

## VODNÁ PREDHYROLÝZA BREZY BRADAVIČNATEJ (*BETULA VERRUCOSA* EHRH.)

### WATER PREHYROLYSIS OF SILVER BIRCH (*BETULA VERRUCOSA* EHRH.)

Marta Laurová – Vladimír Vacek

#### ABSTRACT

Hydrothermal pretreatment of various renewable lignocellulosic sources is very important step for efficient bioethanol and other technical important chemicals production. This work deals with the water prehydrolysis of silver birch wood (26 and 62 years old). In this study, formation of sugars during water prehydrolysis of wood at 140–180 °C has been studied. The maximum of both monosaccharides and oligosaccharides contents were found at 180 °C of pretreatment.

**Keywords:** carbohydrates, gas chromatography, hydrolysis, wood.

#### ÚVOD

Lignocelulózová (LC) biomasa je v súčasnej dobe ako východisková surovina 2. generácie na výrobu bioetanolu síce z rôznych dôvodov preferovaná, avšak ako substrát pre enzymatickú hydrolýzu vykazuje rôzne „bariéry“, ktoré sťažujú a spomaľujú samotné hydrolýzne procesy celulózovej frakcie (tzv. C6 frakcia) a tým aj znižujú konkurencieschopnosť tohto perspektívneho biopaliva. Preto je nevyhnutné predupraviť vstupnú surovinu tak, aby sa v konečnom dôsledku hydrolýznymi postupmi získali monosacharidy schopné mikrobiálnej fermentácie (PANDEY 2009).

Cieľom predúpravy LC biomasy je z chemického hľadiska v čo najväčšej miere odstránenie lignínu a hemicelulózu, zníženie kryštalického podielu celulózy a zvýšenie porózności samotnej suroviny (PANDEY 2009, TAHERZADEH, KARIMI 2008, MOSIER *et al.* 2005).

Vysoký podiel kryštalinity celulózy je zapríčinený vysokou usporiadanosťou celulózových makromolekúl do mikrofibril v dôsledku existencie intermolekulových vodíkových väzieb. To spôsobuje, že natívna celulóza sa stáva ako substrát vo všeobecnosti neprístupná nielen pre enzýmy, ale aj také malé molekuly, ako je voda.

Ďalším dôležitým faktorom, ktorý ovplyvňuje hydrolýzny proces celulózy, je jej priemerný polymerizačný stupeň. Kratšie makromolekuly sú viac prístupné účinkom enzýmov, obzvlášť exocelulázam.

Okrem toho, v LC biomase sa nachádza aj lignín a hemicelulózy. Lignín-sacharidové väzby majú zväčša heterogénny charakter a zväčša nie sú prístupné hydrolytickému štiepeniu. Dôsledkom je existencia nerozpustného lignínu naviazaného na hemicelulózy, čo taktiež prispieva ku sťaženiu depolymerizačných procesov samotnej celulózy, nakoľko veľmi dôležitú úlohu pri hodnotení účinnosti enzymatickej hydrolýzy zohráva aj prístupnosť enzýmov k celulóze, prítomnej v najväčšom zastúpení v sekundárnej vrstve bunkovej steny rastlín. Silne lignifikované substráty LC charakteru z uvedených dôvodov nie sú vhodné na biokonverziu celulózy. V tejto súvislosti je dôležité vhodnou predúpravou materiálu dosiahnuť maximálne odstránenie hemicelulózu a lignínu, t.j. zvýšiť jeho pórovitosť, resp. vnútorný povrch.

Tieto problémy sa v technológiách výroby bioetanolu riešia rôznymi technologickými postupmi predúpravy natívnej LC biomasy, výsledkom ktorých je v konečnom dôsledku zvýšenie rýchlosti a efektívnosti hydrolyzy celulózy a následne výťažnosti konečného produktu.

V súčasnej dobe sa spôsoby predúpravy LC biomasy delia na fyzikálne, chemické, fyzikálno-chemické a biologické (MOSIER *et al.* 2005, SUN, CHENG 2002, Hu *et al.* 2008, Garrote *et al.* 1999, SZCZODRAK, FIEDUREK 1996, BUČKO 2001, KOŠÍKOVÁ, BUČKO 2002).

Horúcovodná predúprava LC biomasy využíva na zachovanie kvapalného skupenstva vody pri vysokých teplotách tlak. Pri priamom procese sa nechá prúdiť voda priamo cez vrstvy LC biomasy. Táto metóda spolu s metódou, ktorá taktiež využíva na predúpravu vodu, ale vo forme pary, má v literatúre rôzne pomenovania, ako napríklad *hydrotermická predúprava* (GARROTE *et al.* 1999), *autohydrolyza* (CONNER 1984), *hydrotermolýza* (BOBLETER *et al.* 1981), *vodná* alebo *parno-vodná frakcionácia* (SUN, CHENG 2002, BOUCHARD *et al.* 1991, RAMOS 2003, *nekatalyzovaná solvolýza* (MOK *et al.* 1992), *vodná hydrolyza* (CONNER 1984, ALLEN *et al.* 1996) a pod.

Hydrotermická predúprava LC biomasy parením alebo varením má viacero výhod, napríklad:

- 1) nie sú potrebné žiadne chemikálie, t.j. celý proces je z enviromentálneho hľadiska vyhovujúci;
- 2) hemicelulózy z roztokov možno využiť na prípravu sacharidov;
- 3) v porovnaní s kyslou predhydrolyzou, existujú oveľa menšie problémy s koróziou v dôsledku nízkych hodnôt pH predhydrolyzátov;
- 4) problémy s odstraňovaním nánosov sú minimalizované;
- 5) fyzikálnochemické zmeny lignínu a celulózy zmierňujú následnú izoláciu týchto makromolekulových látok z LCM ai. (GARROTE *et al.* 1999).

Cieľom tohto typu predúpravy LC materiálov je pri energeticky a technologicky prijateľných podmienkach odstrániť ľahkohydrolyzovateľnú časť polysacharidov (*hemicelulózy*), vodorozpustný lignín a extraktívne látky, pričom je dôležitý fakt, že k degradácii kryštalickej celulózy dochádza až v teplotnom rozmedzí 210 až 280 °C (HEITZ *et al.* 1986, SASAKI *et al.* 2002).

Predkladaná práca je zameraná na sledovanie vplyvu horúcovodnej predúpravy brezy bradavičnatej na uvoľňovanie najmä jej hemicelulóзовého podielu do hydrolyzátov.

## EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

### Výber vzoriek

Z lokality Vysokoškolského lesníckeho podniku pri TU vo Zvolene boli odobraté dva výrezy brezy bradavičnatej (*Betula Verrucosa* Ehrh.), ktoré sa líšili vekom ( 26 rokov – B1 a 62 rokov – B2). Vzorky boli spracované na hranoly v smere vlákien a konečné rozmery štiepok použitých na experimenty boli 2 × 2 × 10 mm.

### Vodná predhydrolyza dreva

Do autoklávov z nehrdzavejúcej ocele sa na analytických váhach navážilo s presnosťou na tri desatinné miesta približne 2 g vzorky štiepok a pridalo sa 8 ml destilovanej vody (hydromodul 1 : 4). Autoklávy sa vložili do termostatu vopred vyhriateho na 140 °C (resp. 160 °C a 180 °C). Po uplynutí časového limitu (30, resp. 60, 120 a 240 minút) sa autoklávy vybrali a okamžite ochladili. Získané hydrolyzáty sa po vychladnutí oddelili od štiepok filtráciou cez sklenú fritu (S3) a podrobili analytickému rozboru. Jednotlivé experimenty sa uskutočnili paralelne. Experimenty boli uskutočnené pri každej teplote a čase várky paralelne.

### Analýza dreva

Extraktívne látky v dreve boli stanovené zmesou toluén-etanol (1 : 2) podľa normy ASTM Standard D 1107-96 (1998), celulóza podľa SEIFERTA (1960), holocelulóza podľa WISEA *et al.* (1946), lignín podľa normy ASTM Standard D 1106-96 (1998).

### Stanovenie pH hydrolyzátov

pH hodnoty hydrolyzátov boli stanovené potenciometricky. Na stanovenie bol použitý pH-meter MultiLab 540 s kombinovanou elektródou.

### Stanovenie sacharidov v hydrolyzátach

Vo všetkých získaných hydrolyzátach boli plynovou chromatografiou (GC) – metódou vnútorného štandardu, stanovené vo forme aldonitrilacetátov, z dreva uvoľnené monosacharidy a po hydrolyze glykozidových väzieb aj oligosacharidy a nízkomolekulové fragmenty polysacharidov (KAČÍK, SOLÁR 1999, Kačík *et al.* 1993). Výsledky stanovení boli štatisticky vyhodnotené.

Podmienky chromatografickej analýzy:

$$T_{inj} = 260 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{termostatu} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{detektora} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Nosný plyn: N<sub>2</sub>

$$\text{Tlak N}_2 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Kolóna: náplňová – 5 % PEGA na Chromatone N-AW-DMCS (0,16 až 0,2 mm),

240 cm × 0,35 cm, sklená kolóna s priamym nástrekom

Detektor: FID

## VÝSLEDKY A DISKUSIA

*Breza bradavičnatá (Betula verrucosa Ehrh.)*, ale aj ďalšie druhy brezy, je rýchlorastúci strom, mimoriadne nenáročný na pôdu. Výškový rast vrcholí medzi 10. až 15. rokom, na horších stanovištiach medzi 20. až 25. rokom. Dorastá do výšky až 30 m, pričom nie je náročný na ekologické podmienky. Drevo vykazuje vysokú výhrevnosť, ale rýchlo horí. V prípade tejto dreviny sa nepredpokladá, že z hľadiska jej výskytu na území SR ide o pôvodnú drevinu (PAGAN 1996).

Na základe vizuálneho odčítania počtu ročných kruhov na priečnom reze oboch vzoriek dreva brezy bradavičnatej bol určený vek dreva brezy (1) na 26 rokov (označenie B1) a brezy (2) na 62 rokov (označenie B2).

Zastúpenie chemických zložiek vo vzorkách brezového dreva je uvedené v tabuľke 1. Mladšie drevo (B1) má nižší obsah celulózy, a vyšší obsah extraktívnych látok stredne polárneho charakteru.

**Tab. 1 Chemické zloženie brezového dreva (% a.s.)**

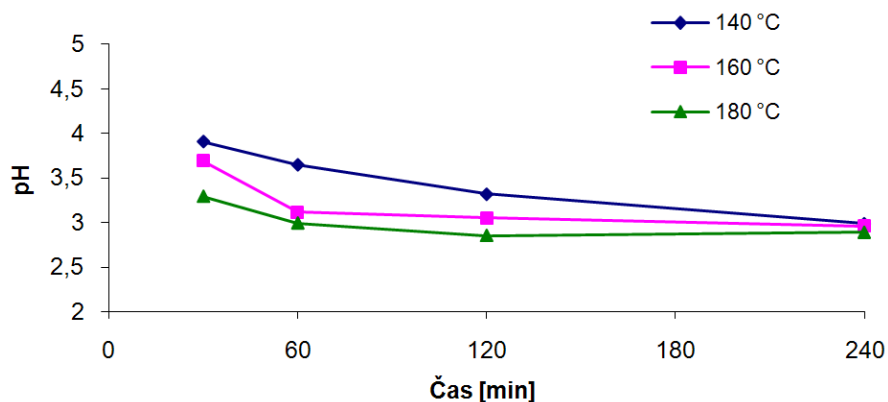
**Tab. 1 Chemical composition of birch wood (% a.d.)**

	Extrakt		Celulóza	Holocelulóza	Lignín
	Vodný extrakt	Toluén-etanolový extrakt			
B1	4,48	4,51	35,68	85,93	17,82
B2	4,69	3,48	37,14	86,76	17,81

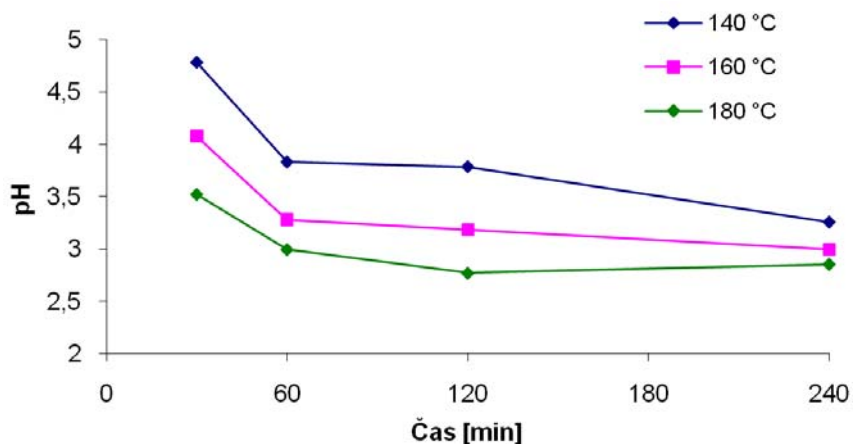
Do hydrolyzátov sa počas vodnej predúpravy brezového dreva uvoľňujú rôzne látky kyslého charakteru (napr. kyselina mravčia, octová a i.), ktoré významne ovplyvňujú hydrolyzne procesy v dreve a v samotných hydrolyzátach (GARROTE *et al.* 1999, FENGEL, WEGENER 1984). Dôkazom ich prítomnosti v hydrolyzátach boli namerané hodnoty pH, ktoré sa so zvyšujúcou

teplotou predhydrolyzy posúvali do kyslých oblastí. Najnižšie hodnoty pH hydrolyzáto v prípade oboch vzoriek drevín B1 a B2 boli namerané pri 240 minútových várkach (Obr. 1, 2).

Závislosť uvoľňovania látok s kyslým charakterom z dreva od režimu jeho predúpravy, pri porovnaní oboch vzoriek B1 a B2, bola navzájom podobná. Stanovenie ukázalo, že pri predhydrolyze dreva mladšej brezy sa získali hydrolyzáty s hodnotami pH posunutými do kyslejších oblastí.



Obr. 1 pH hydrolyzáto (B1).  
Fig. 1 pH values of hydrolyzates (B1).



Obr. 2 pH hydrolyzáto (B2).  
Fig. 2 pH values of hydrolyzates (B2).

Výsledky chromatografických stanovení uvoľnených monosacharidov prítomných v získaných hydrolyzátoch potvrdili odbúravanie sacharidového podielu už pri teplote 140 °C (Obr. 3).

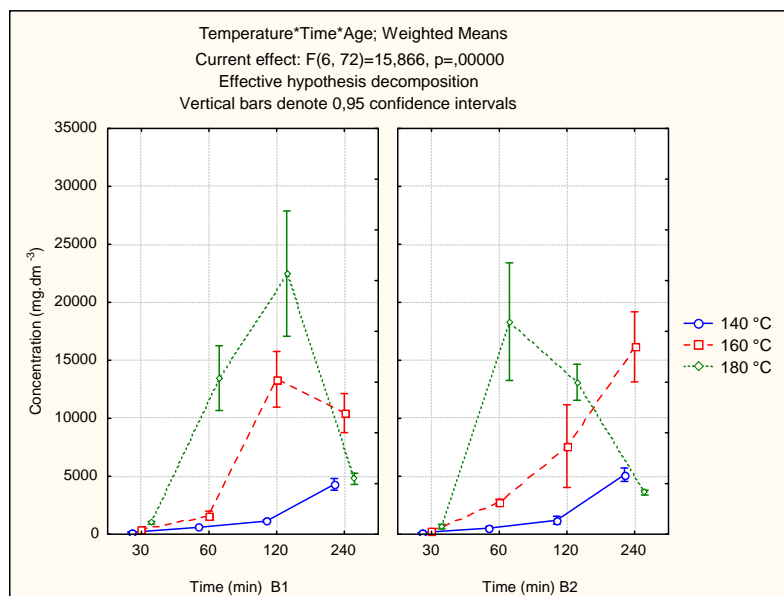
Štatistickým vyhodnotením výsledkov modelom *3-faktorovej analýzy rozptylu* bol zistený jednoznačný vplyv teploty a času a ich spoločnej interakcie na uvoľňovanie monosacharidov z dreva (hladina významnosti *F-testu*  $p = 0$ ) (Tab. 2). Vplyv veku dreva (26 a 62 rokov) na tvorbu monosacharidov nebol štatisticky významný ( $p = 0,174$ ), čo ale vzhľadom pre relatívne nízky počet vstupných údajov (4), potrebných na dôkladné štatistické posúdenie vplyvu veku dreva, nemožno považovať za jednoznačne platné tvrdenie.

**Tab. 2 Základná tabuľka analýzy rozptylu.**  
**Tab. 2 Fundamental table of variance analysis.**

	P
Teplota	0,000
Čas	0,000
Vek	0,174
Teplota*Čas	0,000
Teplota*Vek	0,010
Čas*Vek	0,000
Teplota*Čas*Vek	0,000

V hydrolyzátoch boli stanovené monosacharidy typické pre listnaté drevo: L-arabínóza, D-xylóza, D-manóza, D-glukóza a D-galaktóza. Dominantné zastúpenie v roztokoch mali D-xylóza, D-glukóza a L-arabínóza. Ostatné monosacharidy boli zastúpené v menšej miere.

Maximálna koncentrácia uvoľnených monosacharidov v hydrolyzátoch z dreva mladšej brezy (B1) bola v porovnaní so staršou (B2) stanovená pri rovnakej teplote predúpravy (180 °C), ale až pri 120 minútovej várke. V prípade dreva staršej brezy na dosiahnutie maximálnej koncentrácie stačila 60 minútová várka. Treba však podotknúť, že zo vzorky B1 sa uvoľnilo, čo do kvantity, viac monosacharidov.



**Obr. 3 Koncentrácie monosacharidov v hydrolyzátoch.**  
**Fig. 3 Concentration of monosaccharides in hydrolysates.**

Počas vodnej predhydrolyzy dreva brezy bradavičnatej sa okrem monosacharidov do roztoku uvoľňovali aj oligosacharidy a nízkomolekulové fragmenty polysacharidov, čoho dôkazom bol stanovený vyšší obsah monosacharidov v hydrolyzátoch po dodatočnej hydrolyze glykozidových väzieb uvoľnených oligosacharidov 4% roztokom H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (obr. 4).

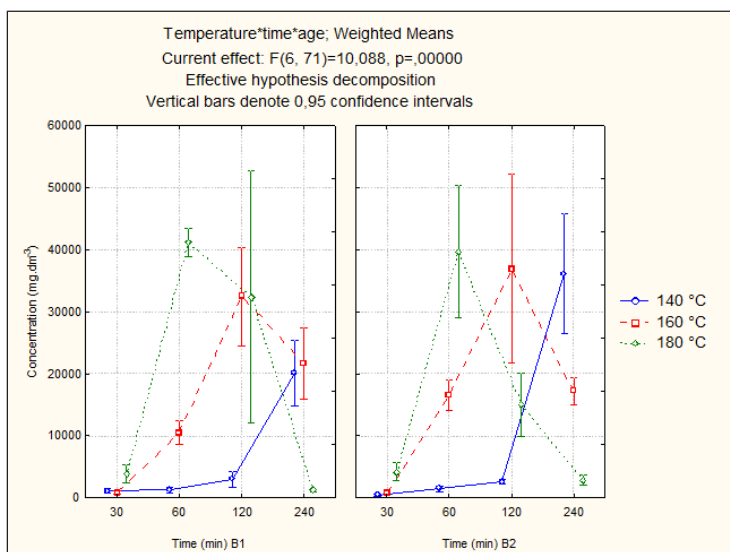
Štatistickým vyhodnotením výsledkov metódou *3-faktorovej analýzy rozptylu* bol zistený, obdobne ako v prípade monosacharidov, jednoznačný vplyv teploty a času na uvoľňovanie nízkomolekulových fragmentov sacharidov z dreva do roztoku (hladina významnosti *F-testu* p = 0). Vplyv veku dreva (26 a 62 rokov) sa aj v tomto prípade z hľadiska štatistiky ukázal ako bezvýznamný (Tab. 3).

**Tab. 3 Základná tabuľka analýzy rozptylu.**  
**Tab. 3 Fundamental table of variance analysis.**

	p
Teplota	0,000
Čas	0,000
Vek	0,592
Teplota*Čas	0,000
Teplota*Vek	0,010
Čas*Vek	0,001
Teplota*Čas*Vek	0,000

Vplyv času hydrolyzy (30, 60 a 120 minút) pri 140 °C na celkový obsah sacharidov v hydrolyzátoch, bol rozhodne menší, ako pri 240 minútach. Do 240 minút sa do roztoku uvoľňoval hemicelulózový a amorfný podiel celulózy, predovšetkým vo forme monosacharidov. Po uvedenom čase hydrotermickej predúpravy prevládalo uvoľňovanie nízkomolekulových fragmentov polysacharidov.

Iná situácia nastala v prípade teplôt 160 a 180 °C. Pri teplote 160 °C po 60 minútach varenia bol zaznamenaný výrazný vzostup uvoľňovania nízkomolekulových fragmentov polysacharidov, ktorý niekoľkokrát prevýšil množstvo uvoľnených monosacharidov. Tento trend bol zaznamenaný v celom rozsahu použitých časov aj pri teplote 180 °C.



**Obr. 4 Koncentrácie monosacharidov v hydrolyzátoch stanovených po hydrolyze glykozidových väzieb 4% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**

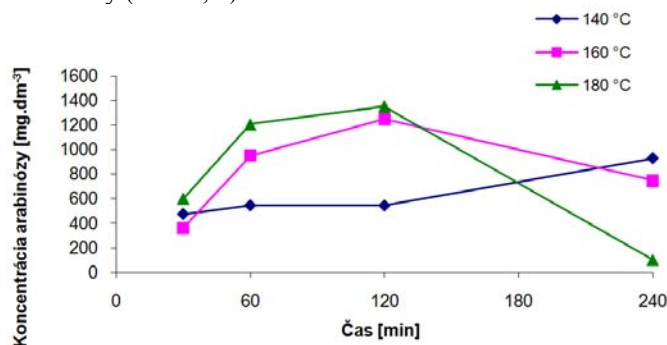
**Fig. 4 Concentration of monosaccharides in hydrolysates obtained after hydrolysis of glycoside bonds by 4 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.**

Maximálne množstvo uvoľnených sacharidov do hydrolyzátoch bolo zaznamenané pri 160 °C pri 120 minútach varenia, resp. pri 180 °C pri 60 minútach varenia.

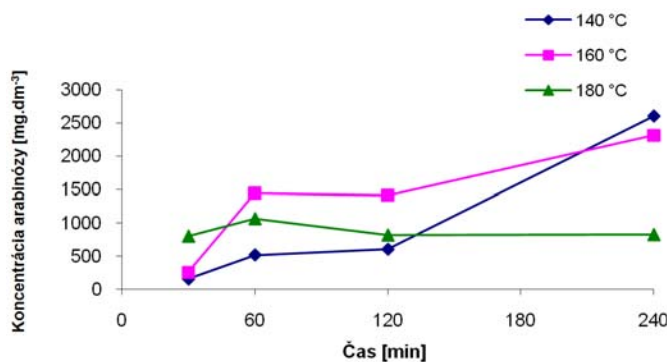
Staršie brezové drevo v porovnaní s mladším podliehalo vplyvom hydrotermickej predúpravy, z hľadiska odbúravania polysacharidového podielu, hlbším zmenám v zložení. Z dreva brezy bradavičnatej sa spomedzi dreva drevín topol'a osikového, jelše lepkavej a vrbý bielej uvoľnilo do hydrolyzátoch najväčšie množstvo sacharidového podielu (Kačík *et al.* 2008, LAUROVÁ *et al.* 2008, LAUROVÁ *et al.* 2009, Kačík *et al.* 2007).

V hydrolyzátoch opäť prevládali monosacharidy typu D-xylóza, D-glukóza a L-arabínóza. Ostané monosacharidy D-manóza a D-galaktóza boli zastúpené v menšej miere.

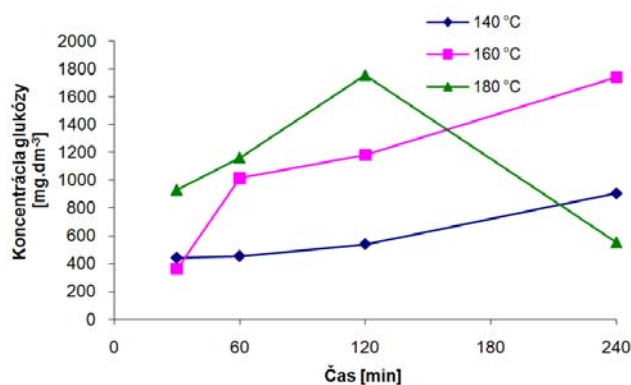
Odbúravanie väčšej časti hemicelulóзовého podielu dreva brezy bradavičnatej bolo možné dosiahnuť, v závislosti od času hydrolyzy, pri teplote 160, resp. 180 °C (obr. 5, 6, 9, 10). Pri týchto teplotách však možno predpokladať, že ešte stále nie je ukončené odbúravanie amorfného podielu celulózy (Obr. 7, 8).



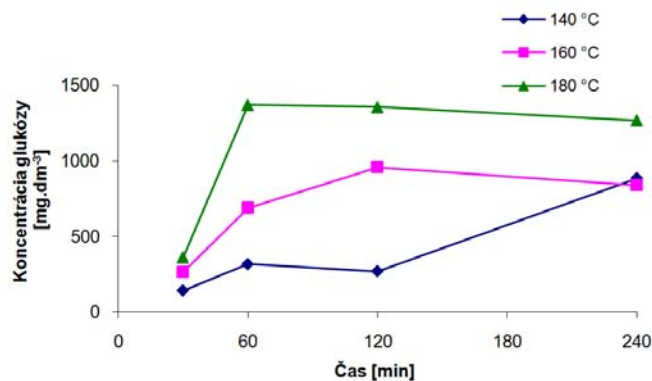
**Obr. 5 Celková koncentrácia L-arabínózy v hydrolyzátoch (B1).**  
**Fig. 5 Total concentration of L-arabinose in hydrolysates (B1).**



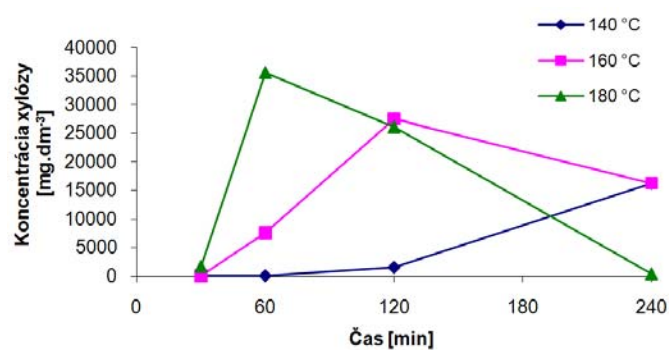
**Obr. 6 Celková koncentrácia L-arabínózy v hydrolyzátoch (B2).**  
**Fig. 6 Total concentration of L-arabinose in hydrolysates (B2).**



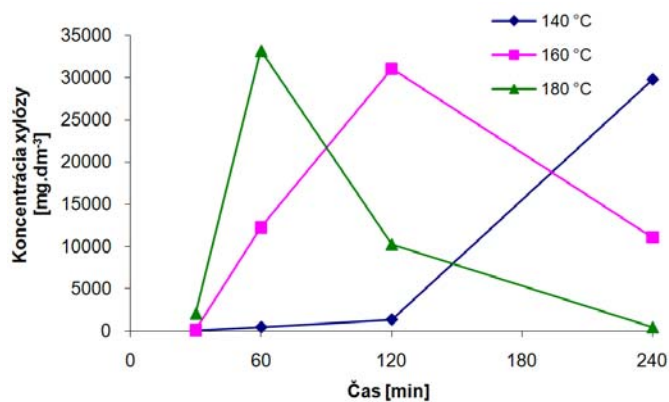
**Obr. 7 Celková koncentrácia D-glukózy v hydrolyzátoch (B1).**  
**Fig. 7 Total concentration of D-glucose in hydrolysates (B1).**



Obr. 8 Celková koncentrácia D-glukózy v hydrolyzátoch (B2).  
Fig. 8 Total concentration of D-glucose in hydrolysates (B2).



Obr. 9 Celková koncentrácia D-xylózy v hydrolyzátoch (B1).  
Fig. 9 Total concentration of D-xylose in hydrolysates (B1).



Obr. 10 Celková koncentrácia D-xylózy v hydrolyzátoch (B2).  
Fig. 10 Total concentration of D-xylose in hydrolysates (B2).

## ZÁVER

Počas vodnej predhydrolyzy dreva brezy bradavičnatej (*Betula Verrucosa Ehrh.*), v teplotnom rozsahu 140 až 180 °C a v časovom rozpätí 30 až 240 minút, sa do hydrolyzáto v uvoľňovali látky rôzneho charakteru. Nascentné organické kyseliny, ktoré vznikali najmä



odštepovaním funkčných skupín a degradačnými reakciami uvoľnených monosacharidov, posúvali hodnoty pH roztokov do kyslých oblastí.

Katalytické účinky týchto látok na hydrolyzne procesy, ktoré nastali v dreve a v hydrolyzátoch, sa prejavili aj v chemickom zložení hydrolyzátoch.

Sacharidový podiel podliehal vplyvom autohydrolyzy depolymerizačným reakciám. Prevažne hemicelulózový podiel dreva sa do roztoku uvoľňoval vo forme monosacharidov a nízkomolekulových fragmentov polysacharidov (*oligomérov*). V získaných hydrolyzátoch boli stanovené monosacharidy (pentózy a hexózy), ktoré sú typické pre listnaté drevo (D-glukóza, D-galaktóza, D-manóza, D-xylóza, L-arabínóza).

Maximálna koncentrácia sacharidov uvoľnených z dreva, závisela od reakčných podmienok – teploty a času. Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že na uvoľnenie maximálneho množstva, prevažne hemicelulózového podielu z brezy bradavičnatej, je potrebné dosiahnuť pracovnú teplotu vodného média 180 °C a čas pôsobenia 60 min.

## LITERATÚRA

- ASTM Standard D 1107-96. 1998. Standard test method for ethanol toluene solubility of wood.
- ASTM Standard D 1106-96. 1998. Standard test method for acid insoluble lignin in wood.
- ALLEN, S.G., SPENCER, M.J., ANTAL, M.J. 1996. Semi-chemical pulping using the aquasolv process. Abstract of papers of the American Chemical Society 211 (Cell), 1996, č. 66.
- BOBLETER, O., BINDER, H., CONCIN, R., BURTSCHER, E. 1981. The conversion of biomass to fuel raw material by hydrothermal treatment. In: Energy from biomass, W. Palz, P. Chartier, a D.O. Hall (eds), Applied Science Publ., 1981, s. 554–562.
- BOUCHARD, J., NGUYEN, T.S., CHORNET, E., OVEREND, R. P. 1991. Analytical methodology for biomass pretreatment. Part 2: Characterization of the filtrates and cumulative product distribution as a function of treatment severity. Bioresource Technology, 36(2): 121–131.
- BUČKO, J. 2001. Chemické spracúvanie dreva v teórii a v praxi. Vysokoškolská učebnica. 2.vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene. 2001. 427 s. ISBN 80-228-1089-4.
- CONNER, A. H. 1984. Kinetic modelling of hardwood prehydrolysis. Part I. Xylan removal by water prehydrolysis. Wood and fiber science, 16(2): 268–277.
- FENGEL, D., WEGENER, G. 1984. Wood. Chemistry, Ultrastructure, Reaction. Berlin-New York: Walter de Gruyter, 1984. 613 s.
- GARROTE, G., DOMÍNGUEZ, H., PARAJÓ, J. C. 1999. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. Holz als Roh- und Werkstoff, 57(3): 191–202.
- HEITZ, M., CARRASCO, F., RUBIO, M., CHAUVETTE, G., CHORNET, E., JAULIN, L. 1986. Generalized correlations for the aqueous liquefaction of lignocellulosics. Canadian journal of chemical engineering, 64(4): 647–650.
- HU, G., HEITMANN, A., ROJAS, O. J. 2008. Feedstock pretreatment strategies for producing ethanol from wood, bark, and forest residues. Bioresources, 3(1): 270–294.
- KAČÍK, F., SOLÁR, R. 1999. Analytická chémia dreva. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1999. 369 s. ISBN 80-228-0882-0.
- KAČÍK, F., SOLÁR, R., MELCER, I. 1993. Stanovenie monosacharidov v dreve a drevných materiáloch metódou plynovej chromatografie. In: Zborník vedeckých prác DF TU vo Zvolene, 1993, s. 99–104.
- KAČÍK, F., LAUROVÁ, M., KAČÍKOVÁ, D. 2008. Determination of volatile compounds and saccharides at alder wood hydrolysis. Chemické Listy, 102: 383–385.
- KAČÍK, F., VÝBOHOVÁ, E., KAČÍKOVÁ, D. 2007. Vznik prchavých látok pri hydrolyze brezového dreva. Acta facultatis xylologiae Zvolen, XLIX(2): 39–46.
- KOŠÍKOVÁ, B., BUČKO, J. 2002. Biotechnologické a chemické spôsoby využitia rastlinnej biomasy. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2002. 196 s. ISBN 80-228-1140-8.
- LAUROVÁ, M., KAČÍK, F., KAČÍKOVÁ, D., SIVÁK, J. 2008. Influence of hydrothermal treatment on dissolution of aspen. In: Annals of Warsaw University of Life Sciences. Forestry and Wood Technology. 64: 14–21.
- LAUROVÁ, M., KAČÍK, F., SIVÁK, J. 2009. Water prehydrolysis of willow (*Salix alba* L.). Acta Facultatis Xylogiae Zvolen, 51(1): 19–26.

- MOK, W. S. L., ANTAL, M. J., JR. 1992. Uncatalyzed solvolysis of whole biomass hemicellulose by hot compressed liquid water. *Industrial and Engineering chemistry research*, 31(4): 1157–1161.
- MOSIER, N., WYMAN CH., DALEC, B., ELANDERD, R., LEE, Y.Y., HOLTZAPPEL, M., LADISCH, M. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 96(6): 673–686.
- PAGAN, J. 1996. *Lesnícka dendrológia*. Zvolen: TU vo Zvolene, 1996. 378 s. ISBN 80-228-0534-3.
- PANDEY, A. 2009. *Handbook of plant-based biofuels*. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-56022-175-3.
- RAMOS, L. P. 2003. The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. *Química Nova*, 26(6): 863–871.
- SASAKI, M., ADSCHIRI, T., ARAI, K. 2002. Fractionation of sugarcane bagasse by hydrothermal treatment. *Bioresource Technology*, 86(3): 301–304.
- SEIFERT, V. K. 1960. Zur Frage der Cellulose-Schnellbestimmung nach der Acetylaceton- Methode. *Das Papier*, 14: 104–106.
- SUN, Y., CHENG, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production. *Bioresource Technology*, 83(1): 1–11.
- SZCZODRAK, J., FIEDUREK, J. 1996. Technology for conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. *Biomass and bioenergy*, 10(5/6): 367–375.
- TAHERZADEH, MOHAMMAD J., KARIMI, K. 2008. Pretreatment of Lignocellulosic Wastes to Improve Ethanol and Biogas Production: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 9(9):1621–1651.
- WISE L. E., MURPHY M., D'ADDIECO A. A. 1946. Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. *Paper Trade Journal*, 122(35): 35–34.

#### **Pod'akovanie**

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy, ITMS: 26220120006, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

#### **Adresa autorov**

Doc. RNDr. Marta Laurová, PhD.  
Technická univerzita vo Zvolene  
Drevárska fakulta  
Katedra chémie a chemických technológií  
T. G. Masaryka 24  
960 53 Zvolen  
Slovensko  
laurova@vsld.tuzvo.sk

RNDr. Vladimír Vacek  
Technická univerzita vo Zvolene  
Drevárska fakulta  
Katedra matematiky a deskriptívnej geometrie  
T. G. Masaryka 24  
960 53 Zvolen  
Slovensko  
vacek@vsld.tuzvo.sk