

Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.

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



VÝSKUMNÁ SPRÁVA

Názov projektu: Optimalizácia využitia drevnej suroviny nižšej kvality na Slovensku

Názov etapy 3: Výskum inovatívnych postupov mechanického a chemického spracovania drevnej suroviny nižšej kvality

Názov správy: Predspracovanie dendromasy pre výrobu biopalív druhej generácie (štúdia)

Autori správy: Ing. Vladimír Ihnát, PhD., Ing. Andrej Pažitný,
Mgr. Albert Russ, Ing. Maroš Kováč

Číslo projektu: APVV-16-0487
tel.: +421-(0)2-911 728 622

VS: priebežná správa

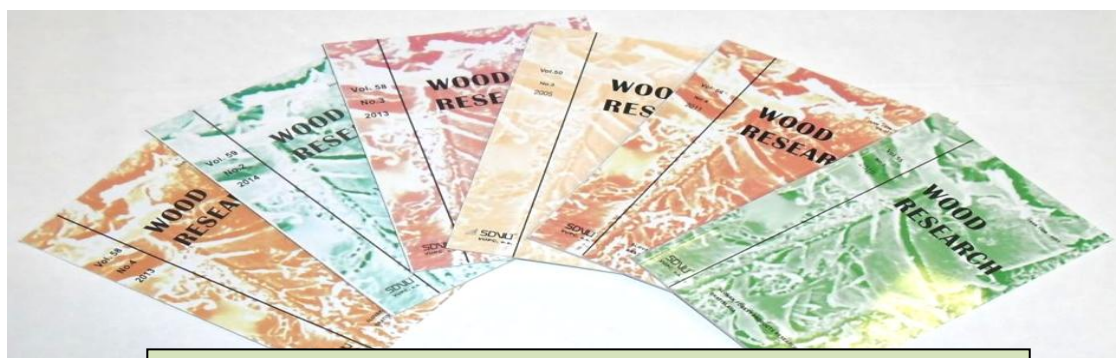
1. Číslo projektu: APVV-16-0487				
2. Prírastkové číslo: -		3. Podpis originálu riaditeľom sekcie		
4. Názov a adresa riešiteľského pracoviska: Výskumný ústav papiera a celulózy a.s., Dúbravská cesta 14, 841 04 Bratislava úsek Slovenský drevársky výskumný ústav				
5. Vedúci riešiteľského pracoviska: Ing. Štefan Boháček, PhD. generálny riaditeľ a.s.		6. Riešiteľ projektu: Ing. Vladimír Ihnát, PhD.		
		7. Riešiteľ čiastkovej úlohy: Ing. Andrej Pažitný		
		8. Druh úlohy: štátna		
9. Názov projektu: Optimalizácia využitia drevnej suroviny nižšej kvality na Slovensku				
10. Názov etapy: Výskum inovatívnych postupov mechanického a chemického spracovania drevnej suroviny nižšej kvality				
11. Autori správy: Ing. Vladimír Ihnát, PhD., Ing. Andrej Pažitný Mgr. Albert Russ, Ing. Maroš Kováč				
12. Názov správy: Predspracovanie dendromasy pre výrobu biopalív druhej generácie (štúdia)				13. Druh správy: priebežná
14. Dátum ukončenia správy 11.12.2019	15. Číslo zväzku 1	16. Počet strán textu 21	17. Počet samostatných príloh: 0	18. Počet citovaných prameňov: 0
19. Počet výtlačkov správy 2	20. Dátum začiatku výskumu 07.2018	21. Dátum ukončenia 12.2019	22. Znak MDT	
			23. Stupeň utajenia: Prístupné	
24. Kľúčové slová: drevná surovina nižšej kvality, parná explózia, predúprava amoniakom, predúprava CO ₂				

Výskumný ústav papiera a celulózy, a.s.
úsek Slovenský drevársky výskumný ústav
Dúbravská cesta 14, 841 04 Bratislava

Predspracovanie dendromasy pre výrobu biopalív druhej generácie (štúdia)

December 2019, Bratislava

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



The journal covered by Thompson Reuters Materials science Citation Index Expanded™, CAB International Abstracting Services and Scopus

Úvod

Očakáva sa, že biomasa sa stane jedným z hlavných obnoviteľných zdrojov na výrobu potravín, materiálov, chemikálií, palív, energie a tepla v rámci budovanej trvalo udržateľnej spoločnosti. Biologické a chemické vedy majú vedúcu úlohu pri budovaní budúcich priemyselných odvetví. Termín **Bioekonomika** prvýkrát definoval Juan Enrique a Rodrigo Martinez na stretnutí AAAS (Americká asociácia pre rozvoj vedy) už v roku 1997. Výňatok z článku bol publikovaný v Science 281 (14. augusta 1998): 925-926.

Biorafinérie majú predstavovať dôležitý pilier hospodárstva založeného na biopalivách. Biorafinácia sa týka trvalo udržateľného spracovania biomasy na spektrum predajných výrobkov a energie. Víziou EÚ je, že do roku 2030 sa nové výrobky, ako sú potraviny, biopalivá, textil, chemikálie atď., budú vyrábať na základe zavedených biorafinérskych operácií. Na dosiahnutie tohto cieľa sú však potrebné integrované a flexibilné biorafinérie, ktoré fungujú udržateľnejšie ako súčasné. Európska komisia zaviedla 13. februára 2012 novú stratégiu v oblasti biohospodárstva s názvom Inovácia pre udržateľný rast: biohospodárstvo pre Európu. Európa potrebuje radikálnu zmenu vo výrobe, spotrebe, spracovaní, skladovaní, recyklácii a zneškodňovaní biologických zdrojov. Jedným z novovznikajúcich odvetví je **zelená chémia**, čiže veda, ktorej cieľom je obmedziť alebo vylúčiť použitie a tvorbu nebezpečných látok už vo fáze výroby materiálov. Vyžaduje vynaliezavý a interdisciplinárny pohľad na návrh materiálu a výrobku. Zelená chémia dodržiava zásadu, že je lepšie zvažovať možnosti predchádzania vzniku odpadu, ako zneškodňovať alebo upravovať odpad.

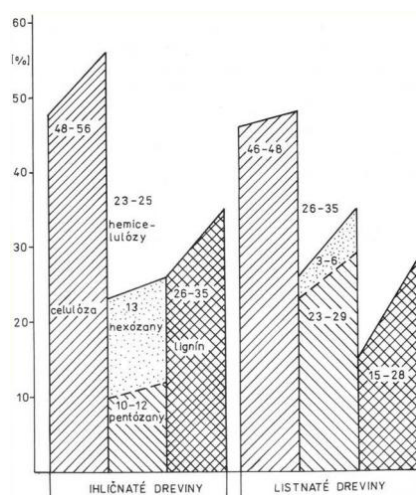
Táto štúdia pod názvom **Predspracovanie dendromasy pre výrobu biopalív druhej generácie (štúdia)** bola vypracovaná v rámci etapy spoločného projektu Národného lesníckeho centra so sídlom vo Zvolene a Výskumného ústavu papiera a celulózy, a.s. so sídlom v Bratislave pod názvom **Optimalizácia využitia drevnej suroviny nižšej kvality na Slovensku č. APVV-16-0487**. Cieľom štúdie je reflektovať na čiastkový cieľ projektu: Návrh využiteľných inovatívnych technológií mechanického a chemického spracovania drevnej suroviny nižšej kvality umožňujúcich lepšie využitie domáceho potenciálu v závislosti na budúcom vývoji disponibilných zdrojov a zvyšovania pridanej hodnoty produkcie.

Kapitola I. Celulóзовý etanol

Všeobecne sa tvrdí, že celulóзовý etanol a etanol vyrobený z iných zdrojov biomasy majú potenciál znížiť emisie skleníkových plynov až o takmer 90%. Lignocelulóзовé materiály, ako sú poľnohospodárske zvyšky (napr. pšeničná slama, bagasa z cukrovej trstiny, kukuričné kôrovie a pod.), lesné dreviny a rýchlorastúce plodiny sú obnoviteľnými zdrojmi energie. Tieto suroviny sú dostatočne bohaté a vytvárajú veľmi nízke emisie skleníkových plynov. Približne 90% suchej hmotnosti väčšiny rastlinných materiálov je uložených vo forme celulóзы, hemicelulóзы, lignínu a pektínu (obr.1).

1.1. Lignocelulóза

Lignocelulóза je primárnou stavebnou zložkou bunkových stien rastlín. Rastlinná biomasa sa skladá hlavne z celulóзы, hemicelulóзы a lignínu, spolu s menším množstvom pektínu, bielkovín, extraktov (rozpuštné neštruktúralne materiály, ako sú neštruktúralne cukry, dusíkaté látky, chlorofyl a vosky) a popola. Zloženie týchto zložiek sa môže meniť od jedného rastlinného druhu k druhému. Napríklad tvrdé drevo obsahuje väčšie množstvo celulóзы, zatiaľ čo pšeničná slama a listy majú viac hemicelulóзы. Okrem toho sa pomery medzi rôznymi zložkami v rámci jednej rastliny menia v závislosti od veku, štádia rastu a ďalších podmienok. Celulóза je hlavnou štruktúralnou zložkou bunkových stien rastlín a nachádza sa v organizovanej vláknitej štruktúre.



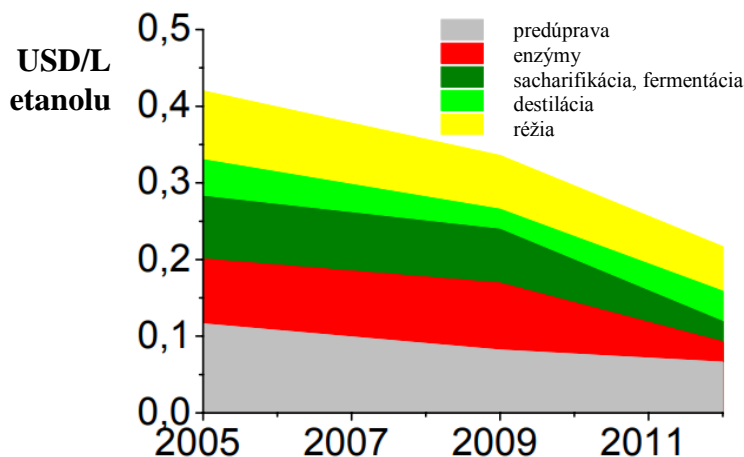
Chemické zloženie domácich drevín (Blažek a kol. 1975)

Komponent	Smrek (%)	Borovica (%)	Buk (%)
celulóза	45.6	43.2	39.2
hemicelulóзы	27.6	28.0	35.2
manán	16.0	12.5	1.5
xylán	9.0	13.0	28.0
lignín	26.9	26.6	20.9

Obr.1 Základné chemické zložky domácich drevín.

Prítomnosť lignínu v značnom množstve v lignocelulóзach vedie k vytváraniu akejosi ochrannej bariéry, ktorá zabraňuje deštrukcii rastlinných buniek hubami a baktériami pri ich premene na palivo. **Cieľom procesu predúpravy** je rozbiť lignínovú štruktúru a narušiť kryštalickú štruktúru celulóзы tak, aby kyseliny alebo enzýmy mohli ľahko pristupovať k celulóзе a hydrolyzovať ju. Predúprava môže byť najdrahším procesom premeny biomasy na palivá, ale má ďalší potenciál na zlepšenie efektívnosti a zníženie nákladov prostredníctvom ďalšieho výskumu a vývoja (obr.2). Predúprava je dôležitým nástrojom pre procesy premeny

biomasy na biopalivá. Na premenu biomasy na palivo sa celulóza a hemicelulóza musia štiepiť na príslušné monoméry, aby ich mohli mikroorganizmy spracovať. Na výrobu monomérov (jednoduchých cukrov) vhodných na výrobu etanolu (fermentáciou) sa zvyčajne používajú tri hlavné spôsoby hydrolýzy: zriedená kyselina, koncentrovaná kyselina a enzymatická hydrolýza.



Obr.2 Vývoj nákladov pre výrobu etanolu podľa jednotlivých operácií (zdroj: J.Y. Zhu et al., 5th World Congress on Industrial Biotechnology, Chicago, 2008).

Hemicelulózy sa môžu ľahko hydrolyzovať zriedenými kyselinami za miernych podmienok, na hydrolýzu celulózy sú však potrebné oveľa extrémnejšie podmienky. V zriedenej kyseline sa reakcia uskutočňuje pri vysokej teplote a tlaku ale z dôvodu nízkych výťažkov glukózy z celulózy počas hydrolýzy je výťažok etanolu nízky. Použitie koncentrovanej kyseliny v procese hydrolýzy môže priniesť vyššie množstvá etanolu kvôli pomerne vysokej konverzii celulózy na glukózu, napr. zahrievanie celulózy v koncentrovanom roztoku H_2SO_4 pri teplote $100^\circ C$ počas 5-7 h poskytne viac ako 80%-ný výťažok D-glukózy. Významnou nevýhodou štandardného technického prevedenia hydrolýzy celulózy koncentrovanou kyselinou je korózia aparatúry a generovanie značne kyslého odpadu proti princípom zelenej ekonomiky. Proces hydrolýzy zriedenou kyselinou používa vysoké teploty ($160^\circ C$ - $230^\circ C$) a tlaky (cca 10 atm). Koncentrácia kyseliny v procese hydrolýzy zriedenej kyseliny je v rozsahu 2 až 5%.

1.2. Degradácia celulózy a hemicelulóz

Celulóza je lineárny polymér sa skladá z D-glukózových podjednotiek navzájom spojených - (1,4) -glykozidickými väzbami so stupňom polymerizácie 100-20 000. Cellobióza je opakujúca sa jednotka vytvorená týmto spojením a tvorí celulózové reťazce. Polyméry celulózy s dlhým reťazcom sú spojené vodíkovými väzbami a van der Waalsovými väzbami, ktoré spôsobujú združovanie celulózy do mikrofibríl. Veľkosť celulózových mikrofibríl sa pohybuje v rozsahu 5 - 15 nm a vzdialenosť medzi mikrofibrilami v rozsahu 20 - 40 nm. Mikrofibrily pokrývajú hemicelulózy a lignín. Fermentovateľná D-glukóza sa môže vyrábať z celulózy pôsobením kyseliny alebo enzýmov, ktoré narušujú - (1,4) - glykozidické väzby. Celulóza v biomase je prítomná v kryštalickej aj amorfnej forme. Zhruba 15 % celulózového reťazca tvoria amorfné oblasti Kryštalická celulóza obsahuje hlavný podiel celulózy, zatiaľ čo malé percento neorganizovaných celulózových reťazcov tvorí amorfnú celulózu.

Celulóza je náchylnejšia na enzymatickú degradáciu vo svojej amorfnej forme. Hlavným znakom, ktorý odlišuje hemicelulózu od celulózy, je to, že hemicelulóza má vetvy s krátkymi bočnými reťazcami skladajúcimi sa z rôznych cukrov. Tieto monosacharidy zahŕňajú pentózy (xylóza, ramnóza a arabinóza), hexózy (glukóza, manóza a galaktóza) a urónové kyseliny (napr. 4-ometylglukurónová, D-glukurónová a D-galaktouronová kyselina). Kostra hemicelulózy je buď homopolymér alebo heteropolymér s krátkymi vetvami spojenými - (1,4) -glykozidickými väzbami a niekedy - (1,3) -glykozidickými väzbami. Hemicelulózy tiež môžu mať určitý stupeň acetylácie, napríklad v heteroxyláne. Na rozdiel od celulózy sú polyméry prítomné v hemicelulózach ľahko hydrolyzovateľné.

Lignin je komplexná molekulárna štruktúra, ktorá obsahuje zosieťované polyméry fenolových monomérov. Je prítomný v primárnej bunkovej stene, čím poskytuje štrukturálnu podporu, nepriepustnosť a odolnosť proti mikrobiálnemu napadnutiu. Tri fenylové propiónové alkoholy existujú ako monoméry lignínu: koniferylalkohol (guaiacyl propanol), kumaryl alkohol (p-hydroxyfenylpropanol) a sinapylalkohol (syringyl alkohol). Alkyl-aryl, alkyl-alkyl a aryl-aryléterové väzby spájajú tieto fenolové monoméry dohromady. Rastliny ako sú trávy, majú všeobecne najnižší obsah lignínu, zatiaľ čo mäkké dreveniny majú najvyšší obsah lignínu. Publikované množstva lignínu v surovinách sa často líšia, závisia od spôsobu stanovenia, preto je Tab.1 potrebné považovať za značne zovšeobecnenú.

Tab.1 Podiel lignínu v dostupných surovinách.

Surovina	Obsah lignínu (%)
ihličnaté stromy	25-35
listnaté stromy	15-20
cukrová trstina	20
kukurličné stonky	35
miscantus	10-12
pšeničná slama	15
novinový papier	20
odpadový papier z chemických buničín	5-10

Enzymatická hydrolýza

Celulózové reťazce môžu byť rozdelené na jednotlivé molekuly jednoduchého cukru glukózy pomocou enzýmov známych ako **celulóza**. Celulóza označuje skupinu enzýmov produkovaných hlavne hubami (*Trichoderma viride*, *Trichoderma lignorum*, *Trichoderma konigii*, *Penicillium funiculosum*, *Penicillium irensii* a *Fusarium solani*), baktériami (*Clostridium*, *Cellulomonas*, *Bacillus*, *Thermomonospora*, *Ruminococcus*, *Bacteriodes*, *Erwinia*, *Acetovibrio*, *Microbispora*, a *Streptomyces*) a prvokmi, ktoré katalyzujú hydrolýzu celulózy. Existujú však aj celúlázy produkované rastlinami a zvieratami. Základné delenie celulózového komplexu je na: Endo- β -(1,4)-glukanázy, Exo- β -glukanázy (β -(1,4) glukanáza glukohydrolázy a β -(1,4) glukan cellobiohydrolázy) a β -(1,4) glukozidázy. Priebeh a hlavne výsledok (výťažok) enzymatickej hydrolýzy je ovplyvnený rôznymi faktormi: typ predúpravy,

prítomnosť inhibítorov, termostabilita enzýmov, aktivita, koncentráciou a adsorbcia enzýmov na substrát, čas hydrolýzy, pH, spôsob miešania.

Etanolová fermentácia

Anaeóbna fermentácia je proces premeny organických sacharidov na energeticky chudobnejší etanol prostredníctvom enzýmov. Enzými sú obsiahnuté v mikroorganizmoch a bežne sa uvažuje s kvasinkovými kmeňmi a bakteriálnymi kmeňmi, ktoré sa však ukázali ako citlivé na prítomnosť inhibítorov. Inhibítory, ktoré sa po predspracovaní najčastejšie vyskytujú v lignocelulóзовých materiáloch sú syringaldehyd, furfural, vanilín, kyselina levulová, ferulová, octová a mravčia, octan sodný a negatívne vplyvajú na priebeh fermentácie vrátane tvorby etanolu. Základné faktory vplyvajúce na efektivitu etanolovej fermentácie s využitím lignocelulóзовých substrátov sú: typ suroviny, spôsob fyzikálnochemickej predúpravy, vplyv inhibítorov, spôsob doživenia, režim kultivácie a pod. Pri fermentácii je potreba doživovania lignocelulóзовých substrátov z dôvodu doplnenia nutričných zložiek a ich koncentrácií (napr. kvasničný extrakt, kukuričný výluh alebo peptón). Výživové zložky pre enzýmy významne závisia aj od substrátu na fermentáciu, v ktorom sú obsiahnuté.

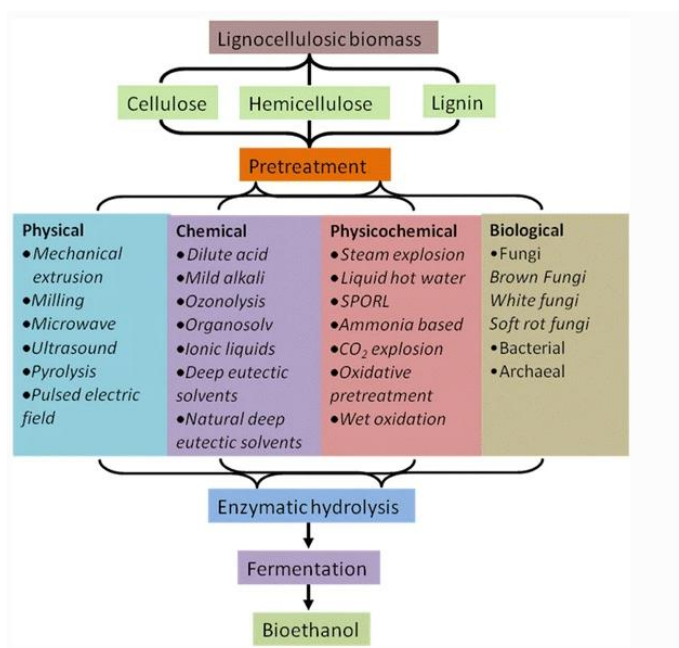
Predúprava extrúziou si vyžaduje ďalšie pridávané alkalické látky na zvýšenie jej účinnosti (napr. NaOH a $\text{Ca}(\text{OH})_2$). V alkalickom prostredí dochádza k rozrušeniu esterových väzieb a čiastočne sa odstraňuje hemicelulóзовá a hlavne lignínová frakcia, čo má vplyv na prvotnú separáciu lignínu. Ich aplikácia v určitom množstve už nemusí byť k enzýmom tolerantná. Aplikácia škrobov však neovplyvňuje fermentačný proces. Používanie sanačných látok môže mať významný inhibičný účinok. Premývanie vzoriek má mierny vplyv na tvorbu etanolu, avšak opakované premývanie nemá významný vplyv na priebeh fermentácie.

Predspracovanie parnou explóziou pri vyšších teplotách môže byť k procesu fermentácie nešeterné. V porovnaní s predúpravou extrúziou tieto vzorky obsahujú viac sacharidov, najmä glukózy avšak vyššie koncentrácie inhibítorov. Celkový obsah skvasiteľných sacharidov pri parnej extrúzii je porovnateľný, no obsahuje menej glukózy a viac xylózy v porovnaní s hydrolyzátmi po parnej explózii.

Kapitola II. Predúprava

Priaznivé účinky predúpravy lignocelulóзовých materiálov sú známe už dlhú dobu. Cieľom procesu predúpravy je odstránenie lignínu a hemicelulóзы, zníženie kryštalinity celulóзы a zvýšenie pórovitosti lignocelulóзовých materiálov. Predbežná úprava musí spĺňať tieto požiadavky: (1) zlepšiť tvorbu cukrov alebo schopnosť následne tvoriť cukry hydrolýzou, (2) zabrániť odbúraniu alebo strate uhl'ohydrátov, (3) zabrániť tvorbe vedľajších produktov, ktoré inhibujú následnú procesy hydrolýzy a fermentácie a (4) sú nákladovo efektívne. Metódy predúpravy možno zhruba rozdeliť do kategórií: fyzikálne (mletie a drvenie), fyzikálno-chemické (predúprava parou / autohydrolýza, hydrotermolýza a oxidácia za mokra),

chemické (alkálie, zriedená kyselina, oxidačné činidlá a organické rozpúšťadlá), biologické, elektrické, alebo ich kombinácia. Na obr.3 je znázornený jeden z najnovších prehľadov, ako ho prezentujú autori Kumar a Sharma. Viaceré z prezentovaných procesov predúpravy sa však dnes nachádzajú ešte len v štádiu intenzívneho výskumu a na praktické využitie sa stále čaká.



Obr.3 Prehľad rozličných spôsobov predúpravy (zdroj: Kumar, A.K., Sharma, S., 2017: Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review. *Bioresources and Bioprocessing* (4).

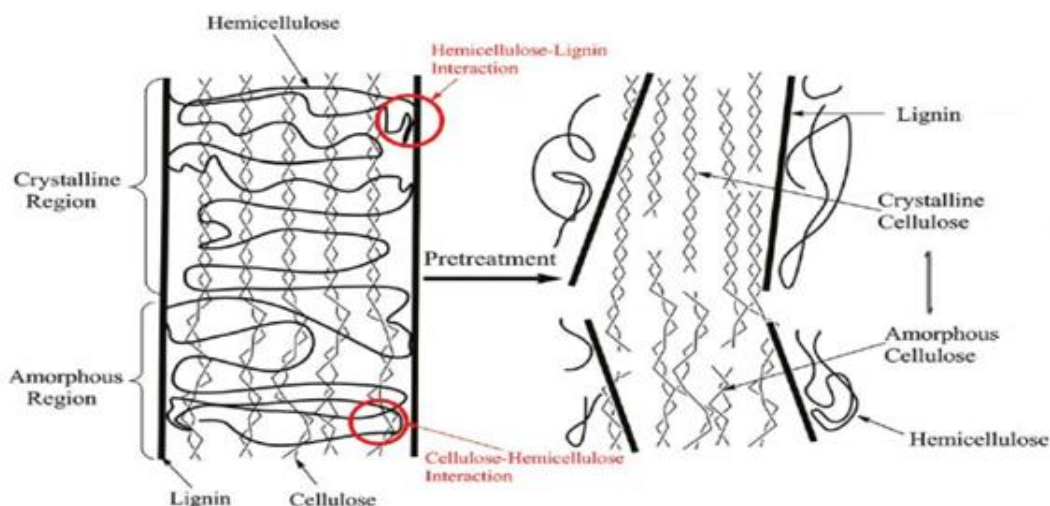
Predspracovanie a prvotná dezintegrácia

Samotnému procesu predspracovania predchádzajú procesy **prvotnej dezintegrácie** drevej hmoty. Najrozšírenejší spôsob redukcie rozmerov drevej hmoty je štiepkovanie. Proces **štiepkovania** je priemyselne dobre zaužívaný, využívajú sa hlavne diskové a bubnové štiepkovače. Proces **drvenia** v dnešnej dobe už začína naberať na vážnosti a to hlavne vďaka tlakom na využívanie recyklovaného odpadového dreva a drevných materiálov. Proces **mletia** už niektorí autori uvádzajú ako jeden zo spôsobov fyzikálnej predúpravy s tvrdením, že spôsobuje redukciiu krištalinity a taktiež prístupnosť enzýmov je vyššia.

Predspracovanie a frakcionácia dendromasy

Pri definovaní pojmov predspracovanie a frakcionácia je potrebné si hlavne uvedomiť zmysel ďalšieho využívania hmoty. **Predspracovanie** je proces, ktorého hlavným cieľom je sprístupnenie karbohydrátov enzymatickému ataku. **Frakcionácia** je zameraná na separáciu lignocelulózových komponentov (celulózy, hemicelulózy, lignínu, extraktívnych látok a pod.) s cieľom ich ďalšieho spracovania. Frakcionácia je jeden zo spôsobov, ktorý využívať si dáva za cieľ práve zelená chémia.

Hydrofóbny lignín predstavuje fyzikálnu bariéru pre prístup enzýmov. Účelom predúpravy je túto bariéru prekonať (obr.4), sprístupniť kryštalickú štruktúru celulózy a oddeliť hemicelózy. Inými slovami prekonať prirodzenú obranu lignocelulóзовých materiálov pre enzýmami biologických škodcov, ktorá je založená na malej prístupovej ploche a malých kapilárach.



Obr.4 Proces predúpravy, ktorému predchádza redukcia rozmerov substrátu.

Kapitola III. Fyzikálno-chemická predúprava

Parná explózia (steam explosion). Lignocelulóзовý nasiakavý substrát sa spracuje vysokotlakovou nasýtenou parou, pričom sa po určitej dobe tlak náhle zníži, čo spôsobuje, že substrát podlieha explozívnej dekompresii. Parný výbuch sa zvyčajne iniciuje pri teplote 160°C - 260°C počas niekoľkých sekúnd. Zmes dendromasy a pary za tlaku sa udržiava určitý čas, aby sa podporila hydrolýza hemicelulózy. Tento proces spôsobuje degradáciu hemicelulózy a transformáciu lignínu v dôsledku vysokej teploty, čím sa zvyšuje potenciál na ďalšiu hydrolýzu celulózy.

Účinnosť parnej explózie na enzymatickú hydrolýzu môže za istých podmienok predstavovať až 90%. Predpokladá sa, že odstránenie hemicelulózy z mikrofibríl vystavuje povrch celulózy a zvyšuje prístup enzýmov k celulóзовým mikrofibrilám. Lignín sa v priebehu predúpravy odstraňuje iba v obmedzenej miere, ale v dôsledku reakcií topenia sa depolymerizácie a redistribuuje na povrchu vlákien. Odstránenie a redistribúcia hemicelulózy a lignínu zvyšujú objem predspracovanej vzorky.

Počas parnej explózie môže dôjsť k určitej degradácii celulózy na glukózu. Pridanie H₂SO₄ (alebo SO₂) alebo CO₂ môže efektívne prispieť k zníženiu potrebného času a teploty, zníženiu produkcie inhibičných zlúčenín aj viesť k úplnému odstráneniu hemicelulózy. Na efektívnu predúpravu mäkkých drevín je nevyhnutným predpokladom sprístupnenie substrátu enzýmom pridaním kyslého katalyzátora. Faktory, ktoré ovplyvňujú predúpravu pred dekompresiou

pary, sú: čas zotrvania, teplota, veľkosť frakcie substrátu a obsah vlhkosti. Optimálna solubilizácia a hydrolýza hemicelulózy sa dá dosiahnuť buď vysokou teplotou a krátkou dobou zotrvania (270 ° C, 1 min.) alebo nižšou teplotou a dlhšou dobou zotrvania (190 ° C, 10 min.).

Výhody predúpravy parnou explóziou zahŕňajú nízku energetickú náročnosť v porovnaní s mechanickým drvením. Bežné mechanické metódy vyžadujú 70% viac energie ako výbuch pary, aby sa dosiahlo rovnaké zníženie veľkosti frakcie substrátu. Predbežná úprava parou s pridaním katalyzátora je technológia, o ktorej sa tvrdí, že je najbližšie ku komercializácii. Parná explózia je uznávaná ako jeden z nákladovo najefektívnejších postupov predúpravy tvrdého dreva a zvyškov v poľnohospodárstve, pre mäkké drevo je však menej účinná.

Autori Cara et al. zverejnili výsledky predúpravy čerstvého prútia z orezu olivovníkov parnou explóziou pri 240°C, pričom poukázali na maximálny výťažok etanolu (7,2 g etanolu / 100 g suroviny). Maximálny teoretický výťažok etanolu dosiahli v množstve 0,51g etanolu/1g glukózy, pričom uvažovali, že všetka glukóza v predspracovanom materiáli je k dispozícii na fermentáciu. Obmedzenia parnej explózie zahŕňajú deštrukciu časti xylánovej frakcie, neúplné narušenie matrice lignínu a uhl'ohydrátov a tvorbu zlúčenín inhibítorov. Práve kvôli tvorbe degradačných produktov, ktoré inhibujú enzymatickú hydrolýzu a fermentáciu, sa musí predspracovaná dendromasa premývať vodou, aby sa odstránili inhibítory avšak spolu s vodou rozpustnou hemicelulózou. Premývanie vodou znižuje celkový výťažku sacharifikácie odstránením rozpustných cukrov.

Známy je aj proces predúpravy kvapalnou vodou, pričom sa využíva tlak na udržanie vody v tekutom stave pri zvýšených teplotách. Tento typ predúpravy sa nazýva hydrotermolýza, vodná alebo parná/vodná fracionácia, nekatalyzovaná solvolýza alebo aquasolv proces. Zdržný čas je obvykle 15 minút pri teplotách v rozmedzí 200°C - 230°C. Pri tomto postupe sa rozpustí asi 40 až 60% celkového substrátu, pričom sa odstráni 4 až 22% celulózy, 35 až 60% lignínu a všetka hemicelulóza. Používajú sa tri konfigurácie horúcovodného reaktora, a to súbežný, protiprúdový a prietokový.

AFEX - Predúprava amoniakom (Ammonia Fiber Explosion). AFEX je fyzikálno-chemický proces predúpravy, pri ktorom je lignocelulóзовý substrát vystavený tekutému amoniaku pri vysokej teplote a tlaku po určitú dobu a potom sa tlak náhle zníži. Proces AFEX je veľmi podobný parnej explózii. Dávka tekutého amoniaku predstavuje 1 až 2 kg amoniaku/kg suchej dendromasy, teplota je cca 90 °C a zdržná doba je cca 30 minút. Počas predúpravy je rozpustené iba malé množstvo tuhého materiálu; to znamená, že sa neodstráni takmer žiadna hemicelulóza alebo lignín. Hemicelulóza je degradovaná na oligoméne cukry a deacetylovaná, čo je pravdepodobne dôvod, že hemicelulóza sa nerozpustí. Proces AFEX je vhodný hlavne pre trávy, nie je však príliš efektívny pre biomasu s vyšším obsahom lignínu, ako sú štiepky napr. z topoľa osiky (25% lignín). Výťažky hydrolýzy sú iba okolo 40 - 50%.

Iným typom procesu využívajúceho amoniak je metóda **ammonia recycle percolation (ARP)**. Pri tomto postupe vodný amoniak (10% až 15% hmotn.) prechádza biomasou pri

zvýšených teplotách (150°C až 170°C) s rýchlosťou tekutiny 1 cm/min počas zdržnej doby cca 14 minút, pričom sa amoniak regeneruje. Pri metóde ARP sa amoniak separuje a recykluje. Za týchto podmienok vodný amoniak reaguje primárne s lignínom a spôsobuje depolymerizáciu lignínu a štiepenie lignín-sacharidových väzieb. Predúprava amoniakom nevytvára inhibítory pre následné biologické procesy, takže nie je potrebné premývanie vodou. Hlavný rozdiel v procesoch je, že AFEX sa uskutočňuje v kvapalnom amoniaku a ARP sa uskutočňuje vo vodnom roztoku amoniaku (10 až 15%). AFEX súčasne znižuje obsah lignínu a odstraňuje niektoré hemicelulózy pri dekryštalizácii celulózy. Môže mať výrazný vplyv na rýchlosť hydrolýzy celulózy. Náklady na amoniak, a najmä na regeneráciu amoniaku, zvyšujú náklady na predúpravu AFEX.

Známe sú výsledky AFEX laboratórnych pokusov so switchgrass (*Panicum virgatum*) s teplotou okolo 100 °C, dávka amoniaku 1 kg amoniaku / 1 kg sušiny, obsah vlhkosti 80% a zdržná doba 5 minút. Výsledky hydrolýzy vzoriek ošetrených AFEX a neošetrených vzoriek ukázali 93% oproti 16% konverzii glukánu. Výťažok etanolu bol meraný na asi 0,2g etanolu/ 1g suchej biomasy, čo bol 2,5-násobok výťažku neošetrenej vzorky. Alebo výsledky pre miscantus pri tvrších podmienkach 160°C, amoniak : biomasa 2 : 1 (w/w) 2.3g vody / 1gram biomasy, 5 min zdržná doba s výsledkom 96% premeny glukánu a 81% xylánu. Kim et al. uvádzajú, že proces ARP dokáže odstrániť z kukuričného kôrovia až 85% lignínu.

Predúprava CO₂ (Carbon Dioxide Explosion). Myšlienka použitia superkritického výbuchu CO₂ vznikla aby sa znížila teplota parnej explózie a znížili náklady v porovnaní s výbuchom amoniaku. Superkritická tekutina označuje tekutinu, ktorá je v plynnej forme, ale je stlačená pri teplotách nad kritickým bodom na hustotu podobnú tekutine. Predpokladalo sa, keďže CO₂ tvorí kyselinu uhličitú, keď je rozpustený vo vode, že kyselina zvyšuje rýchlosť hydrolýzy. Molekuly oxidu uhličitého sú svojou veľkosťou porovnateľné s vodou a amoniakom a mali by byť schopné preniknúť cez malé póry dostupné pre molekuly vody a amoniaku. Oxid uhličitý sa považoval za užitočný pri hydrolýze hemicelulózy a celulózy. Nízka teplota navyše bráni akémukoľvek citelnému rozkladu monosacharidov kyselinou. Po explozívnom uvoľnení tlaku oxidu uhličitého narušenie celulózovej štruktúry zvyšuje prístupnú povrchovú plochu substrátu k hydrolýze.

Dale a kol. použil tento spôsob na predúpravu lucerny (4 kg CO₂ / kg vlákna pri tlaku 5,62 MPa) a získal 75% teoretickej glukózy uvoľnenej v priebehu 24 hodín enzymatickej hydrolýzy. Výťažky boli relatívne nízke v porovnaní s výťažkami z predúpravy parnou explóziou alebo amoniaku, ale vysoké v porovnaní s výťažkami enzymatickej hydrolýzy bez predúpravy.

Zheng a kol. porovnal preúpravu CO₂ s parnou explóziou a predúpravu amoniakom pri zmesi recyklovaného papiera, bagasi z cukrovej trstiny a recyklovanej buničiny a zistil, že predúprava CO₂ bola nákladovo efektívnejšia ako predúprava amoniakom. Porovnával účinky použitia amoniaku (množstvo v gramoch NH₃ na gram suchej biomasy) na enzymatickú konverziu glukánu a xylánu na AFEX predúpravu kukurice pri 90 °C a 60% obsahu vlhkosti.

Predúprava nespôsobuje tvorbu inhibičných zlúčenín, ktoré by sa mohli vyskytnúť pri parnej explózii. Zvýšenie tlaku umožnilo rýchlejšiu penetráciu molekúl CO₂ do kryštalických štruktúr, čím sa po výbuchu vytvorilo viac glukózy. Pretože výbuch CO₂ je prevádzkovaný pri nízkych teplotách, nespôsobuje degradáciu cukrov, ako napríklad degradácia cukrov pozorovaná pri výbuchu pary v dôsledku vysokej teploty.

Kapitola IV. Optimalizácia predspracovanie dendromasy parnou explóziou v laboratórnych podmienkach

Príprava vzoriek

Vzorky boli pripravené z našich dvoch najrozšírenejších drevín smrek a buk. Zároveň takto bolo odskúšané zastúpenie makkých a tvrdých drevín. Na prípravu boli použité predsušené dosky. Prvotné spracovanie bolo uskutočnené rovinným frézovaním za účelom získania tenkej vzorky, pričom jej hrúbka má byť násobne menšia ako jej ostávajúce dva rozmery a to z dôvodu účinnej impregnácie pred predúpravou.

Definovanie frakcie

Takto získané hobliny boli presitované na tri frakcie podľa Tab. 2. Cieľom bolo aj oddeliť jemnú frakciu obsahujúcu prach. S touto frakciou sa už ďalej v experimentoch neuvažovalo.

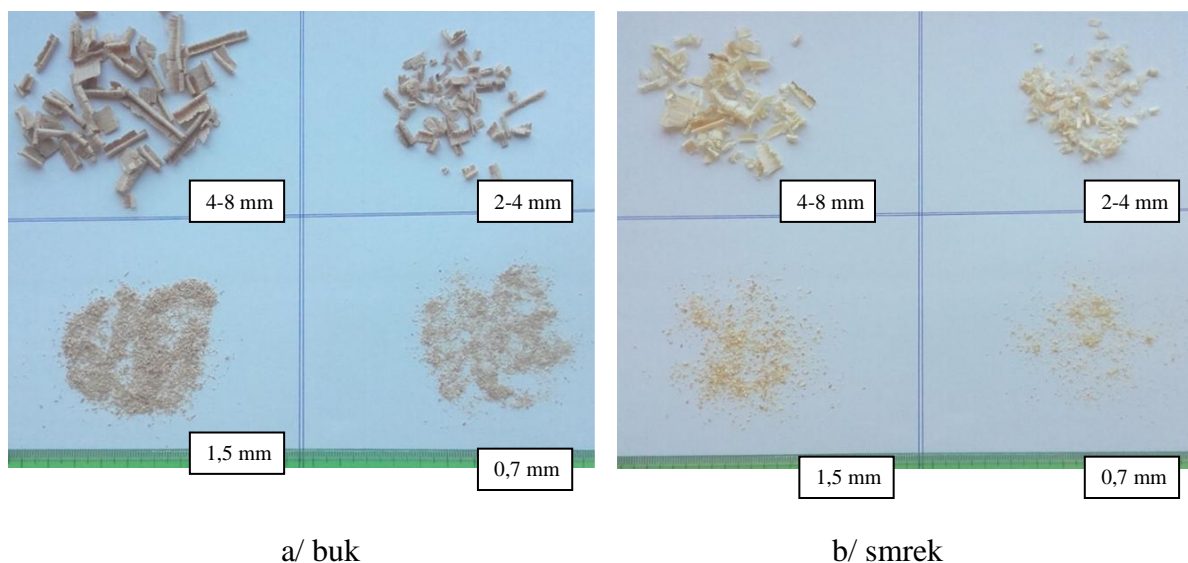
Tab.2 Frakcie po sitovaní.

	frakcia (mesh)	množstvo	podiel
buk	4 – 8 mm	1000 g	64,10 %
	2 - 4 mm	375 g	24,04 %
	0 - 2 mm	185 g	11,86 %
smrek	4 – 8 mm	365 g	62,93 %
	2 - 4 mm	125 g	21,55 %
	0 - 2 mm	90 g	15,52 %

Rovinným frézovaním tak boli z buka získané frakcie 4-8 / 2-4 / 0-2 v pomere 5,4 : 2,0 : 1,0. Tie isté frakcie získané zo smreka boli v pomere 4,0 : 1,4 : 1,0.

Mletie

Za účelom získania jemnejšej frakcie bolo použité laboratórne nožové mletie zariadenie Brabender so spodným sitom. Na experiment boli použité sitá s okom 1,5 mm a 0,7 mm. Nožové mletie nahrádza v praxi používané kladivkové mletie na získavanie drevnej múčky.



Obr.5 Frakcie vzoriek určené na experiment.

Impregnácia vzoriek vodou

Impregnácia vzoriek bola vykonaná vodou tak aby konečná relatívna vlhkosť vzoriek počas experimentu dosahovala min. 85%. To znamená, že množstvo vody, v ktorej bola vzorka pred samotným experimentom máčaná bolo dopočítané na 15% sušinu v absolútnom stave (a.s.). Vzorky boli namáčané vo vode cca 20°C minimálne jednu hodinu pred experimentom. Rýchle stanovenie sušiny vzoriek bolo vykonané na náhodnej vzorke na laboratórnych váhach Denver IR35. Navážka vzorky 50g a.s. bola jednotná pre všetky vzorky.

Parná explózia pripravených vzoriek

Vzorky smreka a buka pripravené podľa postupov popísaných hore boli ďalej podrobené parnej explózii v zariadení tlakového reaktora (Amar Equipments Pvt. Ltd., India) pri teplotách 180°C, 200°C a 220°C (obr.6).



Obr.6 Tlakový reaktor s tlakovou nádobou (STEX).

Postup prípravy na experiment prebiehal tak, že do zariadenia na parnú explóziu, ktoré bolo vyhriate na 50°C, sa umiestnila vzorka a bola doliata voda s objemom 100 ml z dôvodu zabránenia čiastočnému zuhoľnateniu vzorky v styku so stenami a dnom tlakového reaktora.

Spustilo sa vyhrievanie na nastavenú teplotu. Zvyšujúcou teplotou v tlakovej nádrži narastal tlak. Pri dosiahnutí predpísanej teploty sa prostredníctvom pneumaticky ovládaného guľového ventilu tlak z nádoby rýchlo uvoľnil cez výpustný ventil s vnútorným otvorom priemeru 10 mm, čo spôsobilo vnútornú deštrukciu vzorky a jej vymrštenie do záchytnej nádoby. Vystrelená vzorka sa uskladnila pri teplote minimálne 2°C po dobu maximálne 72 hodín až do následnej enzymatickej hydrolýzy.

Priebeh a výsledky parnej explozie (STEX)

Tab.3 Príklad bukovej vzorky frakcie 4-8mm

Buk frakcia 4-8mm				
sušina 91 % a.s.				
navážka 50 g a.s.				
váha vzorky 54,9 g				
vlhkosť vzorky na: 15 %				
doliať vodu na 333 g (vrátane vzorky 54,9 g)				
doliať 1 dc vody do reaktora				
zádržný čas: 10 min				
P.č.	Nastavená teplota [°C]	Priemerná dosahovaná teplota [°C]	Max. pracovný tlak [bar]	pozn. (slovné zhodnotenie výsledku)
1	140	144	3,7	slabý výstrel, vystrelilo málo, takmer neporušené, vzorka z tlakového varenia odobraná na hydrolýzu
2	160	158	5,2	vystrelilo málo vzorky, málo rozrušené, vzorky odobrané na hydrolýzu aj z tlakového varenia aj z explózie
3	170	169	6,9	vystrelilo málo, málo rozrušené, vzorky odobraté na hydrolýzu aj z tlakového varenia aj z explózie
4	180	178	9,2	vystrelilo viacej, polovica ostala v reaktore, vzorky odobrané na hydrolýzu
5	200	197	14,7	dobry výstrel, vzorky odobrané na hydrolýzu
6	220	218	21,8	vystrelilo všetko



Obr.7 Ukážky vzoriek vystrelených po parnej explózii.

Kapitola II. Enzymatická hydrolýza drevných častíc upravených STEX**Enzymatická hydrolýza vzoriek drevných častíc**

Enzymatická hydrolýza pôvodných a predúpravených drevných častíc enzýmom Cellic CTec3 s dávkovaním 15% hmotnostných (g Cellic CTec3 na 100 g celulózy) bola realizovaná pri 50°C, pH = 5,0 v trvaní 72 hodín a pri sušine vzoriek 12,5 % hmotnostných. Hodnota pH bola upravovaná počas procesu priebežne, a to prostredníctvom 0,1 N H₂SO₄ alebo 0,1 N NaOH.

HPLC metóda pre stanovenie monosacharidov a inhibítorov

Chemické zloženie predspracovaných drevných častíc bolo stanovované použitím procedúry vyvinutého na NREL (National Renewable Energy Laboratory, Sluiter a kol. 2011). Vzorky hydrolyzátorov pripravené podľa postupov popísaných v kapitolách 1.1 až 1.4 boli analyzované na obsah monosacharidov (glukóza a xylóza), pričom boli odoberané v čase 24 hodín, 48 hodín a 72 hodín. Pre účely analýzy bola použitá metóda HPLC s použitím kolóny typu Rezex ROA H⁺ (CHROMSERVIS, Slovenská republika). Inhibítory ako kyselina mravčia, kyselina octová, hydroxymetylfurfural a furfural boli stanovené tiež uvedenou metódou HPLC. Ako mobilná fáza bola v kolóne, a tiež v celom systéme, použitá 0,005 N H₂SO₄ s objemovým prietokom veľkosti 0,7 mL.min.⁻¹ a teplote 30 °C. Vzorky boli pred nástrekom do HPLC kolóny filtrované použitím striekačkového filtra MS s priemerom filtra 25 mm. Použitý filter bol na báze hydrofilizovaného polytetrafluóretylénu s veľkosťou pórov 0,22 μm (CHROMSERVIS, Slovenská republika).

Výsledky a diskusia

Na Obr. 8 a Obr. 9 sú graficky zaznamenané výsledné koncentračné výt'azky monosacharidov po predspracovaní smrekových a bukových častíc o veľkosti 0,7 mm parnou explóziou a následne hydrolyzovaných v závislosti od teploty. Porovnaním výsledkov analýzy metódou HPLC bolo zistené, že najvyššie výt'azky monosacharidov sú v prípade bukových častíc hydrolyzovaných po predspracovaní pri teplote parnej explózie 180 °C (celkový podiel monosacharidov na úrovni 81,1 g.L⁻¹).

Pre výpočet faktora závažnosti procesu predspracovania slúži nasledovná rovnica v integrálnom tvare:

$$R_o = \int_0^t \exp \left[\frac{T_r - T_b}{14,75} \right] dt$$

kde

R_o - kvantifikácia reakčnej koordináty

t - zdržný čas biomasy v danej reakcii (min)

T_r - reakčná teplota

T_b - základná teplota (100 °C)

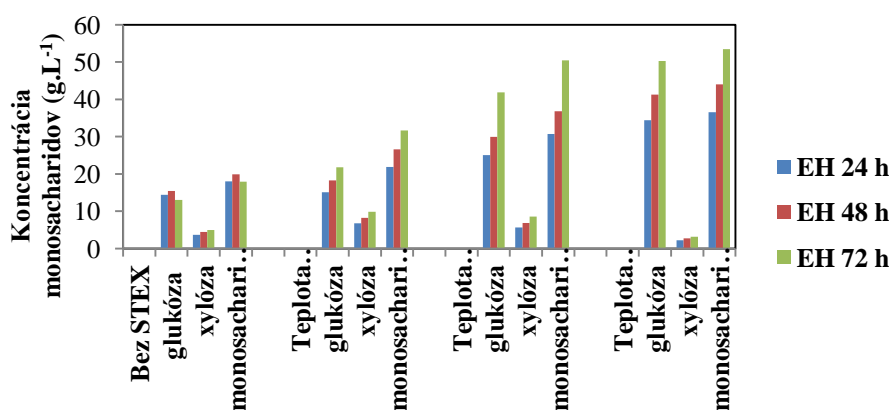
konštanta s hodnotou 14,75 kJ.mol⁻¹ je konvenčná aktivačná energia.

Rovnicu pre výpočet faktora závažnosti procesu možno napísať aj v zjednodušenom tvare:

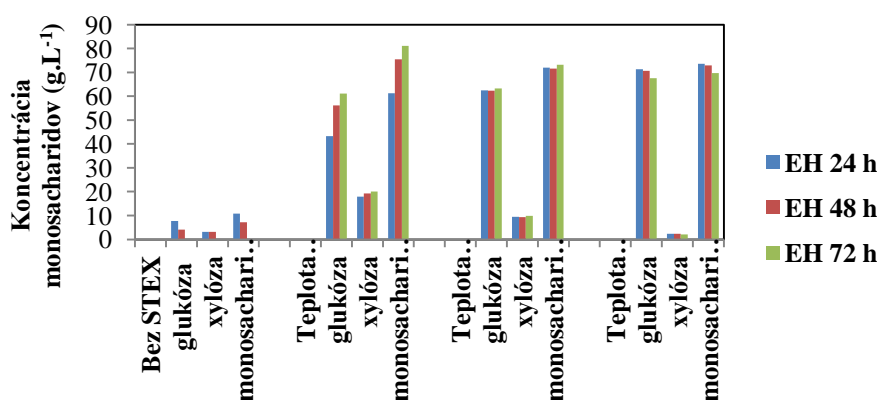
$$R_o = t \cdot \exp \left[\frac{T_r - T_b}{14,75} \right]$$

Pre nami zvolený zdržný čas 10 minút v prípade procesu predspracovania parnou explóziou pri teplote 180 °C a odlogaritmovaní má závažnosť procesu hodnotu 3,36. Hodnoty závažnosti pre ostatné procesy predspracovania parnou explóziou boli vždy vyššie $R_o = 3,94$ (200 °C, 10 minút), resp. $R_o = 4,53$ (220 °C, 10 minút) a rádovo korešponujú s publikovanými prácami (Simangunsong a kol. 2018, Damay a kol. 2018).

Z uvedených hodnôt závažnosti procesu a z priradenia výťažkov monosacharidov zo smrekových a bukových častíc k uvedeným procesom tiež vyplýva, že optimálne podmienky sa dosahujú v prípade **smrekových častíc** pri predspracovaní parnou explóziou pri teplote 220 °C, naproti tomu v prípade **bukových častíc** ide o už zmienenú teplotu 180 °C.



Obr.8 Závislosť výťažku monosacharidov – glukózy a xylózy od teploty predspracovania smrekových častíc o veľkosti 0,7 mm parnou explóziou.



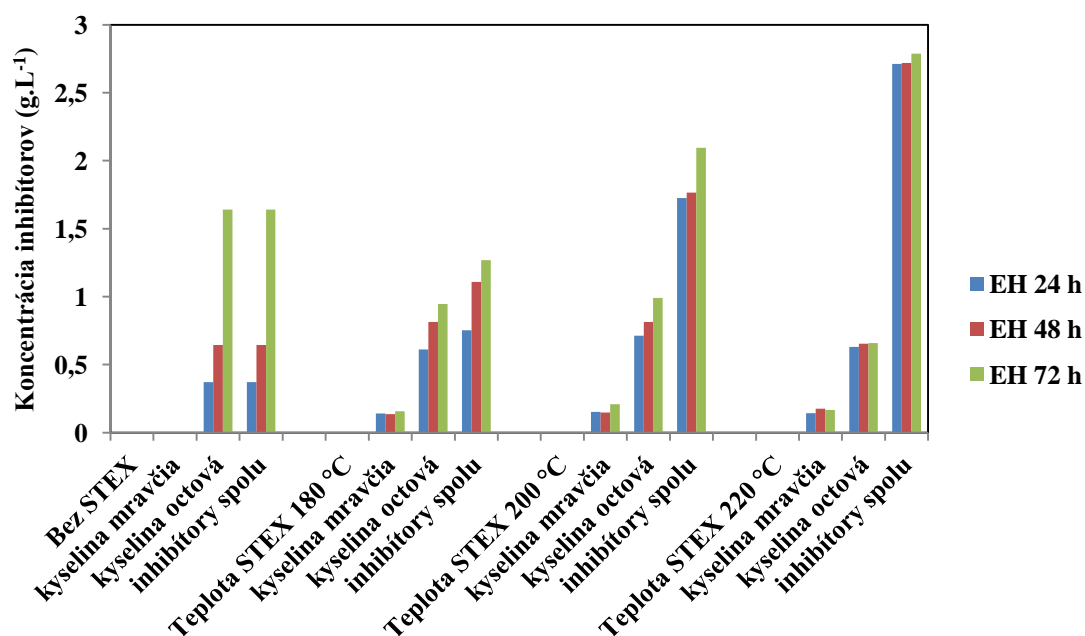
Obr.9 Závislosť výťažku monosacharidov – glukózy a xylózy od teploty predspracovania bukových častíc o veľkosti 0,7 mm parnou explóziou.

Z predchádzajúcich závislostí možno tiež vidieť rast výťažku monosacharidov už v čase 48 hodín od začiatku enzymatickej hydrolýzy. Pritom v čase 72 hodín od inicializácie procesu enzymatickej hydrolýzy je v porovnaní s časom 48 hodín nárast výťažkov monosacharidov len mierny. Hodnoty faktora závažnosti, od ktorého závisí výťažok enzymatickej hydrolýzy, keďže ide o veličinu, ktorá je funkciou teploty a zdržného času, sú pre nami vybrané teploty predspracovania parnou explóziou v rozmedzí 3,36 až 4,53 (Tab.4). Ako vyplýva z predchádzajúcich skutočností, závislosť hodnôt faktora závažnosti od teploty je teda nelineárna – logaritmická.

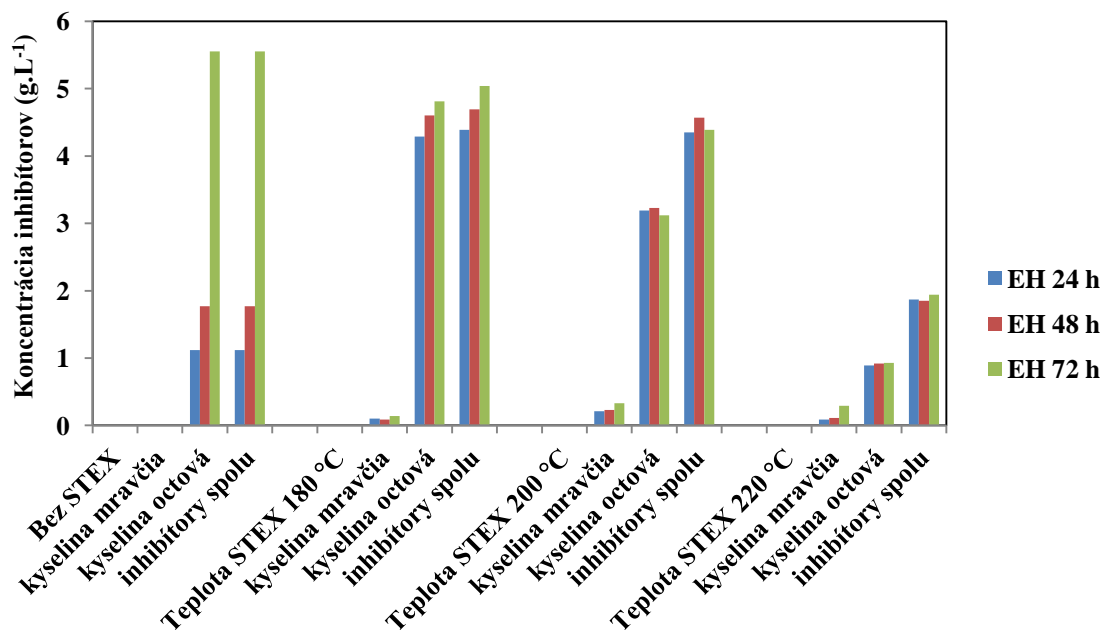
Tab.4 Závislosť hodnoty faktora závažnosti procesu predspracovania od teploty parnej explózie pri konštantnom zdržnom čase v trvaní 10 minút.

Teplota parnej explózie (°C)	Zdržný čas (minúty)	Faktor závažnosti procesu predspracovania
180	10	3,36
200	10	3,94
220	10	4,53

Pre priemyselnú prax výroby biopalív na báze celulózy je tiež dôležité poznať podiel inhibítorov v získaných hydrolyzátoch (Obr.10 a Obr.11), lebo spomaľujú samotnú hydrolýzu.



Obr.10 Závislosť koncentrácie inhibítorov od teploty predspracovania smrekových častíc o veľkosti 0,7 mm parnou explóziou.



Obr.11 Závislosť koncentrácie inhibítorov od teploty predspracovania bukových častíc o veľkosti 0,7 mm parnou explóziou.

Z analýz stanovenia inhibítorov vyplýva, že v hydrolyzátoch sa nachádzali značné množstvá kyseliny octovej a kyseliny mravčej (Obr.10 a Obr.11), prípadne aj ďalších inhibítorov – hydroxymetylfurfuralu a furfuralu. S nárastom času hydrolyzy je tiež evidentný nárast podielu všetkých inhibítorov, a to v prípade enzymatickej hydrolyzy smrekových častíc predspracovaných parnou explóziou, pričom najvyšší podiel inhibítorov bol až pri teplote predspracovania 220°C. Najvýraznejší nárast podielu inhibítorov pre uvedený prípad enzymatickej hydrolyzy je v čase 72 hodín od začiatku enzymatickej hydrolyzy, kedy vzniklo až 0,17 g.L⁻¹ kyseliny mravčej, 0,66 g.L⁻¹ kyseliny octovej, 1,66 g.L⁻¹ hydroxymetylfurfuralu a 0,30 g.L⁻¹ furfuralu. Faktor závažnosti procesu predspracovania pre tento prípad bol $R_0 = 4,53$ (Tab.4), avšak pre optimálne podmienky predspracovania smrekových častíc parnou explóziou vzhľadom na najvyšší podiel inhibítorov pri teplote 220°C je nutné zvážiť zníženie teploty predspracovania parnou explóziou na 200°C, kedy pokles podielu monosacharidov nie je ešte výrazný, hoci vzhľadom k podielu monosacharidov (53,4 g.L⁻¹) nami zistená optimálna teplota predspracovania bola 220°C.

Záverom možno teda konštatovať, že pri tejto teplote bol zistený najvyšší podiel monosacharidov (53,4 g.L⁻¹), ale aj inhibítorov (2,79 g.L⁻¹). Najnižší podiel inhibítorov bol v prípade teploty predspracovania smrekových častíc s veľkosťou 0,7 mm parnou explóziou 180°C, avšak výtazky monosacharidov boli výrazne nižšie (31,7 g.L⁻¹). Čo sa týka vplyvu teploty predspracovania na podiel inhibítorov v procese enzymatickej hydrolyzy predspracovaných bukových častíc s veľkosťou 0,7 mm, trend bol mierne klesajúci, a teda pri teplote predspracovania parnou explóziou 180°C bol zistený najvyšší podiel inhibítorov (zhruba 5,0 g.L⁻¹) a najnižší podiel inhibítorov pri teplote 220°C, čo súhlasí s našimi opakovanými experimentmi (Pažitný a kol. 2018).

Záver

Na to, aby bolo možné konkurovať tradičným ropným rafinériám, sa pri biochemickom spracovaní vyžadujú vysoké výnosy biopalív s nízkym obsahom enzýmov. Aj keď existuje veľa technológií predúpravy s rôznymi chemickými postupmi pre rozklad biomasy, väčšina procesov je spätých s ekonomickými a environmentálnymi problémami týkajúcimi sa použitia chemikálií a ich regenerácie, nadmerného využívania vody a pod. Medzi popredné možnosti termochemickej predúpravy patria parná explózia (STEX) a predúprava amoniakom (AFEX™), dve technológie demonštrované v pilotnom meradle, ktoré vzhľadom na rozdielne vzorce dekonštrukcie biomasy (kyslý vs. zásaditý) majú potenciál na integráciu do existujúcich závodov.

Autokatalyzovaný STEX je dobre známy prístup založený na termochemickom predspracovaní, ktorý využíva vysokoteplotnú nasýtenú paru a vlastné organické kyseliny odvodené z biomasy (napríklad kyselinu octovú) na zvýšenie prístupnosti celulózy. Počas procesu predúpravy dochádza k selektívnej frakcionácii hemicelulózy, čiastočnému štiepeniu väzieb esterového komplexu lignínu a uhľohydrátu a zvýšenej prístupnosti substrátu k hydrolytickým enzýmom. Výhody predúpravy STEX na integráciu do operácií zahŕňajú použitie vody ako zeleného rozpúšťadla, relatívne nízke kapitálové investície, mierne požiadavky na energiu a schopnosť používať biomasu s vysokým obsahom vlhkosti. Avšak kvôli závažnosti predúpravy vyžadovanej na dosiahnutie vysokej prístupnosti k celulóze, STEX vytvára hemicelulózu a degradačné produkty, ktoré inhibujú enzymatickú hydrolýzu a fermentáciu.

Alkalický proces predúpravy AFEX™ spracováva vlhkú biomasu bezvodým amoniakom pri miernych teplotách a tlakoch, po čom nasleduje rýchle uvoľnenie tlaku a regenerácia odpareného amoniaku. AFEX™ predúprava zvyšuje enzymatickú prístupnosť biomasy prostredníctvom štiepenia väzieb komplexných esterov lignínu s uhľohydrátmi, dekrystalizácie celulózy, deacetylácie, redistribúcie lignínu / hemicelulózy smerom k vonkajšej bunkovej stene rastlín a zväčšenej plochy prístupnej pre enzýmy. Okrem toho AFEX™ zachováva pôvodné rastlinné živiny a vytvára produkty minimálnej inhibičnej degradácie, čo vedie k skvasiteľnému enzymatickému hydrolyzátu, ktorý nevyžaduje detoxikáciu alebo významné externé doplnenie živín. Operácie zhodnocovania amoniaku a doplnkový amoniak však zvyšujú kapitálové a prevádzkové náklady na AFEX™. Preto bola navrhnutá optimalizácia podmienok predúpravy pri nízkom zaťažení amoniakom na biomasu ako potenciálna stratégia na zníženie nákladov na regeneráciu amoniaku.

V rámci vlastného výskumu sme modifikovali proces predúpravy STEX a to spôsobom znížovania nákladov na dodatočú výrobu pary. V našom procese para vzniká prehriatim vlhkosti obsiahnutej v dendromase resp. biomase, ktorá zároveň slúži na pôvodnú impregnáciu. pri experimentálnych meraniach bol zistený významný vplyv teploty a faktora závažnosti pri predspracovaní smrekových a bukových častíc s veľkosťou 0,7 mm parnou explóziou na výťažok monosacharidov a inhibítorov enzymatickej hydrolýzy uvedených

predspracovaných drevných častíc. Najvyšší podiel monosacharidov z enzymatickej hydrolýzy bol zistený pri teplote predspracovania bukových častíc s veľkosťou 0,7 mm na úrovni 180 °C. V tomto prípade bola hodnota faktora závažnosti procesu na úrovni $R_0 = 3,36$ a podiel monosacharidov na úrovni 81,1 g.L⁻¹. Pre enzymatickú hydrolýzu bukových častíc s veľkosťou 0,7 mm predspracovaných pri tejto teplote a pri príslušnej hodnote faktora závažnosti procesu bol však tiež zistený najvyšší podiel inhibítorov na úrovni zhruba 5,0 g.L⁻¹. Naproti tomu, najvyšší podiel inhibítorov v prípade enzymatickej hydrolýzy predspracovaných smrekových častíc s veľkosťou 0,7 mm bol zistený pre faktor závažnosti procesu na úrovni $R_0 = 4,53$, teda pre teplotu 220 °C. Podiel inhibítorov bol v tomto prípade 2,79 g.L⁻¹, a teda omnoho nižší v porovnaní s hydrolyzovanými bukovými časticami s veľkosťou 0,7 mm predtým podrobenými predspracovaniu parnou explóziou pri teplote 180°C. Najvyšší získaný podiel monosacharidov zo smrekových častíc s veľkosťou 0,7 mm na úrovni 53,4 g.L⁻¹ bol však výrazne nižší v porovnaní s najvyšším získaným podielom monosacharidov z bukových častíc s veľkosťou 0,7 mm na úrovni 81,1 g.L⁻¹. Určenie optimálnych podmienok pre zisk, resp. podiel monosacharidov má využitie v potravinárskom a chemickom priemysle, a takisto v transformácii drevných materiálov na biopalivá a pelety, preto je nutná ďalšia optimalizácia podmienok zmieňovaných procesov predspracovania, prípadne návrh optimálneho surovinového mixu vhodného pre uvedené procesy predspracovania.