



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

ISBN 978-80-973573-2-0

Zborník výskumných prác

Január 2021



Centrum pre rozvoj drevárskeho, nábytkárskeho a celulózo- papierenského priemyslu

- Centrum je neziskové, voľné, záujmové, dobrovoľné a nepochitické združenie. Členmi sú pracoviská výskumu a vývoja, podnikateľské a nepodnikateľské subjekty.
- Centrum bolo zapísané dňa 16.08.1998 na Krajskom úrade v Bratislave, odbore všeobecnej správy, podľa ustanovenia § 20i ods. 2 Občianskeho zákonníka do registra záujmových združení právnických osôb, vedeného na krajskom úrade.
- Centrum má svoje orgány: Rada riaditeľov, predseda Rady riaditeľov, podpredseda Rady riaditeľov, výkonný riaditeľ, revízori účtov.
- Centrum pre rozvoj drevárskeho, nábytkárskeho a celulózo-papierenského priemyslu spolupracuje s ostatnými Centrami založenými Ministerstvom hospodárstva SR.
- Centrum je rámcovo usmerňované Stanovami združenia.
- Cieľom je príprava strategických, koncepčných a rozvojových zámerov výskumu a vývoja, koordinácia spolupráce pri príprave, riešení a realizácii rozhodujúcich a integrovaných projektov vedy a techniky, súčinnosť pri rozvoji normalizácie a jej harmonizácii s EÚ, koordinovaný rozvoj skúšobníctva, podpora presadzovania systémov kvality, koncepčná a rozborová činnosť v odvetviach drevárskeho, nábytkárskeho a celulózo-papierenského priemyslu.



**MINISTERSTVO
HOSPODÁRSTVA
SLOVENSKEJ REPUBLIKY**



Predslov

Vážené dámy, vážení páni.

Uplynulý rok 2020 bol poznačený pandémiou spôsobenou vírusom COVID-19, ktorá stále zúri po celom svete. Ľudstvo sledovalo obrovské úsilie vedcov pri vývoji vakcíny, ktorú sa koncom roka podarilo začať aj hromadne aplikovať. V istých fázach sa zdalo, ako keby život zastal, na chvíľu sa zastavili aj niektoré výrobné prevádzky, zaznamenali sme stagnáciu a potom aj pokles svetovej ekonomiky. Ale v skutočnosti sa náš doterajší spôsob života iba transformuje, nové technológie nám pomáhajú prekonať izoláciu, zavádzajú sa nové formy výkonu práce aj obstarávania tovarov.

Aj keď je riešenie pandémie v súčasnosti prvoradou otázkou, nesmieme zabúdať, že sme nastúpili cestu inej „hlbokej“ transformácie spojennej s cieľmi klimateckej neutrality v Európskej únii. Čakajú nás zmeny existujúcich hodnotových reťazcov, ktoré prinesú nové výrobky s nízkym obsahom uhlíka, nové výrobné procesy a nové obchodné modely. Táto transformácia má ovplyvniť celý priemysel, najmä vrátane energeticky náročných odvetví. Aj keď presné postupy realizácie tejto transformácie zostávajú otvorené, sú už známe mnohé trendy a technológie smerujúce k dekarbonizácii: elektromobilita, vodíkové technológie, neustále zvyšovanie energetickej účinnosti procesov a technológií, obehové biohospodárstvo, uhlíkovo neutrálna palivá, zachytávanie zlúčenín uhlíka, skleníkových plynov a pod.

Významnú úlohu pri dosahovaní cieľov klimateckej neutrality zohrajú lesy a vzťah človeka k nim. Udržiavanie rovnováhy medzi spotrebou a prírastkom musí zohľadňovať rovnováhu medzi zachovávaním biodiverzity, potrebou konzervovať skleníkové plyny pomocou efektívnych rýchlorastúcich drevín, ako aj potrebou obnoviteľnej suroviny. A naopak, priemysel spracovávajúci drevo musí reflektovať na medzinárodné klimatecké záväzky implementáciou optimálnych BAT technológií, ako aj zavádzaním prvkov Industry 4.0 akými sú „smart riešenia“, využívajúce nové schopnosti ľudstva v oblasti aplikácie a využívania umelej inteligencie a spracovania veľkých objemov dát. Sú pred nami obrovské výzvy, ktoré sú zvládnuteľné len prostredníctvom efektívneho využívania výsledkov vedy, výskumu a technologického rozvoja.



Ing. Štefan Boháček, PhD.

predseda Rady riaditeľov

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

ZBORNÍK VÝSKUMNÝCH PRÁC

JANUÁR 2021

OBSAH

1. Vladimír Ihnát, Marián Slamka: Alternatívne spôsoby zhodnocovania menej kvalitnej drevnej hmoty.5
2. Jozef Balberčák, Vladimír Kuňa: Eliminácia lepivých nečistôt (makrostickies) v linke prípravy zberového papiera v Metsa Tissue Žilina.14
3. Štefan Boháček, Jozefína Gallová, Andrej Pažitný, Albert Russ, Vladimír Ihnát: Enzymatická hydrolýza bele topoľového dreva predspracovaného zmrazovaním: vplyv trvania enzymatickej hydrolýzy a času zmrazovania.26
4. Monika Stankovská, Mária Fišerová, Juraj Gigac, Elena Opálená: Optimálny výber buničín pre výrobu tissue papierov s požadovanými funkčnými vlastnosťami.37
5. Vladimír Ihnát, Henrich Lübke, Andrej Pažitný, Jozef Balberčák, Vladimír Kuňa, Opálená Elena: Kaskádové využívanie drevnej hmoty v krajinách EÚ.48
6. Alois Vojta: Mechanická dezintegrácia dendromasy pre výrobu biopalív druhej generácie.57
7. Michal Halaj: Vodný kvet ako celulóзовý materiál pre zdroj biopalív 3. generácie: zber a spôsoby predspracovania na hydrolýzu a následnú fermentáciu.66
8. Marián Slamka, Maroš Sedliak, Milan Oravec, Vladimír Ihnát: Možnosti nasadenia harvesterových technológií vo výchovných ťažbách listnatých drevín v oblasti Zvolena a Žiliny.78

Alternatívne spôsoby zhodnocovania menej kvalitnej drevnej hmoty

*Vladimír Ihnát

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

Slovenský drevársky výskumný ústav

ihnát.sdvu@vupc.sk

Marián Slamka

Národné lesnícke centrum, Zvolen

Abstrakt

Článok predstavuje alternatívne spôsoby využitia menej hodnotného dreva akými sú drevo-cementové a drevo-plastové kompozitné materiály a produkty vznikajúce chemickým spracovaním dezintegrovaného dreva. Súčasné nastavenie drevospracujúceho priemyslu logicky uprednostňuje spracovanie menej hodnotného dreva, hlavne vlákničky, dvojakým spôsobom: buď na výrobu aglomerovaných materiálov akými sú drevotrieskové a drevovláknité dosky a z toho odvodené výrobky, resp. na výrobu buničiny na výrobu papierových produktov. Alternatívne metódy spracovania predstavujú kvantitatívne malý, ale do budúcnosti nie zanedbateľný, podiel spracovania menej hodnotnej hmoty, hlavne s dôrazom na rozvoj biopalív druhej generácie a zelenej chémie.

Kľúčové slová: Cementové dosky, drevo-plastové materiály, chemické produkty na báze dreva, biopalivá, nanocelulóza, aditíva.

Úvod

Pojem menej kvalitná drevná hmota zahŕňa kvalitatívnu triedu 5- vláknička a osobitne kvalitatívnu triedu 6-palivové drevo pre oba druhy ihličnatých aj listnatých drevín. Kvalita aj rozmerový profil tejto suroviny sú podstatne nižšie ako je to pri vyšších kvalitatívnych stupňoch a to sa prejavuje aj na výrazne zníženej cene za mernú jednotku. Na túto cenu však sú nastavené dva obrovské spracovateľské reťazce drevospracujúceho priemyslu.

Potenciál drevnej hmoty nižších kvalitatívnych stupňov v súčasnej dobe značne závisí od faktorov ovplyvňujúcich jej ekonomické zhodnocovanie. Vysoká voluminóznosť a nižšie zhodnotenie vstupov nútia spracovateľov rozmýšľať o výrobách vo vysokých objemoch. Silnú konkurenciu v boji o vlákničku a menej kvalitnú drevnú hmotu môže predstavovať stále sa zdokonaľujúci priemysel na výrobu lesnej palivovej štiepky (Hakkila 2003) za účelom jej energetického zhodnocovania. Na strane druhej neustále stúpajúca recyklácia odpadového dreva môže vyvolať znížený dopyt po cenovo nevýhodnejšej primárnej vlákničke a vytvoriť tak priestor pre vývoj nových produktov. V súčasnosti sa tak deje pri výrobe aglomerovaných materiálov na báze dreva (Obr. 1) a to drevotrieskových dosiek (Ihnát et al. 2017), drevovláknitých dosiek (Ihnát et al. 2018, Balberčák et al. 2017, 2018, Wan et al. 2014), OSB (Schoo et al. 2003, Wan et al. 2014, Ihnát et al. 2017, 2018, Zeng et al. 2018) a MDF (Wan et al. 2014, Ihnát et al. 2018, Petar and Savov 2019). Spoločenské uprednostňovanie recyklácie pred primárnymi zdrojmi má hlavne environmentálny dôvod (Di Maria et al. 2018, Stahl et al. 2002), vo výrobe však stále rozhoduje cenová dostupnosť. Recyklovanú drevnú hmotu je

možné získať zo stavebných odpadov a demolícií (Wang et al. 2016, 2017a,b, Asari et al. 2004, Huang et al. 2002, Rautkoski et al. 2016), čiastočnou náhradou za primárne zdroje je aj priemyselný odpad (piliny, hobliny a pod.) vznikajúci pri spracovaní a opracovaní dreva (Ahmed et al. 1998). Typický vedľajší produkt spracovania surového dreva- kôra má hlavné využitie pri energetickom zhodnocovaní, v malom množstve sa využíva na mulčovanie resp. podstielky pre zvieratá a pod. Mnohí autori uprednostňujú jej neenergetické využitie (Andres et al. 2010, Ghitescu et al. 2015, Medved' et al. 2019, Mirski et al. 2020).



Obr. 1: Recyklácia dreva sa využíva hlavne pri výrobe aglomerovaných materiálov na báze dreva. Vo výrobe DTD sa očistené odpadové drevo a starý nábytok využíva ako prídavok k primárnym trieskam.

Výroba buničiny v krajinách CEPI

Konfederácia európskeho celulózo-papierenského priemyslu (CEPI), ktorá združuje 18 krajín Európy, reprezentuje 92% európskeho CELPAP (Tab. 1). Podľa štatistík CEPI sa v členských organizáciách každý rok vyprodukuje viac ako 37,5 mil ton buničiny, pričom spotreba drevnej hmoty sa pohybuje cca na úrovni 150 mil m³ (v pomere 110/40 - ihličnaté/ listnaté). Suroviny do výroby však vstupuje podstatne viac, keďže agregovaný recyklačný stupeň pre CELPAP predstavuje viac ako 70%, využíva sa recyklát. Špecializácia výroby v jednotlivých krajinách je individuálna, napr. na Slovensku CELPAP spracováva od roku 2015 výhradne listnatú surovinu. Najväčšími spracovateľmi (obaja po cca 30% z celkového množstva) sú Švédsko a Fínsko.

Tab. 1: Približná celková ročná výroba buničiny v členských spoločnostiach CEPI.

Buničina	Množstvo
Mechanická a polochemická	9,7 mil ton
Chemická	27,5 mil ton
Ostatné buničiny a vlákna	0,3 mil ton

Výroba aglomerovaných materiálov na báze dreva v Európe

EPF (European Panel Federation) reprezentuje európskych výrobcov drevotrieskových, drevovláknitých a drevoštiepkových materiálov z 25 krajín (Tab. 2). Spotreba drevnej hmoty sa pohybuje cca na úrovni 70 mil m³ (započítané je aj množstvo na výrobu cca 3,5 mil m³ preglejky, ktorá sa vyrába z kvalitnejšieho dreva). Agregovaný recyklačný stupeň sa zatiaľ

nesleduje ale prezentované príklady dobrej praxe napovedajú, že aj v tomto priemysle je možné dosiahnuť uspokojivé hodnoty (napr. výroba DTD až do 50%).

Tab. 2: Približná celková ročná výroba aglomerovaných materiálov na báze dreva v členských spoločnostiach EPF.

Buničina	Množstvo
Drevotrieskové dosky (DTD)	32 mil ton
Drevovláknité dosky (MDF)	12 mil ton
Drevoštiepkové dosky (OSB)	6 mil ton
Ostatné vláknité dosky	5 mil ton

Alternatívne zhodnocovanie menej kvalitnej drevnej hmoty

Počas posledných desaťročí bola vyvinutá veľká snaha nachádzať nové využitia pre drevnú hmotu, pričom jej všeobecné použitie je viac-menej dané a závisí od kvality vstupnej guľatiny. Ak v drevospracujúcom priemysle sledujeme vývoj v oblasti výroby nových materiálov dospejeme k názoru, že z pohľadu udržateľnosti na trhu majú všetky tieto výrobky stály menovateľ a tým je hromadná výroba (Obr. 2). Dobrým príkladom je CLT (krížom lepené lamelové drevo), ktoré našlo uplatnenie v stavebníctve v posledných rokoch. Je za tým samozrejme aj dobrý marketing spojený s presadzovaním drevených stavieb. Keďže CLT sa vyrába z dreva strednej kvality, zoberme prípad MDF (polotvrdá vláknitá doska), ktorá našla uplatnenie v nábytkárskom priemysle. Tento výrobok dokázal za relatívne krátke obdobie vďaka svojim vlastnostiam prebrať tú časť využitia, ktorá patrila DTD a rastlému drevu a využiť zvyšujúci sa dopyt spoločnosti po novom nábytku. Celosvetová výroba MDF sa pritom dostala do závratných objemov.



a) MDF

b) CLT

Obr. 2: Produkty na báze dreva, ktoré si našli svoje uplatnenie v mohutných objemoch.

Aj kvôli hore uvedeným skutočnostiam je pohľad na niektoré už pripravené aplikácie dosť skeptický ale napriek tomu nie je nutné ich zavrhnúť. Ich transfer do priemyslu musí však byť dobre prepracovaný, pričom je potrebné si uvedomiť ich trhovú hodnotu. Aj keď všetko nasvedčuje na potrebu hromadnej výroby, na druhej strane malosériovým výrobám dnes doba

praje z pohľadu získavania vstupného kapitálu (start up a pod.). Každopádne je potrebné zvážiť konkurencieschopnosť nového výrobku, ktorý si bude musieť vytvoriť svoj priestor na úkor už používanej produkcie. K takýmto produktom, ktoré už našli svoje uplatnenie a podľa prieskumu trhu už aj dosiahli svoj pomyselný strop patria drevo-cementové a drevo-plastové kompozitné materiály, ak samozrejme neuvažujeme s výrobou brikiet a peliet slúžiacich na energetické účely. Na rozdiel od mnohých iných aplikácií s obsahom menej hodnotného dezintegrovaného dreva výroba beží aj keď v nie strategických objemoch. Taktiež biouhlie nie je typickým príkladom priameho využitia menej hodnotnej vlákničky ale označuje sa ako výrobok s vyššou pridanou hodnotou, ktorá sa argumentuje využitím na fertilizáciu, resp. na remediáciu pôdy. Biouhlie má byť produktom palivového dreva šiestej kvalitatívnej triedy. Ako nádejné varianty chemického spracovania menej hodnotného dreva spomeňme skvapalňovanie dreva a kôry za účelom získavania pojív pre aglomerované materiály Janiszewska et al. (2016), výrobu polyhydroxyalkanoátu (PHA) pomocou mikróbov za účelom nahradiť ropné produkty (Li et al. 2020) alebo výrobu nanokryštalickej celulózy (Irle et al. 2019).

Drevo –plastové kompozitné materiály

Drevoplastové kompozitné materiály sa používajú ako konštrukčný materiál s vyššou odolnosťou voči vlhkosti a poveternostným vplyvom ako rastlé drevo. Najviac využívaným plastom, ktorý sa používa v ich výrobe je vysoko-hustotný polyetylén (HDPE), ktorý sa pridáva v rôznych pomeroch (20% - 40%). V zásade platí, že vyšší obsah plastu znamená lepší modul pružnosti v ohybe aj lepšiu odolnosť voči nasiakaniu. Na štúdium fyzikálnych a mechanických vlastností už existujú normy aj keď vývoj stále pokračuje smerom využívania recyklátov. V roku 2008 bol tento materiál označený ako nádejný pre uplatnenie v automobilovom priemysle (Ashori 2008) avšak jeho najväčšie uplatnenie je v podobe terasových dosiek a pod. (Obr. 3). Aby boli tieto výrobky ekonomicky úspešné, musia sa preukázať ako výrobky s nižším dopadom na životné prostredie v porovnaní s alternatívami. Požadované informácie možno poskytnúť porovnávacím posudzovaním životného cyklu (LCA).



Obr. 3: Produkty vyrobené z drevoplastových kompozitných materiálov.

Feifel et al. 2015 uskutočnili štúdiu na posúdenie konkurencieschopnosti drevoplastových terás z hľadiska životného prostredia. V tejto štúdii LCA sa porovnali drevoplastovú terasu s

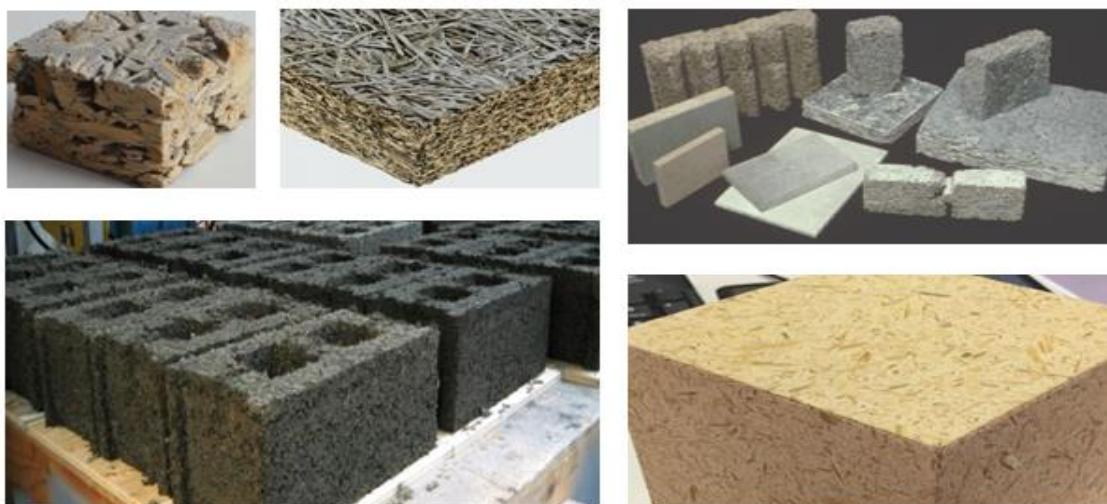
terasou z tlakovo impregnovanou borovicou. Výsledky za predpokladu rovnakých životností ukazujú, že pre všetky kategórie vplyvov je borovicová terasa ekologicky najpriaznivejšia.

Tab. 3: Výhody a nevýhody drevoplastových kompozitných materiálov oproti rastlému drevu z pohľadu uplatnenia na trhu.

Drevoplastové materiály	
Výhody	Nevýhody
– lepšia odolnosť voči (nižšia navlhavosť a nasiakavosť)	– obmedzená recyklovateľnosť, problematická likvidácia
– vyššia odolnosť voči atmosférickej korózii	– výroba spojená so chemickou záťažou
– vysoká odolnosť voči biotickým činiteľom (plesne, huby) a abiotickým (mráz, dážď, slnko)	– plastový vzhľad, postupná strata farebnosti v dôsledku UV žiarenia, znížené hmatové a pocitové vlastnosti subjektívneho hodnotenia
– vyššia odolnosť voči korózii pri kovových spojoch	– potreba retardérov horenia
– rozmerovo stabilnejšie	– nižšia tvárová stabilita
– dobrá opracovateľnosť	– opracovanie spojené s emisiami

Drevo-cementové kompozitné materiály

Známejšie ako drevo-cementové kompozitné materiály sú drevo-betónové konštrukcie. Jedná sa o spriahnuté rovinné konštrukcie, ktoré využívajú pevnostné vlastnosti oboch materiálov, pričom ich vzájomné pôsobenie je zabezpečené prenosom šmykových síl v rovine spriahnutia. Na drevo-betónové konštrukcie sa využíva rezivo kvalitatívne vyššej triedy (3A, 3B), naopak drevo-cementové kompozitné materiály vznikajú vzájomným miešaním dezintegrovaného dreva nižšej kvality a druhej zložky na báze cementu (Obr. 4).



Obr. 4: Produkty vyrobené z drevocementových kompozitných materiálov.

Komerčné drevo-cementové materiály obsahujú 2,75 až 3,0 časti portlandského cementu na 1,0 diel drevných častíc (hmotnostný základ), a tak dosahujú prijateľné mechanické a fyzikálne vlastnosti.

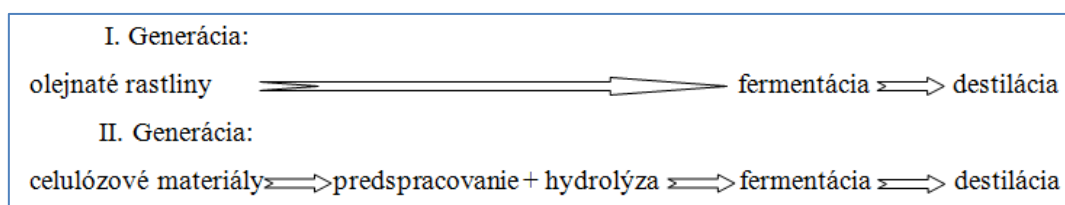
Drevo cementové kompozitné materiály sa v minulosti používali predovšetkým ako izolačné materiály s nízkou hustotou. Na rozdiel od bežných drevotrieskových dosiek majú okrem dobrej odolnosti voči poveternostným vplyvom a zvukovej izolácie, vysokú odolnosť proti ohňu, hmyzu a hubám. V Tab. 4 sú uvedené hlavné výhody a nevýhody drevocementových kompozitných materiálov oproti betónovým odliatkom z pohľadu ich uplatniteľnosti na trhu.

Tab. 4: Výhody a nevýhody drevocementových kompozitných materiálov oproti betónovým odliatkom z pohľadu uplatnenia na trhu.

Drevocementové materiály	
Výhody	Nevýhody
– vylepšené tepelno-technické vlastnosti	– nižšia odolnosť voči biotickým činiteľom a a biotickým činiteľom,
– vzhľadovo zaujímavé produkty s environmentálnych podtónom	pórovitosť štruktúry
– ľahšia opracovateľnosť, nižšia hmotnosť	– nižšia odolnosť voči atmosférickej korózii
– dobré povrchové vlastnosti pre vytváranie sendvičových konštrukcií	– zvýšená nasiakavosť a navlhavosť
– vhodné pre kotviace prostriedky	– potreba retardérov horenia
	– postupná strata farebnosti

Bioetanol druhej generácie

Biopalivá druhej generácie vyrobené z menej hodnotného dreva (Okuda a kol. 2008, Shi a kol. 2009) sa zvažujú pre budúcu priemyselnú výrobu s vysokým potenciálom. V roku 2016 sa vo Fínsku začala prvá priemyselná výroba tohto druhu na svete. Boli študované rôzne metódy predúpravy dreva, ako predspracovanie zriedenou kyselinou (Akhavue a kol. 2019) alebo parná explózia (Pažitný 2019). Predúprava dreva pred hydrolýzou je momentálne kľúčovou operáciou, ktorej sa vo výskume venuje patričná pozornosť. Predúprava celulóзовých materiálov je operácia nad rámec v porovnaní s výrobou bioetanolu prvej generácie (Obr. 5).



Obr. 5: Porovnanie výroby bioetanolu prvej a druhej generácie.

V Tab. 5 sú zosumarizované výhody a nevýhody celulóзовého bioetanolu ako trhovej položky a jej potenciálu uplatniť sa na trhu.

Tab. 5: Výhody a nevýhody bioetanolu z pohľadu uplatnenia na trhu ako biopalivo.

Celulóзовý bioetanol	
Výhody	Nevýhody
– uplatniteľný ako biozložka v palivách v obrovských množstvách	– silná konkurencia v podobe I. generácie biopalív, vodíkových palív, elektropohonov
– neropný produkt, očakávaná legislatívna podpora	– nedokončený technologicky vývoj
– nepoľnohospodársky produkt	– energeticky náročná viacstupňová výroba
– nižšia voluminóznosť oproti I. generácii	– vyžaduje uplatniteľnosť vedľajších produktov
– obnoviteľná vstupná surovina	– časovo náročnejšia výroba

Záver

Vyššie zhodnocovanie dreva nižšej kvality z celospoločenského pohľadu je možné dosiahnuť cieleným smerovaním drevospracujúceho priemyslu na nový perspektívny produkt, ktorý bude mať potenciál uplatniť sa na trhu v obrovských objemoch. Z prehľadu doposiaľ prezentovaných technológií sa uplatnenie bioetanolu II. generácie javí ako najperspektívnejšie. Potenciál niektorých známych technológií spracovania ako sú výroba drevocementových a drevoplastových produktov, ako sa zdá, už dosiahol svoj strop. Nevýhoda týchto technológií je, že si na trhu musia uplatniť svoju pozíciu na úkor už existujúcich technológií. Naopak strategickou výhodou bioetanolu II. generácie by mohla byť legislatívna podpora z dôvodu celospoločenského tlaku na znižovanie skleníkových emisií. Sumár nevýhod však v súčasnosti stále prevyšuje jeho klady a tak vývoj v tejto oblasti stále nie je uzavretý. Z minulosti sú známe prípady, keď trhový potenciál dobrej technológie časom zanikol z dôvodu, že technologické nedostatky neboli odstránené včas alebo aj vôbec. Takéto technológie sú jednoducho trhom obídene a paradoxne ich nahradia technológie na úplne inom princípe, kde sa tieto nedostatky vôbec nevyskytujú.

Pod'akovanie

„Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na Zákľade Zmluvy č. APVV-16-0487“.

Použitá literatúra

1. Ahmed, A., Akhtar, A., Myers, G.C., Scott, G.M., 1998: Kraft pulping of industrial wood waste. TAPPI Pulping Conference, Montreal, pp 993- 1000.
2. Akhabue, C., Otoikhian, K.S., Bello, D., Adeniyi, A.G., Ighalo, J.O., 2019: Effect of dilute acid pre-treatment on the functional complexes and surface morphology of wood sawdust for bioethanol production. Proceeding of the 18th Annual International Materials Congress for the Materials Society of Nigeria (MSN), 18 - 22nd November, Nigeria. Pp 318-322.
3. Andres, Y., Dumont, E., Le Cloirec, P., Ramirez-Lopez E., 2010: Wood bark as packing material in a biofilter used for air treatment. Environmental Technology 27(12): 1297-1301.

4. Asari, M., Takatsuki, H., Yamazaki, M., Azuma, T., Takigami, H., Sakai, S.I., 2004: Waste wood recycling as animal bedding and development of bio-monitoring tool using the CALUX assay. *Environment International* 30(5): 639-649.
5. Ashori, A., 2008: Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries! *Bioresource Technology* 99(11): 4661-4667.
6. Balbercak, J., Bohacek, S., Medo, P., Ihnat, V., Lubke, H., 2017: Chemical processing of waste wood based agglomerates Part I: Evaluation of properties of fluting liners made of semichemical pulp obtained by a mildly alkaline sulphur-free cooking process. *Wood Research* 62(5): 715-726.
7. Balbercak, J., Bohacek, S., Pazitny, A., Ihnat, V., Lubke, H., 2018: Chemical processing of waste wood based agglomerates part II: Evaluation of properties of fluting liners made of semichemical pulp obtained by an alkaline cooking process. *Wood Research* 63(1): 35-44.
8. Di Maria, A., Eyckmans, J., Van Acker, K., 2018: Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management* 75: 3-21.
9. Feifel, S., Stubs, O., Seibert, K., Hartl, J., 2015: Comparing wood-polymer composites with solid wood: the case of sustainability of terrace flooring. *European Journal of Wood and Wood Products* volume 73: 829-836.
10. Ghitescu, R.E., Volf, I., Carausu, C., Bühlmann, A.M., Gilca, I.A., Popa, V.I., 2015: Optimization of ultrasound-assisted extraction of polyphenols from spruce wood bark. *Ultrasonics Sonochemistry* 22: 535-541.
11. Hakilla, P., 2003: Developing technology for large-scale production of forest chips. *Wood Energy Technology Programme 1999-2003. Interim report.* 58 s. ISBN 952-457-101-3.
12. Huang, W.L., Lin, D.H., Chang, N.B., Lin, K.S., 2002: Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. *Resources, Conservation and Recycling* 37(1): 23-37.
13. Ihnat, V., Lubke, H., Boruvka, V., Russ, A., 2017: Waste agglomerated wood materials as a secondary raw material for chipboards and fibreboards. Part I: Preparation and characterization of wood chips in term of their reuse. *Wood Research* 62(1): 45-56.
14. Ihnát, V., Lübke, H., Russ, A., Pažitný, A., Borůvka, V., 2018: Waste agglomerated wood materials as a secondary raw material for chipboards and fibreboards. Part II: Preparation and characterization of wood fibres in terms of their reuse. *Wood Research* 63(3): 431-442.
15. Irle, M., Privat, F., Couret, L., Belloncle, Ch., Déroubaix, G., Bonnin E., Cathala, B., 2019: Advanced recycling of post-consumer solid wood and MDF. *Wood Material Science & Engineering* 14(1): 19-23.
16. Janiszewska, D., Frąckowiak, I., Mytko, K., 2016: Exploitation of liquefied wood waste for binding recycled wood particleboards. *Holzforschung* 70(12): 1135-1138.
17. Li, D., Yin, F., Ma, X., 2020: Towards biodegradable polyhydroxyalkanoate production from wood waste: Using volatile fatty acids as conversion medium. *Bioresource Technology* 299: 122629.

18. Medved, S., Gajšek, U., Tudor, E.M., Barbu, M.C., Antonović, A., 2019: Efficiency of bark for reduction of formaldehyde emission from particleboards.. *Wood Research* 64(2): 307-316.
19. Mirski, R., Kawalerczyk, J., Dziurka, D., Wieruszewski, M., Trociński, A., 2020: Effects of using bark particles with various dimensions as a filler for urea-formaldehyde resin in plywood. *BioResources* 15(1): 1692-1701.
20. Okuda, N., Ninomiya, K., Katakura, Y., Shioya, S., 2008: Strategies for reducing supplemental medium cost in bioethanol production from waste house wood hydrolysate by ethanologenic *Escherichia coli*: Inoculum size increase and coculture with *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioengineering* 105(2): 90-96.
21. Pažitný, A., 2019: Steam explosion of wood particles from fibreboard and particle board with indirect control by enzymatic hydrolysis. *Acta Chimica Slovaca* 12(2): 185-191.
22. Petar, A., Savov, V., 2019: Possibilities for manufacturing eco-friendly medium density fibreboards from recycled fibres. A Review. In: 30th International Conference on Wood Science and Technology - ICWST 2019 "IMPLEMENTATION OF WOOD SCIENCE IN WOODWORKING SECTOR" and 70th anniversary of Drvna industrija Journal, 7pp.
23. Rautkoski, H., Vähä-Nissi, M., Kataja, K., Gestranus, M., Liukkonen, S., Määttänen, M., Liukkonen J., Kouko, J., Asikainen, S., 2016: Recycling of contaminated construction and demolition wood waste. *Waste and Biomass Valorisation* 7: 615–624.
24. Schoo, A., Roffael, E., Uhde, M., 2003: Medium density fibre boards (MDF) from recovered oriented strand boards (OSB). *European Journal of Wood and Wood Products* 61: 390-391.
25. Shi, J., Ebrik, M., Yang, B., Wyman, Ch.E., 2009: The potential of cellulosic ethanol production from municipal solid waste: A technical and economic evaluation. University of California Energy Institute, 38 pp.
26. Stahl, D.C., Skoraczewski, G., Arena, P., Stempko, B., 2002: Lightweight concrete masonry with recycled wood aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering* 14(2): 116-121.
27. Wan, H., Wang, X.M., Barry, A., Shen, J., 2014: Recycled wood composite panels: Characterizing recycled materials. *BioResources* 9(4): 7554-7565.
28. Wang, L., Chen, S.S., Tsang, D.C.W., Poon, Ch.S., Shih, K., 2016: Value-added recycling of construction waste wood into noise and thermal insulating cement-bonded particleboards. *Construction and Building Materials* 125(30): 316-325.
29. Wang, L., Yu, I.K.M., Tsang, D.C.W., Li, S., Li, J.-s., Sun, Poon, Ch.S., Wang, Y.S., Dai, J.-G., 2017a: Transforming wood waste into water-resistant magnesia-phosphate cement particleboard modified by alumina and red mud. *Journal of Cleaner Production* 168: 452-462.
30. Wang, L., Chen, S.S., Tsang, D.C.W., Poon, Ch., S., Ok, Y.S., 2017b: Enhancing anti-microbial properties of wood-plastic composites produced from timber and plastic wastes. *Environmental Science and Pollution Research* 24: 12227–12237.
31. Zeng, Q., Lu, Q., Zhou, Y., Chen, N., Rao, J., Fan, M., 2018: Circular development of recycled natural fibers from medium density fiberboard wastes. *Journal of Cleaner Production* 202: 456-464.

Eliminácia lepidivých nečistôt (makrostickies) v linke prípravy zberového papiera v Metsa Tissue Žilina

*Jozef Balberčák, Vladimír Kuňa

Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s. Bratislava

kuna@vupc.sk

Abstrakt

Cieľom článku bolo stanoviť vplyv zvýšenej dávky bentonitu na obsah lepidivých nečistôt (makrostickies) pri rôznych druhoch vodolátok, pričom sa analyzoval obsah popola, belosti a zvyškovej farby. Prevádzkové skúšky boli uskutočnené v období 2016 až 2020 na vstupe do linky prípravy zberového papiera v Metsa Tissue Žilina. Výsledky prvotných analýz preukázali, že došlo k rapídному nárastu obsahu makrostickies. Z tohto dôvodu bolo o 30% zvýšené dávkovanie prostriedku na uvoľnenie nežiaducich látok zo zberového papiera a tomu bolo upravené aj dávkovanie prostriedku na stabilizáciu peny. Dávkovanie prostriedku na elimináciu lepidivých nečistôt a zlepšenie účinnosti triedenia bolo zvýšené z pôvodných 2,8 kg/t a.s. vodolátky na 4,0 kg/t a.s. vodolátky.

Kľúčové slová: Lepivé nečistoty (makrostickies), vodolátka, Hydrobent PAI, flotácia, bentonit, obsah popola, belosť, zvyšková farba.

Úvod

Zvyšovanie recyklácie papiera tiež zvyšuje obsah nečistôt a nežiaducich látok v odpadovom papieri (Kuňa et al. 2016), čím sa zhoršuje jeho kvalita. V recyklovanom papieri sú rôzne zdroje a druhy nečistôt (Holík 2000), ako sú adhezíva, živice, plnivá, činidlá na zvýšenie pevnosti za mokra a rozpustné koloidné materiály, ako sú povlaky, latexy. Hlavným zdrojom lepidivých nečistôt sú lepidlá citlivé na tlak (PSA) kvôli ich trvalému termoplastickému stavu, ktorý zaisťuje trvalú lepidivosť. Sú to hlavne plasty, ako napríklad polyetylén a polypropylén (Putz 2000). Aj buničiny môžu obsahovať smolu z dreva, ktorá je zmes živicových kyselín, mastných kyselín, prírodných olejových materiálov, ktoré majú tendenciu byť lepkavé, a preto sú náchylné prispievať k tvorbe usadenín v papierenskom stroji (Hubbe 2000). Existujú dva hlavné spôsoby klasifikácie stickies (Putz 2000). Podľa pôvodu: a) primárne stickies, b) sekundárne stickies a podľa ich fyzikálnych alebo chemických vlastností: a) mikro stickies, b) makro stickies. Primárne stickies pochádzajúce z roztavených lepidiel, spojív nachádzajúcich sa v knihách, obálkach a pod. (styrénbutadién, spojivá styrénakrylového latexu, guma, vinylakryláty, polyizoprén, polybutadién atď.) (Gribble et al. 2010). Sekundárne stickies sa tvoria v dôsledku fyzikálnych a chemických interakcií, ktoré sa vyskytujú počas výrobného procesu (Sarja 2007). Potenciálnym dôvodom ich vzniku je zmena teploty, pH a náboja, ktoré podporujú koloidnú destabilizáciu a aglomeráciu rozpustených a koloidných látok (Putz 2000). Klasifikácia na mikro a makro stickies sa vykonáva podľa veľkosti lepkavých látok. Je to stanovené laboratórnym skríningom, pri ktorom sú makro častice zachytené na 100 µm alebo 150 µm laboratórnych sítach a mikro

častice, ktoré prechádzajú cez tieto sitá, ale sú väčšie ako 1 až 5 μm (Sarja 2007). Podľa Doshi et al. (2003) môžu byť mikro stickies ďalej rozdelené na suspendované stickies (20 - 100 μm), dispergované stickies (1-20 μm), koloidné stickies (5-0,01 μm) a rozpustené stickies (<0,01 μm). Klasifikácia podľa veľkosti je potrebná z dôvodu rôznych prístupov k odstraňovaniu mikro a makro stickies, špecifických metód používaných na ich kvantifikáciu a rôznych stratégií na minimalizáciu ich vplyvu na výrobu papiera (Doshi a Dyer 2000). Okrem toho veľkosť a koncentrácia stickies majú veľký vplyv na kvalitu papiera a prevádzkovateľnosť papierenského stroja (Putz 2000). Aby sa vyriešilo vytváranie stickies v procese spracovania zberového papiera, je dôležité porozumieť ich mechanizmom tvorby a akumulácie. Prvým krokom je pochopenie, ktoré druhy stickies sú zapojené (mikro, makro, primárne, sekundárne). Existujú dva hlavné mechanizmy, vďaka ktorým môže dôjsť k depozícii: depozícia nárazu kvôli lepkavej povahe a depozícia toku kvôli destabilizácii koloidného materiálu (Monte et al. 2010). Smola prítomná v buničine môže vytvárať synergický účinok s mikrostickies prítomnými v deinkovanej buničine a navzájom sa destabilizovať (Monte et al. 2004). Chemikálie použité v tomto procese môžu destabilizovať škodlivé látky prítomné v procese a spôsobiť tvorbu sekundárnych stickies (Monte a kol. 2004 a 2012, Laurila-Lumme a kol. 2003 a Jansson 2009). Ako už bolo uvedené, stickies sú dosť zložité látky a môžu obsahovať organické aj anorganické látky.

Porovnanie zaťaženia zberového papiera lepivými nečistotami

V období 2016 až 2020 boli v linke prípravy zberového papiera v Metsa Tissue Žilina, vykonané analýzy za účelom stanovenia obsahu makrostickies. Priemerné zaťaženie zberového papiera lepivými nečistotami za nádržou B 103 sú uvedené v Tab. 1.

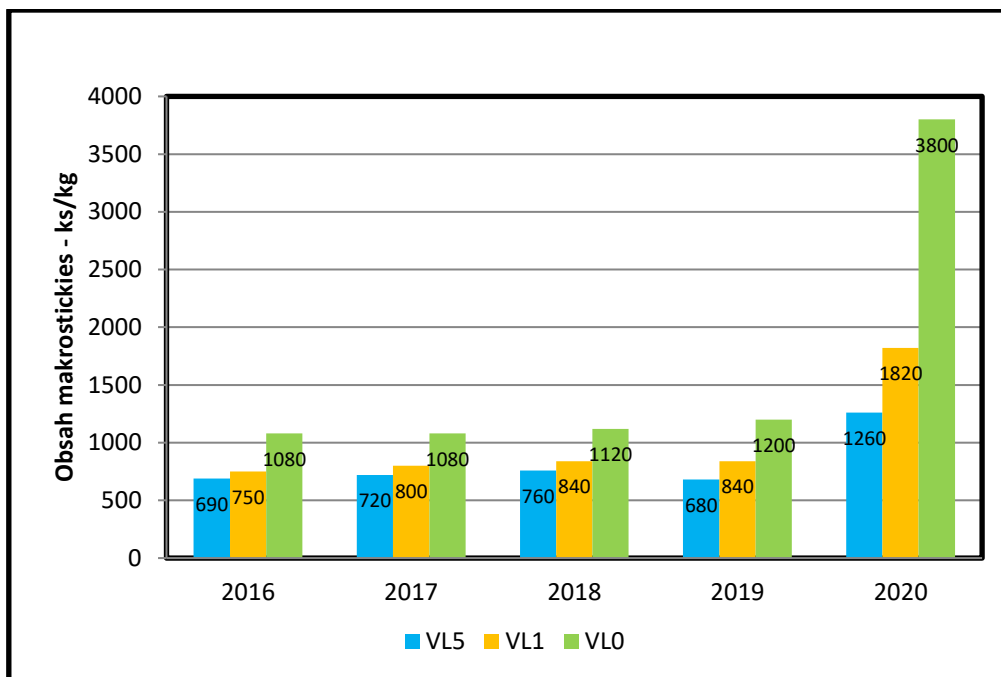
Tab. 1: Analýzy obsahu makrostickies na vstupe do zberovej linky za B103 (priemerné hodnoty).

Obdobie odberu	2016	2017	2018	2019	2020*
Vodolátka	Makrostickies - priemerné hodnoty (ks/kg)				
VL-5	690	720	760	680	1260
VL-1	750	800	840	840	1820
VL0	1080	1080	1120	1200	3800

2020* - odbery vzoriek v období 12.19 - 1.2020

Na základe analýz obsahu makrostickies (MS) v rôznych technologických uzloch bolo zistené, že v sledovanom období došlo k rapídному nárastu obsahu makrostickies v zberovom papieri vstupujúcom do linky prípravy. Oproti roku 2016, kedy bola realizovaná navrhnutá technológia eliminácie lepivých nečistôt, došlo k zvýšeniu ich obsahu v zberovom papieri nasledovne (Obr. 1) :

- vodolátka VL5 zo 690 ks/kg na 1260 ks/kg
- vodolátka VL1 zo 750 ks/kg na 1820 ks/kg
- vodolátka VL0 z 1080 ks/kg na 3800 ks/kg.



Obr. 1: Porovnanie obsahu makrostickies v rôznych druhoch vodolátok.

Z tohto dôvodu sa prijali opatrenia, ktoré boli monitorované a analyzované na mesačnej báze:

Prodeink Extra – prostriedok na uvoľnenie nežiaducich látok zo zberového papiera, dávkaný do rozvlákňovacieho bubna, zvýšiť jeho dávkovanie o 30 %.

Prodeink AS 10 – prostriedok na stabilizáciu peny vo flotačných celách dávkaný pred flotáciu – jeho dávkovanie upraviť potrebám zvýšeného dávkovania Prodeinku Extra.

Hydrobent PAI – prostriedok na elimináciu lepidlových nečistôt a zlepšenie účinnosti triedenia, dávkaný pred flotáciu, zvýšiť dávkovanie zo súčasných 2,8 kg/ t a.s. vodolátky na 4,0 kg/ t a.s. vodolátky.

Vyhodnotenie

Zvýšenie dávkovania Hydrobentu PAI

Z dôvodu zachovania vysokej účinnosti zberovej linky pri odstraňovaní makrostickies bolo pristúpené ku zmene dávkovania chemikálií. V prvom kroku bola zvýšená dávka Hydrobentu PAI z pôvodných 2,8 kg/t vodolátky na 4,0 kg/t vodolátky. Dávkovacie miesto bentonitu Hydrobent PAI do látky bolo na vstupe do flotácie. Cieľom dávkovania bentonitu bolo zlepšenie účinnosti flotácie pri odstraňovaní makrostickies a zlepšenie účinnosti jemného triedenia. Analýzy obsahu makrostickies boli vykonané v nasledovných technologických uzloch :

- rozvláknená látka z nádrže B103
- vstup látky na flotáciu
- výstup látky z flotácie
- vstup látky na Variosplit
- látka za bieliacou vežou.

Porovnanie obsahu makrostickies, pred a počas zvýšenej dávky bentonitu, pri rôznych druhoch vodolátok je uvedené v Tab. 2, 3 a 4 a na Obr. 2 - 7. Súčasťou vyhodnotenia boli aj analýzy obsahu popola, belosti a zvyškovej farby.

Tab. 2: Optimalizácia dávkovania chemikálií v linke prípravy zberového papiera - VL5.

Vodolátka VL 5		Odber 1			dňa: 3.2.2020	
Extra – 8,0 l/hod		(1 kg/t a.s. vodolátky)				
AS10 – 1,5 l/hod		(0,2 kg/t a.s. vodolátky)				
Hyd PAI – 1250 l/hod		(2,8 kg/t a.s. vodolátky)				
Č. vz.	Odberové miesto	Konzist. (%)	MS (ks/kg)	Popol (%)	Belosť (%)	Zvyšková farba (ppm)
1	za nádržou B103	2,5	880	23,9	53,8	503
2	vstup na flotáciu	1,7	920	23,2	53,5	506
3	výstup z flotácie	1,7	600	20,9	54,8	446
4	vstup na Variosplit	0,8	320	19,8	54,7	439
5	za bieliacou vežou.	3,9	120	5,3	59,7	236
Vodolátka VL 5		Odber 2			dňa: 3.2.2020	
Extra – 8,0 l/hod		(1 kg/t a.s. vodolátky)				
AS10 – 1,5 l/hod		(0,2 kg/t a.s. vodolátky)				
Hyd PAI – 1750 l/hod		(4,0 kg/t a.s. vodolátky)				
Č. vz.	Odberové miesto	Konzist. (%)	MS (ks/kg)	Popol (%)	Belosť (%)	Zvyšková farba (ppm)
1	za nádržou B103	2,9	890	25,3	53,6	513
2	vstup na flotáciu	1,6	930	25,2	53,8	519
3	výstup z flotácie	1,6	540	21,5	55,1	425
4	vstup na Variosplit	0,9	200	19,9	55,1	422
5	za bieliacou vežou.	3,4	80	5,3	60,1	217

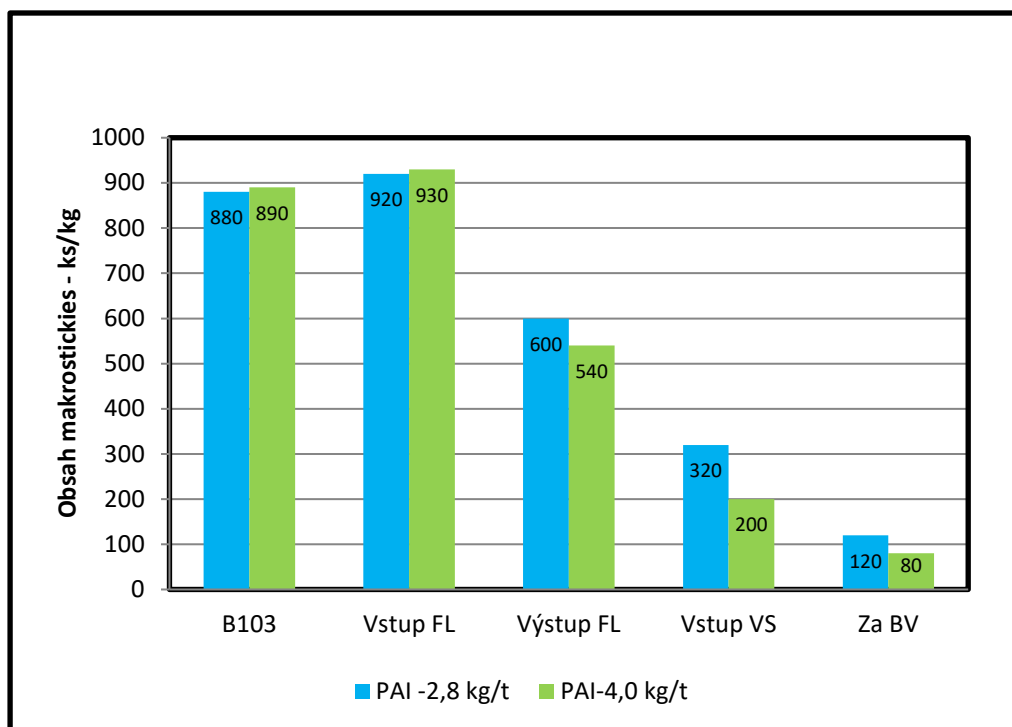
Tab. 3: Optimalizácia dávkovania chemikálií v linke prípravy zberového papiera – VL1.

Vodolátka VL 1		Odber 3		dňa: 5.3.2020		
Extra – 10,0 l/hod		(1,3 kg/t a.s. vodolátky)				
AS10 – 1,5 l/hod		(0,2 kg/t a.s. vodolátky)				
Hyd PAI – 1250 l/hod		(2,8 kg/t a.s. vodolátky)				
Č. vz.	Odberové miesto	Konzist. (%)	MS (ks/kg)	Popol (%)	Belosť (%)	Zvyšková farba (ppm)
1	za nádržou B103	2,9	1240	27,3	64,3	252
2	vstup na flotáciu	1,5	1320	27,5	64,2	259
3	výstup z flotácie	1,6	880	25,7	65,3	235
4	vstup na Variosplit	0,8	280	23,3	65,2	235
5	za bieliacou vežou.	3,6	80	4,5	71,7	98
Vodolátka VL 1		Odber 4		dňa: 5.2.2020		

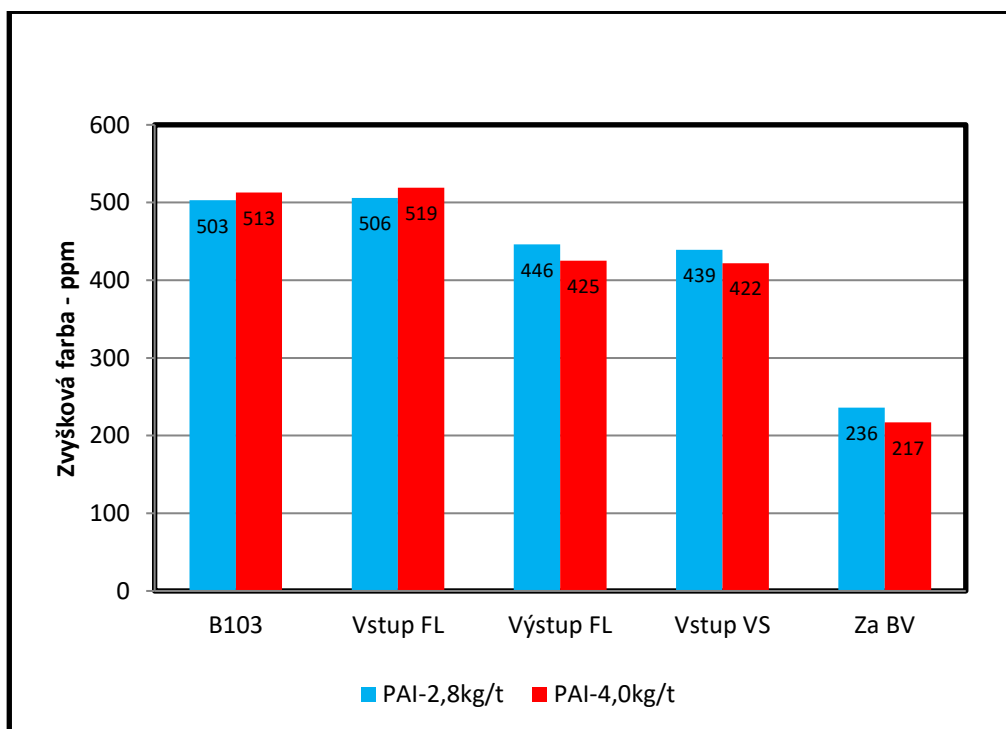
Extra – 10,0 l/hod (1,3 kg/t a.s. vodolátky)						
AS10 – 1,5 l/hod (0,2 kg/t a.s. vodolátky)						
Hyd PAI – 1750 l/hod (4,0 kg/t a.s. vodolátky)						
Č. vz.	Odberové miesto	Konzist. (%)	MS (ks/kg)	Popol (%)	Belosť (%)	Zvyšková farba (ppm)
1	za nádržou B103	3,0	1260	28	64,3	252
2	vstup na flotáciu	1,9	1320	28,6	64,3	265
3	výstup z flotácie	2,0	760	26	65,8	220
4	vstup na Variosplit	0,9	160	2,7	65,7	219
5	za bieliacou vežou.	3,8	20	4,6	73,3	84

Tab. 4: Optimalizácia dávkovania chemikálií v linke prípravy zberového papiera – VL0

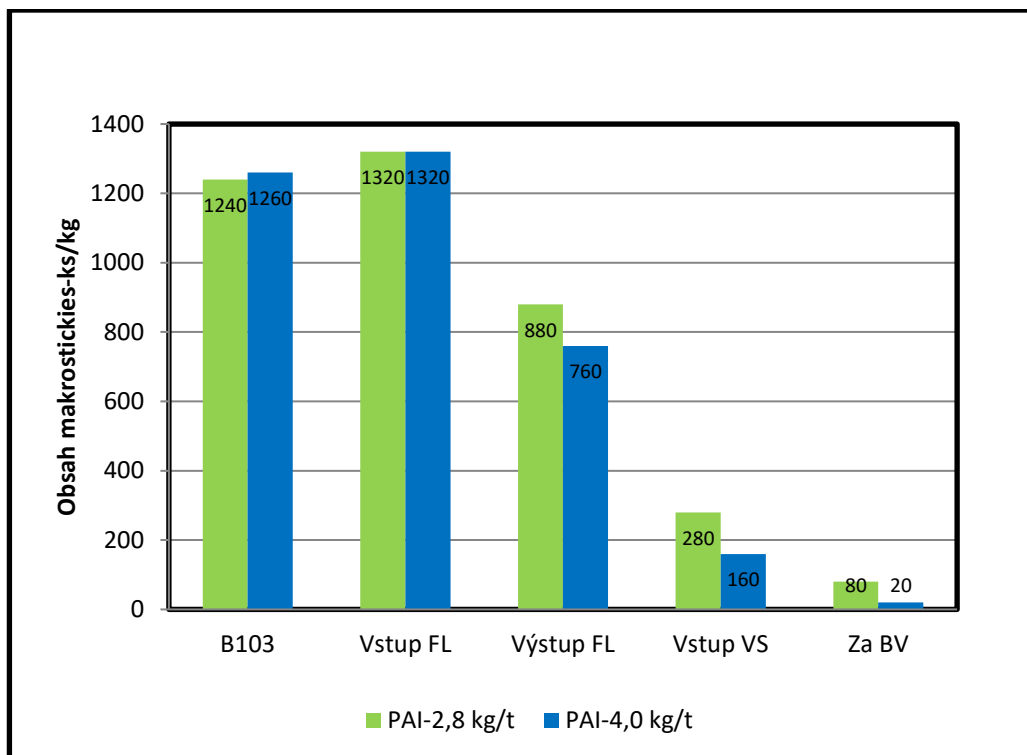
Vodolátka VL 0		Odber 5			dňa: 10.2.2020	
Extra – 15,0 l/hod (2,0 kg/t a.s. vodolátky)						
AS10 – 2,5 l/hod (0,33 kg/t a.s. vodolátky)						
Hyd PAI – 1250 l/hod (2,8 kg/t a.s. vodolátky)						
Č. vz.	Odberové miesto	Konzist. (%)	MS (ks/kg)	Popol (%)	Belosť (%)	Zvyšková farba (ppm)
1	za nádržou B103	3,0	1660	27,6	70,4	151
2	vstup na flotáciu	1,9	1740	27,8	70,5	151
3	výstup z flotácie	2,0	1440	25,5	71,5	139
4	vstup na Variosplit	1,1	360	24,3	71,5	138
5	za bieliacou vežou.	3,6	100	5,2	77,4	52
Vodolátka VL 0		Odber 6			dňa: 10.2.2020	
Extra – 15,0 l/hod (2,0 kg/t a.s. vodolátky)						
AS10 – 2,5 l/hod (0,33 kg/t a.s. vodolátky)						
Hyd PAI – 1750 l/hod (4,0 kg/t a.s. vodolátky)						
Č. vz.	Odberové miesto	Konzist. (%)	MS (ks/kg)	Popol (%)	Belosť (%)	Zvyšková farba (ppm)
1	za nádržou B103	2,9	1680	28,5	70,6	150
2	vstup na flotáciu	1,6	1760	27,6	70,6	151
3	výstup z flotácie	1,7	1380	25,4	72	128
4	vstup na Variosplit	0,9	220	24	72,4	127
5	za bieliacou vežou.	3,6	60	5,2	78,1	45



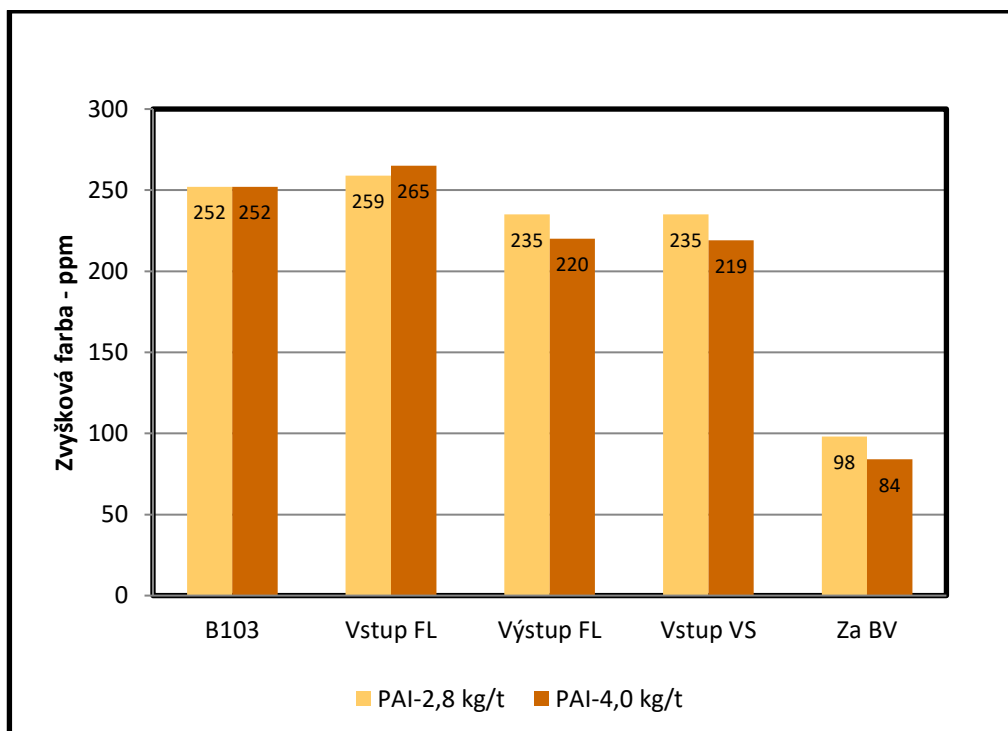
Obr. 2: Vplyv bentonitu na obsah makrostickies - VL5.



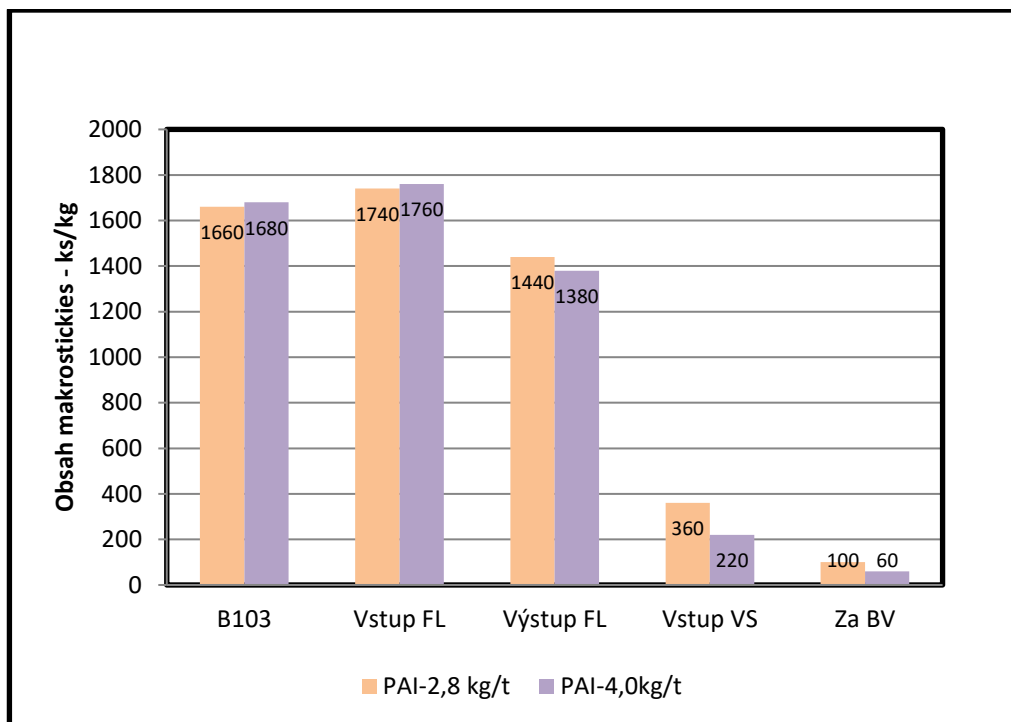
Obr. 3: Vplyv bentonitu na obsah zvyškovej farby - VL5.



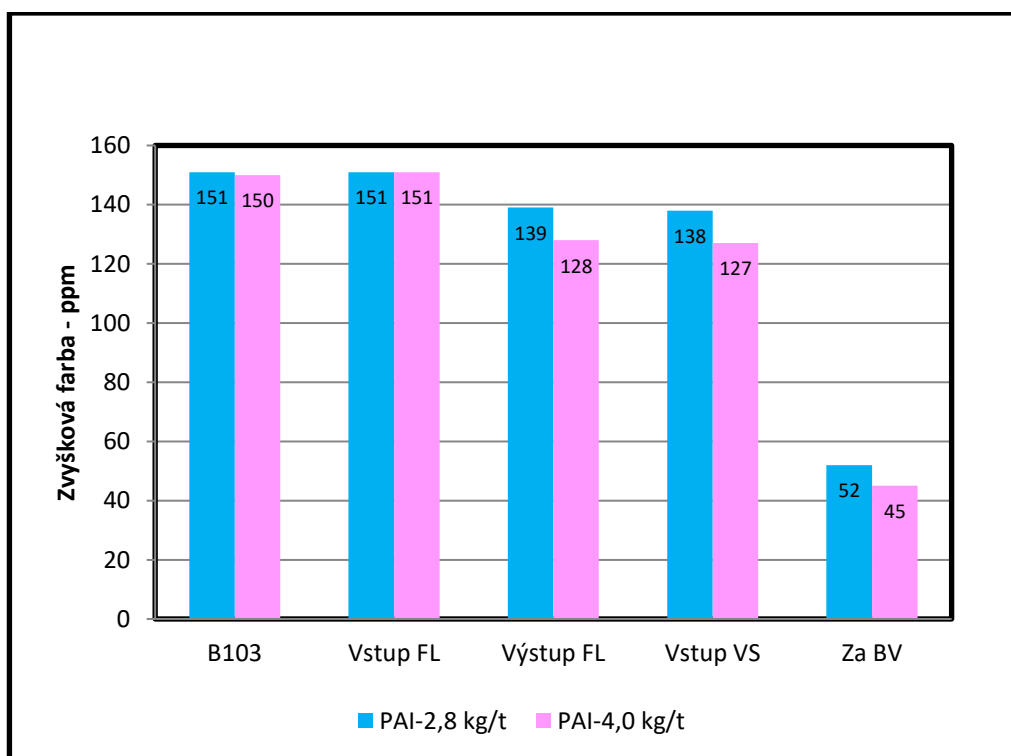
Obr. 4: Vplyv bentonitu na obsah makrostickies –VL1.



Obr. 5: Vplyv bentonitu na obsah zvyškovej farby –VL1.



Obr. 6: Vplyv bentonitu na obsah makrostickies –VL0.



Obr. 7: Vplyv bentonitu na obsah zvyškovej farby –VL0.

Vyhodnotenie

Zvýšením množstva dávky bentonitu Hydrobent PAI z 2,8 kg/t a.s. vodolátky na 4,0 kg/t a.s. vodolátky, došlo k zvýšeniu účinnosti eliminácie makrostickies, ku zvýšeniu belosti vodolátky a k zníženiu obsahu zvyškovej farby a to nasledovne (Tab. 5, Obr. 8-10):

Vodolátka VL5

- obsah makrostickies na výstupe z linky klesol zo 120 ks/kg na 80 ks/kg, čo predstavuje účinnosť linky pri odstraňovaní MS 91 %
- zvýšila sa belosť vodolátky na výstupe z linky z 59,7 % ISO na 60,1 % ISO
- znížil sa obsah zvyškovej farby z 236 ppm na 217 ppm

Vodolátka VL1

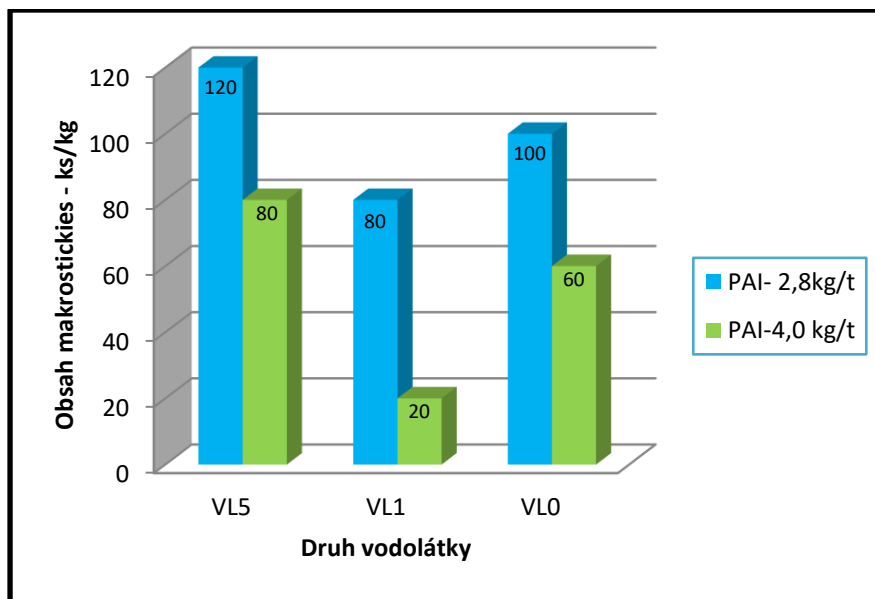
- obsah makrostickies na výstupe z linky klesol z 80 ks/kg na 20 ks/kg, čo predstavuje účinnosť linky pri odstraňovaní MS 98 %
- zvýšila sa belosť vodolátky na výstupe z linky z 71,7 % ISO na 73,3 % ISO
- znížil sa obsah zvyškovej farby z 98 ppm na 84 ppm

Vodolátka VL0

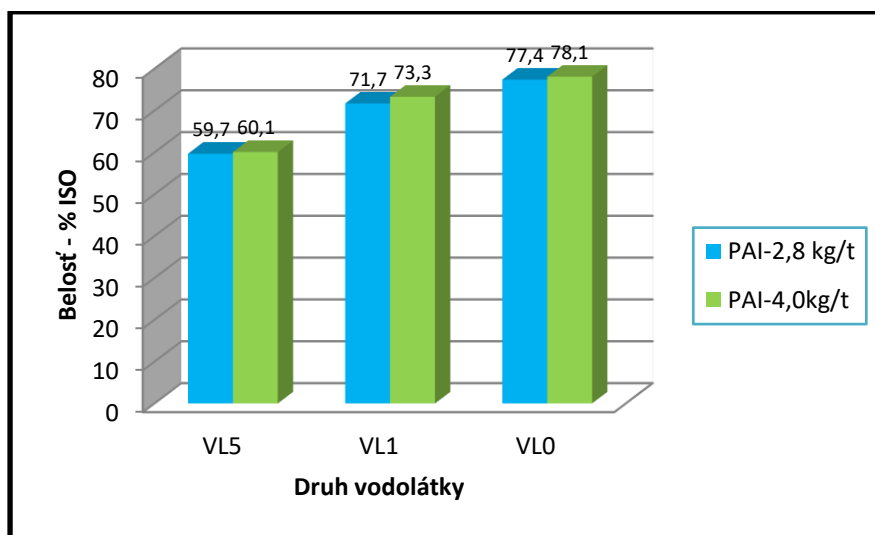
- obsah makrostickies na výstupe z linky klesol zo 100 ks/kg na 60 ks/kg, čo predstavuje účinnosť linky pri odstraňovaní MS 96 %
- zvýšila sa belosť vodolátky na výstupe z linky z 77,4 % ISO na 78,1 % ISO
- znížil sa obsah zvyškovej farby z 52 ppm na 45 ppm

Tab. 5: Vplyv bentonitu na kvalitu vodolátky na výstupe zo ZL.

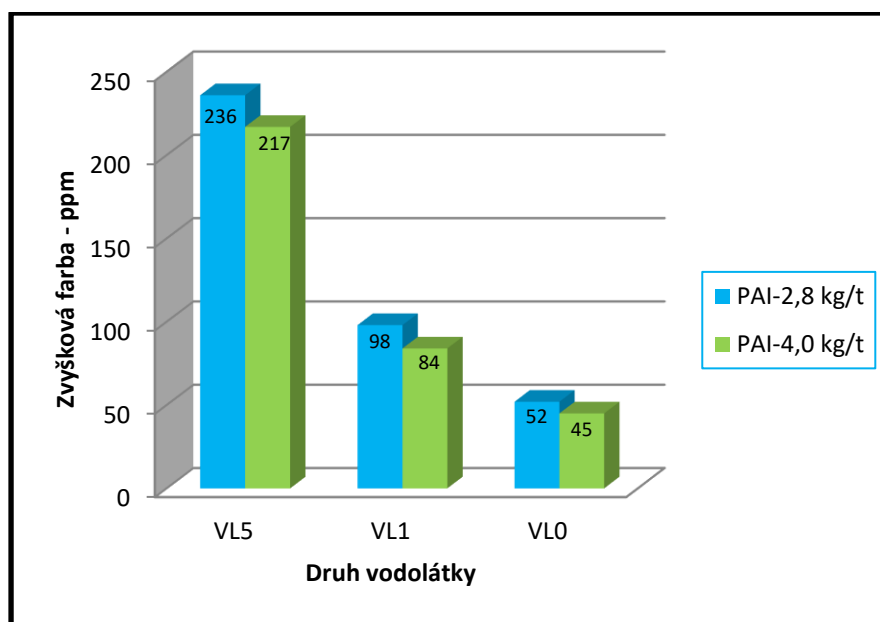
Dávka bentonitu	Vstup na ZL			Výstup zo ZL		
	MS (ks/kg)	Belosť (% ISO)	Zvyš. farba (ppm)	MS (ks/kg)	Belosť (% ISO)	Zvyš. farba (ppm)
VL5 – 2,8 kg/t PAI	880	53,8	503	120	59,7	236
VL5 – 4,0 kg/t PAI	890	53,6	513	80	60,1	217
VL1 – 2,8 kg/t PAI	1240	64,3	252	80	71,7	98
VL1 – 4,0 kg/t PAI	1260	64,3	252	20	73,3	84
VL0 – 2,8 kg/t PAI	1660	70,4	151	100	77,4	52
VL0 – 4,0 kg/t PAI	1680	70,6	150	60	78,7	45



Obr. 8: Vplyv bentonitu na obsah makrostickies na výstupe zo ZL.



Obr. 9: Vplyv bentonitu na belosť vodolátky na výstupe zo ZL.



Obr. 10: Vplyv bentonitu na obsah zvyškovej farby na výstupe zo ZL.

Záver

Na základe vykonaných analýz a dosiahnutých výsledkov bolo navrhnuté riešenie zvýšiť dávku bentonitu Hydrobent PAI, dávkovaného pred flotáciu, z 2,8 kg/t na 4,0 kg/t a.s. vodolátky. Realizáciou navrhnutého opatrenia sa zvýši účinnosť linky prípravy zberového papiera pri odstraňovaní makrostiek, zvýši sa belosť a zníži sa obsah nečistôt vyjadrených ako zvyšková farba. Zároveň bolo navrhnuté ďalej analyzovať vodolátky vo vybraných technologických uzloch, aby sa potvrdila účinnosť vyššej dávky bentonitu.

PodĎakovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Integrovaná infraštruktúra 2014 - 2020 pre projekt: Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu LignoSilva (kód ITMS: 313011S735), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

Použitá literatúra

1. Doshi, M.R., Blanco, A., Dorris, G.M., Hamann, A., Haynes, D., Houtman, C., Putz, H.-J., Johansson, H., Venditti, R.A., 2003: Comparison of microstickies measurement methods part 1: sample preparation and measurement methods, Progress in Paper Recycling 12(4): 35-42.
2. Doshi, M.R., Dyer, J.M., 2000: Review of quantification methods for PSA and other stickies. TAPPI Recycling symposium 2: 701-712.
3. Gribble, C., Matthews, P., Gantenbein, D., Turner, A., Schoelkopf, J., Gane, P., 2010: Adsorption of surfactant-rich stickies onto mineral surfaces, Journal of Colloid and Interface Science 352: 483-490.

4. Holik, H., 2000: Unit operations and equipment in recycled fiber processing, in Recycled Fiber and Deinking, L. Götsching, Pakarinen, H., Fapet Oy: Helsinki, Finland Pp 91-201.
5. Hubbe, M.A., 2000: Stickies, pitch, and secondary fiber - A chemist's view, in opportunities in wet-end chemistry: Feature Essay. <http://www4.ncsu.edu/~hubbe/new>.
6. Jansson, A.C. 2009: Carbon dioxide based applications for optimization of calcium carbonate containing papermaking process. In TAPPI Paper Conference. St.Louis, MO.
7. Kuňa, V., Balberčák, J., Opálená, E., Pažitný, A., Russ, A., Schwartz J., 2016: The effect of multi-component retention systems on the properties of the paper suspensions, Wood Research 61(5): 767-776.
8. Laurila-Lumme, A., Pakarinen, H., Leino, H.J., 2003: Process for substantially retarding dissolution of calcium carbonate in a papermaking system, U.S. Pat. No. 6,540,870.
9. Monte, M., Blanco, A., Negro, C., Tijero, J., 2004: Development of a methodology to predict sticky deposits due to the destabilization of dissolved and colloidal material in papermaking - application to different systems, Chemical Engineering Journal 105: 21-29.
10. Monte, M., MacNeil, D., Negro, C., Blanco, A., 2010: Interaction of dissolved and colloidal material during the mixing of different pulps. Holzforschung 64: 277-283.
11. Monte, M.C., Sanchez, M., Blanco, A., Negro, C., Tijero, J., 2012: Improving deposition tester to study adherent deposits in papermaking. Chemical Engineering Research and Design 90: 1491-1499.
12. Putz, J., 2000: Stickies in recycled fiber pulp. In: Recycled fiber and deinking, L. Götsching, Pakarinen, H., Editor, Fapet Oy: Helsinki, Finland, pp 441-498.
13. Sarja, T., 2007: Measurements, nature and removal of stickies from deinked pulp, Faculty of Technology of the University of Oulu: Oulu, Finland, 82 pp.

Enzymatická hydrolýza bele topoľového dreva predspracovaného zmrazovaním: vplyv trvania enzymatickej hydrolýzy a času zmrazovania

*Štefan Boháček, Vladimír Ihnát, Jozefína Gallová, Andrej Pažitný, Albert Russ

Výskumný ústav papiera a celulózy, Bratislava

bohacek@vupc.sk

Abstrakt

Predmetný článok sa zaoberá vplyvom dĺžky trvania enzymatickej hydrolýzy a času zmrazovania na celkový výťažok monosacharidov z bele topoľového dreva predupravovaného zmrazovaním pri -20°C . Experimentálne porovnanie sa uskutočnilo na frakcii pilín do 0,7 mm nasýtených vodou, nasýtených vodou so 6% zanáškou NaOH a pilín nasýtených vodou so zanáškou 2% Na_2CO_3 a 8% NaOH. Výťažok glukózy a xylózy ako aj množstvo kyseliny octovej boli sledované pri 6, 24, 48, 72 a 96 hod trvania enzymatickej hydrolýzy pri 15% zanáške enzýmu na celkový vstupný obsah celulózy. Vplyv doby trvania zmrazovania bol určený pre štyri zvolené časy (1,5, 3, 24 a 48 hod) pre efektívny čas 48 hod enzymatickej hydrolýzy. Maximálny výťažok glukózy ($45,3 \text{ g.l}^{-1}$) a xylózy ($23,4 \text{ g.l}^{-1}$) bol zistený pri 6% zanáške NaOH s 96 hod enzymatickou hydrolýzou, pričom sa preukázalo, že predlžovanie doby zmrazovania po úplnom vytvorení kryštálov ľadu nemá ďalší vplyv na zvyšovanie výťažku monosacharidov, t.j. nezvyšuje enzymatickú prístupnosť holocelulózy.

Kľúčové slová: Predspracovanie, zmrazovanie, *Populus alba*, monosacharidy, frakcia dreva.

Úvod

Z celosvetovo publikovaných experimentálnych prác je evidentné, že fáza predúpravy pred enzymatickou hydrolýzou pre získavanie II. generácie chemických produktov z lignocelulóзовých zdrojov sa začína segmentovať v dvoch polohách. V prvej polohe sa jedná o výber substrátu, a to buď ľahšie spracovateľného akým je bylinná slama alebo ťažšie spracovateľného a tým je drevná hmota. Druhá poloha je záležitosť účinnosti rôznych metód predspracovania.

Výskumný ústav papiera a celulózy v Bratislave venuje problematike náležitú pozornosť už od roku 2016 výskumom progresívnych metód predspracovania akými sú parná explózia (Russ et al. 2016) alebo parná extrúzia (Gigac et al. 2017a,b) alebo ich vzájomnému porovnávaniu (Pažitný et al. 2019c). Na výskum predspracovania pšeničnej slamy (Brezániová et al. 2016) nadväzuje Pažitný et al. (2019a) svojim výskumom v oblasti spracovania drevnej substancie. V práci Pažitný et al. (2019b) boli hodnotené rozdiely v enzymatickej akcesibilite rozličných druhov lignocelulóзовých materiálov. Práce po roku 2020 sú už venované výlučne drevnému substrátu. V práci Pažitný et al. (2020) sa autori venujú rozdielom v beľovej a jadrovej časti dreviny *Populus alba* s porovnaním jednoročného výmladku toho istého druhu.

Cieľom tohto článku je predstaviť nepublikované výsledky ďalšej metódy pedspracovania dendromasy/biomasy a tou je kryolýza. Malé kryštály ľadu na mikro a nano úrovni sa tvoria v lúmenoch vodou dokonale naimpregnovanej biomasy a zväčšovaním objemu pri zmene skupenstva a ostrými hranami rastúcich kryštálikov zároveň spôsobujú deštrukciu v substráte (Boháček et al. 2020). Ciele súčasného výskumu sú zamerané na vplyv kinetiky procesu zmrazovania na efektívnosť následných procesov hydrolýzy celulózy a hemicelulóz, ale ucelená teória stále chýba. Väčšina publikovaných prác ako použitý substrát uvádza slamu poľnohospodárskych plodín: ryžovú slamu (Chang et al. 2011, Deng et al. 2018), pšeničnú slamu (Wang et al. 2013), jačmennú slamu (Rooni et al. 2017) alebo kukuričné kôrovie a stonky (Echeverria et al. 2018, Yuan et al. 2019, Li et al. 2019a). Ďalším substrátom, v podstate v tej istej kategórii, sú trávy, ktoré autori podrobili zmrazovaniu, a to switchgrass (*Panicum virgatum*) (Yang et al. 2009) alebo sitina (*Juncus maritimus*) (Smichi et al. 2016). V aplikačnej časti výskumu VÚPC boli podané dve patentové prihlášky. Boháček et al. (2014) opísal metódu pedspracovania opakovaným zmrazovaním a rozmrazovaním a kontrolovaným zmrazovaním kombinovaným s mechanickým pedspracovaním Pažitný et al. (2016) za účelom otvorenia kryštalickej štruktúry celulózy a zväčšenia mernej povrchovej plochy vybraných druhov lignocelulózových materiálov pre sprístupnenie hydrolytickými enzýmami. Pre kompaktnjšiu drevnú hmotu mnohí autori kombinujú zmrazovanie s anorganickými rozpúšťadlami. Jeong et al. (2016) študoval efekt zmrazovania na mongolský dub (*Quercus mongolica*), ktorý bol upravený 1% H₂SO₄, Li et al. (2019b) skúmal predúpravu kombinovaného zmrazovania a rozmrazovania (-20°C and 20°C) s prídavkom amoniaku (NH₃) a Su and Fang (2017) použili prídavok NaOH.

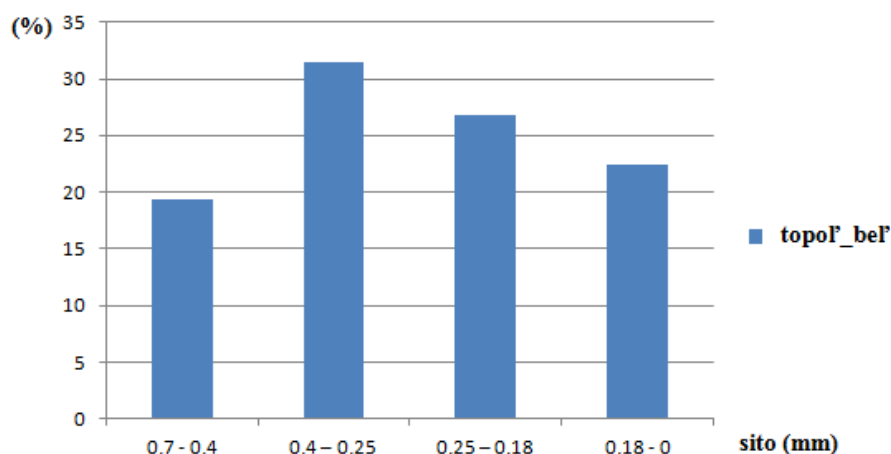
V predkladanom experimente sme jednostupňové zmrazovanie kombinovali so 6% prídavkom NaOH na objem obsiahnutej vody a porovnávali so vzorkou nasýtenou tým istým objemom vody bez hydroxidu. Pri ďalšej vzorke sme významnú časť silného rozpúšťadla nahradili Na₂CO₃, čo je proces šetrnejší k drevnej hmote (Balberčák et al. 2018).

1. Závislosť výťažkov monosacharidov od času trvania enzymatickej hydrolýzy

Na experimentálne vyšetovanie závislosti výťažkov monosacharidov od času trvania enzymatickej hydrolýzy bola použitá drevina topoľ z lokality Bratislava. Výrez z 12 ročného dreva mal farebne výrazne odlišenú bel' od jadra. Vzorka bola získaná v mesiaci november. Výrez bol spracovaný na hobliny hrúbky do 0,3 mm. Hobliny boli prirodzene sušené pri bežnej laboratórnej teplote 20°C viac ako dva mesiace. Hobliny boli mleté na nožovom mlyne Brabender so spodným sitom 0.7 mm. Celkovo sme získali okolo 250 g svetlej frakcie 0.7 mm bele topoľa (*Populus Alba*). Sitovými testami bola definovaná jej frakcia na vzorke 50 g (Tab.1, Obr. 1).

Tab. 1: Sitové testy topoľového dreva (bel') mletého na nožovom mlyne so spodným sitom 0,7 mm.

sito (mm)	0,7 - 0,4	0,4 - 0,25	0,25 - 0,18	0,18 - 0	spolu
topoľ- bel'	9,7 g	15,7 g	13,4 g	11,2 g	50,0 g



Obr. 1: Frakčné zloženie pilín topoľového dreva (percentuálne zastúpenie).

Na sušinových váhach Denver IR 35 bola stanovená sušina vzorky 94,2%. Na kvantifikáciu jednotlivých zložiek dreva - lignín, celková holocelulóza a celulóza (Tab. 2) boli použité bežné analytické metódy. Klasonov lignín bol stanovený metódou podľa T 222 om-98, lignín rozpustný v kyseline podľa Tappi UM 250. Wiseho metóda sa použila na stanovenie holocelulózy a ISO 692 na stanovenie celulózy. Pritom holocelulóza zahŕňa vo vode nerozpustné vlákna, ktoré sú chemicky tvorené z celulózy hydrolyzovateľnej na glukózu a hemicelulóz hydrolyzovateľných na rôzne hexózy a pentózy.

Tab. 2: Chemické zloženie topoľového dreva (bel').

	Holocelulóza	Celulóza	Lignín
		(%)	
topoľ- bel'	75,3	49,9	21,5

Pre experimentálne porovnanie bolo zvolené zmrazovanie pilín nasýtených iba vodou, pilín nasýtených vodou so zanáškou NaOH a pilín nasýtených vodou so zanáškou Na₂CO₃ a NaOH:

- 12,5 g a.s. pilín + 86,7 ml H₂O
- 12,5 g a.s. pilín + 6% zanáška NaOH
- 12,5 g a.s. pilín + 2% zanáška NaOH + 8% zanáška Na₂CO₃

Impregnácia vzorky sa uskutočnila vodou, pričom cieľom bolo dosiahnuť minimálne nasýtený stav buniek pred zmrazovaním. Vzorky boli máčané v neupravenej vode o izbovej teplote v množstve, ktoré sa zistilo tak, že vzorka už nebola schopná postupne pridávanú vodu absorbovať ani v priebehu dostatočne dlhého časového intervalu. Nadbytočná voda zostala do vzorky viditeľne nevsiaknutá. Vzorky boli pripravené v uzavretých PET sáčikoch a vložené do Shaker-inkubátora na **24 hod** pri teplote **60°C**. Následne boli vzorky vybraté a voľne uložené na laboratórnom stole, aby sa teplota ustálila a následne boli vložené na 24 hod do chladničky s teplotou 2°C. Vzorky boli premiestnené do mraziaceho boxu s teplotou -20°C na 48 hod. Vzorky boli vybraté a nechali sa pri bežnej izbovej teplote rozmraziť po dobu 24 hod.

Na **enzymatickú hydrolýzu** sa použil Cellic CTec2 od spoločnosti Novozymes A/S (Bagsværd, Denmark) priamo určený na degradáciu lignocelulózových materiálov na fermentovateľné monosacharidy. Aktivita enzýmu bola laboratórne stanovená na 1.700 BHU/g. Zanáška enzýmu predstavovala 15%. Vzorky boli uložené v plastových uzavretých bankách a vložené do inkubátora s vyhrievaním na 50°C a otáčkami 150 min⁻¹. Odoberanie vzoriek sa uskutočnilo po 6 hod, 24 hod, 48 hod, 72 hod, 96 hod.

Koncentrácia monosacharidov a inhibítorov bola stanovená pomocou procedúry National Renewable Energy Laboratory (Sluiter et al. 2008). Monosacharidy (glukóza, xylóza) a inhibítor (kyselina octová) boli stanovené použitím metódy HPLC (High performance liquid chromatography) s kolónou Rezex ROA (organic acid) H⁺ column. Mobilná fáza predstavovala 0.005 N, prietok kyseliny sírovej 0.5 ml/min pri teplote do 30°C. Chromatografické dáta boli spracované softvérom Clarity version 5.3.0.180 (DataApex Ltd., Česká republika).

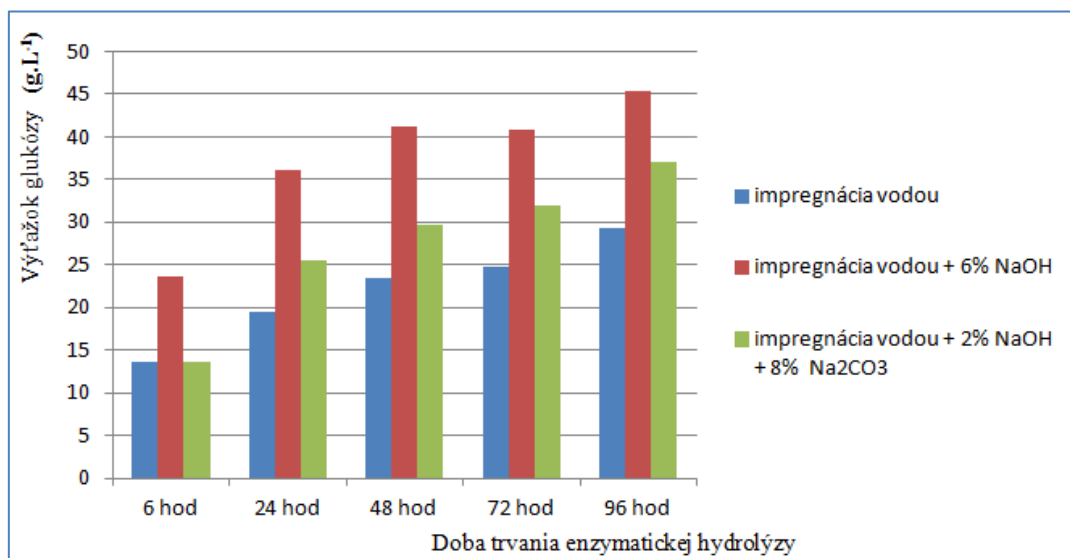
Namerané hodnoty

Výťažky glukózy a xylózy a obsah vznikajúceho inhibítora (kyseliny octovej) zistené metódou HPLC sú uvedené v Tab. 3. V poslednej časti tabuľky sú uvedené hodnoty namerané autormi Pažitný et al. (2020) pri predspracovaní tej istej suroviny parnou explóziou pri 205°C.

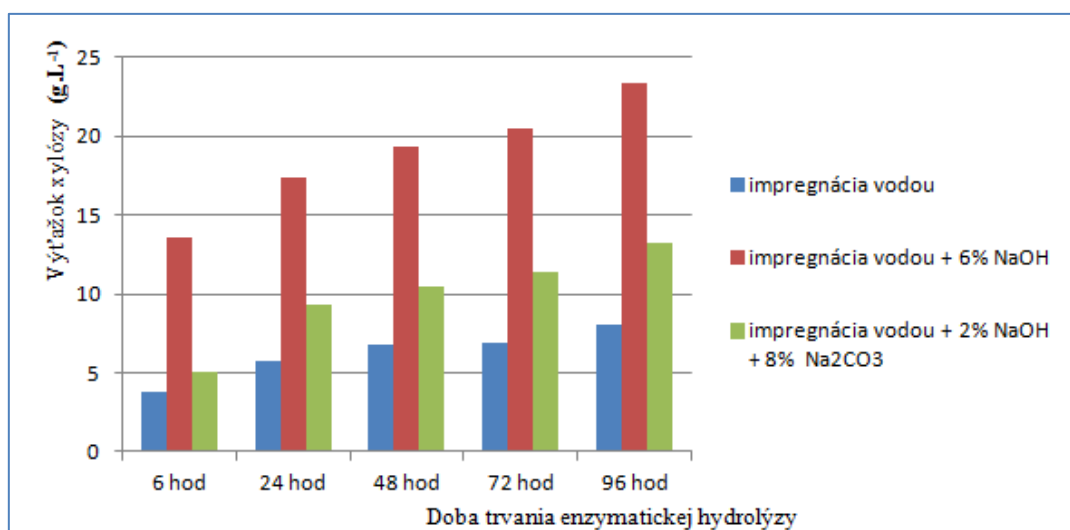
Tab. 3: Výťažky monosacharidov a obsah inhibítora z hydrolyzátov topoľových pilín (beľ frakcie do 0,7 mm) predúpravených kombinovaním zmrazovania pri teplote -20°C po dobu 48 hod a zanášky 6% NaOH alebo 2% NaOH + 8% Na₂CO₃. Porovnanie s parnou explóziou pri 205 °C.

Vzorka	čas hydrolýzy	6 hod	24 hod	48 hod	72 hod	96 hod
	----- výťažok	(g l ⁻¹)	(g l ⁻¹)	(g l ⁻¹)	(g l ⁻¹)	(g l ⁻¹)
Impregnácia vodou	glukóza	13,7	19,5	23,4	24,8	29,2
	xylóza	3,8	5,8	6,7	6,9	8,0
	monosacharidy spolu	17,5	25,3	30,1	31,7	37,2
	kyselina octová	0,4	0,6	0,7	0,8	0,88
Impregnácia vodou + 6% NaOH	glukóza	23,6	36,0	41,1	40,8	45,3
	xylóza	13,6	17,4	19,3	20,5	23,4
	monosacharidy spolu	37,2	53,4	60,4	61,3	68,7
	kyselina octová	6,9	7,2	6,9	8,0	9,9
Impregnácia vodou + 2% NaOH + 8% Na ₂ CO ₃	glukóza	13,7	25,6	29,7	32,0	37,0
	xylóza	5,1	9,3	10,5	11,4	13,2
	monosacharidy spolu	18,8	34,9	40,2	43,4	50,2
	kyselina octová	4,6	6,1	5,9	5,9	6,5
Parná explózia 205°C (Pažitný et al. 2020)	glukóza	-	65,2	65,7	63,9	-
	xylóza	-	17,2	17,6	18,1	-
	ost. monosacharidy		2,2	1,6	1,6	
	monosacharidy spolu	-	84,6	84,9	83,6	-
	kyselina octová	maximálne 1,7 g/l				

Najvyššia koncentrácia monosacharidov (glukóza $45,3 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$, xylóza $23,4 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$) bola dosiahnutá pri použití 6% NaOH pri 96 hod enzymatickej hydrolýze. Výťažok glukózy (Obr. 2), ale hlavne xylózy (Obr. 3), v tomto prípade významne prevyšuje ich ekvivalenty v porovnaní s len vodou impregnovanou vzorkou ($29,2 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$ a $8,0 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$). Substitúcia NaOH za Na_2CO_3 z dôvodu šetrnejšieho prístupu k drevnej hmote (Balberčák et al. 2018) v tomto prípade nebola dostatočne účinná aj keď v porovnaní s len vodou impregnovanou vzorkou sú výťažky podstatne vyššie. V Tab. 3 je zelenou farbou vyznačená enzymatická hydrolýza 48 hod, ako optimálny čas vzhľadom na ďalší zanedbateľný výťažok monosacharidov.

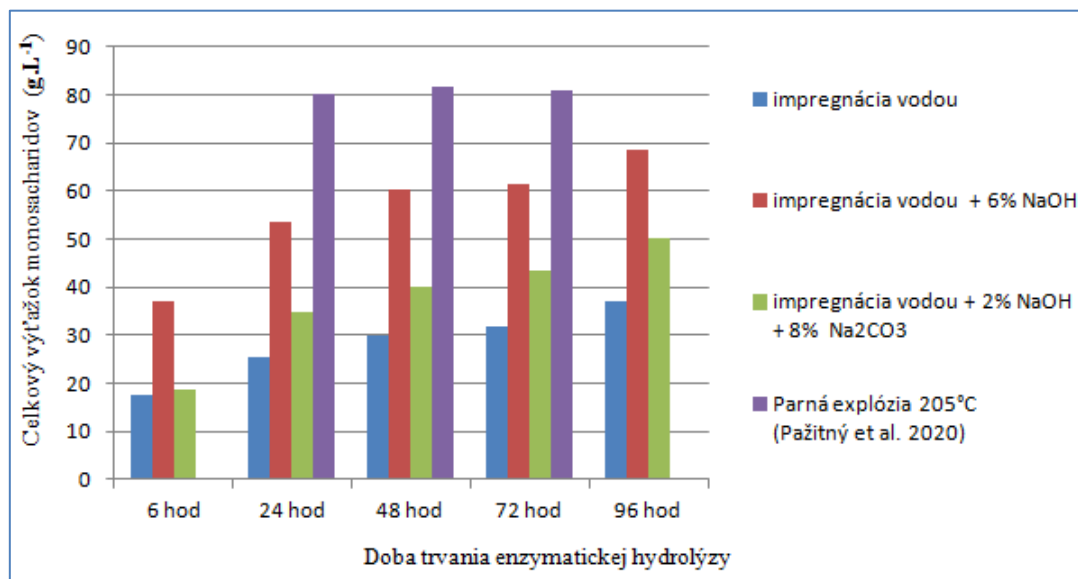


Obr. 2: Vplyv trvania enzymatickej hydrolýzy na výťažok glukózy z topoľových pilín (beľ frakcie do 0,7 mm) predúpravených kombinovaním zmrazovania pri teplote -20°C po dobu 48 hod a zanášky 6% NaOH alebo 2% NaOH + 8% Na_2CO_3 .

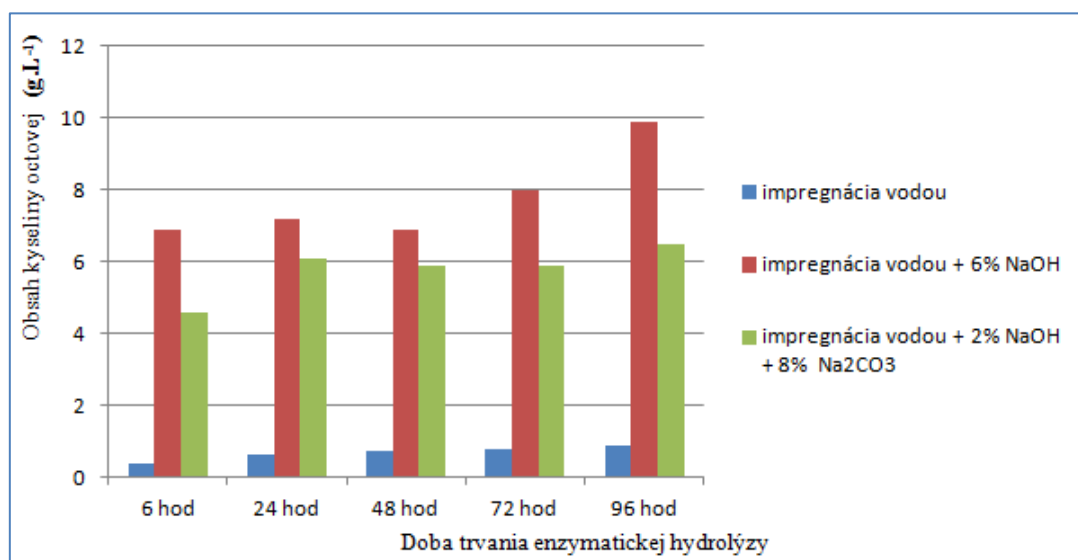


Obr. 3: Vplyv trvania enzymatickej hydrolýzy na výťažok xylózy z topoľových pilín (beľ frakcie do 0,7 mm) predúpravených kombinovaním zmrazovania pri teplote -20°C po dobu 48 hod a zanášky 6% NaOH alebo 2% NaOH + 8% Na_2CO_3 .

Porovnanie celkových výťažkov monosacharidov vzhľadom na výsledky dosiahnuté pri parnej explózii (Pažitný et al. 2020) je znázornené na Obr. 4. Dosiahnuté hodnoty pri optimalizovanej 48 hod enzymatickej hydrolýze predstavujú 73% z hodnôt dosiahnutých pri parnej explózii pri 205°C.



Obr. 4: Celkové výťažky monosacharidov v hydrolyzátoch z topoľových pilín (beľ frakcie do 0,7 mm) predúpravených kombinovaním zmrazovania pri teplote -20°C po dobu 48 hod a zanášky 6% NaOH alebo 2% NaOH + 8% Na₂CO₃ v porovnaní s účinnosťou parnej explózie pri 205°C.



Obr. 5: Vplyv trvania enzymatickej hydrolýzy na tvorbu kyseliny octovej v hydrolyzátoch z topoľových pilín (beľ frakcie do 0,7 mm) predúpravených kombinovaním zmrazovania pri teplote -20°C po dobu 48 hod a zanášky 6% NaOH alebo 2% NaOH + 8% Na₂CO₃.

Na obr. 5 je znázornený vývoj kyseliny octovej ako hlavného inhibítora enzymatickej hydrolýzy. Jednoduché zmrazovanie vzorky impregnovanej iba vodou nemá výraznejší vplyv na tvorbu kyseliny octovej (0,4 – 0,88 g.l⁻¹). Jej tvorbu ovplyvňuje veľkosť prídavku NaOH. Substitúcia NaOH za Na₂CO₃ túto skutočnosť mierne zjemňuje.

2. Vplyv doby zmrazovania na celkový výťažok monosacharidov

V ďalšom kroku bol sledovaný vplyv doby zmrazovania na celkový výťažok monosacharidov pri 48 hod enzymatickej hydrolýze, ktorá bola vyhodnotená ako časovo efektívne výhodná doba vzhľadom na ďalší málo významný prírastok vo výťažku spojený s jej predlžovaním. Experiment sa uskutočnil za totožných podmienok pre zanášky:

- 12,5 g a.s. pilín + 6% zanáška NaOH
- 12,5 g a.s. pilín + 2% zanáška NaOH + 8% zanáška Na₂CO₃

Nezmenené zostali 24 hod impregnácia vzoriek, 24 hod chladenie, pričom sa menila iba doba zmrazovania: 1,5 hod, 3 hod, 24 hod. Enzymatická hydrolýza trvala spomínaných 48 hod.

Namerané hodnoty

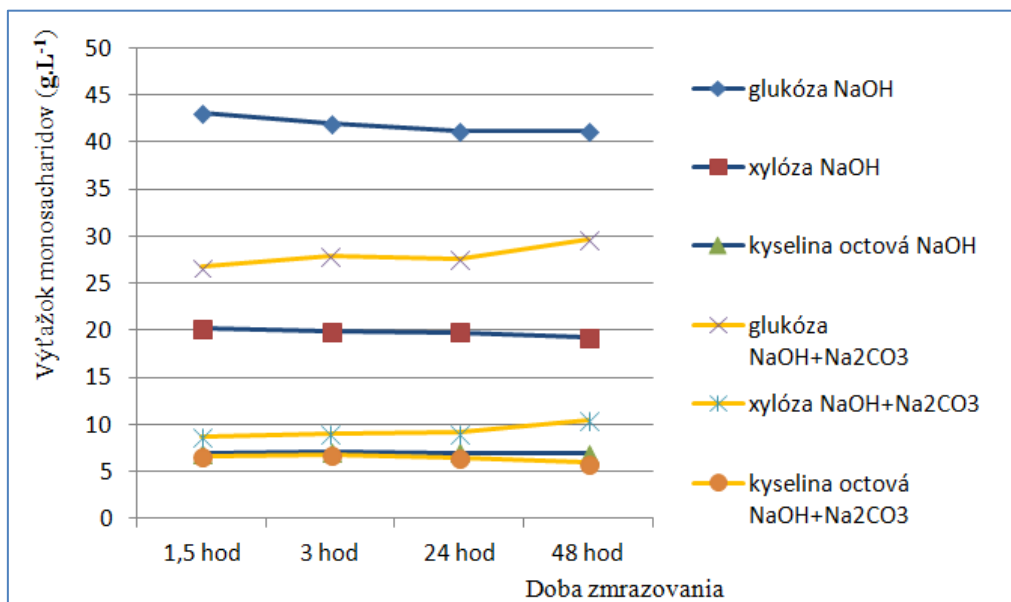
Výťažky glukózy a xylózy ako aj obsah vznikajúcej kyseliny octovej pri kombinovanom zmrazovaní v závislosti od dĺžky zmrazovania je znázornený v Tab. 4.

Tab. 4: Výťažky monosacharidov a obsah inhibítora z hydrolyzátoz topoľových pilín (beľ frakcie do 0,7 mm) predúpravených kombinovaním zmrazovania pri teplote -20°C po dobu 48 hod a zanášky 6% NaOH alebo 2% NaOH + 8% Na₂CO₃ počas rôznych dôb trvania zmrazovania.

Vzorka	do ba zmrazovania	1,5 hod	3 hod	24 hod	48 hod
	----- výťažok	(g.l ⁻¹)	(g.l ⁻¹)	(g.l ⁻¹)	(g.l ⁻¹)
Impregnácia vodou + 6% NaOH	glukóza	43,1	42,0	41,2	41,1
	xylóza	20,2	19,9	19,8	19,3
	monosacharidy spolu	63,3	61,9	61,0	60,4
	kyselina octová	6,9	7,0	6,9	6,9
Impregnácia vodou + 2% NaOH + 8% Na ₂ CO ₃	glukóza	26,7	27,9	27,6	29,7
	xylóza	8,7	9,0	9,1	10,5
	monosacharidy spolu	35,4	36,9	36,7	40,2
	kyselina octová	6,6	6,8	6,4	5,9

Z grafického znázornenia vyplýva, že predlžovanie doby zmrazovania pri tej istej teplote (-20°C) neprináša žiadany efekt. Z vedeckého hľadiska zaujímavý je fakt, že krivka vývoja výťažkov pre zanášku s NaOH má mierne degresívny a pre zanášku s Na₂CO₃ mierne progresívny charakter. Deštruktívny účinok je preto možné predpokladať iba pri tvorbe kryštálikov ľadu, čo nastáva pri 0°C až -5°C. Po následnom znížení teploty by sa mali vytvárať kryštálky ľadu v lúmenoch buniek biomasy smerom dovnútra častíc pričom súčasne

dochádza ku zväčšeniu objemu pri fázovej premene vody na ľad v lúmenoch buniek, čo spôsobuje narušenie kryštalickej štruktúry celulózy a zvyšuje jej prístupnosť v následných procesoch hydrolýzy. Tvorba kyseliny octovej pri zanáške NaOH je v podstate konštantná ($6,9 - 7,0 \text{ g l}^{-1}$), rozsah pri zanáške Na_2CO_3 je minimálny ($6,6 - 5,9 \text{ g l}^{-1}$) (Obr. 6).



Obr. 6: Vplyv dĺžky zmrazovania (-20°C) na výťažok monosacharidov v hydrolyzátoch z topoľových pilín (beľ frakcie do $0,7 \text{ mm}$) pri kombinovanej predúprave.

Počas procesu mrazenia je nižšia povrchová teplota v porovnaní s vnútornou časťou lignocelulózy (Chang et al. 2011). Keď teplota pri zmrazovaní klesá, objem voľnej vody v póroch sa rozširuje a molekula vody musí prekonať viskóznú odolnosť a výsledné tlakové gradienty vody majú výrazne poškodiť lignocelulóзовú štruktúru (Chang et al. 2011). K adsorpcii molekuly vody dochádza iba v amorfnej oblasti celulózy, kde viazaná voda vytvára vodíkové väzby s hydroxylovými skupinami. Vnútorný objem lignocelulóзовej štruktúry sa zvýši v dôsledku zníženia súdržnosti, tuhé látky zmäknú a dôjde k napučaniu. Deštrukcia lignocelulóзовej štruktúry nastáva v dôsledku expanzie objemu vody počas zmrazovania (Boháček et al. 2020).

Záver

Podľa súčasných poznatkov kryolýza dendromasy/biomasy predstavuje metódu predspracovania, ktorá pre praktické uplatnenie potrebuje, aby substrát bol okrem vody impregnovaný aj malým prídavkom chemikálií, aby sa prejavil účinok expanzie kryštálikov ľadu. Alkalické rozpúšťadlá v kombinácii s teplotou nízkou pod bodom mrazu predstavujú vhodnú voľbu. Experimentálne vyšetrenie preukázalo celkové výťažky monosacharidov v rozsahu $60,4$ až $68,70 \text{ g l}^{-1}$ pri použití 6% zanášky NaOH a v rozsahu $40,2$ až $50,2 \text{ g l}^{-1}$ pri čiastočnej substitúcii NaOH za Na_2CO_3 . Pre lepšiu predstavu výťažky iba vodou predimpregnovaného substrátu (prekročený bod nasýtenia vlákien, 60°C , 24 hod) sa pohybujú v rozsahu $30,1$ až $37,2 \text{ g l}^{-1}$ a momentálne najprogresívnejšia metóda predúpravy – parná

explózia poskytuje výťažky cez 80 g·l⁻¹. Experimentom bolo potvrdené, že výťažky monosacharidov nie sú ovplyvnené narastajúcou dĺžkou zmrazovania, dôležité je prekročiť časový interval, kedy už dôjde k úplnej tvorbe kryštálov ľadu, ktoré substrát sprístupňujú enzýmom.

PodĎakovanie

„Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV–18–0533.“

Použitá literatúra

1. Balbercak, J., Bohacek, S., Pazitny, A., Ihnat, V., Lubke, H., 2018: Chemical processing of waste wood based agglomerates part II: Evaluation of properties of fluting liners made of semichemical pulp obtained by an alkaline cooking process. *Wood Research* 63(1): 35-44.
2. Boháček, Š., Balberčák, J., Schwartz, J., Pažitný, A., Bombilajová, K., Kuňa, V., 2020: Predspracovanie biomasy kryolýzou. In: Zborník výskumných prác. Január 2020. Centrum pre rozvoj drevárskeho, nábytkárskeho a celulózo-papierenského priemyslu. Bratislava. Str. 15-21. Dostupné online: www.centrumdp.sk.
3. Boháček, S., Fišerová, M., Gigac, J., Pažitný, A., Russ, A., Letko, M., Mikulášik, R., Ihnat, V., 2014: "Metóda zvýšenia prístupnosti lignocelulóзовých materiálov voči hydrolytickým enzýmom počas výroby biopalív ". Výskumný ústav papiera a celulózy a.s., Bratislava. PA 50076-2014 (IPO SR, 12.12.2014).
4. Brezániová, Z., Fišerová, M., Stankovská, M., Gigac, J., Opálená, E., Puškelová, J., 2016: Effect of prehydrolysis on enzymatic hydrolysis of two-stage pretreated wheat straw. *Wood Research* 61(5): 697-708.
5. Deng, Y., Qiu, L., Yao, Y., Qin, M., 2018: A technology for strongly improving methane production from rice straw: freeze–thaw pretreatment. *RSC Adv.* (8): 22643-22651.
6. Echeverria, C., Bazan, G., Gonzalez, J.S., Lescano, L., Pagador, S., Linares, G., 2018: Pre-treatment by Acidification and Freezing on Corn cob Polymers and its Enzymatic Hydrolysis. *Asian Journal of Scientific* 11 (2): 222-231.
7. Gigac, J., Fišerová, M., Stankovská, M., Pažitný, A., 2017a: Enzymatic hydrolysis of extruded wheat straw with addition of sodium hydroxide and calcium hydroxide. *Wood Research* 62(6): 919-930.
8. Gigac, J., Fišerová, M., Stankovská, M., Pažitný, A., 2017b: Effect of alkaline extrusion pretreatment of wheat straw on filtrate composition and enzymatic hydrolysis. *Wood Research* 62(6): 919-930.
9. Chang, K.L., Thitikorn-amorn, J., Hsieh, J.F., Ou, B.M., Chen, S.H., Ratanakhanokchai, K., Huang, P.J., Chen, S.T., 2011: Enhanced enzymatic conversion with freeze pretreatment of rice straw. *Biomass and Bioenergy* 35(1): 90-95.
10. Jeong, H.S., Jang, S.K., Kim, H.Y., Yeo, H., Choi, J.W., Choi, I.G., 2016: Effect of freeze storage on hemicellulose degradation and enzymatic hydrolysis by dilute-acid pretreatment of Mongolian oak. *Fuel* Volume 165: 145-151.

11. Li, J., Wachemo, A.Ch., Yuan, H., Zuo, X., Li, X., 2019a: Natural freezing-thawing pretreatment of corn stalk for enhancing anaerobic digestion performance. *Bioresource Technology* 288: 121518.
12. Li, J., Wachemo, A.Ch. Yu, G., Li, X., 2019b: Enhanced anaerobic digestion performance of corn stalk pretreated with freezing-thawing and ammonia: An experimental and theoretical study. *Journal of Cleaner Production*, Available online 2 November 2019, 119112.
13. Pažitný, A., 2019a: Steam explosion of wood particles from fibreboard and particle board with indirect control by enzymatic hydrolysis. *Acta Chimica Slovaca* 12(2): 185-191.
14. Pažitný, A., Russ, A., Kuňa, V., Balberčák, J., Ihnát, V., Stankovská, M., Boháček, S., Gigac, J., Medo, P., Schwartz, J., 2016: "Metóda zvýšenia výťažku monosacharidov počas výroby biopalív z lignocelulóзовých materiálov", Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s., Bratislava. PP 50083 – 2016 (ÚPV SR, 06.12.2016).
15. Pažitný, A., Russ, A., Boháček, Š., Stankovská, M., Ihnát, V., Šutý, Š., 2019b: Various lignocellulosic raw materials pretreatment processes utilizable for increasing holocellulose accessibility for hydrolytic enzymes. Part II. Effect of steam explosion temperature on beech enzymatic hydrolysis. *Wood Research* 64(3): 437-448.
16. Pažitný, A., Russ, A., Boháček, Š., Stankovská, M., Šutý, Š., 2019c: 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.
17. Pažitný, A., Russ, A., Boháček, Š., Stankovská, M., Ihnát, V., Šutý, Š., 2020: Effect of steam explosion on enzymatic hydrolysis of various parts of poplar tree. *Wood research* 65(4): 579-590.
18. Rooni, V., Raud, M., Kikas, T., 2017: The freezing pre-treatment of lignocellulosic material: A cheap alternative for Nordic countries. *Energy* 139: 1-7.
19. 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.
20. Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., Crocker, D., 2008: Technical Report NREL/TP-510-42618. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, USA.
21. Smichi, N., Messaoudi, Y., Moujahed, N., Gargouri, M., 2016: Ethanol production from halophyte *Juncus maritimus* using freezing and thawing biomass pretreatment. *Renewable Energy* 85: 1357-1361.
22. Su, T.CH., Fang, Z., 2017: One-pot microwave-assisted hydrolysis of cellulose and hemicellulose in selected tropical plant wastes by NaOH-freeze pretreatment. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2017, 5, 6: 5166-5174.
23. Wang, X.M., Wang, L.J., Yu, M., Chen, H., 2013: Freeze-thaw and sulfuric acid pretreatment of wheat straw for fermentable sugar release. *Advanced Materials Research* (724-725) : 257-260.
24. Yang, Y., Sharma-Shivappa, R.R., Burns, J.C., Cheng, J., 2009: Saccharification and fermentation of dilute-acid-pretreated freeze-dried switchgrass. *Energy Fuels* 23, 11: 5626-5635.

25. Yuan, H., Lan, Y., Zhu, J., Wachemo, A.Ch., Li, X., Yu, L., 2019: Effect on anaerobic digestion performance of corn stover by freezing–thawing with ammonia pretreatment. Chinese Journal of Chemical Engineering 27(1): 200-207.

Optimálny výber buničín pre výrobu tissue papierov s požadovanými funkčnými vlastnosťami

*Monika Stankovská, Mária Fišerová, Juraj Gigac, Elena Opálená
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s. Bratislava
stankovska@vupc.sk

Abstrakt

Cieľom práce bol výber vhodného typu buničiny pre získanie tissue papierov s vysokou nasiakavosťou, indexom pretrhnutia, objemovou mäkkosťou a požadovanými optickými vlastnosťami. Porovnal sa vplyv zanášky troch komerčných bielených mletých listnatých sulfátových buničín ako aj bielenej chemicko-termicko-mechanickej buničiny z listnatého dreva k mletej bielenej sulfátovej borovicovej buničine na funkčné vlastnosti tissue papiera, ako objemová mäkkosť, index pretrhnutia, absorpcia vody po ponorení, počiatočná absorpcia vody a na optické vlastnosti ako belosť a súradnica b^* . Vyselektovali sa dva typy listnatých buničín a ich optimálna zanáška k borovicovej buničine s vlastnosťami vhodnými pre rôzne typy hygienických výrobkov. Porovnávali sa vlastnosti komerčných bielených ihličnatých a listnatých buničín pri rôznych stupňoch mletia. Nezmesné bielené listnaté a ihličnaté buničiny nepriniesli takú kvalitu ako zmesné buničiny s výnimkou jedného typu nezmesnej eukalyptovej buničiny, mletej na vyšší stupeň mletia.

Kľúčové slová: Tissue papiere, listnatá/ihličnatá buničina, absorpcia vody, index pretrhnutia, objemová mäkkosť, belosť, žltosť.

Úvod

Náklady na vláknu tvoria zvyčajne viac ako 50% z celkových nákladov na výrobu hygienických papierov v závislosti od ich vlastností, ako je mäkkosť, objemová hmotnosť, pevnosť a absorpcia. Najkvalitnejšie výrobky z hygienického papiera sa vyrábajú hlavne z buničiny, zvyčajne zo zmesi dlhovláknitej buničiny z ihličnatého dreva s krátkovláknitou buničinou z listnatého dreva. Hygienické výrobky vyrobené zo 100% listnatej buničiny môžu byť veľmi mäkké, sú však menej pevné ako papiere z ihličnatých buničín. Ich nevýhodou je tiež degradácia pevnosti pri ražbe. Pre zvýšenie pevnosti sa môžu použiť aditíva, ale tieto ovplyvňujú náklady a výsledné vlastnosti hygienického papiera.

Hygienické výrobky z tissue sa vyrábajú tak, aby vyhovovali požadovaným vlastnostiam podľa konkrétnej aplikácie. Celkovo sú nasiakavosť, mäkkosť a pevnosť najdôležitejšími vlastnosťami, ktoré sa používajú na hodnotenie kvality výrobkov z buničín. Napríklad kuchynské utierky sa používajú hlavne na účely čistenia a absorpcie kvapalín, spotrebitelia očakávajú dobrú pevnosť za sucha aj za mokra, ktoré dokážu vyčistiť špinavý mokrý povrch bez toho, aby sa rozpadli. Ďalšou dôležitou vlastnosťou kuchynských utierok je nasiakavosť. Spotrebitelia očakávajú, že kuchynské utierky budú schopné absorbovať a zadržiavať čo najviac vody. Preto by sa pevnosť za mokra a nasiakavosť mohli považovať za primárne, základné alebo funkčné vlastnosti hygienických výrobkov. Ostatné vlastnosti, ako je mäkkosť, belosť a vzhľad, by sa mohli považovať za doplnkové vlastnosti, pretože výrazne

neprispiievajú k hlavnému účelu, ktorým je čistenie a sušenie povrchov. Napriek tomu, mäkkosť sa stala žiadanou vlastnosťou napr. pri kuchynských utierkach a toaletných papieroch, kde sa nevyžaduje až tak vysoká nasiakavosť, kde niektorí spotrebitelia sú citliví na mäkkosť.

Tab. 1: Súhrn primárnych alebo základných vlastností tkanivových výrobkov AFH na európskom trhu v roku 2005 (de Assis a kol. 2018).

Produkty a vlastnosti	Pevnosť	Pevnosť za mokra	Mäkkosť	Nasiakavosť	Belosť a farba
Toaletný papier			+		+
Obrúsky na tvár			++		+
Utierky	+	+		++	
Servítky			+		++

Papierové výrobky sa zvyčajne vyrábajú zo zmesi tvrdého a mäkkého dreva. Z dôvodu cenového rozdielu medzi buničinami z ihličnatého a listnatého dreva má zmysel optimalizovať zanášku buničiny z ihličnatého dreva v papieri bez toho, aby sa ohrozili požadované konečné vlastnosti hygienického výrobku a efektívnosť výroby. Buničiny, výrobná technológia a know-how spoločne dodávajú kvalitu konečnému hygienickému výrobku. Sulfátové buničiny z ihličnatého dreva sa líšia v pevnosti v ťahu a aj vplyv mletia na jej zvyšovanie je odlišné. Vyššia pevnosť pri danom stupni mletia umožňuje zníženie jej zanášky pri zachovaní výslednej pevnosti. Ak sa dosiahne vyššia pevnosť pri použití nižšej energie na mletie a menšej zanáške mletej ihličnatej buničiny je to ďalšia výhoda, ktorá sa prejaví vo forme nižších nákladov. Ak je obsah jemného podielu v mletej buničine vysoký, zhorší sa odvodnenie a bude dochádzať k tvorbe prachu na papierenskom stroji. Pri mäkkých a objemných hygienických papieroch sa odporúča mletie iba ihličnatej buničiny. Hygienický papier má mať vysoký volúmen a hladký povrch, ale musí byť tiež dostatočne pevný, musí mať dobré absorpčné vlastnosti a nemal by výrazne strácať pevnosť pri ražbe a laminovaní.

Najlepšou príležitosťou na zníženie a optimalizáciu nákladov na vlákno v hygienickom papieri na báze buničinových vlákien je zvýšenie podielu zložky listnatej buničiny. Použitie bielennej listnatej sulfátovej buničiny už dlhší čas stúpa kvôli ich špeciálnej vhodnosti pre výrobu hygienických papierov, najmä bielená eukalyptová buničina, ale aj kvôli cenovému rozdielu medzi bielenou sulfátovou listnatou a ihličnatou buničinou. Vyšší podiel listnatej buničiny zlepšuje formáciu a tým sa zvyšuje obsah sušiny pred Yankee valcom, čo vedie k úsporám sušiackej energie.

Chemicko-termomechanická buničina (CTMB) je typ buničiny, ktorý má vyvážené vlastnosti z oboch, listnatého a ihličnatého dreva (Nanko a kol. 2005). V procese chemicko-termicko-mechanického spracovania buničiny sa drevité triesky impregnujú slabým roztokom siričitanu sodného pri alkalickom pH pred pretlakom. Jedným z účinkov tohto spracovania je zmäkčenie lignínu a teda pretrhnutie vlákna počas rafinácie bude koncentrované na strednú lamelu bohatú na lignín. To vedie k tvorbe vyššieho množstva dlhých vlákien a nižšiemu množstvu jemných častíc a triesok pri určitom príkone v porovnaní s termicko-mechanickou

buničinou (TMB). Vysoký obsah dlhých vlákien je dôležitý pre všetky produkty, pri ktorých sa požaduje vysoká objemová hmotnosť, preto je CTMP technológia špeciálne vhodná pre takéto výrobky. Dlhé vlákna však môžu spôsobiť problémy dôsledkom slabej formácie na papierenskom stroji, čo môže mať za následok zlé povrchové vlastnosti, preto sú z tohto hľadiska žiaduce kratšie vlákna. Krátke a tuhé vlákna je možné získať z CTMB listnatých buničín ako je breza alebo rezaním dlhých vlákien v CTMB ihličnatej buničine s nízkou konzistenciou pri rafinácii. Počas výroby chemicko-termicko-mechanických buničín sa lignín zjemňuje chemicky a termálne, čo dáva buničinu, charakterizovanú frakciou dlhých a flexibilnejších vlákien. CTMB poskytuje lepšiu pevnosť a zároveň lepšiu absorpčnú schopnosť, nevýhodou je ich nízka opacita. Preto sa takéto typy buničín používajú hlavne na výrobu papiera s nízkou pridanou hodnotou a krátkou životnosťou, pretože v svetle žltnú. Avšak, bielené chemicko-termicko-mechanické buničiny (BCTMB) zo slabo sfarbených druhov dreva ako osika môžu poskytnúť vyššiu kvalitu a používajú sa ako lacnejšia alternatíva za severské bielené sulfátové buničiny (NBSK). BCTMB sa vo zvýšenej miere používa pri výrobe bezdrevných tlačiarenských a kancelárskych papierov a viacvrstvových skladacích kartónov ako aj tissue papierov. V roku 2018 bola Ázia a Tichomorie najväčšou globálnou krajinou na trhu s BCTMB, zatiaľ čo Európa bola druhou v poradí (ARC organization, 2019).

Cieľom tejto práce bolo navrhnúť optimálny výber buničiny z listnatých a ihličnatých drevín pre získanie vysokej absorpcie vody, mäkkosti a indexu pretrhnutia tissue papiera, pričom ďalšie parametre, ktoré sa zisťovali sú belosť a žltosť.

Materiál a metódy

Bielené ihličnaté a listnaté sulfátové buničiny pri rôznom stupni mletia

Bielená sulfátová borovicová buničina, bielená sulfátová buničina zo zmesi borovice a smreka (obsah smreka do 45%), bielená sulfátová buková buničina, bielená sulfátová brezová buničina I, bielená sulfátová brezová buničina II, bielená eukalyptová sulfátová buničina I a bielená eukalyptová sulfátová buničina II. Komerčné bielené ihličnaté a listnaté sulfátové buničiny boli nemleté (14°SR) alebo mleté na 20, 25 a 35°SR v laboratórnom Jokro mlyne podľa ISO 5264-3:1979 a laboratórne hárky (57-63 g.m⁻²) sa pripravili v hárkovači Rapid Köthen podľa normy ISO 5269-2.

Zmes bielených sulfátových listnatých buničín s ihličnatou buničinou

Bielená borovicová sulfátová buničina, bielená buková sulfátová buničina, bielená brezová sulfátová buničina I, bielená eukalyptová sulfátová buničina II, bielená chemicko-termicko-mechanická osiková buničina BCTMB. Listnaté buničiny aj borovicová buničina boli separátne mleté na 20°SR pred zmesovaním v laboratórnom Jokro mlyne podľa ISO 5264-3:1979. Nižší stupeň mletia sa zvolil z toho dôvodu, že mletie buničín síce zvyšuje pevnostné vlastnosti, ale radikálne znižuje absorpciu vody a objemovú mäkkosť a belosť. Pripravila sa zmes bielených sulfátových listnatých buničín (20, 40, 60, 80%) s borovicovou buničinou a laboratórne hárky (57-63 g.m⁻²) sa pripravili v hárkovači Rapid Köthen podľa normy ISO 5269-2.

Absorpcia vody (WA) po ponorení po dobu 10 s sa merala podľa normy ISO 5637.

Dynamika penetrácie vody

Dynamika penetrácie vody sa merala ultrazvukovým prístrojom PDA C.02 (Emtec, Radnor, PA, USA) s frekvenciou 2 MHz. Testovacia kvapalina bola voda s povrchovou energiou 72 mJ.m^{-2} . Získala sa zmena intenzity ultrazvukového signálu (USI) v čase 43 ms - 60 s pri použití algoritmu SC. Zo stanovenia poklesu USI v 200 ms a času v minime USI sa navrhol algoritmus pre výpočet počiatkovej absorpcie vody. Výsledné hodnoty sa získali z priemernej hodnoty na lícovej a rubovej strane papierového hárku. Opis tejto metódy a proces hodnotenia počiatkovej absorpcie vody bol podrobnejšie publikovaný (Stankovská a kol. 2019a).

Počiatková absorpcia vody HYG 1 sa vypočítala z intenzity ultrazvukového signálu v čase 200 ms (USI) pomocou rovnice:

$$HYG 1 = \frac{100 - USI_{200}}{0,2} (\%) \quad (1)$$

kde 0,2 je konštanta, čím je väčšia hodnota HYG 1, tým vyššia je absorpcia vody.

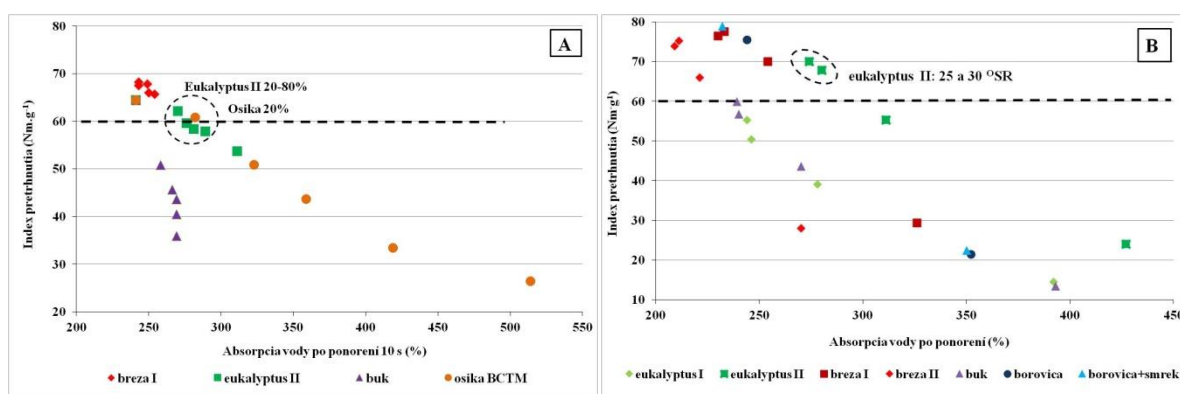
Index pretrhnutia sa stanovil podľa normy ISO 1924-2. Objemová mäkkosť sa vypočítala z tuhosti v ohybe stanovenej pri 15° a 10 mm vzdialenosti medzi svorkou a britom podľa metódy TAPPI T 556 pm-95. Belosť sa stanovila podľa normy ISO 2470-1:2016 a hodnota súradnice b^* podľa normy ISO 5631-1:2015.

Výsledky a diskusia

Snahou je nájsť taký typ buničiny, aby sa získali buničínové hárky s vysokým indexom pretrhnutia a zároveň s čo najvyššou absorpciou vody. Obr.1 ukazuje vzťah medzi indexom pretrhnutia a absorpciou vody po ponorení borovicovej buničiny s rôznymi zanáškami listnatých buničín (vľavo), resp. bielených ihličnatých a listnatých buničín pri rôznych stupňoch mletia (vpravo). Laboratórne hárky so 100% zanáškou ihličnatej buničiny mali vysoký index pretrhnutia ($64,5 \text{ Nm.g}^{-1}$), avšak nízku absorpciu vody po ponorení (241%). BCTM osiková buničina má 1,8-1,9 – násobne vyššiu absorpciu vody po ponorení oproti ostatným buničinám čo korešponduje s jej vysokou pórovitosťou ϵ (Stankovská a kol. 2020). Účinok zmesovania brezovej buničiny s borovicovou buničinou sa významne neprejavil, pretože obidve buničiny majú podobne nízky Runkelov pomer. Zmesovaním bukovej, eukalyptovej sulfátovej buničiny alebo osikovej BCTMP buničiny s ihličnanovou buničinou sme sa snažili zvýšiť index pretrhnutia, ktorý je pri listnatých buničinách nízky. Ako najvhodnejšia sa ukazuje byť eukalyptová buničina so zanáškou 20-80%, kedy sa dosiahla vyššia absorpcia vody po ponorení (270-289%) a index pretrhnutia ($57,9\text{-}62,1 \text{ Nm.g}^{-1}$). Dobrý výsledok sa získal pri 20% zanáške osikovej buničiny, kedy sa dosiahne vysoká absorpcia vody po ponorení (282%) a zároveň vysoký index pretrhnutia ($60,8 \text{ Nm.g}^{-1}$). Zvyšovanie zanášky osikovej BCTM buničiny má za následok výrazné zvyšovanie absorpcie vody po ponorení (323-514%), ale výrazne klesá index pretrhnutia na $26,4\text{-}50,9 \text{ Nm.g}^{-1}$ a to už so zanáškou 40%. Hárky z brezovej buničiny majú síce vysoký index pretrhnutia ($65,7\text{-}$

68,2 Nm.g⁻¹), ale nízku absorpciu vody (243-254%), ktorá sa ani so zvyšovaním zanášky výrazne nezvyšuje.

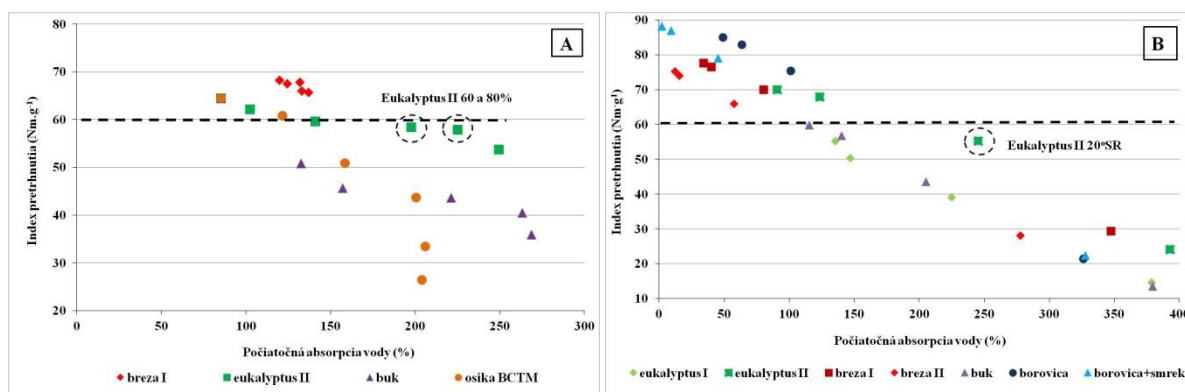
Obr. 1B znázorňuje vzťah medzi indexom pretrhnutia a absorpciou vody po ponorení nezmesných bielených ihličnatých a listnatých sulfátových buničín. Mletie bielených sulfátových buničín má výrazný vplyv na absorpciu ako aj index pretrhnutia (Fišerová a kol.2019). Pri rovnakom stupni mletia mali bielené sulfátové buničiny z eukalyptu a buka najvyššiu absorpciu vody, potom nasledovali buničiny z brezového a ihličnatého dreva. Pri rovnakom stupni mletia mali najvyšší index ihličnaté buničiny, následne brezové buničiny a najnižší mali eukalyptové a buková buničina. Vysoký index pretrhnutia (67,9 a 70,0 Nm.g⁻¹) a zároveň absorpciu vody po ponorení (274 a 280%) mala iba eukalyptová buničina Eukalyptus II pri vyššom stupni mletia (25 a 30°SR). Ostatné mleté a nemleté buničiny ako aj nemletá buničina Eukalyptus II a mletá na 20 °SR mali buď vysokú absorpciu vody po ponorení alebo index pretrhnutia, avšak žiadna z nich nemala vysoké súčasne oba parametre. So zvyšovaním stupňa mletia sa zvyšoval index pretrhnutia všetkých typov buničín.



Obr. 1: Vzťah medzi indexom pretrhnutia a absorpciou vody po ponorení A: hárkov z bielenej ihličnatej sulfátovej buničiny s rôznymi zanáškami listnatých buničín (20, 40, 60, 80 a 100%); B: nemletých a mletých bielených ihličnatých a listnatých sulfátových buničín.

Vzťah medzi indexom pretrhnutia a počiatočnou absorpciou vody zmesných buničín s rôznymi zanáškami listnatých buničín (vľavo) a bielených ihličnatých a listnatých buničín pri rôznych stupňoch mletia (vpravo) je na Obr.2. Laboratórne hárky so 100% zanáškou ihličnanovej buničiny mali vysoký index pretrhnutia (64,5 Nm.g⁻¹), avšak nízku počiatočnú absorpciu vody (85%). Zmesovaním listnatej a ihličnanovej buničiny sa zvýšila počiatočná absorpcia vody. Najvhodnejšou buničinou na prípravu tissue papierov s dobrou okamžitou nasiakavosťou a zároveň dobrou pevnosťou za sucha sa ukazuje byť zmesná buničina so zanáškou eukalyptovej buničiny 60 a 80%, kedy sa dosiahla vysoká počiatočná absorpcia vody 198-225%, a index pretrhnutia 57,9-58,4 Nm.g⁻¹. Laboratórne hárky s 60- 10% zanáškou bukovej buničiny síce majú vysokú počiatočnú absorpciu vody (221-269%) ale nízky index pretrhnutia (36-43,7 Nm.g⁻¹). BCTM osiková buničina s 20% zanáškou má síce vysoký index pretrhnutia (60,8 Nm.g⁻¹), ale veľmi nízku počiatočnú absorpciu vody (122%), ktorá sa zvyšovaním zanášky zvyšuje, ale index pretrhnutia výrazne klesá. Podobne, zanáškami brezovej buničiny sa dosiahol vysoký index pretrhnutia (65,7-68,2 Nm.g⁻¹) ale veľmi nízka počiatočná absorpcia vody (120-137%).

Obr. 2B znázorňuje vzťah medzi indexom pretrhnutia a počiatocnej absorpcie vody bielených ihličnatých a listnatých sulfátových buničín. So zvyšovaním stupňa mletia sa zvyšovali indexy pretrhnutia všetkých buničín. Pri rovnakom stupni mletia sa index pretrhnutia bielených sulfátových buničín zvyšoval v nasledovnom poradí: eukalyptus I < buk < eukalyptus II) < breza II < breza I < borovica < borovica+smrek. Pri nemletých buničinách mali bielené sulfátové buničiny z eukalyptu a buka vyššiu počiatocnú absorpciu vody, kým najnižšiu mala buničina breza I. Výrazný rozdiel počiatocnej absorpcie vody medzi buničinami bol pri mletých buničinách, kde buková buničina a obe eukalyptové buničiny mali 2-4-násobne vyššiu počiatocnú absorpciu vody oproti brezovým a ihličnatým buničinám. Z Obr.2B vyplýva, že v skupine nezmesných buničín mala vysoký index pretrhnutia ($55,3 \text{ Nm.g}^{-1}$) a zároveň počiatocnú absorpciu vody (245%) iba buničina Eukalyptus II pri mletí na 20°SR i keď index pretrhnutia je o čosi nižší ako v prípade zmesných buničín pri 60 a 80% zanáške tejto buničiny k borovicovej buničine ($57,9\text{-}58,4 \text{ Nm.g}^{-1}$). Ostatné buničiny nemali vysoké súčasne oba parametre.



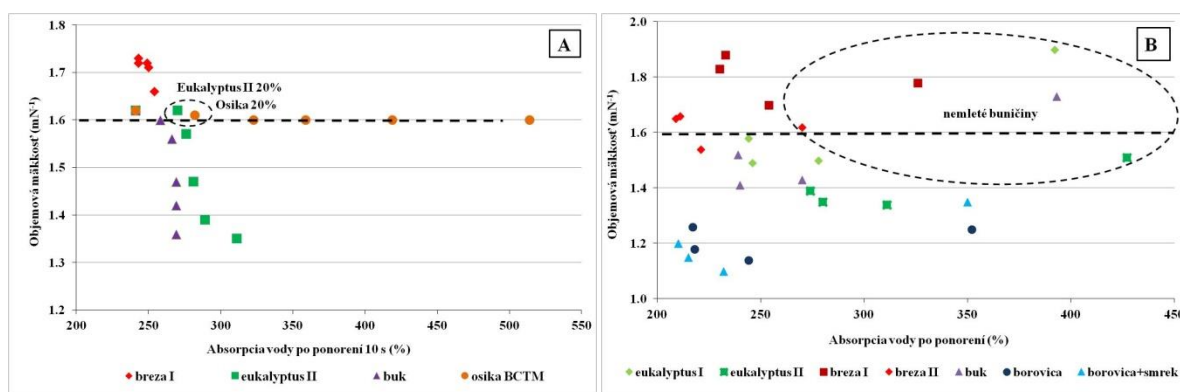
Obr. 2: Vzťah medzi indexom pretrhnutia a počiatocnou absorpciou vody A: hárkov z bielených ihličnatej sulfátovej buničiny s rôznymi zanáškami listnatých buničín (20, 40, 60, 80 a 100%); B: nemletých a mletých bielených ihličnatých a listnatých sulfátových buničín.

Pre tissue papiere je tiež dôležitá mäkkosť, v závislosti od požiadaviek zákazníkov. Obr. 3 ukazuje vzťah medzi objemovou mäkkosťou a absorpciou vody po ponorení zmesných buničín s rôznymi zanáškami listnatých buničín (vľavo), resp. nezmesných bielených ihličnatých a listnatých buničín pri rôznych stupňoch mletia. Hárky z 100% borovicovej sulfátovej bielenej buničiny mali síce vysoký index pretrhnutia, ale nižšiu mäkkosť ($1,62 \text{ m.N}^{-1}$) a predovšetkým nízku absorpciu vody po ponorení (241%). Z toho dôvodu nie je vhodná vysoká zanáška tohto typu buničiny, ale je možné skombinovať nižšiu zanášku borovicovej sulfátovej bielenej buničiny s vyššou zanáškou listnatej buničiny za účelom zvýšenia absorpcie vody. Najvyššiu objemovú mäkkosť ($1,69\text{-}1,73 \text{ m.N}^{-1}$) a index pretrhnutia ($59,7\text{-}68,2 \text{ Nm.g}^{-1}$) mali buničiny so zanáškami 40-100% z brezovej buničiny ale ich absorpcia vody po ponorení bola iba 243-250%. Tieto sulfátové bielené brezové buničiny so zanáškou do 60% sú vhodné pre výrobu hygienického papiera, kedy sa vyžaduje vysoká mäkkosť a pevnosť za sucha ale bez potrebnej vysokej nasiakavosti. Laboratórne hárky so zanáškou bukovvej buničiny mali vyššiu objemovú mäkkosť ($1,60 \text{ m.N}^{-1}$) iba pri zanáške 20%,

ktorá je porovnateľná s borovicovou buničinou alebo s 20%-nou zanáškou eukalyptovej buničiny, index pretrhnutia bol však nízky ($50,9 \text{ Nm.g}^{-1}$).

Laboratórne hárky so zanáškami osikovej BCTM buničiny k borovicovej buničine majú vysokú objemovú mäkkosť od $1,60$ do $1,65 \text{ m.N}^{-1}$ a zároveň absorpciu vody po ponorení od 282 do 514% . Vzhľadom na nízky index pretrhnutia pri zanáške $40\text{--}100\%$ ($26,4\text{--}50,9 \text{ Nm.g}^{-1}$) sa ukazuje dobrou voľbou použitie 20% zanášky, kedy sa získa vysoká absorpcia vody (282%), index pretrhnutia ($60,8 \text{ Nm.g}^{-1}$) a prijateľná objemová mäkkosť ($1,61 \text{ m.N}^{-1}$). Ďalšou možnosťou je použitie 20% zanášky bielennej sulfátovej eukalyptovej buničiny kedy sa získal vysoký index pretrhnutia ($62,1 \text{ Nm.g}^{-1}$) aj objemová mäkkosť $1,63 \text{ m.N}^{-1}$, i keď absorpcia vody je o čosi nižšia (WA 270%) v porovnaní s osikovou BCTM buničinou, avšak stále je vyššia ako u ostatných buničín. Absorpciu vody je možné zvýšiť zvýšením zanášky bielennej sulfátovej eukalyptovej buničiny na 40% , kedy sa dosiahne absorpcia vody po ponorení 276% pričom index pretrhnutia zostáva vysoký ($59,6 \text{ Nm.g}^{-1}$), nevýhodou je zníženie objemovej mäkkosti ($1,57 \text{ m.N}^{-1}$). Tento typ buničiny by však mohol byť vhodný na výrobu toaletného papiera alebo utierok s priemernou mäkkosťou alebo by sa vyššia mäkkosť mohla dosiahnuť po následnej úprave papiera napr. krepovaním.

V rámci nezmesných bielených ihličnatých a listnatých sulfátových buničín sa dosiahne veľmi vysoká absorpcia vody po ponorení aj objemová mäkkosť pri oboch typov nemletých brezových a eukalyptových buničín aj pri nemletej bukovej buničine (Obr.3B). Tieto nemleté buničiny však nie sú vhodné na výrobu tissue papierov, nakoľko ich index pretrhnutia je veľmi nízky ($13,5\text{--}29,4 \text{ Nm.g}^{-1}$). Mletím buničiny breza I, breza II a eukalyptus I na vyššie $^{\circ}\text{SR}$ sa síce dosiahne vysoká objemová mäkkosť a index pretrhnutia, avšak na úkor absorpcie vody.

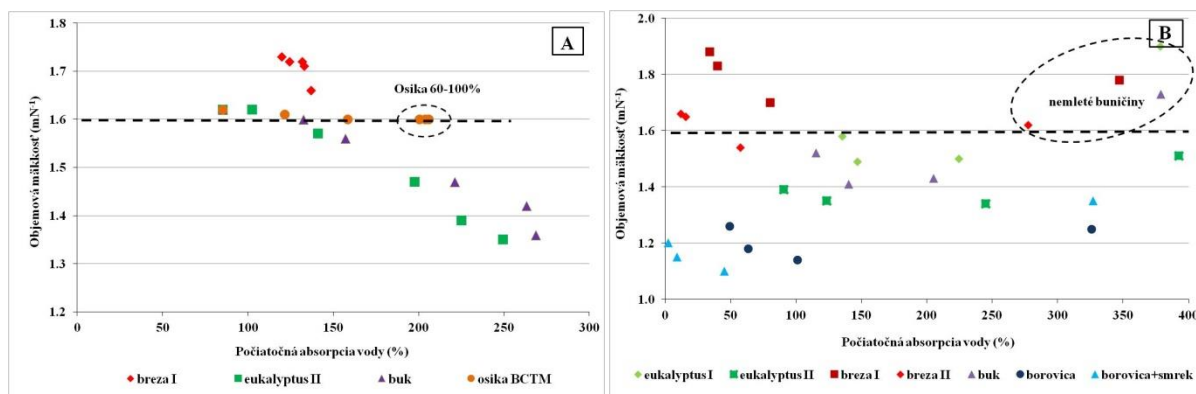


Obr. 3: Vzťah medzi objemovou mäkkosťou a absorpciou vody po ponorení, A: hárkov z bielennej ihličnatej sulfátovej buničiny s rôznymi zanáškami listnatých buničín (20, 40, 60, 80 a 100%); B: nemletých a mletých bielených ihličnatých a listnatých sulfátových buničín.

Vlákná rôznych drevín reagujú odlišne na proces mletia a na tlakovú silu pri výrobe hárkov počas sušenia v závislosti od morfológických vlastností vlákna. Brezové vlákna majú relatívne tenkú stenu $2,0\text{--}3,6 \mu\text{m}$ pri porovnaní s eukalyptovými ($4,3\text{--}5,0 \mu\text{m}$) alebo bukovými ($3,0\text{--}5,5$) a vlákna sú širšie. Ich Runkelov pomer je menší ako 1, výsledkom je ľahšie sploštenie vlákien a menšia poréznosť štruktúry. Osikové vlákna majú šírku bunkovej steny $2,0\text{--}3,0 \mu\text{m}$, čo je na úrovni brezových vlákien a Runkelov pomer je o trochu vyšší ($1,1$).

Bukové vlákna majú najvyšší Runkelov pomer (2,13) a výsledkom je najvyššia počiatková absorpcia vody. Poradie eukalyptovej, brezovej a bukovej buničiny pri vyšších zanáškach z hľadiska Runkelovho pomeru teda dobre koreluje s počiatkovou absorpciou vody ako aj priepustnosťou vzduchu (Stankovská a kol.2019b). Osiková buničina, spracovaná termicko-chemicko-mechanickým spôsobom má vyšší obsah lignínu, čo dáva rigidnejšiu štruktúru vlákna a dáva vyššiu schopnosť zadržiavať vodu (Nanko a kol.2005). Na druhej strane, vyšší podiel jemných častíc v BCTM buničine znižuje rýchlosť absorpcie kvapalín tissue papierom a tá môže byť dokonca ešte nižšia pri kombinácii prítomnosti jemného podielu a lignínu dôsledkom ich hydrofóbneho správania (Assis a kol.2018). Táto skutočnosť by mohla teoreticky vysvetľovať, prečo v prípade osikovej BCTM buničiny bola nižšia počiatková absorpcia vody v porovnaní s bukovou buničinou, ale zároveň vyššia absorpcia po ponorení v dlhšom čase.

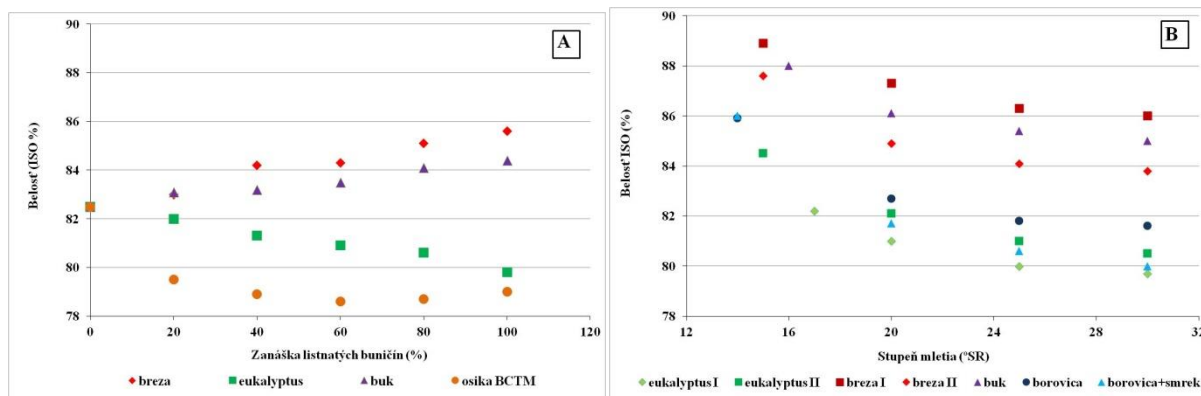
Laboratórne hárky so 60-100% zanáškou osikovej BCTM buničiny k borovicovej buničine, ktoré majú vysokú objemovú mäkkosť a zároveň absorpciu vody po ponorení mali aj vysokú počiatkovú absorpciu vody (Obr.4A) ale nedostatkom je nízky index pretrhnutia 26,4-43,7 Nm.g⁻¹. Pri 20% zanáške tejto buničiny sa síce nezíska vysoká počiatková absorpcia vody (122%) ale získa sa vysoká absorpcia vody po ponorení (v čase 10 s), index pretrhnutia (60,8 Nm.g⁻¹) a objemová mäkkosť. Počiatková absorpcia vody nie je tak dôležitá vlastnosť pri tissue papieroch než absorpcia v dlhšom čase (absorpcia po ponorení). Pri nezmesných buničinách, počiatková absorpcia vody bola vysoká (Obr.4B, 278-392%) iba pri nemletých buničinách breza I, breza II, eukalyptus I a buk, obdobne ako bola vysoká absorpcia vody po ponorení (Obr.3B) a zároveň objemová mäkkosť (Obr.4B, 1,62-1,90 m.N⁻¹).



Obr. 4: Vzťah medzi objemovou mäkkosťou a počiatkovou absorpciou vody: A) hárkov z bielennej ihličnatej sulfátovej buničiny s rôznymi zanáškami listnatých buničín (20, 40, 60, 80 a 100%); B) nemletých a mletých bielených ihličnatých a listnatých sulfátových buničín.

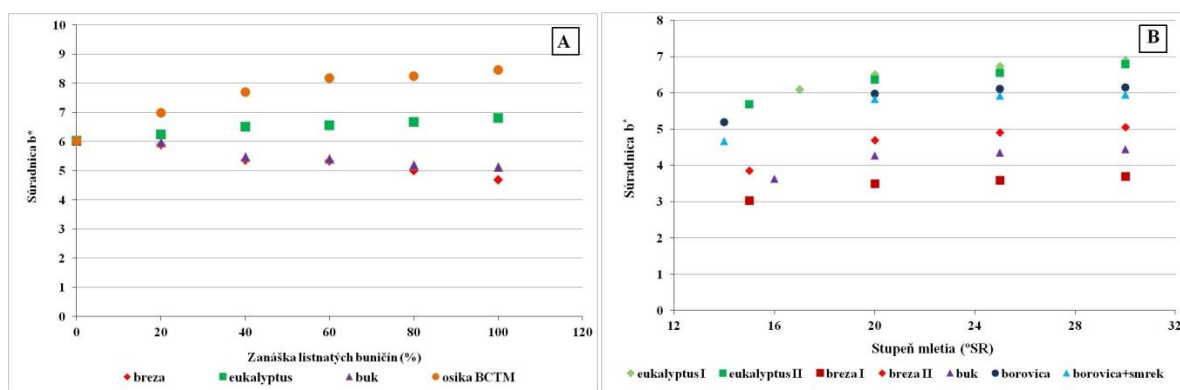
Vplyv zanášky na ISO belosť hárkov z rôznych zmesí ihličnatej a listnatých buničín je ukázaný na Obr.5A. Belosť 100% borovicovej buničiny bola 82,5%. So zanáškami brezovej a bukovej buničiny belosť narastala o 0,1-1,5% (breza) a o 0,1-0,7% (buk). Zvyšovaním zanášky eukalyptovej buničiny došlo k miernemu poklesu belosti o 0,4-1%. V prípade osikovej BCTM buničiny došlo k výraznému poklesu belosti o 3,8% pri zanáške 20% a s ďalšími zanáškami sa belosť menila už iba minimálne. Na Obr. 5B je prezentovaný vplyv

mletia na belosť bielených sulfátových nezmesných buničín. Belosť nemletých buničín sa pohybovala od 82,2 do 88,9% ISO. Po mletí na 30°SR poklesla belosť buničín o 1,5 až 2%. Z porovnávaných buničín mali brezové buničiny a buková buničina najvyššiu belosť, zatiaľ čo eukalyptové a ihličnaté buničiny mali nižšiu belosť.



Obr. 5: Vplyv zanášky bielennej brezovej, eukalyptovej, bukovej sulfátovej buničiny a bielennej chemicko-termicko-mechanickej osikovej buničiny k bielennej ihličnatej sulfátovej buničine (A) a vplyv stupňa mletia bielených mletých a nemletých sulfátových buničín (B) na belosť.

Schopnosťou papiera je odrážať, prípadne pohlcovať svetlo určitých vlnových dĺžok. Snahu čo najvhodnejšie vyjadriť farebnosť papierov a kvantitatívne vyjadriť farebnú odchýlku medzi dvoma papiermi, tak aby čo najvernejšie odpovedala zrakovému vnemu, umožňuje CIELAB systém. Farba je definovaná súradnicami L^* a a^* a b^* z ktorých súradnica b^* s kladnou hodnotou vyjadruje žltú farbu a so zápornou hodnotou modrú farbu. Obr.6A ukazuje vplyv zanášky buničín na súradnicu b^* . Samotná borovicová buničina mala súradnicu b^* 6,02, zvyšovaním zanášky eukalyptovej buničiny k borovicovej buničine došlo k miernemu nárastu súradnice b^* , a so zanáškami osikovej BCTM buničiny došlo k výraznému nárastu súradnice b^* . Výsledkom zvyšovania zanášok bukovej a brezovej buničiny bol pokles súradnice b^* , tvar oboch kriviek bol totožný.



Obr. 6: Vplyv zanášky bielennej brezovej, eukalyptovej, bukovej sulfátovej buničiny a bielennej chemicko-termicko-mechanickej osikovej buničiny k bielennej ihličnatej sulfátovej buničine (A) a vplyv stupňa mletia bielených mletých a nemletých sulfátových buničín (B) na súradnicu b^* .

V prípade nezmesných bielených sulfátových buničín sa hodnota súradnice b^* zvyšovala so stupňom mletia (Obr. 6B) na rozdiel od belosti (Obr. 5B).

Obe nemleté eukalyptové buničiny ako aj obe ihličnaté buničiny mali omnoho vyššiu súradnicu b^* ako nemleté brezové buničiny a buková buničina. Súradnica b^* mletých eukalyptových buničín sa pohybuje v oblasti 6,4-6,8. Tam, kde zákazník požaduje vysokú žltosť a kde je dôležitá vysoká pevnosť za sucha, objemová mäkkosť aj absorpcia vody je vhodné použiť osikovú BCTM buničinu, pričom aj s jej nižšou zanáškou k borovicovej buničine sa dosiahne vysoká žltosť (súradnice b^* je 7,0).

Záver

Najkvalitnejšie výrobky z hygienického papiera sa často vyrábajú zo zmesi ihličnatej a listnatej buničiny. Pre dosiahnutie požadovaných funkčných vlastností hygienického papiera je dôležitý výber typu buničiny a optimalizovanie zanášky týchto buničín.

Chemicko-termicko-mechanická osiková buničina s nižšou zanáškou k borovicovej buničine sa ukázala byť vhodná pre výrobu tissue papierov s vysokou pevnosťou za sucha, objemovou mäkkosťou a vysokou nasiakavosťou. Tento typ buničiny je vhodný pre výrobu tissue produktov, kde sa nevyžaduje vysoká belosť, ale naopak, požaduje sa vysoká žltosť. Ďalšie zvyšovanie zanášky tejto buničiny už má nepriaznivý vplyv na index pretrhnutia.

Bielená sulfátová buničina eukalyptus II s 20% zanáškou k borovicovej buničine umožní získať tissue papiere s vyššou objemovou mäkkosťou a pevnosťou za sucha a stredne vysokou nasiakavosťou. Je možné použiť aj zanášku 40 a 60%, kedy sa dosiahne ešte vyššia absorpcia vody ako aj vyššia pevnosť za sucha, i keď sa zníži objemová mäkkosť, je možné ju použiť predovšetkým na výrobu kuchynských utierok, kde sa nevyžaduje až tak vysoká mäkkosť, alebo sa mäkkosť zvýši po následnej úprave papiera napr. krepovaním.

Buková buničina mala nízky index pretrhnutia, a to dokonca aj pri veľmi nízkej zanáške k borovicovej buničine a taktiež sa nedosiahla vyššia objemová mäkkosť. Brezová buničina mala síce veľmi vysoký index pretrhnutia ako aj objemovú mäkkosť, avšak veľmi slabú nasiakavosť.

Pre získanie vysokej pevnosti za sucha a zároveň absorpcie vody po ponorení je možné použiť aj nezmesnú bielenú sulfátovú buničinu eukalyptus II pri vyššom stupni mletia, i keď objemová mäkkosť bola nižšia.

Podakovanie

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na Základe Zmluvy č. PP-COVID-20-0103.

Použitá literatúra

1. ARC organization, 2019. Dostupné online: <http://www.arcognizance.com/report/global-bleached-chemi-thermomechanical-pulp-bctmp-market-growth-2019-2024>.
2. Assis, T.D., Lee W. 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. BioResources 13(2): 4593-4329.

3. Daub E., Sindel, H., Göttching, L., 1986: Absorption von Flüssigkeiten in Papier. *Das Papier* 40(5):188-197.
4. Fišerová, M., Gigac, J., Stankovská, M., Opálená, E., 2019: Influence of bleached softwood and hardwood kraft pulps on tissue paper properties. *Cellulose Chemistry and Technology* 53 (5-6): p. 469-477.
5. Ingmanson, W.L., Thode, F.T., 1959: Factors contributing to the strength of the sheet of paper. II. Relative bond area. *Tappi* 42(1): 83-93.
6. Nanko, H., Button, A., Hillman, D., 2005: *The world of Market Pulp*, C. E. Swann, Ed., Appleton, Wisconsin, USA: WOMP, LLC.
7. Stankovská, M., Gigac, J., Fišerová, M., Opálená, E., 2019a: Relationship between structural parameters and water absorption of bleached softwood and hardwood kraft pulps. *Wood Research* 64 (2) 261-272.
8. Stankovská, M., Fišerová, M., Gigac, J., Opálená, E., 2019b: Vplyv zmesi bielených ihličnatých a listnatých sulfátových buničín ako aj buničín z recyklovaných vlákien na vlastnosti tissue papiera. *Výskumná správa VS: 3275/2019*, 59 strán.
9. Stankovská, M., Fišerová, M., Gigac, J., Opálená, E., 2020: Blending impact of hardwood pulps with softwood pulp on tissue paper properties. *Wood Research* 65(3): 447-458.

Kaskádové využívanie drevnej hmoty v krajinách EÚ

*Vladimír Ihnát, Henrich Lübke,
Andrej Pažitný, Jozef Balberčák, Vladimír Kuňa, Opálená Elena
Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s. Bratislava
ihnmat@vupc.sk

Abstrakt

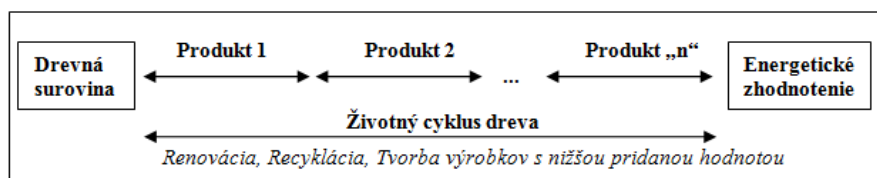
Predkladaný článok zovšeobecňuje princíp kaskádového využívania dreva, preferovaný Európskou úniou, v teoretickej rovine ako odpoveď na predikovaný deficit v dodávkach tejto suroviny v nasledujúcich desaťročiach. Tento princíp môže mať výrazne zmierňujúce dopady na celospoločenský tlak na zníženie zaťaženia životného prostredia vplyvom nadmernej ťažby. Poukazuje na skutočnosť, že experimentálne potvrdené modely na jednotlivých úrovniach (kaskádach) už existujú, čiastočne sa aj aplikujú, avšak pevný legislatívny rámec stále chýba. Odborná verejnosť preferuje princíp viacstupňového kaskádového využívania, aj keď prípadové štúdie poukazujú na nedostatočný stupeň materiálového zhodnocovania už pri jednostupňových modeloch.

Kľúčové slová: Kaskádové využívania dreva, renovácia, recyklácia, životný cyklus dreva, jednostupňový a viacstupňový model kaskádového využívania.

Úvod

Posledné štúdie nasvedčujú tomu, že rastúci dopyt po materiáloch a energii by mohol viesť k deficitu dodávok dreva v nadchádzajúcich desaťročiach. Efektívnejšie využitie drevnej hmoty ponúka potenciál pre prekonanie tohto deficitu, ktorý tkvie v princípe tzv. kaskádového využívania dreva.

Kaskádové využívanie je stratégia využívania surovín, akým je aj drevo, v chronologicky postupných krokoch čo najdlhšie, najčastejšie a najefektívnejšie pre materiály a pre energiu až na konci životného cyklu (Obr. 1).



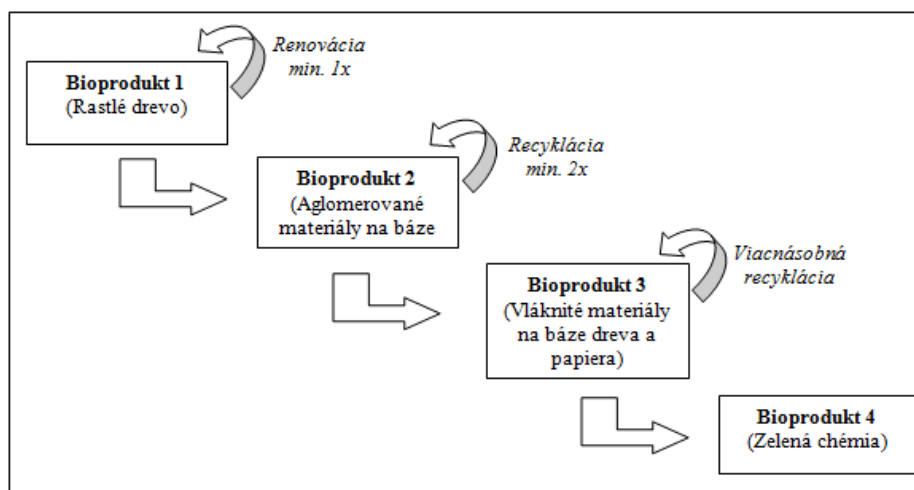
Obr. 1: Schéma stratégie kaskádového využívania dreva.

Zámerom zo spoločenského pohľadu je aj zníženie tlaku na životné prostredie, avšak stav neurčitosti naďalej pretrváva, i keď sa o kaskádovom využívaní často hovorí vo verejnej aj politickej rovine. Spoločné chápanie tohto výrazu a konsenzus o tom, kde a ako kaskádové použitie dreva by malo byť implementované stále chýba. Integrácia stratégie v jednotlivých krajinách EÚ sa značne líši. Tento stav vedie k nejasnostiam a nesprávnej interpretácii zo strany zainteresovaných strán. Žiadna z krajín EÚ neprijala politiku pre kaskádové použitie

dreva, avšak množstvo politík a legislatívnych opatrení ovplyvňuje kaskádové využitie a drevospracujúci priemysel všeobecne, napr. stratégie biohospodárstva, lesného hospodárstva, odpadových politík, politík bioenergií, stavebných predpisov atď.

1. Teoretický model kaskádového využívania drevnej hmoty

Aj keď je legislatívny stav kaskádového využívania drevnej hmoty neuspokojivý, teoretické modely aplikovateľné v praxi už existujú (Obr. 2). Čiastočné praktické uplatnenie je možné pozitívne hodnotiť hlavne pri recyklácii drevotrieskových materiálov, kde v rámci výrobných podnikov, ktoré sú združené v EPF (European Panel Federation), sa na výrobu v roku 2019 použilo iba 24% surovej hmoty, pričom zvyšok tvorilo odpadové drevo (43%) a priemyselné odpady z výroby (33%). Uspokojivé výsledky v celkovej recyklácii dosahuje papierenský priemysel, kde celoeurópsky stupeň recyklácie predstavoval v roku 2019 hodnotu 72% (zdroj: CEPI).



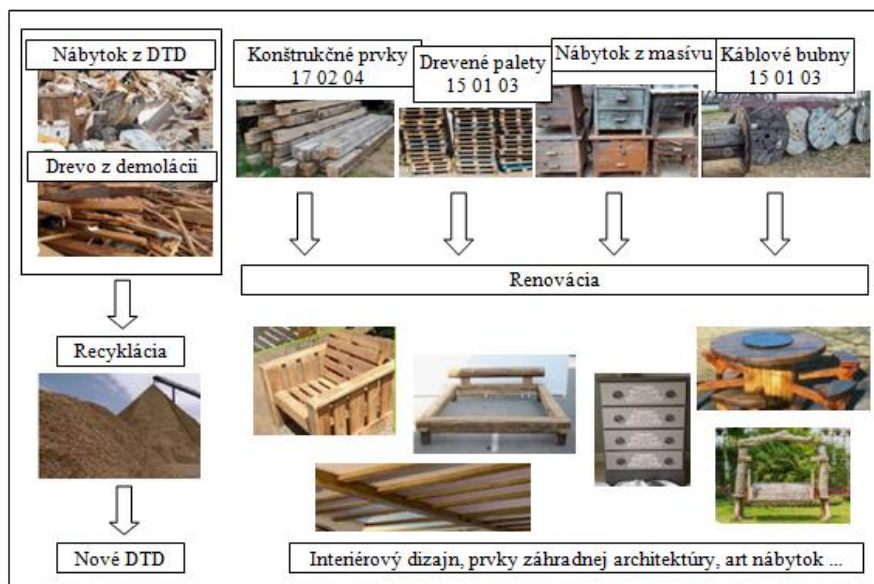
Obr. 2: Teoretický model viacstupňového kaskádového zhodnocovania drevených výrobkov po skončení doby ich používania.

2. Životný cyklus dreva

Životný cyklus dreva začína už počas rastu stromu. Počas tejto doby strom plní svoju najdôležitejšiu úlohu, kedy vytvára kyslík v rámci fotosyntézy a zároveň plní množstvo ľudstvu prospešných úloh (filtračných, prostredie zvlhčujúcich, zmierňujúcich výkyv teplôt, protihlukových, protieróznych atď.). Toto obdobie trvá okolo 90 rokov a viac, alebo aj menej, v závislosti od nastavenej rubnej doby. Od tohto obdobia sa už počíta životný cyklus dreva vo forme produktu/výrobku. Po ukončení životnosti dreveného výrobku z rôznych dôvodov (nefunkčnosť, morálna zastaralosť, generačná obmena...) zväčša nasledoval hneď proces jeho likvidácie (incinérácia resp. biodegradácia). Životnosť výrobkov z dreva sa v minulom období dala rátať na desiatky rokov v závislosti od typu výrobku (stavebné 50-100 rokov, nábytok 30-40 rokov). Priemyselný (vo veľkom merítku) proces recyklácie priniesla až implementácia recyklátu do výroby drevotrieskových dosiek, čo bolo čiastočne ovplyvnené aj rozvojom mobilných štiepkovacích zariadení.

Stratégia kaskádového využívania implementuje proces recyklácie ako nosný proces vzhľadom na množstvo materiálu, ktorému je možné týmto spôsobom predĺžiť životnosť. Pri

šetrnom zaobchádzaní počas likvidácie nepotrebných drevených výrobkov mu môže predchádzať proces renovácie, ktorý postupne nabera na popularite. Ak sa drevný materiál využije „materiálovo“ minimálne ešte raz, okrem svojho pôvodného určenia, hovoríme o jednostupňovom kaskádovom využívaní (Obr. 3).



Obr. 3: Príklady jednostupňového kaskádového využívania dreva.

Pri študovaní odbornej literatúry zistíme, že väčšina autorov preferuje viacstupňové kaskádové využívanie, čiže drevo sa materiálovo zhodnotí hneď niekoľkokrát, pričom aj incinerácia zvyšku sa považuje za jeho zhodnotenie, tentokrát energetické.

3. Materiálové zhodnocovanie dreva

Prvotná zodpovednosť za správne využívanie drevnej suroviny pripadá sortimentácii drevených výrezov a spôsobu využívania poťažobných zvyškov. Jednotlivé zatriedenie do kvalitatívnych stupňov predurčujú jej prvotné použitie. Kvalitatívne zhodnocovanie (dosiahnuť čo najvyššiu pridanú hodnotu pre daný kvalitatívny stupeň) je regulované cenovou politikou za vstupnú surovinu a závisí od technickej a technologickej vyspelosti spracovateľa. Celá táto oblasť až po výrobu prvotného výrobku z dreva sa zdá byť už uzavretá z pohľadu materiálového zhodnocovania avšak napriek tomu sa stále stretávame s nedostatočným dôrazom pri sortimentácii, neschopnosťou spracovať niektoré kvalitatívne stupne a/alebo schopnosťou dostatočne využiť vlastnosti tej-ktorej dreveniny. Osobitne je potrebné spomenúť nízku schopnosť správne zareagovať pri kalamitách.

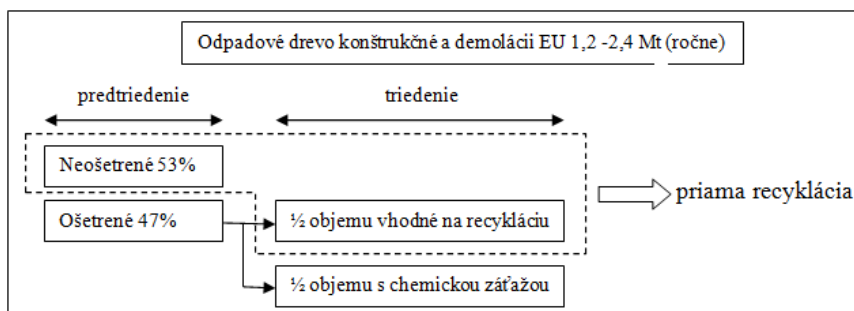
Sekundárna zodpovednosť je to, čo chceme v súčasnosti docieľiť a to je „**kaskádovo**“ využívať drevnú hmotu podľa segmentov odpadového dreva. Nasledujúce segmenty odpadového dreva spoločne predstavuje najväčšie využitie dreva podľa objemu v súčasnosti v EU:

a) Konštrukčné odpadové drevo a drevo z demolácii budov

V súčasnosti sa väčšina vyťaženého dreva spotrebuje na stavebné účely. Zvyšky dreva sa vytvárajú vo forme odrezkov, polámaných kúskov, obalov alebo nosných konštrukcií už počas stavebných procesov. Štatistiky o dreve neobsahujú samostatnú kategóriu pre tieto množstvá, ale poskytujú základ pre hrubý odhad tohto toku odpadu v EÚ v rozmedzí 1,2 až 2,4 Mt ročne. Jednou z veľkých výziev je ekonomický zber pomerne malých a rozptýlených množstiev. Súčasťou problému je, že tento druh odpadu sa často nezhodnocuje osobitne, ale naopak sa zbiera, nakladá s ním aj zneškodňuje v zmesi s iným stavebným a demolačným odpadom. V súčasnosti recyklačné kanály závisia spôsobu triedenia a klasifikácie dreveného odpadu. Predpisy o materiáloch v drevotriekovom priemysle sú také, že drevený tento odpad je z veľkej časti vylúčený z recyklácie.

Dôležitú úlohu zohráva to, že pre toto drevo všeobecne predpokladá prítomnosť kontaminantov. Iba veľmi málo krajín prijalo legislatívny rámec, ktorý klasifikuje drevený odpad a snaží sa zabezpečiť, aby bolo možné určiť a spracovať recyklovateľné množstvá oddelene od potenciálne kontaminovaných. Väčšina krajín však uplatňuje všeobecné právne predpisy o odpadovom hospodárstve (napr. rozlišovanie medzi nebezpečným a nie nebezpečným) aj na drevený odpad. Znečistenie dreveného odpadu môže byť obzvlášť zložité a môže mať charakter aj chemický aj fyzikálny (napr. cudzí materiál). Pre stavebné drevené prvky sa navyše predpokladá ďalšie riziko, pretože medzi ne patria komponenty, ktoré mohli byť ošetrené konzervačnými látkami. Nemôžeme poskytnúť záruky, či to tak skutočne bolo alebo nie, pokiaľ nie je poskytnuté laboratórne testovanie.

Významné zlepšenie v oblasti opätovného použitia by sa dalo dosiahnuť, keby sa použili schémy separácie zdrojov a predtriedenia. To by si zase vyžadovalo selektívnejšie búracie, pomocné mobilné zariadenia na rýchlu detekciu alebo označenia (ošetreného a neošetreného) dreva. Tieto techniky ešte nie sú rozšírené, pretože je stále potrebné ich spoľahlivosť ďalej rozvíjať a znižovať s nimi spojené náklady. Menej komplikované spôsoby predtriedenia však môžu byť dôležité, ak po nich nasleduje sofistikovanejšie stacionárne triedenie a ďalšie rôzne opatrenia na odstránenie kontaminantov, pre ktoré už existujú praktické a ekonomicky únosné čistiace techniky.



Obr. 4: Kaskádového využívanie konštrukčné odpadové drevo a drevo z demolácii budov.

Štúdie ukázali, že asi 53% celkového stavebného bolo neošetrených (Obr. 4). Zvyšok bol rozdelený rovnakým dielom medzi dve kategórie „upravené drevo“ a „drevo s nebezpečnou kontamináciou“. Ďalšie štúdie ukázali, že podiel „neošetreného dreva“ sa pohybuje v rozmedzí 36 - 45%, jednoduché predtriedenie a techniky selektívneho búrania by umožnili asi dve tretiny tohto materiálu správne oddeliť a použiť na recyklačné účely. Pri tomto

prešetrovaní sa tiež zistilo, že v priemere viac ako 70% drevených komponentov malo opakovane použiteľnú kvalitu na renováciu.

Celkové vyhlíadky kaskádovania stavebného dreveného odpadu majú mierne pozitívne vyhlíadky. Postupom času došlo k postupnému znižovaniu používania škodlivých látok pri konzervácii dreva, a to predovšetkým v dôsledku chemickej regulácie, ktorá zahŕňa a zakazuje rastúci počet týchto látok. Detekčné technológie sa navyše neustále zdokonaľujú.

b) Odpadové aglomerované materiály na báze dreva

Drevotriekové dosky v súčasnosti dominujú výrobe aglomerovaných materiálov na báze dreva. Ďalšími hlavnými segmentmi sú polotvrdá drevovláknitá doska (MDF), drevovláknité dosky s vysokou hustotou (HDF) a dosky s orientovanými vláknami (OSB). Asi jedna tretina dreva na ich výrobu pochádza z recyklovaného dreva a asi 15% objemu tvoria nedrevné komponenty (živica, chemikálie vrátane vosku, farbív a zmáčadiel...). Údaje o toku dreva naznačujú, že drevotriekové dosky sú jediným segmentom, kde sa v súčasnosti vo väčšej miere používa zhodnocované drevo.

Výhodou drevotriekových dosiek je, že sa dajú vyrobiť z rôznych druhov surového dreva. Výhodou je nižšia vstupná cena za recyklované drevo a jeho nízky obsah vlhkosti, ktorý výrazne znižuje množstvo energie potrebnej na sušenie. Nevýhodou je znečistenie drevených častíc. Fyzické triedenie je čoraz viac potrebné na zníženie chemickej kontaminácie. Separovať a odstraňovať kontaminanty je extrémne dôležité. Existujú tiež pomerne prísne obmedzenia týkajúce sa recyklácie OSB a drevotriekových materiálov späť do nových dosiek (Tab. 1). Dokonca použité drevené palety, veľmi vyhľadávaný vstup pre výrobu drevotriekových dosiek, už nie je ľahké recyklovať kvôli kompozitným výrobkom, ktoré zahŕňajú aj plasty vo zvyšujúcich sa množstvách.

Tab. 1: Limitné hodnoty kontaminantov pre aglomerované materiály na báze dreva. Tabuľka obsahuje odporúčané hodnoty pre členov EPF (European Panel Federation).

Chemický kontaminant	Limitná hodnota (g/kg a.s.)
Arzén	0,025
Kadmium	0,050
Chróom	0,025
Meď	0,04
Olovo	0,09
Ortuť	0,025
Fluór	0,1
Chlór	1,0
Pentachlórfenol (PCP)	0,005
Kreozot (Benzo(a)pyrén)	0,0005

Vyváženejšie nariadenia a harmonizácia podmienok by mohli pridať na stabilitu v kaskádovom využívaní segmentu odpadových aglomerovaných materiálov. Rastúce očakávania od výrobkov a zvyšujúca sa rozmanitosť materiálov na trhu zvyšujú výzvu integrovať druhotné suroviny do výroby a zvládnuť klesajúcu čistotu spätne získaných objemov dreva, čo podnecuje ďalší vývoj technológie čistenia recyklovaného dreva. Najnovší

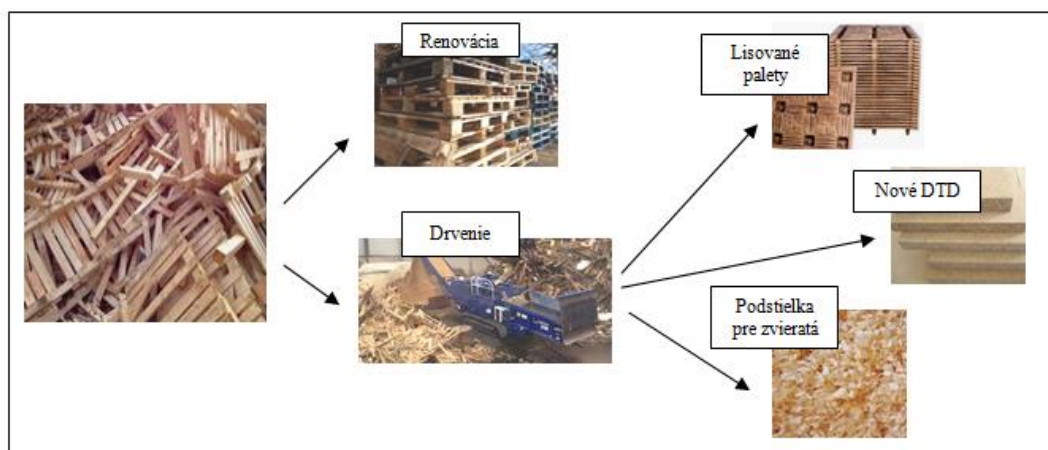
vývoj zahŕňa ekologické a suché čistenie recyklovaného dreva s cieľom získať materiál blízky kvalite pôvodného dreva. Tieto technológie založené na vysokej intenzite separácie a preosievaní materiálových vstupov pre rôzne vrstvy dosiek sú schopné eliminovať asi 98% znečisťujúcich látok z materiálového toku.

c) Odpadové obalové materiály na báze dreva

Drevené obaly zahŕňajú drevené palety, prepravky, krabice a priemyselné obaly. Z tohto množstva tvoria drevené palety tvoria asi 75%, zvyšok sú priemyselné a ľahké obaly. 90% paliet je vyrobených z dreva. Predpokladá sa, že v EÚ cirkuluje asi 2,5 mld paliet. Na tento segment sa ročne spotrebuje asi 17,3 mil. m³ dreva, čo je zhruba 17% výroby reziva v EÚ.

Drevené palety sa často vyrábajú podľa štandardizovaných formátov, aby sa uľahčilo ich opätovné použitie. Drevené obalové materiály v EÚ sú zvyčajne vyrobené z čistého rezaného dreva, čo z neho robí atraktívny materiál pre materiálové zhodnotenie. Na zníženie rizika zavlečenia karanténnych škodcov spojených s prepravou prostredníctvom medzinárodného obchodu sa používalo aj chemické ošetrovanie metylbromidom, čo bolo väčšinou krajín zakázané od roku 2010. Preto sa neočakáva, že ošetrovanie metylbromidom už nepredstavuje prekážku pre kaskádové použitie odpadu z drevených obalov.

Z pohľadu kaskádového využívania je pre palety dôležité opätovné použitie. Priemerná životnosť palety 5 až 7 rokov. Výskum ukázal, že podiel nových paliet na trhu je 25% v Nemecku, 25% vo Francúzsku a 42% vo Veľkej Británii. Podľa Eurostatu v roku 2015 sa materiálovo zhodnotilo (recyklovalo) asi 37% paliet, dlhodobou ambíciou EÚ je 80%. Odpad z drevených obalov je všeobecne čistý a pozostáva hlavne z rezaného dreva, preto je vhodný na použitie v priemysle drevotriekových dosiek. Ostatné identifikované možnosti sú využitie drevného vlákna resp. drevných triesok na výrobu lisovaného dreva, čo je už zavedené v praxi, využitie vlákna pre celulózový a papierenský priemysel, avšak výroba buničiny preferuje potrebné čerstvé drevo a využitie ako podstielka pre zvieratá alebo v priemyselnom dizajne je štatisticky zatiaľ málo významné (Obr. 5).



Obr. 5: Kaskádového využívania odpadových paliet na báze dreva.

Pre kaskádové využívanie drevených odpadových obalov boli identifikované tieto štyri základné bariéry: zvýšené požiadavky na bioenergie, problematický zber (sústredovanie),

nedostatočne zvládnutá separácia od chemicky zaťaženého dreva a limitované recyklačné aplikácie.

d) *Drevený nábytok po ukončení doby užívania*

Zhruba sa odhaduje, že v EÚ sa ročne zlikviduje až 10 miliónov ton nábytku, ale pravdepodobne oveľa väčšie množstvo dosiahne koniec svojej prvej fázy používania v rovnakom období. Viac ako dve tretiny výroby drevotrieskových dosiek a asi polovica výroby MDF sú spotrebované týmto odvetvím. K tomu existuje trend zvyšovania podielu aglomerovaného dreva a lepenkových materiálov pri výrobe nábytku. Problémom nábytku pri recyklácii je jeho voluminóznosť a použitie rôznych materiálov a spôsobov ich spájania pri samotnej separácii materiálov. Okrem toho už separovaná odpadová MDF nemá koncepčne vyriešenú recykláciu. Preto väčšina odpadového nábytku končí na skládkach komunálneho odpadu alebo sa likviduje incineráciou. Otázka recyklácie starého nábytku je stále otvorená, zavedenie zodpovednosti za vznik odpadu sa bude pravdepodobne musieť riešiť poplatkami už pri jeho výrobe.

4. Koncept bioraфинérie v kontexte kaskádového využívania dreva

Bioraфинérie môžu slúžiť ako východiskový bod pre kaskádové použitie dreva (jednostupňový model), ako aj pre využitie drevených vlákien neskôr v kaskádovom reťazci (viacstupňový model) tak, že sa zabráni akýmkoľvek tokom odpadu, alebo sa optimalizuje výstup produktu s vyššou pridanou hodnotou (upcycling). Vis a kol. (2016) zostavili štyri scenáre pre bioraфинérie podľa poznatkov dnešného výskumu (Schéma 1-4).

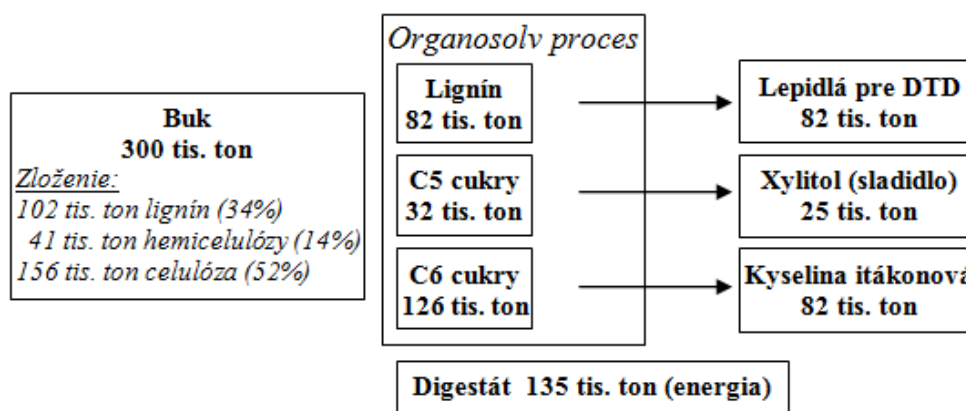


Schéma 1: Scenár materiálových tokov bioraфинérie (Organosolv proces) pre listnaté dreviny. Kyselina itákonová má široké využitie v kozmetike.

Pre prvé tri scenára je nosným transformačným procesom drevnej hmoty na medziprodukty tzv. organosolv proces, čiže sa v procese používajú organické rozpúšťadlá za účelom rozpustiť rozpustnú časť lignínu a hemicelulózy a uvoľniť celulózu pre ďalšie použitie. Vznikajúce medziprodukty (lignín a cukry C5, C6) sa ďalej transformujú v chemických procesoch na valorizované materiály s uplatnením v potravinárstve, kozmetike, biopalivách a pod.

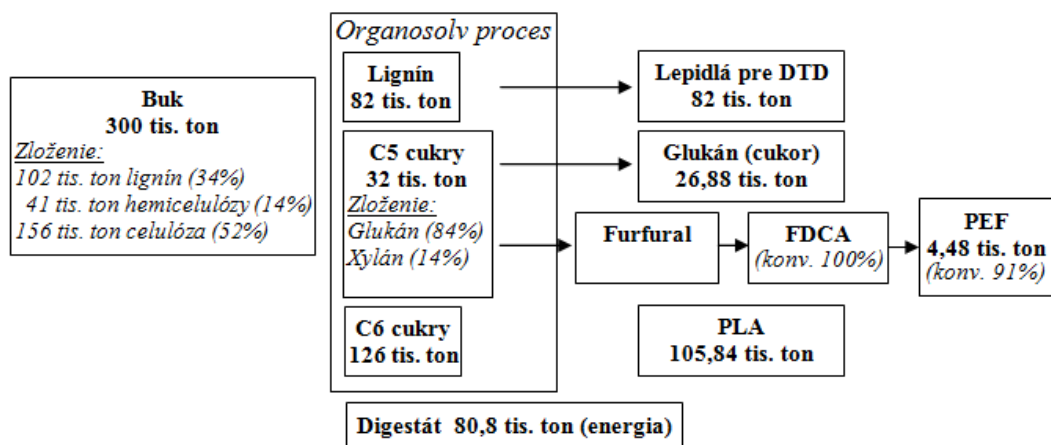


Schéma 2: Scenár materiálových tokov biorafinérie (Organosolv proces) pre listnaté dreviny. Kyselina polymliečná (PLA) má perspektívu v baliarenskom priemysle ako náhrada za polyetylén.

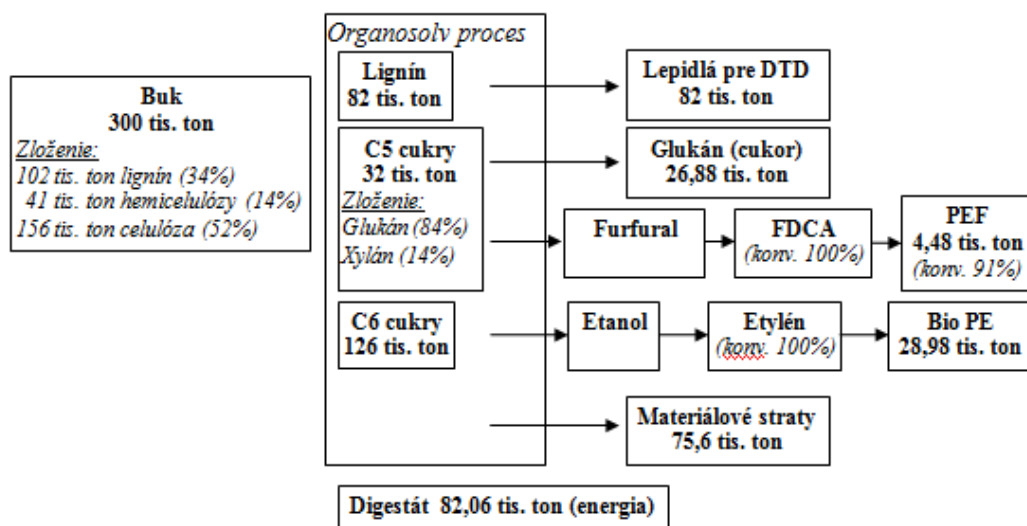


Schéma 3: Scenár materiálových tokov biorafinérie (Organosolv proces) pre listnaté dreviny.

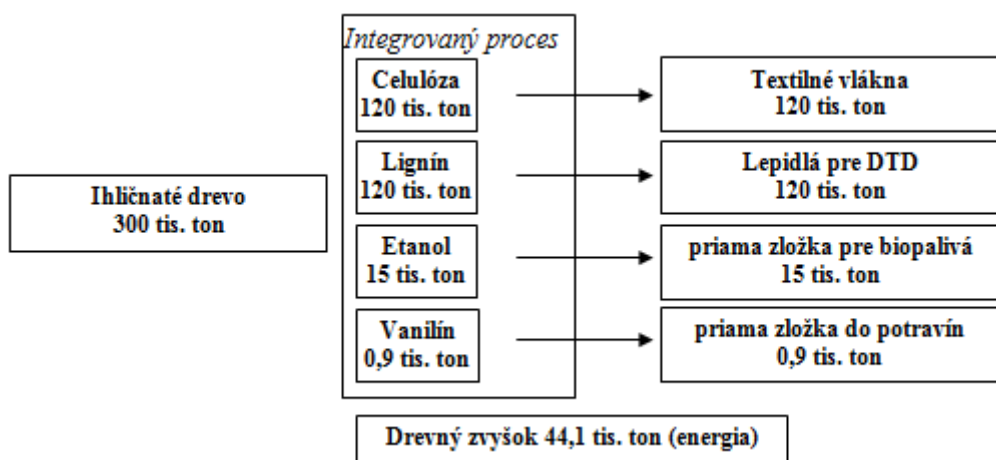


Schéma 4: Scenár materiálových tokov biorafinérie (Integrovaný proces) pre ihličnaté dreviny.

Integrovaný proces by mohol byť zaujímavý pre transformáciu celulózových fabriek. Mnohé spoločnosti už prešli na výrobu zaujímavejších produktov s vyššou pridanou hodnotou ako je napr. textilné vlákno.

Záver

Existuje silná potreba vypracovania spoločne dohodnutej a všetkými akceptovanej koncepcie kaskádového využívania dreva medzi tvorcami politík, výskumníkmi aj priemyslom. Jednotlivé „kaskády“ sa budú zakladať, iba ak budú mať ekonomický zmysel, ktorý môžu značne ovplyvniť politické rozhodnutia, nepriaznivo ich ovplyvňujú napr. stimuly pri bioenergiách. Skutočnosť, že biomasa (vrátane dreva a výrobkov z dreva) bola vybraná ako jedna z primárnych prostriedkov na dosiahnutie cieľov v oblasti energie z obnoviteľných zdrojov v členských štátoch EÚ, predstavuje potenciálnu bariéru pre vývoj a ďalšie vytváranie kaskád pre drevnú biomasu, pretože prvé použitie (materiál alebo energia) vlastne určuje konečné materiálové toky. Spoľahlivá klasifikácia a systémy triedenia odpadového dreva sú mimoriadne dôležité pre funkčné recyklačné systémy. Je potrebná podpora širokej propagácie pozitívnych príkladov už zavedených kaskádových a recyklačných systémov. Biorafinérie môžu zohrať pri valorizácii drevnej hmoty dôležitú úlohu v budúcnosti. Ich politická podpora zo strany jednotlivých štátov EÚ bude nevyhnutná aby mohli byť teoretické scenáre pretransformované do praxe.

Podakovanie

„Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na Záklađe Zmluvy č. APVV-17-0330“.

Použitá literatúra

1. Vis, M., Mantau, U., Allen, B., (Eds.), 2016: Study on the optimised cascading use of wood. No 394/PP/ENT/RCH/14/7689. Final report. Brussels 2016. 337 p.
2. Vojta, A., Havlín, D., Ihnát, V., Pažitný, A., 2019: Optimalizácia postupov opätovného zhodnocovania drevených výrobkov po skončení doby ich používania vzhľadom k ich chemickej záťaži. In: Zborník výskumných prác, Január 2019, str. 24-33.
3. Vojta, A., Smolár, M., Ihnát, V., Havlín, D., Mikulášik, R., Balberčák, J., Kuňa, V., Opálená, E.: Chemická záťaž v starých výrobkoch z dreva. In: Zborník výskumných prác, Január 2020, str. 62-72.

Mechanická dezintegrácia dendromasy pre výrobu biopalív druhej generácie

Alois Vojta

Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s. Bratislava

Slovenský drevársky výskumný ústav

vojta.sdvu@vupc.sk

Abstrakt

Najrozšírenejším surovinovým zdrojom pre výrobu celulózového bioetanolu druhej generácie je lignocelulózová biomasa vrátane zdrevnatenej dendromasy. Primárne zdroje dendromasy pochádzajú z lesného hospodárstva a poľnohospodárstva (výmladkové plantáže), sekundárne z drevospracujúceho priemyslu (priemyselné odpady), alebo z iných zdrojov ako sú napríklad komunálne odpady - staré výrobky z dreva po skončení doby ich používania.

Článok poskytuje prehľad o jednotlivých druhoch disponibilných zdrojov dendromasy na Slovensku vo vzťahu na ich mechanické spracovanie na technologickú štiepku ako vstupnú surovinu pre výrobu biopalív druhej generácie. V článku sú prezentované súčasné strojnotechnologické drviace a štiepkovacie zariadenia prevážne európskych výrobcov.

Kľúčové slová: Biomasa, dendromasa, mechanická deštrukcia, drviče, štiepkovače, štiepky, piliny, kusový drevný odpad, tenčina, staré výrobky z dreva po skončení doby ich používania.

Úvod

Dezintegrácia je všeobecný názov pre rôzne technologické postupy zmenšovania častíc tuhých materiálov, napr. drvenie, mletie, strúhanie, strihanie, rezanie a sekanie. Proces dezintegrácie ovplyvňujú okrem konštrukčných a exploatačných parametrov strojnotecnologických zariadení použitých na mechanickú dezintegráciu aj niektoré vlastnosti dezintegrovaných materiálov, hlavne ich vlhkosť, koeficient trenia, tvrdosť, súdržnosť a pružnosť. Proces dezintegrácie významne ovplyvňuje aj účel, na ktorý budú dezintegrované častice slúžiť /nadväzná technológia ich ďalšieho spracovania alebo použitia/.

Spôsoby dezintegrácie tuhých látok

Materiál, ktorý sa má dezintegrovat', môže byť mechanicky silovo atakovaný týmito spôsobmi: (A) strihom, kde ide o dezintegráciu, pri ktorej sa pôsobí na delený materiál tlakom pomocou ostrého nástroja /strihanie, rezanie, strúhanie, čiastočne aj mletie/, (B) tlakom, kde ide o dezintegráciu materiálu účinkom tlaku plochého nástroja /drvenie, čiastočne mletie/, (C) rozotieraním, kde sa na dezintegrovaný materiál pôsobí kombináciou tlaku a šmyku /drvenie, mletie/, (D) úderom, kde sa na dezintegrovaný materiál pôsobí údermi plochých nástrojov /drvenie, mletie, šrotovanie/. Pri voľbe vhodného spôsobu mechanickej dezintegrácie materiálu sa vychádza z jeho geometrických a fyzikálnych vlastností.

Spôsoby mechanickej dezintegrácie sa líšia podľa fyzikálnych vlastností materiálu: (a) tvrdý materiál: dezintegrácia tlakom a úderom, (b) stredne tvrdý materiál: dezintegrácia tlakom a úderom, menej vhodné je rozotieranie, (c) mäkký materiál: dezintegrácia strihom, tlakom, rozotieraním, menej vhodné je úderom, (d) krehký materiál: dezintegrácia tlakom,

úderom, menej vhodné je rozotieraním, (e) elastický materiál: dezintegrácia strihom, (f) húževnatý materiál: dezintegrácia strihom, (g) vlákňitý materiál: dezintegrácia strihom, menej vhodné sú rozotieraním a úderom.

Podľa konštrukcie rozdeľujeme dezintegračné strojno-technologické zariadenia na: (a) tanierové /dezintegrácia rozotieraním/, (b) valcové /dezintegrácia tlakom, strihom a rozotieraním/, (c) úderové /dezintegrácia úderom/, (d) kužeľové /dezintegrácia tlakom a rozotieraním/, (e) kolesové /dezintegrácia tlakom a rozotieraním/, (f) vibračné /dezintegrácia tlakom/, (g) nožové /dezintegrácia strihom/.

Rozdelenie dezintegračných strojno-technologických zariadení

Dezintegrátory je spoločný názov pre stroje nazývané aj ako drviče, mlyny, štiepkovače, sekačky. Všetko sú to stroje pracujúce na podobnom princípe. Dezintegračné stroje využívané pri nakladaní s odpadmi boli väčšinou využívané už v skoršej dobe v iných sférach priemyslu. Až neskôr keď sa stalo dôležitejšie nakladať z odpadmi čo najefektívnejšie, vznikla väčšia potreba využitia dezintegrátorov v odpadovom hospodárstve. Veľa dezintegračných strojov bolo pôvodne využívaných pri zdobňovaní a spracovaní hornín, a preto v tejto sfére je aj najprepracovanejšie rozdelenie strojov a terminológia. V oblasti odpadového hospodárstva dreva sa dezintegrátory delia na mlyny a drviče, v oblasti spracovania drevných odpadov sa dezintegrátory delia na drviče a štiepkovače. Z dôvodu existencie veľkého množstva dezintegračných strojov a ich využitia v širokom spektre činností je delenie a označovanie dezintegračných strojov nejednotné. Označovanie a delenie strojov sa líši nie len medzi rozdielnymi odbormi, ale aj v rámci jedného odboru. Bežne sa stáva, že rovnaký stroj je označovaný viacerými názvami. Tiež prichádzajú na trh stále nové stroje, ktoré majú v sebe použité prvky z viacerých rozdielných dezintegrátorov súčasne. Takéto stroje je potom obtiažne zaradiť do určitej skupiny. Je potrebné si uvedomiť aké množstvo rôznych odpadov (rôzne mechanické a fyzikálne vlastnosti) vznikajúcich v jednotlivých oboroch lesníctva, drevárskeho a nábytkárskeho priemyslu existuje. Takmer každý tento odpad je potrebné alebo vhodné pred ďalším spracovávaním dezintegrovať. Z toho vyplýva variabilnosť prevedenia a výkonnosti rôznych dezintegračných strojov pre rôzne materiály.

1. Dezintegrácia dendromasy

Dezintegrácia lignocelulózovej biomasy je delenie rastlého dreva, ako napr. lesných sortimentov s nízkou kvalitou dreva, odpadových lesných sortimentov, priemyselného drevného odpadu a dreva zo starých výrobkov z dreva po skončení doby ich používania na časti a častice (štiepku, triesku, vlákno) (Obr. 1).



Obr. 1: Drevné štiepky, triesky a drevné vlákna.

Veľkosť výstupnej frakcie je definovaná: počtom rezných nástrojov, rozmermi drviacich/sekacích kotúčov, počtom rezných klinov, roztečou medzi reznými klinmi, vstupným materiálom, nadväzným spôsobom technologického využitia frakcie, veľkosťou otvorov roštu pod pracovným priestorom drviča (4). Pre výrobu drevných častíc sa používajú strojné zariadenia s reznými alebo drviacimi nástrojmi, upevnenými na pohyblivých nosičoch (Očkajová a Kučerka 2011).

1.1 Dezintegrácia potŕažobných zvyškov /vetvy, pne a korene, vrcholce stromov/, tenčiny a priemyselne nespracovateľnej hrubiny z prebierok a prerezávok.

Hlavným zdrojom dendromasy na Slovensku je lesné hospodárstvo. Na účely výroby bioetanolu druhej generácie je možné okrem časti vytŕaženého dreva, ktorá nie je z hľadiska kvality vhodná pre použitie v drevospracujúcom priemysle, využiť aj tzv. zvyšky po ťažbe (vrcholové časti stromov, konáre a vetvy), tenčina stromov, kalamitné drevo (vyvrátené pne, koreňové časti stromov), prerezávky, manipulačné odpady a pod. (Obr. 2).



Obr. 2: Exploatacia zvyškovej dendromasy - koreňov a pňov po lesnej ťažbe (vľavo), skládka zvyškovej dendromasy (vľavo).

Tenčina je drevo s kôrou z korunových častí alebo kmeňov ťažených stromov s hrúbkou do 7 cm. Priemyselne nespracovateľná hrubina je drevo z korunových častí stromov hrubšie ako 7 cm, ktoré sa po oddelení kmeňa stromu použije na výrobu štiepok.



Obr. 3: Horizontálny mobilný drvič lesnej biomasy HG 4000 fy Vermeer, USA.

Slovensko s výmerou lesa približne dva milióny hektárov je schopné ročne vyprodukovať približne 4,5 milióna ton dendromasy. V súčasnosti sa využíva len 1,8 milióna ton, najmä vo forme drevnej štiepky na výrobu energie (Obr. 3). Štiepka je drvené drevo z konárov a iných zvyškov porastov nevhodných na iný spôsob spracovania. Na drvenie sa používa štiepkovač, ktorý hmotu spracováva priamo na mieste ťažby. Kvalitné drevo sa odváža na ďalšie priemyselné spracovanie, menej kvalitné sa využíva na výrobu štiepky. Tá následne sa dá využiť aj pre výrobu bioetanolu druhej generácie (Příhoda 2008).

Výhody dendromasy

Jednou z najväčších výhod dendromasy je jej lokálna dostupnosť, čo umožňuje eliminovať náklady na dovoz. Existujú aj možnosti využitia odpadových materiálov z drevospracujúceho priemyslu (odrezky, kusový odpad), z lesníctva (odpad zo spracovania dreva, preriedovania lesov, lesná biomasa).

Tab. 1: Využitelný potenciál lesnej lignocelulózovej biomasy v SR.

Zložka stromovej dendromasy	Ročné množstvo (t)
Kôra	360 000
Tenčina, nezužitkovaná hrubina	375 000
Pne a korene	25 000
Palivové drevo	485 000
Prestarnuté porasty	300 000
Manipulačné odpady	120 000
Odpady z prerezávok	15 000
Odpady po mechanickom spracovaní dreva v organizáciách LH	130 000
Spolu	1 810 000
Z toho množstvo, ktoré je energeticky využívané v súčasnosti	768 000

Dendromasa, z ktorej sa vyrába drevná štiepka, sa môže cielene pestovať na tzv. výmladkových plantážach (Obr. 4).



Obr. 4: Plantáž rýchlorastúcich drevín pre energetické využitie (vľavo), ťažba rýchlorastúcich drevín na plantáži zároveň s ich štiepkovaním s vyfukovaním hotových štiepok do mobilného sila.

Na tento účel sa využívajú dreviny ako napríklad rýchlorastúci (japonský) topoľ, pavlovnia alebo vŕba. Rýchlorastúce topole sa vyznačujú rýchlym rastom po zrezaní a vysokým výnosom nadzemnej biomasy v krátkom čase, umožňujú teda žatvu zhruba raz za tri roky. Životnosť plantáže je až 20 rokov, je teda možné dosiahnuť aj sedem žatiev a celkový výnos je až 90 t/ha v trojročnej perióde. Rýchlorastúci topoľ je zároveň nenáročný na podmienky a darí sa mu až do nadmorskej výšky 600 m, je teda vhodný pre pestovanie na väčšine území strednej a východnej Európy. Je ho možné využiť i na pozemkoch, ktoré nie sú príliš vhodné pre tradičné poľnohospodárstvo, ako aj v záplavových oblastiach. Vlhkosť drevnej štiepky po žatve, prebiehajúcej hlavne na konci zimného obdobia, dosahuje zhruba 50%. Drevná štiepka sa potom suší na slnku a vetre a dosuší sa v riadne vetraných skladoch (Trenčiansky a kol. 2007).

1.2 Dezintegrácia dendromasy z pestovania a ošetrovania ovocných stromov v ovocných sadoch a záhradách /orezané konáre, pne a korene ovocných stromov, kríkov a viniča/.

Jedná sa o dendromasu z orezu stromov a kríkov v ovocných sadoch, zdrevnatenú biomasu z orezu viníc, dendromasu celých ovocných stromov po skončení doby ich životnosti alebo po rekultivácii sadov alebo viníc, menej hodnotnú dendromasu z výrubu stromov brehových porastov, líniových výsadiieb pozdĺž komunikácií a mestskej zelene (Obr. 5).



Obr. 5: Skládka orezaných konárov z líniových výsadiieb pri komunikáciách a brehových porastov (vľavo), mobilný drvič lesnej biomasy HG 6000 fy Vermeer, USA (vpravo).

1.3 Dezintegrácia rýchlorastúcich drevín pestovaných plantážnym spôsobom.

Veľmi perspektívnym zdrojom je dendromasa, ktorú možno produkovať na málo produktívnych poľnohospodárskych pôdach, resp. iných nelesných pozemkoch. Najčastejšie sa jedná o intenzívne porasty rýchlorastúcich drevín (tzv. energetické porasty). Časť týchto pozemkov je už v rôznej miere zalesnená v dôsledku prirodzenej sukcesie drevín. Na energetické účely sa najčastejšie využívajú rýchlorastúce druhy topoľov, vŕb, agáta, osiky a jelše vysádzané v hustom pravidelnom spon. Na pestovanie energetických porastov sa otvára veľký priestor na takzvaných bielych plochách. Jedná sa o dlhodobu zalesnenú poľnohospodársku pozemky, evidované v katastri nehnuteľností ako druh poľnohospodárskeho pozemku, najmä ako trvalé trávne porasty alebo orná pôda. Porasty na bielych plochách, vytvorené najmä sukcesiou drevín, sa v súčasnosti nachádzajú na ploche približne 275-tisíc hektárov s celkovou zásobou 36,6 milióna metrov kubických dreva. Sortimentová štruktúra porastov na bielych plochách v porovnaní s porastmi na lesnej pôde je charakterizovaná vyšším podielom drevnej hmoty vhodnej na energetické využitie, najmä z korunových častí stromov. Porasty na bielych plochách sú vzhľadom na ich lokalizáciu dobre

prístupné a terénne pomery umožňujú využívanie efektívnych technológií. Na bielych plochách sa v súčasnosti nachádza približne 340-tisíc ton palivovej dendromasy, do roku 2025 sa predpokladá, že tento objem vzrastie na takmer 380-tisíc ton (Trenčiansky a kol. 2007).

1.4 Dezintegrácia kalamitnej drevnej hmoty priemyselne nespracovateľnej.

Kalamitou nazývame rozsiahle poškodenie porastov alebo celých lesných komplexov jedným alebo niekoľkými škodlivými činiteľmi. Vyskytujú sa prípady, keď prvotná kalamita spôsobená jedným činiteľom, napr. vetrom, postupne prerastie do následnej kalamity spôsobenej ďalšími činiteľmi, napr. podkôrnym hmyzom, čím sa pôvodný rozsah dokáže niekoľkonásobne zväčšiť (Obr. 6).



Obr. 6: Následky víchrice na lesnom poraste (vľavo), mobilný drvič kalamitnej drevnej hmoty a lesných zvyškov po ťažbe, typ HG 6000 TX, firmy Vermeer, Iowa, USA.

1.5 Dezintegrácia drevnej hmoty z drevárskej prvovýroby /jemnozrnné odpady, kusový odpad/.

Jemnozrnné odpady (piliny, prach, stružliny) vznikajú po poreze a následnom mechanickom opracovaní dreva. Piliny sú triesky menších rozmerov, vznikajúce pri rezaní a vŕtaní dreva v drevospracujúcom priemysle. Kusový drewný odpad sú kusy dreva s kôrou alebo bez kôry často s prímiesou kovov alebo pôdných silikátov, vznikajúce pri poreze guľatiny a následnom mechanickom delení reziva a pri výrobe prírezov a polotovarov z masívneho dreva (Obr. 7).



Obr. 7: Skládka kusového drewného odpadu v drevárskom závode (vľavo), krytá skládka odrezkov dreva z prvovýroby a manipulácia s nimi (v strede), skladovanie drewných odrezkov v osobitnom kontajneri (vpravo).

V každom drevospracujúcom závode vzniká drevný odpad z výroby drevených polotovarov alebo výrobkov. Veľké drevospracujúce závody a kombináty uplatňujú vlastné technológie spracovania týchto odpadov s využitím vlastných drviacich zariadení na výrobu štiepky alebo triesky. Malé drevospracujúce závody využívajú, ak je to pre nich ekonomicky výhodné, spoluprácu so špecializovanými firmami, ktoré dovezú vlastné drviče a vykonajú drvenie u producenta drevných odpadov na zákazku (Obr. 8 a Obr.9).



Obr. 8: Pomalobežný drvič dreva VB 750 DK (vľavo) na drvenie odpadového dreva z drevárskej výroby. Priečny magnet separuje kovové časti, VB 950 DK (vpravo) si poradí aj s prímiesami ako sú kovy a silikáty.



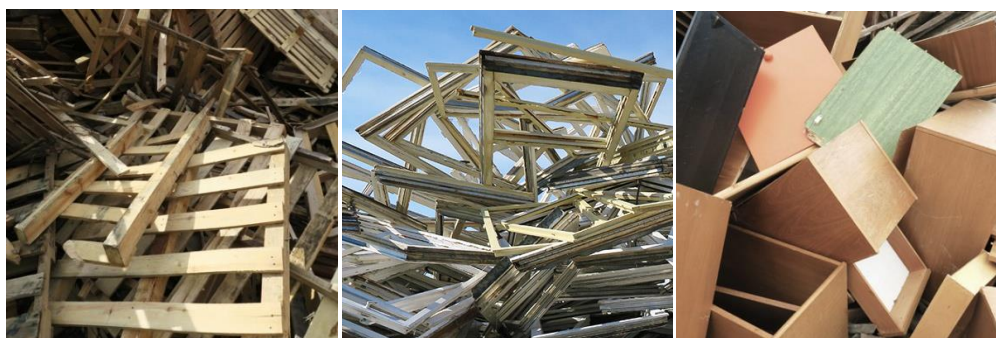
Obr. 9: Štiepkovanie drevných odrezkov priamo v drevárskom závode mobilným štiepkovačom (vľavo), nožové hlavy so sadami drviacich nožov štvorhriadeľového pomalobežného drviča RS 30 rakúskej fy Untha (vpravo).

1.6 Dezintegrácia drevnej hmoty zo starých výrobkov z dreva po skončení doby ich používania, vytriedených z komunálneho odpadu, bez chemického znečistenia.

Ide o komunálny a priemyselný drevný odpad (nábytok, palety, stavebný drevný odpad a pod.) (Obr. 10). Celková bilancia výskytu výrobkov z dreva po skončení doby ich používania v SR je uvedená v Tab. 2.

Tab. 2: Celková bilancia výskytu výrobkov z dreva po skončení doby ich používania v SR.

Zložka stromovej dendromasy	Ročné množstvo ton/rok
Drevený komunálny odpad TKO	133 000
Starý nábytok	320 000
Drevený stavebný odpad	30 000
Drevené odpady z drevovýroby /piliny, hobliny, odrezky/	387 800
Drevené odpady z drevovýroby / kôra a odpadové drevo/	226 700
Drevené obaly /palety, debny, prepravky, káblové bubny/	9 600
Drevené výrobky z exteriérov a záhradnej architektúry	2 300
Drevené športové potreby a drevené hračky	2 400
Drevené prepravné obaly	50 000



Obr. 10: Skládka starých drevených paliet, okenných rámov a starého nábytku k jeho recyklácii na nový výrobok.

Záver

Slovensko patrí medzi krajiny, ktoré majú tradície a pre budúcnosť aj nové ambície v oblasti ťažby a spracovania dendromasy, ale aj následnej obnovy lesov. Je potrebné investovať do modernej techniky na ťažbu dreva a tiež nasledného spracovania zostávajúcej zvyškovej dendromasy, aby bola ťažba dreva čo najefektívnejšia a pokiaľ možno čo najšetrnejšia pre ďalšiu obnovu lesa. Využitelný potenciál lesnej dendromasy ako aj lignocelulózovej biomasy z nelesných zdrojov tak, ako je uvedené v tejto štúdii vyššie, predstavuje surovina, ktorá svojimi parametrami nevyhovuje kvalitatívnym kritériám pre priemyselné spracovanie (rozmery, tvar, poškodenie) alebo inú podobu jej recyklácie. Je však ideálnym surovinovým zdrojom pre druhú generáciu biopalív. Vzhľadom na vývoj technológií energetického využitia drevnej biomasy sa predpokladá stagnácia spotreby kusového palivového dreva a rast produkcie štiepok energetických ako aj štiepok a triesok technologických.

Z hľadiska budúcnosti je štiepkovanie veľmi zaujímavý spôsob využitia dreveného odpadu. Takáto úprava je perspektívna aj pre odpad, ktorý vzniká priamo pri ťažbe dreva. Energetická štieпка sa spravidla vyrába z menej hodnotného odpadového dreva, tenčiny,

prebierok a kôry. Je perspektívna aj v budúcnosti pri energetickom zhodnocovaní plantáží z rýchlorastúcich drevín.

Aby sa zefektívnil proces výroby štiepky z tenčiny, bude vhodné v technológii rátať s preddrvením tenčiny a lesného odpadu priamo na mieste ťažby dreva. Tým sa výrazne zmenší objem lesného odpadu a znížia dopravné náklady na jeho približovanie do miest finálneho spracovania. Uvedená technológia znamená, že mobilné technologické linky na výrobu štiepky sa budú používať priamo v lokalite ťažby dreva. Ide o moderný technologický prístup - stroje k drevu oproti klasickému - drevo k stroju.

Výroba štiepky je vhodným spôsobom nielen energetického, ale aj materiálového zhodnotenia drevného odpadu.

Pod'akovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Integrovaná infraštruktúra 2014 - 2020 pre projekt: Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu LignoSilva (kód ITMS: 313011S735), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

Použitá literatúra

1. Očkajová, A., Kučerka, M., 2011: Materiály a technológie 1, Drevárske technológie, UMB, Banská Bystrica, ISBN 978-80-557-0262-9.
2. Příhoda, J., 2008: Technologie pro zpracování dendromasy - těžebních zbytků. Biom.cz [online], 2008-06-09 [cit. 2020-06-18].
3. Technické listy a prospekty výrobcov dezintegračných strojno- technologických zariadení.
4. Trenčiansky, M., Lieskovský, M., Oravec, M., 2007: Energetické zhodnotenie biomasy. Národné lesnícke centrum, ISBN 978-80-8093-050-9, Zvolen.
5. Višpel, M., 2011: Vplyv rozmerových parametrov výstupnej frakcie na voľbu nástrojov dvojrotorového dezintegračného stroja. Diplomová práca, Slovenská technická univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta, Bratislava.
6. Vojta, A., Šteller, Š., Ihnát, V., Neuschlová, E., Rigáň, P., 2012: Optimalizácia využívania výrobkov z dreva po skončení doby používania ich opätovným zhodnotením, štúdia. VÚPC Bratislava, Bratislava.

Vodný kvet ako celulóзовý materiál pre zdroj biopalív 3. generácie: zber a spôsoby predspracovania na hydrolýzu a následnú fermentáciu

Michal Halaj

Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s. Bratislava

halaj@vupc.sk

Abstrakt

Mikroriasy sú fotosyntetické mikroorganizmy s veľmi vysokou rýchlosťou fotosyntézy, rastu a produkcie biomasy. Tieto mikroorganizmy sa vyskytujú vo všetkých teritóriách našej planéty, ale hlavne vo vodných prostrediach, morských aj sladkovodných. Vypúšťaním odpadových vôd bohatých na dusík a fosfor a zvyšujúcou sa priemernou teplotou dochádza k premnoženiu mikrorias a vzniká na hladine súvislý povlak, tzv. vodný kvet. To spôsobuje problémy ako napr. úhyn rýb, znehodnotenie vody na úžitkové účely, ujmy na cestovnom ruchu. Zber tohto vodného kvetu sa môže zintenzívniť dopytom po takejto biomase na výrobu biopalív. Výhodou takéhoto druhu biomasy je, že je ľahšie degradovateľná než lignocelulóзовé materiály, ale zber a odvodňovanie biomasy je náročnejší. Tento článok je zameraný na prehľad týkajúci sa technológií zberu a predspracovania takéhoto druhu biomasy.

Kľúčové slová: Mikroriasy, sinice, vodný kvet, biopalivá 3. generácie, zber, predspracovanie.

Úvod

Mikroriasy sú buď jednobunkové alebo vláknité fotosyntetické mikroorganizmy, môžu tvoriť kolónie a veľkosť bunky je približne od 3 do 10 μm (Sastre 2012, De La Noue a De Pauw 1988, Lee a kol. 2014) , pričom kolónie môžu dosiahnuť niekoľko sto μm až niekoľko centimetrov (Nostoky) (Nozaki a kol. 2015, Roney a kol. 2009). Rôznorodosť u týchto druhov je omnoho vyššia, než u vyšších rastlín. Niektoré zdroje odhadujú počet druhov na 200 000 až niekoľko miliónov, z ktorých je známych približne 40-60 tisíc druhov (Norton a kol. 1996, Guiry 2012). Z celkového počtu mikrorias sa doposiaľ pestuje a priemyselne využíva len približne 15 kmeňov. Rýchlosť fotosyntézy u mikrorias je najvyššia, pričom majú 10-50 krát vyššiu rýchlosť fixácie CO_2 a vyššiu rýchlosť rastu ako suchozemské rastliny (Sastre 2012, Norton a kol. 1996, Yen a kol. 2013). Prvotná tvorba kyslíka je pôvodom z cyanobaktérií (modro-zelené riasy), ktoré mnoho literatúr radí medzi mikroriasy, ktoré žijú anaeróbne aj aeróbne a sú zodpovedné za tvorbu atmosférického kyslíka na Zemi približne pred 3,5 miliardami rokov (Kasting a Seifert 2002, Archer a Barber 2004, Friedl a kol. 2012). Väčšina mikrorias sa prevažne nachádza v morskej alebo sladkej vode, existujú však aj suchozemské druhy a druhy žijúce v extrémnych podmienkach ako je púšť, termálne pramene, sneh, čo dokazuje, že mikroriasy sú schopné okupovať všetky teritória našej planéty (Schaeffer a Krylov 2000, Teoh a kol. 2004, Sakai a kol. 1995, Castenholz 1976, Hu a kol. 2003., Garcia-Pichel a kol. 2001). V súčasnosti sa riasy podieľajú na približne 50% fotosyntetickej produkcie kyslíka na Zemi a odhaduje sa, že sú schopné akumulovať približne 110-

120 × 10¹² kg uhlíka za rok (Giordano a kol. 2005). Pojem mikroriasy zahrňuje veľký počet fotosyntetických organizmov, mnohí autori do tejto skupiny zaraďujú aj modro-zelené riasy, čiže **cyanobaktérie**, alebo ináč aj **sinice**. Sú to však prokaryotické organizmy, ale životným štýlom sú podobné eukaryotom (Friedl a kol. 2012).

Záznamy o využití mikrorias sa datujú do staroveku ako alternatívna potrava počas krízových situácií. V starovekej Číne počas hladomoru konzumovali Nostoky a súčasne sa u nich zistili zdravotne prospešné účinky. Nostoky boli známe dokonca aj v severských civilizáciách. Konzumácia Spiruliny bola známa u Aztékov pred dobytím Mexika Španielmi a aj na území dnešného Čadu (Roney a kol. 2009, Ciferri 1983, Abdulqader a kol. 2000).

V súčasnosti mikroriasy ukázali potenciál vo viacerých oblastiach. Vďaka vysokému obsahu rôznych nutričných látok, ako napr. esenciálnych polynenasýtených mastných kyselín, vitamínov, karotenoidov a pod. sa používajú ako výživové doplnky a aj ako alternatívne liečivá (napr. Chlorella, Spirulina). Taktiež majú potenciál ako živočíšna krmovina, pričom následné živočíšne výrobky ukázali vysokú kvalitu, ale vysoká výrobná cena takejto biomasy bráni takémuto využitiu. Taktiež ukázali potenciál napr. na čistenie odpadových vôd, v kozmetike, výrobe biodegradovateľných plastov a pod., ale najmä na výrobu biopalív 3. generácie (Sastre 2012, Borowitzka 2013).

Biopalivá 3. generácie

Zdrojmi biomasy pre biopalivá prvej generácie sú plodiny ako napr. kukurica (zrná), pšenica, cukrová trstina, repka, slnečnica a pod. Avšak výroba biopalív týchto jedlých plodín je na úkor produktov pre potravinársky priemysel. Preto sa začali ako zdroje biopalív využívať nejedlé plodiny, resp. ich časti ako sú napr. pšeničná slama, kukuričné vretená, kuchynský odpad ako aj divo rastúce rastliny a pod. Tieto zdroje sú označované ako prekurzory pre biopalivá 2. generácie. Nádejnými zdrojmi biomasy na produkciu biopalív sú aj mikroriasy, označované ako prekurzory pre biopalivá 3. generácie. Taktiež sú aj biopalivá štvrtej generácie, ktoré sú odvodené od kombinácie geneticky modifikovaných surovín (Sankaran a kol. 2020).

Niektoré druhy mikrorias obsahujú veľké množstvo zásobných polysacharidov (vyše 50% hmotnosti sušiny), vďaka čomu majú potenciál aj na výrobu etanolu z biomasy. (John a kol. 2011). Odhaduje sa, že mikroriasy vyprodukujú približne 50 -150 tisíc L/ha/rok etanolu. Tieto výťažky sú niekoľkonásobne vyššie než z rastlinných surovín ako napr. kukurica (4000 L/ha/rok), pšenica (2500 L/ha/rok), cukrová trstina (7000 L/ha/rok) (Mussatto a kol. 2010). Podobne, v prípade produkcie oleja a následnej konverzie na bionaftu transesterifikáciou, mikroriasy vyprodukujú viac než 100 000 L/ha/rok, oleja zatiaľ čo palma okolo 5000, kokos 2500, ricín 1400 a slnečnica len asi 900 L/ha/rok. (Ahmad a kol. 2011, Amin 2009, Suali, a Sarbatly 2012). Mikroriasy sú aj alternatívou pri produkcii bioplynu. V tomto prípade možno použiť priamo čerstvú vlhkú biomasu. Energetické nároky pre anaeróbne bioreaktory sú veľmi nízke, tým vyššie sú energetické výťažky. Viaceré experimenty ukázali výťažky bioplynu od 200 - 500 dm³/kg suchej biomasy (Dębowski a kol. 2013).

Mikroriasy sú vodné organizmy a na rozdiel od suchozemských plodín mnohé druhy je možné kultivovať v morskej a odpadovej vode. Vďaka tomu pri ich kultivácii nie je potrebné čerpať sladkú vodu z povrchových zdrojov (Brennan a Owende 2010). Na druhej strane sa udáva, že vstupné náklady na prevádzku priemyselnej kultivácie mikrorias sú vyššie než

energetický profit, čo ich robí zatiaľ neschopných konkurencie voči suchozemským rastlinám (Reijnders 2008). Preto sa treba zamerať aj na získavanie biomasy na energetické účely z prírodných zdrojov, ako napr. rieky, jazerá, moria.

Vodný kvet

Premnožením rias vo vodných plochách vzniká tzv. vodný kvet. Vodný kvet je hlavne zložený zo siníc a dinoflagelátov, čo tvorí štruktúru na povrchu vodnej plochy a vylučuje toxické metabolity, ktoré sú škodlivé pre rast fytoplanktónu, zooplanktónu a rias, ktoré netvorí kvet, teda dochádza k zníženiu biodiverzity. Z aplikačného hľadiska sa vodný kvet stáva problémom z dôvodu znehodnocovania vody na pitie, zavlažovanie ako aj rekreačné účely. Hlavnými príčinami vzniku vodného kvetu je eutrofizácia, spôsobená vypúšťaním odpadových vôd z domácností a priemyslu obsahujúce vysoké množstvo dusíka a fosforu ako nutrientov pre mikroriasy a zvyšujúca sa priemerná teplota. Okrem morských pobreží, sa vo veľkom množstve tvorí vodný kvet aj vo vnútrozemských jazerách a riekach (Kumar a kol. 2020, Shumway a kol. 2018). Tento problém sa taktiež vyskytuje aj v jazerách a riekach na Slovensku (Maková a Medo 2020, Karková a kol. 2014). Preto využitím vodného kvetu, teda jeho zberom za účelom spracovania na biopalivá môžeme sčasti vyriešiť aj tento problém a z malej sčasti aj problém týkajúci sa spotreby fosílnych palív. Takto získaná a následne spracovaná biomasa sa môže použiť buď priamo na výrobu biopalív alebo do kultivačných médií za účelom umelej monokultivácie (Kumar a kol. 2020, Duman a kol. 2019).



Obr.1 Vodný kvet na pobreží Floridy (vľavo) a Austrálie (vpravo). Zdroj: internet.



Obr. 2: Výskyt vodného kvetu na Slovensku – Rybník Koliňany (okres Nitra) (Maková a Medo 2020).

Zber mikrorias

Zber biomasy mikrorias zaberá asi 30% z výrobných nákladov. Tento proces zahŕňa dva kroky a to samotný výber biomasy z vody a následné zahusťovanie biomasy. Preto je dôležitý výber metódy s čo najnižšími nákladmi. V súčasnosti existuje viacero techník zberu mikrorias: flokulácia, filtrácia a flotácia (Salim a kol. 2011, Brennan a Owende 2010).

Flokulácia zahŕňa proces tvorby agregátov na zvýšenie hustoty buniek z fyzikálneho, chemického a biologického hľadiska. Chemické flokulanty sú buď anorganického pôvodu, napr. kationy Zn^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , magnetické nanočastice alebo organického, ako napr. chitozán, škrob, **kationizovaná nanocelulóza**. Povrch mikrorias všeobecne býva záporne nabitý kvôli aniónovým funkčným skupinám na bunkových stenách a extracelulárnych slizovitých obaloch. Absorpciou kationov z flokulantu sa obal zneutralizuje a dôjde k zhlukovaniu buniek. Táto metóda je náročná kvôli nákladom na flokulanty, preto je potrebný výber takýchto látok z hľadiska ceny a toxicity.

Na podobnom princípe pracuje aj elektrolytické získavanie mikrorias (elektrokoagulácia, elektroflotácia), pričom bunky mikrorias so záporne nabitými obalmi sa zhľukujú okolo anódy. (Duman a kol. 2019, Blockx a kol. 2019, Shuba a Kifle 2018, Karková a kol. 2014, Salim a kol. 2011).

Ďalšou metódou na zber mikrorias vo veľkom množstve je filtrácia. Je viacero filtračných techník, napr. vákuová filtrácia, filtrácia pod tlakom, tangenciálnym tokom a pod. Veľkosť pórov sa pohybuje od vyše 10 μm (makrofiltrácia), 0.1 – 10 μm (mikrofiltrácia), 0.02 – 2 μm (ultrafiltrácia) a pod 0.001 μm (reverzná osmóza). Táto metóda je tiež pomerne časovo aj finančne nákladná (Shuba a Kifle 2018).

Flotácia je založená na tvorbe mikrobublín na povrchu mikrorias, ktoré môžu obaliť bunku a tým vyplávať na povrch. Účinnosť tejto metódy závisí na veľkosti bublín, ktoré môžu byť rádovo v mikrometroch a dokonca v nanometroch. Hoci flotácia je metóda, pri ktorej nie sú potrebné žiadne chemikálie, sú veľmi obmedzené technologické a ekonomické možnosti (Shuba a Kifle 2018).



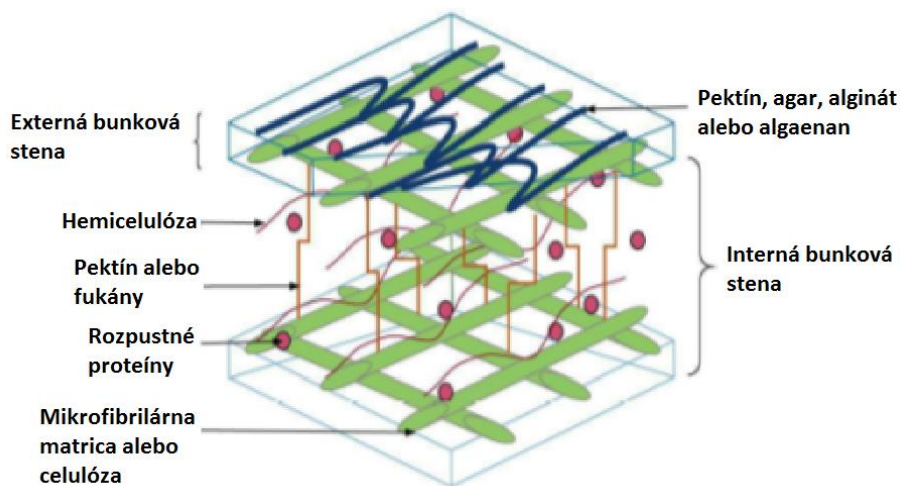
Obr. 3: Mechanický zber vodného kvetu (Karková a kol. 2014).

Predúprava biomasy mikrorias

Predúprava biomasy je energeticky náročný proces. Podmienky predúpravy závisia od typu biomasy, procedúry a príp. aj použitého rozpúšťadla. Metódy na predúpravu biomasy

z rias a tiež aj lignocelulózových materiálov spadajú pod štyri kategórie: fyzikálne, chemické, biologické a iné novo vyvinuté metódy. Výber metódy závisí od povahy materiálu a predúprava mikrorias je menej náročná ako v prípade lignocelulózových materiálov, v ktorých komplex lignín- hemicelulóza je ťažko degradovateľný (Sankaran a kol. 2020).

Všeobecné zloženie biomasy mikrorias pozostáva z lipidov (7% - 23%), karbohydrátov (4% - 57%) a proteínov (6% - 71%). Toto zloženie závisí od druhu mikrorias a vonkajších podmienok. Bunková stena mikrorias je primárne zložená z polysacharidov a iných zložiek, ako napr. proteínov, biopolymérov a kalcifikovaných štruktúr. Z organických zlúčenín, ktoré sú naviazané na bunkovú stenu, sú celulóza a hemicelulózy, ktoré majú nízku biodegradabilitu. Pevnosť bunkovej steny je druhovo závislá a hlavnými faktormi sú obsah celulózy, hemicelulózy a biodegradovateľných biopolymérov (napr. sporopoleín, polyterpény). Bunková stena siníc, na rozdiel od mikrorias, je zložená z peptidoglykánovej vrstvy, ktorá je omnoho jednoduchšia a tým aj ľahšie degradovateľná (Möllers a kol. 2014, Sankaran a kol. 2020).



Obr. 4: Zloženie bunkovej steny mikrorias (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Fyzikálne metódy predúpravy

Fyzikálne metódy využívajú buď mechanické alebo ožarovacie technológie, čím sa dá predísť použitiu napr. chemikálií a mikroorganizmov. Fyzikálne metódy majú účinok na zmenu plochy povrchu, veľkosti častíc, indexu kryštalinity a polymerizačného stupňa látok v biomase. Fyzikálne metódy predúpravy zahŕňajú priame kroky a majú nižšiu environmentálnu záťaž, ale sú energeticky náročné. Preto fyzikálne vlastnosti biomasy a technológia sú rozhodujúcimi faktormi na výber vhodnej metódy s ohľadom na rentabilitu (Sankaran a kol. 2020).

Hydrotermálna predúprava

Hydrotermálne spracovanie je metóda na rozbitie bunkovej steny mikrorias a gelatinizáciu intracelulárneho škrobu. Rozsah teplôt pre túto metódu je 60-180°C a využívajú sa krátke reakčné časy do 60 min. Navyše, v tejto predúprave sa kyseliny, zásady alebo obyčajná voda využívajú iba ako katalyzátory. Použitie čistej vody ako katalyzátora sa

ukazuje ako najzaujímavejšie, pretože neprodukuje toxický odpad a nevyžaduje neutralizáciu spracovaného materiálu. Nevýhodou tejto metódy sú nároky na zariadenie, pretože je potrebné pracovať pod vysokou teplotou a tlakom. Na zníženie energetických nárokov je možnosť kombinácie tejto metódy napr. s ultrazvukom, mikrovlnami, elektrickým impulzom a pod. Použitím veľmi agresívnych podmienok dochádza k degradácii materiálu a vznikajú vedľajšie nežiaduce produkty, napr. furfural (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Hydrotermálna karbonizácia a pyrolýza pracuje pri vyšších teplotách (až do 370 °C) a aj za pomoci katalyzátorov. Na tejto báze sa počas miliónov rokov tvorili fosílna palivá. Pri týchto teplotách dochádza k denturácii bunkových stien a uvoľňovania rôznych látok. Pri týchto procesoch dochádza k dehydratácii a dekarboxylácii, uvoľňuje sa voda, CO₂ a karboxylové kyseliny. Táto metóda degradácie je perspektívna pre biomasu mikrorias. Môže sa buď priamo degradovať biomasa alebo aj biomasa po extrakcii lipidov a prípadne aj odpadová voda po predspracovaní biomasy. Najviac štúdií je zameraných na priamu degradáciu biomasy na uhlie, organické chemikálie, palivá a pod. Takéto uhlie z mikrorias má podobné vlastnosti ako klasické uhlie (Sankaran a kol. 2020).

Predúprava elektrickým impulzom

Predúprava elektrickým impulzom je jednoduchá technológia založená na elektrine (nie na báze tepla) a jej priebeh trvá veľmi krátky čas, rádovo od nanosekúnd do milisekúnd, pri vysokom napätí od 100 – 300 V cm⁻¹ až do 300 kV cm⁻¹. Táto predúprava funguje aj pri nízkych aj pri vysokých koncentráciách buniek v kvapaline. Počas tohto procesu vzniká buď elektroporácia alebo elektropermeabilizácia. Elektrické pole vytvára rozdiely v napätí bunkovej steny a elektroporácia nastáva, keď sa prekročí určitá hranica (medzi 0.5 – 1.5 V). Pri vzniku elektroporácie sa zvyšuje priepustnosť bunkových stien. Bunkové steny sú väčšinou negatívne nabité z iónov a rôznych proteínov. Z tohto hľadiska existuje transmembránový potenciál z vnútorných a vonkajších iónových gradientov a pri externom elektrickom poli presahujúcom spomínaný potenciál, dôjde k značnej zmene bunkovej polarizácie, vzniká separácia náboja a dipólový moment, ktorý je paralelný s externým poľom. Pri aplikácii kritického elektrického poľa vznikne dielektrický zlom, ktorý zvýši priepustnosť spolu s tvorbou pórov, ktoré sú nenávratné. Dokonca predúprava elektrickým impulzom spôsobí degranuláciu škrobu a zníži kryštalinitu (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Mechanická predúprava

Konvenčné mechanické metódy sú najpoužívannejšími, ktoré prinášajú dobré výsledky v širokej škále ako aj vysokú recykláciu produktov. Medzi ne patrí vysokotlaková homogenizácia, hydrodynamická kavitácia, guľôčkové a guľové mletie.

Vysokotlaková homogenizácia je založená na jednoduchom princípe a spôsobuje významný rozpad buniek v biomase. Bunky sa umiestnia do suspenzie a pomocou čerpadla prejdú do ústia špeciálnymi ventilmi odolnými voči tlaku. Následne sa prúd rýchlo zvýši a tlak tekutiny sa náhle zníži. Celkovo je rozpad buniek pomocou vysokotlakovej homogenizácie pripísaný rôznym príčinám alebo mechanizmom, ako napr. šmykové napätie kvapaliny, turbulencia, rýchlosť šoku a kavitácia (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Alternatívnou formou odvodenou od vysokotlakovej homogenizácie je hydrodynamická kavitácia, pri ktorej tekutina alebo kašovitá forma biomasy prechádza veľkou priečnou

ductinou, z ktorej postupuje do veľmi malej dutiny, tzv. škrtiaceho ventilu, čo spôsobí stlačenie suspenzie. Tento proces vytvára pokles tlaku, keď klesne pod tlak pár, začnú sa tvoriť mikrobubliny, ktoré sa rozpadnú po návrate tlaku pár nad normálne hodnoty. Tento rozpad bublín spôsobí nárazové vlny a zvýšenie tlaku a teploty, čo následne rozbije bunky (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Najpoužívanějšími druhmi mechanických predúprav v priemysle sú guľôčkové a guľové mletie. V oblasti biotechnológie sa tieto techniky používajú na rozpad buniek niektorých mikroorganizmov a závisia od rôznych parametrov ako napr. rýchlosť dávkovania buniek, agitačná rýchlosť, konštrukcia agitátora, veľkosť a priemer guľčiek ako aj konštrukcia mlecej komory. Ďalšími dôležitými faktormi na výber zariadenia sú koncentrácia biomasy, hustota suspenzie a morfológia mikroorganizmov. Čo sa týka účinnosti týchto metód predúpravy biomasy mikrorias, ich hlavnou nevýhodou je, že priamo nezasahujú do štruktúry intracelulárnych karbohydrátov a preto je potrebné použiť aj inú technológiu na úpravu štruktúry škrobu. Taktiež sú tieto metódy aj energeticky veľmi náročné (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Predúprava zmrazovaním-rozmrazovaním (kryolýzou)

Mechanizmus predúpravy zmrazovaním a rozmrazovaním je jednoduchý, t.j. pomalé zmrazovanie pri cca -10°C . Týmto sa tvoria ľadové kryštály, ktoré mechanicky rozrušujú bunkové steny. Intracelulárne látky ako napr. karbohydráty, proteíny, lipidy a pigmenty sa počas rozmrazovania uvoľnia do média, zatiaľ čo látky na bunkovej stene a organické látky rozpustné vo vode sa taktiež môžu extrahovať. Táto predúprava sa môže cyklicky opakovať, čím sa zvýši rozpad buniek a teda aj extrakcia karbohydrátov ako aj iných látok, ktoré sa nachádzajú v bunkových organelách. Pri tejto metóde nevznikajú degradačné produkty. Napriek tomu je táto metóda kontroverzná kvôli časovej a energetickej náročnosti (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Predúprava ožarovaním

Ultrazvuková predúprava

Ultrazvuková technológia sa používa v rôznych oblastiach organickej chémie na urýchlenie chemických reakcií a na extrakciu bioaktívnych látok z rastlín. Proces ultrazvukového spracovania zahŕňa prenos zvukového vlnenia cez kvapalné médium a vytvára oblasti s pretlakom a podtlakom, pričom sa zmeny v tlaku vytvárajú kavitačný efekt a dochádza k tvorbe bublín v elastickom médiu. Plyn, ktorý nie je možné udržať v bublinách, je kondenzát a uvoľňuje veľké množstvo energie, čo zapríčiňuje silný rozpad bublín, čo vytvára nárazové vlny a oblasti s vysokou teplotou a tlakom. Kavitačný proces je účinný na prenos tepla a hmoty, vytvára horúce miesta, čo môže zapríčiniť urýchlenie chemickej reaktivity v médiu. Tento druh technológie môže rozbiť bunkovú stenu mikrorias, pretože keď sa bublina rozpadne na ploche pevnej látky, tlak a zvýšená teplota vytvorí mikroprúdy, ktoré umožnia rozpúšťadlu prenikať do suroviny a tým dochádza k rozpadu bunkovej steny. Tento typ predúpravy je alternatívou pre rozpad bunky, kde buď voda, kyselina alebo zásada sa môže využiť ako katalyzátor. Taktiež účinok ultrazvuku ukázal aj zníženie kryštalinity a zvýšenie absorpcie vody škrobových granúl, čo pomáha prístupnosti enzýmov pre hydrolýzu polysacharidov (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Predúprava mikrovlnami

Tento typ predúpravy sa tiež využíva z veľkej časti v organickej chémii na urýchlenie reakcií, extrakciu látok a aj na predúpravu biomasy. Účinok tejto energie je založený na interakcii s polárnymi molekulami rozpúšťadla (obvyčajne vody), čo vytvára horúce centrá umožňujúce veľmi účinné a rýchle ohrievanie. Následne reakcie môžu prebiehať rýchlejšie, s vyššími výťažkami a väčšou selektivitou. Ohrievanie prebieha dvoma mechanizmami: rotáciou dipólov, kde polárne molekuly sa snažia usporiadať svoju orientáciu podľa elektromagnetického poľa, ktoré sa rýchlo mení a iónovým vedením, ktoré vzniká z okamžitého ohrevu iónovej látky zapríčineného trením iónových molekúl počas ich pohybu indukovaného elektrickým poľom. Aplikáciou mikrovlnného žiarenia v škrobe dochádza k strate kryštalinity (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Chemická predúprava biomasy

Kyslá a alkalická hydrotermálna predúprava

Koncentrované alebo zriedené kyslé a alkalické roztoky sa taktiež môžu použiť na hydrotermálne podmienky, čo má za následok skrátenie reakčného času, zníženie nákladov a vyššiu prístupnosť pre hydrolýzu poly- a oligo- sacharidov na monosacharidy. Vyššie koncentrácie týchto látok znižujú reakčné časy, umožnia aj vyhnúť sa použitiu enzýmov, zatiaľ čo použitie pri nízkej koncentrácii vyžaduje vyššie teploty a tlaky na zachovanie vhodných hydrolytických účinkov. Nevýhodou je, že použitím týchto chemikálií pri vysokých teplotách sa tvoria degradačné produkty vo vysokých koncentráciách, ktoré sú nežiaduce pri fermentácii. Tieto degradačné produkty tiež aj spôsobujú koróziu zariadení, kontaminujú odpad a škodia životnému prostrediu. Neutralizácia týchto látok zvyšuje celkové náklady. Bežnými kyselinami pre túto metódu sú kyselina sírová a chlorovodíková v koncentrácii od 1 do 10 % a rozsah teplôt od 60 – 180 °C. To pomáha degradácii celulózovej matrice v bunkovej stene, depolymerizácii hemicelulózy a hydrolýze škrobu na jednoduché molekuly bez pomoci enzýmu. Hlavnou zásadou používanou pri tejto metóde je hydroxid sodný. Táto metóda je charakteristická tvorbou rozpúšťacích a saponifikačných reakcií, tvorbou pórov v bunkových stenách, aby sa intracelulárne látky dostali von z bunky, znižovaním veľkosti škrobových častíc a kryštalinity celulózy (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Biologické predúpravy biomasy

Enzymatická predúprava

V porovnaní s rôznymi metódami predúprav, enzymatická predúprava sa ukazuje ako nádejná. Hlavnými výhodami enzymatickej hydrolýzy je vysoká špecifickosť a bez extrémnych podmienok a tým aj ľahká priemyselná aplikácia. Hlavnými nevýhodami tejto metódy je vysoká cena enzýmu. Enzymatická hydrolýza používa rôzne enzýmy, kde patria celulózy, amylázy a amyloglukozidázy na hydrolýzu polysacharidov z bunkových stien. Taktiež bolo zaznamenané aj využitie proteáz na hydrolýzu glykoproteínov v bunkových stenách niektorých druhov mikrorias, čo následne zvýšilo účinnosť rozpadu buniek a extrakciu požadovaných látok. Je dôležité spomenúť, že v závislosti od druhu mikrorias, ich bunková stena buď je alebo nie je priepustná pre iné látky, čím teda špecifické enzýmy nie sú potrebné na rozbitie bunkovej steny (Velazquez-Lucio a kol. 2018).

Bakteriálna predúprava

Aplikácia baktérií v biologickej predúprave je nádejná, pretože vyžaduje kratší čas vďaka vysokej rýchlosti rastu a metabolickej aktivite. Baktérie s algicídny účinkom sa bežne používajú na predúpravu biomasy. Veľkou výzvou pre bakteriálnu predúpravu biomasy mikrorias je produkcia látok s nízkou špecificitou. Tieto produkty spôsobujú komplikácie v biokonverzii. Tento problém závisí od špecifického druhu hydrolytických baktérií a použitia buď jedného druhu alebo kombinácie viacerých druhov baktérií a cieľa procesu (Sankaran a kol. 2020).

Výskum v oblasti získavania a energetického využitia vodného kvetu

V dizertačnej práci Kuo (2011) sa sledovala rentabilita mechanického zberu vodného kvetu a spôsob konverzie na biopalivá. Výsledky tejto práce ukázali, že iba hydrotermálne skvapalňovanie a anaeróbne spracovanie je rentabilné, pričom fermentácia a transesterifikácia na biodiesel boli v tomto prípade nerentabilné. Práca Zhang a kol. (2016) bola zameraná na mikrovlnnú pyrolýzu biomasy vodného kvetu. Biomasa bola pomletá, optimálna frakcia bola 20-5 μm , výkon mikrovlnnej rúry 600 W za katalýzy aktívneho uhlia 10 % pod rôznymi atmosférami – N_2 , 10 % H_2/Ar a CO_2 . Po reakcii časť z produktov ostala kvapalná a časť plynná, výťažky kvapalných častí (oleja) boli 49.1%, 51.7% a 54.3% pod atmosférou N_2 , 10% H_2/Ar a CO_2 , a celkové energetické výťažky pod uvedenými atmosférami boli 216.7%, 236.9% a 208.7%. Duman a kol. (2019) robili experimenty na zber vodného kvetu pomocou flokulácie magnetických nanočastíc. Následne flokulant regenerovali pomocou 6 mol/L kyselinou chlór vodíkovou a zmes prefiltrovali. V tejto práci bol sledovaný iba obsah lipidov po mletí biomasy a Soxhletovej extrakcii hexánom s 5.6 %-ným výťažkom. Podobne Kumar a kol. (2019) testovali hydrotermálne skvapalňovanie sladkovodného vodného kvetu za nižšej teploty a katalýzy. Experimenty pevnej časti prebiehali pri teplote 270 °C buď s alebo bez prítomnosti katalyzátora počas 45 °C. Výťažky oleja záviseli od použitého katalyzátora, 20 % s použitím Na_2CO_3 , 19 % s použitím TiO_2 , 17 % s CaO a 15 % bez použitia katalyzátora. Zvyšná, vodná sa použila ako kultivačné médium pre mikroriasy, pričom výsledky ukázali, že aj pevná aj kvapalná časť z vodného kvetu sú vhodné na uvedené účely. Kumar a kol. (2020) zo získaného riečného vodného kvetu po kryolýze s prídavkom NaOH a následnej hydrolýze v 2 % kyseline sírovej pri teplote 230 °C počas 1 min získali výťažok 5.78 g / 100g redukujúcich sacharidov. Sacharidy využili na kultivačné médium mikroriasy *Chlorella minutissima* a kvasinky *Trichosporon cutaneum* na produkciu ďalšej biomasy, čo ukázalo dobré výsledky.

Záver

Vodný kvet je celosvetovým problémom a spôsobuje napr. úhyn rýb, znehodnotenie vody na úžitkové účely a aj straty na cestovnom ruchu v letoviskách. Zozbieraný vodný kvet sa ukazuje ako potenciálny zdroj biopalív, ako napr. etanol zo zásobných polysacharidov, bionafty buď z olejov alebo po hydrotermálnom skvapalňovaní biomasy, bioplynu po fermentácii a pod, príp. využitie extraktu ako kultivačné médium pre iné druhy mikrorias. Celkové náklady závisia od koncentrácie buniek vo vode, spôsobu zberu vodného kvetu, druhov mikrorias spôsobu predspracovania a spracovania na príslušné biopalivo. Hoci vo viacerých štúdiách sa ukázali niektoré kombinácie metód získavania a spracovania

nerentabilné, je obrovskou výzvou použiť rôzne kombinácie metód a neustále zvyšovanie ich účinnosti.

Pod'akovanie

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Integrovaná infraštruktúra 2014 - 2020 pre projekt: Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu LignoSilva (kód ITMS: 313011S735), spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.“

Použitá literatúra

1. Abdulqader, G., Barsanti, L., Tredici, M.R., 2000: Harvest of *Arthrospira platensis* from Lake Kossorom (Chad) and its household usage among the Kanembu. *Journal of Applied Phycology* 12(3-5): 493-498.
2. Ahmad, A.L., Yasin, N.M., Derek, C.J.C., Lim, J.K., 2011: Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(1): 584-593.
3. Amin, S., 2009: Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae. *Energy conversion and management* 50(7): 1834-1840.
4. Archer, M., 2004: Photosynthesis and Photoconversion. Archer, M.D., Barber, J. *Molecular to Global Photosynthesis*.
5. Blockx, J., Verfaillie, A., Eyley, S., Deschaume, O., Bartic, C., Muylaert, K., Thielemans, W., 2019: Cationic cellulose nanocrystals for flocculation of microalgae: effect of degree of substitution and crystallinity. *ACS Applied Nano Materials* 2(6): 3394-3403.
6. Borowitzka, M.A., 2013: High-value products from microalgae—their development and commercialisation. *Journal of Applied Phycology* 25(3): 743-756.
7. Brennan, L., Owende, P., 2010: Biofuels from microalgae - a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews* 14(2): 557-577.
8. Castenholz, R.W., 1976: The effect of sulfide on the bluegreen algae of hot springs. I. New Zealand and Iceland 1. *Journal of Phycology* 12(1): 54-68.
9. Ciferri, O., 1983: *Spirulina*, the edible microorganism. *Microbiological reviews* 47(4): 551-578.
10. De La Noue, J., De Pauw, Nn, 1988: The potential of microalgal biotechnology: a review of production and uses of microalgae. *Biotechnology Advances* 6(4): 725-770.
11. Dębowski, M., Zieliński, M., Grala, A., Dudek, M., 2013: Algae biomass as an alternative substrate in biogas production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27: 596-604.
12. Duman, F., Sahin, U., Atabani, A.E., 2019: Harvesting of blooming microalgae using green synthesized magnetic maghemite (γ -Fe₂O₃) nanoparticles for biofuel production. *Fuel* 256: 115935.
13. Friedl, T., Rybalka, N., Kryvenda, A., 2012: Phylogeny and systematics of microalgae: An overview. *Microalgal biotechnology: potential and production*, De Gruyter, Berlin. Pp. 11-38.

14. Garcia-Pichel, F., López-Cortés, A., Nübel, U., 2001: Phylogenetic and morphological diversity of cyanobacteria in soil desert crusts from the Colorado Plateau. *Applied and Environmental Microbiology* 67(4): 1902-1910.
15. Guiry, M.D., 2012: How many species of algae are there? *Journal of phycology* 48(5): 1057-1063.
16. Hu, C., Liu, Y., Paulsen, B.S., Petersen, D., Klaveness, D., 2003: Extracellular carbohydrate polymers from five desert soil algae with different cohesion in the stabilization of fine sand grain. *Carbohydrate polymers* 54(1): 33-42.
17. John, R.P., Anisha, G.S., Nampoothiri, K.M., Pandey, A., 2011: Micro and macroalgal biomass: a renewable source for bioethanol. *Bioresource technology* 102(1): 186-193.
18. Karková, M., Dzuro, T., Badina, M., 2014: výskyt a šírenie siníc v Slovenskej republike. *Proceedings of the 14th International Conference, Bojnice, March 28 – 29. Pp 15-20.*
19. Kasting, J.F., Siefert, J.L., 2002: Life and the evolution of Earth's atmosphere. *Science* 296(5570): 1066-1068.
20. Kumar, V., Arora, N., Pandey, S., Jaiswal, K.K., Nanda, M., Vlaskin, M.S., Chauhan, P.K., 2020: Microwave-assisted pretreatment of harmful algal blooms for microbial oil-centered biorefinery approach. *Biomass Conversion and Biorefinery* 1-9.
21. Kumar, V., Kumar, S., Chauhan, P.K., Verma, M., Bahuguna, V., Joshi, H.C., Ahmad, W., Negi, P., Sharma, N., Ramola, B., Rautela, I., 2019: Low-temperature catalyst based Hydrothermal liquefaction of harmful Macroalgal blooms, and aqueous phase nutrient recycling by microalgae. *Scientific reports* 9(1): 1-9.
22. Kuo, C.T., 2011: Harvesting natural algal blooms for concurrent biofuel production and hypoxia mitigation.
23. Lee, K., Eisterhold, M.L., Rindi, F., Palanisami, S., Nam, P.K., 2014: Isolation and screening of microalgae from natural habitats in the midwestern United States of America for biomass and biodiesel sources. *Journal of natural science, biology, and medicine* 5(2): 333-339.
24. Maková, J., Medo, J., 2020: Sinice a ich metabolity. *SciCell magazín* 3(3): 1-7.
25. Möllers, K.B., Cannella, D., Jørgensen, H., Frigaard, N.U., 2014: Cyanobacterial biomass as carbohydrate and nutrient feedstock for bioethanol production by yeast fermentation. *Biotechnology for Biofuels* 7(1): 1-11.
26. Mussatto, S.I., Dragone, G., Guimarães, P.M., Silva, J.P.A., Carneiro, L.M., Roberto, I.C., Vicente, A., Domingues, L., Teixeira, J.A., 2010: Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. *Biotechnology advances* 28(6): 817-830.
27. Norton, T.A., Melkonian, M., Andersen, R.A., 1996: Algal biodiversity. *Phycologia* 35(4): 308-326.
28. Nozaki, H., Ueki, N., Misumi, O., Yamamoto, K., Yamashita, S., Herron, M. D., Rosenzweig, F., 2015: Morphology and reproduction of *Volvox capensis* (Volvocales, Chlorophyceae) from Montana, USA. *Phycologia* 54(3): 316-320.
29. Reijnders, L., 2008: Do biofuels from microalgae beat biofuels from terrestrial plants? *Trends in biotechnology* 26(7): 349-350.

30. Roney, B.R., Renhui, L., Banack, S.A., Murch, S., Honegger, R., Cox, P.A., 2009: Consumption of fa cai *Nostoc* soup: a potential for BMAA exposure from *Nostoc* cyanobacteria in China?. *Amyotrophic Lateral Sclerosis* 10(sup2): 44-49.
31. Sakai, N., Sakamoto, Y., Kishimoto, N., Chihara, M., Karube, I., 1995: *Chlorella* strains from hot springs tolerant to high temperature and high CO₂. *Energy Conversion and Management* 36(6-9): 693-696.
32. Salim, S., Bosma, R., Vermuë, M.H., Wijffels, R.H., 2011: Harvesting of microalgae by bio-flocculation. *Journal of applied phycology* 23(5): 849-855.
33. Sankaran, R., Cruz, R.A.P., Pakalapati, H., Show, P.L., Ling, T.C., Chen, W.H., Tao, Y., 2020: Recent advances in the pretreatment of microalgal and lignocellulosic biomass: A comprehensive review. *Bioresource technology* 298: 122476.
34. Sastre, R.R., 2012: Products from microalgae: An overview. Posten, C.; Walter, C. (ed.). *Microalgal biotechnology: Integration and economy*. Berlin: Walter de Gruyter. Pp. 13-50
35. Shuba, E.S., Kifle, D., 2018: Microalgae to biofuels: 'Promising' alternative and renewable energy, review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81: 743-755.
36. Shumway, S.E., Burkholder, J.M., Morton, S.L., (Eds.), 2018: Harmful algal blooms: a compendium desk reference. John Wiley & Sons.
37. Schaeffer, D.J., Krylov, V.S., 2000: Anti-HIV activity of extracts and compounds from algae and cyanobacteria. *Ecotoxicology and environmental safety* 45(3): 208-227.
38. Suali, E., Sarbatly, R., 2012: Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(6): 4316-4342.
39. Teoh, M.L., Chu, W.L., Marchant, H., Phang, S.M., 2004: Influence of culture temperature on the growth, biochemical composition and fatty acid profiles of six Antarctic microalgae. *Journal of Applied Phycology* 16(6): 421-430.
40. Velazquez-Lucio, J., Rodríguez-Jasso, R.M., Colla, L.M., Sáenz-Galindo, A., Cervantes-Cisneros, D.E., Aguilar, C.N., Fernandes, B.D., Ruiz, H.A., 2018: Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: a review. *Biofuel Research Journal* 17: 780-791.
41. Yen, H. W., Hu, I.C., Chen, C.Y., Ho, S.H., Lee, D.J., Chang, J.S., 2013: Microalgae-based biorefinery—from biofuels to natural products. *Bioresource technology* 135: 166-174.
42. Zhang, R., Li, L., Tong, D., Hu, C., 2016: Microwave-enhanced pyrolysis of natural algae from water blooms. *Bioresource Technology* 212: 311-317.

Možnosti nasadenia harvesterových technológií vo výchovných ťažbách listnatých drevín v oblasti Zvolena a Žiliny

*Marián Slamka, Maroš Sedliak, Milan Oravec
Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen
T.G. Masaryka 22, 960 01 Zvolen
marian.slamka@nlcsk.org

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

Abstrakt

V príspevku je zhodnotený potenciál objemu dendromasy z výchovných ťažieb listnatých drevín dostupných pre ťažbu harvesterovou technológiou malej triedy na modelovom území spádovej oblasti mesta Zvolena a Žilina. Identifikovaných bolo celkovo 534 JPRL (jednotiek priestorového rozdelenia lesa) s prevažujúcimi listnatými drevinami a vyhovujúcimi technicko-terénnymi charakteristikami. Celkový potenciálny objem výchovnej ťažby sa vypočítal na takmer 135 tis m³. Výsledky ukazujú, že potenciál na využívanie palivovej dendromasy je veľký, výrazné rozdiely sú však v jednotlivých oblastiach. Vykonaná analýza môže predstavovať vzorový podklad pre dlhodobé plánovanie nasadenia harvesterových technológií pre vybrané oblasti.

Kľúčové slová: Dendromasa, harvester, ťažba, listnaté dreviny.

Abstract

The paper evaluates the potential of deciduous tree dendromas volume of tending felling available for harvesting by small-class harvester technology in the model area of Zvolen and Žilina cities. A total of 534 forest stand units were identified with dominant deciduous trees and satisfactory technical and terrain characteristics. The total potential volume of tending felling was derived at almost 135 000 m³. The results show that the potential for the using of fuel dendromas is great, but there are significant differences between two model areas. The performed analysis can provide a model basis for long-term planning of the deployment of harvester technologies for interesting areas.

Keywords: Dendromass, harvester, logging, deciduous.

Úvod

Vzhľadom na veľkú lesnatosť územia štátu 41,3 % (Zelená správa 2020), súčasné a predpokladané ťažbové možnosti, má domáca produkcia, spracovanie a využitie drevnej suroviny veľký význam v oblasti ekonomiky, zamestnanosti, ekológie a rozvoja vidieckych oblastí a preto ju možno považovať za najvýznamnejšiu obnoviteľnú surovinu na Slovensku.

V záujme trvalo udržateľného využívania drevnej suroviny je potrebné zamerať pozornosť na komplexné spracovanie dreva vrátane korunových častí stromov, optimalizáciu

sortimentovej štruktúry ťaženého dreva a v neposlednom rade zlepšovanie ekologických parametrov produkcie, spracovania a jeho využitia. Vplyvom klimatickej zmeny a zmien v spôsobe obhospodarovania lesov, napr. nárast podielu prirodzenej obnovy, dochádza k postupnej zmene druhovej a kvalitatívnej štruktúry lesných porastov. Znižuje sa podiel ihličnatých drevín v prospech listnatých a zároveň sa zvyšuje podiel sortimentov dreva nižšej kvality. Tento trend sa predpokladá aj v budúcom období. Podľa výsledkov Národnej inventarizácie a monitoringu lesov SR pokleslo zastúpenie smreka v období 2006 – 2016 o 2 %, čo zodpovedá porastovej ploche 33 tisíc hektárov (Šebeň 2017). Zhoršujúcu sa kvalitatívnu štruktúru ťaženého dreva možno kompenzovať napríklad zvyšovaním efektívnosti ťažbového procesu.

Harvesterové technológie ťažby dreva sa vyznačujú vysokou výkonnosťou, efektívnosťou, produktivitou, bezpečnosťou práce a zároveň môžu byť šetrné k životnému prostrediu. Vysoké sú však náklady na ich obstaranie a následnú prevádzku, preto je dôležité zabezpečiť ich maximálne využitie (Javůrek a Dvořák 2018). Tieto technológie pôvodne určené do ihličnatých porastov sa vďaka technologickému pokroku efektívne využívajú aj v listnatých porastoch, najmä mladších vekových kategórií (Zimelis a kol. 2018, Sedliak a kol. 2019). V starších porastoch je výkonnosť aj využiteľnosť technológie ovplyvnená hrúbkou konárov a zakrivením kmeňov stromov, čo ovplyvňuje aj výrobu požadovaných sortimentov (Mederski a Bembenek 2018).

V príspevku analyzujeme možnosti využitia uvedenej technológie vo výchovných ťažbách listnatých drevín v spádovej oblasti miest Zvolen a Žilina. Priestorové analýzy sa vykonali s využitím nástrojov programu ArcGIS Desktop 10 s podporou údajov Informačného systému lesného hospodárstva (IS LH). Vyhovujúce leso-technické požiadavky boli definované na základe predchádzajúcich meraní a na základe poznatkov z dostupnej literatúry. V diskusii sa zaoberáme ďalšími možnosťami efektívnejšieho získavania dendromasy z lesných porastov ako aj ekologickými parametrami ťažbového procesu..

1. Materiál a metodika

Modelovým územím pre odhad potenciálneho objemu výchovných ťažieb boli lesné porasty (jednotky priestorového rozdelenia lesa – JPRL), ktoré sa nachádzali v širšom okolí mesta Žilina a Zvolen.

Územie Žilina bolo definované lesnými porastami v 15 lesných hospodárskych celkoch (Bytča, Dubeň, Jánošíkovo, Krasno, Kýčera, Marček, Martinské hole, Prečín, Rajec, Rajecké Teplice, Starovec, Súľov, Varín, VLM-Sklené, VLM-Turany) s výmerou viac ako 189 930 ha. Územie Zvolen, v ktorom sa nachádza niekoľko potenciálnych odberateľov drevnej suroviny (napr. Kronospan, s.r.o., Bučina Zvolen, a.s., Zvolenská teplárenská, a.s.), bolo definované lesnými porastami v 13 lesných hospodárskych celkoch (Badín, Banská Bystrica, Banská Štiavnica, Dobrá Niva, Ihráč, Jalná, Kremnica, Kysihýbeľ, Kyslinky, Očová, ŠLP TU Zvolen, Vígľaš, Zvolen) s výmerou viac ako 129 447 ha.

Záujmovými porastami boli prevažne listnaté porasty (so zastúpením listnatých drevín viac ako 50 %) vo veku 20 až 50 rokov. Priestorové a atribútové údaje o lesných porastoch boli prebrané z Informačného systému lesného hospodárstva (IS LH) na základe príslušných Programov starostlivosti o les (PSL). Ďalším použitým zdrojom priestorových údajov bola lesná cestná sieť z IS LH. Predmetom záujmu boli porasty v blízkosti lesných ciest (1L, 2L),

ktoré sú vhodné pre nasadenie harvesterovej technológie malej triedy (Rottne H8). Okolo identifikovaných ciest bola pomocou nástroja buffer v programovom prostredí ArcGIS Desktop 10 vypočítaná pracovná zóna harvestera do vzdialenosti 600 m od cesty. V porastoch, ktoré sa prekrývali z vypočítanou pracovnou zónou boli vykonané atribútové dopyty v SQL jazyku s cieľom identifikovať porasty s vhodnou drevinovou skladbou a vhodnými terénno-technologickými charakteristikami pre nasadenie harvestera Rottne H8. Vhodné podmienky sú definované ako terénny typ 5, čo znamená sklon svahu 20-40 % a priechodnosť terénu P/N - Priechodný terén za určitých klimatických podmienok: terén na únosnom podloží len za určitých klimatických podmienok ako napr. sucho, zima, na ktorom môžu pracovať lesné kolesové traktory. Veľkosť prekážok do 0,5 m ako napr. skaly, jamy vo vzdialenosti väčšej ako 5 m od seba.



Obr. 1: Harvester Rottne H8 pri výrobe sortimentov výchovných ťažbách listnatých drevín (Slamka 2019).

2. Výsledky

Odhad potenciálneho objemu výchovných ťažieb

Územie Žilina

Na základe spracovania priestorových a atribútových údajov o lesných porastoch a lesnej cestnej sieti boli identifikované hospodárske lesy do vzdialenosti 600 m od spevnených lesných ciest, ktorých zastúpenie listnatých drevín je viac ako 50 % a spĺňajú podmienku terénneho typu 5. Z celkového počtu 25 163 JPRL splnilo podmienky 108 porastov.

Drevinou s najvyšším celkovým podielom potenciálnej ťažby v regióne je buk lesný (56,06 %). Druhou najzastúpenejšou drevinou je javor horský (20,14 %). Z hľadiska priestorového rozdelenia ťažieb má najvyšší podiel LHC Súľov (22,00 %) nasledovaný LHC Martinské hole (15,17 %) a LHC Marček (10,16 %). Ostatné LHC majú podiel pod 10 %.

Tab. 1: Rozdelenie potenciálneho objemu ťažby podľa vybraných listnatých drevín a LHC, spádová oblasť Žilina.

	Lesné hospodárske celky (LHC)												
	Bytča	Jánošíkovo	Krásno	Kýčera	Marček	Martinské hole	Prečín	Rajec	Rajecké teplice	Starovec	Súľov	Varín	VLM Turany
Drevina	Potenciálny objem výchovnej ťažby (m ³)												
BK	340	33	914	222	332	762	233	52	430	176	1082	250	409
JH	13	128	0	0	96	492	67	21	284	1	498	252	29

Územie Zvolen

Na základe spracovania priestorových a atribútových údajov o lesných porastoch a lesnej cestnej sieti boli identifikované hospodárske lesy vo vzdialenosti 600 m od spevnených lesných ciest, ktorých zastúpenie listnatých drevín je viac ako 50 % a spĺňajú podmienku terénneho typu 5. Z celkového počtu 14 987 JPRL splnilo podmienky 426 porastov.

Celkovo drevinou s najvyšším podielom potenciálnej ťažby v regióne je buk (59,48 %). Druhou najzastúpenejšou drevinou je hrab (14,32 %). Z hľadiska priestorového rozdelenia ťažieb má najvyšší podiel LHC Očová (19,59 %) nasledovaný LHC Zvolen (15,38 %) a ŠLP TU Zvolen (11,39 %). Rozdelenie potenciálneho objemu vybraných druhov drevín je uvedené v Tab. 2. Celkový objem potenciálnej ťažby sa vypočítal viac ako 135 tis.m³.

Tab. 2: Rozdelenie potenciálneho objemu ťažby vybraných listnatých drevín a LHC, spádová oblasť Zvolen.

	Lesné hospodárske celky (LHC)												
	Badín	Banská Bystrica	Banská Štiavnica	Dobrá Niva	Ihráč	Jalná	Kremnica	Kysi-hýbeľ	Kys-linky	Očová	ŠLP TU Zvolen	Vígľaš	Zvolen
Drevina	Potenciálny objem výchovnej ťažby (m ³)												
BK	401	757	7656	2803	5335	5963	3256	8448	3280	15136	7581	2954	11878
DZ	43	0	274	196	8	1095	980	846	345	551	355	220	4901
HB	31	17	1404	1627	101	1268	1119	884	1636	5669	2462	1077	876
JH	60	252	1520	41	575	1337	523	796	924	634	1278	348	335
JS	0	124	641	127	847	396	426	391	313	1669	2230	339	118

3. Diskusia

Analyzovali sme možnosti využitia harvesterovej technológie vo výchovných ťažbách listnatých drevín v spádovej oblasti miest Zvolen a Žilina. Uvedené oblasti patria do Banskobystrického, resp. Žilinského kraja, v ktorých sa v rámci Slovenska nachádzajú najväčšie zásoby dreva na lesných a nelesných pozemkoch (Šebeň 2017). Analýzy sa vykonali s využitím nástrojov v programe ArcGIS Desktop 10 s podporou údajov Informačného systému lesného hospodárstva (IS LH) a na základe definovaných vyhovujúcich leso-technických požiadaviek pre harvester malej triedy. Celkový objem potenciálnej ťažby sa vypočítal na viac ako 135 tis.m³, prevažne na území spádovej oblasti Zvolen. Výsledok mohlo významnejšie ovplyvniť lepšie sprístupnenie porastov lesnou dopravnou sieťou, ak aj aktuálne vyššie zastúpenie listnatých drevín a lepšie terénne podmienky (najmä sklon svahu) v rámci spádovej oblasti Zvolen.

Vplyvom postupnej zmeny v druhovej a kvalitatívnej štruktúry lesných porastov v prospech listnáčov (Zelená správa 2020), zvyšuje sa podiel sortimentov dreva nižšej kvality a tento trend sa predpokladá aj v budúcom období. Zhoršujúcu sa kvalitatívnu štruktúru ťaženého dreva možno kompenzovať napríklad zvyšovaním efektívnosti ťažbového procesu.

V rámci vykonaných meraní v zodpovedajúcich terénnych podmienkach (Sedliak a kol. 2019) sa pri 8 hodinovej prevádzke v 25-ročnom poraste so zásobou 260 m³.ha⁻¹ pri priemernej približovacej vzdialenosti 215 m zistila výkonnosť harvesteru Rottne H8 6,69 m³.h⁻¹ hrubiny a 0,82 m³.h⁻¹ tenčiny, v 30-ročnom poraste so zásobou 270 m³.ha⁻¹ pri priemernej približovacej vzdialenosti 485 m, 5,0 m³.h⁻¹ hrubiny a 0,43 m³.h⁻¹ tenčiny a v 50-ročnom poraste pri zásobe 345 m³.ha⁻¹ a priemernej približovacej vzdialenosti 430 m, 10,0 m³.h⁻¹ hrubiny a 1,31 m³.h⁻¹ tenčiny.

Poškodenie ostávajúceho porastu sa pohybovalo na úrovni 5 – 10 % stromov. Arlinger a kol. (2014) hodnotili efektívnosť nasadenia harvesteru vyššej triedy v prvých prebierkach, pričom porovnávali jeho výkonnosť s harvesterom malej triedy. Vychádzalo sa s hypotézy, že parametrom porastu je potrebné prispôbiť aj parametre stroja. Výsledky štúdie ukázali, že harvester vyššej triedy pracoval efektívnejšie a poskytoval operátorom harvesterov aj väčšiu pohodu z hľadiska ergonómie. Autori štúdie uvádzajú, že v prípade nasadenia menších strojov vznikajú často situácie, pri ktorých ich operátori zaťažujú na maximum ich kapacity, čo sa odzrkadlí v životnosti stroja. V štúdiu nebol hodnotený vplyv strojov na ostávajúci porast a pôdu. Harvesterovú technológiu s využitím malých tried (Vimek) testovali Zimelis a kol. (2018) v listnatých prebierkach. Harvester po výmene hlavice efektívne pracoval aj v ihličnatých aj listnatých porastoch, pričom výkonnosť bola ovplyvnená najmä hrúbkou konárov stromov väčších dimenzií. Vyvážač dosiahol pri približovacej vzdialenosti do sto metrov výkonnosť 8.63 m³.h⁻¹. Spinelli a Magagnotti (2011) zisťovali náklady na ťažbu dreva s využitím klasických a moderných ťažbových technológií. Výsledky ukázali, že pri moderných technológiách možno znížiť náklady na ťažbu až na polovicu, hoci platby vlastníkov lesov sú pri všetkých technológiách porovnateľné.

V rámci hodnotenia vhodných ťažbovo-výrobných technológií sa čoraz väčšia pozornosť venuje práve ekologickým parametrom ťažbového procesu. Kaleja a kol. (2018) hodnotili poškodenie ostávajúceho porastu vyvážačom JD 810 D pri použití štandardného a špeciálneho naklápacieho ramena. S naklápacím ramenom sa znížil podiel poškodených stromov o 21 %

a zároveň boli nižšie aj náklady na približovanie dreva. Ferenčík a kol. (2010) zisťovali poranenia stromov pri výrobe ihličnatého dreva motomanuálnym spôsobom vo výchovných ťažbách. Poranenia na ostávajúcich stromoch ostávali najmä vtedy, keď sa smer stínky nezhodoval so smerom vyťahovania stromov. Výsledkom štúdie bol návrh opatrení na zníženie poškodenia kôry ostávajúcich stromov porastu.

Často kladenou otázkou je aj množstvo ťažbových zvyškov ostávajúcich v poraste, pretože jednou z výhod harvesterových technológií je schopnosť okrem vyrobených sortimentov efektívne sústrediť aj ťažbové zvyšky z korunových častí stromov s relatívne nízkou prímесou nežiaducich prvkov. Napr. Pavlenda a kol. (2019) poukazujú na ochudobňovanie pôdy a následné zníženie produktivity jednotlivých stanovišť. Podľa autorov je z hľadiska zachovania produkčnej schopnosti lesných pôd a priaznivej bilancie živín na lesnom stanovišti dôležitá skutočnosť, či sa z lesa odnáša iba hrubina, alebo sa odnáša aj tenčina, pretože koncentrácie hlavných živín v konároch, v listoch a ihličí sú niekoľko násobne vyššie než v dreve. Vzhľadom na zvýšený dopyt po palivových štiepkach sa vo svete častejšie využíva metóda ťažby celých stromov.

Približovanie dreva vo forme celých stromov sa realizuje prevažne prostredníctvom univerzálnych kolesových traktorov, zriedkavejšie prostredníctvom forwarderov malých a stredných tried. Forwarder je konštruovaný na vývoz guľatinových sortimentov, no v praxi sa aj napriek nedostatočne využívanej nosnosti používajú aj na vývoz ťažbových zvyškov a energetického dreva (Hakkila 2004, Slotta a Spevár 2010, Klvac 2011). Hytönen a Moilanen (2014) porovnávali rozdiel objemu ťažbových zvyškov ostávajúcich v poraste po stromovej a kmeňovej metóde. Výsledky testov po ťažbe borovice ukazujú, že pri kmeňovej metóde zostáva v poraste 7 – 15 t.ha⁻¹ biomasy, pri metóde celých stromov 32 – 66 % z uvedeného množstva ťažbových zvyškov. V prípade ďalšieho ručného dozberu, sa objem znížil na 4 – 16 %. Pri metóde celých stromov ostávajú na ťažbovej ploche najmä zvyšky s najmenším priemerom. Spinelli a kol. (2014) na druhej strane upozorňujú na to, že v prípade ponechania väčšieho množstva hrubších zvyškov je nutné počítať s väčším rizikom požiarov a súčasne zhodnotili ťažbu celých stromov ako ekonomicky najefektívnejší spôsob výroby energetických štiepok. Podľa Spinelli a Magagnotti (2010) ponechaním tenkých vetiev a ihličia znižujeme množstvo získanej biomasy, ale zároveň zvyšujeme kvalitu vyprodukovaných energetických štiepok, čo sa môže prejaviť v ich zvýšenej cene. V našich podmienkach sa energetické štiepky dodávajú v dvoch triedach zrnitosti (jemnozrnné, hrubozrnné), pričom by podiel častíc menších ako 5 mm v oboch triedach nemal presiahnuť 20 % (Trenčiansky a kol. 2007).

V snahe zvýšiť produkciu palivovej dendromasy sa mechanizačné prostriedky nasadzujú aj do prvých prebierok listnatých porastov. Lupikis a kol. (2014) hodnotili vplyv nasadenej technológie na zhutnenie pôdy v pracovných linkách strojov. Výsledky štúdie ukazujú, že lesné stroje môžu významne zhutniť pôdu a to až do hĺbky 80 cm. Odporúčajú využiť kombináciu minimálne šesť kolesového harvestera a pásového forwardera a na zmiernenie tlaku na pôdu využiť ešte aj ukladanie ťažbových zvyškov do dráhy strojov. V prípade, že je aj o túto hmotu záujem, odporúčajú ťažbu vykonávať pri zamrznutej pôde.

4. Záver

- Zhoršujúcu sa kvalitatívnu štruktúru ťaženého dreva, ktorá sa predpokladá v budúcom období, možno kompenzovať zvyšovaním efektívnosti ťažbového procesu.
- Harvesterové technológie ťažby dreva sa vyznačujú vysokou výkonnosťou, efektívnosťou, produktivitou, bezpečnosťou práce a zároveň môžu byť šetrné k životnému prostrediu. Vysoké sú však náklady na ich obstaranie a následnú prevádzku, preto je dôležité zabezpečiť maximálne využitie a ich nasadenie vopred dobre naplánovať.
- Vykonaná analýza potenciálneho objemu dendromasy z výchovných ťažieb listnatých drevín dostupných pre ťažbu harvesterovou technológiou vo vybraných oblastiach, ktorá je prezentovaná v tomto príspevku, môže predstavovať vzorový podklad pre dlhodobé plánovanie.
- V rámci hodnotenia a výberu vhodných ťažbovo-výrobných technológií je potrebné väčšiu pozornosť venovať ekologickým parametrom ťažbového procesu.

PodĎakovanie

Tento príspevok vznikol na základe finančnej podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja v rámci riešenia projektu APVV-0487-16 Optimalizácia využitia drevnej suroviny nižšej kvality na Slovensku (50 %) a 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“ (50 %).

Použitá literatúra

1. Arlinger, J., Björheden, R., Brunberg, T., Lundström, H., Möller, J., 2014: Size matters! Improving operations by analyzing the effects of machine size. In: Strandström, M. et al. Mechanized tree planting in Finland. Proceedings of the Nordic Baltic Conference OSCAR14. June 25-27, 2014 NOVA Park Conference, Knivsta, Sweden.
2. Ferenčík, M., Kindernay, D., Kováčik, P., Mesingerová, V., Slugeň, J., Stanovský, M., 2010: Poranenia stromov pri výrobe ihličnatého dreva motomanuálnym spôsobom vo výchovných ťažbách.. Acta Facultatis Forestalis 52(2): 85-97.
3. Hakkila, P., 2004: Developing technology for large scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999–2003. Final report. Technology Report 5/2004. Tekes. 44 p.
4. Hytönen, J., Moilanen, M., 2014: Effect of harvesting method on the amount of logging residues in the thinning of Scots pine stands. Biomass and Bioenergy 67:347-353.
5. Klvac, R., 2011: Pure Energy Ratio of logging residua processing. In: 44th International Symposium on Forestry Mechanisation: “Pushing the Boundaries with Research and Innovation in Forest Engineering”, October 9-13, 2011 in Graz, Austria.
6. Javůrek P., Dvořák J., 2018: Evaluation of total time consumption in harvester technology deployment in conditions of the forest sector of the Czech Republic. J. For. Sci., 64: 33-42.

7. Lupiķis, A., Sarkanābols, T., Lazdiņš, A., 2014: Comparison of soil compaction using tracked and wheeled machines in early thinning. In: Strandström, M. et al. Mechanized tree planting in Finland. Proceedings of the Nordic Baltic Conference OSCAR14. June 25-27, 2014 NOVA Park Conference, Knivsta, Sweden.
8. Mederski, P.S., Bembenek, M., 2018: Investigation of Log Length Accuracy and Harvester Efficiency in Processing of Oak Trees. *Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 39(2): 173-181.
9. Pavlenda, P., Sitková, Z., Pavlendová, H., 2019: Intenzifikácia odberu biomasy pre energetické účely – riziká pre lesné pôdy, návrh kritérií pre hodnotenie a návrh riešenia. Výstupy NLC pre lesnícku prax. NLC Zvolen. 59 s.
10. Sedliak, M., Slamka, M., Oravec, M., Ihnát, V., 2019: Odhad potencionálneho objemu dendromasy z výchovných ťažieb listnatých drevín harvesterovou technológiou. In: Aktuálne otázky ekonomiky a politiky LH SR. Zborník z odborného seminára. NLC Zvolen, 12/2019.
11. Slotta, M., Spevár, J., 2000: Príprava lesnej biomasy z pohľadu dodávateľ technológie – OZLT v š. p. Lesy Slovenskej republiky. In: Integrovaná logistika pri produkcii a využití biomasy. Zborník pôvodných vedeckých prác. TU Zvolen. p. 123-126.
12. Spinelli, R., Lombardini, C., Magagnotti, N., 2014: The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. *Silva Fennica* vol. 48 no. 1 article id 1003.
13. Spinelli R., Magagnotti N., 2010: Comparison of two harvesting system for the production of forest biomass from the thinning of *Picea abies* plantation. *Scandinavian Journal of Forest Research* 25: 69–77.
14. Spinelli R., Magagnotti N., 2011: The effects of introducing modern technology on the financial, labour and energy performance of forest operations in the Italian Alps. *Forest Policy and Economics* 13(7): 520-524.
15. Šebeň, V., 2017: Národná inventarizácia a monitoring lesov Slovenskej republiky 2015 – 2016. NLC Zvolen, 255 s.
16. Trenčiansky, M., Lieskovský, M., Oravec, M., 2007: Energetické zhodnotenie biomasy. NLC Zvolen. 153 s.
17. Zelená správa, 2020: Správa o lesnom hospodárstve v Slovenskej republike za rok 2019. Ministerstvo pôdohospodárstva a rozvoja vidieka Slovenskej republiky, Národné lesnícke centrum, 68 s. ISBN 978 - 80 - 8093 - 316 – 6.
18. Zimelis, A., Kaleja, S., Luguza, S., 2018: Factors affecting productivity of machined logging in thinning using small size forest machines. *Research for rural development* 1:47-52.

ZBORNÍK VÝSKUMNÝCH PRÁC

Január 2021

EDITOR

Doc. Ing. Štefan Šteller, CSc.

GRAFICKÁ ÚPRAVA

Havlín Dávid



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

Odporúčaná citácia:

In: Zborník výskumných prác. Január 2021. Centrum pre rozvoj drevárskeho, nábytkárskeho a celulózo-papierenského priemyslu. Bratislava. 86 str. dostupné online: www.centrumdp.sk. ISBN 978-80-973573-2-0.

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