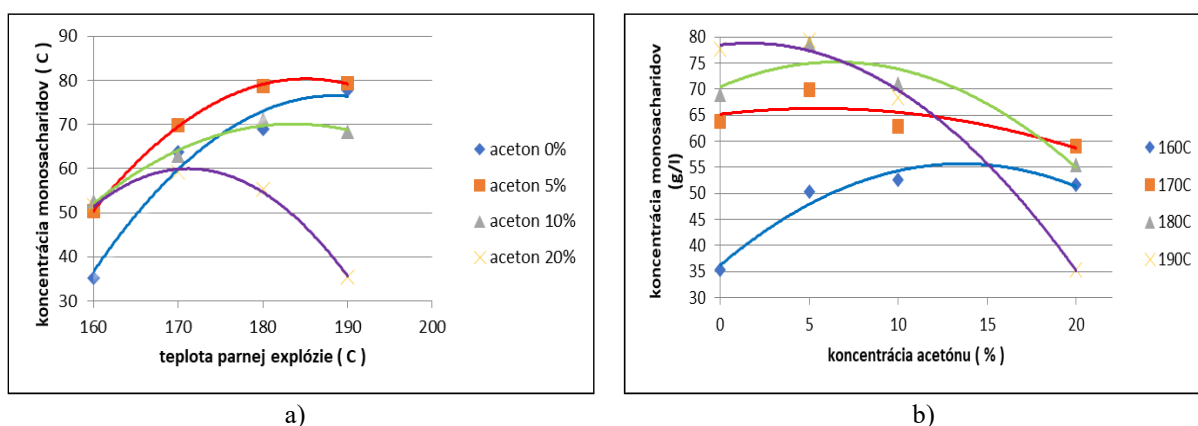
Pri teplote 190°C je koncentrácia monosacharidov pri 5% roztoku síce najvyššia s hodnotou 79,3 g/l, ale je to len o 1,6 g/l viac v porovnaní s hodnotou v prípade čistej vody a to 77,7 g/l. Navyše v prípade čistej vody je priemerná hodnota 77,7 g/l prekonaná počas všetkých experimentov iba v tomto jednom prípade.

Tabuľka 1. Priemerná koncentrácia monosacharidov (g/l) z enzymatickej hydrolýzy slamy po párnej explózii pri rôznom prídavku acetónu a rôznej teplote.

t (°C)	sacharidy	% acetónu			
		0	5	10	20
160	glukóza	23,3	30,1	31	29,9
	xylóza	12	20,2	21,5	21,7
	total	35,3	50,3	52,5	51,6
170	glukóza	38,4	42,5	37,7	35,2
	xylóza	25,4	27,4	25,1	23,9
	total	63,8	69,9	62,8	59,1
180	glukóza	44,3	52,4	48,1	37,7
	xylóza	24,7	26,3	22,9	17,7
	total	69	78,7	71	55,4
190	glukóza	51,7	53,1	46,6	24,1
	xylóza	26	26,2	21,7	11,7
	total	77,7	79,3	68,3	35,8

Na Obr. 1a je ilustrovaný vyššie uvádzaný trend, na základe ktorého je možné vidieť postupný nárast koncentrácie monosacharidov v závislosti od teploty. Najpriaznivejší efekt na predspracovanie pšeničnej slamy je pomocou 5% acetónu pri nižších teplotách, zatiaľ čo pri najvyššej teplote je efektivita predspracovania v prípade čistej vody takmer rovnaká. Na grafe je zrejмый prudký pokles koncentrácie monosacharidov pri použití 20% acetónu pri použití vyšších teplôt. Dokonca pri 190°C je koncentrácia získaných monosacharidov viac ako dvojnásobne nižšia v prípade 20% acetónu ako v prípade čistej vody.

Pre porovnanie je na Obr. 1b uvádzaná závislosť koncentrácie monosacharidov od koncentrácie acetónu pri rôznych teplotách s analogickou interpretáciou výsledkov. Z výsledkov vyplýva, že použitie acetónu je možné použiť na zníženie teploty parnej explózie, ale len pri nižších teplotách a s obmedzeným benefitom.



Obrázok 1. Závislosť koncentrácie monosacharidov (g/l) z enzymatickej hydrolýzy nepremýtaných vzoriek s prídavkom acetónu od teploty parnej explózie (a) a od koncentrácie acetónu (b).

3 Závislosť efektivity predspracovania pšeničnej slamy od prídavku acetaldehydu na základe teploty a koncentrácie

V druhej časti výskumu sme skúmali vplyv prídavku acetaldehydu na efektivitu predspracovania lignocelulóзовého materiálu na základe koncentrácie monosacharidov v hydrolyzátoch bez a s prídavkom acetaldehydu na úrovni 5%, 10% a 20% pri konštantnej teplote. Experimenty boli uskutočnené pri rovnako ako v prípade acetónu pri teplote 160°C, 170°C, 180°C a 190°C. Výsledky sú zhrnuté v Tab. 2.

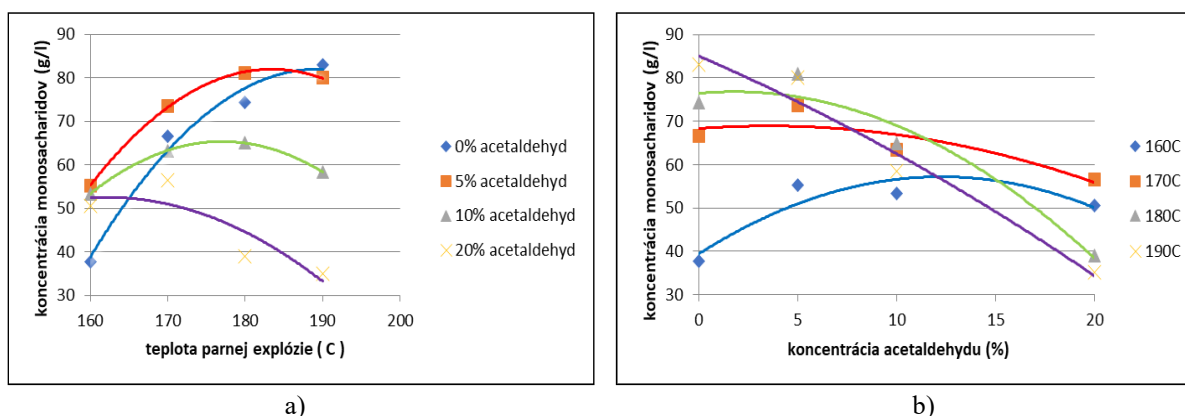
Tabuľka 2. Priemerná koncentrácia monosacharidov (g/l) z enzymatickej hydrolyzy slamy po párnej explózii pri rôznom prídavku acetaldehydu a rôznej teplote.

t (°C)	sacharidy	% acetaldehydu			
		0	5	10	20
160	glukóza	24,1	32,3	31,3	29,7
	xylóza	13,7	22,9	22,1	20,9
	total	37,8	55,2	53,4	50,6
170	glukóza	41,6	43,7	36,6	33,3
	xylóza	24,9	29,9	26,7	23,2
	total	66,5	73,6	63,3	56,5
180	glukóza	47,3	53,3	44,2	26,4
	xylóza	27,1	27,7	20,8	12,7
	total	74,4	81	65	39,1
190	glukóza	55,3	52,6	40,7	19,5
	xylóza	27,7	27,4	17,7	15,6
	total	83	80	58,4	35,1

V prípade acetaldehydu je situácia podobná ako v prípade acetónu, čo vyplýva z relatívne podobných chemických vlastností týchto organických rozpúšťadiel. Obdobne má najlepší vplyv na predspracovanie použitie 5% acetónu pri nižšej teplote. Napr. pri 160°C prídavkom 5% acetónu stúpla koncentrácia monosacharidov z 37,8 g/l až na 55,2 g/l. Ďalšie zvyšovanie prídavku acetónu už pri tejto teplote mierne znižuje koncentráciu monosacharidov. Avšak ďalšie zvyšovanie teploty spôsobuje už výrazný pokles koncentrácie monosacharidov v porovnaní s čistou vodou a 5% acetónom. Pri 190°C je koncentrácia monosacharidov už najvyššia v prípade použitia čistej vody a pridaním acetónu sa táto koncentrácia rýchlo znižuje, obzvlášť pri koncentráciách acetónu nad 10%.

Na Obr. 2a je ilustrovaná závislosť koncentrácie monosacharidov v hydrolyzátoch od teploty parnej explózie, kde je zrejmý prudký pokles koncentrácie monosacharidov pri vysokých koncentráciách acetónu, z čoho je dedukcia nevhodnosť použitia väčšieho množstva acetónu. Naopak pri nižších koncentráciách acetónu je sledovaný markantný benefit v prípade nižších teplôt oproti parnej explózii v čistej vode.

Pre porovnanie je na Obr. 2b uvádzaná závislosť koncentrácie monosacharidov od koncentrácie acetónu pri rôznych teplotách, kde je nám umožnené analogicky interpretovať vyššie uvedené spomínané trendy. Z výsledkov vyplýva, že použitie acetónu je možné použiť na zníženie teploty parnej explózie, ale len pri nízkych koncentráciách okolo 5% s miernym prírastkom monosacharidov, čo zodpovedá miernemu zlepšeniu predspracovania oproti použitiu čistej vody ako médiu pre parnú explóziu.



Obrázok 2. Závislosť koncentrácie monosacharidov (g/l) z enzymatickej hydrolýzy nepremýtaných vzoriek s prídavkom acetaldehydu od teploty parnej explózie (a) a od koncentrácie acetaldehydu (b).

4 Závislosť efektivity predspracovania pšeničnej slamy od prídavku kyseliny octovej na základe teploty a koncentrácie

V tejto časti výskumu bol sledovaný vplyv prídavku kyseliny octovej na efektivitu predspracovania pšeničnej slamy na základe koncentrácie glukózy a xylózy v hydrolyzátoch bez prídavku kyseliny octovej a s prídavkom kyseliny octovej na úrovni 5%, 10%, 15% a 20% pri konštantnej teplote. Experimenty boli opakované pri nasledovných teplotách: 160°C, 170°C, 180°C, 190°C, 200°C a 210°C.

Tabuľka 3. Výťažok monosacharidov (g/l) z enzymatickej hydrolýzy premytej a nepremytej slamy po parnej explózii s prídavkom kyseliny octovej.

t (°C)	nepremyté (g/l)					premyté (g/l)				
	0%	5%	10%	15%	20%	0%	5%	10%	15%	20%
160	38,9	50,4	54,8	60,7	62,3	47,1	63,1	71,6	81,6	93,1
170	53,8	62,3	66,1	64,1	63,4	61,8	77,5	85,3	94,8	94
180	59,4	73,6	76,7	65,1	61,5	68,1	88,5	98,6	101,4	97,9
190	64,5	72,7	74,2	64,4	60,6	84,5	96	100,9	94	85,5
200	68	60,3	56	48,4	44,4	82,8	85,1	86,8	68,9	47,8
210	79,9	43,2	27,1	22,6	16,3	85	72,5	55,4	43,1	30,4

Na základe analýz sa zistilo, že pri nižších teplotách parnej explózie sa vďaka pridanej kyseline octovej uvoľnilo do roztoku výrazne viac monosacharidov ako bez jej prídavku (Tab. 3). Avšak kyselina octová zvyšovala efektivitu rozrušenia lignocelulózovej štruktúry iba pri nižších koncentráciách. Najvyššia dosiahnutá hodnota 76.7 g/l zodpovedá prídavku 10% hm. kyseliny octovej. Tento výťažok bol dosiahnutý pri teplote 180°C. Najvyššia koncentrácia monosacharidov v prípade nepremýtaných monosacharidov 101.4 g/l sa získala pri 180°C pri koncentrácii 15% kyseliny octovej. V prípade premytých vzoriek boli hodnoty koncentrácie monosacharidov výrazne vyššie. Avšak ďalšie zvyšovanie teploty malo za následok pokles koncentrácie monosacharidov. Oproti koncentráciám dosiahnutým pri parnej explózii slamy impregnovanej iba vodou (Russ et al. 2016) sa optimálna teplota procesu znižuje o 20°C. Kyselina octová má pozitívny vplyv na efektivitu predspracovania na základe koncentrácie glukózy a xylózy v prípade nepremýtaných vzoriek v rozmedzí teplôt 160-190°C. Maximálna koncentrácia glukózy sa dosahuje pri 5-10% kyseliny octovej a teplote 180-190°C. Pri vyšších teplotách dochádza k poklesu koncentrácie glukózy bez ohľadu na to, koľko kyseliny octovej sa pridá s tým.

Dokonca rýchlosť poklesu sa zvyšuje s koncentráciou pridanej kyseliny octovej. V prípade čistej vody sa koncentrácia glukózy naďalej zvyšuje a dosahuje maximálnu hodnotu pri 210°C.

V prípade koncentrácie xylózy je situácia odlišná. Kým pri 160°C sa koncentrácia xylózy zvyšuje s koncentráciou pridanej kyseliny octovej, pri vyššej teplote koncentrácia xylózy už klesá pri 15% a 20% kyseliny octovej s tým, že pokles xylózy je miernejší pri 15%. Prídavok kyseliny octovej na úrovni 5-10% má stúpajúcu tendenciu až po približne 175°C, kde dosahuje koncentrácia xylózy maximálne hodnoty a ďalším zvyšovaním teploty dochádza k prudkému poklesu. Pri 210°C je už deštruktívna sila kyseliny octovej tak intenzívna, že hodnoty xylózy vo všetkých prípadoch sú veľmi podobné.

Diskusia

Parná explózia slamy v čistej vode dosahuje maximum hodnoty koncentrácie xylózy dosiahnuté pri približne 185°C. Zvyšujúcou sa teplotou koncentrácia xylózy v čistej vode síce klesá, ale značne pomalšie ako v prípade pridanej kyseliny octovej. Na základe výsledkov sa môže skonštatovať, že zvyšovaním teploty a koncentrácie kyseliny octovej sa prostredie pre biomasu stáva deštruktívne na polysacharidy, ale menej na termicky stabilnejšiu celulózu v porovnaní s hemicelulózami. Koncentrácia glukózy v hydrolyzátoch premytých vzoriek závisí od prídavku kyseliny octovej viac ako v hydrolyzátoch nepremytých vzoriek. Pri 160°C najnižšia koncentrácia glukózy zodpovedá parnej explózii v čistej vode na úrovni 39 g/l a rovnomerne stúpa až nad 81 g/l pri koncentrácii 20% kyseliny octovej. Nárastom teploty spočiatku stúpajú koncentrácia glukózy pri nižšej teplote rovnomerne narastá so zvyšujúcou sa teplotou, ale ďalším nárastom teploty koncentrácia glukózy prudko klesá. Najvyššia úroveň koncentrácie glukózy je dosiahnutá najskôr v najkoncentrovanejšej kyseline octovej a maximá sa posúvajú k vyšším teplotám pri klesajúcej koncentrácii kyseliny octovej a to nasledovne. 20% kyselina octová dosahuje najvyššiu koncentráciu glukózy pri 170°C, v 15% roztoku je to 180°C, v 10% roztoku 190°C, 5% roztok zodpovedá teplote 195°C a v čistej vode pri 210°C. Najvyššie hodnoty glukózy presahujú 90 g/l pri prídavkoch 10-20% kyseliny octovej kým pri vyššej teplote v 5% kyseline octovej a v čistej vode sú tieto hodnoty nižšie a to na úrovni 80-85 g/l. V prípade xylózy boli dosiahnuté podobné závislosti pri premytých vzorkách ako pri nepremytých vzorkách. Pri najnižšej teplote t.j. 160°C koncentrácie xylózy stúpali so stúpajúcou koncentráciou kyseliny octovej. 15% a 20% kyselina octová mala za následok rýchly pokles xylózy v hydrolyzátoch zatiaľ čo 0-10% kyselina octová spôsobila ďalšie stúpanie koncentrácie xylózy s dosiahnutím maxima pri 175°C. Pri vyššej teplote koncentrácia xylózy klesala pri všetkých koncentráciách kyseliny octovej, avšak najpomalšie v prípade čistej vody. Najvyššia koncentrácia xylózy v hydrolyzátoch premytých vzoriek bola zaznamenaná pri parnej explózii v prostredí 5% kyseliny octovej a to 17.5 g/l.

Konverzia polysacharidov na monosacharidy bola kalkulovaná nasledovne. Najvyššia konverzia 74.78% polysacharidov na monosacharidy pri nepremytých vzorkách bola dosiahnutá pri teplote 180°C a 10% obsahu kyseliny octovej. Pri premytých vzorkách vysoké konverzie 98.87% a 98.38% boli dosiahnuté za podmienok 180°C (15%) a 190°C (10%).

Najvyššia dosiahnutá konverzia na monosacharidy vysoko presahuje konverziu za daných podmienok bez prítomnosti kyseliny octovej (Russ et al. 2016). Na druhej strane je potrebné konštatovať, že vyššie konverzie, ktoré je možné dosiahnuť pri vyšších teplotách bez prítomnosti kyseliny octovej, s jej prítomnosťou nie sú možné.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy číslo APVV-21-0487.

Literatúra

GIGAC, J., FIŠEROVÁ, M., STANKOVSKÁ, M., PAŽITNÝ, A., 2017: Enzymatic hydrolysis of extruded wheat straw with addition of sodium hydroxide and calcium hydroxide. *Wood Research* 62(6): 919-930.

PAŽITNÝ, A., RUSS, A., BOHÁČEK, Š., STANKOVSKÁ, M., ŠUTÝ, Š., 2019: Various lignocellulosic raw materials pretreatment processes utilizable for increasing holocellulose accessibility for hydrolytic enzymes. Part I. Evaluation of wheat straw pretreatment processes. *Wood Research* 64(1): 13-24.

RUSS, A., FIŠEROVÁ, M., LETKO, M., OPÁLENÁ, E., 2016: Effect of steam explosion temperature on wheat straw enzymatic hydrolysis. *Wood Research*, 61(1), 65-74.

STANKOVSKÁ, M., FIŠEROVÁ, M., GIGAC, J., PAŽITNÝ, A., 2018: Effect of alkaline extrusion pretreatment of wheat straw on filtrate composition and enzymatic hydrolysis. *Cellulose Chemistry and Technology* 52(9-10): 815-822.

Zhrnutie

Influence of additives of selected organic solvents on the efficiency of wheat straw pre-processing using steam explosion. The article is focused on studying the impact of biomass pretreatment using steam explosion with the addition of organic solvents, which we selected based on relative affordability, health and environmental safety. Of all the selected solvents, acetic acid was used the most, and to a lesser extent acetaldehyde and acetone. The goal is to reduce the temperature of steam explosion with additional solvents so as to increase the efficiency of this pretreatment method at a lower temperature. The goal was best achieved when using acetic acid, while the use of other solvents had only a partial effect. It is assumed that in addition to increased volatility and the assumed stronger effect of the steam explosion itself, the addition of acetic acid also had a chemical contribution to the increased efficiency of pretreatment.

Kľúčové slová

Organické rozpúšťadlá, kyselina octová, acetón, ecetaldehyd, pšeničná slama, teplota, koncentrácia, predspracovanie, parná explózia, glukóza, xylóza.

Kontaktné adresy

Albert Russ, Alena Jandová
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.
Dúbravská cesta 14, Bratislava
841 04, Slovak Republic
russ@vupc.sk

ANALÝZA MOŽNOSTÍ ZVÝŠENIA EFEKTIVITY MERANÍ SKENOVACÍM ELEKTRÓNOVÝM MIKROSKOPOM

Renáta Somogyiová, Daniela Majerčáková

Úvod

Skenovacia elektrónová mikroskopia (SEM) je v súčasnosti jednou z najuniverzálnejších analytických metód v materiálovom výskume, nanotechnológiách a biologických vedách. Na rozdiel od optických metód, SEM využíva fokusovaný zväzok elektrónov, čím prekonáva limity rozlíšenia a poskytuje detailné informácie o topografii, morfológii a zložení tuhých látok [1]. Moderné systémy, ako Thermo Fisher Scientific Prisma E, transformujú SEM na komplexnú analytickú platformu. Prístroj integruje pokročilé technológie ako environmentálnu skenovaciu elektrónovú mikroskopiu (ESEM), energiovo-disperznú spektroskopiu (EDS) a technológiu spomaľovania zväzku (Beam Deceleration), čím rozširuje aplikovateľnosť na široké spektrum vzoriek bez nutnosti ich invazívnej prípravy [2].

Fyzikálne princípy a rozlišovacia schopnosť

Rozlíšenie optickej mikroskopie je limitované difrakciou svetla (Abbeho kritérium) na približne 200 nm, pričom závisí od vlnovej dĺžky žiarenia a numerickej apertúry. SEM tento limit prekonáva využitím vlnovej povahy elektrónov. Podľa de Broglieho vzťahu je vlnová dĺžka elektrónov nepriamo úmerná ich hybnosti. Pri štandardnom urýchl'ovacom napätí (napr. 30 kV) dosahuje hodnoty v pikometroch (pm). To umožňuje nanometrické rozlíšenie, ktoré je v praxi limitované primárne kvalitou elektromagnetických šošoviek a interakčným objemom zväzku, nie difrakciou [3].

Interakcia zväzku so vzorkou a generovanie signálu

Pri dopade primárneho zväzku na povrch vzorky dochádza k sérii elastických a neelastických rozptylov. Pre charakterizáciu materiálu v systéme Prisma E sú kľúčové tri typy signálov:

1. Sekundárne elektróny (SE): Vznikajú neelastickým rozptylom a majú nízku energiu (do 50 eV). Vzhľadom na malú únikovú hĺbku poskytujú informácie o topografii povrchu s vysokým rozlíšením.
2. Spätne odrazené elektróny (BSE): Vznikajú elastickým rozptylom. Ich intenzita je priamo úmerná priemernému atómovému číslu (Z) materiálu, čo umožňuje vizualizáciu fázového kontrastu.
3. Charakteristické röntgenové žiarenie: Využíva sa v EDS analýze na identifikáciu chemických prvkov prítomných vo vzorke [1].

Prekonávanie limitov vysokého vákuua

Konvenčná SEM vyžaduje pre svoju prevádzku vysoké vákuum (typicky $< 10^{-3}$ Pa), aby sa minimalizoval rozptyl elektrónov a zabránilo elektrickému prierazu v tubuse. To však predstavuje komplikáciu pre nevodivé vzorky (vznik povrchového náboja) a hydratované materiály (odparovanie vody). Platforma Prisma E rieši tieto obmedzenia integráciou viacerých režimov tlaku:

- a) High Vacuum: Pre maximálne rozlíšenie na vodivých vzorkách.
- b) Low Vacuum: Pre potlačenie nabíjania nevodivých vzoriek bez nutnosti pokovovania.

- c) ESEM (Environmentálny režim): Umožňuje prácu v plynnom prostredí (napr. vodná para), čo je kritické pre in-situ štúdium vlhkých a nevodivých nevodivých materiálov v ich prirodzenom stave.

Kľúčové parametre a konfigurácia elektrónovej optiky

Kvalita zobrazenia a analytických výsledkov v SEM je priamo závislá od parametrov elektrónovej optiky, predovšetkým od typu zdroja elektrónov a použitého urýchľovacieho napätia.

Zdroj elektrónov

V skenovacej elektrónovej mikroskopii určuje typ zdroja elektrónov (elektrónového dela) kľúčové charakteristiky zväzku, ako sú jas, veľkosť virtuálneho zdroja a energetické rozdelenie elektrónov. Tieto parametre priamo limitujú dosiahnuteľné rozlíšenie a stabilitu prúdu zväzku.

Wolfrámové vlákno predstavuje klasický a najrozšírenejší typ termoemisného zdroja, ktorý sa v prístrojoch typu Prisma E využíva pre svoju spoľahlivosť a schopnosť generovať vysoké prúdy zväzku, nevyhnutné pre analytické aplikácie (napr. EDS mapovanie). Zdroj tvorí drôt z čistého wolfrámu v tvare písmena „V“, ktorý je priamo vyhrievaný prechodom elektrického prúdu.

Hlavné charakteristiky wolfrámového zdroja zahŕňajú:

- a) Jas: Nižší v porovnaní s autoemisnými zdrojmi (FEG), typicky 10^5 A/cm²sr.
- b) Veľkosť zdroja: Virtuálny priemer zdroja sa pohybuje v rozmedzí 30–50 μm, čo vyžaduje výraznú demagnifikáciu prostredníctvom sústavy elektromagnetických šošoviek.
- c) Energetické rozdelenie: Šírka energetického spektra (ΔE) je približne 2–3 eV, čo pri nízkych urýchľovacích napätiach vedie k nárastu chromatickej aberácie.

Hoci wolfrámové zdroje nedosahujú také vysoké rozlíšenie ako zdroje s poľnou emisiou, ich výhodou v systémoch Prisma E je vysoká stabilita prúdu a schopnosť pracovať v prostrediach s nižším vákuom (ESEM), kde by vysoko citlivé FEG zdroje podliehali rýchlej degradácii v dôsledku iónového bombardovania [2].

Vplyv urýchľovacieho napätia (E_0)

Voľba urýchľovacieho napätia predstavuje v SEM kritický kompromis medzi dosiahnuteľným rozlíšením, penetračnou hĺbkou a povrchovou citlivosťou zobrazenia.

- a) Vysoké E_0 (15–30 kV): Vyššia energia primárnych elektrónov koreluje so skrátením ich de Broglieho vlnovej dĺžky, čo efektívne znižuje vplyv difrakčnej aberácie. To umožňuje fokusáciu zväzku do menšej stopy (spot size) a dosiahnutie vyššieho rozlíšenia. Negatívnym sprievodným javom je nárast interakčného objemu – elektróny prenikajú hlbšie do materiálu (v závislosti od hustoty vzorky až do niekoľkých mikrometrov). Výsledný signál tak reprezentuje skôr objemovú informáciu než čistú morfológiu povrchu. Vysoké napätia sú však nevyhnutné pre efektívne generovanie charakteristického röntgenového žiarenia v rámci EDS analýzy a pre zvýraznenie fázového kontrastu pri detekcii späťne odrazených elektrónov (BSE) [1].
- b) Nízke E_0 (0,1–5 kV): Redukcia dopadovej energie dramaticky znižuje interakčný objem, čím sa maximalizuje povrchová citlivosť. Signál sekundárnych elektrónov (SE) v tomto režime pochádza z najvrchnejších atomárnych vrstiev, čo poskytuje vernejší obraz topografie nanoštruktúr.

Práca pri nízkych napätiach je kľúčová najmä pre zobrazovanie nevodivých a polovodivých materiálov, pretože pri určitej energii (tzv. bod rovnováhy) sa počet dopadajúcich elektrónov rovná počtu emitovaných elektrónov, čím sa eliminuje akumulácia nežiaduceho povrchového náboja. Hlavnou technologickou výzvou zostáva nárast chromatickej aberácie, ktorú systémy ako Prisma E korigujú pokročilou konštrukciou objektívu a technológiou spomaľovania zväzku [1].

Environmentálna skenovacia elektrónová mikroskopia (ESEM)

Technológia ESEM predstavuje revolučný posun v metodológii SEM, nakoľko eliminuje nutnosť udržiavania vysokého vákua v bezprostrednom okolí vzorky [3]. Táto technológia umožňuje štúdium materiálov v ich prirodzenom stave, vrátane vlhkých, mastných alebo vysoko izolačných vzoriek, ktoré by v konvenčnom SEM podliehali degradácii alebo masívnemu nabíjaniu.

Fyzikálny princíp a mechanizmus neutralizácie náboja

Základom funkcie ESEM je sofistikovaný systém diferenciálneho čerpania. Zatiaľ čo v tubuse s elektrónovým zdrojom a elektromagnetickými šošovkami je udržiavané stabilné vysoké vákuum, komora vzorky môže byť naplnená pracovným plynom (najčastejšie vodnou parou, dusíkom alebo argónom) pri tlakoch v rozsahu 10 až 2600 Pa. Oddelenie týchto dvoch tlakových režimov zabezpečuje sústava tlakovo-obmedzujúcich apertúr (Pressure-Limiting Apertures, PLA).

Interakcia primárneho zväzku s molekulami plynného prostredia v komore vyvoláva dva javy:

1. Vznik elektrónovej "sukne" (Beam Skirt): Pri prechode plynom dochádza k elastickému rozptylu časti primárnych elektrónov na molekulách plynu. To vedie k vytvoreniu rozptýleného halo efektu okolo centrálneho fokusovaného zväzku. Hoci tento jav mierne zvyšuje šumové pozadie, moderná optika Prisma E a optimalizácia pracovnej vzdialenosti (WD) umožňujú zachovať vysoký kontrast a rozlíšenie aj pri vyšších tlakoch [4].
2. Iónová neutralizácia povrchového náboja: Toto je kľúčový benefit ESEM pre nevodivé materiály. Pri zrážkach primárnych elektrónov a emitovaných sekundárnych elektrónov s molekulami plynu dochádza k ich ionizácii, čím vzniká kaskáda voľných elektrónov a kladne nabitých iónov. Ak sa na povrchu nevodivej vzorky začne hromadiť záporný náboj z dopadajúceho zväzku, tento lokálny negatívny potenciál pritiahne kladné ióny z plynného prostredia. Dochádza k okamžitej a kontinuálnej neutralizácii náboja, čo umožňuje stabilné pozorovanie bez potreby nanášania vodivých vrstiev (zlato, uhlík), ktoré by mohli maskovať jemné povrchové detaily [4].

Energiovo-disperzná spektroskopia (EDS) pre elementárnu analýzu

Zatiaľ čo zobrazovacie signály (SE, BSE) poskytujú primárne morfológické a topografické informácie, EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy, tiež známa ako EDX) transformuje SEM na výkonný nástroj pre kvalitatívnu a kvantitatívnu chemickú analýzu.

Princíp generovania RTG žiarenia

Fyzikálny základ EDS spočíva v procesoch prebiehajúcich v elektrónovom obale atómov vzorky pri interakcii s primárnym zväzkom. Keď dopadajúci vysokoenergetický elektrón neelasticky narazí na atóm, môže vyraziť elektrón z niektorej z vnútorných hladín. Tým vzniká vakancia a atóm sa ocitá v excitovanom, metastabilnom stave. K návratu do základného stavu dochádza takmer okamžite preskokom elektrónu z energeticky vyššej hladiny na voľné miesto na nižšej hladine. Nadbytočná energia sa uvoľní buď ako Augerov elektrón, alebo ako fotón charakteristického röntgenového (RTG) žiarenia. Keďže energetické hladiny sú pre každý prvok unikátne, RTG spektrum slúži ako chemický „odtlačok prsta“ [2].

Detekcia a kvantitatívna analýza

V súčasných konfiguráciách mikroskopov SEM Prisma E sa využívajú kremíkové driftové detektory (Silicon Drift Detectors, SDD) s termoelektrickým chladením. Kľúčové výhody SDD detektorov zahŕňajú:

- Vysoká rýchlosť zberu dát: Schopnosť spracovať extrémne vysoké počty impulzov (často > 100 000 cps) bez výraznej straty energetického rozlíšenia.
- Energetické rozlíšenie: Štandardne sa pohybuje v rozmedzí 125–130 eV, čo umožňuje presnú separáciu susediacich píkovo v spektre.
- Prevádzková efektívnosť: Rýchly nábeh do pracovného stavu a vysoká stabilita pri dlhodobom mapovaní [2].

Kvalitatívna analýza prebieha identifikáciou energetických pozícií píkovo v spektre. Kvantitatívna analýza, určujúca presné hmotnostné alebo atomárne zastúpenie prvkovo, vyžaduje korekciu nameraných intenzít píkovo. V systémoch EDS sa najčastejšie využíva matematický model ZAF, ktorý zohľadňuje tri hlavné javy (Z – Atomic Number Correction, A – Absorption Correction, F – Fluorescence Correction).

Moderný softvér integrovaný v Prisma E umožňuje tieto korekcie vykonávať v reálnom čase, čo poskytuje výskumníkovi okamžitý prehľad o chemickej heterogenite vzorky prostredníctvom bodovej analýzy, líniových profilov alebo plošných chemických máp [2].

Spomaľovanie zväzku (Beam Deceleration) pre zobrazovanie s ultra-vysokým rozlíšením

Jednou z najvýznamnejších výziev v súčasnej skenovacej elektrónovej mikroskopii je dosiahnutie vysokého priestorového rozlíšenia pri nízkych dopadových energiách elektrónovo (landing energies). Tieto podmienky sú nevyhnutné pre nedeštruktívne zobrazovanie povrchových nanoštruktúr, polymérov a iných materiálov citlivých na poškodenie zväzkom. Pri konvenčnom znižovaní urýchľovacieho napätia však dochádza k dramatickému nárastu vplyvu chromatickej aberácie, ktorá sa stáva dominantným faktorom degradácie rozlíšenia [1].

Princíp technológie Beam Deceleration

Technológia spomaľovania zväzku, známa aj ako režim retardačného poľa (retarding field), prekonáva fyzikálny limit. Systém v tomto režime urýchľuje elektróny v tubuse mikroskopu na vysokú energiu (typicky 20–30 keV). Pri tejto energii sú relatívne chyby minimálne, čo umožňuje optike sformovať extrémne úzky a koherentný zväzok s potlačenou chromatickou aberáciou. Kľúčový moment nastáva tesne pred dopadom na vzorku. Na stolík so vzorkou je aplikované záporné elektrické predpätie. Toto záporné pole vytvorí elektrostatickú bariéru, ktorá prilietajúce elektróny prudko spomalí.

Výsledná dopadová energia je definovaná rozdielom urýchľovacieho napätia a predpätia. Vďaka tomuto mechanizmu získava mikroskop výhody ako:

- Vysoké rozlíšenie pri nízkych energiách – zväzok si zachováva nízku aberáciu, no dopadá s energiou v stovkách eV,
- Zvýšenie jasú a signálu – efektívnejšia práca zdroja zvyšuje pomer signálu k šumu (SNR),
- Zber signálu – retardačné pole smeruje nízkoenergetické elektróny k in-lens detektorom, čím zvyšuje detekčnú účinnosť [5].

Implementácia technológie Beam Deceleration v kombinácii s režimom ESEM robí z mikroskopu SEM Prisma E jeden z najuniverzálnejších nástrojov pre charakterizáciu moderných nanomateriálov, kde sa vyžaduje extrémna povrchová citlivosť bez rizika artefaktov spôsobených vysokou energiou dopadu.

Podakovanie

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

Literatúra

- [1] Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.
- [2] THERMO Thermo Fisher Scientific. (n.d.). *Scanning Electron Microscopy (SEM) Techniques*. Dostupné na (www.thermofisher.com/sk/en/home/materials-science/scanning-electron-microscopy-materials-science/techniques.html)
- [3] Reimer, L. (2000). Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis. *Measurement Science and Technology*, 11(12), 1826-1826.
- [4] Danilatos, G. D. (1991). Review and outline of environmental SEM at present. *Journal of Microscopy*, 162(3), 391-402.
- [5] Ohta, K., Sadayama, S., Togo, A., Higashi, R., Tanoue, R., & Nakamura, K. I. (2012). Beam deceleration for block-face scanning electron microscopy of embedded biological tissue. *Micron*, 43(5), 612-620.

Abstract

In the field of Scanning Electron Microscope (SEM), the integration of ESEM, EDS, and Beam Deceleration technologies has fundamentally transformed SEM into a truly multifunctional analytical platform. Environmental SEM (ESEM) has broken the traditional high-vacuum barrier, enabling the direct analysis of samples in their natural state and the in-situ study of various dynamic processes. Furthermore, Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) has significantly expanded the capabilities of SEM by providing precise chemical microanalysis with high spatial resolution across diverse material types. The implementation of Beam Deceleration technology has pushed the boundaries of non-destructive imaging, allowing for the characterisation of sensitive nanostructures even at ultra-low landing energies. The synergy of these advanced methods makes modern SEM systems an indispensable tool for complex material characterisation in cutting-edge science, nanotechnology, and industrial research. This comprehensive approach ensures that researchers can obtain both structural and chemical information simultaneously while preserving the integrity of delicate specimens. By combining atmospheric control with high-resolution imaging and elemental mapping, these systems offer unparalleled insights into the microscopic world.

Kľúčové slová

Skenovacia elektrónová mikroskopia; ESEM; EDS; Spomaľovanie zväzku

Keywords

Scanning Electron Microscopy; ESEM; EDS; Beam Deceleration

Kontaktné adresy

Renáta Somogyiová, Daniela Majerčáková
Výskumný ústav papiera a celulózy Bratislava
Dúbravská cesta 1799/14
84 104, Bratislava 4
Slovenská republika
somogyiova@vupc.sk

TRENDY VO VYUŽITÍ RÔZNYCH DRUHOV SUROVÍN NA ZÍSKANIE NANOFIBRILOVANÝCH A NANOKRYŠTALICKÝCH VLÁKIEN CELULÓZY

Monika Stankovská, Albert Russ, Marta Páteková

1 Úvod

V poslednom desaťročí sa pozornosť sústredila na využitie nanocelulózy ako suroviny na výrobu gélov a membrán, vystuženie baliaceho papiera, využitie mikro-/nanocelulózy ako modifikátora reológie, miešanie s rôznymi materiálmi za účelom získania nanokompozitov a nanotechnologické aplikácie, ako napríklad v optickej elektronike a pre nanorozmerné dielektrické vrstvy. Nanocelulóza sa dá extrahovať z rôznej drevnej biomasy konvenčnými technikami, pričom sa uvoľňujú zvyšky lignínu a hemicelulózy a premieňa sa celulóza na nanomateriál (Kargarzadeh a kol. 2018). Využitie odpadu z poľnohospodárskej výroby ako alternatívneho zdroja celulóзовého materiálu voči drevu si získalo značnú pozornosť vďaka zníženiu odlesňovania. Poľnohospodárska odpadová slama, ako je ryža, pšenica a kukurica, sa vyrába vo veľkých množstvách. Vo svete sa využívajú ako suroviny napríklad ibišteky (Sulaiman a kol., 2025), pšeničná slama (Nehra a kol. 2022), stonky tabaku (Luo a kol. 2024), bambus (Yu a kol., 2012, Zhao a kol. 2025), juta, sisal a konope (Pirah a kol. 2022), ako aj hyacint (Mondal a kol. 2023). Nanocelulóza z biomasy, ako je recyklovaný kal z papierenského závodu, sa vyrába ozonizáciou a následnou kyslou hydrolyzou (Peretz a kol. 2019). V potravinárskom priemysle môžeme hovoriť o využití vedľajších produktoch, ako sú šupky z ovocia a zeleniny, dužina a zvyšky zo spracovania potravín, ako napríklad výlisky z výroby vína alebo kávová usadenina. Všetky tieto produkty sú bohatými zdrojmi bioodpadu obsahujúceho celulózu. Okrem toho, využitie poľnohospodárskych vedľajších produktov na extrakciu celulóзовých nanomateriálov ponúka udržateľné riešenie na zníženie organického odpadu a riešenie environmentálnych problémov. Ukázalo sa, že užitočným zdrojom nanovlákién je aj odpad zo spracovania ovocia, ktorý vytvára veľké množstvo zvyškovej biomasy, ako napríklad stonky banánu (Mishra a kol. 2023, Kumar a kol. 2023), kokosová škrupina (Santos Silva a kol. 2025) alebo ananášová šupka (Rini a kol. 2023), listy (Araya-Chavarria a kol. 2022) a odpad po odšťavovaní ananásu (Sajithkumar a kol. 2023).

Pivovarské mláto je hodnotné krmivo pre domáce zvieratá, podporuje zdravý rast prasníc a tvorbu mlieka u dojníc a je možné ho dlhodobo konzervovať. Obsah minerálnej zložky sa líši proti obilnému šrotu, pretože obsahuje vyšší obsah vápníka a nižší obsah fosforu a draslíku. Vedci zo švajčiarskeho Federálneho ústavu pre materiálové vedy a technológiu vytvorili z pivovarského odpadu nanocelulózu, ktorú následne spracovali na aerogél. Kukuričné výpalky aj kukuričná vláknina sa používajú na skrmovanie zvierat. Kukuričná vláknina nepodlieha fermentačným a destilačným procesom oproti kukuričným výpalkom z výroby biopalív a neprebehla tu väčšia dezintegrácia vlákién. Kukuričné výpalky sa získavajú mletím, následne čistením a hydrolyzou, fermentáciou a destiláciou a nakoniec dosušením na molekulových sítach. Kukuričná vláknina sa pripravuje mletím zrna a následne odstránením škrobu ako hlavného produktu výroby.

Izolácia lignínu obsahujúcej mikro- a nanofibrilovanú celulózu si vyžaduje viacstupňový proces. Na izoláciu celulózy z biomasy sa používajú rôzne kombinované metódy, ako je mletie, homogenizácia za vysokého tlaku, kryolýza, parná explózia, ultrazvuk, enzymatické predúpravy, mechanické a chemické úpravy (Kaur a kol. 2021).

Procesom úpravy sa znižuje koncentrácia lignínu alebo hemicelulózy a narúša sa štruktúra bunkových stien rastlín, čím by sa zvýši dostupnosť celulózy a povrchová plocha. Hlavné metódy izolácie zahŕňajú najmä kyslú a enzymatickú hydrolýzu, ako aj mechanické procesy. Na kyslú hydrolýzu celulózovej biomasy sa používajú rôzne typy kyselín, najmä kyselina sírová, kyselina mravčia, kyselina chlorovodíková, kyselina steárová a kyselina maleínová. Konečný účinok tohto spracovania je ovplyvnený koncentráciou kyseliny, reakčným časom a použitou teplotou.

Výskum na VUPC a.s. sa venuje vývojom filtračných papierov s povrchovo aplikovanými nanovláknami celulózy s potenciálom využitia pri účinnej filtrácii a dezinfekcii vzduchu. Pripravili sa nanofibrilované vlákna celulózy z troch rôznych zdrojov (kukuričné výpalky, kukuričná vláknina a pivovarnícke mláto) metódou kyslo-alkalickej extrakcie s použitím dvoch typov kyselín. Otestoval sa aj vplyv použitia dvoch typov kyselín ako aj vplyv sonifikácie po extrakcii na degradáciu hemicelulózy a lignínu pomocou infračervenej spektrometrie. Optimalizoval sa proces premývania. Po úprave všetkých typov surovín došlo k výraznej ale nie úplnej eliminácii hemicelulózy. V prípade kukuričnej vlákniny pri použití kyseliny chlorovodíkovej došlo k úplnej eliminácii lignínu a to aj v prípade použitia poupravy izolovaných vlákien sonifikáciou, na druhej strane, použitie kyseliny fosforečnej viedlo k výraznej, ale nie úplnej eliminácii lignínu. Kyslo-alkalická extrakcia kukuričných výpalkov a pivovarníckeho mláta bola menej účinná na degradáciu lignínu a bude si vyžadovať doplňujúce postupy v budúcnosti.

2. Materiály a metódy

2.1. Materiál

Zdrojom kukuričných vlákien bola firma Tate & Lyle, Boleráz a.s.; kukuričných výpalkov bola firma Enviral, a.s.; a pivovarníckeho mláta Banskobystrický Pivovar, a.s. Chemikálie: kyselina chlorovodíková, kyselina fosforečná a hydroxid sodný boli od Slavus, s.r.o.

2.2 Prístroje a zariadenia

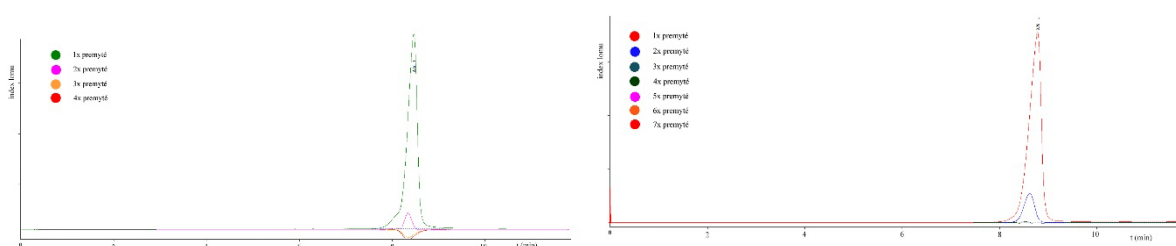
Ultrazvukový kúpeľ Manufacturer expert, sušinové váhy IR 35 (Denver Instrument), laboratórny digitálny pH meter OP-211/1 (Redelkis Budapest), Jokro mlyn Prym (Germany), mechanický homogenizátor MLW ER 10, centrifúga IEC CL30 (Thermo Scientific) a infračervený spektrometer Nicolet iS10 laboratory FTIR-NIR/MIR s Omnic 8 software (Thermo Scientific). HPLC s Rezex ROA H+ kolónou. Mobilná fáza bola 0,005 N H₂SO₄ s rýchlosťou toku 0,7 ml.min⁻¹ pri 30°C Vzorky sa najprv prefiltrovali cez 22 µm filter.

2.3. Izolácia vlákien nanofibrilovanej celulózy

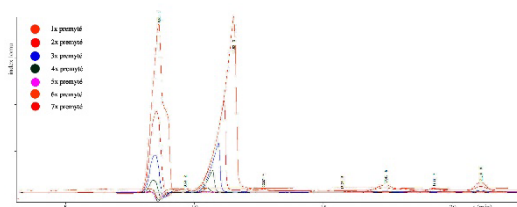
V prvom kroku sa vstupné suroviny kukuričné vlákna a kukuričné výpalky dvakrát premyli vodou a prebytočná voda sa odstránila centrifugáciou. Potom sa materiál zriedil na požadovanú konzistenciu 10 % a zomlel v Jokro mlyne po dobu 30 min. V ďalšom kroku sa materiál povaril po 60 min pri 80°C za intenzívneho miešania. Výsledný produkt sa dvakrát premyl s destilovanou vodou a prebytočná voda sa odstránila za použitia centrifugácie. Extrakcia sa uskutočnila zahriatím suspenzie na 60°C a následnou úpravou pH s HCl alebo s H₃PO₄ a vzorka sa nechala stáť pri teplote 60 °C po dobu 60 min. Potom sa upravilo pH s NaOH a po 60 min pri nastavenej teplote sa upravila na neutrálne pH. Ďalším krokom bola sonifikácia pri frekvencii 40 Hz po dobu 10 min a v poslednom kroku premyla vodou, kde sa prebytočná voda odstraňovala s použitím centrifugácie.

3. Výsledky a diskusia

Po izolácii vlákien nanofibrilovanej celulózy je dôležitým krokom ich premytie za účelom odstránenia uvoľnenej hemicelulózy, lignínu a zbytkovej soli. Za účelom optimalizácie premývania vodou nanofibrilovanej celulózy z kukuričnej vlákniny sa testoval obsah hemicelulózy v supernatante v závislosti od počtu cyklov premytia za použitia HPLC chromatografie. Chromatogramy ukázali odlišnosť v účinnosti premývania v závislosti od typu vzorky. V prípade kukuričných výpalkov alebo kukuričnej vlákniny sa ukázal výrazný pokles obsahu hemicelulózy (vrchol píku v čase 8,78 min) už v druhom premytí a v supernatante po treťom premytí už nebola detegovaná uvoľnená hemicelulóza (Obr.1). Pri použití pivovarnického mláta bolo potrebných až päť cyklov premývania (Obr.2) a nachádzali sa tu dva výrazné píky v čase 8,6 a 11,5 min a viacero menších píkov.



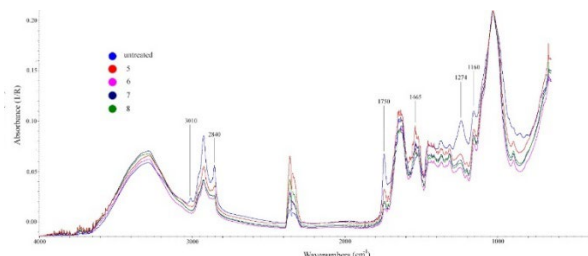
Obr.1 Chromatogram supernatantu po premytí nanofibrilovanej celulózy, získanej z kukuričných výpalkov (vľavo) a kukuričnej vlákniny (vpravo) použitím H_3PO_4 a sonifikáciou



Obr.2. Chromatogram supernatantu po premytí nanofibrilovanej celulózy, získanej u pivovarnického mláta a použitím H_3PO_4 a sonifikáciou

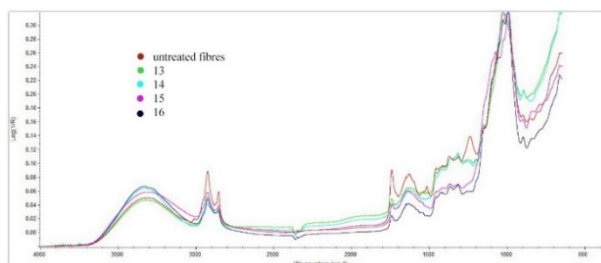
Porovnali sa IR spektrá po kyslo-alkalickej extrakcie u troch typov suroviny. Obr. 4 ukazuje IR spektrá izolovaných vlákien nanofibrilovanej celulózy, získané úpravou kukuričných výpalkov po kyslo-alkalickej extrakcii. Pík v oblasti $1700\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$, zodpovedajúci vibráciám v acetylových a esterových skupinách hemicelulózy bol vysoký pri neupravenej vzorke (modrá čiara) a s kyslo-alkalicou úpravou došlo k jeho výraznému zníženiu, ale nie k úplnej eliminácii hemicelulózy, pričom k najväčšej deštrukcii hemicelulózy došlo pri pôsobení H_3PO_4 s následnou poúpravou vzorky sonifikáciou a naopak, pôsobenie H_3PO_4 bez sonifikácie (ružová čiara) viedlo k menšej degradácii hemicelulózy ako pri ostatných úpravách vzorky (červená čiara). Neupravená vzorka ukazuje veľký pík v oblasti 1274 cm^{-1} zodpovedajúcej prítomnosti lignínu a jej úpravou došlo k veľmi výraznému zníženiu píku, kde veľkosť píkov sa nelíšila v závislosti od spôsobu úpravy.

Prítomnosti lignínu zodpovedá aj pík pri 1465 cm^{-1} a bol viditeľný v neupravenej vzorke ako aj upravených vzorkách. Pík pri 2840 cm^{-1} , ktorý súvisí s valenčnými vibráciami C-H metylových a metylénových skupín lignínu sa výrazne znížil po kyslo-alkalickej úprave, rovnako ako pík v oblasti 1465 cm^{-1} . Z výsledkov vyplýva, že došlo iba k čiastočnej eliminácii lignínu.



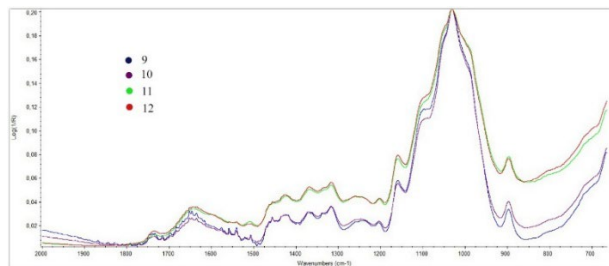
Obr.3. IR spektrá nanofibrilovanej celulózy z kukuričných výpalkov, získaných predspracovaním mletím a kyslo-alkalicou extrakciou za použitia H_3PO_4 bez (5) alebo so sonifikáciou (6) a s HCl bez (7) alebo so sonifikáciou (8).

Na Obr. 4 sú IR spektrá izolovaných vlákien nanofibrilovanej celulózy, získané úpravou kukuričných vlákien a použitím kyslo-alkalickej extrakcie. Pri neupravenej kukuričnej vláknine je viditeľný výrazne vyšší pík v oblasti $1700\text{--}1750\text{ cm}^{-1}$ (červená čiara), zodpovedajúci vibráciám v acetylových a esterových skupinách hemicelulózy, ktorý sa s úpravou vlákny výrazne znížil, pričom veľkosť píku sa nelíšila v závislosti od typu úpravy. Pík v oblasti 1274 cm^{-1} zodpovedá rozťahovaniu C-O arylovej skupiny lignínu; neupravená vzorka ukazuje veľký pík (červená čiara), zatiaľ čo po úprave s použitím HCl došlo k úplnej eliminácii lignínu nezávisle od použitia sonifikácie (modrá a fialová čiara). V prípade úpravy s H_3PO_4 bol viditeľný iba malý pík, čo naznačuje prítomnosť malého množstva lignínu. Naším cieľom bolo porovnať často kyselinu chlorovodíkovú a kyselinu fosforečnú. Ďalší pík zodpovedajúci lignínu pri 1465 cm^{-1} bol viditeľný v neupravenej vzorke a po kyslo-alkalickej úprave sa už nevyskytol ani v jednom prípade. Pík pri 2840 cm^{-1} , ktorý súvisí s valenčnými vibráciami C-H metylových a metylénových skupín lignínu sa výrazne znížil po kyslo-alkalickej úprave. Z výsledkov vyplýva lepšia aplikovateľnosť kyslo-alkalickej extrakcie pre kukuričné vlákna než pre výpalky, kde sa nedosiahli tak dobré výsledky s elimináciou lignínu. V oblasti 3010 cm^{-1} sa nepozoroval absorpčný pás u vzoriek po kyslo-alkalickej úprave, čo vylučuje prítomnosť väzieb C-H na aromatických štruktúrach, pri neupravenej vzorke bol viditeľný vyšší pík.



Obr.4. IR spektrá neupravenej vzorky kukuričných vlákien a nanofibrilovanej celulózy, získanej predspracovaním mletím a kyslo-alkalicou extrakciou za použitia H_3PO_4 bez (13) alebo so sonifikáciou (14) a s HCl bez (15) alebo so sonifikáciou (16).

V prípade pivovarnického mláta je vidieť neúplnú elimináciu hemicelulózy (pík v oblasti 1750 cm^{-1}) ako aj lignínu (1274 a 1465 cm^{-1}).



Obr.5. IR spektrá nanofibrilovanej celulózy z pivovarnického mláta, získanej predspracovaním mletím a kyslo-alkalickou extrakciou za použitia H_3PO_4 bez (9) alebo so sonifikáciou (10) a s HCl bez (11) alebo so sonifikáciou (12).

Pod'akovanie

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

Literatúra

- JAYAPRAKASH, S. K., CHELLAPPAN, S., PRASANNAN, S. A., & PADIL, V. V. 2023: Pineapple fruit residue-based nanofibre composites: Preparation and characterizations" *e-Polymers* 23(1):20230094.
- KARGARZADEH, H. 2018: Advances in cellulose nanomaterials. *Cellulose* 25(4): 2151–2189.
- KAUR P, SHARMA N, MUNAGALA M, RAJKHOWA R, AALLARDYCE B, SHASTRI Y AND AGRAWAL R. 2021: Nanocellulose: Resources, Physio-Chemical Properties, Current Uses and Future Applications. *Frontiers in Nanotechnology* 3:747329.
- KUMAR, V., CHAKRABORTY, P., SIVALINGAM, A.M. 2023: Potential of banana based cellulose materials for advanced applications: A review on properties and technical challenges. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications* 6: 100366.
- LUO, F., XU, X., JIANG, Y., QI, J., ZHOU, J., LIU, Y., AND ZHANG, S. 2024: Preparation of spherical nanocellulose from waste tobacco stem. *BioResources* 19(2): 3826-3836.
- MISHRA, S., PRABHAKAR, B., KHARKAR P., 2023: Banana Peel Waste: An Emerging Cellulosic Material to Extract Nanocrystalline Cellulose. *ACS Omega* 8(1): 1140-1145.
- Mondal M.S., Hussain, S.Z., Roy, P., Halder, Ch. 2023: Development of high-performance composite via innovative route using water hyacinth extracted nanocellulose and analysis of its physical properties. *Heliyon* 9(12):e23095.
- NEHRA, P., CHAUHAN, R.P., 2022: Facile synthesis of nanocellulose from wheat straw as an agricultural waste. *Iranian Polymer Journal* 31: 771–778.
- PERETZ, R., STERENZON, E., GERCHMAN, Y., KUMAR VADIVEL, V., LUXBACHER, T., MAMANE, H. 2019: Nanocellulose Production from Recycled Paper Mill Sludge Using Ozonation Pretreatment Followed by Recyclable Maleic Acid Hydrolysis. *Carbohydrate Polymers* 216: 343–351.
- PIRAH, S, WANG X, JAVED M, SIMAIR K, WANG B, SUI X, LU C. 2022: Lignocellulose Extraction from Sisal Fiber and Its Use in Green Emulsions: A Novel Method. *Polymers (Basel)* 14(11):2299.

- RINI, H.S., PURNAMA, D.H., DAIMON, S., JASWANDI, F.K., MUHAMMAD, M.2023: Application of Nanocellulose Biofilter from Pineapple Peel Waste for Water Microbes Removal. *Journal of Environmental and Public Health*: 5823207.
- SILVA, S.I.D.S., PIRES, C., JUNIOR, E.P., CORDEIRO, A.M.T.D.M., DE FREITAS, R.A., DOS SANTOS, N.A. 2025: Fibrillated Nanocellulose Obtained by Mechanochemical Processes from Coconut Fiber Residue. *Fibers* 13(9): 123.
- SULAIMAN, H.S., CHAN, C.H., CHIA, C.H., ZAKARIA, S., SYED JAAFAR, S.N. 2025: Isolation and Fractionation of Cellulose Nanocrystals from Kenaf Core. *Sains Malaysiana* 44(11):1635-1642.
- YU, M., YANG, R., HUANG, L., CAO, X., YANG, F., AND LIU, D. 2012: Preparation and characterization of bamboo nanocrystalline cellulose. *BioRes.* 7(2): 1802-1812.
- Zhao, H.; Sun, L.; Yu, Y.; Lu, J.; Chen, X.; Liu, L.2025: *Biomass Conversion and Biorefinery* 15: 7799–7808.

Summary

Trends in the use of different types of raw materials to obtain nanofibrified and nanocrystalline cellulose fibers: The possibility of using acid-alkaline extraction of nanofibrillated cellulose from three raw materials used in agriculture as animal feed was tested. Corn fiber proved to be a suitable source for the application of acid-alkaline extraction, where hemicellulose was significantly eliminated and when hydrochloric acid was used, lignin was completely eliminated regardless of whether sonication was used after extraction. During treatment with phosphoric acid, lignin was significantly but not completely removed. Acid-alkaline treatment of corn stover and brewer's mash only partially eliminated hemicellulose and lignin, and it is obvious that for these cellulose sources it will be necessary to use acid-alkaline extraction in combination with other methods in the future, supplemented by pre-treatment or post-treatment of the material. It has been found that the number of washing cycles of isolated cellulose fibers required to remove released hemicellulose depends on the type of original feedstock.

Kľúčové slová

Nanocelulóza, rastlinný zdroj, kyseliny, izolačné metódy, hemicelulóza, lignín

Key words

Nanocellulose, plant source, acids, isolation methods, hemicellulose, lignin

Kontaktné adresy:

Monika Stankovská, Albert Russ, Marta Páteková
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárského komplexu
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.
Dúbravská cesta 14,
Bratislava 841 04, Slovenská Republika
stankovska@vupc.sk

DIGITÁLNE TECHNOLOGIE PRI ZVYŠOVANÍ PRIDANEJ HODNOTY V SORTIMENTÁCII, DRUHOVANÍ A SPRACOVANÍ DREVA (DIGIWOOD)

Tomáš Gergel', Radovan Gracovský, Ondrej Vacek

1 Úvod

DIGIWOOD je projekt výskumného zámeru NLC na roky 2022 – 2026 a jeho zodpovedným riešiteľom je Ing. Tomáš Gergel', PhD.

Hlavným cieľom projektu Digiwood je podporiť zavádzanie digitálnych technológií do reťazcov zhodnocovania dreva. Na splnenie cieľa je potrebné uskutočniť experimentálne overenie a validáciu konceptu využitia 3D mobilnej technológie pozemného skenovania pri porastovej inventarizácii a sortimentácii, experimentálne overenie a validáciu koncept využitia technológie 3D CT skenovania pri detekcii vnútorných znakov a chýb listnatej guľatiny a experimentálne overenie a validáciu možnosti kontinuálneho sledovania pohybu guľatiny a reziva. Za týmto účelom je projekt rozdelený na čiastkové úlohy:

Digitalizácia postupov sortimentácie porastov a optimalizácia druhoovania dreva (zodpovedný riešiteľ: Ing. Ivan Sačkov, PhD.),

3D CT detekcia vnútorných chýb dreva (zodpovedný riešiteľ: Ing. Tomáš Gergel', PhD.),
sledovanie pohybu dreva a výrobkov z dreva (zodpovedný riešiteľ: Ing. Maroš Sedliak, PhD.).

2 Základné informácie

Časový harmonogram riešenia projektu

Projekt Digiwood je naplánovaný ako 5 ročný projekt v rokoch 2022 až 2026. Nasledujúci obrázok 1 zobrazuje Ganttov diagram postupnosti riešenia etáp projektu. Každá čiastková úloha má 3 etapy.

ČÚ	Etap	2022	2023	2024	2025	2026
ČÚ1	E1.1 Príprava experimentov					
	E1.2 Experimentálne preukázanie konceptu					
	E1.3 Validácia konceptu a nasadenie technológie					
ČÚ2	E2.1 Príprava experimentov					
	E2.2 Experimentálne preukázanie konceptu					
	E2.3 Validácia konceptu a nasadenie technológie					
ČÚ3	E3.1 Príprava experimentov					
	E3.2 Experimentálne preukázanie konceptu					
	E3.3 Validácia konceptu					

Obrázok 1.Ganttov diagram projektu

Opis kľúčových aplikačných výstupov projektu

Nová metodika: Inventarizácia a sortimentácia porastov na báze mobilného pozemného laserového skenovania (2025) Výstupom bude prípadová štúdia inventarizácie a sortimentácie porastov na báze mobilného pozemného laserového skenovania (PLS). Obsahovať bude zhodnotenie technických, ekonomických a legislatívnych možnosti aplikácie PLS v kvalitatívnej inventarizácii lesa, vrátane zhodnotenia prínosov prepojenia technológie PLS a 3D CT.

Nová metodika: Algoritmy pre detekciu chýb dreva z 3D skenov pre dub zimný a hrab (2024) Výstupom riešenia bude metodika nastavenia parametrov skenovania v závislosti od vlhkosti a hrúbky výrezu. Využitie budú postupy riadenej a neriadenej klasifikácie obrazu a objektovo orientovanej klasifikácie 3D skenov OBIA - Object-based image classification [1]. OBIA prístup využíva segmentáciu obrazu (3D skenov guľatiny) na viacerých úrovniach podrobnosti. To umožňuje okrem inherentne obsiahnutých vlastností, akými sú jas (DN), textúra a tvar objektov, pracovať aj s prvkami, ktoré popisujú objekt cez jeho vzťahy k iným objektom na tej istej, vyššej alebo nižšej úrovni segmentácie, čo umožní spresniť správnosť klasifikácie chýb dreva [2].

Nová metodika: Metóda optimalizácie druhovania dreva na báze využitia 3D CT detekcie chýb dreva [4]. Metodika optimalizácia procesu druhovania dreva bude založená na porovnaní štandardného spôsobu druhovania guľatiny pri ktorom vnútorné znaky guľatiny nie sú zohľadnené, s prístupom založeným na využití technológií 3D CT skenovania výrezov. Zvýšenie výťažnosti očakávame z dôvodu (i) eliminácie subjektívnej chyby pri zatriedení výrezu do kvalitatívnej triedy a (ii) vydruhovaním sortimentov od cenovo najzaujímavejších k menej hodnotným.

Nový proces: Elektronická evidencia toku dreva a reziva v dodávateľsko-odberateľskom reťazci (2026) Prípadová štúdia bude obsahovať výsledky testovania a návrh využiteľnosti rôznych technológií evidencie dreva (RFID čipy, štítky s kódmi) pri sledovaní jeho pohybu z lesa až ku spracovateľovi tak, aby bola možná jednoduchá identifikácia dreva alebo reziva aj so zobrazením údajov skenovania a s využitím načítania online údajov. Zhodnotená bude použiteľnosť vybraných technológií v oblasti lesníctva a spracovania dreva.

Personálne zabezpečenie riešenia projektu

Nasledovná tabuľka 1 uvádza prehľad riešiteľov projektu s ročnou kapacitou.

Tabuľka 1. Prehľad riešiteľov projektu s ročnou kapacitou

P.č.	Pracovník	Kategória (V, T, P)	Zapojenie (ČÚ)	2022 (FTE)	2023 (FTE)	2024 (FTE)	2025 (FTE)	2026 (FTE)
1	Ing. Tomáš Gergeľ, PhD.	V	ČÚ1, 2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
2	Ing. Radovan Gracovský, PhD.	V	ČÚ2, 3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
3	Ing. Maroš Sedliak, PhD.	V	ČÚ3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
4	Ing. Ivan Sačkov, PhD.	V	ČÚ1	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
5	Ing. Vlastimil Murgaš, PhD.	V	ČÚ3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
6	Ing. Rastislav Raši, PhD.	V	ČÚ3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
7	Ing. Peter Veverka	P	ČÚ1, 2, 3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
8	nepomenovaný*	V	ČÚ2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
9	nepomenovaný*	T	ČÚ1, 2, 3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
FTE spolu				2,1	2,1	2,1	1,9	1,9

Základná finančná štruktúra projektu

Financovanie projektu sa skladá s dvoch častí: štátneho rozpočtu a mimorozpočtovú zdroja, ktorým je Lesy SR. Nasledovná tabuľka 2 zobrazuje prehľad rozpočtu projektu po jednotlivých rokoch a tabuľka 3, ročný rozpočet nákladov na riešenie projektu na rok 2026

Tabuľka 2. Rozpočet projektu v jednotlivých rokoch riešenia

Rok riešenia	2022	2023*	2024*	2025*	2026*	Spolu
Štátny rozpočet (EUR)	60 700	61 900	75 297,09	75 297,09	68 608	
Mimorozpočtové finančné zdroje (EUR)	3 035	3 095	3 160	3 220	3 430	

Tabuľka 3. Ročný rozpočet nákladov na riešenie projektu na rok 2026

P. č.	Kalkulačná položka	Štátny rozpočet (EUR)	Spolu-finan-covanie (EUR)	Finančné prostriedky spolu (EUR)
1	Náklady obstarania celkom (r. 02 + r. 03)	1 500	75	1 575
2	Spotreba materiálu	1 500	75	1 575
3	Služby (r. 4 až 6)	0	0	0
4	- Všeobecné služby	0	0	0
5	- Výskum a vývoj	0	0	0
6	- Kooperácie	0	0	0
7	Náklady spracovania celkom (r. 08 + r. 09 + r. 10 + r. 14)	59 200	2 960	62 160
8	Mzdové náklady	41 000	2 050	43 050
9	Náklady na zdravotné a sociálne poistenie a prís. NÚP	14 350	718	15 068
10	Ostatné priame náklady (r. 11 až 13)	3 850	193	4043

3 Metodika riešenia čiastkovej úlohy 3D CT detekcia vnútorných chýb dreva

Výskumné riešenie vychádza zo zámeru uplatnenia výkonných 3D skenovacích technológií v procese detekcie kvality a chýb dreva. Následne využíva získané údaje pri optimalizácii druhovania a piliarskeho spracovania. [1].

Úspešné zavedenie 3D CT technológií podstatne obmedzuje (i) nedostatok znalostí s nastavením parametrov skenovania najmä pri listnatých drevinách, (ii) chýbajúce algoritmy detekcie vnútorných chýb listnatého dreva v 3D prostredí. Uvedené problémy sú v predkladanom projekte riešené na príklade drevín zastúpených v dielci 911 (dub zimný, hrab a lipa malolistá) cez:

výskum metód hodnotenia a meranie kvalitatívnych znakov dreva nedeštruktúrnymi metódami
výskum metód automatizovanej detekcie chýb dreva z 3D skenov guľatiny, algoritimizácia postupov detekcie, vizualizácie v 3D priestore a spracovanie „big data“ z 3D skenov

Výsledkom riešenia bude experimentálne preukázaný a poloprevádzkovo validovaný koncept využitia 3D CT technológie pri optimalizácii výťažnosti listnatej guľatiny na základe detekcie chýb dreva z CT skenov.

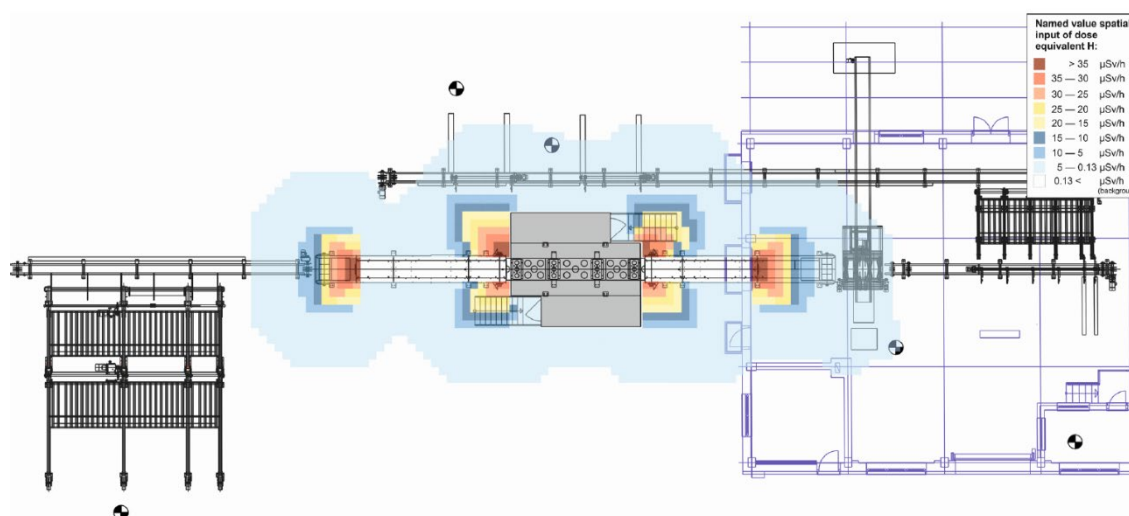
Výskum chýb dreva sa sústreďí na identifikáciu hrčí, stržňa, jadrového a beľového dreva, trhlín a hniloby a z nich odvodených kvalitatívnych vlastností reziva. Dosiahnutie hlavného cieľa si vyžaduje výskumné zvládnutie 3 základných úloh, pre ktoré definujeme čiastkové ciele: (1) Návrh parametrov skenovania pre detekciu chýb dreva z 3D skenov; (2) návrh algoritmov pre detekcie chýb dreva v 3D priestore a (3) implementácia získaných poznatkov z úloh (1) a (2) do algoritmov druhovania dreva a primárneho spracovania dreva a zhodnotenie dosiahnutého zvýšenia výťažnosti guľatiny a reziva [4].

Spoločným výsledkom riešenia ČU1 a ČÚ2 bude vytvorenie údajovej a poznatkovej bázy pre výskum kvality kmeňov pre skenované dreviny na báze pozemného mobilného skenovania porastov a technológií 3D skenovania kmeňov. Takto vytvorená poznatková a údajová база bude v 3. až 5. roku riešenia východiskom pre spresnenie sortimentačných modelov pomocou detekcie vnútorných chýb dreva pre vybrané hlavné druhy listnatých drevín (dub a hrab). Pre zabezpečenie dostatočného výberového súboru budú okrem bázy vytvorenej v rámci predkladaného projektu využité dáta zo súbežne riešených projektov a zmluvného výskumu. Pre spresnenie existujúcich sortimentačných modelov sa kvantifikuje význam doplňujúcich vnútorných znakov (napr. prítomnosť a rozsah hniloby a zmeny sfarbenia) na presnosť odhadu jednotlivých sortimentov. Predpokladá sa významný prínos doplňujúcich znakov pre spresnenie stromových a porastových sortimentačných modelov (Petráš et al. 1990).

4 Výsledky projektu 3D CT detekcia vnútorných chýb dreva

Podmienky bezpečnej prevádzky CT skenera guľatiny

Meranie únikového žiarenia počas skenovania sa uskutočnilo 7. 2. 2023. Namerané boli hodnoty priestorového dávkového ekvivalentu H^* pozadia pri vypnutom CT skenery (0,13 Sv/hod) a počas procesu skenovania guľatiny. Na základe nameraných hodnôt H^* na meracích bodoch bola interpolovaná mapa expozície ionizujúcim žiarením 3D CT pracoviska skenovania guľatiny (Obr.2).

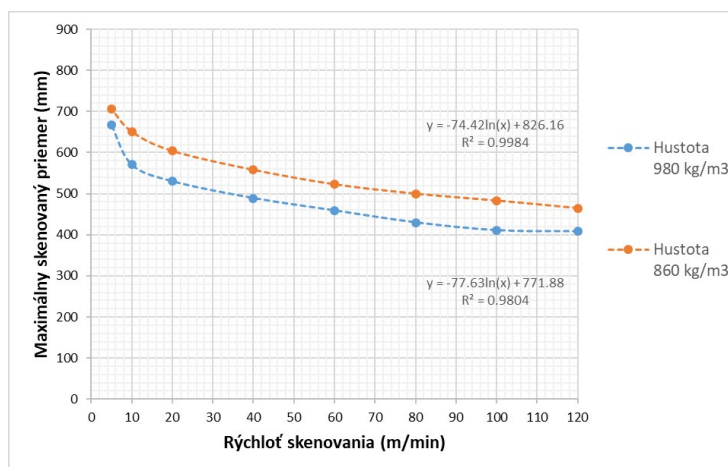


Obrázok 2. Mapa expozície ionizujúcim žiarením 3D CT pracoviska skenovania guľatiny [3].

Požiadavky na guľatinu z hľadiska priemeru, krivosti, veľkosti koreňových nábehov

Návrh zníženia rizika zaseknutia guľatiny v skenovacom tuneli vychádza z empirických skúseností zo skenovaných približne 200 kusov listnatej guľatiny v dĺžkach od 4 m do 8 m. V prípade dubovej guľatiny boli identifikované prípady, ktoré nie sú vhodné na CT skenovanie: a) guľatina s priemerom väčším ako 900 mm, b) guľatina s výrazným koreňovým nábehom, c) guľatina s výraznou krivosťou, d) guľatina s kombináciou krivosti a koreňových nábehov.

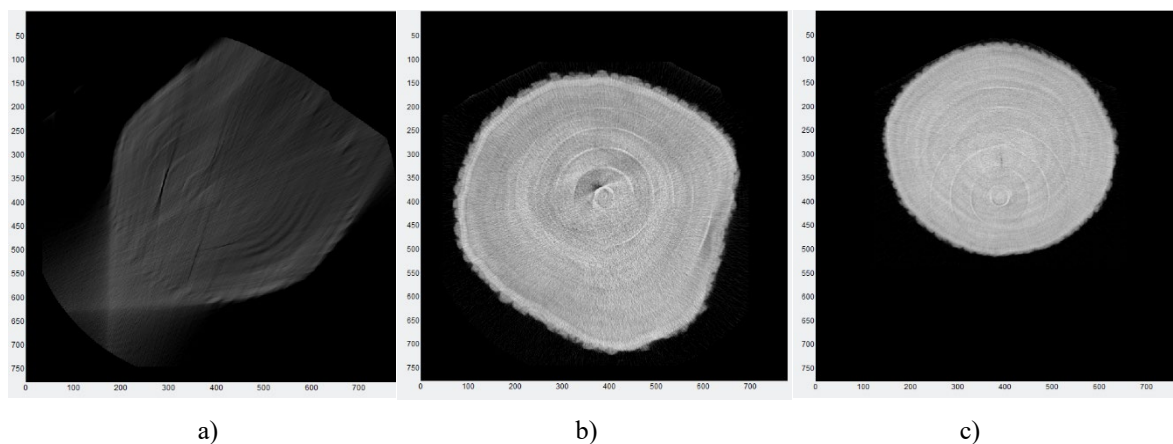
Maximálny priemer dreva, ktorý možno skenovať, aby sa správne zobrazili vnútorné chyby dreva, závisí od rýchlosti snímania a hustoty materiálu. Obr. 3 zobrazuje závislosť maximálneho skenovaného priemeru od rýchlosti skenovania pre dve hustoty čerstvého tvrdého listnatého dreva.



Obrázok 3. Závislosť maximálneho skenovaného priemeru od rýchlosti skenovania

Porucha CT skenov

Najčastejšie poruchy zistené pri analýze CT snímok sú vizualizované na Obr. 4a) - nesprávne vyhotovený sken v dôsledku nesprávnej synchronizácie dopravníkového pasu CT skenera a otáčok skenovacieho portálu; Obr. 4b) - zhoršenie kvality snímku z dôvodu prekročenia maximálneho priemeru guľatiny; Obr. 4c) - prítomnosť kruhového artefaktu v CT snímke. Tieto artefakty vznikajú najčastejšie nesprávnou kalibráciou detektorov alebo zlou polohou jedného z detektorov.



Obrázok 4. Poruchy v procese CT skenovania guľatiny [3]

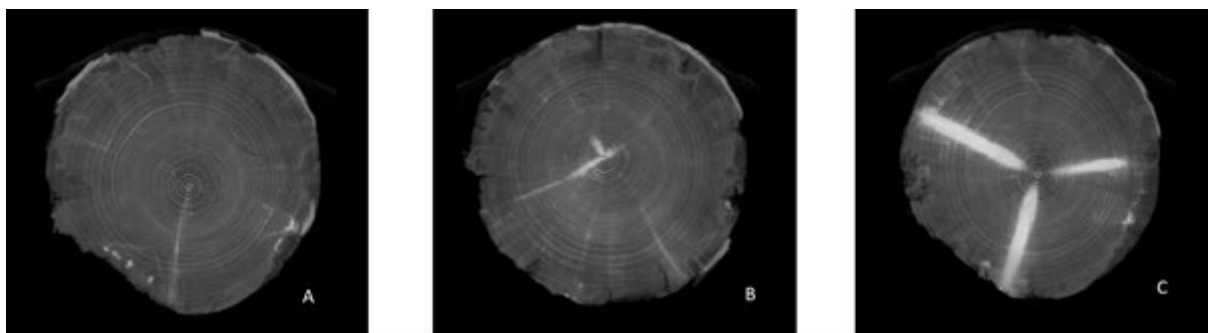
Protokolu zo skúšky kvality skenovanej guľatiny

Výsledky z prvého experimentu - využiť informácie z CT skenovania prostredníctvom aukcie s cennými výrezmi guľatiny. Cieľom bolo vytvoriť metodiku hodnotenia kvality skenovaného výrezu a výsledky vhodne interpretovať ak aby boli použité pre potencionálnych záujemcov účastných aukcie cenných výrezov guľatiny. Navrhnutá forma výstupu je prostredníctvom protokolu zo skúšky, ktorý obsahuje Identifikačné údaje zákazníka, základné údaje o skenovanom kmeni, zaradenie do triedy kvality podľa (STN 48 0055/ STN 48 0056), sagitálne zobrazenie skenovaného kmeňa [2]. Hlavná časť protokolu obsahuje zoznam identifikovaných vnútorných znakov kmeňa s údajmi o kategórii chyby, vzdialenosti od čela guľatiny, CT snímok identifikovanej chyby. Nasleduje analýza tvaru skenovanej guľatiny a informácie o meracom postupe a meracích zariadeniach. Záver protokolu obsahuje podpis osoby, ktorá test uskutočnila a schválila. Protokol je dostupný aj v anglickej jazykovej mutácii príloha č. 1.

Skúšobné protokoly boli reálne otestované v konkrétnej prevádzke a to na aukcii s cennými výrezmi guľatiny, ktorú organizovali Lesy Slovenskej republiky, štátny podnik, Odštepňý závod Kriváň v dňoch 19. 3. – 21. 3. 2024. Naskenovaných bolo 24 kusov guľatiny (16,07 m³) a následne vypracovaných 24 protokolov kvality skenovanej guľatiny (viď. príloha Ostatné aplikačné výstupy 01).

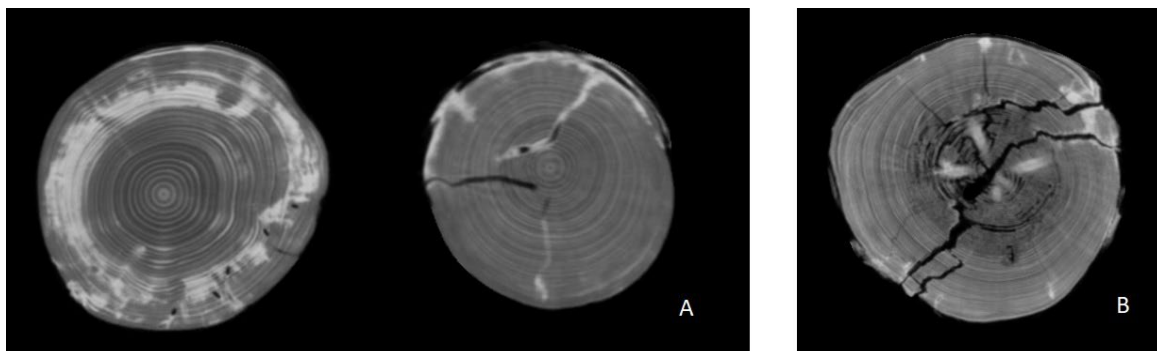
vnútorné chyby dreva spôsobené drevokazným hmyzom

Vnútorné chyby dreva spôsobené drevokazným hmyzom. V spolupráci s LOS Banská Štiavnica sa uskutočnil experiment, ktorého cieľom bolo preskenovať poškodenú smrekovú guľatinu. Išlo o biotické poškodenie smrekového dreva. Skenované výrezy boli dlhé od 60 do 120 cm. Identifikované boli výrazné poškodenia drevokazným hmyzom – lokalizované zárodky hmyzu (A), podkôrne požerky (B) a požerky smerujúce k stržňu (C). Ďalším cieľom je pracovať na pokročilej automatickej detekcii a identifikácii drevokazného hmyzu pomocou aplikovania AI (obr. 5).



Obrázok 5. Biotické poškodenie smrekového dreva viditeľné v CT snímkach

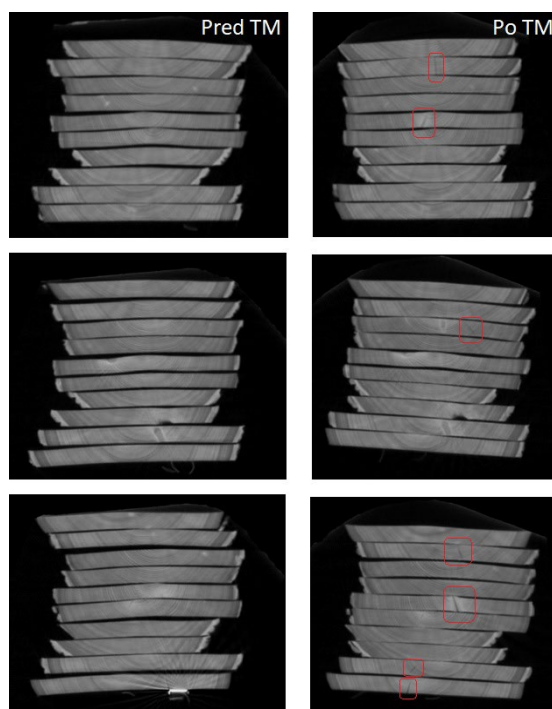
V spolupráci s Mendelovou univerzitou v Brne, CE LignoSilva pracovalo na experimente diplomovej práce „Analýza možností využitia vizuálnych metod a frekvenčne-rezonančných technik pro odhad možností zpracování pilařské kulatiny“. V našom prípade s využitím 3D CT technológie sa identifikovalo hlboké napadnutie hmyzom (A) a mäkká hniloba s výraznými trhlinami (B) (obr. 6).



Obrázok 6. Napadnutie hmyzom smrekového dreva viditeľné v CT snímkach

Použité CT skenovacej technológie na rezivo s jaseňa ktoré bolo podrobené termickej modifikácii

Testovaná bola možnosť skenovania reziva samotného, možnosti zobrazenia a sústredili sme sa na vyhodnotenie vzniku trhlín v termicky upravenom dreve. V spolupráci s Technickou univerzitou vo Zvolene a spoločnosťou Jantarwood s.r.o. vznikol experiment, v ktorom sa využila 3D CT technológia na identifikáciu novovzniknutých vnútorných trhlín a výsušných prasklín po termizácii. Pre porovnanie sa skenovanie uskutočnilo v dvoch etapách, pred termizáciou a po nej. Skenované boli výrezy s dĺžkou 200 a 300 cm. Trhliny sa objavili lokálne. Overením pomocou 3D CT technológie sa zistilo, že vznikli nielen viditeľné výsušné trhliny na povrchu reziva, ale aj vnútorné trhliny, voľným okom neviditeľné (obr. 7). Tieto trhliny by sa objavili až pri ďalšom technologickom spracovaní. Vnútorné trhliny vznikajú na základe Soretovho efektu, kde sa pri sušení viazaná voda z povrchu – okraja reziva vplyvom teploty kumuluje v jeho strede a následne sa prudko uvoľňuje vláknami smerom z reziva.



Obrázok 7. Porovnanie CT snímkov jaseňového reziva pred a po termickej modifikácii (TM) z hľadiska prítomnosti trhlín

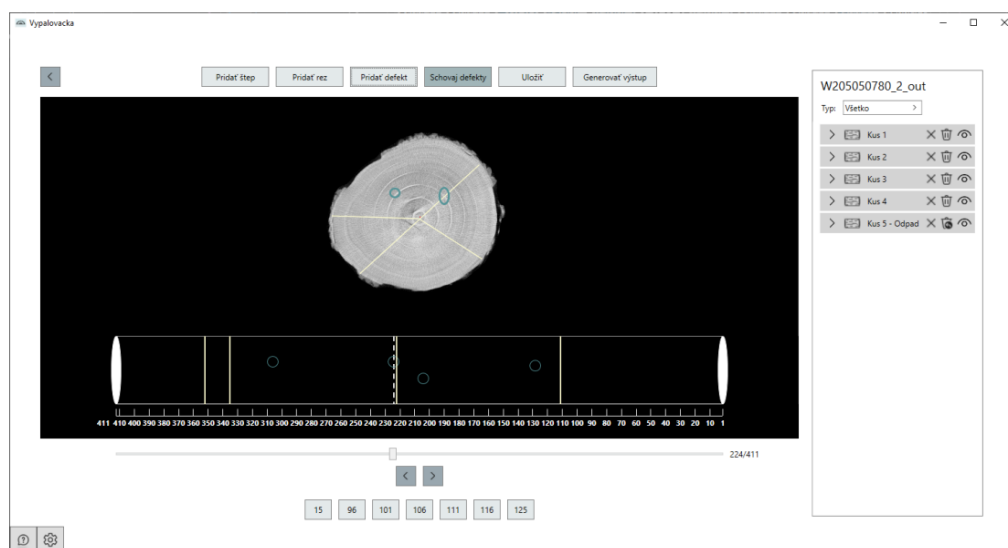
Nasadenie CT skenovacej technológie spolu z vyvinutým softvérom na vypaľovanie rezných alebo štiepacích plánov na čelo guľatiny

V roku 2024 bola 3D CT skenovacia linka doplnená o unikátne zariadenie prvé svojho druhu – vypaľovačka rezných alebo štiepacích plánov na čelo guľatiny (obr. 8). Koncept je vytvorenie vypaľovanej hlavy vybavenej žeravým segmentom (450 °C), ktorú je možné posúvať v x, y, z osiach a zároveň rotovať vypaľovacou hlavou o 360 °.



Obrázok 8. Vypaľovacia hlava nainštalovaná na 3D CT skenovacej linke

K samotnému vypaľovaciemu zariadeniu prislúcha aj softwarové riešenie. Ide o software „Vypaľovačka“ (Obr. 9). Softvér je vytvorený na základoch softvéru OPTIREZ (vznikol v projekte SLOVLES). V súčasnosti máme ukončenú prvú fázu budovania softvéru, ktorý dnes umožňuje vizualizovať 3D model guľatiny prehliadať jednotlivé chyby, softvér umožňuje označovať jednotlivé relevantné chyby manuálne a následne uskutočniť priečne krátenie guľatiny. Softvér premieta označené chyby vo zvolenom výreze na čelo guľatiny a operátor má možnosť navrhnuť rezný alebo štiepací plán na čelo guľatiny. Tento rezný alebo štiepací plán je následne vypálený (unikátnym vypaľovacím zariadením na čelo guľatiny. Týmto spôsobom vieme vymanipulovať nežiaduce defekty zo skenovanej guľatiny duba za účelom produkcie štepov na výrobu dobových sudov (Obr. 10).



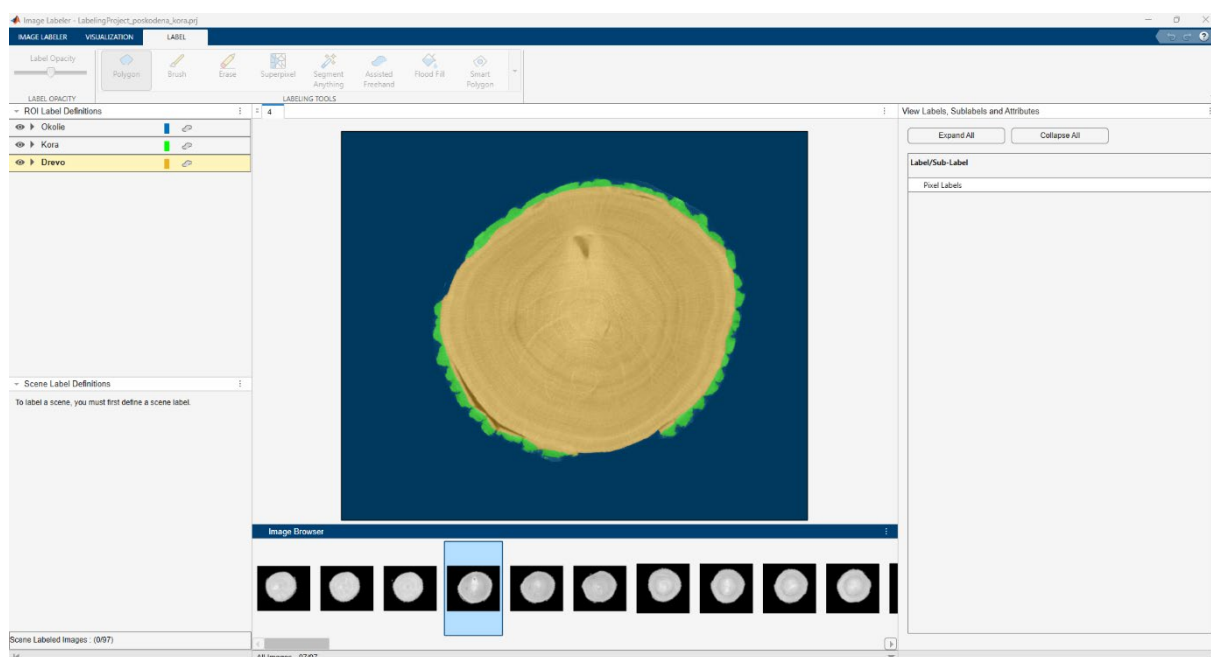
Obrázok 9. Prostredie programu Vypaľovačka



Obrázok 10. Vyštiepnutá časť s hrčou z dubového výrezu na základe CT skenovania

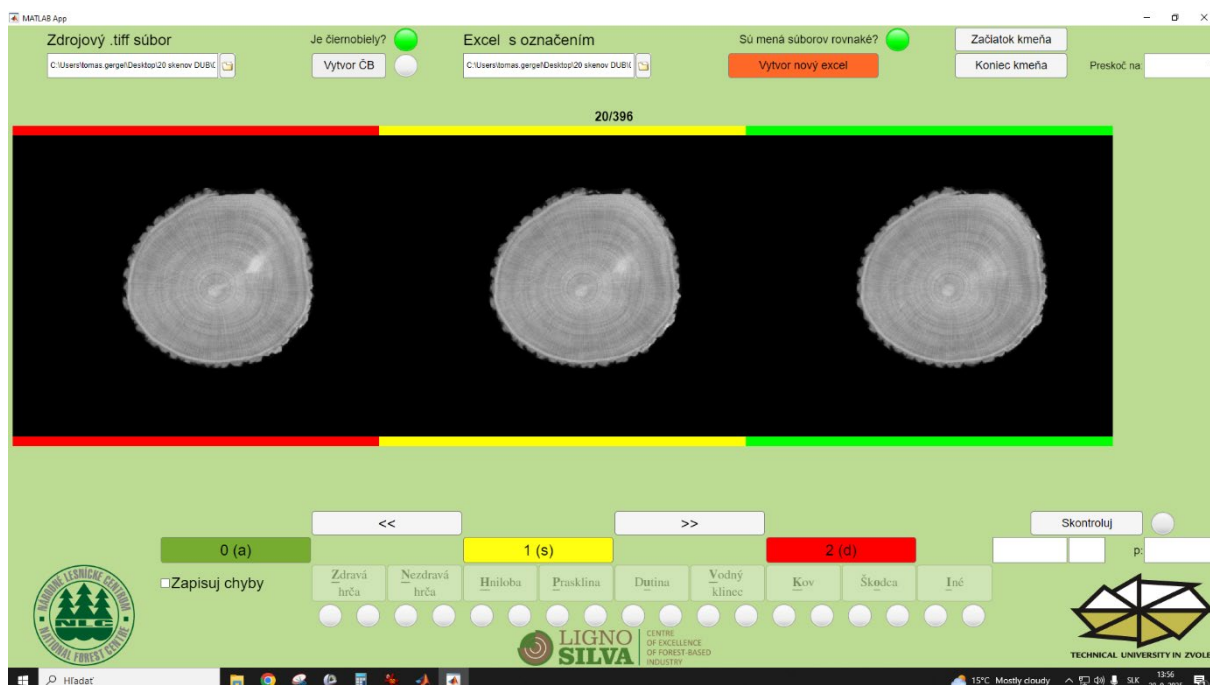
Trénovanie neurónových sietí prebieha na budovanej databáze CT skenov stromov LIBROARBOR. Pri označovaní jednotlivých znakov v CT snímkach sme postupovali podľa nasledovnej metodiky. Ako prvý znak, ktorý je potrebné správne detegovať, je druh dreveniny a poloha stržňa v CT snímke. Táto detekcia bola úspešne nasadená. Následne pristupujeme k trénovaniu neurónovej siete na automatickú detekciu kôry.

Na trénovanie neurónovej siete využívame anotované CT snímky v prostredí MATLAB, pričom používame vstavanú aplikáciu Image Labeler. Pomocou ručného vyznačovacieho nástroja označujeme tri kategórie oblastí v každej snímke: pozadie, guľatinu (t.j. vnútornú drevnú hmotu) a kôru. Takto pripravené anotácie slúžia ako vstupné dáta pre trénovanie klasifikačných modelov, ktoré následne umožňujú automatickú identifikáciu týchto oblastí v nových CT snímkach. Tento postup zabezpečuje vysokú presnosť segmentácie a vytvára základ pre ďalšiu detekciu vnútorných defektov dreva. Vyznačovanie kôry sa uskutočnilo (Obr. 11) na 3 CT skenoch výrezov dubu čo predstavuje 380 CT snímkov.



Obrázok 11. Anotácia CT snímkov za účelom trénovania automatickej detekcie kôry v prostredí Matlab

Po úspešnom natrénovaní neurónovej siete na detekciu kôry sa môže pokračovať k detekcii ďalších znakov, ktoré sa nachádzajú vo vnútri jednotlivých CT snímkov, ako praskliny, hniloba, zdravé a nezdravé hrče. Keďže ide o rôzne znaky s vysokou variabilitou, je nevyhnutné najskôr natrénovať neurónovú sieť tak, aby bola schopná rozlíšiť, či je v danom CT snímku chyba alebo nie je. Informácia sa zaznamenáva v tabuľke programu Excel, kde ku konkrétnemu číslu poradia CT snímky sa zaznamená neprítomnosť znaku – 0, nerozhodnosť – teda vylúčenie snímky z tréningu – 1, a prítomnosť chyby – 2. Softvérové rozhranie, ktoré sme si vytvorili na mieru v prostredí MATLAB, slúži na zefektívnenie označovania a klasifikácie stoviek CT snímkov. Aplikácia je zároveň pripravená na konkrétnu klasifikáciu jednotlivých znakov v snímkach a umožňuje zobrazit' pravdepodobnosť, s akou bola určená prítomnosť daného znaku v CT snímke. Umožňuje načítanie snímok, výber konkrétneho čísla, označovanie chýb, export do Excelu a vizuálnu kontrolu pomocou farebnej škály. Využívame funkcie ako „Zapisuj chyby“, „Skontroluj“, „Excel s označením“ či „Vyber nový Excel“, ktoré zjednodušujú celý proces anotácie a prípravy dát pre ďalšie fázy analýzy (Obr.12).



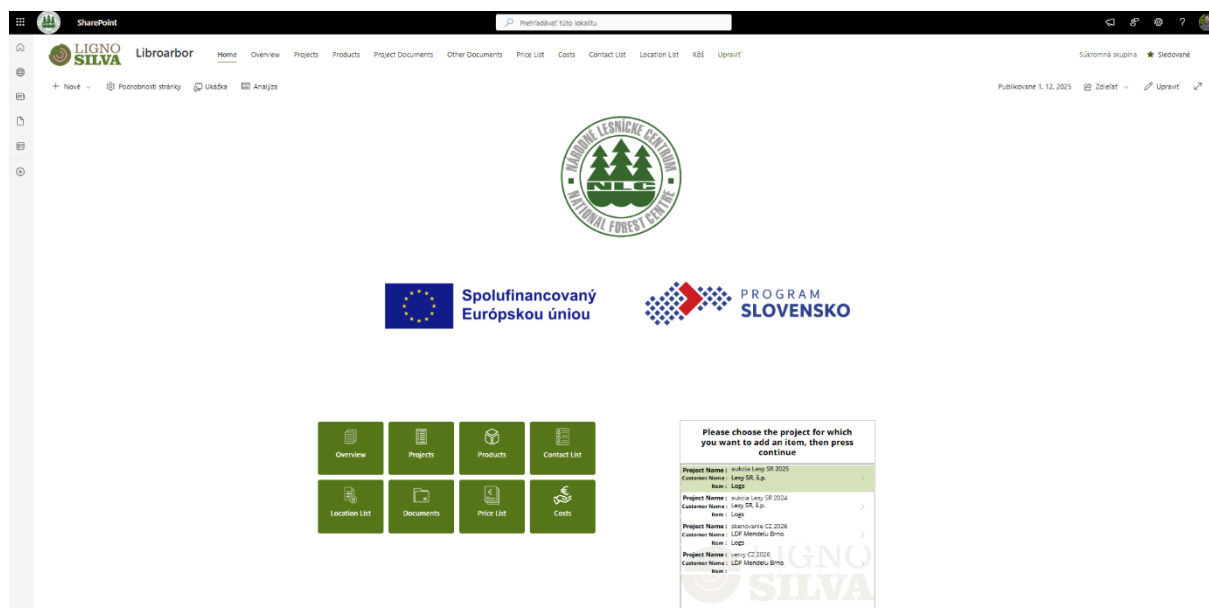
Obrázok 12. Prostredie aplikácie na zjednodušenie anotovania CT snímkovo na prítomnosť alebo neprítomnosť znaku/ chyby v CT snímkach

Vytvorená aplikácia zároveň kontroluje, či je CT snímka v čiernobiely formáte (ak nie je, je možné ju previesť do čiernobieleho formátu), overuje, či názov CT snímky korešponduje s názvom vytvoreného Excel súboru. V aplikácii je možné kontrolovať automatickú klasifikáciu na prítomnosť alebo neprítomnosť znakov v CT snímke, vrátane jej číselného vyjadrenia pravdepodobnosti.

Libroarbor - databáza CT skenov

V rámci riešenia tohto projektu bola významne dobudovaná databáza CT skenov guľatiny dreva - LIBROARBOR. Vytvorená databáza je sprístupnená pomocou internetovej stránky <https://www.lignosilva.eu/download/>. Na stránke záujemca požiada o udelenie prístupu do databázy prostredníctvom formulára. V súčasnosti databáza obsahuje CT skeny drevín: dub, buk, smrek, borovica, jaseň, lipa, osika, brest, hrab.

V projekte Digiwood sme sa zamerali na doplnenie databázy skenov duba - v súčasnosti evidujeme 961 CT skenov duba, čo predstavuje cca 384 000 CT snímok.



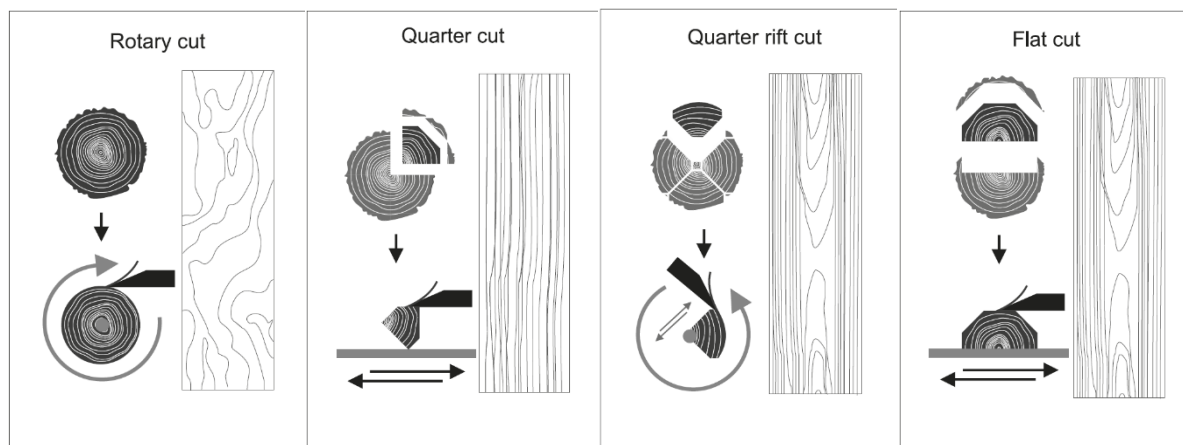
Obrázok 13. Aplikácia databázy Libroarbor

Virtuálna tvorba dýh z CT skenov guľatiny v aplikácii OptiRez

V roku 2026 bol v rámci výskumno-vývojových aktivít rozšírený softvér OptiRez [5] o nový doplnok, ktorý umožňuje virtuálnu tvorbu dýh z 3D CT skenov guľatiny. Cieľom riešenia je poskytnúť používateľovi realistický náhľad na vnútornú štruktúru kmeňa a jej prejav na výslednej dyhe ešte pred fyzickým spracovaním suroviny. Nástroj tak podporuje optimalizáciu výroby, predikciu kvality a efektívnejšie rozhodovanie pri využívaní hodnotnej guľatiny.

Doplnok pracuje s vysokokvalitnými CT skenmi guľatiny, z ktorých je vytvorený trojrozmerný model vnútorných vlastností kmeňa. Na základe tohto modelu je následne možné realizovať simulované technologické postupy lúpania a krájania. Implementované sú štyri základné spôsoby výroby dýh (Obr. 15):

- Rotačný spôsob (rotary peeling). Guľatina sa simuluje ako rotujúca okolo pozdĺžnej osi a dyha je odvíjaná plynule po špirále. Tento spôsob umožňuje detailne zachytiť prepojené útvary ako hrče, nepravidelnosti či zmeny hustoty, keďže prechádza celým prierezom kmeňa v kontinuálnom zábere.
- Štvrt'ový spôsob (quartering). Kmeň je virtuálne rozdelený na štyri kvadranty, pričom dyhy sú generované z jednotlivých segmentov s typickým vertikálnym smerovaním textúry. Simulácia vystihuje najmä výrazné žilkovanie a anizotropiu anatomických štruktúr.
- Plošný spôsob (flat slicing). Krájanie prebieha tangenciálne k letokruhom, čo v simulácii umožňuje získať široké dyhy s typickými dekoratívnymi obrazcami. Metóda je vhodná na predikciu výsledného estetického charakteru pri výrobe okrasných dyhových listov.
- Rift spôsob (rift slicing). Ide o špecifický uhol krájania, ktorý minimalizuje výrazné letokruhovú kresbu a zvýrazňuje rovnomernú líniovú textúru. Virtuálny model umožňuje presné nastavenie geometrie rezu, čím poskytuje detailnú kontrolu nad predpokladaným vzhľadom riftových dýh.



Obrázok 14. Prehľad spôsobov výroby dýh

Výsledkom simulácie je rozprestretá virtuálna dyha, ktorá obsahuje všetky relevantné vnútorné znaky guľatiny zistené pomocou CT:

- priebeh a intenzita hrčí,
- praskliny, trhliny a vnútorné dutiny,
- zmeny hustoty a rozdiely v anatomickej štruktúre,
- vlnenie vlákien a odchýlky od ideálneho smeru (grain deviation),
- prítomnosť defektov a anomálií.

Všetky tieto prvky sú prenesené do finálnej vizualizácie vo forme detailnej 2D projekcie. Používateľ má možnosť meniť parametre rezania, sledovať ich dopad na vzhľad dyhy a porovnávať alternatívne scenáre spracovania ešte pred fyzickým zásahom do materiálu.

Implementácia doplnku prináša niekoľko kľúčových výhod [6]:

- Prediktívna kontrola kvality – možnosť odhadnúť vzhľad a použiteľnosť guľatiny pre výrobu dekoratívnych dyh.
- Optimalizácia procesu – výber najefektívnejšieho spôsobu krájania z hľadiska výťažnosti, hodnoty a estetickej kvality.
- Úspora materiálu a nákladov – eliminácia nevhodných kmeňov ešte pred spracovaním.
- Podpora výskumu a vývoja – presné modely vnútorných vlastností dreva umožňujú nové formy analýz a experimentov.

5 Prehľad dosiahnutých výstupov projektu

Tabuľka 1.

P.č.	Výstup	2022	2023	2024	2025	2026
1	Vedecká monografia					
2	Odborná monografia					1
3	Vedecký článok s impact faktorom			1/1		1
4	Vedecký článok		1/1		1/2	
5	Odborný článok, referát		1/1	1/4	1/1	
6	Zorganizovaná konferencia			1/1		1
7	Vyvolaný projekt	1/1		0/1	1/7	
8	Patent alebo iný chránený výstup					
9	Softvérový produkt			1/1		
10	Legislatívny predpis					
11	Ostatné aplikačné výstupy		1/1	1/3	1/2	1
Spolu výstupov		1/1	3/3	5/11	4/12	4

Podakovanie

Táto štúdia bola financovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence z kontraktu NLC s MPRV SR v rámci projektu výskumného zámeru NLC 2022-2026 Digiwood. Vznik tohto príspevku podporila Agentúra na podporu výskumu a vývoja v rámci projektu č. APVV-21-0032 „Certifikovanie kvality guľatiny na základe vnútorných chýb dreva“, a APVV-20-0118 „3D CT detekcia a optimalizácia výťažnosti bukovej guľatiny“.

Literatúra

- [1] GERGEL, T., BUCHA, T., GEJDOŠ, M., VYHNÁLIKOVÁ, Z. 2019. Computed tomography log scanning – high technology for forestry and forest-based industry. *Central European Forestry Journal*, 65(1), 51–59.
- [2] GEJDOŠ, M., GERGEL, T., MICHAJLOVÁ, K., BUCHA, T., GRACOVSKÝ, R. 2023. The accuracy of CT scanning in the assessment of the internal and external qualitative features of wood logs. *Sensors*, 23(20), 8505.
- [3] GERGEL, T. 2021. *3D zobrazovacie technológie pre detekciu chýb dreva*. Zvolen : Národné lesnícke centrum.
- [4] GERGEL, T., SEDLIAK, M., BUCHA, T., ORAVEC, M., SLAMKA, M., PÁSTOR, M. 2020. Prediction model of wooden logs cutting patterns and its efficiency in practice. *Applied Sciences*, 10(9), 3003.
- [5] ONDREJKA, V., GERGEL, T., BUCHA, T., PÁSTOR, M. 2021. Innovative methods of non-destructive evaluation of log quality. *Central European Forestry Journal*, 67(1), 3–13.
- [6] BUCHA, T., GERGEL, T. 2021. 3D CT skenovacie technológie pre zvyšovanie výťažnosti dreva, robotizácia a automatizácia procesov spracovania dreva. In: *BIOEAST Foresight Conference – New technologies in wood value chains*. Zvolen : CoE LignoSilva.

Zhrnutie

Digital Technologies for Increasing Added Value in Timber Grading, Sorting, and Wood Processing (DIGIWOOD). The DIGIWOOD project (2022–2026) focuses on integrating advanced digital technologies into the wood value chain to improve forest inventory, timber grading, and processing efficiency. Its core objective is to validate the use of mobile terrestrial laser scanning (PLS) for stand-level inventory, and 3D CT scanning for detecting internal wood defects in hardwood logs. The project is divided into three sub-tasks: digitalizing sorting procedures, developing algorithms for defect detection in CT data, and creating methods for continuous tracking of timber and sawnwood. Results include new methodologies for PLS-based forest inventory, CT-based defect identification, and optimization of log grading to increase yield and reduce human subjectivity. Additional outputs include CT-based quality protocols, experiments on insect-damaged wood, thermal modification studies, development of software for marking cutting plans, and expansion of the Libroarbor CT database. The project provides practical tools for industry and supports more efficient, data-driven wood processing.

Kľúčové slová

3D CT skenovanie; druhotenie dreva; detekcia vnútorných chýb; optimalizácia spracovania dreva; 3D CT scanning; Timber grading; Internal defect detection; Wood processing optimization

Kontaktné adresy

Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Národné lesnícke centrum
Sekcia pre vedu a výskum
T.G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovak Republic
tomas.gergel@nlcsk.org

MODELÝ BIOMASY STROMOVÝCH KOMPONENTOV BREZY PREVISNUTEJ PRVEJ VEKOVEJ TRIEDY

Bohdan Konôpka, Vlastimil Murgaš, Jozef Pajčík, Vladimír Šebeň

1 Úvod

Breza previsnutá (*Betula pendula* Roth.) je listnatá devina, ktorá je rozšírená na väčšine územia Európy, s najvyššou frekvenciou výskytu v severských krajinách (San-Miguel-Ayanz et al. 2016). Pokiaľ ide o Slovensko, najnovšie údaje z Národnej inventarizácie a monitoringu lesov ukázali, že hoci brezy (prevažne *B. pendula*, menej *B. pubescens* Ehrh.) prispievajú k zásobe drevnej hmoty na lesnej pôde iba približne 1 %, podstatne väčší podiel, teda asi 6,5 %, sa zistil na nelesných plochách, prevažne na bývalých poľnohospodárskych pozemkoch (Šebeň 2017). Inventarizačné údaje ďalej naznačili, že brezy sa vyskytujú s vyšším podielom v mladých porastoch než v starších. Tento jav súvisí s rozsiahlymi lesnými disturbanciami smrekových porastov na Slovensku, najmä v ostatných dvoch desaťročiach. Po týchto kalamiťach spravidla nasledovala prirodzená obnova lesa s vysokým zastúpením pionierskych drevín, predovšetkým briez (Konôpka et al. 2019). Preto je veľmi pravdepodobné, že podiel brezy na zásobe drevnej hmoty na lesnej aj bývalej nelesnej pôde sa v blízkej budúcnosti zvýši v dôsledku postupnej akumulácie jej biomasy. Navyše možno očakávať ďalšie rozsiahle disturbance v lesoch Slovenska, a preto môžu brezy zohrávať významnú úlohu ako pionierske dreviny pri obnove lesa a vytvárať priaznivé rastové podmienky (mikroklimu a vlastnosti pôdy) pre iné dreviny (Kacálek et al. 2017). Ich výhodou je, že na rozdiel od iných pionierskych drevín nie sú atraktívnym zdrojom potravy pre veľké voľne žijúce bylinožravce, ako je jelen lesný, daniel škvrnitý, muflón lesný či srnec lesný. Preto ju táto zver nepoškodzuje.

V podmienkach strednej a západnej Európy sú brezy pre drevospracujúci priemysel málo významné, avšak plnia rôzne ekologické funkcie (Kula 2011). Odlišná situácia je v škandinávskych a pobaltských krajinách, a to jednak v dôsledku vysokého podielu brezy na zásobe drevnej hmoty (napr. vo Fínsku a Nórsku približne po 16 %, v Estónsku a Lotyšsku až po 20 %), ako aj vďaka dlhšej tradícii využívania brezového dreva v priemysle (Kurvits et al. 2020). Zároveň hrozí energetická kríza, resp. redukcia využívania fosílnych palív v Európe zvyšuje dopyt po dreve ako vykurovacom médiu a zdroji energie. Preto predpokladáme, že aj breza môže na európskom trhu získať väčší význam, než mala v minulosti.

Hlavným cieľom práce bolo odvodiť alometrické modely pre biomasu brezy previsnutej s ohľadom na jednotlivé stromové komponenty (listy, konáre, kmeň bez kôry, kmeňová kôra a korene), ako aj ich agregovanú formu, t. j. celkovú biomasu stromu. Všetky modely využili hrúbku kmeňa meranú na jeho báze (v ďalšom texte hrúbka d_0) ako prediktor. Keďže odobraté stromy pochádzali z ôsmich lokalít po celom území Slovenska, naše alometrické vzťahy môžu byť prakticky použiteľné pre celé Západné Karpaty.

2 Materiál a metódy

Hlavnými kritériami pre výber odberových porastov boli tieto: pôvod výlučne z prirodzenej obnovy, podiel brezy previsnutej v druhovom zložení z počtu stromov najmenej 50 % a priemerný vek porastu nižší ako 20 rokov. Následne sme vykonali terénne prieskumy a nakoniec vybrali osem porastov pre ďalší odber vzorníkových stromov.

Naše odberové porasty sa nachádzali na týchto lokalitách (v zátvorkách sú uvedené súradnice a nadmorské výšky jednotlivých plôch, ako aj geomorfologické podprovincie, ku ktorým patria):

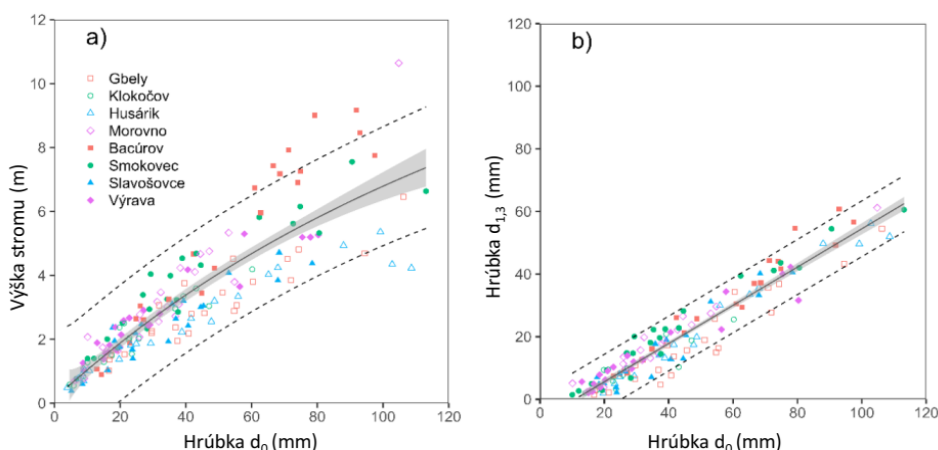
1. Gbely (171 m n. m.; zem. šírka: 48,7289° S, zem. dĺžka: 17,1025° V; Borská nížina),
2. Klokočov (692 m n. m.; 49,4621° S, 18,5413° V; Západné Beskydy),
3. Husárik (750 m n. m.; 49,4143° S, 18,7692° V; Javorníky),
4. Morovno (619 m n. m.; 48,7368° S, 18,7188° V; Vtáčnik),
5. Bacúrov (449 m n. m.; 48,5271° S, 19,0423° V; Štiavnické vrchy),
6. Smokovec (890 m n. m.; 49,1291° S, 20,2310° V; Vysoké Tatry),
7. Slavošovce (640 m n. m.; 48,7301° S, 20,2928° V; Slovenské rudohorie),
8. Výrava (505 m n. m.; 49,2068° S, 21,9747° V; Nízke Beskydy).

V rámci ôsmich vybraných porastov sa celkovo odobralo a zmeralo 180 jedincov brezy previsnutej. Na každej lokalite bolo vybraných medzi 20 až 25 stromov tak, aby pokrývali celý výškový rozsah porastu. Pred spílením stromu sme odmerali hrúbky d_0 ako aj $d_{1,3}$. Odberový strom sa spílil na úrovni pôdy a zmerali sme jeho výšku (pre ilustráciu rozpätí hodnôt výšok a hrúbok vzorníkových stromov pozri Obrázok 1).

Nadzemné časti stromu sme oddelili na vetvy s listami a kmeň. Stromové komponenty sa zabalili do papierových vriec označených špecifickými kódmi. Podzemné časti stromu (koreňový systém) boli starostlivo vykopané podľa princípu zahrnutia všetkých koreňových segmentov s hrúbkou nad 2 mm. Vzorky podzemných častí sme zabalili do papierových vriec, označili a previezli spolu s ostatnými vzorkami do laboratória. Tam boli listy oddelené od konárov a pripravené pre ďalšie spracovanie.

Kmene sme rozpíliť na približne 50 cm dlhé úseky (menšie stromy na kratšie úseky a to tak, aby predstavovali aspoň tri segmenty na strom). Potom sa zmerali hrúbky na oboch koncoch a v strede každého segmentu, vždy v dvoch kolmých smeroch. Kôra bola z každého úseku kmeňa olúpaná a hrúbky boli merané rovnakým spôsobom ako pred olúpaním.

Vzorky sme skladovali v suchom a dobre vetranom priestore približne jeden mesiac. Následne sme jednotlivé stromové komponenty, t. j. kmeň, listy, konáre, kmeň bez kôry, kmeňovú kôru a korene, vysušili v sušičke pri teplote 105 °C až do dosiahnutia konštantnej hmotnosti. Suché stromové komponenty sme odvážili digitálnou váhou (presnosť $\pm 0,1$ g).



Obrázok 1. Bodové pole výšok stromov a hrúbok d_0 , resp. $d_{1,3}$ a ich vzájomné regresné vzťahy. V grafoch sa okrem modelových kriviek vyznačili 95 %-né pásma spoľahlivosti (sivá plocha) a 95 %-né pásma predikčných intervalov (prerušované čiary). Podrobný popis modelov sa uvádza v práci Konôpka a kol. (2023).

Na základe zistených hmotností jednotlivých stromových komponentov sa skonštruovali alometrické vzťahy založené na hrúbke d_0 ako nezávislej premennej. Zároveň sa takéto modely vytvorili aj pre objem kmeňa jednak s kôrou, ako aj bez kôry. Presný popis konštrukcie modelov je v práci Konôpka a kol. (2023). Pre obmedzený priestor v tomto zborníku nebudeme matematický postup odvodenia alometrických vzťahov opisovať. Zároveň vzorce modelov a príslušné štatistické charakteristiky sa neuvedú v tomto príspevku (sú dostupné v už uvádzanej práci). Vo výsledkoch sa zameriame iba na grafické vyjadrenie alometrických vzťahov.

3 Výsledky a záver

Alometrické modely sa graficky vyjadrili v Obrázku 2. Predstavujú biomasu (t.j. hmotnosť masy po vysušení) pre listy, konáre, kmeňovú kôru, kmeň bez kôry, korene a pre všetky komponenty spolu, tzn. celý strom. Grafické zobrazenie naznačilo, že najväčšiu časť stromovej biomasy predstavoval kmeň, najmenšiu listy. Celková stromová biomasa napríklad pri brezách s hrúbkou d_0 rovnou 7 cm bola v zmysle modelu okolo 5 kg, v prípade jedincov s hrúbkou d_0 rovnou 10 cm to bolo približne 9 kg. Približne 50 % zo sušiny drevín tvorí uhlík. Takže tieto modely (ich polovičné hodnoty) môžu poslúžiť aj na odhad množstva uhlíka viazaného v biomase mladých briez, či už na stromovej alebo porastovej úrovni.

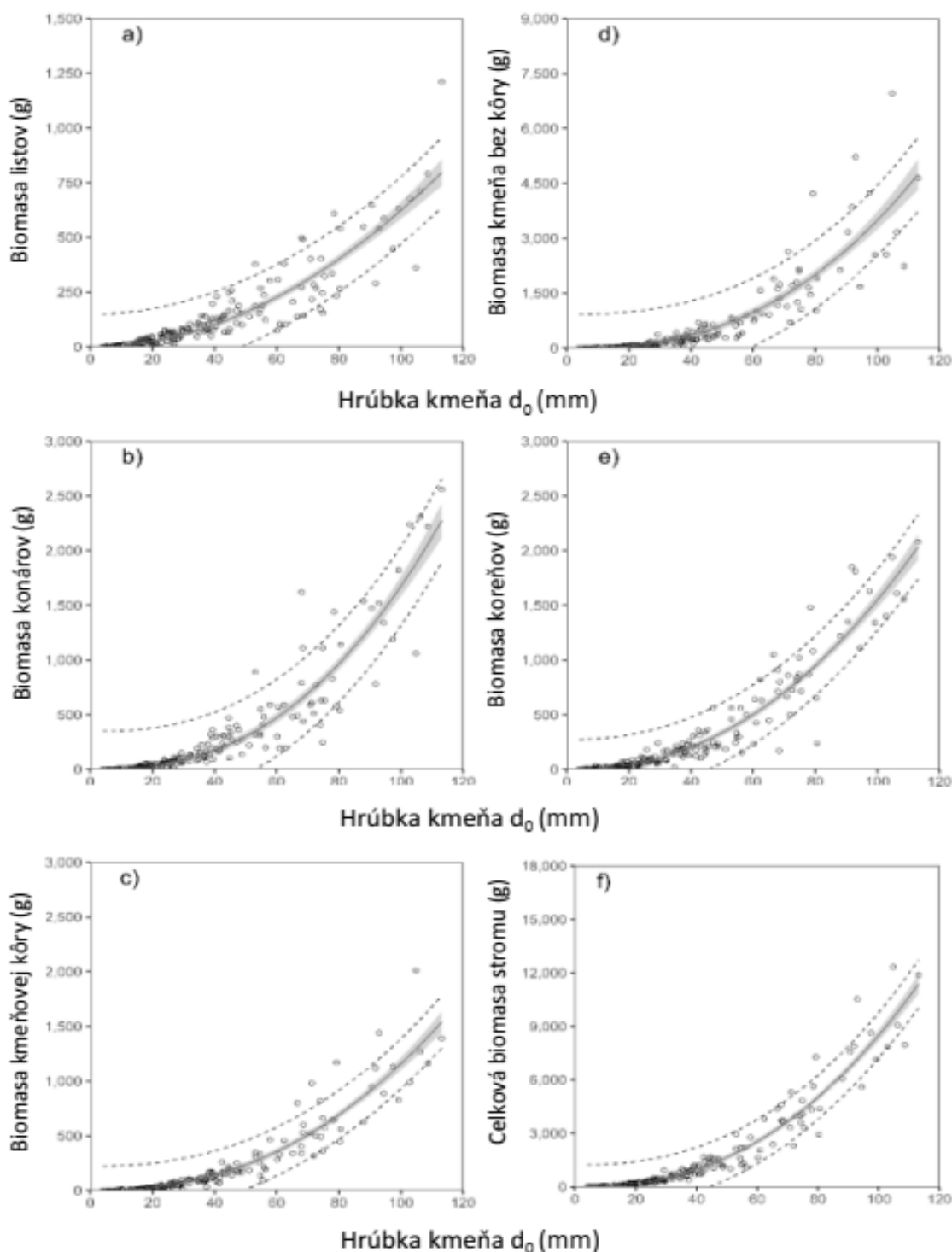
Po vypočítaní podielu jednotlivých stromových komponentov na celkovej biomase výsledky ukázali zmeny v štruktúre biomasy s veľkosťou stromu. Zistili sme, že zatiaľ čo podiel listov a koreňov s veľkosťou stromu (konkrétne vzhľadom na hrúbku d_0) klesal, podiel všetkých ostatných komponentov, najmä kmeňa s kôrou, sa so zväčšovaním stromu zvyšoval. Výsledky naznačili, že najmenšie stromy mali najväčší podiel koreňov, zatiaľ čo najväčší podiel kmeňa bol typický pre naše najhrubšie stromy.

Ďalej sme na základe hrúbky d_0 vyjadrili objem kmeňa (objemové modely), a to jednak s kôrou, ako aj bez kôry (Obrázok 3). Výsledky napríklad naznačili, že kým modelový objem kmeňa s kôrou pre brezy s hrúbkou d_0 rovnou 7 cm bol okolo 0,002 m³, v prípade jedincov s hrúbkou d_0 10 cm bol približne 0,007 m³.

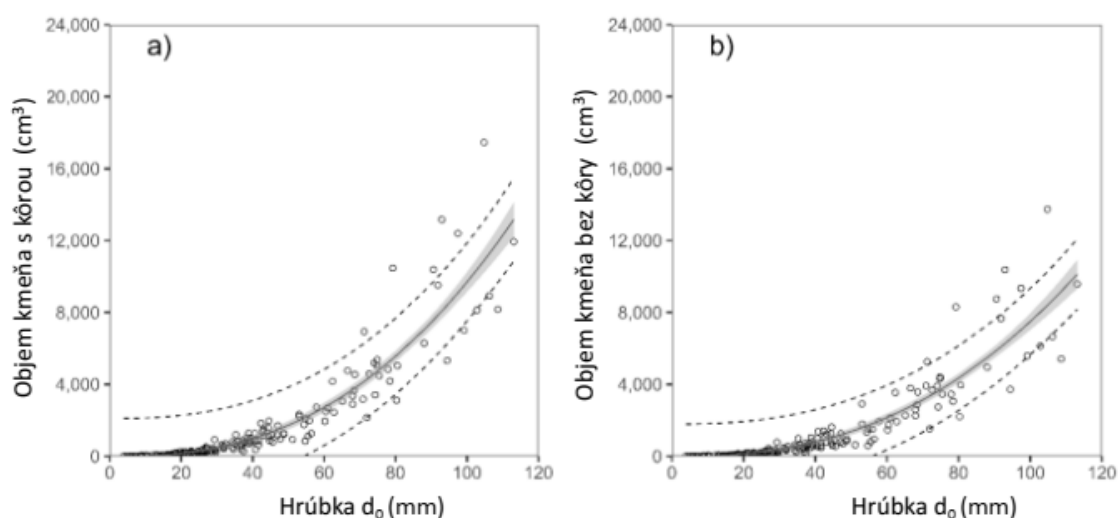
Na tomto mieste príspevku chceme poukázať na to, že je nevyhnutné konštruovať modely biomasy pre mladé stromy, pretože modely vytvorené pre staršie stromy (tieto boli predmetom výskumu viacerých predošlých prác) nie sú vôbec použiteľné vzhľadom na odlišnú alokáciu biomasy v rôznych fázach rastu (Wirth et al. 2004). Modely biomasy v jednotlivých stromových komponentoch pre porasty všetkých rastových fáz, či vekových tried sú dôležité, najmä ak je cieľom pochopiť dynamiku alokácie biomasy, a tým aj ukladanie a obeh uhlíka v lesných porastoch. V počiatočných fázach rastu väčšina mladých stromov neprežije v dôsledku konkurenčného tlaku (Šebeň et al. 2017). Následne ich rozkladajúce sa komponenty prispievajú k obehu uhlíka v lesnom ekosystéme. Pre obeh uhlíka sú mimoriadne dôležité listy, ktoré každoročne opadajú. Takže modelovanie, či kvantifikácia aj tohto stromového komponentu sú dôležité najmä z ekologického, či produkčno-ekologického významu. Tento typ alometrických vzťahov je cenný pre odhady uhlíka viazaného v lesných porastoch na regionálnej alebo národnej úrovni, ako aj na bývalých poľnohospodárskych pôdach pokrytých stromovou vegetáciou.

Potreba kvantifikácie biomasy malých stromov súvisí okrem iných okolností aj so súčasnými snahami vo väčšine európskych krajín pestovať lesy podľa princípov „prírody blízkyh procesov“ (Larsen et al. 2022). Porasty v takomto režime obhospodarovania obsahujú stromy rôzneho veku, teda aj malé stromy.

Navyše, v podmienkach Európy by manažment lesov formou prírode blízkeho viedol k vyššiemu podielu druhov, ktoré tradične neboli považované za komerčné. To zahŕňa aj mäkké listnáče, vrátane brezy previsnutej (Holmström et al. 2021).



Obrázok 2. Modely pre jednotlivé stromové komponenty (grafy a-e) a celkovú stromovú biomasu (graf f) založené na hrúbke kmeňa d_0 . V grafoch sa okrem modelovej krivky vyznačili 95 %-né pásmo spoľahlivosti (sivá plocha) a 95 % -né pásmo predikčného intervalu (prerušované čiary). Podrobný popis modelov sa uvádza v práci Konôpka a kol. (2023).



Obrázok 3. Modely pre objem kmeňa s kôrou (graf a) a bez kôry (graf b) založené na hrúbke kmeňa d_0 . V grafoch sa okrem modelových kriviek vyznačili 95 %-né pásma spoľahlivosti (sivá plocha) a 95 % -né pásma predikčných intervalov (prerušované čiary). Podrobný popis modelov sa uvádza v práci Konôpka a kol. 2023.

Pod'akovanie

Táto štúdia bola financovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence. Zároveň táto práca vznikla aj vďaka plneniu úloh v rámci projektov APVV-22-0056, APVV-23-0293, APVV-24-0081 a APVV-24-0057 financovaných Agentúrou na podporu výskumu a vývoja.

Literatúra

- HOLMSTRÖM, E., CARLSTRÖM, M., GOUDE, M., LIDMAN, F.D., FELTON, A. 2021. Keeping mixture of Norway spruce and birch in production forests: insights from survey data. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 36:155–163.
- KACÁLEK, D., MAUER, O., PODRÁZSKÝ, V., SLODIČÁK, M., HOUŠKOVÁ, K., ŠPULÁK, O. ET AL. 2017. *Meliorační a zpevňující funkce lesních dřevin*. Praha, Lesnická práce, 300 p.
- KONÔPKA, B., ŠEBEŇ, V., PAJTÍK, J. 2019. Species Composition and Carbon Stock of Tree Cover at a Postdisturbance Area in Tatra National Park, Western Carpathians. *Mountain Research and Development*, 39:R71–R80.
- KONÔPKA, B., MURGAŠ, V., PAJTÍK, J., ŠEBEŇ, V., BARKA, I. 2023. Tree Biomass and Leaf Area Allometric Relations for *Betula pendula* Roth Based on Sampling in Western Carpathians. *Plants*, 12:1607.
- KULA, E. 2011. *Bříza a její význam pro trvalý rozvoj lesa v imisných oblastech*. Prague, Publishing House for Forestry, 276 p.
- KURVITS, V., OTS, K., KANGUR, A., KORJUS, H., MUISTE, P. 2020. Assessment of load and quality of logging residues from clear-felling areas in Järveselja: a case study from Southeast Estonia. *Central European Forestry Journal*, 66:3–11

- LARSEN, J.B., ANGELSTAM, P., BAUHUS, J., CARVALHO, J.F., DIACI, J., DOBROWOLSKA, D. ET AL. 2022. Closer-to-Nature Forest Management. From Science to Policy 12. Joensuu, European Forest Institute, 54 p.
- SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DE RIGO, D., CAUDULLO, G., DURRANT, T.H. ET AL. 2016. European Atlas of Forest Tree Species. Luxembourg, Publication Office of European Union, 200 p.
- ŠEBEŇ, V. 2017. Národná inventarizácia a monitoring lesov Slovenskej republiky 2015-2016. Lesnícke štúdie 65, Zvolen, Národné lesnícke centrum, 256 p.
- ŠEBEŇ, V., KONÔPKA, B., PAJTÍK, J. 2017. Quantifying carbon in dead and living trees; A case study in young beech and spruce stand over 9 years. Central European Forestry Journal, 63:133–141.
- WIRTH, CH., SCHUMACHER, J., SCHULZE, E.D. 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe-a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. Tree Physiology, 24:121–139.

Zhrnutie

Biomass Models of Tree Components of Silver Birch in the First Age Class

Biomass allometric relations are necessary for precise estimations of biomass forest stocks as well as for the quantification of carbon sequestered by forest cover. Therefore, we attempted in creating allometric models of total biomass in young silver birch (*Betula pendula* Roth.) trees and the main components, i.e. leaves, branches, stem under bark, bark and roots. The models were based on data from 180 sample trees with ages up to 15 years originating from natural regeneration at eight sites in Slovakia. Sample trees represented individuals with stem base diameters (diameter d_0) from about 4.0 to 113.0 mm and tree heights between 0.4 to 10.7 m. Each tree component was dried to constant mass and weighed. The allometric models were in the form of regression relations using diameter d_0 as predictor. We found that the contribution of individual tree components to total biomass changed with tree size. Specifically, while shares of leaves and roots decreased, those of all other components especially stem with bark, increased. The derived allometric relations may be implemented for the calculation of biomass stock in birch-dominant or birch-admixed stands in the Western Carpathians or in other European regions.

Key words: *Betula pendula*; destructive tree sampling; allometric relations; tree biomass; stem base diameter

Kľúčové slová: *Betula pendula*; deštruktívny odber vzorníkov; alometrické vzťahy; stromová biomasa; hrúbka na báze kmeňa

Kontaktné adresy

doc. Dr. Ing. Bohdan Konôpka; Ing. Vlastimil Murgas, PhD.; Ing. Jozef Pajtík, Ph.D.;

Ing. Vladimír Šebeň, PhD.

Sekcia pre vedu a výskum

Národné lesnícke centrum

T.G. Masaryka 2175/22

960 01 Zvolen, Slovensko

bohdan.konopka@nlcsk.org; vlastimil.murgas@nlcsk.org; jozef.pajtik@nlcsk.org;

vladimir.seben@nlcsk.org

UPLATNENIE UMELEJ INTELIGENCIE PRI DETEKCII CHÝB DREVA Z CT SKENOV (UITECH)

Ondrej Vacek

1 Úvod

Projekt UITECH (kód 09I05-03-V02-00001) je výskumný projekt Národného lesníckeho centra (NLC) financovaný z Plánu obnovy a odolnosti SR. Hlavným cieľom je vytvoriť efektívny nástroj na automatickú detekciu chýb listnatej guľatiny z CT skenov pomocou umelej inteligencie. Projekt sa realizuje od 1. 1. 2024 do 30. 6. 2026 s celkovým rozpočtom 499 771,44 EUR.

NLC prevádzkuje v Biotechnologickom parku Stráž jedinečný 3D CT skener guľatiny (15. na svete), ktorý umožňuje nedeštruktívnu vizualizáciu vnútornej štruktúry kmeňa. Automatická detekcia chýb dreva pomocou neurónových sietí je kľúčovým krokom k digitalizácii a automatizácii sektora. Doterajšie riešenia sa zameriavajú výlučne na ihličnaté dreviny – projekt UITECH túto medzeru vyplňa pre listnaté dreviny a otvára cestu k plne automatizovanému triedeniu hardvúdovej guľatiny podľa vnútornej kvality.

V tomto článku sa podrobne pozrieme na najdôležitejší výsledok projektu UITECH – natrénovaný model sémantickej segmentácie na drevine dub, jeho evaluačné metriky a interpretáciu výkonnosti per-class.

2 Základné informácie

Projekt realizuje tím výskumníkov Centra excelentnosti LignoSilva NLC pod vedením Ing. Tomáša Gergela, PhD. Projekt trvá 30 mesiacov (M1–M30) a pozostáva z dvoch pracovných balíkov: KPB1 „Tvorba databázy CT skenov guľatiny“ a KPB2 „Trénovanie neurónovej siete“. Finančná štruktúra projektu je zhrnutá v tabuľke 1.

Tabuľka 1. Rozpočet projektu UITECH podľa pracovných balíkov (EUR)

Kalkulačná položka	KPB1 (EUR)	KPB2 (EUR)	Spolu (EUR)
Personálne náklady	210 724,80	146 254,80	356 979,60
Ostatné oprávnené náklady	70 241,60	48 751,60	118 993,20
Celkové oprávnené výdavky	295 014,72	204 756,72	499 771,44

3 Metodika riešenia projektu UITECH

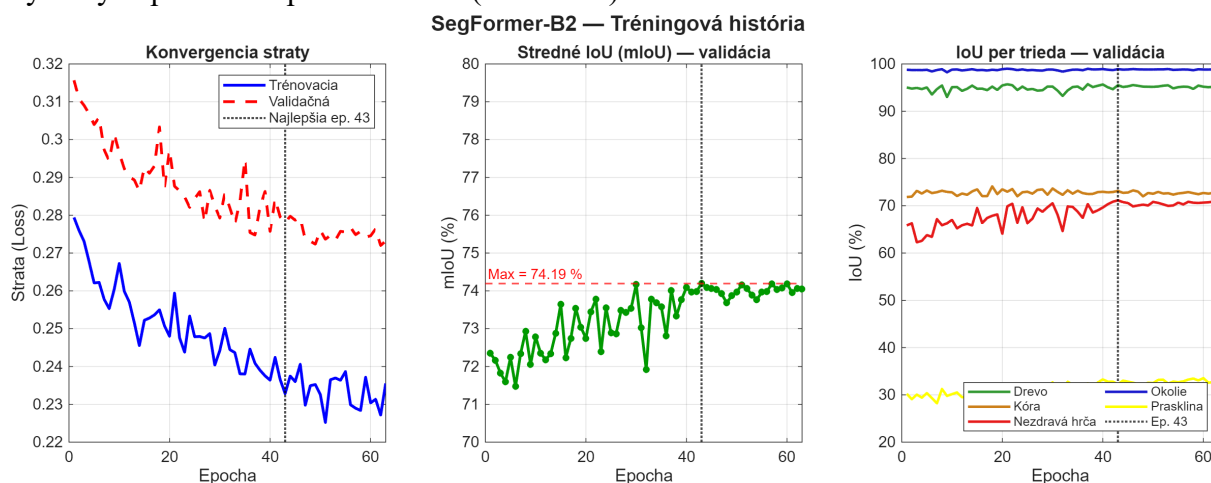
Metodika pozostáva z troch fáz: (1) získanie a správa dát, (2) príprava tréningových dát a (3) trénovanie neurónovej siete. V KPB1 (M1–M27) bola vytvorená databáza CT skenov listnatej guľatiny. Základná sada zahŕňa viac ako 100 kmeňov duba, buka a jaseňa v dĺžkach 4 m (40 000 CT snímok/druh). Každý kmeň je identifikovaný pomocou RFID kódu, čo umožňuje presné sledovanie a spätnú dohľadateľnosť vo všetkých fázach spracovania.

V KPB2 prebehlo poloautomatické označovanie chýb dreva vo vybraných CT snímkach pomocou aplikácie MATLAB Image Labeler. Po dokončení anotácie nasledovalo trénovanie neurónových sietí (Semantic Segmentation) najprv v MatLabe a neskôr v Pythone. Na urýchlenie tréningu a zlepšenie generalizácie bola použitá metóda Transfer Learning s predtrénovanými váhami. Cieľová presnosť detekcie je 80 %, čo zodpovedá úrovni technologickej pripravenosti TRL3.

Výsledky sémantickej segmentácie modelu SegFormer-B2

Pre trénovanie a vyhodnotenie modelu bol zostavený dataset z exportovaných snímok CT skenov listnatej guľatiny. Dataset obsahuje celkovo 1 347 snímok vo formáte PNG rozdelených do piatich sémantických tried: Drevo, Kôra, Nezdravá hrča, Okolie a Prasklina. Dataset bol rozdelený na trénovaciu (80 %, $n = 1\,078$) a validačnú množinu (20 %, $n = 269$ snímok).

Na úlohu sémantickej segmentácie bol použitý model SegFormer-B2 (Xie et al., 2021), moderná Transformer-based architektúra využívajúca hierarchický mix-transformer encoder (MiT-B2) kombinovaný s ľahkým All-MLP decoderom. Na urýchlenie konverencie a zlepšenie generalizácie bola aplikovaná metóda Transfer Learning s predtrénovanými váhami na datasete ImageNet-1k. Trénovanie prebehlo dvojfázovo; v druhej fáze počas 63 epoch s využitím kombinovanej funkcie straty (cross-entropy + Dice loss) a optimalizátora AdamW s polynomial decay learning rate schedulerom. Trénovacia strata monotónne klesala z počiatočnej hodnoty 0,2794 na výslednú 0,2272, pričom validačná strata sa stabilizovala v rozmedzí 0,2720–0,2740 po epoche 47. Hodnota mIoU na validačnej množine dosiahla maximum 74,19 % v epochách 30, 43, 57 a 60, čo indikuje dosiahnutie konverencie bez výrazných príznakov pretrénovania (obrázok 1).



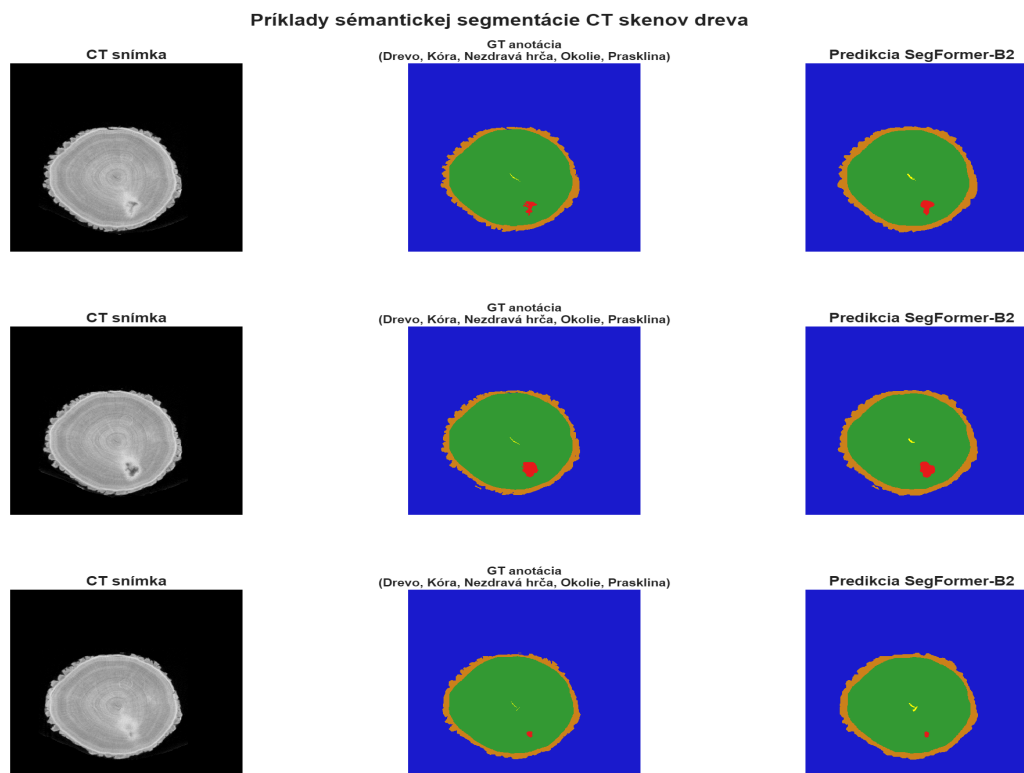
Obrázok 1. Tréningová história modelu SegFormer-B2: konvergenca straty (vľavo), mIoU na validačnej množine (uprostred) a IoU per trieda (vpravo) počas 63 epoch.

Tabuľka 2. Globálne evaluačné metriky modelu SegFormer-B2 na validačnej množine ($n = 269$)

Metrika	Hodnota
Globálna pixelová presnosť (Global Accuracy)	99,33 %
Stredná priesečnosť nad zjednotením (mIoU)	76,89 %
Cohenov koeficient kappa (κ)	0,9797

Tabuľka 2 sumarizuje globálne evaluačné metriky výsledného modelu SegFormer-B2 na validačnej množine (~70,5 milióna hodnotených pixelov). Model dosiahol globálnu pixelovú presnosť 99,33 %, čo potvrdzuje, že absolútna väčšina pixelov je správne klasifikovaná. Táto hodnota odráža predovšetkým výborný výkon na dominantných triedach (Drevo, Okolie), ktoré tvoria prevažujúcu časť obsahu CT snímok.

Stredná hodnota IoU (mIoU = 76,89 %) je štandardnou benchmark metrikou pre sémantickú segmentáciu zahŕňajúcou aj výkonnostné obmedzenia modelu pri zriedkavých triedach. Cohenov koeficient kappa ($\kappa = 0,9797$) naznačuje takmer dokonalú zhodu medzi predikciou a referenčnými anotáciami a je robustnou mierou kvality klasifikácie.



Obrázok 2. Príklady sémantickej segmentácie CT skenov listnatej guľatiny. Ľavý stĺpec: pôvodná CT snímka; stredný stĺpec: manuálna anotácia (ground truth); pravý stĺpec: predikcia modelu SegFormer-B2.

Tabuľka 3. Per-class evaluačné metriky modelu SegFormer-B2 na validačnej množine

Trieda	IoU (%)	Precision (%)	Recall (%)
Priemer	76,89	79,80	93,31
Drevo	98,04	99,68	98,35
Kôra	73,10	73,61	99,07
Nezdravá hrča	78,50	87,29	88,63
Okolie	99,55	99,98	99,57
Prasklina	35,26	38,45	80,95

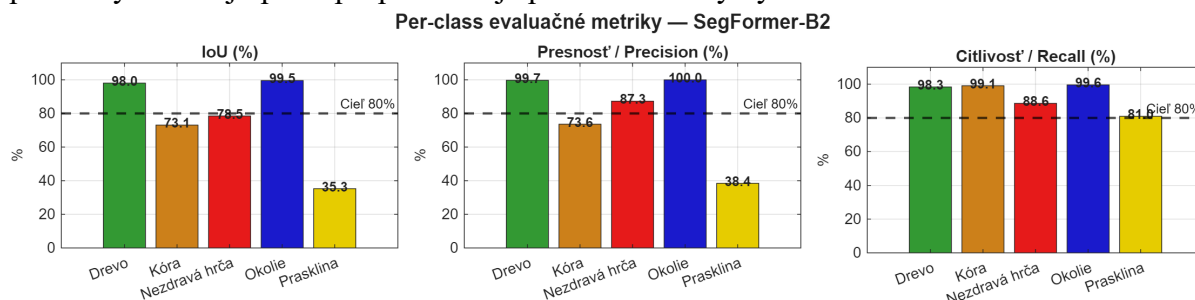
Podrobný prehľad metrík pre každú zo segmentovaných tried uvádza tabuľka 3. Pre každú triedu sú vyhodnotené: priesečnosť nad zjednotením (IoU), presnosť (Precision) a citlivosť (Recall). Z per-class analýzy je zrejmé, že model dosahuje excelentnú segmentáciu pre triedy Drevo (IoU = 98,04 %) a Okolie (IoU = 99,55 %). Tieto triedy zaujímajú dominantný podiel plochy snímok a sú vizuálne výrazne odlišiteľné v CT obraze na základe rozdielov röntgenovej hustoty.

Trieda Nezdravá hrča dosiahla IoU = 78,50 % s vyváženou presnosťou (87,29 %) a citlivosťou (88,63 %), čo svedčí o spoľahlivej detekcii tohto defektu. Symetria medzi Precision a Recall naznačuje, že model netrpí výraznou tendenciou ani k nadmernej ani k nedostatočnej predikcii hrčí.

Trieda Kôra vykazuje charakteristickú asymetriu metrík: vysokú citlivosť (Recall = 99,07 %) pri relatívne nízkej presnosti (Precision = 73,61 %). To znamená, že model úspešne detekuje takmer všetky pixely kôry, no zároveň chybné klasifikuje niektoré príľahlé oblasti ako kôru.

Táto asymetria je pravdepodobne dôsledkom postupného prechodu intenzít CT hodnôt medzi drevenou hmotou kmeňa a vonkajšou kôrou – pixely v prechodovej zóne sú morfológicky nejednoznačné.

Najväčšou výzvou v rámci datasetu zostáva trieda Prasklina s IoU = 35,26 %. Napriek relatívne dobrej citlivosti (Recall = 80,95 %), čo znamená, že model identifikuje priemerne 4 z 5 pixelov trhliny, dosahuje presnosť len 38,45 %, čo indikuje vysoký podiel falzopozitívnych detekcií. Tento výsledok je podmienený viacerými faktormi: (1) extrémna triedna nevyváženosť – pixely prasklín tvoria len 0,013 % z celkového počtu pixelov (9 528 z ~70,5 milióna), (2) tvar prasklín s šírkou niekoľkých pixelov, ktorý komplikuje presnú lokalizáciu, a (3) vizuálna podobnosť CT hodnôt trhlín s hranicami medzi drevenými vrstvami (letokruhy). Na druhej strane falzopozitívne detekcie sa nachádzajú v malej vzdialenosti od skutočného umiestnenia praskliny a nemajú preto pri praktickej aplikácii kritický význam.



Per-class evaluačné metriky modelu SegFormer-B2 (IoU, Precision, Recall). Prerušovaná čiara označuje cieľovú hodnotu projektu (80 %).

Cieľová presnosť detekcie stanovená v projekte UITECH je 80 % (stupeň technologickej pripravenosti TRL3). Dosiahnutá globálna pixelová presnosť 99,33 % tento cieľ výrazne prekračuje. Pre triedy Drevo (IoU = 98,04 %) a Okolie (IoU = 99,55 %) je cieľ výrazne prekonaný. Trieda Nezdravá hrča (IoU = 78,50 %) je tesne pod hranicou 80 %, avšak vyvážená detekcia (Precision = 87,29 %, Recall = 88,63 %) potvrdzuje spoľahlivosť výsledku. Triedy Kôra (IoU = 73,10 %) a Prasklina (IoU = 35,26 %) vyžadujú ďalšiu optimalizáciu. Identifikovaný smer zlepšenia je rozšírenie tréningového datasetu o ďalšie vzorky s cieľom zväčšiť zastúpenie podreprezentovaných tried. Celkové výsledky potvrdzujú potenciál architektúry SegFormer-B2 pre nedeštruktívne hodnotenie kvality listnatej guľatiny z CT skenov a predstavujú relevantný príspevok k digitalizácii procesu triedenia dreva v lesníckom sektore.

Podakovanie

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

Literatúra

- [1] Gergel', T., Bucha, T., Gejdoš, M., & Vyhnáliková, Z. (2019). Computed tomography log scanning – High technology for forestry and forest based industry. *Central European Forestry Journal*, 65(1), 51–59.
- [2] Gejdoš, M., Gergel', T., Michajlová, K., Bucha, T., & Gracovský, R. (2023). The accuracy of CT scanning in the assessment of the internal and external qualitative features of wood logs. *Sensors*, 23(20), 8505.
- [3] Vacek, O., Gergel', T., Bucha, T., Gracovský, R., & Gejdoš, M. (2024). Automatic wood species classification and pith detection in log CT images. *Forests*, 15(12), 2207.

- [4] Xie, E., Wang, W., Yu, Z., Anandkumar, A., Alvarez, J. M., & Luo, P. (2021). SegFormer: Simple and efficient design for semantic segmentation with Transformers. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 34, 12077–12090.
- [5] Xie, G., Wang, L., Williams, R. A., Li, Y., Zhang, P., & Gu, S. (2024). Segmentation of wood CT images for internal defects detection based on CNN: A comparative study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224, 109244.

Zhrnutie

Applications of Artificial Intelligence in the Detection of Wood Defects from CT Scans (UITECH). The UITECH project aims to develop an automated tool for detecting wood defects in hardwood roundwood using CT scans and artificial intelligence. Running from January 2024 to June 2026, the project addresses a significant gap in existing research, as prior solutions focused exclusively on coniferous species. The core methodological output is a trained semantic segmentation model based on the SegFormer-B2 Transformer architecture, applied to a dataset of 1,347 CT scan images of oak roundwood across five classes: Wood, Bark, Unsound Knot, Background, and Crack. Transfer learning from ImageNet-1k weights was employed to accelerate training. The model achieved a global pixel accuracy of 99.33%, a mean Intersection over Union (mIoU) of 76.89%, and a Cohen's kappa coefficient of 0.9797, indicating near-perfect agreement with manual annotations. Per-class analysis confirms excellent segmentation for Wood (IoU = 98.04%) and Background (IoU = 99.55%), reliable detection of Unsound Knot (IoU = 78.50%), and identifies Crack as the most challenging class (IoU = 35.26%) due to extreme class imbalance. The results confirm the strong potential of SegFormer-B2 for non-destructive quality assessment of hardwood roundwood from CT scans, representing a meaningful contribution to the digitalization and automation of timber grading in the forestry sector.

Kľúčové slová

3D CT skenovanie; detekcia vnútorných chýb; sémantická segmentácia; 3D CT scanning; internal defect detection; semantic segmentation

Kontaktné adresy

Ondrej Vacek
Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu
Národné lesnícke centrum
Sekcia pre vedu a výskum
T.G. Masaryka 2175/22
960 01 Zvolen, Slovak Republic
ondrej.vacek@nlcsk.org

AUTOMATIZACE A KOMBINACE NEDESTRUKTIVNÍCH METOD PRO MODERNÍ LESNICKO-DŘEVAŘSKÝ KOMPLEX

Matěj Šimek, Rostislav Berezjuk, Marek Provazník, Jan Tippner

1 Úvod

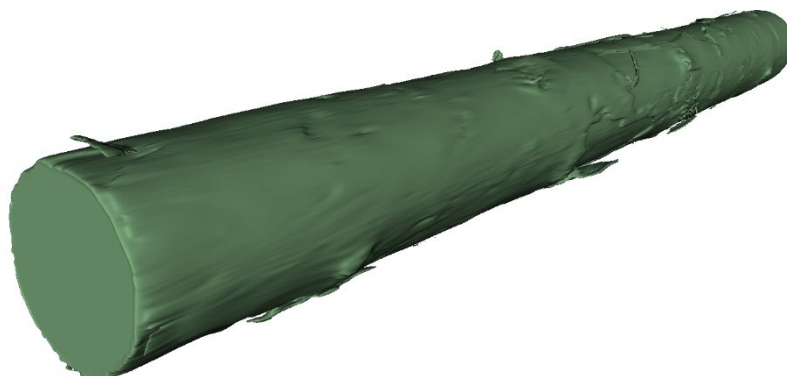
Dřevo je velmi variabilní materiál, u kterého v moderním průmyslu nemusí klasické vizuální metody dosahovat požadovaných výsledků. Mezi významné nevýhody patří vysoká míra subjektivity lidského faktoru a nízká výkonnost (Gajdoš a Gergel, 2022). Strojní nedestruktivní metody jsou alternativou, která umožňuje v dřevařském sektoru zvýšení kvantitativní, kvalitativní i hodnotové výtěže. Rozlišujeme celou řadu méně či více používaných metod – například akustické metody, CT skenování, optické skenování, měření odklonu vláken od podélné osy, metody georadaru, atd. (Olsson et al. 2018; Rais et al. 2020; Ondrejka et al. 2021). Nacházejí uplatnění na úrovni kmene i řeziva – například akustické metody umožňují zvýšení hodnotové výtěže v důsledku pevnostního třídění řeziva (Ridley-Ellis et al. 2022), zatímco CT skenování zvyšuje kvantitativní i kvalitativní výtěž pomocí optimálního polohování výřezů při jejich zpracování (Fredriksson, 2014). Současný technologický rozvoj vytváří předpoklady pro kombinaci a automatizaci metod. Velký potenciál zde představuje využití konvolučních neuronových sítí (CNN) a umělé inteligence při zpracování optických a CT snímků (Han et al. 2023).

Cílem tohoto příspěvku je popsání dosavadních dosažených výsledků v oblasti predikce fyzikálně-mechanických vlastností dřeva na úrovni kmene i řeziva. Jsou vyhodnoceny použité nedestruktivní metody a zhodnoceny možnosti jejich kombinace. Příspěvek také obsahuje nové poznatky autorů o možnostech automatizace zpracování optických a CT skenů pomocí neuronových sítí.

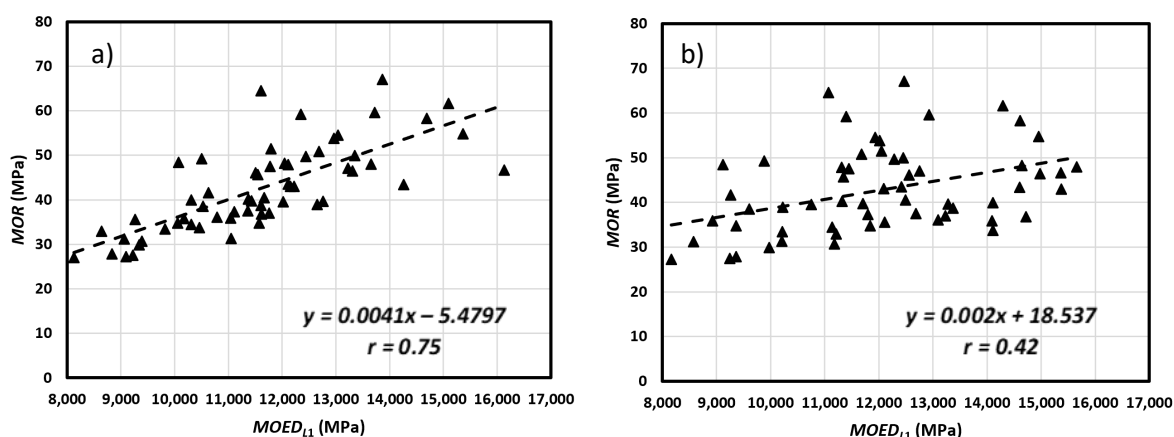
2 Úroveň kmene

V první fázi byly testovány možnosti predikce mechanických vlastností řeziva na základě vlastností pilařských výřezů. Pro analýzu bylo vybráno 60 výřezů smrku ztepilého (*Picea abies* L.) ze Školního lesního podniku Masarykův les Křtiny. Výřezy měly délku 3 m a středový průměr cca. 30 cm. Měření a zpracování proběhlo na 3 lokacích: (1) Pila Olomučany, (2) NLC Zvolen Stráže a (3) Výzkumné centrum Josefa Ressela v Útěchově. Bylo selektováno a použito několik metod: (1) frekvenčně-rezonanční metoda a (2) CT skenování.

Frekvenčně-rezonanční metoda dosahovala vysoké přesnosti při predikci mechanických vlastností finálního řeziva. U dynamického modulu pružnosti s měřením frekvencí v podélném směru (MOED_L) byl spearmanův korelační koeficient $r = 0.75$ pro mez pevnosti (MOR) a $r = 0.80$ pro globální modul pružnosti (MOE). Horších výsledků bylo dosaženo u dynamického modulu pružnosti v ohybu (MOED_B), kdy byl zjištěn spearmanův korelační koeficient $r = 0.55$ pro MOR a $r = 0.60$ pro MOE. Tyto výsledky předčily zjištění jiných autorů, k čemuž nepochybně napomohlo stanovení přesné hustoty dřeva na základě rekonstrukce CT snímků výřezů (Obrázek 1). Bylo zjištěno, že znalost reálné hustoty dřeva umožňuje mnohem přesnější predikci mechanických vlastností ve srovnání s použitím fixní hustoty (Obrázek 2). Kombinace frekvenčně-rezonanční metody s CT skenováním zde proto přináší vysoký potenciál. Výsledky potvrzují možnosti frekvenčně-rezonanční metody pro účely předtřídění kulatiny při produkci pevnostního řeziva, přičemž je vhodné měřit akustické vlastnosti pouze v podélném směru. Měření vlastností v ohybu neumožňuje přesnější predikci, navíc se jedná o technicky mnohem náročnější metodu měření.



Obrázek 1. Rekonstrukce CT snímků výřezů pro zjištění průměrné hustoty dřeva



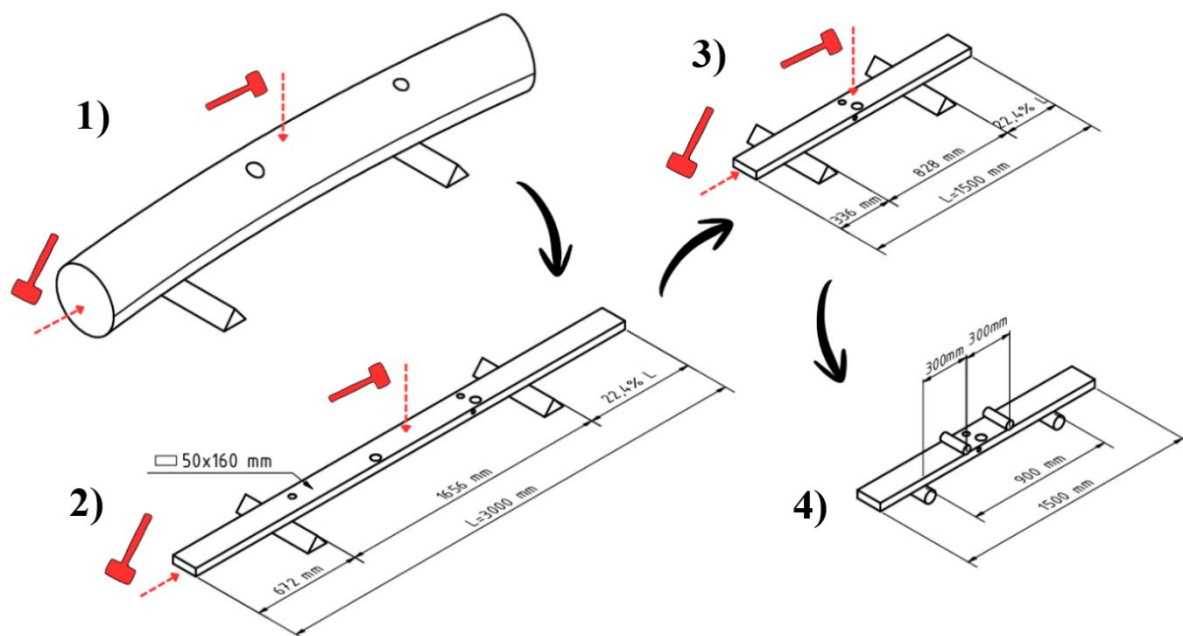
Obrázek 2. Vztah mezi MOED_L výřezů a MOR řeziva: výpočet MOED_L na základě reálné hustoty dřeva (a), výpočet MOED_L na základě fixní hustoty dřeva $\rho = 700 \text{ kg/m}^3$

Skeny byly pořízeny v příčném rozlišení 1x1 mm s krokem v podélném směru 10 mm, každý výřez tedy sestával přibližně z 300 snímků. Skeny byly použity pro rekonstrukci přesného objemu výřezu, dle metodiky popsané v Berezjuk (2025). Dále byly jednotlivé snímky anotovány a vytvořeny modely automatické detekce dřevních vad, viz. kapitola 4. Anotování a tvorba modelů stále pokračuje, prozatím jsou k dispozici pouze dílčí výsledky. Potenciál CT skenování pro predikci mechanických vlastností byl potvrzen především při hodnocení suků. Obecně bylo možné predikovat pevnost řeziva na základě celkového množství suků, viditelných na povrchu kmene ($r = -0.68$). V některých případech však výřezy bez přítomnosti výrazných suků na povrchu disponovaly velkými zarostlými sukly, což ve výsledku významně ovlivnilo pevnost řeziva. CT skenování v těchto případech umožnilo na rozdíl od standardního vizuálního hodnocení tyto zarostlé sukly přesně detekovat a vyhodnotit.

Úroveň řeziva

Na úrovni řeziva byly analyzovány možnosti predikce pevnosti na základě tří nedestruktivních přístupů: (1) stanovení hustoty dřeva, (2) hodnocení rozměrů suků v nejkritičtější oblasti (KAR) a (3) frekvenčně-rezonanční metoda (FRM). Výsledky byly validovány destruktivními zkouškami ve čtyřbodovém ohybu dle normy EN 408 na univerzálním zkušebním stroji LabTest 6.500H (Labortech, Opava, Česká republika). Výstupem statických zkoušek byly mez pevnosti v ohybu (MOR) a globální modul pružnosti (MOE_{glob}).

Pro analýzu bylo použito řezivo smrku ztepilého (*Picea abies* L.) bez přítomnosti dřeně ($n = 107$), což umožnilo přesnější rekonstrukci geometrie suků – materiál tak obsahoval suky vystupující na dvou až třech plochách. Vstupní řezivo o rozměrech $50 \times 160 \times 3\,000$ mm bylo testováno ve třech technologických fázích: (1) v mokřém stavu bezprostředně po pořezu, (2) po vysušení na vlhkost $w = 12\%$ a (3) po zakrácení na finální délku (1 500 mm). Poloha finální délky byla zvolena tak, aby se v polovině délky nacházela oblast 150 mm obsahující nejkritičtější místo z hlediska přítomnosti suků.



Obrázek 3: Schéma postupu měření: (1) Kmeny – FRM + manuální měření; (2) Čerstvé a sušené řezivo – FRM + identifikace nejkritičtější oblasti; (3) Finální délka řeziva – FRM; (4) Finální délka řeziva: MOR, MOE_{glob} , MOE_{loc} (ČSN EN408)

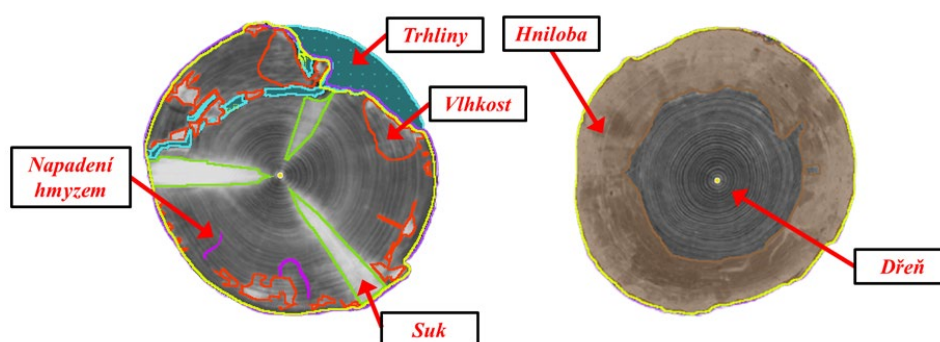
Suky v této oblasti byly kvantifikovány pomocí parametru KAR (Knot Area Ratio), vyjadřujícího poměr plochy promítnutých suků k celkové průřezové ploše dřeva. Rozměry suků byly měřeny na optických snímcích v kalibrovaném měřítku v softwaru ImageJ. Každý suk byl změřen jako tečna k jeho obrysu vzhledem k podélným hranám řeziva na všech plochách, na nichž vystupoval na povrch. Jednotlivé suky byly následně promítnuty do příčného průřezu a překrývající se plochy sjednoceny. Akustické vlastnosti byly stanoveny frekvenčně-rezonanční metodou dle Nop a Tippner (2022). Každý kus řeziva byl mechanicky buzen a jeho vibrace snímány kontaktními akcelerometry KS94B10 (MMF, Radebeul, Německo) připojenými ke sběrnici DEWETRON-41-T-DSA (DEWETRON Inc., Grambach, Rakousko). Na základě změřených vlastních frekvencí byly stanoveny dynamické modul pružnosti v podélném směru (MOE_L) a dynamický modul pružnosti v ohybu (MOE_B).

Z hodnotených nedestruktivních metod vykazovala FRM nejsilnější korelaci se statickou tuhostí a pevností. Dynamický modul pružnosti $MOED_L$ dosahoval v mokřém stavu Spearmanova korelačního koeficientu $r = 0.81$ pro MOR a $r = 0.92$ pro MOE_{glob} . Po vysušení hodnoty mírně vzrostly na $r = 0.82$, resp. $r = 0.93$, a po zakrácení na finální délku dosáhly $r = 0.83$, resp. $r = 0.95$. Výsledky $MOED_B$ byly srovnatelné – v mokřém stavu $r = 0.81$ pro MOR a $r = 0.93$ pro MOE_{glob} , po zakrácení $r = 0.83$, resp. $r = 0.96$. Síla korelace se tedy ve všech případech s postupem technologického zpracování redundantně zvyšovala. Parametry KAR a hustota dosahovaly podobné míry korelace s MOR ($r = 0.51–0.55$), avšak v případě predikce MOE_{glob} vykazovala hustota výrazně vyšší závislost ($r = 0.74$) než KAR ($r = 0.47$).

Získané výsledky naznačují reálnou možnost pevnostního třídění řeziva již v mokřém stavu, a tím i vyřazení nevyhovujícího kusu ještě před nasazením nákladných technologických operací, jako je průmyslové sušení. Shodně s výsledky na úrovni kmene měření v ohybovém směru nepřináší oproti měření v podélném směru žádné zpřesnění predikce. Lze tedy říci že pro třídění řeziva je dostačující měřit vibrace pouze v podélném směru, protože jde o technicky jednodušší metodu. Z pohledu praktičnosti, efektivity a realizovatelnosti průmyslového nasazení se jako perspektivní jeví kombinace frekvenčně-rezonanční metody s automatizovanou detekcí suků z optických snímků pomocí konvolučních neuronových sítí (CNN). Akustické vlastnosti řeziva přitom mohou být snímány bezkontaktně laserovým vibrometrem, což výrazně zvyšuje průchodnost linky. Taková kombinace metod představuje reálný základ pro plně automatizované pevnostní třídění řeziva v podmínkách průmyslové výroby.

3 Automatizace nedestruktivních metod

Pilařské provozy s největší kapacitou ročně zpracují více než 1 000 000 m³ kulatiny. Těmto vysokým objemům odpovídají pořezové rychlosti do 170 m/min. Při takových rychlostech je zcela nemyslitelné manuální vyhodnocování CT/optických snímků a je nutná automatizace procesů. Pro vytvoření modelů je v první řadě potřeba připravit trénovací a testovací databáze, kdy je nutné anotovat jednotlivé snímky. Byla zvolena anotace snímků v software Supervisely pomocí sémantické segmentace do definovaných tříd zahrnujících suky, trhliny, dřev a rostlé dřevo. Pro trénování modelů jsou využity konvoluční neuronové sítě a transformery, přičemž přesnost detekce je hodnocena pomocí metriky Pixel-Wise IoU. Manuální anotace je velmi časově náročný proces, který je možné výrazně urychlit například pomocí modelů SAM (Segment Anything Model). Pomocí tohoto nástroje bylo možné projektové procesy výrazně automatizovat v několika na sebe navazujících fázích, kdy má člověk především funkci opravnou a kontrolní. V budoucnu je také do vytvářených modelů plánována implementace automatizovaných nástrojů umožňujících výpočet ploch jednotlivých segmentů, například pro automatické stanovení počtu a rozměrů suků. Výsledný systém umožní rychlé a objektivní vyhodnocení kvality dřeva v průmyslovém provozu. V kombinaci s dalšími nedestruktivními metodami je možné zvýšit přesnost predikce fyzikálních a mechanických vlastností řeziva s efektivnějším plánováním výroby.



Obrázek 4. Příklady anotace snímků pomocí sémantické segmentace

Poděkování

"Tato studie byla financovaná Evropskou komisí v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akce Horizon Europe Teaming for Excellence."

Literatura

- [1] GEJDOŠ, M., GERGEL, T. 2022. Case study of qualitative sorting of raw wood assortments in the conditions of a forestry enterprise in Slovakia. *Central European Forestry Journal* 68: 232–237. <https://doi.org/10.2478/forj-2022-0006>
- [2] OLSSON, A., POT, G., VIGUIER, J., FAYIDI, Y., OSCARSSON, J. 2018. Performance of strength grading methods based on fibre orientation and axial resonance frequency applied to Norway spruce, Douglas fir and European oak. *Annals of Forest Science* 75: 102. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0781-z>
- RAIS, A., PRETZSCH, H., KUILEN, J.W. 2020. European beech log and lumber grading in wet and dry conditions using longitudinal vibration. *Holzforschung* 74: 939–947. <https://doi.org/10.1515/hf-2019-0227>
- [3] ONDREJKA, V., GERGEL, T., BUCHA, T., PÁSTOR, M. 2021. Innovative methods of non-destructive evaluation of log quality. *Central European Forestry Journal* 67: 3–13. <http://dx.doi.org/10.2478/forj-2020-0021>
- [4] RIDLEY-ELLIS, D., GIL-MORENO, D., HARTE, A.M. 2022. Strength grading of timber in the UK and Ireland in 2021. *International Wood Products Journal* 13: 127–136 <https://doi.org/10.1080/20426445.2022.2050549>
- [5] FREDRIKSSON, M. 2014. Log sawing position optimization using computed tomography scanning. *Wood Material Science & Engineering*, 9: 110–119. <https://doi.org/10.1080/17480272.2014.904430>
- [6] HAN, S., JIANG, X., WU, Z. 2023. An Improved YOLOv5 Algorithm for Wood Defect Detection Based on Attention. *IEEE Access* 11: 71800–71810. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3293864>
- [7] BEREZJUK, R. 2025. The role of the increasing geometry precision for sawlog quality grading. In *Proceedings 7th International Scientific Conference „Wood Technology & Product Design“*, Ohrid, Republic of North Macedonia, 218–224. ISBN 978-608-4723-

- [9] NOP, P., TIPPNER, J. 2022. Influence of dimensions of wooden samples for determination of acoustic parameters and sound timbre. *Applied Acoustics* 196: 108895. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.108895>

Zhrnutie

Automation and the Combination of Non-Destructive Methods for the Modern Forest-Based Industry.

This paper explores the application and integration of non-destructive testing (NDT) methods for wood quality assessment in the modern forestry and wood-processing industry. The main objective is to improve the prediction of the physical and mechanical properties of wood and enhance grading efficiency through automation. The research focused on the analysis of Norway spruce logs and sawn timber using the frequency resonance method (FRM), CT scanning, and optical imaging. The results demonstrated that the highest prediction accuracy was achieved by combining acoustic measurements with CT scanning, which enabled precise determination of wood density and detection of internal knots that significantly affect sawn timber strength. At the sawn timber level, the FRM showed a very strong correlation with mechanical properties, confirming its suitability for reliable strength grading of green timber prior to kiln drying. An important aspect of the study is the automation of image processing using convolutional neural networks and artificial intelligence models capable of detecting wood defects in both CT and optical images. Automated evaluation makes it possible to meet the high processing speeds required in industrial production while improving the objectivity and consistency of quality assessment. The proposed combination of non-destructive methods and AI-based image analysis has the potential to increase production efficiency, optimize manufacturing planning, and improve both the quality and economic value recovery of wood processing.

Kľúčové slová

Nedestruktívne metódy; kvalitatívne triedenie; CT skenovanie kulatiny

Kontaktné adresy (autorov)

Matěj Šimek, Rostislav Berezjuk, Marek Provazník, Jan Tippner
Ústav nauky o dřevě a dřevařských technologiích
Lesnická a dřevařská fakulta MENDELU
Zemědělská 3
613 00 Brno, Czech Republic
matej.simek@mendelu.cz

Bibliografická citácia

- Citácia zborníka:

GRACOVSKÝ Radovan, GERGEL Tomáš, 2026. Konferencia LignoSilva 2026: *Zborník odborných prác z konferencie*. Zvolen 26. marca 2026. Zvolen: Národné lesnícke centrum – Sekcia pre vedu a výskum. ISBN: 978-80-8093-398-2 (pdf)

- Citácia príspevku:

GERGEL Tomáš, GRACOVSKÝ Radovan, VACEK Ondrej, 2026. Digitálne technológie pri zvyšovaní pridanej hodnoty v sortimentácii, druhovaní a spracovaní dreva. In: LignoSilva 2026: Zborník odborných prác z konferencie, 26. marca 2026. Zvolen: Národné lesnícke centrum – Sekcia pre vedu a výskum, s. 104, ISBN: 978-80-8093-398-2



EURÓPSKA ÚNIA
Európsky fond regionálneho rozvoja
OP Integrovaná infraštruktúra 2014 – 2020



MINISTERSTVO
DOPRAVY A VÝSTAVBY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY



Koordinátor projektu:



Partner projektu:



<https://www.lignosilva.eu/>

T. G. Masaryka 2175/22, 960 01 Zvolen

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

ISBN 978-80-8093-398-2