

TDK dolgozat

Sajdik Tamás

Soproni Egyetem

Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Faipari és Műszaki Intézet

**Rostirányban tömörített faanyag nyúlási tartalékának
vizsgálata különböző nedvességtartalmak és tejsavas
kezelés esetén**

Konzulens:

Dr. Báder Mátyás
laboráns

A TDK dolgozat készítője:

Sajdik Tamás
faipari mérnök hallgató



SOPRONI EGYETEM
Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar
H-9401 Sopron, Bajcsy-Zs. u. 4. Pf.: 132.
Tel: +36 (99) 518-101 Fax: +36 (99) 518-259

NYILATKOZAT

Alulírott **Sajdik Tamás** (neptun kód:CPKSOL) jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a **Rostirányban tömörített faanyag nyúlási tartalékának vizsgálata különböző nedvességtartalmak és tejsavas kezelés esetén** című (alábbi megfelelő rész aláhúzendó)

TDK dolgozat

MDK dolgozat

(a továbbiakban: dolgozat) **önálló munkám**, a dolgozat készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. tv. szabályait, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.

Hivatkozások és idézések szabályai:

Az 1999. évi LXXVI. tv. a szerzői jogról 34. § (1) és 36. § (1) első két mondata.

Kijelentem továbbá, hogy a dolgozat készítése során az önálló munka kitétel tekintetében a konzulens, ill. a feladatot kiadó oktatót **nem tévesztettem meg**.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy a dolgozatot **nem magam készítettem**, vagy a dolgozattal kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Soproni Egyetem **megtagadja a dolgozat befogadását és ellenem fegyelmi eljárást indíthat**.

A dolgozat befogadásának megtagadása és a fegyelmi eljárás indítása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Dátum: Sopron, 2023.11.20.

hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

TDK dolgozat	1
nyilatkozat	3
Tartalomjegyzék.....	4
1 Bevezetés	6
2 Irodalmi áttekintés	6
2.1 Tömöríthető fafajok, minőségi feltételek	6
2.2 A tömörítési folyamat.....	8
2.3 Történelmi áttekintés.....	9
2.4 A modifikáció során alkalmazott berendezések	11
3 Anyagok és módszerek.....	14
3.1 Tömörítési folyamat	14
3.2 Vizsgált mintacsoportok.....	17
3.3 Húzóvizsgálati minták kialakítása.....	18
3.4 Húzóvizsgálatok.....	19
3.5 Tejsavas telítés bükk minták	20
4 Húzóvizsgálatok eredményeinek feldolgozása és kiértékelése	22
4.1 Szakítószilárdság.....	22
4.2 Megnyúlás aránya	25
4.3 Szakadási képek kialakulására húzóigénybevétel esetén.....	25
5 Eredmények	26
5.1 Nedvességtartalom befolyása a szakadási képek kialakulására	26

5.2	Nedvességtartalom befolyása a megnyúlás arányának függvényében.....	28
5.3	Bükk és tölgy fafajú minták megnyúlásának összehasonlítása.....	32
5.4	Szakítószilárdsági értékek a bükk és a tölgy minták esetében.....	35
6	Összefoglalás.....	36
7	Köszönetnyilvánítás	37
8	Irodalom jegyzék.....	37

1 Bevezetés

A faanyag egy rendkívül jó modifikációs lehetőségekkel rendelkező, természetes nyersanyag. Modifikációs sokszínűségét a sejtszerkezeti felépítésének köszönheti. A thermo-hidromechanikai faanyag-modifikációk körébe tartozó rostirányú tömörítés hatására szinte minden tulajdonsága megváltozik a faanyagoknak. Ezek közül a legfontosabb, hogy lényegesen lecsökken a hajlítórugalmissági modulusza és csökken a hajlítószilárdsága is, melyek hatására kisebb erővel és jóval nagyobb mértékben hajlíthatóvá, csavarhatóvá válik a kezelt faanyag (Vorreiter 1949; Kollmann 1951; Buchter és mts. 1993). Ahhoz, hogy megérthessük a faanyagban végbemenő változásokat, elengedhetetlen ismerni a magát a faanyag szerkezeti felépítését.

A faanyag három fő alkotóelemből épül fel, cellulózból, hemicellulózból és ligninből. Ezek az anyagok fontos szerepet töltenek be a sejtfa felépítésében. A cellulóz vékony szálú láncot alkot. A láncok csoportba rendeződve alkotják a mikrofibrillákat, melyeket a lignin és a hemicellulóz molekulák kötnek egymáshoz, ezzel megalkotva azt a mátrixanyagot, mely a sejtfa falakat alkotja. A sejtek közül a rostok hosszúkas alakúak és a végükön kihegyesedők, ezeket szokás szilárdító sejteknek nevezni, a fában tengelyirányban helyezkednek el. A faanyagnak két fő részét lehet elkülöníteni. A geszt a faanyag belső részén található, élettanilag inaktív szövet, melyet körülvesz a szíjács. Utóbbi a fa biológiai életében az aktív szerepet tölti be. A fának ezen részében az edények, edénykék, parenchimák felelnek a víz- és tápanyagellátásért. A sejtszerkezeti felépítés és az életfunkciókat biztosító tápanyagszállító tulajdonságok a tűlevelűek és a lombosok csoportjain belül megegyeznek a fafajok többségénél, azonban a mechanikai tulajdonságok fafajonként jelentősen eltérhetnek egymástól.

2 Irodalmi áttekintés

2.1 Tömöríthető fafajok, minőségi feltételek

Előzetes tapasztalatok alapján a számos fafaj alkalmas tömörítésre: fekete dió (*Juglans nigra*), kőris (*Fraxinus excelsior*), bükk (*Fagus sylvatica*), hegyi szil (*Ulmus glabra*), tölgy (*Quercus petraea*), fekete cseresznye (*Prunus serotina*) (Buchter és mts. 1993; Kovács és mts. 2006; Compwood 2008). Azonban vannak olyan fafajok is, melyek esetében a szakirodalmak ellentétes állításokat fogalmaznak meg, ilyen például a nyírfa és az akác (Kuzsella és mts. 2011; Buchter és mts. 1993). A fentiekben felsorolt hazánkban és a környező országokban is megtalálható fafajokon kívül a mediterrán

éghajlat fajainak széles köre, valamint egyes trópusi fafajok is tökéletesen alkalmasak a rostirányú tömörítésre. Összességében kijelenthető, hogy a közepes- és magas sűrűségű lombos fafajok jelentős többsége megfelelően modifikálható a tömörítési technológiával (Buchter és mts. 1993; Kovács és mts. 2006; Compwood 2008; Kollmann 1955). A tűlevelűek és az alacsony sűrűségű lombos fafajok tömörítés közben egy ponton nagy mértékben tömörödnek, tönkremennek. Ennek az az oka, hogy a szilárdító sejteik nem képesek megfelelően továbbadni a tömörítő erőt (Vorreiter 1949; Kuzsella 2011).

A tömörítési eljárás hátránya az időigénye mellett az alapanyaggal szemben támasztott magas minőségi elvárás. Csakis olyan faanyag alkalmas tömörítésre, amely keskeny évgyűrűkkel rendelkezik és göcsmentes (Kovács és mts. 2006; Báder és Németh 2017a). Göcsösség tekintetében csak tűgöcsök fordulhatnak elő, mert a nagyobbak feszültséggyűjtő pontokká válnak és tömörítésnél, vagy a későbbi alkalmazásnál tönkremennek. Ügyelni kell a ferdeszálúság elkerülésére (max 7°). Különösen nagy veszélyt jelent ez a tulajdonság a tömörítőgépre nézve. A feredeszálúság miatt tömörítés közben a minta ék alakban eltörhet, a két szemben álló ellentétes irányú ék pedig a nyomás hatására szétfeszítheti a tömörítőkamrát (Kovács és mts. 2006; Báder 2015a). A minőségi feltételeket nem befolyásolja az, hogy milyen módszerrel/vágásképpel van feldarabolva a rönk, amiből a mintatesteket alakítjuk ki. A minták kialakításánál fontos figyelembe venni az alaki tényezőt is, ugyanis gőzölés és főzés hatására az anyag keresztmetszeti változásokon mehet keresztül. Ez a nedvességtartalom változásának köszönhető.

A faanyagban egyaránt megtalálható a szabad víz és a kötött víz. A kötött víz a sejt falon található, míg a szabadvizet a sejtek belsejében, a sejtüregekben lehet megfigyelni. Amikor a sejtüregekben nem található meg a szabad víz, de a kötött víz a lehető legnagyobb mennyiségben fordul elő, rosttelítettségi pontnak nevezzük (fiber saturation point: *FSP*). Mivel a rosttelítettségi pont fafajonként változó, például bükk esetében 35,6%-ról, a tölgy esetében pedig 24,5%-ról lehet beszélni (Molnár és mts. 2000). A gyakorlatban átlagosan 30%-os értéket alkalmaznak nagy mennyiségű faanyag esetében. Szintén fontos kitétel, hogy a faanyag nedvességtartalma akkor a legalkalmasabb a tömörítéshez, mikor élőnedves állapotban van, vagy pedig nem alacsonyabb 16%-nál (Buchter és mts. 1993). Más szakértők szerint pedig akkor megfelelő, ha a nedvességtartalom 2-8%-kal alacsonyabban van, mint a rosttelítettségi határ (Kuzsella 2011). Összességében tehát meg lehet állapítani, hogy a nedvességtartalmat tekintve

szakirodalmak állításai eltérnek egymástól, de ami közös bennük, hogy mind a rosttelítettségi állapothoz közeli nedvességtartalmat javasolja.

2.2 A tömörítési folyamat

Tömörítést két fő anatómiai irányban is lehet végezni, de iránytól függően a faanyag más mechanikai tulajdonságai változnak. Rostirányú tömörítés esetében a faanyag hajlíthatósága javul, rostokra merőleges tömörítés esetében pedig a faanyag sűrűsége, keménysége, stb. növelhető. A rostirányú tömörítés technológiája három fő lépésből áll. Az első lépés a rostlágyítási folyamat, mely lehetővé teszi a roncsolásmentes tömörítést. A második a rostirányú tömörítés, megfelelő anyaghőmérséklet és nedvességtartalom mellett. Végül a harmadik, egyben zárófolyamat, az utókezelés, ami az anyag megfelelő állapotban történő hűtését, szárítását jelenti.

A faanyag üreges sejtszerkezetének köszönhetően könnyen alakíthatóvá tehető, ha elvégezzük a megfelelő rostlágyítást, melyet gőzöléssel, főzéssel, mikrohullámú- és egyéb eljárásokkal lehet elérni. A rostok szorosan kötődnek egymáshoz, ennek köszönhetően egy olyan merev egységet alkotnak, mely megnehezíti az anyag deformálását. A rostok közötti erős kötéléket a hemicellulóz-cellulóz és a lignin-cellulóz kötések biztosítják (Báder és Németh 2018b). A lágyítás során a magas hőmérséklet és nedvességtartalom hatására ezek a kötések meggyengülnek, esetleg bomlásnak indulnak, ez lehetővé teszi, hogy a rostok egymástól függetlenül elmozdulhassanak amíg a lágyított állapot fennáll, lehetővé téve a roncsolásmentes tömörítést. A folyamat nagyjából 80 °C felett válik intenzívvé. A faanyag nyomással szembeni ellenállóképessége is csökken, amely szintén kedvező körülmény rostirányú tömörítésnél. Szakirodalmak szerint a faanyag gőzölési ideje nagyjából 2 perc/mm, ezt az irányadó értéket érdemes figyelembe venni és felszorozni a gőzölni kívánt faanyag legkisebb keresztmetszeti méretével, ezáltal kiszámolható, hogy mekkora az az időintervallum, ameddig az anyagot előkezelní szükséges (Stevens és Turner 1948).

A tömörítés akkor hajtható végre, ha néhány egyszerű feltételnek megfelel az eljárás. Az előzőleg megfelelő módon rostlágyított faanyagot a tömörítés idejére lágy állapotban kell tartani, vagyis jelentős nedvességvesztés nélkül forró állapotban. A tömörítés során a faanyagot meg kell támasztani, nehogy kihajolás miatti törés következzen be. Egyúttal az is fontos, hogy a minta nem tágulhasson oldalirányban jelentős mértékben és ne tapadhasson le a fellépő erők következtében a tömörítő kamra oldalfalán. Ha mindezen alapfeltételek biztosítottak, akkor a tömörítés sikeresen kivitelezhető.

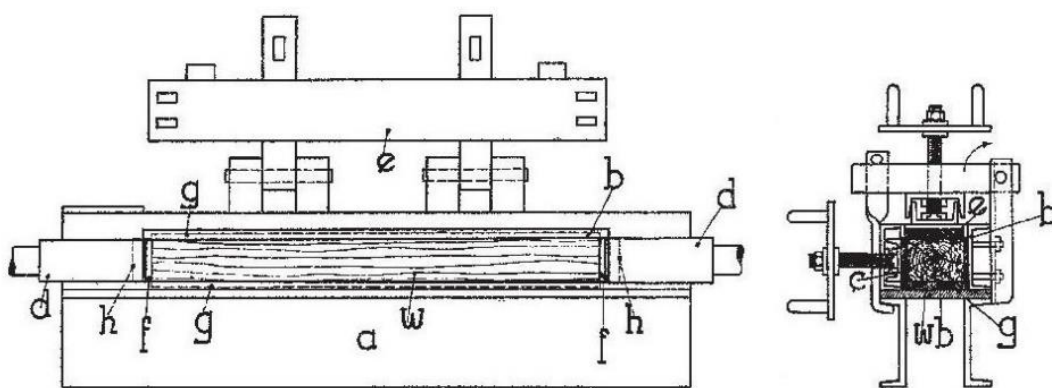
Felhasználáskor a tömörített faanyagot egy sablonra rá kell hajtani, majd rögzíteni, hogy a szárítás során is tökéletesen felvegye a kívánt formát. A tömörített faanyag hajlíthatósága akkor a leghatékonyabb, mikor a rosttelítettségi állapothoz áll a legközelebb (Báder és Németh 2019a). Szárításhoz több módszer és technológia is ismert, általánosan a gyors ütemű, meleglevegős szárítást alkalmazzák. A kezeletlen faanyagokhoz képest az előkezeléseknek köszönhetően intenzívebb szárítási módszer (hőmérséklet, páratartalom, légáramlási sebesség) alkalmazható (Báder 2021).

2.3 Történelmi áttekintés

A faanyag hajlíthatóságára már az ókorban rájöttek. Az ókori Egyiptomban már előszeretettel alkalmaztak hajlított faanyagot különböző célokra. Az akkori technológia kimerült egyetlen előkezelési folyamatban, a gőzölésben. Az emberek rájöttek, hogy a gőzölt faanyag mechanikailag annyira meggyengül, hogy alkalmas a hajlítása. A hajlított anyagot rögzítették, hogy tartsa a formáját, majd kiszárították, így az alakváltozás véglegesedett. Napjainkban is alkalmazzák ugyanezt a módszert, valamint továbbfejlesztett változatait. Ezen felül rendelkezésre áll a tömörítésen alapuló technológia, melynek előnye a faanyag tárolhatóságában rejlik. A hagyományos gőzöléses technológia hátránya, hogy gőzölés után az anyagot egyből hajítani kell, különben újból visszaállnak eredeti tulajdonságai és a folyamatot előről kell kezdeni, ha még lehetséges. A tömörített faanyag végleges sejtszerkezeti változásokon megy keresztül, így tömörítés után tárolhatóvá válik, hiszen a benne rejlő nyúlási tartalék csak igénybevétel hatására aktiválódik. A tárolhatóság ipari környezetben fontos tényező, a tömeggyártást nagyban elősegíti az előzetes készlet felhalmozás.

Az első szabadalom Hanemann-tól ered, mely a Német Birodalomban jelent meg 1917-ben (Hanemann 1917a). A szabadalom szerint a rostirányban tömörített faanyagot sokkal kisebb erőigénybevétellel és nagyobb mértékben lehet hajlítani a kezeletlen faanyaghoz képest, valamint a szintén nagy előrelépésnek számított gőzöléses technológiához képest, hogy a faanyagot hajlításhoz nem kellett előmelegíteni. A szabadalom egy olyan folyamatot írt le, miszerint a faanyagot először gőzölni kell, utána pedig közvetlen a gőzölés után tömöríteni. Készüléket, technológiai leírást nem tartalmaz a szabadalom. Szintén a szabadalom része volt, hogy a tömörített faanyag tárolása lehetséges lehűtve és szárítva, és a további feldolgozás során is hajlítható marad. Az szabadalom (Hanemann 1917a) a tömörített faanyag előállításához szükséges általános feltételeket teremtette meg, azonban ez még nem volt alkalmas a tömeggyártáshoz. Ezen probléma

kiküszöböléséhez Hanemann tovább fejlesztette a technológiát és még ugyanezen évben publikálta tömeggyártáshoz is alkalmas elveket (Hanemann 1917b). Az továbbfejlesztett szabadalom lényege a gyors átállásban rejlett. Tömörítés után az anyagot állandó nyomás alatt kellett tartani/fixálni, hogy a sejtszerkezetben lejátszódó deformációs folyamatok véglegesedhessenek. A fixálás azt időszakot jelenti, ami alatt az anyagot összenyomott állapotban tartják. Ennek értelmében a tömörített anyagot rögzítve kellett kivenni a gépegységből. Amint felszabadult a tömörítőgép, máris behelyezték a következő anyagot. Hanemann szabadalmait figyelembe véve az első hivatalos ipari méretű tömörítésre alkalmas gépet 1926-ban a szintén német Holzveredelung GmbH alkotta meg. A cég egy olyan gépet hozott létre, melynek a tömörítőkamrája elcsúsztatható oldalfalakkal rendelkezett, amik tömörítés hatására együtt mozogtak az anyaggal rostirányban. A speciális tömörítő egység segítségével az anyagot állandó nyomáson tartva ki lehetett venni a gépből. Ennek köszönhetően a gép azonnal nekiláthatott az új anyag tömörítéséhez, míg az előző anyag deformációs folyamatai véglegessé váltak a szorító eszközben.

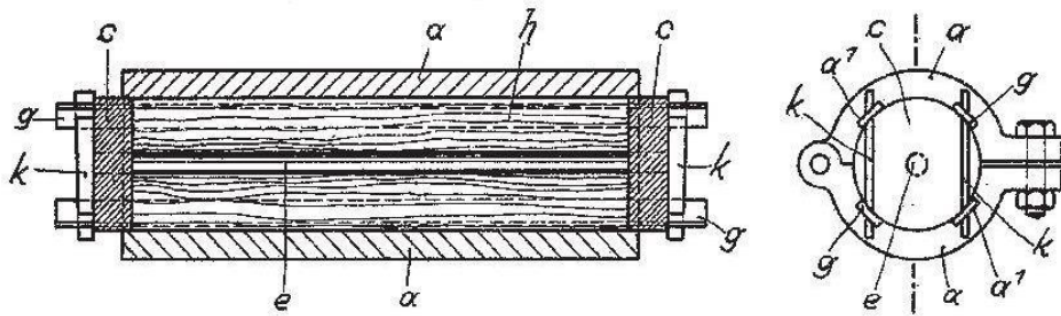


1.

ábra Az első ipari tömörítésre alkalmas gép metszeteit ábrázoló rajza (forrás: Holzveredelung 1926a)

A tömörítőegység belső oldalain a tömörítés hatására hatalmas súrlódás keletkezett, melynek köszönhetően a tömörítőerő is csökkent. A tömörítőerő Kollmann (1955) szerint hiperbólikusan csökken a faanyag közepe felé haladva. Ennek a problémának az orvoslására további fejlesztéseket hajtottak végre, melyek a tömörítőegység kialakítására irányultak (Magyar-Amerikai Faipar Rt 1927) és sikerrel jártak, mert számos cikk készült már az 1930-as években ezzel az eljárással. A kezdeti tömörítési vizsgálatok szögletes keresztmetszetű anyag tömörítését taglalták, azonban csakis jó minőségű faanyag volt alkalmas erre. August Thurn (1932) szabadalma szerint a jó minőségű szögletes

anyaghasználatnak köszönhetően nagy mennyiséget ölt a hulladékanyag. A hengeres tömörítést célravezetőbbnek tartotta, mivel a hengeres kialakítás esetében alacsonyabb minőségű anyagot is eredményesen lehet modifikálni. A felfedezésnek köszönhetően nagyobb anyagmennyiséget lehet megtakarítani és felhasználni. Szintén kifejtette, hogy a hengeres faanyag belének eltávolításával gyorsabban véghezvihető a szárítási folyamat, hiszen a furaton keresztül levegőt lehet áramoltatni.



2. ábra Hengeres faanyag ipari tömörítésére alkalmas gép metszeteit ábrázoló rajza
(forrás: Thurn 1932)

A napjainkban használt tömörítőgépek a Magyar-Amerikai Faipar Rt (1927) szabadalmát alapul véve készülnek. Az iparágban aktív gépgyártói szerepet a dán Compwood Ltd tölt be.

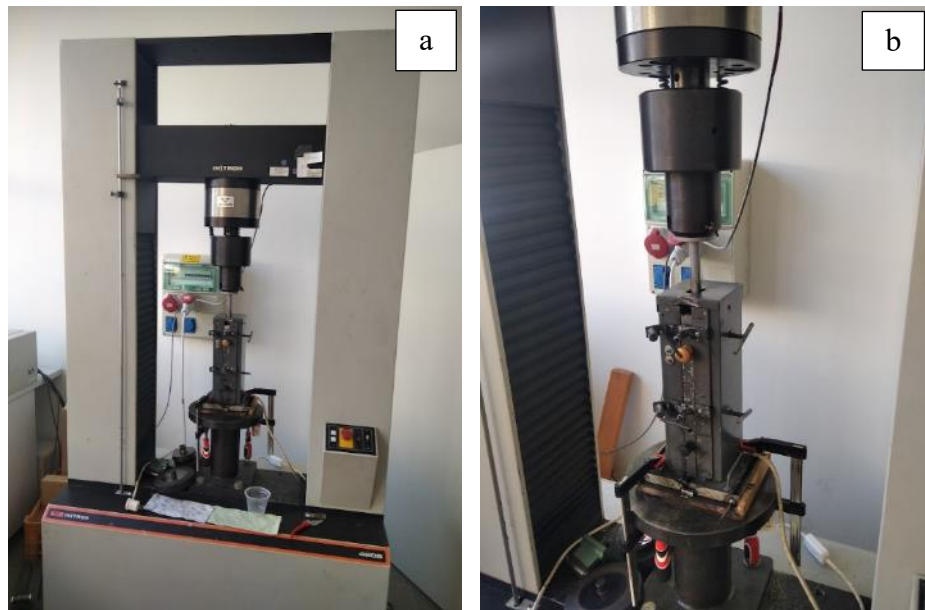


3. ábra Napjainkban használt modern tömörítőgép (forrás: <http://compwood.com/>)

2.4 A modifikáció során alkalmazott berendezések

A Soproni Egyetemen 2015 óta lehetséges a rostirányú tömörítés. A tömörítő berendezés egy anyagvizsgáló gépből (Instron 4208, Instron Corporation, USA) áll, ami a nyomóerőt és a kutatási adatokat biztosítja, valamint és egy rákapcsolható tömörítő egységből. Így

folyamatos adatgyűjtéssel és grafikonok generálásával monitorozhatjuk a tömörítés során létrejövő feszültség- és alakváltozásokat a faanyagban (1. ábra).



4. ábra Instron anyagvizsgáló berendezés a Soproni Egyetemen (a), valamint az anyagvizsgáló berendezésbe rögzített tömörítő egység (b)

A tömörítő egység felépítésében megfigyelhető a 20. században megjelent szabadalmak és leírások alkalmazása (Magyar-Amerikai Faipar Rt 1927; Thomassen és mts. 1990; Kollmann 1955). A berendezés két fő egységgel rendelkezik, egy merevfalú tömörítőkamrával és a köré épített fűtőrendszerrel (2. ábra). A tömörítőkamra oldalfala masszív szerkezetet alkot, hogy kibírja a tömörítés során fellépő több tíz kilonewton mértékű terhelést. A falakon lehelyezett csúszkák együtt mozognak a tömöríteni kívánt anyaggal és egymástól való távolságuk állítható. A fűtőegység biztosítja a tömörítés idejéig a megfelelő hőmérsékletet, melynek köszönhetően a faanyag lágyított állapotban tartható. A félzárt rendszernek köszönhetően alig lép fel nedvességtartalom-csökkenés. A tömörítőegység $20 \times 20 \times 200$, valamint $20 \times 30 \times 200$ mm keresztmetszetű minták tömörítésére alkalmas (Báder és Németh 2017a, Báder és Németh 2019a). A tömörítés mértéke a vizsgálni kíván fafajtól és a hajlíthatóság megkívánt mértékétől függ. Bükk esetében a maximális tömöríthetőség az eredeti hosszhoz képest 30% körül definiált, míg a tölgy esetében ez az arány 21-23% között mozog (Báder 2021). Az egyetemi berendezés maximum 33% tömörítési arányra képes. Ha az adott fafajra jellemző tömöríthetőségi maximumnál nagyobb mértékben tömörítünk, vagy nem megfelelő a rostlágyítás, a sejtszerkezet egy, vagy több szakaszon összeroppan és a maga minta használhatatlanná

válí. A fixálási idő (faanyag adott méreten történő összenyomva tartása) az anyagban végbemenő feszültségváltozások és méretváltozások véglegesítéseként, erősítéseként szolgál. A faanyag minden esetben visszarugózik valamelyest a tömörítést követően. Rövid fixálásnál minden esetben nagyobb mértékű a visszarugózás, hosszú fixálásnál viszont a végleges hossz méret akár a tömörítés mértékének közelében is lehet. Minél hosszabb a fixálási idő, annál hatékonyabb modifikációs eredményt lehet elérni a tömörítéssel.



5. ábra A Soproni Egyetemen alkalmazott tömörítő egység belseje

Korábbi kutatások során a rostirányban tömörített faanyag vizsgálatainál hipotéziseket állítottak fel a nyúlási tartalék létezéséről (Hanemann M. 1920.; Vorreiter L. 1949). A faanyag rosszul viseli a nyújtást, kis alakváltozást képes elviselni, emiatt hajlítása során jellemzően a külső, húzott övben megy tönkre (Gaff és mts. 2015). A feltételezés szerint tömörítés során az anyagban nyúlási tartalék keletkezik, mely akkor aktiválódik, mikor az anyagot hajlítani, vagy nyújtani próbáljuk. A tartaléknak köszönhetően e modifikált faanyag sokkal jobban ellenáll az igénybevételeknek, mint a kezeletlen. Jelenleg is használt technológiáról beszélünk, melyet a bútoriparban és belsőépítészetben alkalmaznak. Az építészetben csakis dizájn szerepe tölthet be, modifikált faanyagként tartószerkezetit nem.

3 Anyagok és módszerek

3.1 Tömörítési folyamat

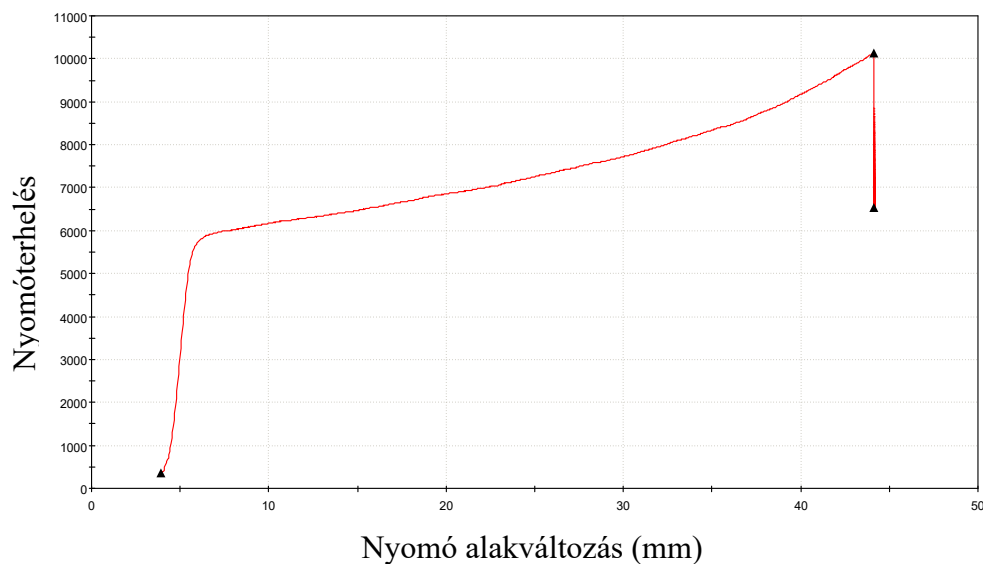
A kutatás során szórtlikacsú fafajként a bükköt (*Fagus sylvatica*) választottuk, míg gyűrűslikacsúként a kocsánytalan tölgyre (*Quercus petraea*) esett a választás. A 20×30×200 mm méretű mintákat (Sugárirány×Húrirány×Rostirány; $S \times H \times R$; 3. ábra) fagyasztva tároltuk felhasználásig. Sorszámozást követően telített gőzben kezeltük, majd a plasztifikált mintákat belehelyeztük a tömörítőegységbe és megkezdtuk a tömörítést. Az iparban jellemző a 20%-os tömörítési arány alkalmazása, így a két fafaj esetében mi is ezt az arányt használtuk. Relatív tömörítési sebességként 25%/min értéket alkalmaztunk. A kísérletek esetében megkülönböztettünk kétfajta fixálási időintervallumot. A tömörített-röviden fixált mintákat 60 másodpercig tartottuk állandó méreten a tömörítés után (a továbbiakban: tömörített minták), míg a tömörített-hosszan fixált mintákat 3 órán keresztül (a továbbiakban: fixált minták). Utóbbi esetben a tömörítő gép fűtését kikapcsoltuk a fixálás kezdetén. Mintacsoportonként 5 mintát készítettünk, a későbbi vizsgálatok igényeit figyelembe véve.



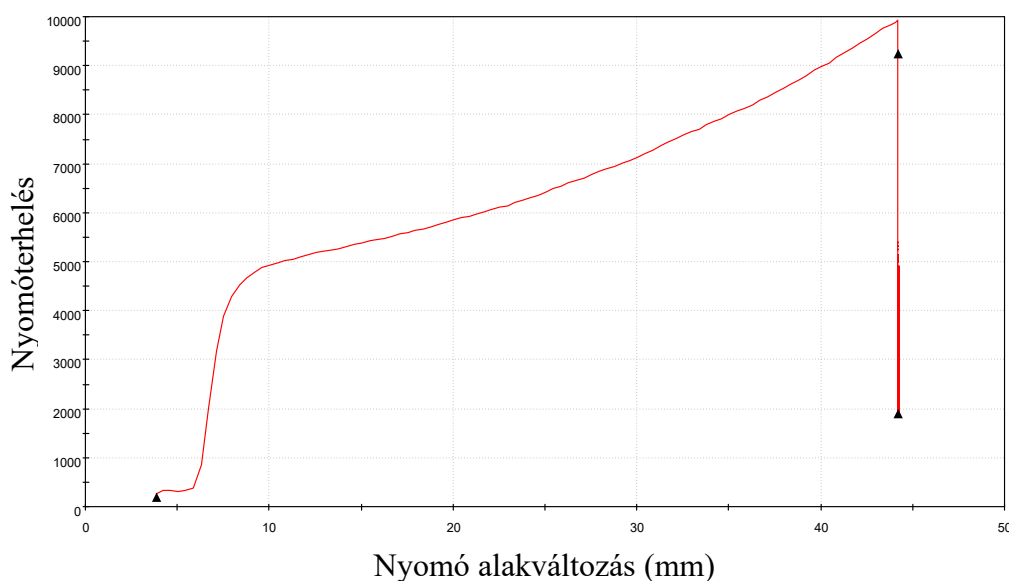
6. ábra Tömöríteni kívánt 20×30×200 mm méretű fagyasztott bükk mintatest

Az anyagvizsgáló gép tömörítés közben mért adatait a gépgyártó által javasolt program segítségével kísértük figyelemmel (Bluehill 2, Instron Corporation, USA). Az Instron 4208 anyagvizsgálógép (Instron Corporation, USA) a húzóvizsgálatok során mérte az anyag hosszcsökkenését (mm), mely esetében először beállítottuk nullpontnak a tömöríteni kívánt minta eredeti magasságát, valamint a tömörítéshez kifejtett erő

nagyságát (N). A két mértékegység időegység alatti metszéspontjait koordináta rendszerben ábrázolta, majd a létrehozott metszéspontokat összekötve diagramot hozott létre. A minták esetében a diagramon a tömörítési folyamat alatt egy erőteljesen felfelé ívelő erőnövekedést figyeltünk meg, amely egészen addig növekedett, míg a tömörítési folyamat be nem fejeződött, vagyis a gép elérte az eredeti minta hosszúságához képest a 20%-os tömörítési arányt. A grafikon maximuma az az érték volt, amelyet a gép a tömörítési folyamat utolsó pillanatában mért. A tömörítési folyamat befejeztével az anyagvizsgáló gép megkezdte a 60 másodperces, illetve a 3 órás fixálási időt, mintacsoporttól függően. A fixálási idő alatt megfigyelhető, hogy az erő elkezd csökkenni. A jelenség azzal magyarázható, hogy az adott időegység alatti nyomva tartásnak köszönhetően az anyag ellenállása is csökken, kiegyenlítődik a tömörítőgép által generált nyomóerővel. A csökkenés az idő múlásával egyre jobban lassul, ezért a teljes kiegyenlítődéshez rengeteg időre van szükség, azonban a mi kísérleteink esetében a 3 órás fixálási idő a legtöbb, aminek az esetében a kifejtett tömörítési erő átlagosan 75%-ot csökken. A 60 másodperces rövid fixálás alatt a csökkenés átlagosan 39% volt. A vizsgálat végén a gépből adatként kinyertük a modifikációs folyamatról készült grafikonokat, továbbá nyers adatokat.



7. ábra. 2T6-os tölgy mintatest tömörítése 60 másodperces fixálási idővel



8. ábra 2T12-es tölgy mintatest tömörítése 3 órás fixálási idővel

A 7. és 8. ábrákon látható grafikonok egy rövid fixálással járó tömörítést és egy hosszú fixálással járó tömörítést mutatnak be. A modifikációs folyamatot leíró grafikonok felépítése hasonló, ezeket három féle egységre lehet felbontani. A tömörítési folyamat kezdetén megfigyelhetünk egy rövid időegység alatt végbemenő hirtelen és jelentős erőnövekedést. Ez a növekedés mutatja be a grafikonokon azt az állapot változást, amikor a tömöríteni kívánt mintatest felveszi az anyagvizsgáló gép által közvetített nyomóerőt. Ennek az állapotnak a grafikonon látható maximuma jelképezi azt az erőt, amit alapterhelésnek nevezhetünk; egy határállapot, amit a mintatest még képes elviselni roncsolódás nélkül. A második szakasz már a tömörítési folyamatot szemlélteti, ahol a nyomóerő határozottan túllépi a roncsolásmentes határértéket, és az anyag deformációja megkezdődik. Ennek a szakasznak az első fele viszonylag lineáris és lassabban emelkedik a nyomóerő, míg a második felében egy felefelé ívelő görbe alakját veszi fel és fokozatosan egyre meredekebbé válik a tömörítés befejeztéig. A növekvő meredekség jelzi a minta tönkremenetelének közeledtét, ahogy a faanyag a tömöríthetőségi határához közeledik. A harmadik, függőlegesen csökkenő szakasz szemlélteti a fixálási idő alatt bekövetkező változást, ami során a faanyag ellenállóképessége a nyomással szemben folyamatosan csökken. Ennek mértéke, mint ahogyan már említettem, függ a fixálási időtől. Az első percekben kifejezetten gyors ütemű a csökkenés, majd folyamatosan lassul a csökkenés, azaz a meredekség, de több órányi fixálást követően sem szűnik meg.

3.2 Vizsgált mintacsoportok

A tömörítés után az utókezelés következett, amely zárófolyamatként is szolgált. Utókezelés alatt esetünkben a szárítást kell érteni. A tömörített anyag hatékonyan csak addig formálható, míg rendelkezik a kellő nedvességtartalommal. Szárítás után a faanyag már nem lesz hajlítható, vagy csak nagyon kis mértékben (Vorreiter 1949). A tömörített faanyag, melynek nedvességtartalma szárítás után 0-5% közé tehető, ridegebb lesz, mint a kezeletlen faanyag (Vorreiter 1949). A különböző nedvességtartalmi állapotokban eltérő hajlíthatóság vizsgálatára különböző utókezeléseknek vetettük alá a tömörített mintáinkat. A négy mintacsoport bükk és tölgy, valamint kezeletlen, tömörített és fixált minták esetében:

- Normál klímakörülmények között (20 °C hőmérséklet, 65%-os relatív páratartalom) egyensúlyi állapotig, kb. 12% nedvességtartalomra kondicionált mintacsoport
- Konvekciós szárítóval hagyományosan 10% nedvességtartalomra műszárított (max. 58 °C hőmérséklet, 0-30% relatív páratartalom), majd normál klímakörülmények mellett kondicionált mintacsoport
- Abszolút szárazra szárított, majd normál klímakörülmények mellett kondicionált mintacsoport
- Élőnedves állapotban tárolt (fagyasztott) mintacsoport

Kialakításra került egy ötödik mintacsoport is, azonban erről érdemes külön beszélni. Maga a rostirányú tömörítés egy modifikációs eljárást foglal magába, melynek segítségével a faanyag hajlíthatóságát igyekszünk növelni. A rostirányban tömörített faanyag elsősorban dizájn szerepet tölt be a faiparban, ennek okán a kültéri felhasználás is fontos szempont lehet. A szélsőséges kültéri klimatikus hatások során, a faanyag nagymértékű nedvesség felvételen és leadáson megy keresztül évszaktól és időjárástól függően. Ennek hatására a faanyag folyamatosan zsugorodik és dagad, melynek hatására a keresztmetszeti méretek is változnak. Rostirányban tömörített faanyagoknál ugyanez a rostirányra is jelentős mértékben igaz. Ennek az előnytelen tulajdonságnak a kiküszöbölésére ad lehetőséget a tejsavas telítésen alapuló modifikáció, melynek hatására a faanyag nagy mértékű méretstabilitásra tesz szert. Az indok, amiért külön beszélhetünk erről az ötödik csoportról az, hogy míg a többi csoport esetében egy modifikációs eljárást alkalmaztunk, addig ennél a mintacsoportnál egy modifikáció utáni modifikációt végeztünk.

A tejsavval telített mintákat először abszolút szárazra szárítottuk. A hő hatására a polimerizáció részlegesen sikeresen lezajlott a sejtekben. Ezek után klimatizáltuk normál körülmények között (20 °C hőmérséklet, 65%-os relatív páratartalom).

3.3 Húzóvizsgálati minták kialakítása

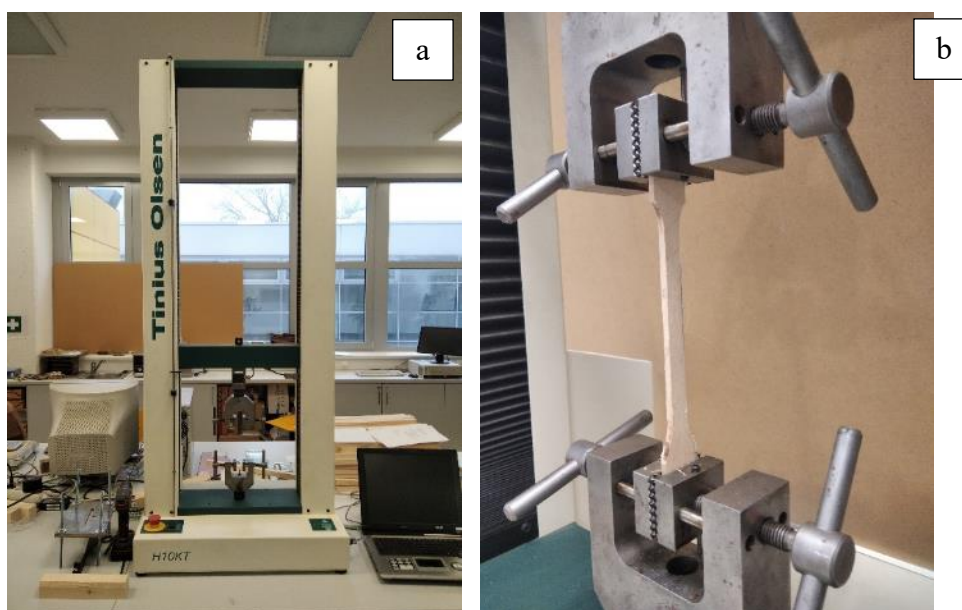
A nyúlási tartalék létezésének bizonyításához húzóvizsgálatokat hajtottunk végre, amihez megfelelő profilú mintákat kellett kialakítani az utókezelések utánra kb. 19×29 mm keresztmetszetű tömörített és kezeletlen mintatestekből. Minden nagy méretű mintatestet felvagtunk 2 mm vastag kis mintatestekké (2×19×160-200 mm ($H \times S \times R$), kezeléstől függően). Ezután kézi marógép segítségével a kialakítottuk a húzóvizsgálatokhoz megfelelő mintatesteket. A minták végpontjain kiszélesített, befogásra alkalmas felületeket hagytunk, melyeknek a mérete minden esetben 2×19×57 mm volt ($H \times S \times R$), a húzófejek befogópofáinak a méreteihez igazodva. A két befogó végpont között alakítottuk ki a tönkremeneteli zónát, mely jelentősen kisebb keresztmetszetű volt, mint a befogási zónák méretei. Szélessége 1,8 mm, vastagsága 9 mm volt. Az előzetesen elvégzett tesztek alapján ez a keresztmetszet volt a legnagyobb, amely a mintáinkból kinyerhető volt és a megfelelő módon bekövetkező szakadást biztosította a tesztek során. Az elvékonyított zóna hosszúsága az anyag teljes hosszától függött, vagyis a kész mintahosszból le kell vonni a két darab 57 mm hússzű befogási zónát. A kezeletlen minták esetében ez a hosszúság átlagosan 86 mm, a röviden fixált minták esetében 76 mm, a hosszán fixált mintáknál pedig 51 mm volt (9. ábra). Mintacsoportonként 20 db húzóvizsgálati minta készült. A fixált minták esetében előfordult, hogy minta a tömörítés-fixálás után jelentősen meggörbült. Ebben az esetben a húzóvizsgálati profilt is a görbülethez igazodva kellett kialakítani, hogy a szálkifutást elkerüljük, ezzel eleget téve a szigorú minőségi feltételeknek.



9. ábra Egyedi húzóvizsgálati mintatestek kialakítása

3.4 Húzóvizsgálatok

Összesen 487 db mintát vetettünk alá húzóvizsgálatoknak. A húzóvizsgálatok elvégzéséhez egy Tinius Olsen (Tinius Olsen Ltd. Redhill, England) gyártmányú, H10KT típusú anyagvizsgáló gépet alkalmaztunk. A szerkezet rendelkezik két mechanikus, kézi beszorítású befogófejjel, ahova a minta két befogásra kialakított végpontját rögzítettük (10. ábra „b” kép).



10. ábra Tinius Olsen H10KT anyagvizsgáló gép húzóvizsgálatokhoz (a) és a húzófejek egy befogott bükk mintával (b)

Az alsó fej fix állású, míg a felső befogófej „z” koordinátán mozgatható volt, valamint önbeálló a szükségtelen feszültségek keletkezésének elkerülésére. A géphez tartozó program (QMat 5.27, Tinius Olsen Ltd, Redhill, England) folyamatosan rögzítette a mért adatokat és grafikon formájában ábrázolta a megnyúlás és a feszültség változásait. A későbbiekben ismertetett mérési eredmények és grafikonok az ebből a gépből kinyert adatok alapján kerültek feldolgozásra.

3.5 Tejsavas telítés bükk minták

A faanyag előnytelen tulajdonsága a gyenge méretstabilitás. A tejsav (lactic acid; LA) egy természetben is előforduló szerves sav, mely nagy mennyiségben áll rendelkezésre. A tejsav polimerizációjaként ismert az úgynevezett politejsav (PLA), melyet a műanyagipar előszeretettel használ környezetbarát mivolta okán. A PLA előnyös tulajdonsága, hogy a faanyagoknak jelentősen javítja a méretstabilitását. Ez pedig nagyon fontos tény azon rostirányban tömörített faanyagból készült termékeknél, melyek magas nedvességtartalomnak lehetnek kitéve, így a kutatás szempontjából indokolt volt ezen modifikáció vizsgálata is a rostirányban tömörített faanyagok felhasználási lehetőségeinek bővítésére.

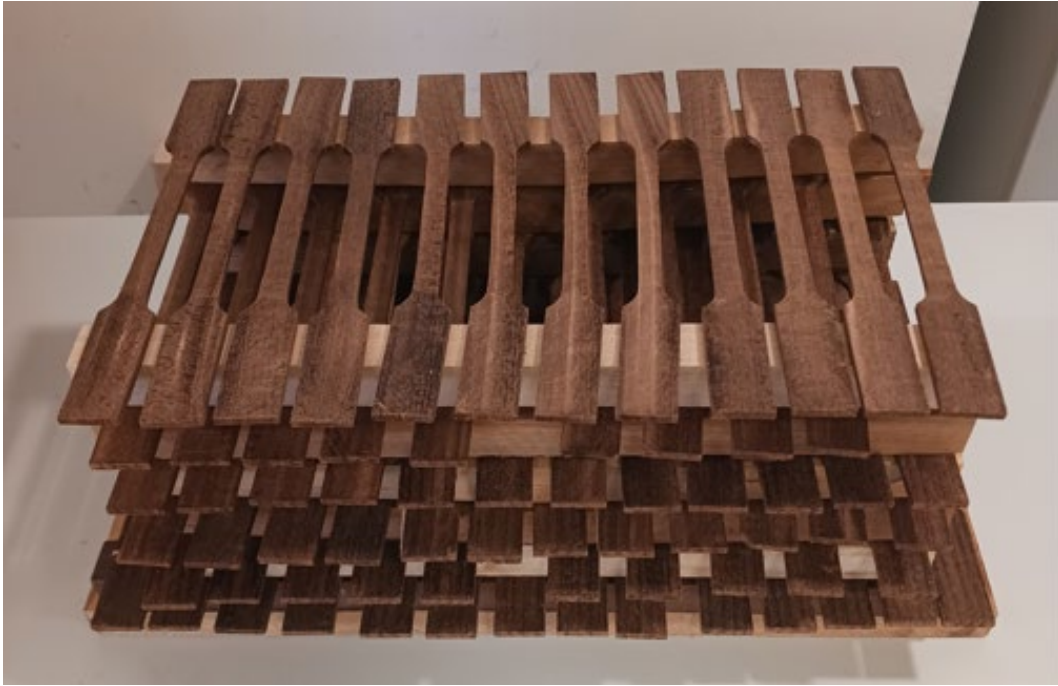
A modifikációhoz L+ tejsav 90%-os vizes oldatát használtuk. A tejsav előkészítése három fő ciklusból tevődik össze. Ahhoz, hogy polimerizálni tudjuk a tejsavat, szükségünk volt egy vákuumkamrára és egy hőmérsékletet mérő szondával ellátott fűthető mágneses keverőre. A mágneses keverőt behelyeztük a vákuumkamrába, majd egy üvegedényt helyeztünk rá, melybe beleöntöttük a megfelelő mennyiségű 90%-os töménységű tejsav-monomer oldatot. Az állandó hőmérsékletet a mágneses keverő fűthető munkafelülete biztosította. A keverőn beállítottuk a megfelelő hőmérsékletet, majd a hőmérő szondát beleállítottuk a L+ tejsavval teli tálba, így a mágneses keverő a folyadék hőmérséklete alapján szabályozta a fűtést.

A fenti elrendezést alkalmazva az első ciklusban az anyagot 75 °C hőmérsékleten és 150 mbar nyomáson kezeltük 75 percen keresztül, 175 fordulat/perc sebességű keverés mellett. A kezelés célja a tejsav monomer víztelenítése volt. A magas hőmérséklet és a vákuum hatására az anyagból elpárologtattuk a vizet, így egy közel 100%-os L+ tejsav monomert kaptunk. A második és a harmadik ciklus alatt a monomert oligomerizáltuk. Az oligomerizálás során a molekulák között részleges kötések alakulnak ki, mely a folyamat végén is meglátszik a nagy viszkozitásban. A második ciklusban a vízmentes

monomert 100 °C hőmérséklet és 175 fordulat/perc keverés mellett 150 mbar nyomáson kezeltük 100 percen keresztül. A harmadik ciklus szintén az oligomerizációhoz járult hozzá. Az oligomerizációt azért érdemes két részre osztani, mivel a folyamat is hatékonyabban zajlik le, ha több lépcsőben melegítjük a folyadékot a harmadik ciklus 130°C-os hőmérsékletére. Itt szintén 175 fordulat/perc keverés mellett 150 mbar nyomáson kezeljük a folyadékot, 160 percen keresztül. Az elkészítési folyamat végén az oligomerizált anyagot kaptuk végeredményül, melynek viszkozitása a mézhez hasonló lett lehűtés után. Ezek után következett a minták telítése az oligomerrel.

A bükk mintákat abszolút szárazra kellett szárítani a telítés előtt. Abszolút szárazra szárítva sokkal több oligomert képes felvenni a telítés során, mivel a faanyagban nem marad vízmolekula, több helyet hagyva a modifikáló anyagnak. A kíméletes szárítás érdekében a szárítási hőmérsékletet egyenletes időközönként emeltük. Miután betettük a szárítóba, a mintákat 48 órán keresztül laborhőmérsékleten szárítottuk (20 °C), az idő lejártá után emeltük a hőmérsékletet 40 °C fokra, majd 12 órán keresztül szárítottuk ezzel a beállítással. A következő emelésnél a hőmérsékletet 50 °C fokra, majd 12 óra elteltével 60 °C fokra módosítottuk. Az utolsó emelést szintén 12 óra elteltével állítottuk be 103 °C fokra, ami már alkalmas a minták abszolút száraz nedvességtartalmának eléréséhez. Ebben az állapotban 24 órán keresztül folytattuk a szárítást.

Az abszolút szárazra szárított bükk mintákat behelyeztük egy tepsibe, majd a tepsit feltöltöttük 90 °C hőmérsékletre előmelegített oligomerizált tejsavval, amíg el nem fedte teljesen a mintákat. Eközben a vákuumkamra belsejében elhelyeztünk egy fűthető tálcát, melynek a hőmérsékletét beállítottuk szintén 90 °C-ra. Mikor elérte a megfelelő hőmérsékletet, beraktuk a tepsit a vákuumkamrába. A nyomást 100 mbar-ra csökkentettük és 60 percen keresztül fenntartottuk a vákuumot annak érdekében, hogy a telítés a leghatékonyabb legyen. A hirtelen ráadott légköri nyomás hatására a 20×30×200 mm méretű minták beszívták az oligomert, amit a mintafelvágás után a teljes keresztmetszetben látható elszíneződés igazol (11. ábra).



11. ábra Polimerizált húzóminták keresztmetszetében látható elszíneződés

A telítés utána mintákat alufóliába csomagoltuk, majd légköri nyomáson 120 °C hőmérsékleten 360 percen keresztül sütöttük. Ez elősegítette a tejsav polimerizálását. Az alufólia megfelelő mennyiségű hőt ad át a bele csomagolt faanyagoknak, egyúttal megakadályozza az oligomer intenzív oxidációját. A következő lépésben a mintákat 48 órán keresztül légköri nyomáson 103 °C hőmérsékleten kezeltük, szintén a polimerizáció elősegítése céljából. A modifikációs eljárás végén a nagy méretű 20×30×200 mm-es mintatestekből kialakítottuk a korábban említett módszer segítségével a húzóvizsgálatokhoz megfelelő profilt.

4 Húzóvizsgálatok eredményeinek feldolgozása és kiértékelése

4.1 Szakítószilárdság

A Tinis H10KT anyagvizsgálógép a húzóvizsgálatok során mérte az anyag megnyúlását (mm) és húzáshoz kifejtett erő nagyságát (N). A két mértékegység időegység alatti metszéspontjait koordináta rendszerben ábrázolta, majd a létrehozott metszéspontokat összekötve grafikont hozott létre. A grafikon tökéletesen ábrázolta a húzó minta tönkremenetelének folyamatát. Továbbá minden húzóvizsgálat előtt lemértük az adott

minta tönkremeneteli zónájának a keresztmetszeti méreteit a pontos számítások érdekében.

A mérési eredmények akkor voltak értékelhetőek, ha a mintatest az általunk alkalmazott ISO 13061-6:2014 szabványban meghatározott időintervallumon belül ment tönkre, azaz elszakadt. Mivel a fixált mintáknak sokkal nagyobb volt a megnyúlási képessége, mint a kezeletlen mintáknak, ezért több idő kellett a szakadásuk bekövetkeztéig. Annak érdekében, hogy a szabványban szereplő tönkremeneteli időintervallumhoz (1-5 perc) igazodni tudjunk, a húzási sebességet mintacsoporttól függően változtattuk. A húzóvizsgálat sebessége a kezeletlen minták esetében 3 mm/perc, a tömörített minták esetében 4 mm/perc, a fixált minták esetében pedig 8 mm/perc volt.

A vizsgálat végén a gépből adatként kinyertük a húzóvizsgálatokról készült grafikonokat, továbbá a grafikonok létrehozásához szükséges több száz értékből álló adatoszlopokat. A gép szintén megadta számunkra minden minta esetében az elért maximális erő kifejtést (N).

Minden mintacsoport esetében mintánként kiszámoltuk a szakítószilárdságot, melyet akkor kaptunk meg, ha elosztottuk a maximális erőt a tönkremeneteli zóna keresztmetszeti méreteivel.

Annak ellenére, hogy a szakítószilárdság csökkenése megfigyelhető volt, még nem lehetett pontos következtetéseket és eredményeket levonni ezen adatokból. A mintacsoportokon belüli minták nedvességtartalma között pár százalékos eltérések előfordultak. Mivel a nedvességtartalom jelentősen befolyásolja az eredményeket, így a minták közötti alacsony százalékos eltérés is pontatlan végeredményeket eredményezett volna. Egymással összevethető eredményeket csak akkor lehet kapni, ha a nedvességtartalom is meg van határozva az egyenletben, ezért minden mintacsoport esetében arra a nedvességtartalomra számoltuk ki a szakítószilárdságot, amelyet a mintacsoportok kialakításakor meghatároztunk:

Mintacsoport	Tölgy	Bükk
Normál klímakörülmények között 12% nedvességtartalomra kondicionált	12%	12%
Konvekciós szárítóval hagyományosan 10% nedvességtartalomra műszárított majd normál klímakörülmények mellett kondicionált	12%	12%
Abszolút szárazra szárított, majd normál klímakörülmények mellett kondicionált	12%	12%
Élőnedves állapotban tárolt (fagyasztott)	40%	50%
Tejsavval kezelt, majd normál klímakörülmények mellett kondicionált	12%	12%

1. táblázat Egységes nedvességtartalmak mintacsoportonként

Az adott nedvességtartalomhoz igazított szakítószilárdságot az MSZ ISO 3345:1991-es szabványban meghatározott képlettel számítottuk ki:

$$\sigma_x = \sigma_w * [1 + \alpha * (W - x)]$$

Az egyenletben az „x” jelképezi azt a százalékos értéket, amelyre kívánjuk egységesíteni a minták szakítószilárdságát. Az „ α ” a nedvességtartalom korrekciós tényezője, melyet a nemzetközi szabványokból veszünk. Valamint korábbi kutatások is megállapították, hogy

az előnedves faanyag esetén a korrekciós tényező 0%, valamint 0-25%-os nedvességtartalom között 3% (Báder és Németh, 2019a)

A fenti számítási módszer által kiszámított értékek átlagai, mediánjai és szórásai szerepelnek az Eredmények című fejezet diagramjain.

4.2 Megnyúlás aránya

A rostirányú tömörítés okozta változások nem csak a szakítószilárdságban mutatkoznak meg, hanem a húzóvizsgálatok közben produkált megnyúlás arányában is.

A megnyúlási arányt százalékos értékben számoltuk ki, majd az ebből kapott átlagokat összevetettük a többi mintacsoport átlagaival is. A maximális megnyúlást a Tinus H10KT anyagvizsgáló gép által mért adatok maximum értékeiből kaptuk meg. Ezt az értéket kellett elosztanunk a húzó minta eredeti hosszával. Kivontuk a húzó minta befogásra kialakított, egyenként 57 mm hossz befogó felületeit, tehát összesen 114 mm-t a teljes hosszából, így megkaptuk a tönkremeneteli zóna hosszát, ahol a megnyúlás végbement. Ahogyan a szakítószilárdság esetében, úgy a megnyúlás arányaiban is látszódtak a különbségek a kezeletlen és a tömörített, fixált minták esetében.

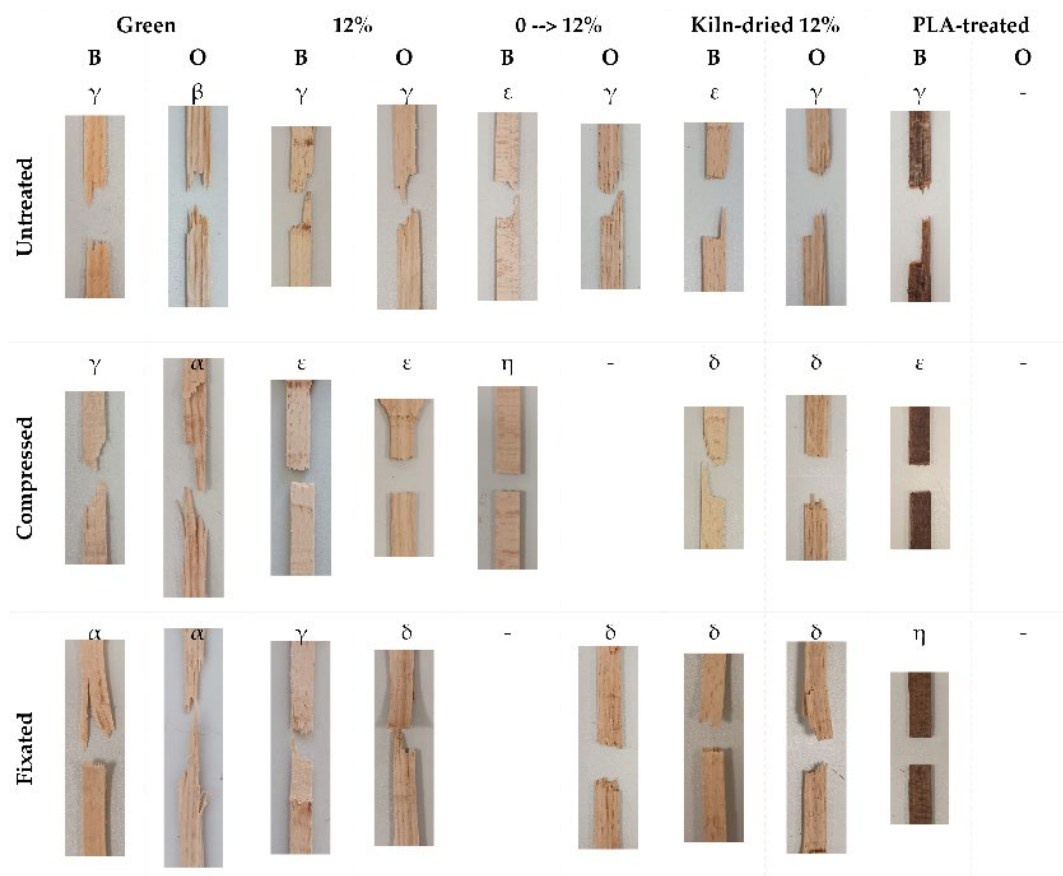
4.3 Szakadási képek kialakulására húzóigénybevétel esetén

A húzóvizsgálat a roncsolásos anyagvizsgálatok csoportjába tartozik. A húzóvizsgálat során nagymértékű húzóerőt fejtünk ki, esetünkben a rostokkal párhuzamos irányban. A szakadáshoz kifejtett erő, a megnyúlás mértéke, valamint a szakadás pillanatában keletkezett töréskép fontos információként szolgálhat az eredmények későbbi kiértékelésénél. A faanyag többféle törésképpel rendelkezhet. A töréskép függ a faanyag ridegségétől, a nedvességtartalomtól, a faanyag sejtszerkezetétől, illetve az apró faanyaghibáktól is (pl. göcsök, repedések, ferdeszálúság). Kánnár (2014) szerint összesen négyféle törésképet lehet megkülönböztetni. A rostokkal párhuzamos húzóvizsgálatok esetében a leggyakoribb a szakadásos törés. Szintén lehet beszélni nyírási törésről, illetve az előző kettő kombinációjáról, a kombinált húzási és nyírási törésről, de ezen felül még előfordulhat a rideg törés is. Jelentős befolyásoló tényezőként ismert a minta pásztaszélessége. Korábbi kutatások megállapították, hogy a késői pászták esetében a kombinált húzási és nyírási törés a legjellemzőbb töréskép, míg a korai pászták jellemzően rideg törést produkálnak a húzóvizsgálatok során (Kánnár 2014).

5 Eredmények

5.1 Nedvességtartalom befolyása a szakadási képek kialakulására

A vizsgált mintacsoportjaink esetében valamennyi szakadási kép-típus megfigyelhető volt, ahogyan azt a 12. ábra szemlélteti.



12. ábra Különböző nedvességtartalmú mintacsoportok szakadási képei. Rövidítések: α - erőteljesen szálkás szakadás; β - mérsékelten szálkás szakadás; γ – Szálkás szakadás; δ – Szálkás-rideg szakadás; ϵ – Rideg szakadás; ζ – Mérsékelten rideg szakadás; η – Erősen rideg szakadás

Fontos megjegyezni, hogy a korábban bemutatott fő tönkremeneteli típusok a kezeletlen faanyag rostokkal párhuzamos húzóvizsgálatára jellemzők. A modifikált, rostirányban tömörített faanyagok szakadási képei ezekkel a típusokkal, vagy a típusok közötti átmeneti típusokkal azonosíthatók. Az 2. táblázat jelmagyarázatként szolgál a csoportok beazonosításához, valamint a 3-4. oszlop fafajonként számszerűen összesíti, hogy a vizsgálat csoportjaink mintáinál milyen gyakorisággal fordultak elő.

Jelölés	Szakadási kép
α	Erőteljesen szálkás szakadás
β	Mérsékelten szálkás szakadás
γ	Szálkás szakadás
δ	Szálkás-rideg szakadás
ε	Rideg szakadás
ζ	Mérsékelten rideg szakadás
η	Erősen rideg szakadás

2. táblázat Jelmagyarázat a különböző szakadási képekhez

Ahogy a szakadási képeken is látszik az élőnedves, vagyis a 40-50%-os nedvességtartalommal rendelkező tölgy és bükk minták esetében főleg a szálkás szakadás és annak különböző változatai voltak jellemzőek a többi mintacsoporttal ellentétben. A magas nedvességtartalom hatására a tönkremenetel nem összpontosul egy adott területre, mint ahogyan a többi mintacsoport esetében látható, hanem ott következik be a szakadás, ahol a sejtszerkezet a leggyengébb. Ebben az esetben az anyaghiba nem befolyásoló tényező, hiszen a szigorú minőségi követelményeknek megfelelően csakis hibamentes anyagot használtunk a vizsgálatok során. A szakadási képek között megfigyelhető, hogy a normál klímakörülmények között 12% nedvességtartalomra kondicionált mintacsoport, az abszolút szárazra szárított, majd normál klímakörülmények mellett kondicionált mintacsoport, valamint a konvekciós szárítóval hagyományosan 10% nedvességtartalomra műszárított majd normál klímakörülmények mellett kondicionált mintacsoport esetében többnyire a rideg

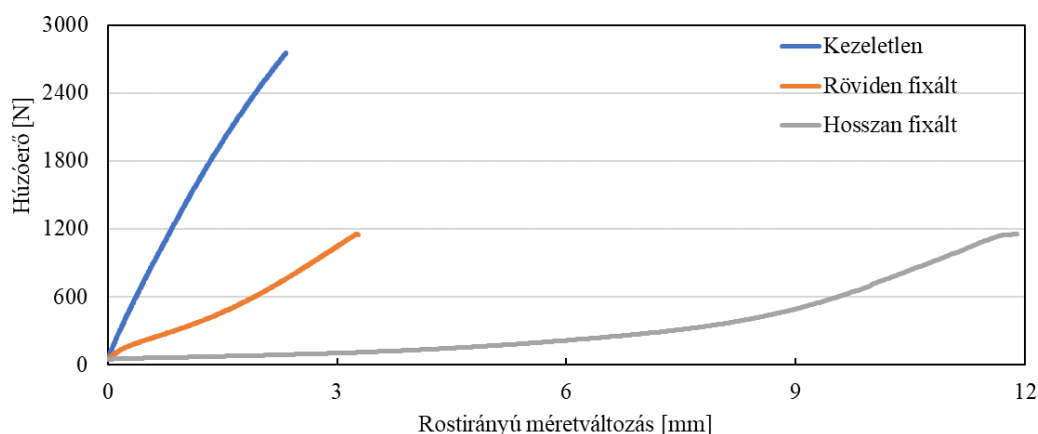
szakadások és annak kombinált változatai figyelhetők meg. Összességében megállapítható, hogy a nedvességtartalom csökkenésével a minták a szakadásos törésről fokozatosan átváltnak rideg törésre, érintve a két törési kép határállapotát. Ha a kezelési folyamatokat, vagyis a fixálási időket vesszük viszonyítási tényezőként a szakadási képek esetében, akkor nem állapítható meg különösen nagy állapotváltozás, mivel a kezeletlen, a röviden fixált és a hosszanfixált minták csoportonként jellemzően egy szakadási képtípust és annak határállapotait produkálták.

A tejsavval kezelt mintacsoport hasonló törésképeket produkált, mint a 12% nedvességtartalomra kondicionált mintacsoport, az abszolút szárazra szárított, majd

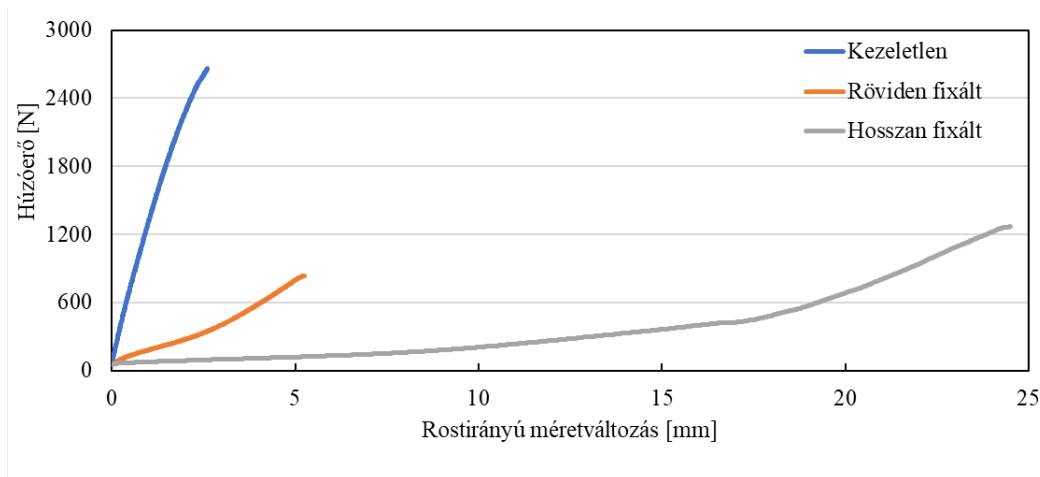
normál klímakörülmények mellett kondicionált mintacsoport, valamint a konvekciós szárítóval hagyományosan 10% nedvességtartalomra műszárított majd normál klímakörülmények mellett kondicionált mintacsoport, ennek ellenére mégsem lehet a másik három csoporthoz társítani, mivel a tejsavas kezelés hatására a magas pH tartalmú polimer szétmarta a minták sejtszerkezetét, ebből adódóan alakultak ki a fent látható szakadási képek. A savas sejtszerkezeti roncsolás a mért adatokban és diagramokban is látszódik, ezeket a későbbiekben foglalkozunk.

5.2 Nedvességtartalom befolyása a megnyúlás arányának függvényében

A húzóvizsgálatok során tökéletesen látszott a grafikonról, hogy mekkora különbségek vannak erő és megnyúlás mértékében a kezeletlen, a röviden fixált és a hosszan fixált mintatestek esetében.



13. ábra Élőnedves közeli nedvességtartalommal rendelkező kezeletlen, röviden fixált és hosszan fixált bükk minták közötti húzóvizsgálati grafikonos különbségek három tipikus mintát alapul véve

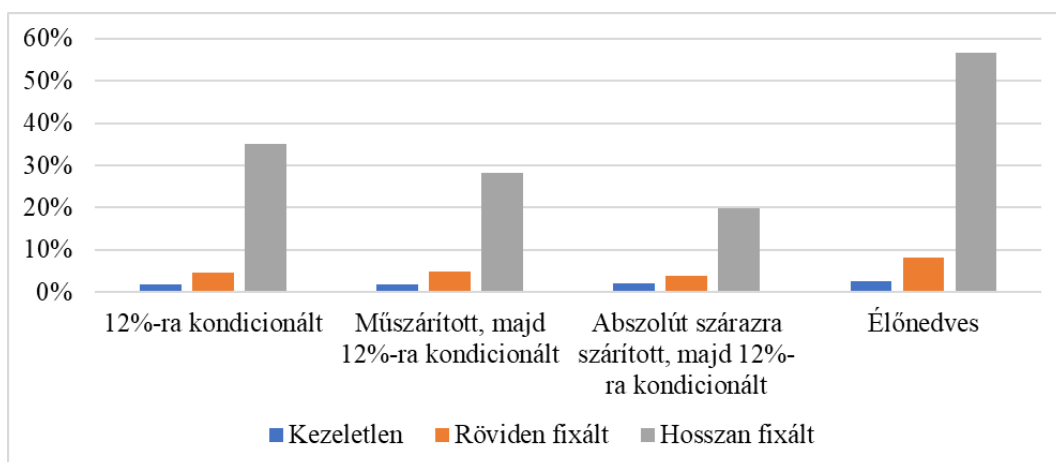


14. ábra Élőnedves közeli nedvességtartalommal rendelkező kezeletlen tölgy és a fixált tölgy minták közötti grafikonos különbségek a húzóvizsgálatok közben három tipikus mintát alapul véve

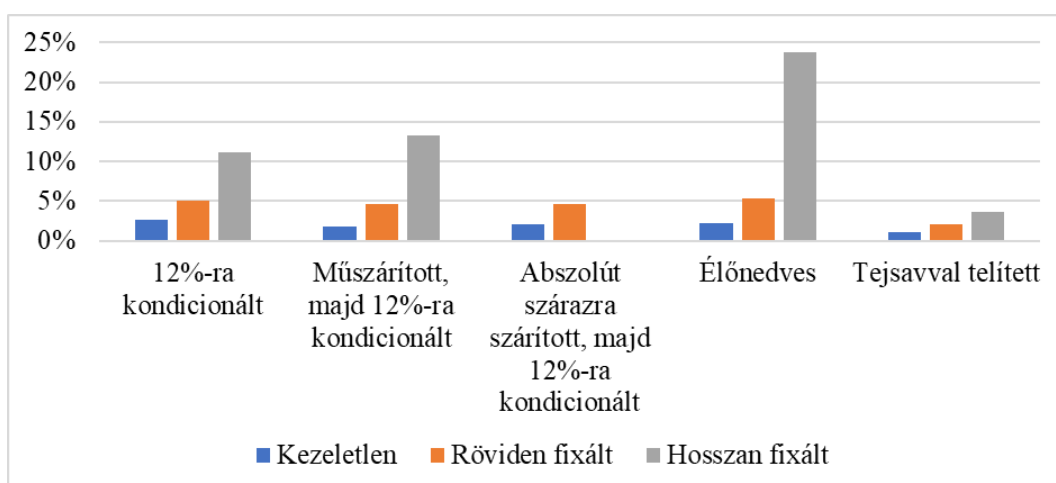
Ahogy a grafikonon is látszik a bükk és tölgy mintáknál is megfigyelhető a húzóerő nagysága és a rostirányú méretváltozás esetében a fordított arányosság. Minél alacsonyabb a húzóvizsgálat során kifejtett erő, annál alacsonyabb a húzószilárdság értéke is, amit az Anyagok és módszerek című fejezetben bemutatott számolási módszer alapján kalkuláltunk. A húzószilárdság csökkenésével a megnyúlás aránya növekszik. A kezeletlen anyagok esetében nagy erő kifejtése mellett csak minimális, $1,7 \pm 0,2\%$ megnyúlást lehetett elérni. A röviden fixált minták esetében már megfigyelhető a modifikációs folyamat okozta változás, ugyanis ebben az esetben már csak harmad annyi erő kifejtésre volt szükség kétszer akkora megnyúlás eléréséhez. A leglátványosabb eredményeket mégis a hosszan fixált minták produkálták, ahol bizonyos erő kifejtése mellett lehetőségünk volt elérni a bükk esetében a kezeletlen mintákhoz képest a négyszeres nagyságú megnyúlást, a tölgy minták esetében pedig szintén a kezeletlen mintákhoz képesti kilencszeres megnyúlást (rendre $23,74\% \pm 2,97$ és $56,74 \pm 4,18\%$). A 13. és a 14. ábrákon látható két grafikon az eredeti magas nedvességtartalommal rendelkező minták nyúlási tulajdonságait szemlélteti. Mint ahogy már említettem a fenti fejezetekben, a grafikonok bizonyítékként szolgálnak korábbi vizsgálatok megállapítására is, miszerint a faanyag annál képlékenyebb a tömörített állapotban, minél nagyobb a nedvességtartalma.

A 12%-ra kondicionált minták esetében szintén szemmel látható megnyúlásokat produkáltak a minták a kezeletlenekhez képest, azonban a nyúlási arány nem közelítette meg a magas nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport értékeit. Az alábbi ábrákon

láthatók mind az öt vizsgált mintacsoport megnyúlásának százalékos értékei a bükk és a tölgy fafajok esetében.



15. ábra Tölgy minták megnyúlásának aránya



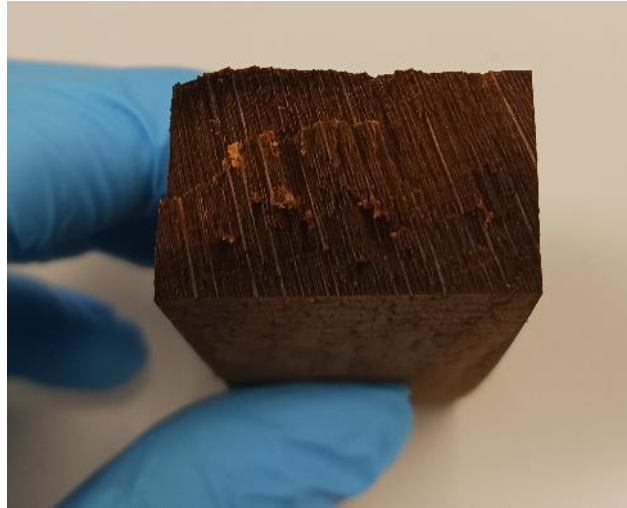
16. ábra Bükk minták megnyúlásának aránya

A tölgy mintacsoportok esetében megfigyelhető, hogy mekkora szerepe van az előkezeléseknek a megnyúlás arányát figyelembe véve. A faanyag sejtszerkezeti ellenállása változik a rostirányú tömörítés során, melyet a húzóvizsgálatok eredményei is kimutatnak. Abban az esetben, ha csak a hosszan fixált mintákat szemléljük megfigyelhető, hogy a nyúlási arány annál a mintacsoportnál a legalacsonyabb, ahol abszolút zárazra szárítottuk a mintákat. Növekvő sorrendben utána következnek a műszárított minták, ahol a nedvességtartalmat 10%-ra csökkentettük konvekciós szárítással, majd ezután következik az a csoport, amit 12%-os nedvességtartalomra állítottunk be klímakamra segítségével állandó 20 °C és 65% relatív páratartalom mellett.

Végül ezt követi az élőnedves közeli állapot, bőven a rosttelítettségi határ feletti nedvességtartalommal. Az imént felsorok tények alapján azt a következtetést lehet levonni, hogy faanyag nedvességtartalmának csökkentése, majd annak mesterséges növelése negatív hatással van a nyújthatóságra. Annak ellenére, hogy az imént említett tények igazak a tölgy mintákra, a bükk minták esetében ugyanez nem figyelhető meg. A két fafaj közötti eltérést maga a faanyagok különböző felépítése okozhatja. A jövőben érdemes precízebben vizsgálni ezt a megfigyelést és utánajárni az okoknak pl. elektronmikroszkóp segítségével.

A tejsavval telített bükk mintacsoport eredményein látszik, hogy minden tekintetben alulmúlta a másik négy mintacsoport eredményeit. Ezen alacsony értékek a tejsav maró hatásának tudhatóak be. Mint ahogyan említettem a magas pH tartalmú telítőanyag olyan mértékben roncsolta a fa sejtszerkezetét, hogy annak ellenállóképessége nagy mértékben csökkent a húzó igénybevételt tekintve.

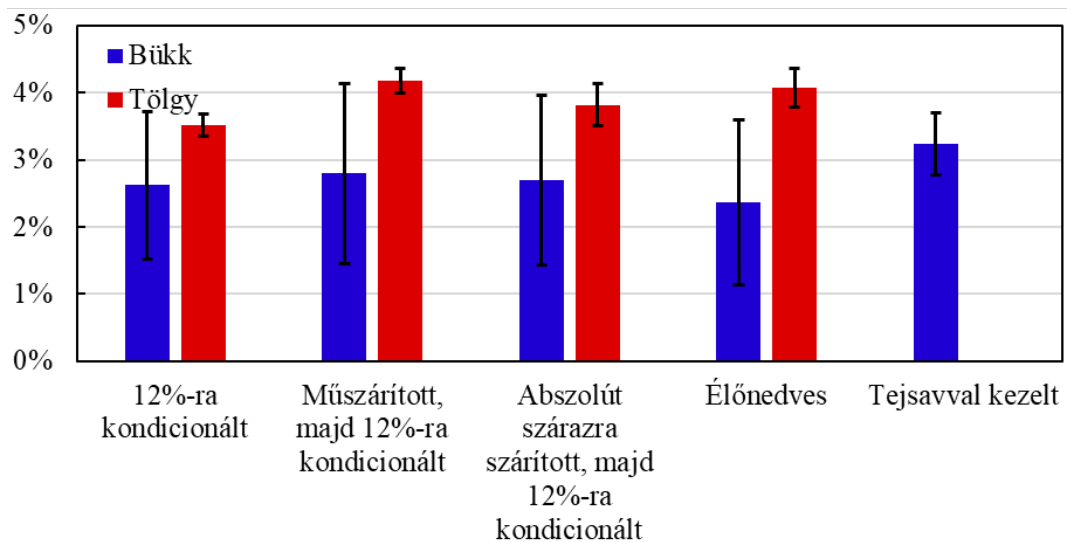
A sejtszerkezeti roncsolásnak már volt egy korábbi előjele is, ami alapján sejteni lehetett a vizsgálat végeredményét. A polimerizációs folyamat végén a 20×30×200 mm-es mintatesteket kivettük a szárítóból. A kicsomagolás során észleltük, hogy az egyik mintatest a szárítás hatására meggörbült, így az anyag kiegyenesítésének érdekében ellenhajlítottunk, ezzel csökkentve a görbeség mértékét. Azonban a mintatest mérsékelt, kézzel kifejtett erő hatására ridegen kettétört. A kezeletlen faanyagok esetében a 20×30×200-as bükk mintatest keresztmetszeti méretei akkora hajlítási ellenállóságot kölcsönöznek a faanyagnak, hogy szabad kézzel, emberi erő igénybevételével nem lehetséges alakváltozást elérni. A telített mintatest tönkretételének egyszerűsége kitűnően szemléltette tejsavas kezelés maró, valamint roncsoló hatását.



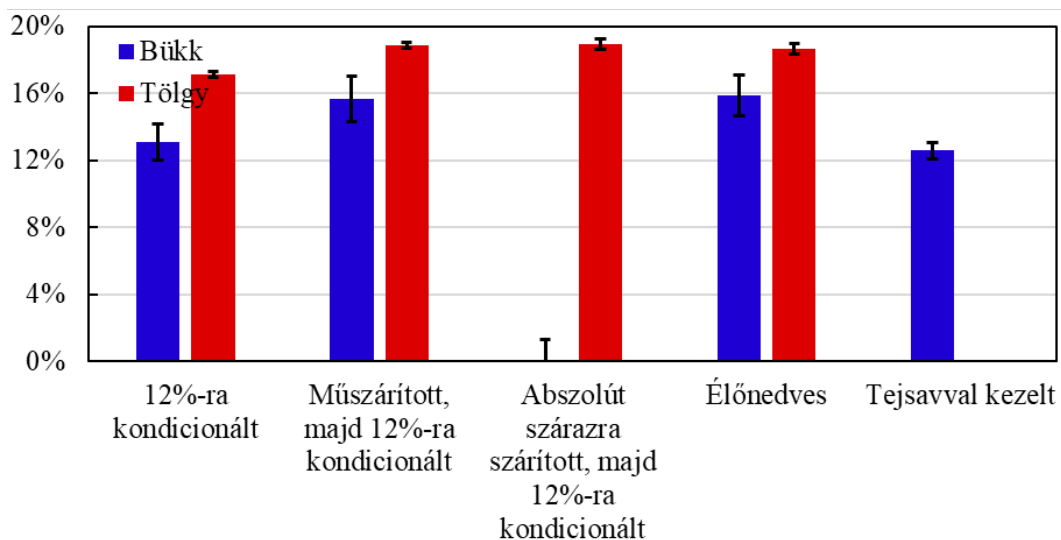
17. ábra Tejsavval telített és polimerizált 20×30×200-as bükk mintatest törésképe hajlítás után

5.3 Bükk és tölgy fafajú minták megnyúlásának összehasonlítása

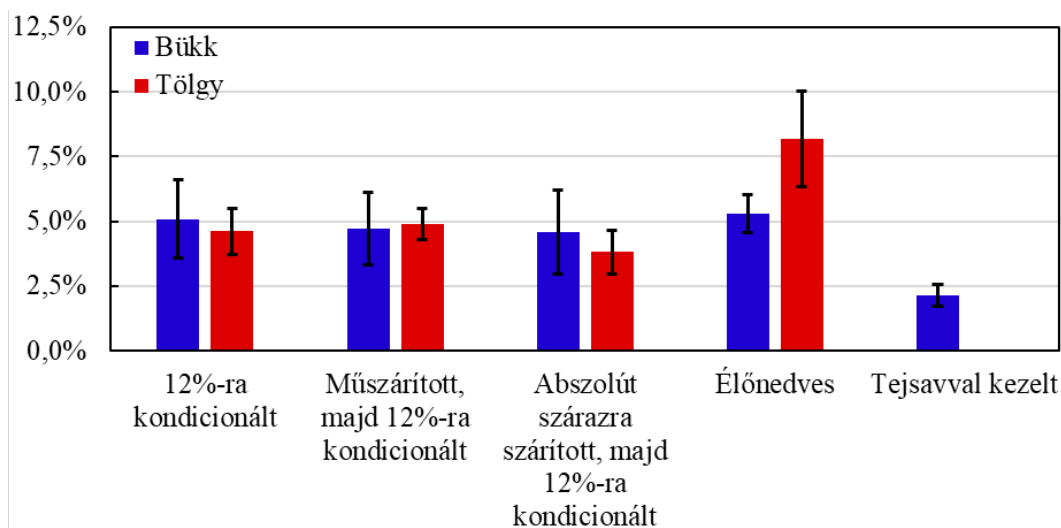
Ahhoz, hogy következtetéseket vonhassunk le a két faanyag húzómintáinak megnyúlása kapcsán, érdemes a nagy mintatestek tömörödési mértékét is figyelembe venni mindkét fixálási idő esetében.



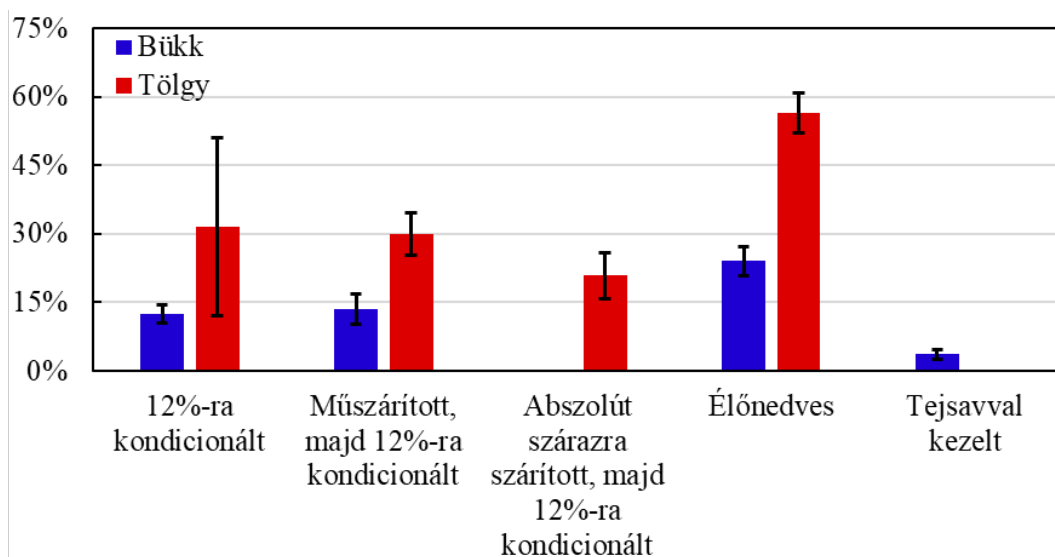
18. ábra Röviden fixált bükk és tölgy minták maradandó rövidülése 20% mértékű rostirányú tömörítést követően



19. ábra Hosszan fixált bükk és tölgy minták maradandó rövidülése 20% mértékű rostirányú tömörítést követően



20. ábra Röviden fixált bükk és tölgy minták megnyúlási aránya a húzóvizsgálatok során



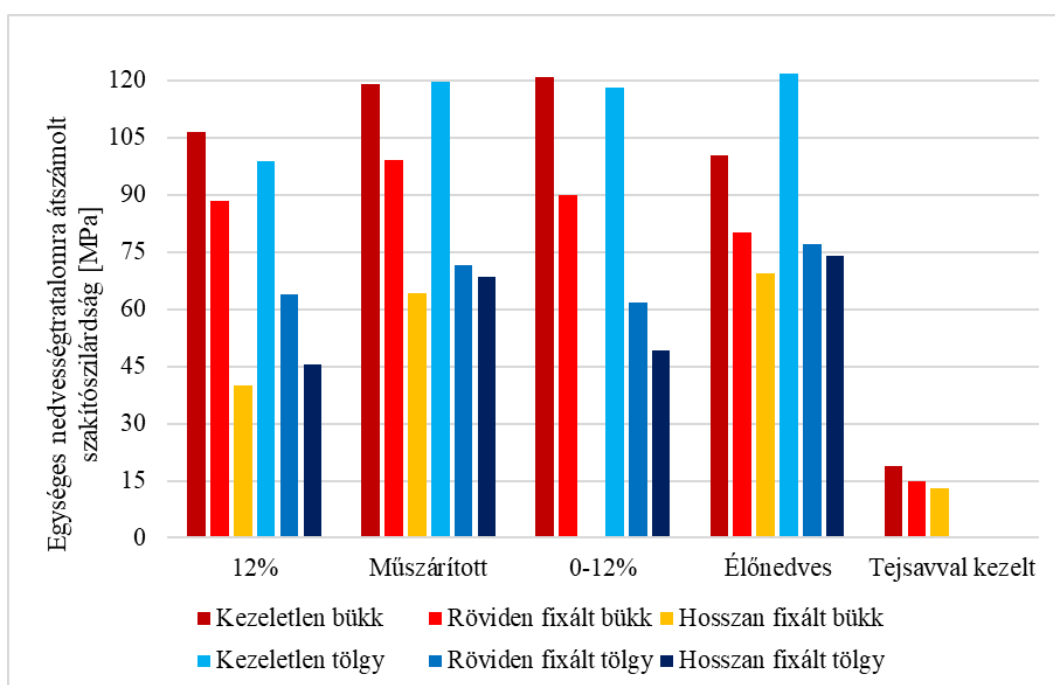
21. ábra Hosszan fixált bükk és tölgy minták megnyúlási aránya a húzóvizsgálatok során

Anyagszerkezetet, azaz fafajokat tekintve a 18.-21. diagramok alapján megállapítható, hogy mind tömörödési arány, mind pedig megnyúlási arány tekintetében a tölgy fafaj hatékonyabbnak bizonyult, mint a bükk. Mindkét fajt 20%-os arányban tömörítettünk a röviden fixált és a hosszán fixált modifikáció során egyaránt. A 20%-os tömörítési arány összesen 40 mm hosszúság csökkenést eredményezett a 200 mm hosszúságú mintatesteknél. Azonban ahogyan az anyagok és módszerek című fejezetben ismertetésre került, a faanyagoknak volt egy jellemző visszarugózásuk a fixálási idő leteltével, melyek alapján a fenti diagramokban található eredmények kirajzolódtak. Tisztán látható, hogy tömörödési arány szempontjából a röviden és hosszán fixált tölgy minták egyaránt nagyobb értékeket produkáltak, mint a bükk minták, ennek értelmében a visszarugózásuk kisebb volt. Ezek alapján megállapítható, hogy tömörítést tekintve a tölgy hatékonyabban modifikálható anyag a rostirányú tömörítés esetében, mert annál hatékonyabb a modifikáció, annál jelentősebbek a tulajdonság-változások, minél alacsonyabb a visszarugózása a faanyagnak. A tölgy mintacsoportok nagy részében megállapítható az a feltevés, miszerint minél kisebb a visszarugózás a fixálási idő után, annál több megnyúlási tartalékot képes eltárolni a faanyag, ezáltal a húzóvizsgálatok során is nagyobb megnyúlást tud produkálni. A feltevés teljes mértékben igaz a hosszán fixált mintákra, azonban a röviden fixált minták esetében megfigyelhető némi ellentmondás, ugyanis annak ellenére, hogy a 12%-ra kondicionált, valamint az abszolút szárazra szárítás után 12%-ra kondicionált mintacsoportok röviden fixált tölgy mintái hiába mutattak nagyobb

tömörödési arányt a bükk mintákéhoz képest, mégis a bükk minták eredményeztek nagyobb megnyúlási arányt a húzóvizsgálatok során. Mivel a fent említett összefüggés a vizsgált mintacsoportok nagy részére igaz így feltételezhető, hogy a fafajok között olyan sejtszerkezeti különbségek vannak, melyek befolyásoló tényezőként hatnak a tömörödéssel.

5.4 Szakítószilárdsági értékek a bükk és a tölgy minták esetében

A szakítószilárdságok egyértelműen csökkenő tendenciát mutattak, mikor a kezeletlen minták eredményeit vetettük össze a tömörített, röviden fixált és hosszan fixált minták eredményeivel. A szakítószilárdság értékét az Anyagok és módszerek című fejezetben ismertetett módszer és szabvány szerint határoztuk meg.



22. ábra Mért szakítószilárdsági értékek a vizsgált bükk és tölgy minták esetében

Ahogy az 22. diagramon is látszik, a kezeletlen, a röviden fixált és a hosszan fixált minták esetében nem lehet egyértelmű következtetést levonni afelől, hogy melyik fafaj produkálta a összességében a nagyobb szakítószilárdsági értékeket, csakis kezelési szempontok alapján lehet megállapításokat tenni. A kezeletlen minták esetében (ha a tejsavval telített bükk mintacsoportot nem vesszük figyelembe, mivel nem végeztünk tejsavas tölgy telítést, amivel össze lehetne hasonlítani) a bükk és tölgy szakítószilárdsági értékei is nagyjából egy szinten mozogtak, a különbségek a modifikációs eljárás után kezdtek megmutatkozni. A röviden fixált mintacsoportok esetében a bükk minták

nagyobb szakítószilárdságot produkáltak, mint a tölgy minták. Erre az észrevételre magyarázatként szolgálhat az a megállapítás, ami a bükk és a tölgy megnyúlási arányainál került ismertetésre, miszerint minél kisebb a visszarugózás a fixálási idő után, annál több megnyúlási tartalékot képes eltárolni a faanyag, ezáltal a húzóvizsgálatok során is nagyobb megnyúlás érhető el. A bükk minták sokkal jobban visszarugóztak tömörítés után, mint a tölgy minták. Ez azt eredményezte, hogy a nyújthatóságuk sem volt olyan jelentős, mint a tölgyeké, ezáltal a szakítószilárdságuk magasabb volt. Érdekes módon azonban a hosszan fixált minták esetében mégis a tölgy fafaj produkálta minden mintacsoport esetében a nagyobb szakítószilárdságot. Logikai szempontból elvárható lenne az, hogy a hosszan fixált minták esetében is a bükk minták eredményezzék a nagyobb szakítószilárdságot, azonban itt ellentétesen alakultak az értékek. Lehetséges, hogy a két fafaj közötti sűrűségi, sejtszerkezeti különbségek okozták a tölgy esetében a nagyobb szakítószilárdságot.

6 Összefoglalás

Összességében megállapítható, az Eredmények című fejezetben összefoglalt megállapítások és következtetések alapján, hogy tömörítés szempontjából a tölgy egy sokkal hatékonyabb anyagnak bizonyul, mint a bükk. Tömörödési és nyúlási aránya, valamint szakítószilárdsági értékei előnyösebbnek bizonyulnak a technológia alkalmazásában. A jövőben érdemes lehet más fafajokat is alkalmazni tömörítés szempontjából. Korábbi kutatások már alkalmaztak más fafajokat is azonban nem, vagy csak érintőlegesen vizsgálták azokat a tulajdonságokat, amik a TDK dolgozat során kifejtésre kerültek.

7 Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a Soproni Egyetemnek, hogy támogatott a tulajdonában lévő gépek és mérőeszközök használatával. Az Intézmény nélkül a kutatás nem jöhetett volna létre.

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-1-I-SOE-151 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.



8 Irodalom jegyzék

Báder M (2015a) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése - 1. rész: Az alapanyagok és előkészítésük, a tömörítés elmélete. Faipar 63:1–9. <https://doi.org/10.14602/WOODSCI.2015.1.8>

Báder M (2021) A természetes faanyag tulajdonságainak módosítása termo-hidromechanikus és vegyi eljárásokkal

Báder M, Németh R (2017a) Faanyagok rostirányú tömörítésének kísérleti körülményei - 1. rész. Gradus 4:403–411

Báder és Németh 2018b- Báder M, Németh R (2018b) Production technology and properties of longitudinally compressed wood. In: Župčić I, Španić N (eds) Proceedings of the 29th International Conference on Wood Science and Technology. University of Zagreb - Faculty of Forestry, Zagreb, Croatia, pp 35–43

Báder és Németh 2019a- Báder M, Németh R (2019a) Moisture-dependent mechanical properties of longitudinally compressed wood. Eur J Wood Prod 77:1009–1019. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01448-1>

Buchter és társai 1993- Buchter J, Adelhøj J, Ljørring J, Hansen O (1993) Introducing Compressed Wood. Danish Technological Institute, Department of Wood and Furniture, Taastrup, Denmark

Compwood Machines Ltd (2008) English manual. Slagelse, Denmark, 33 p

Gaff és társai 2015- Gaff M, Gašparík M, Borůvka V, Haviarová E (2015) Stress simulation in layered wood-based materials under mechanical loading. *Mater & Des* 87:1065–1071. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.128>

Hanemann M (1917a) Holzaufbereitungsverfahren. Deutsches Reich Reichspatentamt No. 318197

Hanemann M (1917b) Holzaufbereitungsverfahren - Zusatz zum Patent 318197. Deutsches Reich Reichspatentamt No. 321629

Hanemann M (1920) Processes for making wood everlastingly flexible. US Patent Office No. 1 457 974

Holzveredelung Ltd (1926a) Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von weichbiegsamen Holz. Deutsches Reich Reichspatentamt, No. 458923

ISO 13061-6:2014- 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.

Kánnár A (2014) A faanyag mikro- és makro- tönkremeneteli folyamatai, Sopron, Hungary, pp 16-17

Kollmann FFP (1936) *Technologie des Holzes*. Springer-Verlag, Berlin, Germany

Kollmann FFP (1951) *Technology of woods and wood materials*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany

Kollmann FFP (1955) *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*, zweiter Band. Springer-Verlag, München, Germany

Kuzsella L (2011) Rostirányú tömörítés hatása a bükk faanyag szerkezetére és mechanikai tulajdonságaira. PhD disszertáció, Miskolci Egyetem

Kuzsella L, Bárczy P, Szabó I (2011) Ősi anyag új feldolgozása, avagy tömörített fából energiatároló rugó. *Bányászati és Kohászati Lapok* 144:40–41

Kovács és társai 2006- Kovács Z, Süveg J, Papp T (2006) *Mechanikai megmunkálás II - A fa hajlítása*. Egyetemi jegyzet, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron, 80 p

Magyar-Amerikai Faipar Rt 1927- Magyar-Amerikai Faipari Rt (1927) Eljárás és berendezés hosszabb fahasábok állandó hajlékonytételére. Magyar Királyi Szabadalmi Bíróság, No. 96736

Molnár és társai 2000- Molnár S, Varga Fné, Fehér S, Németh R (2000) A faanyag műszaki tulajdonságai. In: Molnár S (ed) *Faipari kézikönyv I. Faipari Tudományos Alapítvány*, Sopron, Hungary, pp 59–88

Stevens és Turner 1948- Stevens WC, Turner N (1948) Solid and laminated wood bending. Forest Products Research Laboratory, Department of Scientific and Industrial Research. His Majesty's Stationery Office, London,

Thomassen T, Ljorring J, Hansen O (1990) A method and apparatus for compressing a wood sample. World Intellectual Property Organization, No. WO91/02637

Thurn 1932- Thurn A (1932) Verfahren zur Herstellung dauernd biegsamen Holzes. Deutsches Reich Reichspatentamt, No. 636232

Vorretiter 1949- Vorreiter L (1949) Holztechnologisches Handbuch Band I. Georg Fromme & Co., Wien, Austria