

## VPLYV TEPLoty NA PROCES VYSOKOTEPLotNÉHO SUŠENIA BUKOVÉHO REZIVA

### TEMPERATURE INFLUENCE ON THE PROCESS OF HIGH- TEMPERATURE DRYING BEECH LUMBER

Ivan Klement – Pavol Smilek

#### ABSTRAKT

This article orientates on high-temperature drying process of beech samples. The aim was to find out changes in beech wood and compare two suggested drying schedules using high temperatures on desiccating material. In this process we were measuring drying parameters, which had an influence on drying process. Near the thickness of 30 mm slab we were used temperatures of 130 °C, 170 °C. The main parameters of scanning were temperature scanning, drying curve and moisture cadence. Among characteristics, that were studied during the drying process were change in colour on the surface on desiccating samples.

**Key words:** high-temperature drying, temperature, beech, color.

#### ÚVOD

Sušenie dreva teplotami nad bodom varu sa nazýva vysokoteplotné sušenie dreva (SEHLSTEDT-PERSSON 1995). Vysokoteplotné sušenie nie je veľmi rozšíreným spôsobom sušenia reziva, zaujímavé je však najmä tým, že sa pri ňom dosahuje 3 až 5-krát vyššia rýchlosť sušenia, v porovnaní s klasickým sušením (TREBULA a KLEMENT 2005). Vysokoteplotné sušenie je progresívny spôsob sušenia, ktorý skracuje čas, čím výrazne ovplyvňuje celkovú ekonomiku sušenia. Medzi pozitívne efekty, ktoré vznikajú v procese sušenia patrí stabilizácia rozmerov, zlepšenie hygroskopických vlastností. Medzi negatívne efekty zaraďujeme klesanie šmykovej a ohybovej pevnosti a riziko tvorby drobných povrchových trhlín (KLEMENT a MARKO 2006).

Drevo po vysokoteplotnom sušení získava nové vlastnosti, dobre sa opracováva, má malú tepelnú a elektrickú vodivosť, ako aj určitú biologickú odolnosť proti drevokazným hubám a škodcom (HILLIS 1984).

Cieľom príspevku je analyzovanie účinkov teplôt 130 °C a 170 °C na čas sušenia, rozloženie teplôt a vlhkostí v sušenom dreve a zmena farby na povrchu dreva pri vysokoteplotnom sušení. Na analýzu sme použili drevinu buk, hrúbka vzoriek bola 30 mm.

#### EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

##### **Materiál**

Pre experimentálnu časť práce boli vybrané bukové výrezy (*Fagus sylvatica* L.) o akosti III. A, stredovom priemere 40 cm a dĺžky 3 m z poľesia Školského lesného podniku Technickej univerzity vo Zvolene. Z piliarskych výrezov boli vyrezané vzorky o rozmeroch 30 × 125 × 350 mm<sup>3</sup>. Výber vzoriek bol robený tak, aby nebol medzi nimi veľký rozptyl počiatočných vlhkostí a hustoty.

## Metóda

Sušenie prebiehalo v sušiarňi od firmy Binder. Režim sušenia bol rozdelený do jednotlivých etáp. Prvou etapou bol ohrev sušiaceho prostredia aj materiálu. Teplota bola postupne zvyšovaná až na hodnotu 100 °C, a udržiavaná po dobu, kým vlhkosť vzoriek neklesla pod hodnotu bodu nasýtenia vlákien (BNV). Súčasne v sušiarňi dochádzalo k úprave relatívnej vlhkosti prostredia tak, aby v kombinácii s vyššou teplotou nedošlo k poškodeniu vzoriek. V ďalšej etape nastalo postupné zvyšovanie teploty na maximálnu hodnotu. Po dosiahnutí teploty nastala etapa jej udržiavania až kým sušené vzorky nedosiahli požadovanú konečnú vlhkosť približne 10 %. Meranie relatívnej vlhkosti sušiaceho prostredia bolo robené len v prvom úseku sušenia ( $w > \text{BNV}$ ). Teda keď teplota sušenia bola tesne nad hodnotou 100 °C. Samotné meranie bolo realizované polovodičovým snímačom vlhkosti s kompenzáciou vzhľadom k aktuálnej teplote sušiaceho prostredia. Namerané údaje však možno považovať za orientačné. Použité režimy sušenia sú uvedené v tabuľke 1. Vzhľadom na to, že teplota sušenia bola vyššia ako 100 °C je problematické presne špecifikovať sušiace prostredie v sušiarňi. Sušiareň nemôžeme považovať za dokonale tesnú a preto je možné povedať, že išlo o sušenie zmesou vzduch para a nie o sušenie v čistej prehriatej pare.

Tab. 1 Režimy sušenia.

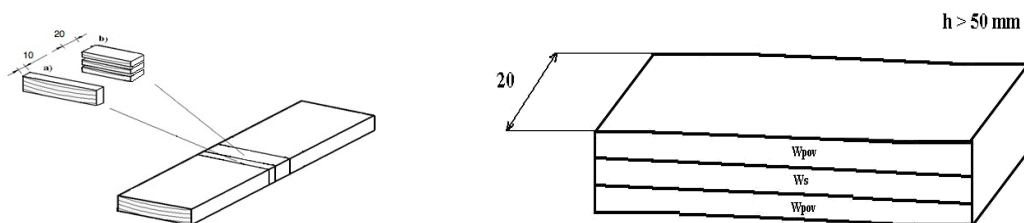
Tab. 1 Drying treatments.

Režim sušenia	Teplota sušiaceho prostredia [°C]		Relatívna vlhkosť sušiaceho prostredia [%]	
	$w > \text{BNV}$	$w < \text{BNV}$	$w > \text{BNV}$	$w < \text{BNV}$
Režim 130	110	130	87–95	nebola meraná ani regulovaná
Režim 170	105	170	87–95	nebola meraná ani regulovaná

V jednej náplni sušiarne bolo 35 vzoriek, pričom zmena farby na povrchu vzoriek bola meraná v priemere na 10 vzorkách, pričom na každej vzorke boli 2 merané miesta.

Počas sušenia bola snímaná teplota sušiaceho prostredia aj teplota v sušenom dreve. Pre snímanie teplôt v sušenom dreve boli použité termočlánky Cu - Ko, ktoré boli umiestnené v strede vzoriek.

V časovom intervale 3 hodiny bola zisťovaná vlhkosť vzoriek váhovou metódou, rozloženie vlhkosti po hrúbke sušeného dreva – vlhkosťný spád  $\Delta w$ , teda rozdiel medzi vlhkosťou stredovej časti ( $w_s$ ) a priemernou vlhkosťou z povrchových častí ( $w_{pov}$ ) skúšobnej vzorky. Spôsob odberu vzoriek podľa ON 49 0651 je znázornený na obrázku 1.



Obr. 1 Výber vzoriek na zisťovanie vlhkosti a vlhkosťného spádu.  
Fig. 1 Selections the species for measuring moisture and moisture cadence.

V uvedenom intervale bola meraná aj farba na povrchu vzoriek pomocou kolorimetra Color Reader CR 10. Získané údaje z kolorimetra boli vyhodnocované podľa vzorca pre výpočet farebnej diferencie  $\Delta E_{ab}$  (HUNTER 1948):

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2} \quad (1)$$

kde:  $L^*$  je jas alebo svetlosť farby v rozsahu -100 (čierna) do +100 (biela),

$a^*$  je súradnica s odtieňom medzi červenou a zelenou,

$b^*$  je súradnica s odtieňom medzi žltou a modrou.

## VÝSLEDKY

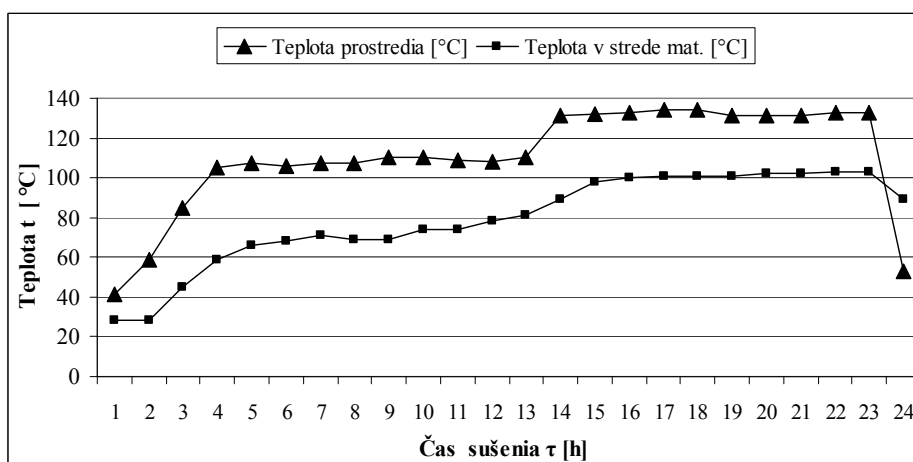
V tabuľke 2 sú uvedené základné charakteristiky procesu sušenia pre jednotlivé režimy. Priemerná počiatočná vlhkosť vzoriek bola v intervale od 83,6 do 88,5 %. Konečná vlhkosť bola od 8,3 do 10,9 %. Teda pri vysokoteplotnom sušení bola dosiahnutá nižšia konečná vlhkosť, ako plánovaná. Bol to z dôvodu rýchleho úbytku vlhkosti, pričom sa nepodarilo odhadnúť dosiahnutie požadovanej vlhkosti.

Tab. 2 Základné charakteristiky procesu sušenia pre jednotlivé série.

Tab. 2 Base characteristics of drying process for particular series.

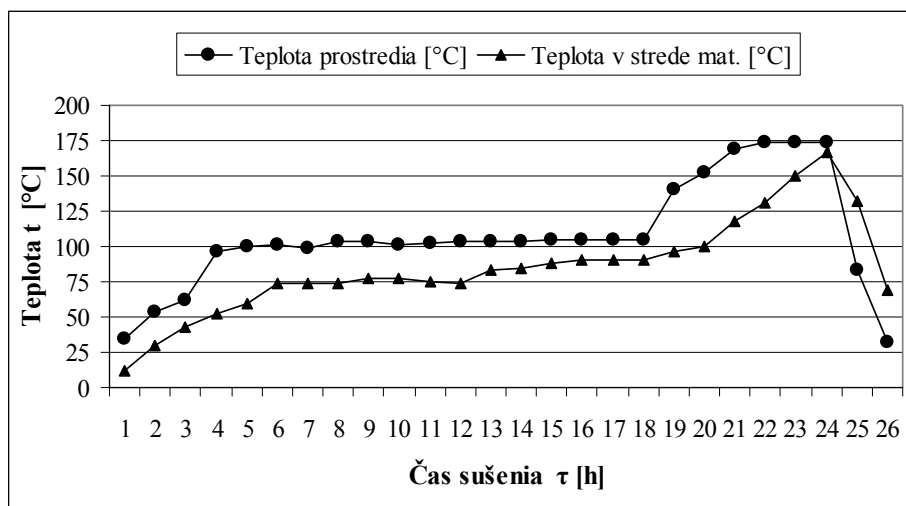
Režim sušenia	Maximálna teplota sušiaceho prostredia [°C]	Priemerná počiatočná vlhkosť materiálu [%]	Priemerná konečná vlhkosť materiálu [%]	Vlhkostný spád na konci sušenia [%]	Čas sušenia [h]
Režim 130	130	83,6	9,8	0,67	23
Režim 170	170	88,5	8,3	-0,08	24

Na obrázku 2 je znázornený priebeh teploty sušiaceho prostredia a teploty v strede materiálu pri režime sušenia 130 a na obrázku 3 pri režime 170.



Obr. 2 Priebeh teplotných kriviek na povrchu a v strede materiálu – režim 130.

Fig. 2 Course of temperature on the surface and in the middle of material.



Obr. 3 Priebeh teplotných kriviek na povrchu a v strede materiálu – režim 170.  
 Fig. 3 Course of temperature on the surface and in the middle of material.

V tabuľke 3 sú uvedené teploty v strede vzoriek pred sušením a na konci sušenia a teploty sušiacieho prostredia pre jednotlivé režimy sušenia.

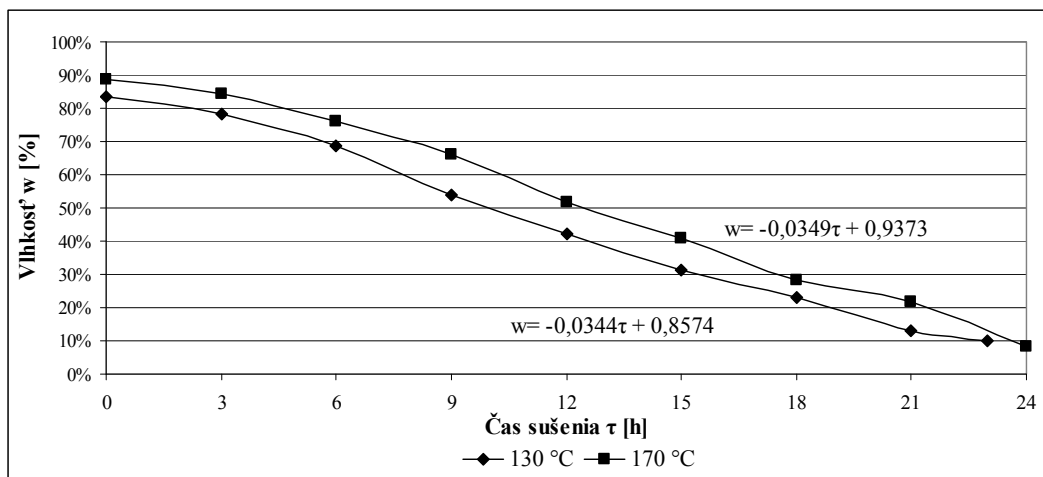
Pri požití teploty 130 °C dosiahla teplota v strede dreva na konci sušenia hodnotu 103 °C, a pri 170 °C teplota v stredovej vrstve na konci sušenia bola 167 °C.

Tab. 3 Prehľad teplôt prostredia a v materiáli.

Tab. 3 Temperatures overview of medium and in the material.

Režim sušenia		Počiatočná teplota [°C]	Konečná teplota [°C]
Režim 130	Teplota prostredia	41	133
	Teplota strednej vrstvy	28	103
Režim 170	Teplota prostredia	35	174
	Teplota strednej vrstvy	12	167

Na obrázku 4 sú znázornené krivky sušenia pre jednotlivé teploty sušenia a rovnice pre matematické vyjadrenie úbytku vlhkosti v závislosti na čase sušenia pre jednotlivé režimy sušenia.



Obr. 4 Priebeh vlhkosťných kriviek v procese sušenia.  
Fig. 4 Course of drying curves in the process of drying.

Hodnoty vlhkosťného spádu, teda rozdiel medzi vlhkosťou v strede a priemernou vlhkosťou na povrchu vzoriek, pre jednotlivé režimy sušenia sú uvedené v tabuľkách 4, 5. Grafické znázornenie rozloženia vlhkosti na priereze sušených vzoriek v závislosti na čase pre jednotlivé režimy sú na obrázkoch 5 a 6.

Tab. 4 Vlhkosťný spád pre režim 130.

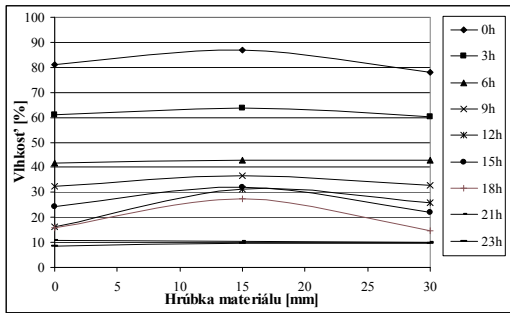
Tab. 4 Moisture cadence for schedule 130.

Čas sušenia [h]	Vlhkosť povrchových a stredových vrstiev [%]			Vlhkosťný spád [%] $\Delta w$
	$w_p$	$w_s$	$w_p$	
0	80.96	86.82	78.09	7.29
3	61.06	63.79	60.23	3.14
6	41.60	42.94	42.77	0.75
9	32.53	36.80	32.96	4.05
12	16.10	31.36	25.95	10.33
15	24.18	32.14	22.17	8.96
18	16.01	27.50	14.65	12.16
21	10.8	10.37	9.88	0.03
23	8.65	9.80	9.61	0.67

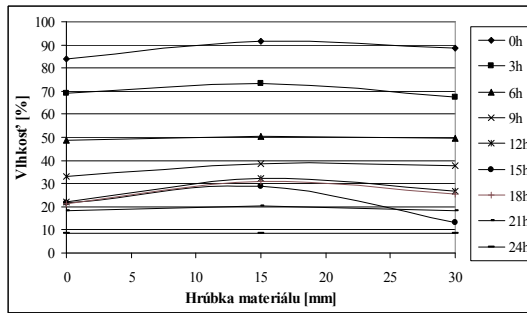
Tab. 5 Vlhkosťný spád pre režim 170.

Tab. 5 Moisture cadence for schedule 170.

Čas sušenia [h]	Vlhkosť povrchových a stredových vrstiev [%]			Vlhkosťný spád [%] $\Delta w$
	$w_p$	$w_s$	$w_p$	
0	83.79	91.60	88.72	1.02
3	69.20	73.44	67.41	5.13
6	48.77	50.29	49.42	1.49
9	32.89	38.68	37.89	3.28
12	21.91	32.37	26.71	8.07
15	21.48	28.95	13.16	11.63
18	21.39	30.94	25.53	7.47
21	18.19	20.16	18.70	1.71
24	8.36	8.39	8.85	-0.08



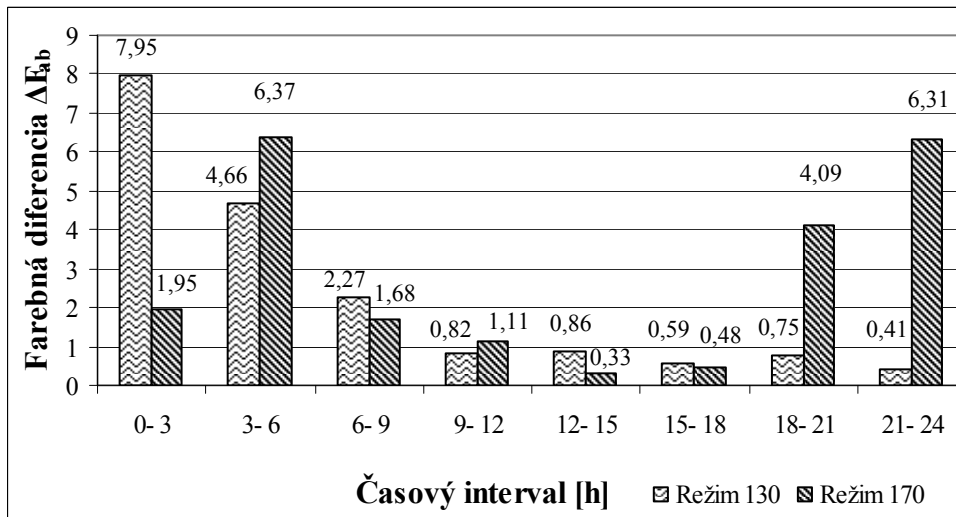
Obr. 5 Vlhkostný spád pre režim 130.  
Obr. 5 Moisture cadence for schedule 130.



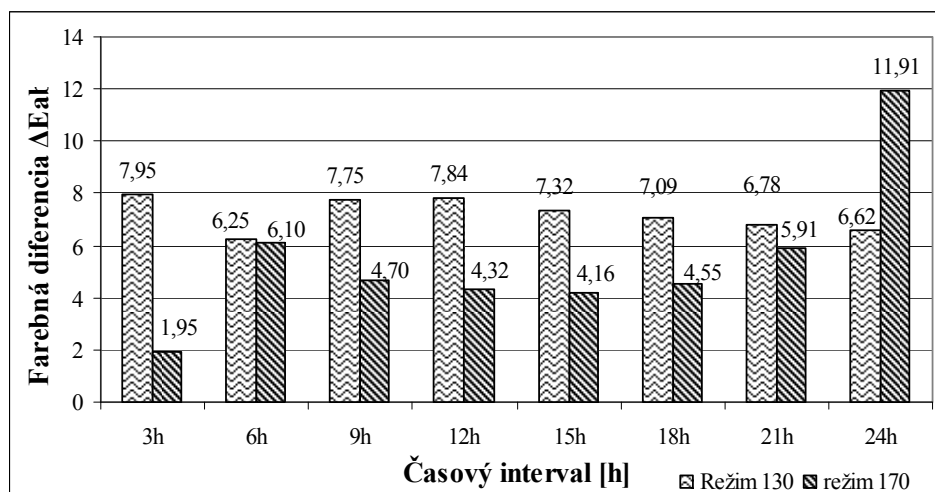
Obr.6 Vlhkostný spád pre režim 170.  
Obr. 6 Moisture cadence for schedule 170.

Na obrázku 7 sú uvedené hodnoty farebných diferencií  $\Delta E_{ab}$ , ktoré charakterizujú zmenu farby v jednotlivých časových intervaloch pre zvolené režimy sušenia.

Na obrázku 8 sú uvedené hodnoty farebných diferencií  $\Delta E_{ab}$ , ktoré charakterizujú zmenu farby sušených vzoriek v jednotlivých časových intervaloch počítané od pôvodnej farby na začiatku sušenia.



Obr. 7 Zmena farby medzi jednotlivými časovými intervalmi.  
Fig. 7 Colour difference between particular time periods.



Obr. 8 Farebná diferencia v porovnaní s pôvodnou farbou.

Fig. 8 Colour difference in contrast with origin color.

## DISKUSIA

Teplota sušiaceho prostredia 130 °C je považovaná za maximálnu teplotu používanú pri vysokoteplotnom sušení. V tomto príspevku je analyzované použitie teploty 170 °C a jej vplyv na sledované parametre procesu sušenia.

Tak ako je to uvedené vo výsledkoch meraní, čas sušenia pri použití maximálnej teploty sušenia 130 °C bol 23 hodín a pri teplote 170 °C bol 24 hodín. Toto relatívne predĺženie času je možné zdôvodniť tým, že vzorky sušené vyššou teplotou mali zároveň vyššiu počiatočnú vlhkosť a aj konečná vlhkosť bola o niečo nižšia (viď tab. 2). Ak matematicky spracujeme úbytok vlhkosti v závislosti na čase, tak ako je to znázornené na obr. 4 a na základe získaných rovníc stanovíme rovnaké počiatočné a konečné vlhkosti je zrejme, že zvýšená teplota nemala reálny vplyv na zmenu času sušenia. V oboch prípadoch (režim 130 aj režim 170) dostaneme rovnice priamky, čo je odlišné od typických exponenciálnych rovníc známych pri klasickom teplovzdušnom sušení dreva. Je preto zrejme, že teplota sušenia nad 100 °C zrýchľuje proces v druhej etape sušenia t.j. keď vlhkosť dreva klesne pod bod nasýtenia vlákien (BNV).

Pri analýze nameraných teplôt v strede sušených vzoriek (obr. 2 a 3), musíme rozlišovať tri úseky. Prvý úsek je možné charakterizovať ako ohrev, kde teplota prostredia bola zvyšovaná na hodnotu približne 100 °C. V oboch prípadoch bol čas dosiahnutia tejto teploty rovnaký (4 hodiny). Nárast teploty v strede dreva v tomto úseku je však odlišný, čo spôsobila nižšia teplota vzoriek pred samotným sušením tak, ako je to uvedené v tab. 3.

Druhý úsek bol od konca ohrevu po bod keď vzorky dosiahli priemernú vlhkosť približne rovnú vlhkosti BNV. Počas tohto úseku bola teplota sušenia rovná približne 100°C, pričom teplota v strede dreva postupne stúpala. Teplota v strede vzoriek bola na konci tohto úseku približne rovnaká.

Najzaujímavejším bol tretí úsek sušenia, kde boli teploty prostredia zvyšované na maximálnu hodnotu. Pri teplote 130 °C bola táto dosiahnutá v sušiarňi za 1 hodinu. Pri teplote 170 °C bol čas na dosiahnutie tejto teploty 3 hodiny. To môže naznačovať, že tepelný zdroj sušiarne je zrejme nedostatočne nadimenzovaný. Napriek tomu však vplyvom vyššej použitej teploty bol intenzívnejší ohrev stredových vrstiev vzoriek pri teplote 170 °C ako pri teplote 130 °C. Vplyv zvýšenej teploty sušiaceho prostredia sa v tomto úseku sušenia prejavil aj na skrátení času sušenia od vlhkosti BNV po konečnú vlhkosť. Po odparení voľnej vody

v dreve nastalo prudké zvyšovanie teploty v materiáli a pri teplote 170 °C sa v priebehu 2 hodín sušenia zvýšila teplota až na 150 °C.

Z hodnôt vlhkostných spádov tak, ako je to uvádzané v tab. 4 a 5 a grafickom znázornení na obr. 5 a 6, sa nedá jednoznačne určiť vplyv teploty na veľkosť vlhkostného spádu. Vlhkostné spády pri oboch režimoch boli podobné a dosiahnuté najvyššie hodnoty boli zaznamenané ku koncu druhého úseku sušenia, teda keď vlhkosť vzoriek dosiahla približne BNV. Po zvýšení na maximálne teploty sušenia sa hodnoty vlhkostných spádov znižovali, pričom nižšie hodnoty boli pri vzorkách sušených režimom 170 °C, kde bol dosiahnutý vyrovnaný, resp. mierne záporný vlhkostný spád.

Ďalším analyzovaným kritériom bol vplyv použitej teploty na povrchovú zmenu farby sušeného dreva. Najvýznamnejšia zmena farby bola v prvých 6 hodinách. Zaujímavé je, že po prvých troch hodinách bola zmena farby výraznejšia pri vzorkách sušených režimom 130. Tento rozdiel však nie je možné odôvodniť režimom sušenia, resp. teplotou, nakoľko teplota prostredia v tomto úseku sušenia bola pri oboch režimoch rovnaká. Uvedené zistenie je v rozpore s názorom na vplyv teploty na farebnú zmenu bukového dreva vyjadrené kritériom farebnej homogenizácie (DZURENDA, DELIISKI 2008). Postupne zmena intenzity farby klesala úmerne s klesajúcou vlhkosťou vzoriek. Pri teplote 170 °C aj napriek nízkej vlhkosti dreva nastalo v závere sušenia k výraznej zmene povrchovej farby. Táto zmena v závere sušenia spôsobila, že výsledný farebný rozdiel medzi režimom 130 a 170 bol významný. Celková zmena farby povrchu vzoriek pri režime 130 vyjadrevá cez hodnotu farebnej diferencie  $\Delta E_{ab}$  bola 6,62 a pri režime 170 bola 11,91.

## ZÁVER

Vysokoteplotné sušenie patrí medzi špeciálne spôsoby sušenia. Tento spôsob sušenia nie je veľmi rozšírený, ale pre svoje špecifické vlastnosti je zaujímavý. Najzaujímavejšie je výrazné skrátenie času sušenia v porovnaní s klasickým teplovzdušným sušením, ako aj určité zmeny vlastností sušeného dreva. Vo všeobecnosti je považovaná teplota 130 °C za maximálnu teplotu používanú pre tento spôsob sušenia. Dnes je však tendencia použitia aj vyšších teplôt sušenia, čo by teoreticky mohlo priniesť skrátenie času sušenia a tým i zvýšenie efektívnosti procesu. V tomto príspevku je analyzovaný vplyv teploty sušenia 130 a 170 °C na čas sušenia, rozloženie teplôt a vlhkostí v sušenom dreve a zmena farby na povrchu dreva. Analýza bola robená na drevine buk, hrúbka vzoriek bola 30 mm. Počiatočná vlhkosť v intervale 84–89 %, konečná vlhkosť 8–0 %.

Výsledný čas sušenia bol 23–24 hodín, pričom sa nepotvrdil vplyv teploty sušenia na výsledný čas sušenia. Väčší vplyv má rozsah vlhkosti.

Z hľadiska rozloženia teploty v sušenom dreve sa potvrdil predpoklad, že pri vyššej teplote sušiacoho prostredia dosiahla teplota v strede dreva vyššiu teplotu. Po odparení voľnej vody v dreve nastávalo zvyšovanie teploty v materiáli a pri teplote 170 °C sa v priebehu 2 hodín sušenia zvýšila teplota až na 150 °C.

Vlhkostný spád bol menší pri vzorkách sušených režimom 170 °C, kde bol dosiahnutý vyrovnaný, resp. mierne záporný vlhkostný spád na konci sušenia. Maximálne hodnoty boli namerané pri vlhkosti vzoriek približne okolo BNV.

V povrchových vrstvách vzoriek bola meraná zmena farby dreva v jednotlivých časových úsekoch sušenia. Najväčšia zmena bola v prvých 6 hodinách (obr. 7). Rozdielne teploty sa vzhľadom na aktuálnu vlhkosť dreva výrazne prejavili v závere sušenia, kde pri vyššej teplote sušenia bola významnejšia zmena farby. Toto je možné vyjadriť cez hodnotu farebnej diferencie  $\Delta E_{ab}$ . Pri teplote sušenia 170 °C bola  $\Delta E_{ab}$  11,91 a pri 130 °C  $\Delta E_{ab}$  6,62.

Záverom je možné konštatovať, že zvýšenie teploty sušiacoho prostredia nad 130 °C pri danej drevine, hrúbke a podmienkach sušenia, neprináša očakávané efekty. Nedochoádza k skráteniu času sušenia, hodnoty vlhkostných spádov sú porovnateľné. Výraznejšiu zmenu



farby dreva pri použití vyššej teploty sušenia môžeme hodnotiť ako nevýhodu. Dá sa preto na základe týchto analýz konštatovať, že zvyšovanie teploty pri vysokoteplotnom sušení prináša viac negatívnych ako pozitívnych efektov.

## LITERATÚRA

- HILLIS, W.E. 1984. High temperature and chemical effects on wood stability. *Wood Science and Technology*. 1984, 18(4): 281–293.
- HUNTER, R. S. 1948. Photoelectric Color Difference Meter. In. Proceedings of the Winter Meeting of the Optical Society of America, JOSA, vol. 38, issue 7, 1948, pp. 651–651.
- KLEMENT, I., MARKO, P. 2006. Vysokoteplotné sušenie bukového a smrekového reziva. In. *Technológia spracovania dreva*. Zvolen: TU vo Zvolene, 2006, s. 101–108. ISBN 80-228-1666-3.
- SEHLSTEDT-PERSSON, M. 1995. High-temperature drying of Scots pine. Comparison between HT- and LT-drying. In. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 53/1995, s. 95–99.
- TREBULA, P., KLEMENT, I. 2005. *Sušenie a hydrotermická úprava dreva*. 2. vyd. Zvolen: TU vo Zvolene, 2005. 449 s. ISBN 80-228-1421-0.
- DZURENDA, L., DELIISKI, N. 2008. Matematický model pre stanovenie normatívu spotreby tepla na farebnú homogenizáciu bukových prírezov v tlakových autoklávoch. In. *Trieskové a beztrieskové obrábanie dreva 2008*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. s. 307–314. ISBN 978-80-228-1913-8. ON 49 0651. Umelé sušenie reziva

## Pod'akovanie

Autori ďakujú agentúre VEGA MŠ SR za finančnú podporu pri riešení projektu č. 1/0231/08, v rámci ktorého vznikol prezentovaný príspevok.

## Adresa autorov

doc. Ing. Ivan Klement, CSc.  
Ing. Pavol Smilek  
Technická univerzita vo Zvolene  
Drevárska fakulta  
Katedra mechanickej technológie dreva  
T. G. Masaryka 24  
960 53 Zvolen  
klement@vsld.tuzvo.sk  
p.smilek@centrum.sk

