

FAANYAGOK HŐVEZETÉSI TULAJDONSÁGAINAK VÁLTOZÁSA A TERMÍKUS KEZELÉS HATÁSÁRA

Börcsök Zoltán és Pásztor Zoltán

Soproni Egyetem, Simonyi Károly Kar, Innovációs Központ

Kivonat

Kutatásunk célja a különböző időtartamú hőkezelés és néhány fizikai, valamint a hővezetési tulajdonságok közötti összefüggések detektálása. A vizsgálatok során lucfenyő (*Picea abies*), Pannónia nyár (*Populus × euramericana* cv. Pannónia) és gumifa (*Hevea brasiliensis*) faanyagot 180 °C-on 15, 25 és 35 órás hőkezelésnek vetettünk alá. Méréseink igazolták, hogy a hőkezelt anyagból készült próbatestek egyensúlyi fanedvessége, sűrűsége és hővezetési tényezője alacsonyabb, mint a kezeletlen mintadaraboké. Az átlagos nettó egyensúlyi nedvességtartalom a kezdeti 12% körüli értékről mind a három fafaj, mindhárom kezelési idejében 6% körüli értékre csökkent. A sűrűség csökkenése 15, 25, illetve 35 órányi kezelés után nyár esetében rendre 9,1, 12,1, illetve 13,4%, lucnál 5,2, 7,6 és 8,7%, gumifánál pedig 3,5, 5,1 és 7,1%. A sűrűség csökkenése 15, 25, illetve 35 órányi kezelés után nyár esetében rendre 17,0, 24,2, 25,2%, lucnál; 8,5, 11,6, 19,2%, gumifánál pedig 3,6, 4,1, és 8,0%. Irodalmi adatokkal alátámasztható, hogy a hőkezelés által a faanyag egyensúlyi fanedvessége és sűrűsége csökken, mely magyarázza az alacsonyabb hővezetési tényezőt az azonos alapanyagból készült kontroll mintadarabhoz képest.

Kulcsszavak: hőkezelés, faanyag, hővezetés, sűrűség, egyensúlyi fanedvesség

CHANGES IN THE HEAT CONDUCTING PROPERTIES OF WOOD MATERIALS AS A RESULT OF THERMAL TREATMENT

Abstract

The aim of the research is to detect correlations between the heat treatment of wood at different durations and some of its physical properties and thermal conductivity. During the experiments, spruce (*Picea abies*), Pannonia poplar (*Populus × euramericana* cv. Pannonia) and rubber wood (*Hevea brasiliensis*) were subjected to heat treatment at 180 °C for 15, 25 and 35 hours. Measurements confirmed that the equilibrium moisture content, the density and the thermal conductivity of the specimens made of heat-treated material were lower than those of the untreated specimens. The average equilibrium moisture content decreased from an initial value of around 12% to around 6% during the treatments in case of all three tree species. The decrease in density after 15, 25 and 35 hours of treatment was 9.1, 12.1 and 13.4% for poplar, 5.2, 7.6 and 8.7% for spruce and 3.5, 5.1% and 7.1% for rubber wood, respectively. The decrease in density after 15, 25 and 35 hours of treatment was 17.0, 24.2, 25.2% for poplar, 8.5, 11.6, 19.2% for spruce and 3.6, 4.1, and 8.0% for rubber wood, respectively. Literature data supports that heat treatment decreases the equilibrium wood moisture and density of the wood which explains the lower thermal conductivity compared to the control sample made from the same raw material.

Keywords: thermal treatment, wood, thermal conductivity, density, equilibrium moisture content



BEVEZETÉS

A faanyagtudomány szinte külön szakterületként tárgyalt ága a faanyag-modifikáció. Faanyag modifikálásán Bosshard (1984) szerint olyan módosító eljárás alkalmazását értjük, mely megváltoztatja a faanyag konstitúcióját azzal a céllal, hogy a felhasználás szempontjából a faanyag előnyös, új tulajdonságokra tegyen szert és ezzel alkalmazási területét szélesítse, új termékek előállítását biztosítsa. Az eljárások között a szakirodalom külön tárgyalja a kémiai és az úgynevezett termikus modifikációt. A faanyagok hőkezelésének története a múlt századra nyúlik vissza, számos kutató foglalkozott a téma különböző aspektusaival (Tiemann 1920, Stamm & Hansen 1937, Stamm et al 1946, Kollmann et al 1958, 1963, 1969, Burmester 1973, 1974a, 1974b stb.). A finn ThermoWood sikereinek köszönhetően a tudományos kutatómunka a kilencvenes évektől ismét a fókuszába helyezte a faanyagok hőkezelését.

A hőkezelés kezdetén a faanyag száradása következtében a sejtfalakban fellépő zsugorodás szerkezeti változást eredményez (Fengel 1966, Fengel & Wegener 1989), és mikrorepedéseket okoz (Terziev & Daniel 2002, Hanhijärvi et al 2003). A repedésképződés mellett a sejtfal porozitása is megváltozik. A korai pásztaban a pórustérfogat csökken, míg a késeiiben növekszik (Fengel 1966). Ez összességében pórusszám (Laganá et al 2006), ill. pórustérfogat növekedést is (Vernois 2001, Omidvar et al 2001, Klose & Schinkel 2002) jelent. Az 1 μm átmérő alatti pórusok száma csökken, míg az 1 μm átmérő feletti pórusok száma növekszik (Junghans et al 2005). A sejtfal mikroszkopikus szövetrendszerének hő hatására bekövetkező szerkezeti változása nem szignifikáns (Krzyszewska et al 2006, Sehlstedt-Persson et al 2006).

A hőkezelés hatására növekszik a faanyag dimenzióstabilitása, növekszik a bazídiumos gombákkal és egyéb farontó mikroorganizmusokkal szembeni ellenálló-képessége (Hillis 1984, Giebel 1983, Welzbacher & Rapp 2002). A tartósság növekedés az egyes szilárdági értékek erős csökkenésével jár együtt (Seborg et al 1953, Jämsä & Viitaniemi 1998, Vernois 2001, Welzbacher & Rapp 2002). A termikus modifikáció a faanyag térfogatcsökkenése mellett tömegcsökkenéssel is jár, mely utóbbi intenzívebb, mint a volumenkontrakció, így a sűrűség csökken (Kubojima et al 1998, Santos 2000). A hővezető-képesség csökkenése szintén megfigyelhető (Jämsä & Viitaniemi 2001). A faanyag tulajdonságainak változása szoros összefüggésben áll a kezelési hőmérséklettel és időtartammal (Rapp et al 2003, Nuopponen et al 2003), valamint a kezeléskor jelenlévő oxigén mennyiségével és a faanyag nedvességével (Stamm et al 1946, Patzelt et al 2003).

A hővezetési tényező az építőiparban használt alapanyagok sokféleségének megfelelően tág határok közt változik – a szigetelő habok $\lambda = 0,03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ értékétől az alumínium $\lambda = 200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ értékéig. Az építési célra használt faanyagok rostra merőleges irányban $0,12\text{--}0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ hővezetési tényezővel rendelkeznek, míg rostirányban az érték ennek akár kétszerese is lehet. Mivel a különböző épületekben jelentős mennyiségű faanyag lehet jelen, fontos tudni a különböző fatermékek, faanyagok hőtani tulajdonságait is (TenWolde et al 1988, Kumaran et al 2003). A faanyag hővezetési tulajdonságainak és azok más tulajdonságoktól való függésének ismerete elsősorban hőszigetelés, szárítás, pasztifikálás, ragasztás témakörökben fontos, illetve olyan esetekben, amikor a faanyag hőellenállása fontos tényező (Kol 2009, Kol et al 2010). Mivel a faanyag anizotróp anyag, a hővezetése függ a hőáramlás irányától, a környezet hőmérsékletétől, a sűrűségtől, a faanyagban lévő hibáktól, valamint függ a faanyag nedvességtartalmától is (Grønli 1996, Suleiman et al 1999, Gupta et al 2003, Kol 2009a, 2009b, Korkut et al 2013). A hőmérséklet emelkedésével a faanyag hővezető képessége növekszik (Santos 2000, Kortelainen et al 2006). Nem elhanyagolható, hogy a faanyagot kezelték-e valamilyen védőszerrel, mert ez általában növeli a hővezetést (Uysal et al 2008, Kol & Altun 2009).

A faanyag hővezetési tényezőjének változásáról viszonylag kevesen értekeztek, bár több kutatás is beszámolt a hőkezelt faanyag növekvő hőszigetelő képességéről, de ennek kezelési hőmérséklet függéséről kevés szó esik (Kol & Sefil 2011). Mint tudjuk, a hőkezelés hatására az egyensúlyi fanedvesség csökken (Gündüz et al 2008), mely azzal van összefüggésben, hogy a kezelés hatására csökkennek a faanyagban a hidrofíll oldalláncok, főként a szénhidrátok hidroxilcsoportjainak mennyisége és „koncentrációja”, így csökken a faanyag víz

abszorbeáló képessége, és annak dinamikája visszaesik. A kisebb vízmennyiség pedig gyengébb hővezetést eredményez (Homan et al 2000, Hinterstoisser et al 2003, Gündüz et al 2008). A hőkezelés hatására a sűrűség is csökken, melynek hatására a hővezetés ugyancsak csökken (Gündüz et al 2008), valamint a fent említett pórustérfogat növekedés is a hővezetés csökkenésében játszik szerepet.

Kol & Sefil (2011) kaukázusi jegenyefenyőt és bükköt azonos időtartamú, de különböző hőmérsékletű (170, 180, 190, 200, 212°C) hőkezelésnek vetették alá, és vizsgálták a hővezetés, a sűrűség, az egyensúlyi fanedvesség változását. Mindkét faj esetében a hővezetés csökkenését figyelték meg. Ugyancsak megállapították, hogy sűrűség esetében a lombos fajokhoz tartozó bükk esetében a csökkenés nagyobb mértékű, míg a hővezetésnél a sűrűséggel találtak szoros összefüggést. Korkut et al (2013) hőkezelt madárcseresznye faanyag hővezetését vizsgálták radiális és tangenciális irányban, megállapítva, hogy a két érték közel azonos, illetve a növekvő hőkezelési idővel a hővezetési tényező arányosan csökken.

Az ültetvényes fatermesztés egyre nagyobb jelentőséget kap hazánkban. Az új erdőterületek jelentős százalékát a nemes nyárok foglalják el, Magyarországon évente 1 millió köbméter körüli nyárfát termelnek ki. Hazánk jelentős mennyiségű, minőségi nyár alapanyaggal rendelkezik, ami lehetővé teszi, hogy olyan területeken is alkalmazzák, ahol eddig mellőzték felhasználását. A nyár kísérleti vizsgálatai is alátámasztják, hogy bővíteni kívánják építő- és asztalosipari alkalmazását (Isebrands & Richardson 2014). Ugyanakkor a faépítészetben ma leginkább a fenyőféléket alkalmazzák, így a kutatás során a vizsgálatok kontrolljaként lucfenyőt alkalmaztunk. Az alacsony sűrűségű nagy pórustérfogatú nyár kedvező hőszigetelési tulajdonságokkal bír, és a termikus kezelés által tartóssága, valamint esztétikai megjelenése is javítható. A fentiek miatt a vizsgálataink alapanyaga a Pannónia nyár (*Populus × euramericana* cv. *Pannonia*), mely kedvező alaki és fizikai tulajdonságú, illetve összehasonlításként a lucfenyő (*Picea abies* (L.) H. Karst.), mivel vizsgálataink eredményeit elsősorban szerkezeti alapanyagokra vonatkoztatjuk.

A gumifa vagy kaucsukfa (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.) a világ faültetvényeinek 18%-án található meg (ITTO 2009; Shigematsu et al 2011). Ezeket az ültetvényeket gumi latex termelésére hozták létre, a kitermelhető latex mennyisége azonban 25–30 év után csökkenni kezd, és új ültetvényt létesítenek (Killmann & Hong 2000). Évente hatalmas mennyiségű gumifa faanyag keletkezik, melynek hasznosítása csak részben megoldott, pl. a farontó szervezetek szembeni gyenge ellenállása miatt (Balsiger et al 2000, Zhou et al 2007). A harmadik vizsgált fajunk így a gumifa lett.

Ebben a tanulmányban a hőkezelés időtartamának hatását vizsgáltuk meg és hasonlítottuk össze a fenti három faj (két hazai és egy trópusi) esetében.

RÖVIDÍTÉSEK

EMC – Egyensúlyi fanedvesség (Equilibrium moisture content)

VOC – Illékony szerves vegyületek (Volatile organic compounds)

ANYAG ÉS MÓDSZER

A luc és nyár minták a TAEG Zrt. soproni Fafeldolgozó Üzeméből származnak, a gumifa mintákat Suthon Srivaro biztosította a thaiföldi Nakhon Si Thammarat provinciából.

A mérésekhez 18–18 db próbatestet készítettünk mindhárom fajfajból. A natúr próbatestek mérete 200×200×20 mm volt, a minták úgy kerültek kialakításra, hogy a hőáram a rostokra merőleges legyen. A kezdeti feltételeket egységesítve, a mintadarabokat, klímakamrában, normál klímán tároltuk (20 °C, 65%) négy hétig, mértük a tömegét (0,1 g érzékenységgel), dimenzióit (mm pontossággal), melyekből számítottuk a sűrű-



seget, valamint nedvességmérővel (Gann Hydromette M4050) ellenőriztük a nedvességtartalmát (0,1% pontossággal). Ezeket a méréseket a hőkezelés után is megismételtük.

A próbatestek hőkezelésénél 3 különböző menetrendet alkalmaztunk, a hőmérséklet mindhárom esetben 180 °C volt, a kezelések hossza (hőntartás) 15, 25 és 35 óra. A felfűtési menetrend szerint 5 óra alatt 90 °C-ra, majd újabb 5 óra alatt 130 °C-ra melegítettük a próbatesteket, a 180 °C-ot további 2 óra alatt értük el. A kezdeti mértékletes felfűtésre a nedvesség eltávozása miatt volt szükség, megkímélve a faanyagot a repedésektől. A lehűtésnél pedig a próbatestek és a kezelő berendezés hőtehetetlenségét használtuk ki, amelyek így mintegy 15 óra alatt hűltek ki 25 °C-ra.

A Soproni Egyetem Simonyi Károly Kar Innovációs Központjának laboratóriumában az egyes kezeletlen próbatestek hővezetési tényezőjének mérése egy erre kialakított, egyedi mérőegység segítségével történt. A meleg (15 °C) és a hideg (5 °C) oldal között állandó 10 °C körüli hőmérsékletkülönbséget biztosítottunk. Hőárammérő segítségével a fűtött meleg oldal és a mért hideg oldal közötti hőmérsékletkülönbségből és a fellépő hőáramból határozható meg a hővezetési tényező. A mérési adatgyűjtés és rögzítés percnként történt. A mérést akkor tekintettük befejezettnek, amikor az utolsó 50 adat szórása a 0,002 W·m⁻¹·K⁻¹ értéken belül volt. A hővezetést az (1) egyenlet alapján számítottuk.

$$\lambda = \frac{d \cdot \Phi_q}{\Delta T} \quad (1)$$

ahol

λ a hővezetés (W·m⁻¹·K⁻¹),

Φ_q a hőáram (W·m⁻²),

ΔT a mintadarab két oldalán a hőmérséklet-különbség (K),

'd' a minta vastagsága (m).

Ezt követte a fenti menetrendek szerint az egyes próbatestek hőkezelése. A hőkezelés után ismét – a hőkezelésből adódó deformációk miatt – a vastagsági méretet egységesen 15 mm-re csökkentettük, valamint a próbatesteket ismétlen klímakamrában tároltuk. Így a vizsgálat egyazon alapanyagon történt, a hővezetési tényezőt ugyanazon próbatesten mértük kezeletlen és hőkezelt állapotban, s ezzel kizárhattuk a fa anatómiai szerkezetéből eredő különbségeket. Vizsgáltuk a hőkezelés hatására bekövetkező sűrűségbeli, egyensúlyi fanedvességbeli és hővezetésbeli különbségeket abszolút értékben, és a kiindulási értékek bázisán számított százalékos értékben is.

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

Mindhárom kezelés hatással volt mind a fenyő, mind a nyár és gumifa mindhárom vizsgált tulajdonságára (1. táblázat).

Az átlagos nettó egyensúlyi nedvességtartalom (EMC) a kezdeti 12% körüli értékről mind a három faj, mindhárom kezelési idejében mintegy felére, 6% körüli értékre csökkent. Vagyis a kezelési idő hosszának ebben az esetben nem volt számottevő hatása, bár a növekvő idővel csökkenő EMC figyelhető meg, ezek között számottevő különbség nincs. A vízmegkötő képesség csökkenése azzal magyarázható, hogy a hőkezelés hatására csökken a hidroxil (–OH) csoportok száma – főként a hemicellulózokon –, valamint a cellulózban csökken az amorf régió aránya, ami csökkenti a cellulóz és hemicellulóz közötti és a légköri vízzel kialakított hidrogénkötések számát (Boonstra & Tjeerdsma 2006, Hill 2006, Xu et al 2019).

A sűrűség esetében is azt mondhatjuk el, hogy abszolút értékben a sűrűség csökkenése ugyanabban a tartományban mozog mindhárom fafajnál: –0,025 – –0,055 g·cm⁻³ és egy fajon belül a kezelési idő növekedésével a sűrűség is egyre nagyobb mértékben csökken. Ugyanakkor, mivel a kiindulási sűrűségekből jelentős

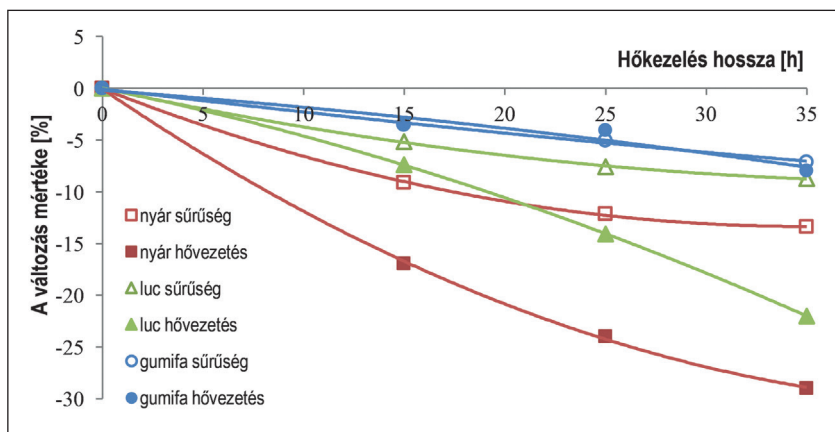
különbég volt, a kiindulási alapon számított relatív csökkenés is jelentősen eltérő. A nyár esetében 15, 25, illetve 35 órányi kezelés után rendre 9,1, 12,1, illetve 13,4%-kal csökkent a sűrűség. Luc esetében ezek az értékek 5,2, 7,6 és 8,7%, gumifánál pedig 3,5, 5,1 és 7,1% (1. ábra).

1. táblázat: Pannónia nyár, lucfenyő és gumifa próbatestek átlagos nettó nedvességtartalma (u [%]), hővezetési tényezője (λ [$Wm^{-1}K^{-1}$]) és normál sűrűsége (ρ [$g(cm^3)^{-1}$]) a kezeléseik előtt és után, valamint a változások mértéke százalékban a kiindulási értékek bázisán
 Table 1: The average net moisture content (u [%]), thermal conductivity (λ [$Wm^{-1}K^{-1}$]) and normal density (ρ [$g(cm^3)^{-1}$]) of Pannonian poplar, spruce and rubberwood specimens before and after treatments, and the percentage of change based on initial values

		Kiindulási értékek			Hőkezelés után								
		u_0 [%]	λ_0 [W/mK]	ρ_0 [g/cm^3]	u_1 [%]	Δu [%]	$u_{\%}$ [%]	λ_1 [W/mK]	$\Delta \lambda$ [W/mK]	$\lambda_{\%}$ [%]	ρ_1 [g/cm^3]	$\Delta \rho$ [g/cm^3]	$\rho_{\%}$ [%]
Pannónia nyár	15 h	11,4 ($\pm 0,4$)	0,1035 ($\pm 0,0032$)	0,340 ($\pm 0,014$)	6,8 ($\pm 0,4$)	-4,6	-40,1	0,0859 ($\pm 0,0028$)	-0,0176	-17,0	0,309 ($\pm 0,010$)	-0,031	-9,2
	25 h	12,4 ($\pm 0,5$)	0,1078 ($\pm 0,0084$)	0,398 ($\pm 0,033$)	6,1 ($\pm 0,2$)	-6,3	-50,8	0,0818 ($\pm 0,0051$)	-0,0261	-24,2	0,350 ($\pm 0,029$)	-0,048	-12,2
	35 h	11,9 ($\pm 0,2$)	0,1044 ($\pm 0,0037$)	0,407 ($\pm 0,002$)	5,9 ($\pm 0,1$)	-5,9	-49,9	0,0781 ($\pm 0,0045$)	-0,0263	-25,2	0,353 ($\pm 0,006$)	-0,055	-13,4
Lucfenyő	15 h	12,7 ($\pm 0,4$)	0,0911 ($\pm 0,0030$)	0,410 ($\pm 0,012$)	8,0 ($\pm 0,1$)	-4,7	-37,0	0,0834 ($\pm 0,0012$)	-0,0077	-8,5	0,385 ($\pm 0,005$)	-0,025	-6,2
	25 h	11,9 ($\pm 0,4$)	0,1093 ($\pm 0,0177$)	0,467 ($\pm 0,057$)	7,2 ($\pm 0,3$)	-4,7	-39,6	0,0966 ($\pm 0,0154$)	-0,0127	-11,6	0,431 ($\pm 0,048$)	-0,036	-7,7
	35 h	11,7 ($\pm 0,2$)	0,1251 ($\pm 0,0018$)	0,520 ($\pm 0,011$)	6,6 ($\pm 0,2$)	-5,1	-43,4	0,1011 ($\pm 0,0080$)	-0,0240	-19,2	0,475 ($\pm 0,012$)	-0,045	-8,7
Gumifa	15 h	11,8 ($\pm 0,4$)	0,1341 ($\pm 0,0086$)	0,685 ($\pm 0,043$)	6,6 ($\pm 1,1$)	-5,2	-44,1	0,1293 ($\pm 0,0061$)	-0,0048	-3,6	0,661 ($\pm 0,0039$)	-0,024	-3,5
	25 h	12,1 ($\pm 0,4$)	0,1351 ($\pm 0,0088$)	0,691 ($\pm 0,037$)	5,8 ($\pm 1,0$)	-6,3	-52,1	0,1296 ($\pm 0,0047$)	-0,0055	-4,1	0,656 ($\pm 0,0036$)	-0,035	-5,1
	35 h	12,3 ($\pm 0,3$)	0,1382 ($\pm 0,0049$)	0,675 ($\pm 0,022$)	5,5 ($\pm 0,6$)	-6,8	-55,3	0,1272 ($\pm 0,0067$)	-0,0110	-8,0	0,627 ($\pm 0,0024$)	-0,048	-7,1

A nyárnál tapasztalható a legnagyobb, a gumifánál a legkisebb relatív sűrűségcsökkenés mindhárom kezelési idő esetén. Ugyancsak elmondható, hogy mindhárom faj esetében a kezelési idő növekedésével a sűrűség csökkenése egyre kisebb, a görbe ellaposodik, hasonlóan más kutatók eredményeihez (pl. Esteves & Periera 2009, Xu et al 2019). Zaman et al (2000) hasonlóan azt tapasztalták, hogy azonos körülmények között a *Pinus sylvestris* L. tömegvesztése kisebb, mint a *Betula pendula* Roth tömegvesztése, vagyis a nyitvatermő tömegvesztése kisebb, mint a lombos fajé.

Alacsony hőmérsékleteken (160 °C-ig) a tömegvesztés főként a szabad és kötött víz távozásával magyarázható (Lin et al 2018). 160 °C feletti hőmérsékleten először a hemicellulóz degradációjával magyarázható a tömegvesztés (Hill 2006, Čabalová et al 2018), mert a sejtfalalkotó anyagok közül ennek a legkisebb a hőstabilitása. Főként kis molekulatömegű anyagok távoznak a faanyagból: H₂O, CO, CO₂, CH₄ és VOC-k (Xu et al 2019). Magasabb hőmérsékleteken (200–220 °C felett) már a többi sejtfalalkotó (lignin, cellulóz) kisebb mértékű bomlása is szerepet játszik. 160 és 200 °C között az acetilcsoportok mennyiségének csökkenése jellemző, melynek következtében csökken a hidroxilcsoportok száma, a faanyag erőteljesebben hidrofóbbá válik (Boonstra & Tjeerdsma 2006, Yang et al 2007). Kisebb mértékben a karbonil-, karboxil- és metilcsoportok mennyisége is csökken, valamint a cellulóz és hemicellulózok alifás régióinak, a lignin gyűrűinek degradációja is kimutatható (Hill 2006, Yang et al 2007, Xu et al 2019).



1. ábra: A nyár, luc és gumifa sűrűségének és hővezetésének relatív változása a kiindulási értékek bázisán, a hőkezelés időtartamának függvényében

Figure 1: Relative change of density and heat conduction of poplar, spruce and rubberwood on the basis of initial values, depending on the duration of heat treatment

A nyitvatermők és zárvatermők hemicellulóz összetételében több eltérés van, pl. a zárvatermők hemicellulóz egységei sokkal több acetilcsoportot hordoznak, mint a nyitvatermőké. Az acetilcsoportok egy része a hőkezelés során felszabadul, ecetsav keletkezik belőle és katalizálja a hemicellulóz és az amorf cellulóz további bomlását, furfurool származékok keletkeznek, melyek részben távoznak a fából (Chaouch et al 2010). Ezzel magyarázzák a zárvatermők és a nyitvatermők degradációjának eltérő mértékét. Ugyanakkor a különbségek nem magyarázhatók ilyen egyszerűen, hiszen a kísérletünkben a gumifa zárvatermőként jóval kisebb arányú tömegvesztést szenvedett, mint a luc. Chaouch et al (2010) szerint a különbségek magyarázatába más fizikai, kémiai tulajdonságokat is be kell vonni, tapasztalataik szerint pl. a nagyobb sűrűségű faanyagok nagyobb relatív tömegvesztést szenvedtek, ami viszont ellentétes az itt tapasztaltakkal. Más vizsgálatok szerint további kémiai tulajdonságok is befolyásolják a faanyag hőstabilitását. Poletto et al (2012) azt találták, hogy a cellulóz alacsonyabb kristályossága elősegíti a faanyag hőbomlását. Azt is kimutatták, hogy a magasabb extraktanyag-tartalom nagyobb mértékű hőbomlást eredményez (Shebani et al 2008, Poletto et al 2012, Poletto 2016). Ezzel azonban nem magyarázhatjuk a nyár és a gumifa eltérő viselkedését, hiszen a gumifának nagyobb az extraktum tartalma (2,7–10,9%) (Simatupang et al 1994, Wagenführ 2006, Okino et al 2010, Severo et al 2013, Riyaphan et al 2015, Severo et al 2016), mint a nyáraknak, köztük a Pannónia nyárnak (1,5–6,9%) (Lengyel 1961, Wagenführ 2006, Kačik et al 2012, Zamora et al 2013). Így ennek magyarázata további vizsgálatokat igényel.

A kiindulási hővezetési tényező már az egyes fajokban, illetve fajon belüli csoportokban is eltért némelyik esetben. A Pannónia nyár és a gumifa három hőkezelési csoportjai között mind a sűrűség, mind a hővezetés viszonylag homogén, az értékek egymáshoz közeliek. Ehhez képest a luc kiindulás hővezetési tényezője és sűrűsége már kiinduláskor is jelentősen eltért az egyes kezelési csoportok között. Ennek ellenére a hosszabb hőkezelés mindhárom fafajnál nagyobb változást eredményezett a hővezetési tényezőben (1. ábra), bár az összefüggés nem lineáris, az idő növelésével a változás egy maximális érték felé közelít. A Pannónia nyár esetében a legnagyobb, gumifa esetében a legkisebb mindhárom mérési időpontban. A hőátadás sok tényezőtől függ (lásd bevezető), és mivel ezek közül a legnagyobb mértékben a sűrűség és az egyensúlyi fanedvesség befolyásolja azt, ezért ezek változása lesz a legjelentősebb befolyásoló tényező. A faanyagban a hőátadás módjai közül (kondukción, konvekción, radiáción) leginkább a hővezetés vagy más néven a kondukción játszik szerepet. A faanyagban található víz hővezetése nagyobb a fáénál, így jelentős szerepe van az egész fa-víz rendszer (innentől faanyag) összesített hővezetésében, még akkor is, ha mennyiségileg a víz jelentősen kisebb

részarányban van jelen. A fentebb említett kémiai változások miatt a hőkezelés hatására az EMC csökken, így a hővezetést befolyásoló szerepe is csökken, melynek következtében a faanyag hővezetése is csökken. A sűrűség is befolyásolja a hővezetést, hiszen hőátadás szempontjából a faanyagban (a vízen kívül) levegővel teli üregek és szilárd anyag van. A sűrűség csökkenésével a szilárd rész aránya csökken, ami a hővezetés csökkenéséhez vezet. Korábbi vizsgálataink során arra a következtetésre jutottunk, hogy a sűrűségcsökkenés befolyása nagyobb (Pásztyori et al 2019). Így, bár abszolút értékben a sűrűség csökkenése hasonló a három fafajnál (1. táblázat) – vagyis közel azonos mennyiségű anyag távozik a hőkezelések során –, a kiindulási sűrűségek között tapasztalható különbségek miatt ez a gumifában jelentősen kisebb relatív hővezetés-változást idéz elő.

ÖSSZEFOGLALÁS

Méréseink igazolták, hogy a hőkezelt anyagból készült próbatestek egyensúlyi fanedvessége, sűrűsége és hővezetési tényezője alacsonyabb, mint a natúr, kezeletlen mintadaraboké.

Az irodalmi adatok alapján és a méréseink alapján is alátámasztható, hogy a hőkezelés által a faanyag egyensúlyi fanedvessége és sűrűsége csökken, mely magyarázza az alacsonyabb hővezetési tényezőt az azonos alapanyagból készült kontroll mintadarabhoz képest.

Megállapítható, hogy lucfenyő esetében mind a sűrűség, mind a hővezetési tényező relatív változása kisebb, mint a Pannónia nyár esetében, minden kezelési időtartam esetén, a gumifa esetében pedig még kisebb értékeket kaptunk. A fafajok közötti különbség részben az eltérő kiindulási sűrűséggel, részben a valószínűsíthető eltérő kémiai szerkezettel magyarázható. Utóbbit azonban egyelőre nem tudjuk bizonyítani, további vizsgálatok szükségesek az igazoláshoz.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány a „Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017” című, EFOP-3.6.2-16-2017-00010 jelű projekt részeként a Szechenyi2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Balsiger J., Bahdon J. & Whiteman A. 2000: The utilization, processing and demand for rubberwood as a source of wood supply. Asia-Pacific Forestry Sector Outlook Study, Working Paper No: APFSOS/WP/50. Asia-Pacific Forestry Commission, Workplan Number E24.2.
- Bosshard H., 1984: Holzkunde Bd.3, Aspekte der Holzbearbeitung és Holzverwertung. Birkhäuser Verlag, Basel
- Boonstra M. & Tjeerdsma B. 2006: Chemical analysis of heat treated softwoods. Holz- und Roh Werkstoffe 64: 204–211. DOI: 10.1007/s00107-005-0078-4
- Burmester A. 1973: Einfluss einer Wärme-Druck-Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbeständigkeit. Holz als Roh- und Werkstoff 31: 237–243.
- Burmester A. 1974a: Erfolgreiche Quellungs-Vergütung mit einfachen Mitteln (1) – Die Wärme-Druck-Behandlung – ein Verfahren mit guten Voraussetzungen für eine Realisierung. Holz- und Kunststoffverarbeitung 8/74: 534–538
- Burmester A. 1974b: Erfolgreiche Quellungsvergütung mit einfachen Mitteln (2) – Die Wärme-Druck-Behandlung von Holzwerkstoffen-technische Durchführung Wirtschaftlichkeit. Holz- und Kunststoffverarbeitung 8/74: 610–615



- Čabalová I., Kačík F., Lagaňa R., Výbohová E., Bubeníková T., Čaňová I. & Ďurkovič J. 2018: Effect of thermal treatment on the chemical, physical, and mechanical properties of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) wood. *BioResources* 13(1): 157–170.
- Chaouch M., Pétrissans M., Pétrissans A. & Gérardin P. 2010: Use of wood elemental composition to predict heat treatment intensity and decay resistance of different softwood and hardwood species. *Polymer Degradation and Stability* 95: 2255–2259. DOI: 10.1016/j.polyimdegradstab.2010.09.010
- Esteves B.M. & Periera H.M. 2009: Wood modification by heat treatment: a review. *BioResources* 4(1): 370–404. DOI: 10.15376/biores.4.1.370–404
- Fengel D., 1966: Thermisch und mechanisch bedingte Strukturänderungen bei Fichtenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff* 24: 529–536
- Fengel D. & Wegener G., 1989: *Wood – Chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, Berlin
- Giebel E. 1983: Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/Wärme/Druck-Behandlung. *Holz Roh- Werkstoff* 41:87–94.
- Grønli M.G. 1996: Theoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass. PhD dissertation. Norwegian University on Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Thermal Energy and Hydropower, Trondheim, Norway
- Gündüz G., Niemz P. & Aydemir D. 2008: Changes in specific gravity and equilibrium moisture content in heat-treated Fir (*Abies nordmanniana* subsp. *bommülleriana* Mattf.) wood. *Drying Technology: An International Journal* 26(9): 1135–1139. DOI: 10.1080/07373930802266207
- Hanhijärvi A., Wahl P., Räsänen J. & Silvennoinen R., 2003: Observation of development of microcracks on wood surface caused by drying stress. *Holzforschung* 57: 561–565. DOI: 10.1515/HF.2003.083
- Hill C.A.S. 2006: *Wood modification: Chemical, thermal and other processes*. In *Wood modification*; Stevens, C.V., Ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA. Volume 5, pp. 99–127.
- Hillis W.E. 1984: High temperature and chemical effects on wood stability. *Wood Science and Technology* 18: 281–293
- Hinterstoisser B., Schwanninge M., Stefke B.; Stingl R. & Patzelt M. 2003: Surface analyses of chemically and thermally modified wood by FT-NIR. In *The 1st European Conference on Wood Modification Proceedings of the First International Conference of the European Society for Wood Mechanics*; van Acker, J.; Hill, C. (eds): Ghent, Belgium, April 2–4, 2003; 65–70.
- Homan W., Tjeerdma B., Beckers E. & Joressan A. 2000: Structural and other properties of modified wood. *Congress WCTE 2000*, 1, 18–35.
- Isebrands J.G. & Richardson J. (eds) 2014: *Poplars and willows: trees for society and the environment*. ISBN 978-1-78064-108-9 (co publisher FAO)
- ITTO 2009: *Encouraging industrial forest plantations in the tropics*. International Tropical Timber Organization, Yokohama
- Jämsä S. & Viitaniemi P. 1998: Heat treatment of wood. Better durability without chemicals. *Nordiske Trebeskyttelsesdager* 47–51
- Jämsä S. & Viitaniemi P. 2001: Heat treatment of wood – Better durability without chemicals. In: *Review on heat treatments of wood. Proceedings of the special seminar on heat treatments. 09.02.2001 in Antibes*. 17–22.
- Junghans K., Niemz P. & Bächle F. 2005: Untersuchungen zum Einfluss der thermischen Vergütung auf die Porosität von Fichtenholz. *Holz als Rohund Werkstoff* 63: 243–244. DOI: 10.1007/s00107-004-0553-3
- Kačík F., Ďurkovič J. & Kačíková D. 2012: Chemical profiles of wood components of poplar clones for their energy utilization. *Energies* 5: 5243–5256. DOI: 10.3390/en5125243
- Killmann W. & Hong L.T. 2000: Rubberwood – the success of an agricultural by-product. *Unasylva* 51: 66–72.
- Klose W. & Schinkel A. 2002: Measurement and modelling of the development of pore size distribution of wood during pyrolysis. *Fuel Processing Technology* 77–78: 459–466. DOI: 10.1016/S0378-3820(02)00082-6
- Kol Ş.H. 2009a: The transverse thermal conductivity coefficients of some hardwood species grown in Turkey. *Forest Products Journal* 59(10): 60–64. DOI: 10.13073/0015-7473-59.10.58
- Kol Ş.H. 2009b: Thermal and dielectric properties of Pine wood in transverse direction. *BioResources* 4(4): 1663–1669. DOI:10.15376/biores.4.4.1663–1669
- Kol Ş.H. & Altun S. 2009: Effect of some chemicals on thermal conductivity of impregnated laminated veneer lumbers bonded with poly(vinyl acetate) and melamine-formaldehyde Adhesives. *Drying Technology* 27: 1010–1016. DOI: 10.1080/07373930902905092
- Kol Ş.H., Uysal B., Kurt Ş. & Ozcan C. 2010: Thermal conductivity of oak impregnated with some chemicals and finished. *BioResources* 5(2): 545–555. DOI: DOI:10.15376/biores.5.2.545–555

- Kol Ş.H. & Sefil Y. 2011: The thermal conductivity of fir and beech wood heat treated at 170, 180, 190, 200, and 212°C. *Journal of Applied Polymer Science* 121(4): 2473–2480. DOI: 10.1002/app.33885
- Kollmann F. & Schneider A. 1958: Einrichtung zur praxisnahen und wissenschaftlich exakten Messung von Sorptionseigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen. *Holz als Roh- und Werkstoff* 16: 118–122. DOI: 10.1007/BF02615506
- Kollmann F. & Schneider A. 1963: Über das Sorptionsverhalten wärmebehandelter Hölzer. *Holz als Roh- und Werkstoff* 21: 77–85. DOI: 10.1007/BF02609705
- Kollmann F., Schmidt E., Kufler M., Fengel D. & Schneider A. 1969: Gefüge- und Eigenschaftsänderungen im Holz durch mechanische und thermische Beanspruchung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 27: 407–425. DOI: 10.1007/BF02604735
- Korkut S., Aytin A., Taşdemir Ç. & Gurău L. 2013: The transverse thermal conductivity coefficients of Wild cherry wood heat-treated using the ThermoWood method. *ProLigno* 9(4): 649–683. Online ISSN 2069-7430.
- Kortelainen S.M., Antikainen T. & Viitaniemi P. 2006: The water absorption of sapwood and heartwood of Scots pine and Norway spruce heat-treated at 170 °C, 190 °C, 210 °C and 230 °C. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64: 192–197. DOI 10.1007/s00107-005-0063-y
- Krzyszowska M., Pilawa B., Pusz, S. & Ng, J. 2006: Physical characteristics of carbon material derived from pyrolysed vascular plants. *Biomass and Bioenergy* 30: 166–176. DOI: 10.1016/j.biombioe.2005.11.009
- Kubojima Y., Okano T. & Otha M. 1998: Vibrational properties of Sitka spruce heat-treated in nitrogen gas. *Journal of Wood Science* 46: 63–67. DOI: 10.1007/BF00521878
- Kumaran M.K., Lackey J.C., Normandin N., Tariku F. & Reenen D.V. 2003: Variation in the hygrothermal properties of several wood based building products. *Research in Building Physics*, Leuven, Belgium, 35–42
- Laganá R., Dizhbite T. & Telysheva G. 2006: An influence of thermal treatment on surface properties of wood. In: Kurjatko S., Kúdela J. & Laganá R. (eds): *Wood structure and Properties '06*, Zvolen 289–291.
- Lengyel P. 1961: A hazai és nemes nyarak fájának kémiai összetétele. *Az Erdő* 10(4): 124–128.
- Lin B.-J., Colin B., Chen W.-H., Pétrissans A., Rousset P. & Pétrissans M. 2018: Thermal degradation and compositional changes of wood treated in a semi-industrial scale reactor in vacuum. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 130: 8–18. DOI: 10.1016/j.jaap.2018.02.005
- Nuopponen M., Vuorinen T., Jämsä S. & Viitaniemi P. 2003: The effect of a heat treatment on the behaviour of extractives in softwood studied by FTIR spectroscopic methods. *Wood Science and Technology* 37: 109–115. DOI: 10.1007/s00226-003-0178-4
- Okino E.Y.A., Resck I.S., Santana M.A.E., Cruz C.L.S.C., Santos P.H.O. & Falcomer V.A.S. 2010: Evaluation of wood chemical constituents of *Hevea brasiliensis* and *Cupressus* decomposed by *Gloeophyllum striatum* using CP/MAS 13C NMR and HPLC techniques. *Journal of Tropical Forest Science* 22(2): 184–196.
- Omidvar A., Schneider M.H. & Van Heinigen A.R.P. 2001: Probing red maple pit membranes pore size at fibre saturation point and oven dry density using polystyrene macromolecule. Document No. IRG/WP 01-40217. International Research Group on Wood Preservation, Stockholm
- Pásztor Z., Tsalagkas D., Horváth N. & Börcsök Z. 2019: Insulation panels made from thermally modified bark. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 15(1): 23–34. DOI: 10.2478/aslh-2019-0002
- Patzelt M., Emsenhuber G. & Stingl R. 2003: Colour measurements as means of quality control of thermally treated wood. In: E Van Acker, J., Hill, C. (eds): *Proceedings of the 1st European Conference on Wood Modification*, 3–4 April 2003, Ghent. Ghent University, Belgium, 213–218.
- Poletto M., Zattera A.J., Forte M.M.C. & Santana R.M.C. 2012: Thermal decomposition of wood: Influence of wood components and cellulose crystallite size. *Bioresource Technology* 109: 148–153. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.11.122
- Poletto M. 2016: Effect of extractive content on the thermal stability of two wood species from Brazil. *Maderas. Ciencia y tecnología* 18(3): 435–42. DOI: 10.4067/S0718-221X2016005000039
- Rapp A.O., Sailer M. & Brand K. 2003: Umweltfreundliche Konservierung von Massivholz und Massivholzprodukten für den Außenbereich. Schlussbericht für das BMBF-Projekt 0339862. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft (BFH), Hamburg.



- Riyaphan J., Phumichai T., Neimsuwan T., Witayakran S., Sungsing K., Kaveeta R. & Phumichai C. 2015: Variability in chemical and mechanical properties of Pará rubber (*Hevea brasiliensis*) trees. *ScienceAsia* 41: 251–258. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2015.41.251
- Samuel O.S., Ramon B.O., Johnson Y.O. 2012: Thermal conductivity of three different wood products of *Combretaceae* family; *Terminalia superba*, *Terminalia ivorensis* and *Quisqualis indica*. *Journal of Natural Sciences Research* 2(4): 36–43.
- Santos J.A. 2000: Mechanical behaviour of Eucalyptus wood modified by heat. *Wood Science and Technology* 34: 39–43. DOI: 10.1007/s002260050006
- Seborg R.M., Tarkow H. & Stamm A.J. 1953: Effect of heat upon dimensional stabilisation of wood. *Journal of Forest Products Research Society* 3: 59–67.
- Sehlfstedt-Persson M., Johansson D. & Morén T. 2006: Effect of heat treatment on the microstructure of pine, spruce and birch and the influence on capillary absorption. In: Kurjatko, S., Kúdela, J. & Lagana, R. (eds): *Wood Structure and Properties '06*, Zvolen, 373–379.
- Severo E.T.D., Oliveira E.F., Sansígolo C.A., Rocha C.D. & Calonego F.W. 2013: Properties of juvenile and mature woods of *Hevea brasiliensis* untapped and with tapping panels. *European Journal of Wood and Wood Products* 71(6): 815–818. DOI: 10.1007/s00107-013-0731-2
- Severo E.T.D., Calonego F.W., Sansígolo C.A. & Bond B. 2016: Changes in the chemical composition and decay resistance of thermally-modified *Hevea brasiliensis* wood. *PLoS ONE* 11(3): e0151353. DOI: 10.1371/journal.pone.0151353
- Simatupang M.H., Schmidt U. & Kasim A. 1994: Wood extractives of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) and their influences on the setting of the inorganic binder in gypsum-bonded particleboards. *Journal of Tropical Forest Science* 6(3): 269–285.
- Shebani A.N., van Reenen A.J. & Meincken M. 2008: The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood species. *Thermochimica Acta* 471(1–2): 43–50. DOI: 10.1016/j.tca.2008.02.020
- Shigematsu A., Mizoue N. & Kajisa T., Yoshida S. 2011: Importance of rubberwood in wood export of Malaysia and Thailand. *New Forests* 41: 179–189. DOI 10.1007/s11056-010-9219-7
- Stamm A.J. & Hansen L.A. 1937: Minimizing wood shrinkage and swelling: Effect of heating in various gases. *Industrial & Engineering Chemistry* 29(7): 831–833. DOI: 10.1021/ie50331a021
- Stamm A.J., Burr H.K. & Kline A.A. 1946: Staywood, Heat-stabilized wood. *Industrial and Engineering Chemistry* 38: 630–634. DOI: 10.1021/ie50438a027
- Suleiman B.M., Larfeldt J., Leckner B. & Gustavsson M. 1999: Thermal conductivity and diffusivity of wood. *Wood Science and Technology* 33: 465–473. DOI: 10.1007/s002260050130
- TenWolde A., McNatt J.D. & Krahn L. 1988: Thermal properties of wood and wood panel products for use in buildings. *Forest Products Laboratory, Subcontract Number DE-AI05-870R21697*
- Terziev N. & Daniel G. 2002: Industrial kiln drying and its effect on microstructure, impregnation and properties of Scots pine timber for above ground use. Part 2. Effect of drying on microstructure and some mechanical properties of Scots pine sapwood. *Holzforschung* 56: 434–439. DOI: 10.1515/HF.2002.067
- Tiemann, H.D. 1920: Effect of different method of drying on the strength and hygroscopicity of wood. *The kiln drying of lumber*. 3rd ed. J.P. Lippincott Co., Philadelphia, PA. 256–264.
- Uysal B., Kurt S., Kol H.S., Özcan C. & Yildirim M.N. 2008: Thermal conductivity of poplar impregnated with some fire retardant. *Teknoloji* 11(4): 239–251.
- Vernois M. 2001: Heat treatment of wood in France – State of the art. In: *Review on heat treatments of wood*. In: Rapp A.O. (ed): *Proceedings of special seminar on heat treatments*, Antibes, France. Office for official publications of the European communities, Luxembourg
- Wagenführ R. 2006: *Holzatlas*. 6., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage Hanser, Carl (Verlag) ISBN 978-3-446-40649-0, 603, 677.
- Welzbacher C.R. & Rapp O.A. 2002: Comparison of thermally modified wood originating from four industrial scale processes-durability. *International Research Group on Wood Protection Doc. N° 02-40229*. Stockholm

- Welzbacher C.R. & Rapp A.O. 2003: Thermische Verfahren – Verfahrensübergreifender Vergleich. In: 23 Holzschutz-Tagung der DGfH, Augsburg, 26–27.03.2003. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., München. 97–112.
- Xu J., Zhang Y., Shen Y., Ki C., Wang Y., Ma Z. & Sun W. 2019: New perspective on wood thermal modification: relevance between the evolution of chemical structure and physical-mechanical properties, and online analysis of release of VOCs. *Polymers* 11: 1145. DOI: 10.3390/polym11071145
- Yang H., Rong Y., Chen H., Dong H.L. & Zheng C. 2007: Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86: 1781–1788. DOI: 10.1016/j.fuel.2006.12.013
- Zaman A., Alén R. & Kotilainen R. 2000: Thermal behavior of Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Silver birch (*Betula pendula*) at 200–230 °C. *Wood and Fiber Science* 32(2): 138–143.
- Zamora D.S., Wyatt G.J., Apostol K.G. & Tschirner U. 2013: Biomass yield, energy values, and chemical composition of hybrid poplars in short rotation woody crop production and native perennial grasses in Minnesota, USA. *Biomass and Bioenergy* 49: 222–230. DOI: 10.1016/j.biombioe.2012.12.031
- Zhou Y., Mingliang J., Ruiqing G. & Xiaoling L. 2007: Rubberwood Processing Manual. Research Institute of Wood Industry Chinese Academy of Forestry, Beijing. CFC/ITTO/72 PD103/01 Rev.4 (I) "Demonstration of Rubberwood Processing Technology and Promotion of Sustainable Development in China and Other Asian Countries"

Érkezett: 2020. április 07.

Közlésre elfogadva: 2020. május 11.