



Rostirányban tömörített faanyag nyúlási tartalékának bizonyítása húzóvizsgálatokkal

Proof of the Elongation Reserve of Longitudinally Compressed Wood by Tensile Tests

Sajdik Tamás,¹ Báder Mátyás^{2*}

¹ Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Faipari és Műszaki Intézet. Sopron, Magyarország, sajdiktomi@gmail.com

² Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Faipari és Műszaki Intézet. Sopron, Magyarország, bader.matyas@uni-sopron.hu

Abstract

This paper deals with the proof of the theory of elongation reserve remaining in wood after compression parallel to the grain. After compression, the wood becomes much more pliable and the force required for bending is reduced. At the end of the 1-minute fixation following 20% compression, the compressive stress in the beech samples was reduced to an average of 72.3%, while the oak samples showed a 65.6% change. The remaining shortening at this time was 3-5%. At the end of the 3-hours fixation, the compressive stress had decreased to 37.1% for beech and 27.9% for oak, resulting in a residual shortening of 12-18%. An average maximum tensile force of 1.76 kN was required for untreated beech samples, which resulted in a 1.55 mm increase in size parallel to the grain. For specimens fixated for a short-time, a tensile force of 1.06 kN caused a 3.66 mm increase in size, while for specimens fixated for a long-time, a force of 0.85 kN caused an 8.79 mm increase in size. The trends were similar for oaks. The higher moisture content provided a significantly larger increase in size during the tensile tests. The existence of the elongation reserve was clearly confirmed.

Keywords: *wood compression parallel to the grain, compressive stress, tensile strength, tensile test, elongation reserve.*

Összefoglalás

A tanulmány a faanyag rostirányú tömörítésekor keletkező nyúlási tartalék elméletének bizonyításával foglalkozik. A tömörítési eljárás után a faanyag sokkal jobban hajlíthatóvá válik, továbbá a hajlításhoz kifejtett erőszükséglet is csökken. A 20% mértékű tömörítés utáni 1 perces fixálás végére a bükk mintáknál a nyomófeszültség átlagosan 72,3%-ra csökkent, míg a tölgyeknél 65,6% volt a változás. A maradó rövidülés ekkor 3–5%. A 3 órás fixálás végére bükk esetében 37,1%-ra, tölgyénél 27,9%-ra csökkent a nyomófeszültség, 12–18% maradó rövidülést eredményezve. A kezeletlen bükk minták húzóvizsgálatánál átlagosan 1,76 kN maximális húzóerőre volt szükség, mely 1,55 mm rostirányú méretnövekedést okozott. A röviden fixált mintáknál 1,06 kN erő 3,66 mm méretnövekedést, míg a hosszan fixáltaknál 0,85 kN erő 8,79 mm méretnövekedést okozott. A tölgyeknél ugyanígy alakultak a tendenciák. A magasabb nedvességtartalom lényegesen nagyobb rostirányú méretnövekedést biztosított a húzóvizsgálatok során. A nyúlási tartalék meglétét egyértelműen sikerült igazolnunk.

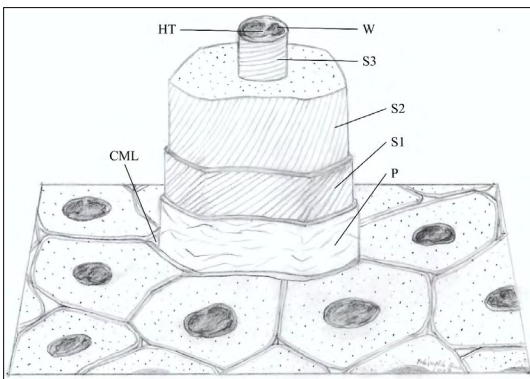
Kulcsszavak: *faanyag rostirányú tömörítése, nyomófeszültség, húzószilárdság, húzóvizsgálat, nyúlási tartalék.*

1. Bevezetés

1.1. A faanyag anatómiai felépítése

A faanyag mint természetes kompozit már az ősidők óta fontos alapanyaga az emberiségnek. Három fő alkotóelemből áll, cellulózból, ligninből és hemicellulózokból. Mielőtt rátérnénk a rostirányú tömörítésre, fontos tisztázni a faanyag általános szerkezeti felépítését, sejtszerkezeti összeállítását. A sejtek általában több sejtfalból épülnek fel, a külső falat elsődleges sejtfalnak hívják, míg az utána következő rétegeket másodlagos sejtfalnak szokás nevezni, azonban mivel ez háromrtegű, így külön jelzésekkel különböztetjük meg őket (S1, S2, S3) (1. ábra).

A sejtek felépítése mechanikai szempontból nagyon fontos, hiszen a szilárdság meghatározó tényező a faanyagok felhasználási területeinél. A sejtek hosszúkas felépítésűek; azokat a sejteket, amelyek a faanyag szilárdságát biztosítják, farostoknak nevezzük. A fatörzs felépítése tekintetében két nagy csoportot lehet megkülönböztetni: gesztet és szijácst. A geszt a fatörzs belső része, az aktív élettani folyamatokban nem játszik szerepet. Extraktanyag-tartalma a szijácshoz képest jellemzően rendkívül nagy, továbbá a geszt biztosítja a megfelelő szilárdságot. Azonban az inaktív sejtek köré kellene az élő sejtek is, melyek biztosítják a biológiai életét a fának. Ezt a funkciót látja el a szijác, melyben az edények és az edénykék szolgálnak víz- és tápanyagszállító csatornának. Azonban fontos megemlíteni, hogy szerkezeti felépítésükről eddig általánosságban volt szó. A tulajdonságok fajokonként eltérőek, de több szempontból lehet a fajokot csoportosítani. Jó példa erre a gyűrűs likacsú és a szórt likacsú fafajcsoportok markáns különbségei. Az eltéréseknek köszönhetően többféle ágazatban lehet a fajokot



1. ábra. A sejtal felépítése (forrás: [1])

alkalmazni. A faanyag-modifikációt sokféle céllal, elterjedten kutatják és alkalmazzák napjainkban. Célja, hogy bizonyos fafajok adott tulajdonságait javítsák, felhasználhatósági körüket növeljék.

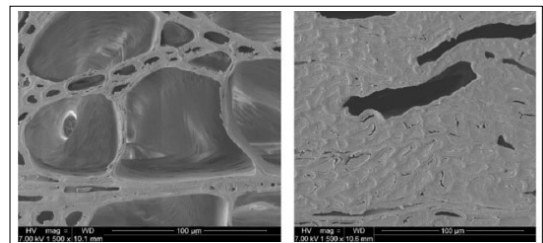
1.2. A nyúlási tartalék létezésének feltételezése

A rostirányban tömörített faanyag a kezelés hatására valamelyest véglegesen veszít eredeti hosszából. Számos folyamat játszódik le rostirányú tömörítés közben, ennek megfelelően számos elmélet látott napvilágot a jelentősen javuló hajlíthatóság magyarázatára. Az elsődleges elmélet, hogy a tömörítés során a sejtfalak meggyűrűsével a faanyagban nyújtási tartalék keletkezik, vagyis a gyűrűt sejtfalak később képesek kiegyenesedni (első megjelenései: [2, 3]). Ez azért fontos, mert a faanyag tönkremenetele hajlítás során jellemzően a húzott zónában következik be (szakadás), a faanyag csekély mértékű, rostirányú nyújthatósága következtében. Kutatásunk célja annak bizonyítása vagy pedig cáfolása a mért eredmények és azok elemzése ismeretében, hogy valóban keletkezik-e nyúlási tartalék a faanyagban a rostirányú tömörítés folyamán.

1.3. A tömörítés előzménye

Két nagy csoportot különböztetünk meg a tömörítési irány szempontjából. A tömörítést végezhetjük a rostokkal párhuzamosan, illetve a rostokra merőlegesen is (2. ábra). Az anatómiai irányok közötti különbség megmutatkozik a modifikációk céljaiban is. Rostiránnyal párhuzamos tömörítésnél az anyag sokkal jobban hajlítható lesz, míg a rostirányra merőleges tömörítésnél a sűrűséget tudjuk növelni, ezáltal az anyag sokkal keményebb lesz.

A faanyag hajlítását mint eljárást már az ókori Egyiptomban is alkalmazták. Akkoriban a faanyagot még csak gőzölték, aminek következtében az anyag meglágyult és hajlíthatóvá vált. Ez tette lehetővé a könnyebb alakváltoztatást az anyag törése nélkül. Miután beállították a megfelelő formá-



2. ábra. Bükk faanyag mikroszkópos képe keresztirányú tömörítés előtt és után (forrás: [3])

ra, hűtés és szárítás segítségével véglegesítették a változást, minimális visszarugózással. A módszert napjainkban is előszórással alkalmazzák, azonban a gőzöléses eljárás nagyon körülményes, és csakis nagyipari sorozatgyártásban gazdaságos. Ennek ellenére kifejlesztettek olyan rostlágyítási módokat is, melyeket Kollman [4] szintén megemlíti a tanulmányában. Léteznek olyan főzési módszerek, ahol a faanyagot timsóban vagy vízmentes folyékony ammóniában kezelik.

1.4. A rostirányú tömörítés fejlődése

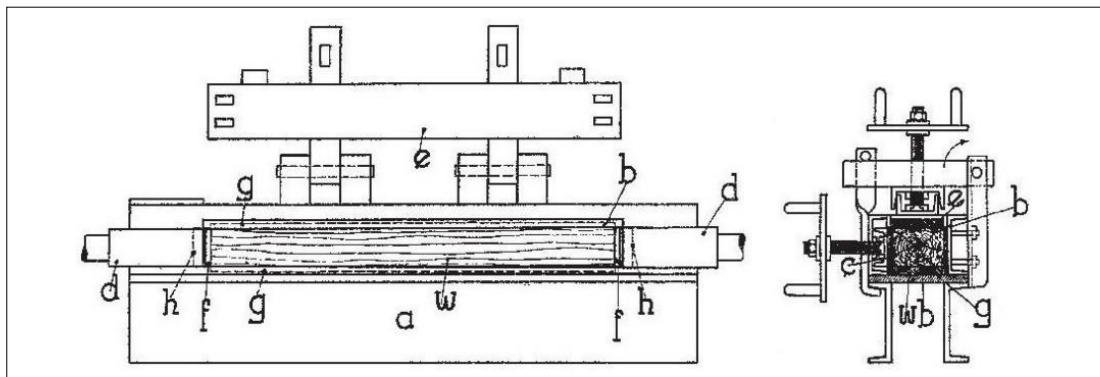
Ezt az eljárást először a Német Birodalomban dolgozták ki 1917-ben, ami lehetőséget biztosított a faanyag szobahőmérsékleten történő hajlítására [5]. A módszer elősegítette a faanyag hajlítását nagyobb erő-igénybevétel nélkül is, továbbá szintén előnyt jelentett, hogy a tömörített anyagot nem kellett újramelegíteni a nagymértékű hajlíthatóság eléréséhez. Fontos része volt az eljárásnak a tömörítés előtti gőzölés, melynek köszönhetően annyira meglágyultak a rostok, hogy ez lehetővé tette a tömörítést az anyag tönkremenetele nélkül. Az a faanyag, amelyet tömörítettek, utána már bármilyen hőmérsékleten formázható marad. A tömörített faanyagot a modifikáció után hűtötték, valamelyest szárították, ennek köszönhetően továbbfeldolgozhatóvá vált, és fel lehetett vágni deszkákra, pallókra, egyéb fűrészárura. Az alkalmazott eljárásról kijelenthető, hogy ebben az esetben egy termo-hidromechanikus modifikációról van szó.

1917-ben szintén megjelent egy szabadalom a Német Birodalomban, mely már az előző szabadalmat fejlesztette tovább nagyipari előállításra [6]. Ebben a fejlesztésben a fixálási időt (az az időszak, amíg a tömörített faanyagot összenyomott állapotban tartják) akarták kiváltani egy szorítóeszköz segítségével. Hétköznapi esetben a

préselés után az anyagot fixálódni hagyjuk a gép belsejében, ami a tömörítés hatására bekövetkezett tulajdonságváltozásokat tovább erősíti, azonban ilyenkor a gép nem alkalmazható további tömörítésre. A kifejlesztett eszköz segítségével fixált állapotban ki lehetett venni a gépből az anyagot, tartós fixálást biztosítva, majd így hűtötték és szárították. Eközben a gépben már elkezdődhetett a következő faanyag tömörítése. Sajnos a művelet annyira komplex volt, hogy az akkori technológia és a gyártási folyamatok nem tették lehetővé az elterjedését a faiparban. Ezt a típust 1926-ra továbbfejlesztették [7]. A Holzveredelung GmbH olyan gépet hozott létre, mely Hanemann előzetes szabadalmain alapul, azonban ez már sikeresen beilleszthető volt az akkori ipari folyamatokba, és valóban megvalósíthatóvá vált a termelés. Egy olyan belső betéttel dolgoztak ki, melynek köszönhetően préselés után a faanyagot egyből ki lehetett venni a gépből, és fixált állapotban tartotta azt (3. ábra). Közben már újra lehetett tölteni a tömörítőteret az újabb faanyaggal.

Az azóta eltelt évtizedek alatt, egészen napjainkig számos fejlesztést kezdeményeztek és hajtottak végre a szakértők, így az 1990-es évektől már PLC-vezérelt tömörítő berendezés is elérhető.

A Soproni Egyetemen 2015 óta lehetséges a rostirányú tömörítés. A méréseket és a tömörítőerőt Instron 4208 (Instron Corporation, USA) univerzális anyagvizsgáló gép biztosítja. Maga a tömörítési folyamat egy kifejezetten erre a célra kifejlesztett gépegységben történik, melyet a 2.2. alfejezet részletesen ismertet. A gép lehetőséget biztosít $20 \times 20 \times 200$, valamint $20 \times 30 \times 200$ mm nagyságú mintatestek rostirányú tömörítésére. Maximális tömörítési képessége lehetővé teszi, hogy a vizsgált anyagot rostirányban az eredeti mérethez képest akár 33%-kal kisebb méretűre préseljük. Oldalfalakba beépített fűtőszálak bizto-



3. ábra. Ipari felhasználásra gyártott első tömörítőgép (forrás: [7])

sítják a megfelelő hőmérsékletet, az oldallemezek pedig a megfelelő tömörítés elérésének érdekében képesek együtt mozdulni az éppen tömörödő faanyaggal [8, 9].

A rostirányban tömörített faanyag nagy előnye, hogy nyersanyag-felhasználás szempontjából nagyon gazdaságos. Az íves bútorelemek többnyire ragasztott vagy rétegelt-ragasztott elemekből készülnek, melyekhez sok ragasztóra és faanyagra van szükség. Ezzel szemben költséghatékony megoldást nyújt a rostirányban tömörített faanyag.

A rostirányban tömörített faanyag felhasználhatósági területeit tekintve rendkívül sokoldalú. Mint ahogy már említettük, kitűnően alkalmazható ívelt bútorelemek létrehozásához, továbbá rezgéscsillapított szerszámnnyelhez, íves képeretnek, autók belső borításánál, sportszergyártásnál, játékiparnál, valamint hangszergyártásnál is [3, 4, 10].

A tömörített faanyag esetében a gyártási túlméretezés elkerülhető, hiszen már a kész alakra lehet törés nélkül hajlítani, mindezek mellett a szállirány végig követi az alakzatot, nincsenek oldalt kifutó szálak. Az eljárás hátránya azonban, hogy a gőzölés hatására számolni kell az elszíneződéssel. Így esztétikailag meg kell válogatni, hogy hol érdemes felhasználni.

1.5. Tömörítésre alkalmas fafajok

Előzetes tanulmányok és kutatások figyelembevételére alapján kijelenthető, hogy tömörítésre a faanyagok széles köre alkalmazható. A lombos fafajok választékban nagyon bőveek, többségük kifejezetten alkalmas rostirányú tömörítésre, ilyen faj például a bükk (*Fagus sylvatica* v. *Fagus* ssp.), a tölgy (*Quercus* ssp., *Quercus petraea*, *Quercus velutina*), a fekete cseresznye (*Prunus serotina*), a kőris (*Fraxinus excelsior*, *Fraxinus americana*), valamint az ezüst juhar (*Acer saccharinum*) és a körtefa is [4]. Különböző szakirodalmakban elteréseket lehet olvasni, amikor az akác, a nyárfa vagy pedig a hárs iránt érdeklődünk. Ezeknek a fafajoknak a tömörítési tulajdonságai kétségesek.

Ahhoz, hogy a faanyag problémamentesen tömöríthető legyen, kifejezetten kell figyelni a felhasználandó anyag minőségére. Csakis egyenes növéssű fának a göcsmentes, keskeny évgyűrűs faanyag alkalmazható tömörítésre. Az anyag rostjainak iránya párhuzamos kell hogy legyen a munkadarab hosszanti élével, ez azt jelenti, hogy maximum 7°-os ferdeszálúságot lehet elfogadni. Maga az anyag minősége sokkal fontosabb tömörítésnél, mint az, hogy milyen módszerrel vágják ki a rönkből, ebben az esetben ez a szem-

pont elhanyagolható információ [11]. Álgesztre hajlamos faanyagoknál külön kell figyelni arra, hogy a felhasználandó faanyagban nem lehet álgeszt, mivel az más mechanikai tulajdonságú, és rontana a végeredményen. Göcsösség szempontjából a nagyméretű göcsök kerülendők, azonban a tűgöcsök megengedhetőek a felületen, de ezek sem túl szerencsések, hiszen ezek a pontok veszik fel a legnagyobb feszültséget, ami azt jelenti, hogy húzóvizsgálatok esetén ezeken a gyengített keresztmetszeteken megy majd végbe az esetleges tönkremenetel. A minták kialakításánál fontos figyelembe venni az alaki tényezőt is, ugyanis gőzölés és főzés hatására az anyag keresztmetszeti változásokon megy keresztül. Ez a nedvességtartalom változásának köszönhető. Lehetőség van az alapanyagok csoportos tömörítésére is. Fontos azonban, hogy csakis egy fajfajt lehet csoportosan tömöríteni, hiszen gépbe való elhelyezésük akkor lehetséges, ha egy anyagként viselkednek.

A faanyag sejtszerkezetében kétfajta vizet különböztetünk meg, szabad vizet és kötött vizet. A szabad víz a sejtek belsejében, a sejtüregekben található meg, míg a kötött víz inkább a sejteknek a falán telepszik meg. Rosttelítettségi pontnak nevezzük azt az állapotot, mikor a sejtüregekben nem található szabad víz, de a kötött víz a lehető legnagyobb mennyiségben halmozódik fel a sejtek falán és falában. A rosttelítettségi pont fafajonként eltérő, bükk esetében 35,6%, míg tölgy esetében 24,5% [12]. Ha a fafajok különböző rosttelítettségi állapotait átlagolnánk, akkor nagyjából 30%-ot kapnánk. Ennek az értéknek köszönhetően a gyakorlatban szintén ezt az értéket alkalmazzák nagy mennyiségű faanyag esetén. Tömörítésre az élőnedves, de legalább 16%-os nedvességtartalmú faanyag alkalmas [13]. Más vélemény szerint a tömörítéshez alkalmas faanyag nedvességtartalma akkor megfelelő, ha az 2–8%-kal kisebb a rosttelítettségi pontnál [14].

2. Anyagok és műszerek, a technológia folyamatainak ismertetése

2.1. Rostlágítási folyamat

A modifikációs eljárás három fontos részből tevődik össze: rostlágításból, magából a tömörítésből és az utókezelésből. A fa üreges sejtszerkezetének köszönhető, hogy a tömörítést roncsolásmentesen végezhet lehet vinni, azonban mivel a kezeletlen anyag nagyon merev, a könnyebb alakíthatóság, a rostlágítás érdekében mindig gőzölni/főzni kell előtte. Kémiai szempontból a megfelelő mennyiségű hő és nedvesség hatására

a hemicellulózok és a lignin változnak, ez lehetővé teszi, hogy csökkenjenek a faanyagok a tömörítés szempontjából fontos mechanikai tulajdonságainak értékei, mint a rugalmassági modulus. A cellulózrostok együtt merev szerkezetet alkotnak a sejtfaiban, azonban a hő és a nedvesség hatására az őket összekötő, főként ligninből és hemicellulózokból álló mátrixanyag meglágyul [15], és képesek elcsúszni egymáshoz képest a tömörítés és a hajlítás közben. A faanyag gőzölés során nagyjából 100 °C körül elkezd bomlani. Kezdetben a hemicellulózok károsodása figyelhető meg, aminek köszönhetően csökken a faanyag ellenálló képessége nyomással szemben, vagyis rostirányú tömörítésnél kifejezetten előnyös ez az állapot. A faanyag átmelegedésének irányértéke 2 min/mm [16, 17], ezt az értéket figyelembe véve kell meghatározni, a tömöríteni kívánt keresztmetszettől függően, a megfelelő gőzölési időt.

Összességében kijelenthető, hogy a faanyagot tömörítés előtt a jobb alakíthatóság érdekében mindig gőzölni kell 80–100°C közötti hőmérsékleten, így megfelelő lesz a rostlágyítás mértéke a tömörítés elkezdéséhez (4. ábra).

2.2. Instron 4208-as anyagvizsgáló gép alkalmazása tömörítéshez

A korábban említettek szerint a Soproni Egyetemen 2015 óta lehetséges a rostirányú tömörítés. A technológia alkalmazásához szükség volt egy megfelelő nagyságú erő kifejtéséhez alkalmas gépre (Instron 4208), valamint egy tömörítőegységre, melyet rá lehet kapcsolni a gépre (5. ábra).

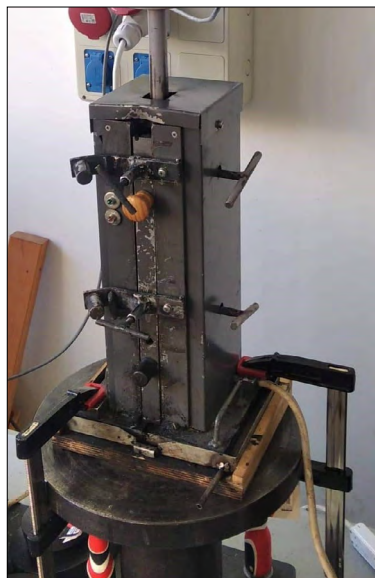
A tömörítőegység felépítése egyszerű, funkcióját tökéletesen ellátja. Két fő részből épül fel. Egy merev falú tömörítőkamrából, melynek a belső oldalfalai képesek a tömörített anyaggal együtt mozdulni, illetve fűtött külső oldalfalból, mely biztosítja a megfelelő hőmérsékletet a tömörítés idejére (6. ábra).

A tömörítési program beállításai megfeleltek minden minta esetében, egyedül egy paramétert változtattunk, a fixálási időt. A fixálási idő nagysága nagyban meghatározza az anyagtulajdonságok változásának mértékét, a nagyobb fixálási idő nagyobb maradé rövidülést okoz, és ezzel együtt valószínűsíthetően a nyúlási tartalék is növekszik.

A kutatás során két fafajt vizsgáltunk, bükköt (*Fagus sylvatica*) és kocsánytalan tölgyet (*Quercus petraea*), illetve két fixálási időt alkalmaztunk fafajonként: egyperces (rövid fixálás), illetve háromórás fixálási időt (hosszú fixálás). Ennek értelmében négy tömörített minta-csoportot különíthettünk el a kezeletlenek mellett.



4. ábra. A minták gőzöléséhez használt edény



5. ábra. A tömörítőegység közelről



6. ábra. A tömörítőegység belső felépítése

2.3. Tömörítés rostirányban

Miután a rostlágyítási folyamat befejeződött, megkezdődhet a tömörítés. A tömöríteni kívánt testet behelyezzük a tömörítőkamrába, ahol nagy nyomás segítségével a mintákat összepréseljük, ilyenkor akár 33%-os méretcsökkentést is el lehet érni az anyag roncsolása nélkül. Fontos megemlíteni, hogy a 33%, legnagyobb tömörítési értéket az általunk használt laboratóriumi tömörítőberendezés határozza meg. Minden fafajnak megvan a tömöríthetőségi határa, melyet meghaladva az anyag már lényeges szerkezeti roncsoláson megy keresztül, így tönkremegy, hajlításra nem lesz alkalmas. Korábbi, nem publikált kutatások alapján például tölgy esetében 21–23% a legnagyobb tömöríthetőségi arány a tönkrementelig, míg bükk esetében akár a 30%-ot is elérheti. A vizsgálataink során a tömörítést 20%-os, rostirányú méretcsökkenéssel végeztük el minden mintacsoportnál, ezzel garantálva a megfelelő tömörítést jelentősebb szerkezeti roncsolások nélkül. A relatív tömörítési sebesség 25%/min volt [1].

A megfelelő préselési arány elérésekor megkezdődhet a fixálás, ahol a belső feszültségek csökkennek, és a maradék rövidülés, valamint hajlíthatóság növekszik. Fontos megemlíteni, hogy minél hosszabb ideig végezzük a fixálást, annál kisebb lesz az anyag visszarugózása.

2.4. Tömörített faanyag utókezelése

Miután kivesszük a próbadarabokat a tömörítőkamrából, megkezdődhetnek az utókezelési folyamatok. Mivel tömörítés előtt gőzölésre van szükség, így nagy a faanyagok nedvességtartalma a folyamat befejezte után, ezért utókezelésként következik a szárítás. Szárításra többféle módszer lehet alkalmazni, ennek kiválasztása a faanyag adott felhasználási területétől függ. Fontos azonban megemlíteni, hogy a szárításkor a faanyag hajlíthatósága rohamosan romlik, ennek legfőbb oka a nedvesség csökkenése. 0–5% nedvességtartalomnál gyakran előfordul, hogy a kezeletlen faanyagnál is ridegebb lesz a rostirányban tömörített faanyag. Összességében tehát megállapítható, hogy a szárítás mint utókezelési folyamat záró műveletként szolgál. A tömörített anyagot a kívánt formára hajlítjuk, majd ezt az alakváltozást véglegesítjük a szárítással. Fontos azonban, hogy a hajlított anyagot a hajlítószablonra rögzítve kell szárítani, így biztosan nem fognak alaki eltérések keletkezni a folyamat végeztével. Korábbi vizsgálatok kimutatták [9], hogy a rostirányban tömörített faanyag hajlíthatósága akkor a legnagyobb,

amikor rosttelítettséghez közeli állapotban van.

A tömörített anyag hajlíthatósága megőrizhető, de ehhez megfelelő nedvességtartalmi állapot szükséges. Ez azt jelenti, hogy a megfelelő klimatikus feltételek betartása mellett a tömörített faanyagot nem fontos azonnal felhasználni, hanem tökéletesen lehet raktározni, ezzel megkönnyítve a nagy anyagfelhasználású gyárak sorozatgyártását.



7. ábra. 20×30×200 mm méretű bükk mintatest



8. ábra. Hosszan fixált, röviden fixált, kezeletlen bükk mintákból kialakított félkész húzóvizsgálati mintatestek



9. ábra. Hosszan fixált, röviden fixált és kezeletlen minták, húzóvizsgálathoz kialakított profillal

2.5. Húzóminták kialakításának folyamata

Az eljárás során 20×30×200 mm-es mintatesteket tömörítettünk (7. ábra), azonban ezek még túl nagyok voltak ahhoz, hogy húzóvizsgálatoknak vethessük alá őket.

Minden nagyméretű mintát felszeleteltünk 2 mm vastag kis próbatestekre (2×20×160–200 mm kezeléstől függően), egy nagy mintából általában 4 kis mintát lehetett kialakítani, figyelembe véve a vágási rés szélességét is (8. ábra).

A felszeletelt mintákat kézi marógép segítségével egységesített profilra kimartuk, melyek már alkalmasak voltak a húzóvizsgálatok elvégzéséhez (9. ábra). Így a vizsgált rész minden húzómintánál 2×8×50 mm lett.

A 8. ábrán a bal oldali minta jól láthatóan görbe, ezért a profil is az eredeti alakhoz igazodva lett kialakítva. Háromórás fixálás esetén a nagy minták többsége a tömörítőberendezésből kivéve meggörbült. Mint ahogyan említettük az 1.5. alfejezetben is, fontos, hogy minden rost párhuzamosan helyezkedjen el a mintatestben, a párhuzamosság megőrzésének érdekében igazodni kell a húzó minta kialakításának az anyag görbületéhez, így nem lesz szálfifutás, ami a húzóvizsgálatnál hibás méréshez vezethet.

Bükk és tölgy esetében összesen három-három mintacsoportot alakítottunk ki: hosszan fixált, röviden fixált, valamint kezeletlen faanyagokat vizsgáltunk. A három fő mintacsoport különböző előkezeléseken esett át, ennek az volt a célja, hogy szélesebb körben tudjunk vizsgálatokat elvégezni.

Az első fajta előkezelés során a mintákat 65%-os páratartalom mellett 20 °C hőmérsékleten 12% nedvességtartalomra kondicionáltunk (normál körülmény). A második fajta előkezelésnél először abszolút szárazra szárítottuk a mintákat, majd kondicionáltuk őket normál körülmények között. A harmadik fajta előkezelésnél élőnedveshez közeli állapotban tároltuk a mintákat, amit úgy értünk el, hogy lefagyasztottuk őket, hogy a víz a fatestben szilárd molekulákat alkosson, ezzel megakadályozva az elpárolgást és a biotikus károsítók megjelenését. Mintacsoportonként átlagosan 40 húzómintát vizsgáltunk, vagyis összesen 240 darab minta adatai lettek feldolgozva.

2.6. Húzóvizsgálatok

Miután a minták kialakítását, illetve a mintacsoportok összeállítását befejeztük, a faanyagokat húzóvizsgálatoknak vetettük alá. A vizsgálatok elvégzéséhez egy Tinius Olsen (Tinius Olsen Ltd. Redhill, England) gyártmányú H10KT anyagvizs-



10. ábra. Húzó minta befogatása az anyagvizsgáló gépbe

gáló gépet használtunk. Az alsó húzófej fix állású, míg a felső fej a „z” koordináta irányában képes mozogni (10. ábra).

Mivel a hosszan fixált, a röviden fixált, valamint a kezeletlen minták szilárdsága és nyújthatósága jelentősen eltért, így mindegyik mintacsoportnál más húzási sebességet választottunk. Célunk az volt, hogy minden minta egységes időintervallumban menjen tönkre, ahogyan azt a kapcsolódó vizsgálati szabvány (ISO 13061-6:2014 [18]) meghatározza. A tönkremeneteli időket figyelembe véve a helyes húzási sebesség a kezeletlen minták esetében 3 mm/s, röviden fixált mintáknál 4 mm/s, valamint a hosszan fixált minták esetében 8 mm/s volt.

3. Eredmények és értékelés

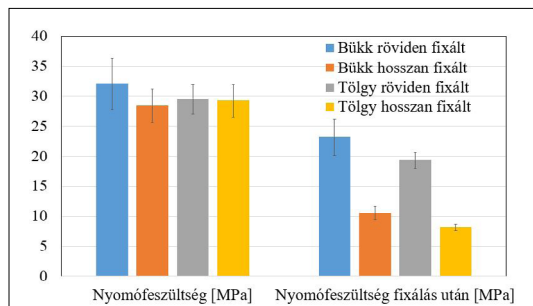
3.1. A nyomófeszültség változása a fixálás hatására

A rostirányú tömörítés során a faanyag végig plasztifikált állapotban van, így kerülhető el a tönkremenetele. A 20%-os tömörítési arány eléréséhez jelentős erőhatásra volt szükség, amit minden bemutatott mintatestünk tönkremenetel nélkül elviselt. A 20%-os tömörítési arány elérésekor mért nyomóerőt a keresztmetszettel elosztva kaptuk meg a legnagyobb nyomófeszültség értékét, ami az eljárás közben fellépett. Az összenyomást állandó értéken tartva (fixálás) ez a feszültség kezdetben gyors ütemben, majd fokozatosan lassulva csökkent, ahogyan a viszkoelasztikus anyagok feszültségrelaxációjára jellemző. Az elvégzett tömörítésekre a bükk- és a tölgy minták eltérő módon reagáltak. A 11. ábrán bemutatottak szerint a 20% mértékű tömörítést követően az egypercnyi fixálás hatására a bükk minták nyomófeszültsége 72,3%-ra csökkent, míg tölgy mintáknál ugyanez

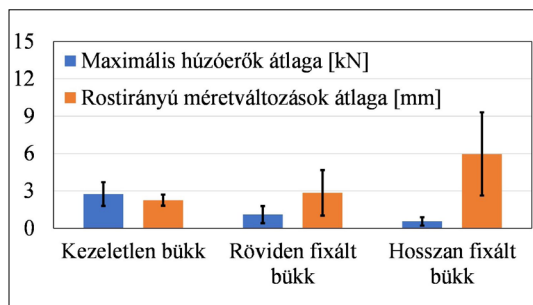
65,6% volt. A hosszú fixálás (3 órán keresztül összenyomva tartás) bükk esetében 37,1%-ra, míg tölgyenél 27,9%-ra csökkentette a nyomófeszültséget. Megjegyzendő, hogy a jelentős különbség a szobahőmérsékletűre hűlés következménye is. Egyúttal jelentősen megváltozott a faanyagok szerkezete mind a tömörítés, mind a hosszú fixálás hatására, amint azt bemutatták mikroszkópos elemzéssel [9]. A maradó rövidülési értékeket elemezve elmondható, hogy a tölgyek minden esetben nagyobb maradó alakváltozást szenvedtek, mint a bükkök. 20% összenyomás és rövid fixálás után 3–5% volt az alakváltozás, míg a hosszan tartó fixálás a mintáknak 12–18% maradó rövidülését eredményezte. Ezek nagyon jelentős mértékű változások, melyek komoly anatómiai-fizikai-mechanikai tulajdonságváltozásokkal párosulnak. Erről számol be a 11. ábra, mely a tömörítés utolsó pillanatában mért nyomófeszültséget és a fixálás végén kapott nyomófeszültséget mutatja be. Általánosságban elmondható, hogy az egyperces fixálás során a tömörítéskor létrejött nyomófeszültség harmada épült le, míg a háromórás fixálás végére a nyomófeszültség lényegesen jobban, kétharmadával csökkent.

3.2. A visszarugózás mértékének és a húzóvizsgálathoz szükséges erő kapcsolata

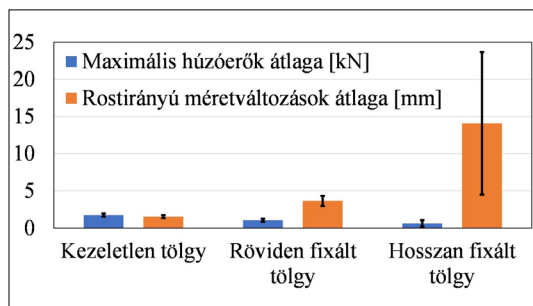
A 20 °C hőmérsékleten 65%-os páratartalom mellett 12% nedvességtartalomra kondicionált (normál körülmény) minták esetében mindkét fajtánál megfigyelhető, hogy a húzóvizsgálatok során ellentétesen alakulnak a rostirányú méretváltozáshoz viszonyított húzóerők, ezek a változások megfigyelhetők a 12. és a 13. ábrákon is. A kezeletlen bükk mintáknál alkalmazott húzóerő a szakadás pillanatáig átlagosan 1,76 kN volt, mellyel átlagosan 1,55 mm mértékű rostirányú méretnövekedést lehetett elérni. A röviden fixált mintáknál már láthatóan kisebb erőre volt szükség, átlagosan 1,06 kN-ra az átlagosan 3,66 mm-es rostirányú méretnövekedés eléréséhez, azonban a leglátványosabb eredményeket a hosszan fixált mintáknál kaptuk. Mindössze 0,85 kN átlagerő elég volt ahhoz, hogy az anya rostirányú méretét átlagosan 8,79 mm-rel növeljük. Ez azt jelenti, hogy a fixálási idővel fordítottan változik a húzóerő nagysága egy adott mértékű megnyúláshoz. A hosszan fixált minták esetében, melyek 3 órán át voltak folyamatos nyomás alatt, sokkal kisebb erő igénybevételével véghez tudjuk vinni az egysegnyi mértékű rostirányú méretnövelést. Ez a megállapítás az összes többi mintacsoportra is igaz volt a mérések során.



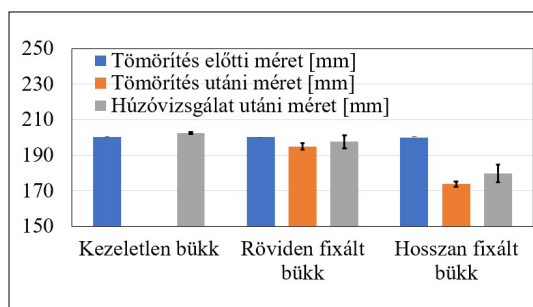
11. ábra. Nyomófeszültségek a tömörítést és a tömörítés utáni fixálást követően



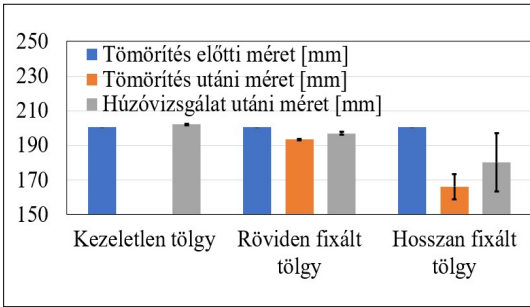
12. ábra. Bükk faanyag húzóvizsgálatának összefüggései



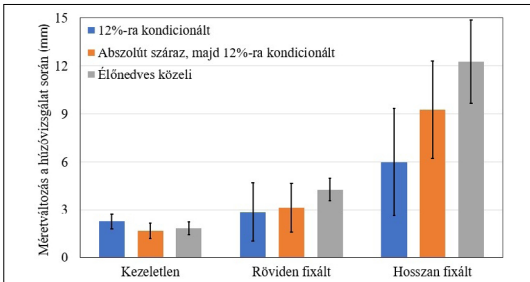
13. ábra. Tölgy faanyag húzóvizsgálatának összefüggései



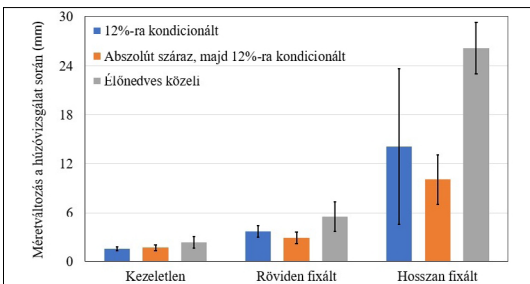
14. ábra. Bükk minták átlagos mérete a rostokkal párhuzamos irányban a vizsgálat különböző fázisaiban



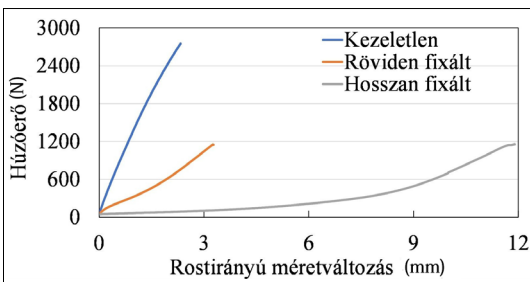
15. ábra. Tölgy minták átlagos mérete a rostokkal párhuzamos irányban a vizsgálat különböző fázisaiban



16. ábra. Bükk mintacsoportoknak a húzóvizsgálat során mért rostirányú méretváltozás-átlagai különböző nedvességtartalmak mellett



17. ábra. Tölgy mintacsoportoknak a húzóvizsgálat során mért rostirányú méretváltozás-átlagai különböző nedvességtartalmak mellett



18. ábra. Bükk élőnedves állapothoz közeli csoportok egy-egy tipikus mintájának erő-elmozdulás grafikonja

3.3. Méretek változása a fixálási idő függvényében

Mindkét vizsgált fafajnál eltérnek a minták hosszmeretei a kezelés következtében (kezeletlen, röviden fixált és hosszan fixált csoportok). Tökéletesen kimutatható, hogy a rostirányú méretváltozási képesség tekintetében a hosszú fixálás bizonyult a leghatásosabb eljárásnak, hiszen a tömörítés utáni méretéhez képest ennél a csoportnál lehetett elérni a legnagyobb rostirányú méretváltozást, ahogyan a 14. és a 15. ábrákon látható. Ez összhangban van Báder és Németh [19] megállapításával, miszerint a 20%-ban tömörített minták lehajlása 4 pontos hajlítóvizsgálat során 3-4-szeres a kezeletlenekéhez képest, míg a hosszú ideig fixáltak legalább hatszoros lehajlást képesek elviselni.

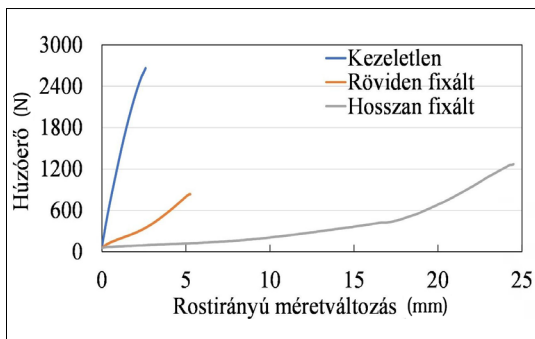
3.4. A nedvességtartalom befolyása a húzóvizsgálati minták rostirányú méretváltozására

A 16. és 17. ábrák diagramjain összegezve vannak fafajra lebontva a rostirányú méretváltozások átlagai mind a három mintacsoport esetében. Tökéletesen látható, hogy majdnem minden esetben azoknak a mintáknak volt a legnagyobb a rostirányú húzóvizsgálat közben létrejövő alakváltozása, amelyek abba a mintacsoportba tartoztak, amelyeket az eredeti, nagy nedvességüket megtartva vizsgáltunk. Ez a megállapítás alátámasztja korábbi kutatások eredményeit is [9], miszerint a faanyag hajlíthatósága/nyújthatósága akkor a legnagyobb, amikor rosttelítettséghez közeli állapotban van. A többi mintacsoport sokkal kevesebb vizet tartalmazott, mint ez a mintacsoport, így ez állt a legközelebb a rosttelítettség határhoz.

3.5. Élőnedves állapothoz közeli mintacsoportok viszonya

Érdekes módon nagyon sok azonosságot lehet megfigyelni a 18. és a 19. ábrákon található görbékben a két faj tekintetében.

A 18–19. ábrákon a kezeletlen minták rostirányú méretváltozás-húzóerő grafikonjai élesen felfelé ívelnek, vagyis nagy erő kifejtése szükséges kis megnyúlás eléréséhez. A röviden fixáltak esetében a kezeletlenekével azonos rostirányú méretváltozáshoz lényegesen kisebb erőre volt szükség, azonban itt már a szakadási nyúlás is jelentősebb, mint az előző esetben. Végül a hosszan fixált minták grafikonja mutatja a leglátványosabb eltérést, hiszen itt már a nagymértékű sejtszerkezeti változásoknak köszönhetően [19] a kezeletlen mintákhoz viszonyított töredék maximális erővel



19. ábra. Tölgy élőnedves állapothoz közeli csoportok egy-egy tipikus mintájának erő-elmozdulás grafikonja

tudjuk elérni a szakadás pillanatában bekövetkező legnagyobb rostirányú méretváltozást.

4. Következtetések

A tanulmány célja a rostirányban tömörített faanyagok nyúlási tartalék elméletének bizonyítása, illetve a modifikációs folyamattal járó különböző anyagszerkezeti változások mechanikai hatásainak vizsgálata és összehasonlítása a kezeletlen faanyag mechanikai tulajdonságaival.

A fentiekben szemléltetett adatok és diagramok bizonyítékként szolgálnak a nyúlási tartalék létezésére, melynek ismerete fontos tényezőként szolgálhat a rostirányban tömörített faanyag további tudományos vizsgálatainál, valamint a gyakorlati, pl. bútortipari alkalmazásánál, ahol íves elemeket készíthetnek belőle. A nyúlási tartalék figyelembevételével pontosabban kalkulálható a tömörített anyag méreteinek, illetve hajlékonyságának változása, mely megkönnyíti majd a jövőben az íves elemek gyártását.

A vizsgálatok során nemcsak a nyúlási tartalék létezésére leltünk bizonyítékot, hanem egyúttal korábbi vizsgálatok megállapítására is egyértelmű magyarázatot találtunk: a rostirányban tömörített faanyag hajlíthatóságának jelentős növekedése a rostirányú méretnövekedési képesség javulásának eredménye. Ezenfelül bizonyítottuk, hogy a minták rostirányú méretnövekedési képessége lényegesen nagyobb a rosttelítettségi állapothoz közeli nedvességtartalomnál, mint 12% nedvességtartalmú állapotban.

A későbbiekben bővíteni fogjuk a vizsgált mintacsoportok számát, melyeket más előkezeléseknek fogunk alávetni a húzóvizsgálatok előtt, ilyen például a 20–25%-os nedvességtartalmú, valamint a műszárított minták vizsgálata.

Köszönetnyilvánítás

Jelen cikk a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-1-I-SOE-76 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Báder M.: *A természetes faanyag tulajdonságainak módosítása termo-hidromechanikus és vegyi eljárásokkal*. Doktori értekezés, Soproni Egyetem, Sopron, 2021. 1–138.
- [2] Hanemann M.: *Processes for making wood everlastingly flexible*. US Patent Office No. 1 457 974, USA, 1920.
- [3] Vorreiter L.: *Holztechnologisches Handbuch*. Band I. Georg Fromme & Co., Wien, 1949. 1–548.
- [4] Kollmann F. F. P.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe II*. Springer-Verlag, München, 1955. 1–1183.
- [5] Hanemann M.: *Holzaufbereitungsverfahren*. Deutsches Reich Reichspatentamt No. 318197, Németország, 1917.
- [6] Hanemann M.: *Holzaufbereitungsverfahren – Zusatz zum Patent 318197*. Deutsches Reich Reichspatentamt No. 321629, Németország, 1917.
- [7] Holzveredelung Ltd.: *Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von weichbiegsamen Holz*. Deutsches Reich Reichspatentamt, No. 458923, Németország, 1926.
- [8] Báder M., Németh R.: *Faanyagok rostirányú tömörítésének kísérleti körülményei-1. rész*. Gradus, 4/2. (2017) 403–411.
- [9] Báder M., Németh R.: *Moisture-dependent mechanical properties of longitudinally compressed wood*. European Journal of Wood and Wood Products, 77. (2019) 1009–1019. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01448-1>
- [10] Báder M., Németh R., Ábrahám J.: *Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése-2. rész: Történelem és szabadalmak. A tömörítési folyamat tulajdonságai és a tömörítést követő eljárások*. Faipar, 63/1. (2015) 10–20.
- [11] Szabó I.: *Fahajlítás*. In: *Faipari kézikönyv II*. (szerk.: Molnárné P. P.). Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, 2002. 60–61.
- [12] Molnár S.: *Faanyagismeret*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 1999. 1–469.
- [13] Buchter J., Adelhoej J., Ljoerring J., Hansen O.: *Introducing Compressed Wood*. Danish Technological Institute, Department of Wood and Furniture, Taastrup, 1993. 1–32.
- [14] Kuzsella L.: *Rostirányú tömörítés hatása a bükk faanyag szerkezetére és mechanikai tulajdonságaira*. Doktori értekezés, Miskolci Egyetem, Miskolc, 2011. 1–151.

- [15] Winkler A.: *Farostlemezek*. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 1999. 1–172.
- [16] Stevens W. C., Turner N.: *Solid and laminated wood bending*. His Majesty's Stationery Office, London, 1948. 1–100.
- [17] Peres M. L., Gatto D. A., Delucis R. A., Beltrame R.: *Vergamento madeira sólida: quallade de processo e matéria-prima*. Nativa-Agricultural and Environmental Research, 1. (2013) 56–61.
- [18] ISO 13061-6: Physical and mechanical properties of wood - Test methods for small clear wood specimens - Part 6: Determination of ultimate tensile stress parallel to grain. 2014.
- [19] Báder M., Németh R.: *The effect of the relaxation time on the mechanical properties of longitudinally compressed wood*. Wood Research, 63/3. (2018) 383–398.