

A nedvességtartalom szerepe a pellet mechanikai stabilitásának kialakulásában

KOCSIS Zoltán

Nyugat-magyarországi Egyetem Simonyi Károly Kar, Faipari Gépészeti Intézet

Kivonat

Napjainkban a faalapú por-forgács halmazok pelletálhatóságával összefüggő kutatások még meg lehetőségen hiányosak. A folyamatra jellemző jelenségek (mechanikai stabilitás, sűrűlódási viszonyok, rheológiai tulajdonságok, feszültség-deformációs összefüggések) még máig is számos kérdést vetnek fel a kutatóknak. Ennek oka a faanyag felépítésének bonyolult struktúrájában keresendő. A szakirodalmak szinte egységes állásponton vannak, miszerint a pellet mechanikai stabilitásában a fő szerepet a lignin, mint természetes kötőanyag illetve a vele kapcsolatos kötési erők játsszák, de emellett megemlítik az adhéziós erők jelentős hatását is, amik a nedvességtartalommal állnak szoros kapcsolatban. Jelen kutatás vizsgálat alá vonta a pellet mechanikai stabilitásával összefüggő kötési erők eredetét és a kísérletek azt bizonyították, hogy a préselés során a farészek felületére kivált víz jelenléte valóban meghatározó szerepet tölt be a kötési erők kialakításában.

Kulcsszavak: pellet-víz kapcsolat, mechanikai stabilitás, szorpció izoterma, vízpotenciál, pF-görbe, tenzió

The influence of moisture content on the mechanical stability of wood pellets

Abstract

At present, research concerning pellet manufacturing is incomplete. The typical properties of pellets, like mechanical stability, friction conditions, rheological properties, relationships of stress and deformation still give rise to many questions for researchers today, because of the complexity of the structure of wood. According to the literature, the mechanical stability of pellets is related to the lignin and the adhesion forces. The present work examines the possible origins of the binding forces and experimental evidence shows that the presence of water on particle surfaces plays a definite role during the pressing procedure.

Keywords: pellet-water contact, mechanical stability, sorption isotherm, water potential, pF curve, tension

Bevezetés, a témával összefüggő szakirodalmi áttekintés

Az utóbbi időben – tekintettel a megújuló energiák fokozódó hasznosítására – egyre nagyobb szerepe van a faiparban keletkező por-forgács halmazok energetikai célú nemesítési folyamatainak. A nemesítés ilyen értelemben tömörítést jelent, amellyel a faalapú melléktermékek használati értékét növeljük. A tömörítési eljárások lényege, hogy a megfelelően aprított alapanyag nagy nyomáson történő préselése során egy nagyobb energiasűrűségű, természetes tüzelőanyagot kapjunk eredményül. Az így előállított pellet vagy brikett energetikai alapanyagul szolgálhat mind az ipari létesítmények részére, mind pedig a lakossági felhasználás területén. A faiparban keletkező por-forgács halmazok pelletálási folyamatainak megvan a sajátos technológiája, amelyhez a kapcsolódó paramétereket (szemcseméret, préselési nyomás, nedvességtartalom stb.) általában tapasztalati úton alakították ki. Éppen ezért az alapkutatások szerepe napjainkban felértékelődött. A jó minőségű pellet ($\rho=1050-1100$ kg/m³) előállításának döntő faktora a megfelelően aprított alapanyag, a nedvességtartalom és a préselési nyomás. Az apríték mérete a 0,2–1,5 mm szemcseméret-tartományban ideális (ez a frakciótartomány jellemző az utánaprítási technológiára is), az optimális alapanyag nedvességtartalom 10–15% között van, a pelletálási nyomás matricás préseknél pedig 100 MPa körülire tehető (Kocsis 2015, Fenyvesi és tsai. 2008, Dmitry és tsai. 2013, Escort 2009).

A préselési nyomást és a frakcióméretet technológiai állandónak tekinthetjük, azaz döntően a nedvességtartalom határozza meg a pellet mechanikai stabilitását.

A témával kapcsolatosan az alábbi főbb külföldi kutatásokat említhetjük meg:

Mani és tsai. (2006) vizsgálták az alapanyag nedvességtartalmának a hatását a fenyőpellet sűrűségével összefüggésben. Megállapították, hogy 100 MPa préselési nyomáson a legnagyobb pelletsűrűség akkor érhető el, amikor az alapanyag (fűrészpor) nedvességtartalma 12–15% között van.

Samuelsson és tsai. (2012) erdeifenyő-pelleteket vizsgáltak és beszámoltak arról, hogy a nedvességtartalom jelentős szerepet játszik a pellet mechanikai szilárdságának kialakításában. A mechanikai szilárdságot összefüggésbe hozták a pelletsűrűséggel. Arra a következtetésre jutottak, hogy az alapanyagból kivált nedvesség kenő hatást fejt ki a matrica falára, így csökken a matrica fala és az anyagalmaz között kialakult súrlódási erő, azaz adott préselési nyomáson nagyobb pelletsűrűségi értékeket kaptak. Azonban bizonyos nedvességtartalom felett észrevették, hogy csökkent a pelletsűrűség. Végül megállapították, hogy ha az alapanyag nedvességtartalom 11–13% között van, akkor optimális a pellet minősége.

Kaliyan és Morey (2009) megállapította, hogy az optimális alapanyag nedvességtartomány változhat a különféle alapanyagok és termelési paraméterek mellett.

Nielsen és tsai. (2010) arról számoltak be, hogy a pellet sűrűségét az alapanyag nedvességtartalmán kívül a faanyagban lévő extraktanyagok mennyisége is befolyásolja. Ha nagyobb a faanyag extraktanyag-tartalma, akkor kisebb pelletsűrűség érhető el.

Mani és tsai. (2003) konstatálták, hogy pelletáláskor a nedvesség hatására létrejövő adhéziós erők okozzák a szemcsék egymáshoz tapadását. Ezek az erők a nedvességtartalmon kívül a szemcsemérettől (felülettől) és a szemcsék közötti távolságtól is függenek. Ha kisebb a szemcseméret, akkor nagyobb a kötési felület és a szemcsék is közelebb kerülnek egymáshoz, ezáltal nő az adhéziós erő. Fordított esetben pedig ez az erő gyorsan csökken. Megállapításuk szerint az adhéziós erők a van der Waals (molekuláris erő) erőkből és a lignin által kialakított H-H kötésekéből származnak.

Sun (2011) arra a következtetésre jutott, hogy az alapanyag nedvességtartalmának növekedésével nő a kötési felület, ami szükséges a molekuláris erők és a H-H kötések kialakulásához. A nedvességtartalom hatását összefüggésbe hozta a monomolekuláris vízréteg (monoréteg) vastagságával. Lucfenyő alapanyagon mérte a különböző alapanyag nedvességtartalmi értékekhez tartozó pelletsűrűségeket, majd megállapította, hogy egy bizonyos alapanyag nedvességtartalmi értéktől kezdve a pelletsűrűség nőtt, majd elért egy maximumot és azután csökkent. Sun (2011) talált egy olyan kritikus nedvességtartalmi értéket, ami már meghaladta a monoréteg vastagságát és ennek eredményeképpen kisebb pelletsűrűségeket kapott. Végeredményben megállapította, hogy az alapanyag nedvességtartalma a 10–15% közötti tartományban az optimális. A 10% alapanyag nedvességtartalom alatt és 15% felett 100 MPa préselési nyomáson csökkent a pellet sűrűsége és a szilárdsága. Kísérletileg megállapította azt is – Kaliyan és Morey (2009) eredményeire építve –, hogy a maximális pelletsűrűség nem mindig ugyanahhoz az alapanyag-nedvességtartalomhoz tartozik, a hőmérséklet és a nyomás is befolyásolja.

A fent leírtak alapján a kutatók megállapították, hogy egy bizonyos alapanyag-nedvességtartalom felett és alatt nem áll össze a pellet. Meghatározták, hogy a gyakorlatban alkalmazott pelletálási nyomáson (100 MPa) 15% alapanyag-nedvességtartalom fölé nem ajánlott menni, az optimális nedvességtartomány 10–15% között van. Préseléskor a szemcsék közötti fő kötési erők a lignin által alkotott másodlagos H-H kötésekéből, valamint a van der Waals erőkből tevődnek össze. Az utóbbiak viszont a nedvességtartalommal állnak szoros kapcsolatban. Egységesen arra a megállapításra jutottak, hogy e témakör további kutatásokat igényel. Jelen kutatás éppen ezért célul tűzte ki a nedvesség befolyásoló hatásának további vizsgálatát a pellet mechanikai stabilitásával összefüggésben.

A fa-víz kapcsolat általános áttekintése

A faanyag egy széles mérettartományt átfogó üregrendszerrel rendelkezik, amelyek alapján megkülönböztetünk:

- makrokapillárisokat: kapilláris sugár $r > 10^{-6} - 10^{-5} \text{ m}$ (szabad víz tartomány),
- mezokapillárisokat: kapilláris sugár $r = 10^{-7} - 10^{-6} \text{ m}$ és
- mikropillárisokat: kapilláris sugár $r < 10^{-10} - 10^{-7} \text{ m}$ (kötött víz tartomány).

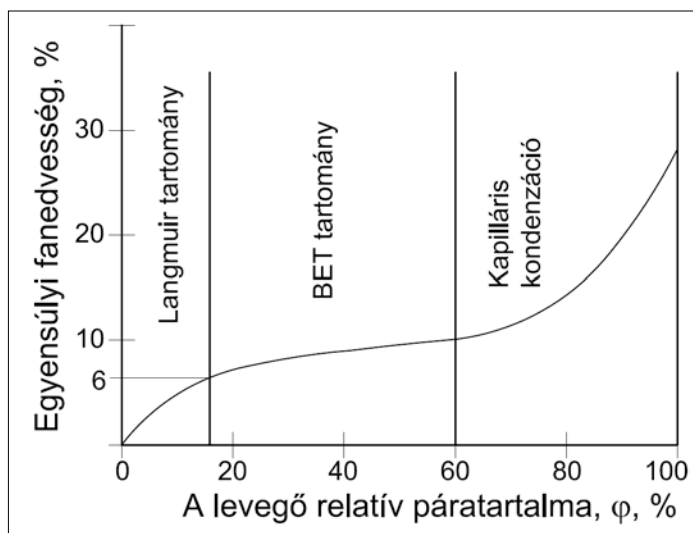
A víz számára hozzáférhető üregek a sejtfaiban találhatóak, a cellulóz fonalmolekulák közötti ún. intermicelláris térben. Ezek az üregek 10^{-9} m nagyságrendűek. A cellulózmolekulán belül minden glükózmolekulához egy elsődleges és két másodlagos hidroxil (OH) csoport kapcsolódik. Az OH csoport a kristályos cellulóz részekenél a molekulák közötti kötést biztosítja, a nem kristályos részeken viszont vízmolekulákat köt meg. A fában lévő cellulóz mintegy 70%-a kristályos (micella) formában van jelen. Itt a cellulózmolekulák között H-H kötések vannak, ezért a kristályos részek a víz számára átjárhatatlanok. Az egymás melletti rétegben elhelyezkedő cellulózmolekula-láncok a másik két fő alkotóelembe vannak ágyazva, vagyis a hemicellulózba és a ligninbe. A lignin a sejtfa mechanikai ellenálló képességét növeli, és alapvetően ez határozza meg a sejtfa mechanikai tulajdonságait (Molnár 1999). A higroszkóposág szempontjából alapvető szerepe van a cellulóz szerkezetének, az intermicelláris és interfibrilláris üregeknek. Ezen üregekben lévő víz mennyisége meghatározza a micellák, mikrofibrillák egymástól való távolságát, vagyis a faanyag zsugorodását és dagadását. Ezek a jelenségek a sejtfaiban lévő kötött víz mennyiségével állnak összefüggésben. A faanyagokban a kötött víz kb. 30% alatti nedvességtartalomnak felel meg. A kötött víz mennyiségét a mikrofibrilla mátrixában a szorpciós helyek száma szabja meg. Amikor minden szorpciós hely telített (sejtfa mikroüregei telítődnek vízzel) rosttelítettségi állapotról beszélünk.

A fa-víz kapcsolat tárgyalásánál fontos megemlíteni a szorpciós izotermát. A különböző faanyagok szorpciós izotermái kissé eltérnek egymástól, de mivel ez az eltérés olyan csekély, ezért jó közelítéssel a faanyagok szorpciós izotermája egy görbén ábrázolható (Eisenmann 1949; Vorreiter 1949; Keylwerth 1964; Peralta 1995). A szorpciós izoterma elvi sémája Németh (1995) alapján az 1. ábrán látható.

A görbe első része az ún. kemiszorpció, ahol a fa vízmolekulákat köt meg a szabad OH gyökein keresztül és kialakul egy monomolekuláris réteg. Ez a réteg rendkívül erősen kötődik a fatesthez, ezért egyes feltételezések szerint a H-H kötések és a van der Waals-erők (molekuláris erők) mellett kovalens kötések is kialakulnak. Az első vízmolekula-csoportok mindig az elemi rostok amorf szakaszaihoz kötődnek. Bariska (1988) szerint a monomolekuláris réteg ~6% nettó nedvességtartalomnak felel meg. Meredek emelkedés figyelhető meg az izotermán $\phi=70\%$ -os relatív páratartalomtól. Ez a jelenség a kapilláris kondenzációval magyarázható, melynek jelentősége van a kötött víz felvétele szempontjából.

Belső nedvességáramlás

A fa kolloid, kapillárporózus anyag, amelyben a nedvesség folyékony vagy gőz fázisban vándorol. A belső nedvességáramlás mindig valamilyen potenciálkülönbség (hajtóerő) hatására jön létre. A faanyag a vizet molekuláris adszorpció és kapilláris adszorpció útján tárolja. Ha a faanyag teljesen száraz, akkor először a molekuláris adszorpció útján köti meg a fa a vizet és csak bizonyos nedvesség felett lép be a kapilláris adszorpció. A molekuláris adszorpció jellemzője, hogy a vízmolekulák a sejtfa közvetlen közelébe (10^{-9} m-es távolságra) kerülnek és a vonzóerő következtében a mikrofibrillák felületi molekuláihoz (azon belül is az amorf részek OH gyökeihez) tapadnak. A vonzóerő az első molekularétegben a legnagyobb és az 5–6. réteg után drasztikusan csökken (Pizzi és tsai. 1987). A molekuláris erőtér hatására a vízmolekulák nyomás alatt vannak a szívóhatásnak megfelelő mértékben. A víz felvétele következtében az anyag térfogata növekszik (megduzzad), kialakulnak a 10^{-9} m nagyságú pórusok. A kapilláris adszorpció esetében a kialakuló kapilláris méretű pórusokban meniszkusz alakul ki, majd ezek a kapilláris méretű üregek tartják a vizet a felületi feszültség adta kapilláris erők segítségével.



1. ábra A szorpciós izoterma elvi sémája

Figure 1 The theory of the sorption isotherm

¹ Tájékoztató adatok: egy vízmolekula átlagos mérete 0,1 nm (korábbi megfelelője az 1 ångström).

² Kötési energiák közelítő értékei: kovalens kötések: ~474 kJ/mol, H-H kötések: ~20 kJ/mol).

A testben lévő üreg addig nevezhető kapillárisnak, míg abban a folyadék felszínét elsősorban a felületi feszültség határozza meg és a gravitációs erő elhanyagolható. Ez a határ kb. 10^{-3} – 10^{-7} m kapilláris sugárnál van (Sitkei 1994). A levegőből a kapillárisba bejutó pára a felületeken a molekuláris erők hatására abszorbeálódik és először egy-, majd többrétegű molekuláris filmet alkot. A víz ebből a rétegből hatol be a mikrokapillárisokba, amelyek sugara kisebb a folyadékfilm rétegvastagságánál. A mozgatóerő a kapilláris potenciál (ψ_k), amely meghaladhatja a 100 MPa nyomást is. Ha a kapilláris sugara nagyobb a többrétegű molekuláris vízréteg vastagságánál, ezek az erők drasztikusan csökkennek és létrejön a rosttelítettség, vagyis az az állapot, amikor a sejtfalak teljesen telítettek kötött vízzel, de az üregekben szabad víz nem található (Tiemann 1906).

A rosttelítettség alatti tartományban a diffúziós jelenségek játsszák a főszerepet. A diffúciónak két fő típusa van:

- a gőz diffúziója a sejtüregben (lumen),
- a kötött víz diffúziója a sejtfalakon belül.

A kötött víz belső mozgása folyékony fázisban és izotermikus viszonyok között a sejtfalakon, mint mikrokapillárisokon keresztül megy végbe. Mozgatóerő a kapilláris feszültség-gradiense. A nedvesség pára formájában diffúziós erők hatására mozog a nagyobb kapillárisokban. Itt a hajtóerő a koncentráció különbség (Sitkei 1994).

Elméleti megfontolások, potenciálmélet

A sejtfalban lévő kapillárisokban a vizet a felületi feszültség adta kapilláris erők tartják. Nedvesítő folyadékok esetén a kapillárisban lévő folyadékfelszín homorú (2. ábra), a felület sugara (r_i) nagyobb vagy egyenlő a kapilláris sugarával (r) (Sitkei 1994).

A meniszkusz két oldalán kialakuló nyomáskülönbség felírható az alábbi módon:

$$P_g - P_s = \Delta P = \frac{2\sigma}{r_i} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} \quad (\text{Pa}) \quad [1]$$

ahol:

- P_g – a kapillárisban lévő vízgőz nyomása, (N/m^2),
- P_s – a meniszkusz felett lévő telített levegő vízgőz nyomása, (N/m^2),
- σ – a víz felületi feszültsége ($0,072 \text{ N/m}$),
- r_i – a folyadékfelszín sugara, (m),
- r – a kapilláris sugara, (m),
- θ – a nedvesítés szöge, ($^\circ$).

Érdekes megjegyezni, hogy a fában lévő szerves anyagok csökkentik a víz felületi feszültségét hozzávetőleg $0,05 \text{ N/m}$ értékre (Csanády és tsai. 2015). A kapillárisnyomás hatására a folyadék a kapillárisban felemelkedik és a kapilláris erő egyensúlyt tart a folyadékoszlop súlyával, amely alapján a kapillárisemelés (h) kifejezhető:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r\gamma_v} \quad (\text{m}) \quad [2]$$

ahol:

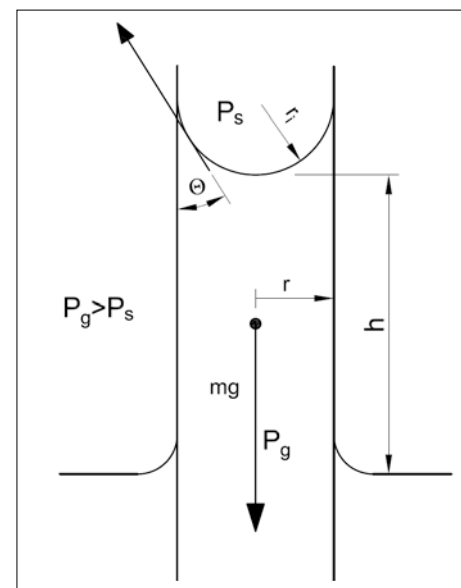
- γ_v – a víz fajsúlya, (N/m^3).

Az (1; 2) egyenletekből következik, hogy a kapilláris emelés és a vele összefüggő kapilláris nyomás a sugárral fordítottan arányos. A meniszkusz két oldalán lévő relatív gőznyomás értéke a Thompson-formula alapján számítható (Sitkei 1994):

$$\phi = \frac{P_g}{P_s} = \exp\left(-\frac{2\sigma\rho_g}{P_s\rho_v r}\right) \quad [3]$$

ahol:

- ϕ – a relatív gőznyomás (vagy másképpen a relatív páratartalom),
- ρ_g – a vízgőz sűrűsége a kapillárisban, (kg/m^3),
- ρ_v – a víz sűrűsége a kapillárisban, (kg/m^3).



2. ábra A kapillárisemelés elvi sémája

Figure 2 The theory of capillary rise

Ez az összefüggés olyan kapillárisokra vonatkozik, amelyekben a kapilláris potenciál sokkal nagyobb a gravitációs erőter potenciáljánál, vagyis a mikrokapillárisokra. A sejt falban lévő mikrokapillárisok vízfelvétele addig tart, amíg $P_s > P_g$. A (3) egyenlet alapján a rosttelítettségi állapot akkor következik be, amikor a kapillárisban lévő vízgőznyomás megegyezik a folyadékfelszín felett lévő telített levegő vízgőz nyomásával ($P_g = P_s$), ekkor $\phi = 1$.

A kapilláris potenciál, vagy másképpen a kapilláris nyomás:

$$\psi_k = \frac{2\sigma \cos \Theta}{r} \quad (\text{Pa}) \quad [4]$$

Nedvesítő folyadékok esetén a ψ_k értéke mindig negatív. A fa víztartó (vízmegkötő) képessége tehát negatív kapilláris nyomással ún. tenzióval jellemezhető. A nedvesség változásakor a fa dagad, illetve zsugorodik, ezzel a pórusok is változnak. A mikrokapilláris sugár (r) és a kapilláris potenciál (ψ_k) változását Sitkei (1994) alapján a relatív páratartalom (ϕ) függvényében az 1. táblázatban láthatjuk.

Növekvő mikrokapilláris sugár esetében gyorsan csökken a kapilláris potenciál (1. táblázat). Ha a sejt falban lévő összes mikrokapilláris sugara nagyobb, mint 10^{-7} m, akkor rosttelítettségi állapotról beszélünk. A mikrokapillárisokban a leggyakoribb kapilláris sugár-méret Stamm (1946) munkája alapján a $0,5-1,0 \cdot 10^{-9}$ m közötti tartományban van. Ekkor $\phi \sim 20\%$; $X \sim 5\%$ és $\psi_k \sim -215$ MPa. A rosttelítettség alatti tartományban ($\phi = 0,05-0,99$) a kapilláris potenciál 400 MPa és 14 MPa között változik. A fa dagadását a sejt falak közé az ilyen rendkívüli nyomáson bekerülő víz okozza.

1. táblázat Az r és ψ_k változása a relatív páratartalom függvényében

Table 1 Changes of r and ψ_k change as a function of the relativ humidity

ϕ	0,05	0,1	0,2	0,5	0,7	0,85	0,9	0,95	0,98	0,99
r ($\times 10^{-9}$ m)	0,36	0,46	0,67	1,8	3,73	10,2	21,9	46,3	106,6	107,7
ψ_k (MPa)	-400	-307	-215	-92,5	-47,6	-21,7	-14	-6,8	-2,7	-1,4

A kapilláris potenciál kifejezhető másképpen is az ún. vízpotenciállal a következő elméleti megfontolások alapján: A levegőben mindig van vízpára, amely a faanyaggal kölcsönhatásba lép. A levegő is negatív vízpotenciállal (tenzióval) köti meg a vizet és ez a potenciál a levegő relatív páratartalmából meghatározható a Thompson-formulához hasonlóan:

$$\ln \phi = -\frac{2\sigma \cdot m_v}{rRT} = \psi_c \frac{m_v}{R'T} \Rightarrow \psi_c = \frac{R'T}{m_v} \ln \phi \quad (\text{MPa}) \quad [5]$$

ahol:

ψ_c – a levegő és a fa vízpotenciálja, (MPa),

T – a hőmérséklet, ($^{\circ}\text{K}$),

ϕ – a relatív páratartalom,

m_v – a víz moltérfogata ($18 \text{ cm}^3/\text{mol}$),

R – az univerzális gázállandó ($8,314 \text{ J/mol} \cdot ^{\circ}\text{K}$),

R' – az univerzális gázállandó más mértékegységben kifejezve ($8,2 \text{ MPa} \cdot \text{cm}^3/\text{mol} \cdot ^{\circ}\text{K}$).

A fában lévő póruseloszlás ismeretében megszerkeszthető az egyensúlyi nedvesség (X) változása a kapilláris sugarának illetve a vízpotenciálnak a függvényében. Példaképpen Csanády és tsai. (2015) munkája alapján fenyőre jellemzően az összefüggés a 3. ábra alapján kerül bemutatásra. Az ábra jól illusztrálja a fentiekben elhangzottakat.

Az anyagok víztartalma megadható az eltávolításához szükséges szívóerő mértékével is. Schofield (1935) nyomán talajok, mezőgazdasági anyagok esetében a nedvességtartalom jellemzésére az ún. pF-görbéket használják, amiken a nedvesség eltávolításához szükséges vízoszlop cm-ben kifejezett szívóerő tízes alapú logaritmusát értjük. Példaképpen, ha $pF = 3$, ez 10^3 cm vízoszlop szívóerejének felel meg, ami átszámítva $-0,1$ MPa tenziót jelent³.

³ A negatív előjelű tenzió vagy másképpen vízpotenciál értékeket fizikailag abszolút értékben kell értelmezni, hiszen a pF-szám emelkedésével növekszik a definíció szerinti vízoszlop magassága és általa a nyomása is. A negatív előjel csupán egy relatív nézőpont. A mikrokapillárisban lévő meniszkusz másik oldalán a szívóerőnek megfelelő nagyságú nyomóerő (kapilláris nyomás) ébred. Ennek értelmében a szívóerő és a nyomóerő egymással ekvivalens mennyiségek.

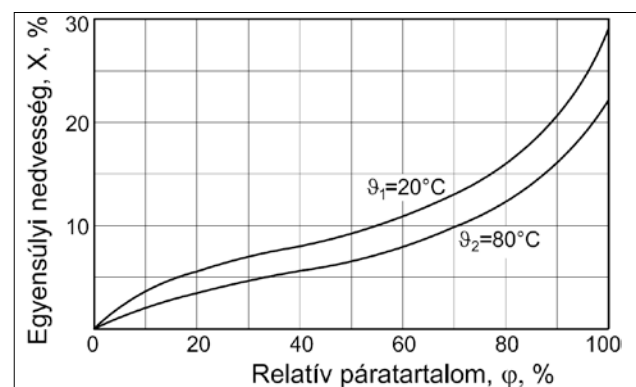
Anyagok és módszerek

A vizsgálatok zárt térben, lucfenyő (*Picea abies*) és akác (*Robinia pseudoacacia*) por-forgács mintákon történtek. A vizsgálati frakciótartomány 0,2–1,5 mm között volt vegyesen, jellemzően az utánaprítási technológiára. A préselési nyomás az 5. ábrán látható mérési pontokhoz tartozó nyomásértékeknek (vízpotenciál értékek) megfelelően 30–300 MPa közötti nyomástartományban változott. A por-forgács halmazok beállított nedvességtartalmi értékei fenyőnél és akácnál egyaránt: 5%, 7%, 10%, 12%, 13%, 14%, 15%. A beállított préselési sebesség egységesen 10 mm/perc volt. A mérések INSTRON univerzális szilárdságvizsgáló gépen történtek egy erre a célra kialakított 6 mm-es nyomófej és hőmérséklet szabályozó mérőberendezés segítségével. A méréshez felhasznált eszközök részletesebb tárgyalása Kocsis és Csanády (2014) munkájában megtalálható. A mérések kivitelezése az alábbiak szerint történt: Az adott nedvességtartalmú és fafajú valamint vegyes frakciójú por-forgács minta behelyezésre került a fentiekben megjelölt irodalomban található nyomócsőbe, majd 100 MPa kezdeti nyomáson tömörítve lett. A nyomócsőből történő kitolást követően a tömörített halmaz vagy egyben maradt vagy szétesett. Az egyben maradás feltétele az volt, hogy a pellet a saját súlyát képes legyen elbírní. Ha a pellet szétesett, akkor 5 MPa megnövelt nyomással újbóli tömörítés történt. Ha a megnövelt nyomásnál a pellet már összeállt, akkor ez a nyomásérték 1 MPa nyomásonként mindaddig csökkentve lett, amíg a pellet még éppen egyben maradt. A minimális nyomásértékek tehát 1 MPa pontossággal kerültek meghatározásra. A mérés hibája ennek megfelelően a 300 MPa nyomáshoz viszonyítva 0,3%-ra, a 30 MPa nyomáshoz képest pedig 3%-ra adódott. Az adott mérési paraméterekhez tartozó mérések háromszor lettek megismételve, majd ezek átlagai adták az 5. ábrán látható mérési pontok értékeit. A három ismételt mérésből adódó nyomásértékek közötti szórás $\pm 5\%$ -on belüli volt a két fafajnál. A kapott nyomásértékek – mivel ekvivalens mennyiségek a vízpotenciállal –, így az 5. ábrán közvetlenül ábrázolhatóak.

Pelletálás során a befektetett préselési energia egy része a matrica falán kialakult jelentős súrlódás miatt hő formájában távozik. Ekkor a hőmérséklet hozzávetőleg $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül van (Gilbert és tsai. 2009, Kocsis 2015). A vizsgálatok éppen ezért a pelletálásra jellemző $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten történtek. Csanády és tsai. (2015) alapján a fa szorpciós izotermáját a rosttelítettségi határig a két vizsgálati hőmérsékleten a 4. ábrán láthatjuk. Megfigyelhető, hogy a hőmérséklet növekedésével a szorpciós izoterma lefelé tolódik, azaz a faanyag egyensúlyi nedvességtartalma csökken azonos relatív páratartalom mellett.

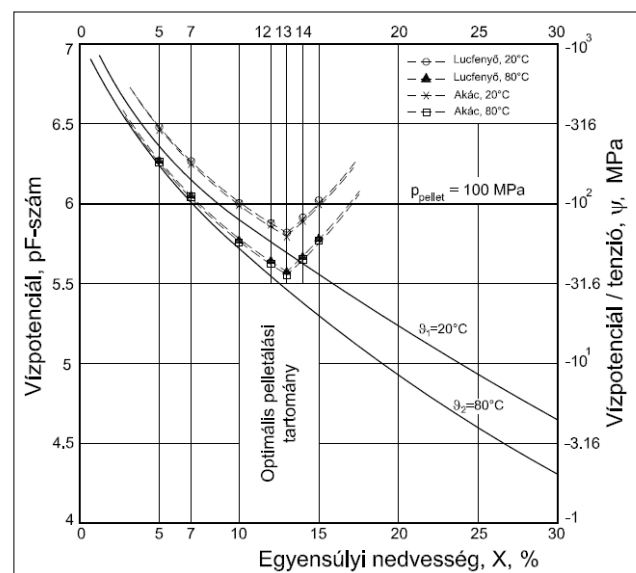
Eredmények és értékelés

Felhasználva az [5] egyenletet, megszerkesztésre került – a 4. ábrán látható szorpciós izoterma alapján – a fa pF-görbéje a rosttelítettségi határig. A kapott mérési eredmények grafikus ábrázolása és egyben a fa pF-görbéje az 5. ábrán látható. Az 5. ábrán látható pF-görbék megfelelnek a szorpciós izotermának és ahhoz hasonlóan hiszterézis jellemzi őket. Megfigyelhető, hogy minél negatívabb a vízpotenciál, annál kisebb a maximálisan elérhető egyensúlyi nedvességtartalom.



4. ábra A faanyag egyensúlyi nedvességtartalma a két vizsgálati hőmérsékleten

Figure 4 The equilibrium moisture content of wood at two different temperatures



5. ábra A kapott eredmények grafikus ábrázolása (szaggatott vonal) és a fa pF-görbéje (folytonos vonal) $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten

Figure 5 The measurement results (dotted line) and the pF curve of wood (solid line) at two different temperatures

A kapott eredmények érdekessége hogy a mérési pontok szisztematikusan az egyensúlyi tenziógörbék felett helyezkedtek el (5. ábra), ami azt jelenti, hogy a szükséges préselési nyomás mindig nagyobb az adott nedvességtartalomhoz tartozó víztenzió értékénél. Ebből az következik, hogy az egyensúlyi nyomásnál negatívabb (nagyobb) nyomáson biztosan kiválik a víz a fa felületére, amely hozzájárul az érintkező fafelületek között fellépő kötési erők kialakításához. A farészek felületén ily módon kivált víz folyadékfilmet alkot. A kialakult folyadékfilm a molekuláris erők hatására az érintkező fafelületek pórusai között potenciálkülönbséget hoz létre. Ez a potenciálkülönbség szívóerőt (vákuumot) produkál, amely következtében a farészek feltételezhetően a kialakult adhéziós erők hatására összetapadnak. A szívóerő nagysága a nedvességtartalom függvényében változik, ezáltal erősen összefügg a fa víztartó képességét meghatározó tenzió értékével. A nedvesség növekedésekor a fa víztenziója csökken, vagyis a víz a felületen kisebb nyomáson válik ki, feltételezhetően csökkentve ezáltal az adhéziós erők nagyságát.

Pizzi és tsai. (1987) megállapították, hogy a szívóhatás értéke a 6. vízmolekula-réteg után drasztikusan csökken. Ez a jelenség analóg módon megfigyelhető a talajoknál is, ahol a vízréteg vastagsága 5–6 molekularétegnél kisebb, akkor a víz erősen kötődik a talaj pórusaihoz és emiatt a növény nem tud felvenni vizet, ez az ún. hervadáspontra jellemezhető (Sitkei 1997). A szívóhatás csökkenésének kezdete megfigyelhető az 5. ábrán a 13%-os nedvességtartalmi értéktől kezdődően. Ettől fogva a pellet már csak egyre növekvő nyomásokon állt ismét össze (a molekuláris erők csökkenése miatt a felületek feltételezhetően megcsúsztak egymáson). A hőmérséklet növekedésével a faanyagban termikus bomlási folyamatok is megindulnak. Ezek a bomlási folyamatok 50–60 °C fölött már elkezdődnek. Ennek fő oka a hemicellulóz és a lignin lágyulása. A hemicellulóz 50 °C, a lignin 90 °C felett kezd el lágyulni. A hőmérséklet növekedésével a faanyag termoplastikus képessége nagymértékben javult, ezáltal a pellet a 20 °C-hoz viszonyítva kisebb nyomáson állt össze. Érdekes megjegyezni, hogy a minimális préselési nyomás mind a két hőmérsékleten azonos nedvességtartalomhoz tartozik.

Következtetések és összefoglalás

A kapott eredmények alapján a következő megállapítások tehetők:

- Kísérletileg és bizonyos elméleti megfontolások alapján megállapítható, hogy a lignin mellett a nedvességtartalomnak is jelentős szerepe van a pellet mechanikai stabilitásának kialakításában, hiszen pelletálási nyomáson jellemzően a nedvességtartalom hozza létre a farészecskéket összetartó adhéziós erőket.
- A fa pF-görbéje a rosttelítettség alatti tartományban exponenciális jellegű, így a 0% nedvességtartalomhoz aszimptotikusan közelít, vagyis a por-forgács abszolút száraz állapotban elméletileg csak végtelen nyomáson áll össze.
- A gyakorlatnak megfelelően az optimális alapanyag nedvességtartalom 10–15% között van. A 15–20% közötti nedvességtartományban csökken a pellet mechanikai stabilitása, 20% körüli nedvességtartalomnál pedig a pellet már nem áll össze 100 MPa nyomáson.
- A pelletsűrűség összefüggésbe hozható a relatív pelletálási nyomással ($\Delta p/p$), ahol Δp a préselési nyomás ($p_{\text{pellet}} = 100 \text{ MPa}$) és a minimális nyomás (p_{min} , amin összeáll a pellet) különbsége. Minél nagyobb a relatív pelletálási nyomás, annál nagyobb pelletsűrűség adódik. Az 5. ábra alapján a legnagyobb pelletsűrűséget a két hőmérsékleti értéken lucfenyő és akác mintánál a 12–13%-os alapanyag nedvességtartalom mellett kapjuk.

A kutatási munka célja a pellet mechanikai stabilitásának kialakítását befolyásoló tényezők felkutatása volt. Megállapítható, hogy a préselés során a fafelületek között kivált víz által kialakított adhéziós erők jelentősen hozzájárulnak a pellet mechanikai stabilitásához. A szerző hangsúlyozza, hogy a téma további, mélyrehatóbb kutatása szükséges a jelenség egzaktabb tárgyalásához.

Megállapíthatjuk, hogy a fa egy igen bonyolult felépítésű biomechanikai rendszer, amely minden részletében még pontosan nem ismert. Ebből következik, hogy a fizikai-mechanikai tulajdonságok az anyagszerkezet jellemzőinek függvényében ma még nem adhatók meg elegendő pontossággal. Az összefüggések kidolgozása elkezdődött, és az ismeretek szisztematikus feldolgozása végül oda fog vezetni, hogy a fizikai-mechanikai tulajdonságok a fa finomszerkezeti jellemzőinek segítségével megadhatók lesznek.

Irodalomjegyzék

- Bariska M. (1988) A szorpció hiszterézise és okai, előadás a Nyugat-magyarországi Egyetemen, Sopron
- Csanády E., Magoss E., Tolvaj L. (2015) Quality of Machined Wood Surfaces. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015 pp.13-32. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-22419-0>

- Dmitry T., Chander S., Mathew L. (2013) Effect of Additives on Wood Pellet Physical and Thermal Characteristics: A Review. Hindawi Publishing Corporation. ISRN Forestry. Volume 2013, Article ID 876939, 6 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/876939>
- Eisenmann E. (1949) Moderne Holztrocknung und ihre Arbeitsgrundlage, Holz -Zentralblatt 75(75): 945.
- Escort G. (2009) Wood pellets – a cleaner kind of fuel. NZ Journal of Forestry Volume 53(4):18-19.
- Fenyvesi L., Ferencz Á., Tóvári P. (2008) A tűzipellet. Cser Kiadó, Budapest, pp.9-43.
- Gilbert P., Ryu C., Sharifi V., Swithenbank J. (2009) Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops, Fuel 88:1491–1497. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.015>
- Kaliyan N., Morey R. V. (2009) Factors affecting strength and durability of densified biomass products. Biomass Bioenergy 33:337–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
- Keylwerth R. (1964) Untersuchungen über die freie und behinderte Quellung 4. Untersuchungen über den Quellungsverlauf und die Feuchtigkeitsabhängigkeit der Rohdichte von Hölzern. HRW 22:255–258.
- Kocsis Z. (2015) A fa szemcsés halmazok tömörítésének rheológiája és energetikája a pelletálási tartományban, Doktori értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem. pp. 32-70. <http://dx.doi.org/10.13147/NYME.2015.002>
- Kocsis Z., Csanády E. (2014) A nem-lineáris rheológia alkalmazása a faalapú anyagok pelletálásával, tömörítésével összefüggésben I. kísérleti rész. Faipar 62:(2) pp.8-17. http://dx.doi.org/10.14602/WoodScience-HUN_2014_1.
- Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. (2003) An overview of compaction of biomassgrinds. Powder Handling Process 15:160–168.
- Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. (2006) Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses, Biomass Bioenerg. 30:648–654. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>
- Molnár S. (1999) Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest. pp.188-209.
- Németh R. (1995) A fa-víz kapcsolatok a kutatás középpontjában. Faipar, 1995/9, pp.148-149.
- Nielsen N. P. K., Gardner D. J. G., Felby C. (2010) Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. Fuel, 89(1), 94-98. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.06.025>
- Peralta P. N. (1995) Sorption of moisture by wood within a limited range of relative humidities. Wood and Fiber Science (27) 1:13-21.
- Pizzi A., Bariska M., Eaton N. J. (1987) Theoretical water sorption energies by conformation analysis. Part 2. Amorphous Cellulose and the sorption isotherm. Wood Sci. Technol. 21:317-327.
- Samuelsson R., Larsson S., Thyrel M. & Lestander T. A. (2012) Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. Applied energy 99:109-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.004>
- Schofield R. K. (1935) The pF of the water in soil. In: Transactions, 3rd Internat. Congr. Soil Science 2:34-48.
- Sitkei G. (1994) A faipari műveletek elmélete. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, pp.105-140.
- Sitkei G. (1997) Gyakorlati áramlástan. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, pp.450-484.
- Stamm A. (1946) Passage of liquids, vapours and dissolved materials through softwoods. USDA Bull. 929.
- Sun C. C. (2011) Decoding powder tabletability: roles of particle adhesion and plasticity. Journal of Adhesion Science and Technology 25:483–499. <http://dx.doi.org/10.1163/016942410X525678>
- Tiemann H. D. (1906) Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood. US Dep Agric For Serv Bull 70, 144 pp.
- Vorreiter L. (1949–1962) Holztechnologisches Handbuch. I-III. G. Fromme Verlag, Wien.