

Chemické zpracování lignocelulózových materiálů

***Kateřina Hájková, Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta lesnická a dřevařská,
Kamýcká 129, 165 00 Praha–Suchdol***

Shrnutí

Lignocelulózové materiály, zejména dřevo, piliny a zemědělské zbytky, představují významný obnovitelný zdroj surovin s potenciálem pro materiálové využití v rámci oběhového hospodářství. Tento článek se zaměřuje na možnosti chemického a fyzikálně-chemického zpracování lignocelulózové biomasy vedoucí k výrobě materiálových produktů, jako je papír a dřevotřískové desky, které lze dále modifikovat chemickou impregnací, povrchovými úpravami nebo nanocelulózou připravenou z odpadních lignocelulózových surovin. Tyto úpravy přispívají ke zlepšení mechanických, optických a funkčních vlastností materiálů, zvyšují jejich trvanlivost a rozšiřují možnosti jejich použití. Závěrečná část práce se zabývá využitím lignocelulózových materiálů k výrobě biosorbentů určených k zadržování vody v půdě, které nacházejí uplatnění především v zemědělství a lesnictví. Tímto způsobem lze část materiálových toků na konci životního cyklu produktu vrátit do přírodního prostředí, čímž se uzavře materiálový cyklus a podpoří se udržitelné využívání lignocelulózových surovin.

Klíčová slova: chemická buničina; oběhové hospodářství; nanocelulóza; chemická modifikace; biosorbenty.

Úvod

Lignocelulózová biomasa je jedním z nejrozšířenějších obnovitelných zdrojů organického uhlíku na Zemi a skládá se především ze dřeva, pilin a zemědělských zbytků vznikajících při zemědělské výrobě. Tyto materiály se skládají především ze tří hlavních biopolymerů (celulózy, hemicelulózy a ligninu), které tvoří složitou strukturu buněčných stěn rostlin. Díky své dostupnosti, relativně nízkým nákladům a nezávislosti na potravinových zdrojích představuje lignocelulózová biomasa slibnou surovinu pro výrobu biomateriálů, chemikálií a energetických produktů a je považována za jeden z klíčových pilířů rozvoje bioekonomiky a oběhového hospodářství [1;2].

V posledních letech se výzkum zaměřuje především na zhodnocení lignocelulózové biomasy, neboli její přeměnu na materiály s vyšší přidanou hodnotou. Tradiční lineární model využívání surovin, založený na principu „vyrobit – použít – zlikvidovat“, je postupně nahrazován cirkulárními modely, které podporují opětovné použití materiálů a minimalizaci odpadu. V této souvislosti jsou lignocelulózové materiály považovány za významnou surovinu, protože umožňují vytváření široké škály produktů od vláknitých materiálů a kompozitů až po biochemikálie a nanostrukturované materiály [3;4].

Slibnou oblastí je využití zemědělských zbytků jako alternativních surovin pro výrobu papíru a dalších lignocelulózových materiálů. Například nedávné studie ukázaly, že pšeničná a ječná sláma mohou sloužit jako vhodný zdroj vláken pro výrobu buničiny a zároveň jako surovina pro přípravu nanocelulózy, která může výrazně zlepšit mechanické vlastnosti papíru [5].

Kromě výroby základních materiálů hraje důležitou roli také jejich následná modifikace chemickými nebo fyzikálně-chemickými metodami. Tyto modifikace umožňují cílenou změnu vlastností materiálů, jako je mechanická pevnost, odolnost proti vlhkosti. Zároveň mohou lignocelulózové materiály po skončení své životnosti sloužit jako zdroj dalších produktů, jako jsou biosorbenty nebo nanomateriály s vysokou adsorpční kapacitou. Takový přístup umožňuje efektivnější využití biomasy a přispívá k uzavření materiálových cyklů v rámci cirkulární ekonomiky [6].

Většina dosavadních studií se zaměřuje pouze na jednotlivé fáze zpracování biomasy, zatímco komplexní propojení těchto kroků v rámci jednoho materiálového cyklu je méně často diskutováno.

Tento příspěvek se proto zaměřuje na integraci jednotlivých přístupů do konceptu kaskádového využití lignocelulózových materiálů.

Cílem tohoto výzkumu je proto představit možnosti chemického zpracování lignocelulózových materiálů a jejich využití v různých fázích materiálového cyklu, od výroby základních materiálů po jejich následnou funkční modifikaci a ekologické aplikace. Studie se zaměřuje především na využití dřeva, pilin a zemědělských zbytků při výrobě papíru a deskových materiálů, jejich modifikaci pomocí nanocelulózy a dalších chemických úprav a možnost jejich dalšího využití ve formě biosorbentů.

Materiály a metody

Metodika práce vychází z experimentálních postupů publikovaných v odborných studiích zaměřených na zpracování lignocelulózových materiálů a jejich následnou modifikaci. Jednotlivé části metodiky se zaměřují na výrobu papíru z agrárních zbytků, přípravu nanocelulózy a využití lignocelulózových materiálů jako biosorbentů pro zadržování vody v půdě.

Papírovina byla připravována z lignocelulózových surovin, především z makové, pšeničné a ječmenné slámy a levandulových stonků. Vlákna byla získána chemickým procesem založeným na alkalické delignifikaci, při níž dochází k oddělení vláken z lignocelulózové struktury. Po delignifikačním procesu byla vlákna promyta, mechanicky rozvlákněna a použita pro přípravu laboratorních papírových archů. U připravených vzorků byly následně hodnoceny základní fyzikální a mechanické vlastnosti papíru, zejména pevnost v tahu a pevnost v průtlaku [5;7;8]

V další části byla z lignocelulózových surovin připravena nanocelulóza. Proces zahrnoval chemické narušení struktury celulózy a přípravu stabilních nanocelulózových suspenzí. Ty byly následně aplikovány do papíroviny nebo na povrch papírových archů s cílem zvýšit mezivláknovou soudržnost a zlepšit mechanické vlastnosti papíru [5;9].

V závěrečné části byly lignocelulózové materiály využity pro přípravu biosorbentů určených ke zlepšení vodního režimu půd. Biosorbenty byly připraveny z pilin v kombinaci s hydrogelem a aplikovány do půdního substrátu. Následně byla sledována retenční schopnost substrátu a jeho vliv na dostupnost vody pro rostliny. Tento přístup umožňuje využít lignocelulózové materiály i po ukončení jejich primární užitné fáze a přispívá k uzavírání materiálového cyklu [10].

Výsledky a diskuse

Výroba papírenské vlákniny

Tabulka 1. Vybrané vlastnosti alkalických buničin z lignocelulózových materiálů.

| Buničina | Tržná délka, km | Pevnost v tahu, $N \cdot g \cdot m^{-1}$ | Pevnost v průtlaku, $kPa \cdot m^2 \cdot g^{-1}$ | Propustnost pro vzduch, s |
|---------------------------------|-----------------|--|--|---------------------------|
| Natronová ječmenná | 3,14 (0,08) | 44,90 (1,21) | 1,97 (0,03) | 9,80 (0,35) |
| Natronová maková | 5,37 (0,05) | 52,71 (0,26) | 2,93 (0,02) | 10,66 (0,40) |
| Natronová pšeničná | 4,85 (0,22) | 69,28 (3,08) | 1,82 (0,04) | 9,20 (0,30) |
| Dusičnano-alkalická levandulová | 4,60 (0,20) | 41,20 (0,55) | 2,20 (0,05) | 7,20 (0,25) |
| Dusičnano-alkalická maková | 4,96 (0,30) | 45,95 (0,58) | 2,53 (0,04) | 8,04 (0,32) |

Tabulka 1 prezentuje mechanické a strukturní vlastnosti papírů o plošné hmotnosti cca 70 g·m⁻² připravených z různých typů lignocelulózových buničín získaných natronovým a dusičnано-alkalickým způsobem zpracování.

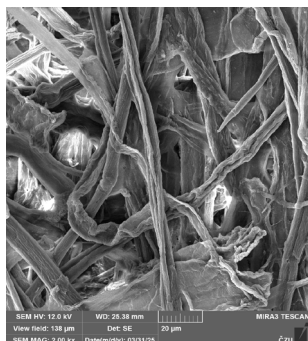
Natronové buničiny dosahovaly vyšších hodnot pevnosti (až 69,28 N·g·m⁻¹) a tržné délky (až 5,37 km) ve srovnání s dusičnано-alkalickými variantami. Naopak dusičnано-alkalické buničiny vykazovaly nižší propustnost pro vzduch, což naznačuje odlišnou strukturu vláknové sítě.

Výroba a aplikace nanocelulózy

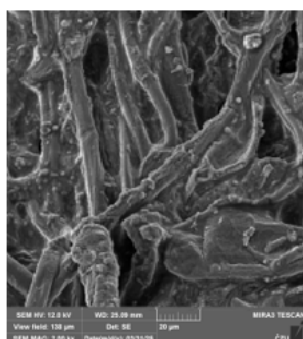
Nanocelulóza byla připravena chemicko-mechanickým zpracováním lignocelulózové biomasy (ječmene a pšenice) následně aplikována do papíroviny formou povrchové úpravy postříkem. Byly testovány jejich nanocelulózové suspenze připravené pomocí Cadoxenového a FeTNa systému. Aplikace nanocelulózy vedla k výraznému zlepšení mechanických vlastností papíru, zejména pevnosti v tahu a průtlaku, Tabulka 2.

Tabulka 2. Mechanické vlastnosti a jejich zvýšení vlivem nánosu nanocelulózové suspenze.

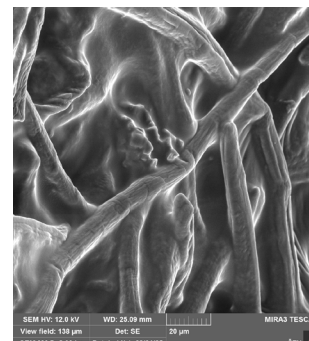
| Buničina | Cadoxen | | FeTNa | |
|--------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|---|
| | Pevnost v tahu, N·g·m ⁻¹ | Pevnost v průtlaku, kPa·m ² ·g ⁻¹ | Pevnost v tahu, N·g·m ⁻¹ | Pevnost v průtlaku, kPa·m ² ·g ⁻¹ |
| Natronová ječmenná | 66,09 (0,75) | 5,32 (0,05) | 58,44 (0,54) | 2,92 (0,15) |
| Natronová pšeničná | 62,81 (0,46) | 4,08 (0,04) | 65,24 (0,91) | 3,08 (0,06) |



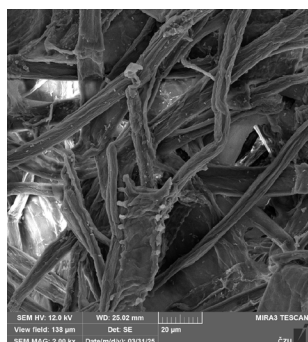
Ječmenná buničina



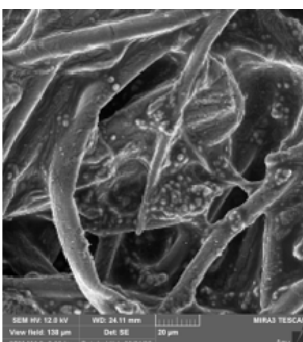
s nanovrstvou na bázi Cadoxenu



s nanovrstvou na bázi FeTNa



Pšeničná buničina



s nanovrstvou na bázi Cadoxenu



s nanovrstvou na bázi FeTNa

Obrázek 1. Snímky ze skenovacího elektronového mikroskopu nanovrstvy aplikované na ječmenné a pšeničné natronové buničiny.

Aplikace nanocelulózy vedla k výraznému nárůstu mechanických vlastností papíru. U ječmenné buničiny vzrostla pevnost v tahu z 44,90 na 66,09 N·g·m⁻¹ a pevnost v průtlaku více než dvojnásobně (z 1,97 na 5,32 kPa·m²·g⁻¹). Obdobný trend byl zaznamenán i u pšeničné buničiny, kde došlo k výraznému zvýšení pevnosti v závislosti na typu použité nanocelulózy, což potvrzuje její zpevňující efekt.

Rozdíly mezi jednotlivými typy nanocelulózy byly patrné především ve struktuře materiálu. Nanocelulóza připravená pomocí Cadoxenu vykazovala jemnější fibrilaci, zatímco FeTNa nanomateriály vedly k homogennějšímu pokrytí vláken, Obrázek 1.

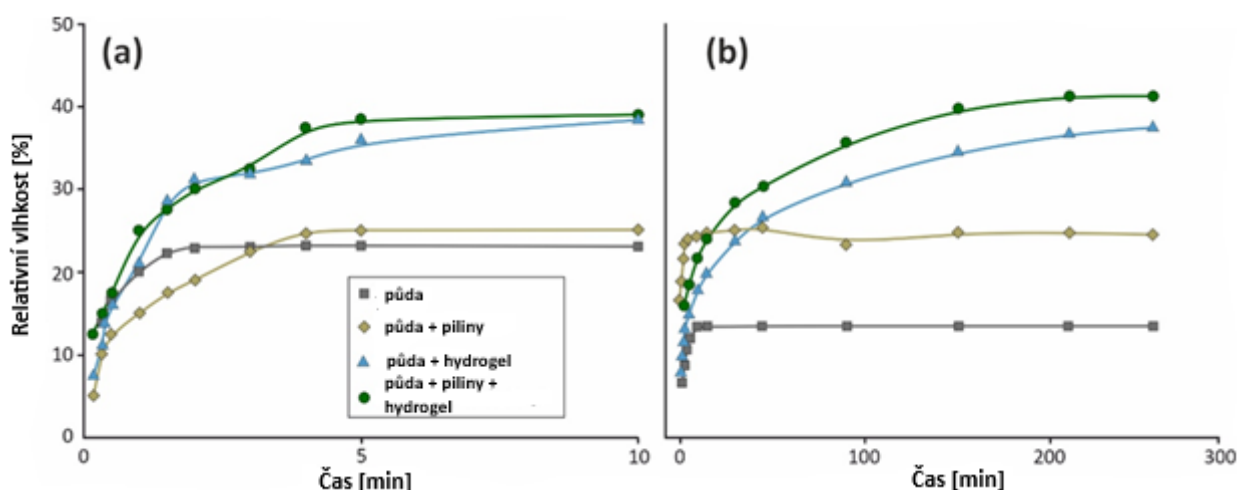
Výsledky ukazují, že typ chemického zpracování má zásadní vliv na výsledné vlastnosti lignocelulóзовých materiálů. Natronové buničiny poskytují vyšší mechanickou pevnost, zatímco dusičnato-alkalické varianty vykazují otevřenější strukturu, která může být výhodná pro následné funkční úpravy.

Aplikace nanocelulózy významně zvyšuje mezivláknovou soudržnost, což se projevuje výrazným nárůstem mechanických vlastností. Rozdíly mezi jednotlivými typy nanocelulózy zároveň ukazují, že způsob její přípravy ovlivňuje výslednou strukturu i funkci materiálu. Získané výsledky potvrzují, že kombinace chemického zpracování a nanostrukturální modifikace umožňuje cíleně navrhovat vlastnosti lignocelulóзовých materiálů podle požadované aplikace.

Po ukončení materiálového využití byly lignocelulóзовé materiály dále zhodnoceny v environmentálních aplikacích jako sorbenty.

Sorbenty

Lignocelulóзовé materiály byly po ukončení své primární funkce využity pro přípravu biosorbentů určených ke zlepšení vodního režimu půd. Kromě odpadního materiálu z pilnice (pilin) mohou být jako vhodná surovina využity také zemědělské zbytky, zejména sláma, které představují dostupný a dosud nedostatečně využitý zdroj lignocelulózy. Tyto materiály byly kombinovány s hydrogelovou matricí. Obrázek 2 ukazuje rozdílné chování systému při přímém kontaktu s vodou a při absorpci vlhkosti ze vzduchu, což potvrzuje vícefázový sorpční mechanismus.



Obrázek 2. a) rychlost nasáknutí půdní směsi za běžných podmínek, kdy byla půdní směs ponořena do vody, b) absorpce atmosférické vody, když byla půdní směs vystavena teplotě 20 °C a 95% relativní vlhkosti vzduchu.

Výsledky ukázaly, že přidavek těchto materiálů vedl ke zvýšení retenční schopnosti půdy a zpomalení vysychání substrátu. Kombinace lignocelulózové struktury a hydrogelu umožňuje efektivní absorpci vody a její postupné uvolňování, což přispívá ke zlepšení dostupnosti vody pro rostliny.

Závěr

Práce ukazuje, že lignocelulózové materiály představují perspektivní surovinu pro výrobu funkčních materiálů v rámci oběhového hospodářství. Bylo prokázáno, že zemědělské zbytky, jako jsou makovice, pšeničná a ječmenná sláma, lze úspěšně využít pro výrobu papírenské vlákniny s vhodnými mechanickými vlastnostmi, přičemž typ chemického zpracování významně ovlivňuje výslednou strukturu a vlastnosti materiálu.

Aplikace nanocelulózy připravené z těchto surovin vedla k výraznému zlepšení mechanických vlastností papíru, zejména pevnosti v tahu a průtlaku, což potvrzuje její význam jako funkčního modifikačního činidla. Strukturní změny pozorované pomocí SEM analýzy zároveň ukázaly, že nanocelulóza přispívá k vytvoření kompaktnější a soudržnější vláknové sítě.

V závěrečné fázi byly lignocelulózové materiály využity pro přípravu biosorbentů na bázi pilin a hydrogelu. Tyto materiály vedly ke zvýšení retenční schopnosti půdy a zpomalení vysychání substrátu, což má významný potenciál pro aplikace v zemědělství a lesnictví. Zemědělské zbytky, zejména sláma, představují v tomto kontextu perspektivní alternativní surovinu, která by mohla být v budoucnu využita pro přípravu obdobných sorpčních materiálů.

Celkově lze konstatovat, že navržený přístup umožňuje kaskádové využití lignocelulózové biomasy od výroby materiálů přes jejich funkční modifikaci až po environmentální aplikace, čímž dochází k efektivnímu využití surovin a uzavírání materiálových cyklů.

References

1. Makaveckas, T., Šimonėlienė, A., & Šipailaitė-Ramoškienė, V. (2025). *Sustainability* 17(21), 9913. <https://doi.org/10.3390/su17219913>
2. Pandey, A., Verma, N., Jain, S. *et al.* (2025). *Biotechnology for Sustainable Materials* 2, 20. <https://doi.org/10.1186/s44316-025-00042-1>
3. Dey, N., Bhardwaj, S., & Maji, P.K. (2025). *RSC Sustainability* 3(8), 3307-3357, <https://doi.org/10.1039/d5su00142k>.
4. Segers, B., Nimmegeers, P., Spiller, M. *et al.* (2024). *RSC Sustainability* 2, 3730-3749. <https://doi.org/10.1039/D4SU00342J>.
5. Hájková, K., Holeček, T., Bárta, J., *et al.* (2025). *Nanocomposites* 11(1), 271–281. <https://doi.org/10.1080/20550324.2025.2588558>
6. Wang, Y., Wang, Z., Lin, Y. *et al.* (2024). *Food Research International* 192, 114741. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114741>.
7. Hájková K, Holeček T, Filipi M, *et al.* (2025). *Scientific Reports* 15(1), 339. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-82733-9>.
8. Hájková, K., Bárta, J., Holeček, T. *et al.* (2026). *AppliedChem* 6(1), 11. <https://doi.org/10.3390/appliedchem6010011>.
9. Bárta, J., Hájková, K., & Sikora, A. (2025). *Nanotechnology Reviews* 14(1), 20250229. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2025-0229>.
10. Hájková, K., Tomášková, I., Holeček, T. *et al.* (2026). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 189(1), 168–178. <https://doi.org/10.1002/jpln.70045>.