



Nedvességváltozás hatása a rostirányban tömörített tölgy faanyag tulajdonságaira

Témavezetők:

Dr. Báder Mátyás
laboráns

Prof. Dr. Németh Róbert
egyetemi docens

A dolgozat készítője:

Gecseg Péter Pál
faipari mérnöki hallgató



JELENTKEZÉSI LAP

Tudományos és Művészeti Diákköri Konferencia

Soproni Egyetem Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

(Kitöltve, aláírva, szkennelve elküldeni: fmk-tdk@uni-sopron.hu)

Pályázó neve: Gecseg Péter Pál

E-mail cím: gecsegpali@gmail.com

Szak: Faipari mérnök

Képzés típusa (aláhúzendő): BA MA BSc MSc

Aktív félévek száma: 7.

TDK/MDK Szekció (a megfelelő aláhúzendő):

Tudományos Diákköri Konferencia (TDK)

Műszaki szekció

Informatikai szekció (megfelelő létszám esetén indul külön szekció, min. 4 fő)

Művészeti Diákköri Konferencia (MDK)

Dolgozat/alkotás címe:

Nedvességváltozás hatása a rostirányban tömörített tölgy faanyag tulajdonságaira

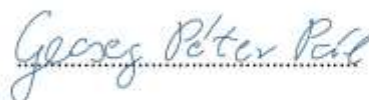
Konzulens(ek) neve, beosztása:

Dr. Báder Mátyás, kutató

Sopron, 2024.11.10



konzulens aláírása



pályázó aláírása



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 **Gecseg Péter Pál** (neptun kód: FSQQPP) jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a **Nedvességváltozás hatása a rostirányban tömörített tölgy faanyag tulajdonságaira** 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 konzulenszt, 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, 2024.11.10 (év, hó, nap)

hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	4
1 Bevezetés	5
2 Anyagok és módszerek.....	11
2.1 A minták kiválasztása	11
2.2 A fahasábok gőzölése.....	12
2.3 Tömörítés folyamata	13
2.4 Faanyagok kondicionálása nedvességtartalom szerint.....	16
2.5 A minták hajlítási vizsgálatra való felkészítése	21
2.6 Az „Instron” anyagvizsgáló gép hajlítási vizsgálatra való felkészítése	22
2.7 A mintacsoportok előkészítése nyomószilárdsági vizsgálatokhoz	24
2.8 Az „Instron” anyagvizsgáló gép nyomószilárdsági vizsgálatra való felkészítése	25
2.9 A mintacsoportok zsugorodás-dagadási vizsgálatának lépései	26
3 Eredmények, következtetések	27
3.1 Rostiránnyal párhuzamos tömörítési kezelésnél mért adatok:	28
3.1.1 Maximális nyomófeszültség:.....	28
3.1.2 Tömörítési utáni hosszúság:.....	29
3.2 Hajlítószilárdsági vizsgálatok:.....	30
3.2.1 Hajlítószilárdság:	30
3.2.2 Hajlítófeszültség 4 mm behajlásnál:	31
3.2.3 Hajlítórugalmassági modulus	32
3.2.4 Valós behajlás a legnagyobb erőnél.....	34
3.3 Nyomószilárdsági vizsgálatok:	36
3.3.1 Nyomószilárdság (abban a pontban ahol az erőnövekedés megáll).....	36
3.3.2 Nyomórugalmassági modulus.....	37
3.4 Zsugorodás-dagadási vizsgálatok:.....	39
3.4.1 I. kör. Dagadás abszolút száraz állapotból vízzel telített állapotba :.....	40
3.4.2 I. Kör Zsugorodás vízzel telített állapotból abszolút száraz állapotra:	41
3.4.3 II. kör. Dagadás abszolút száraz állapotból vízzel telített állapotba.....	42
3.4.4 II. Kör Zsugorodás vízzel telített állapotból abszolút száraz állapotra:	43
3.5 Egyéb vizsgálatok:	44
3.5.1 Alapanyag kiindulási nedvességtartalmának vizsgálata:	44
3.5.2 Egyéb érdekes észrevételek, megfigyelések a vizsgálatok során:.....	44
4 Összefoglalás	45

5 Köszönetnyilvánítás.....	47
6 Irodalomjegyzék.....	48

1 Bevezetés

A faanyagok rostirányú tömörítésének célja azok hajlékonyabbá, alakíthatóvá tétele. A fát inhomogén szálerősítésű kompozitként kezelve, a rostok hossztengelyével párhuzamosan összenyomva a fát tömörítést hajtunk végre. A művelet hatására kisebb erővel, egyúttal nagyobb mértékben válik hajlíthatóvá a minta.

A gőzöléses fahajlítást először Michael Thonet (1. ábra) alkalmazta az 1800-as években sorozatgyártás céljából, ipari körülmények között.

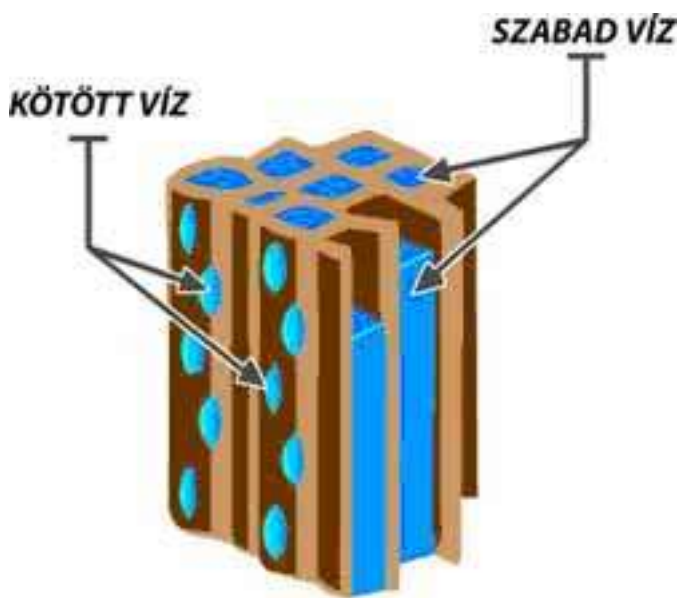


1. ábra Michael Thonet (forrás: Technologystudent.com 2023)

A Thonet-féle eljárásnál gőzből kivéve azonnal kész formára kell hajlítani a faanyagot, mielőtt az lehülne. Ezzel ellentétben a rostirányú tömörítési technológia óriási előnye, hogy az így kezelt faanyag készletezhetővé válik és szobahőmérsékleten is hajlítható állapotban marad. A keménylombos fafajok (pl. tölgy, bükk, kőris, juhar) bizonyultak rostirányban tömöríthetőnek. Magas minőségű alapanyag szükséges, sokszor a jelentéktelennek tűnő fahibák is komoly problémákat okoznak. A megfelelő minőségű tömörített faanyag előállításának meghatározó tényezői a fafaj, alapanyag minősége, nedvességtartalom, hőmérséklet, tömörítési arány, stb. A legtöbb 20% feletti kezdeti nedvességtartalommal rendelkező jó minőségű keménylombos fafaj tömöríthető. Az

általában gőzöléssel plasztifikált faanyag rostirányú tömörítése során a faanyagot meg kell támasztani az oldalirányú kihajlás megakadályozására, és előzetesen rostlágyításon kell átesnie, csökkentve eközben a fellépő súrlódási erőknek az egyenletes tömörítést hosszirányban gátló hatását. A rostirányú préselés hatására a fa hidrotermikus kezeléssel meglágyított és folyamatosan legalább 80 °C hőmérsékleten tartott sejtszerkezetében a nagyrészt lignin és hemicellulóz alkotta középlemez engedi elcsúszni egymáshoz képest a magas cellulóztartalmú, szilárdítást biztosító farostokat és egyéb szöveteket, miközben ezeknek a longitudinális irányultságú hosszúkás szöveti elemeknek a sejtfa meggyűrődik. Az eljárással a fa rugalmassági modulusa lecsökken, így a kezeletlen faanyaghoz képest lényegesen könnyebben hajlíthatóvá válik, egyes módszerek szerint akár szárított és szobahőmérsékletű állapotban is (Báder 2015; Báder et al. 2017).

A faanyagokban víz található, méghozzá kétféle állapotban. Az egyik formája a fatestben jelenlévő szabad víz, ami az élő fában a tápanyagszállító szerepet tölt be. A sejtfa által körülzárt térben, az edények, illetve fenyők esetén az álldények sejtüregeiben helyezkedik el, cseppfolyós vagy gőz halmazállapotban. Mennyisége (megközelítőleg a fa faj nedvességtartalmának 30% fölötti része) nagymértékben befolyásolja a faanyag tömegét, illetve sűrűségét. De nincs hatással a faanyag alak- és méretváltozásaira. A faanyagban lévő víz nagymértékben csökkenti a faanyag hőszigetelő képességét, és növeli elektromos vezetőképességét (a vizes fa jobb hő- és elektromos vezető).



2. ábra: A faanyagban található szabad és kötött víz (forrás: fatáj.hu 2024)

A szárítási folyamatok során a szabad vízmennyiség távozik el először a faanyagból. Eltávolításához viszonylag kis energiamennyiség szükséges.

A másik formája a kötött víz, ami alatt a fatestet alkotó sejtfalváz cellulózrostjai között jelenlévő molekuláris szinten kötött vízmennyiséget értjük. A fatest sejszerkezetének sejtfal-vázát mikroszkopikus cellulóz fonalmolekulák alkotják, melyek elemi rostokká, mikrofibrillákká és fibrillákká szerveződve specifikus orientációval biztosítják a sejtfal különböző rétegeinek megfelelő szilárdságát, és rugalmasságát. Köztük található az elemi szinten jelenlévő, molekuláris szinten kötött, úgynevezett kötött víz (2. ábra). A kötött víz, a szabad víznél jóval erősebben kötődik a fatesthez, ezért eltávolítása nehezebb, nagyobb energia befektetést kíván. A szárítási folyamatok során, távozása csak a szabad víz elpárologtatását követően kezdődik meg. Ezt a határt, amikor a faanyag sejtüregeiben már nem található (úgynevezett szabad) víz, a sejtfalat alkotó fibrillák között azonban még az általa megkötni képes maximális mennyiségű (ún. kötött) víz van jelen, rosttelítettségi határnak nevezzük. Értéke, mint ahogy a kötött víz fában lévő mennyisége is fafaj-függő, de általánosságban a faanyag nedvességtartalmának 30% alatti részét tekintjük kötött víznek, és a 30%-os nedvességtartalmi határt nevezzük rosttelítettségi határnak. Természetesen ezek az értékek csak hozzávetőlegesek, fafajonként jelentős mértékben eltérhet az átlagtól. Ezeknek a vizeknek a mennyisége alapján (jele: u) osztjuk be a faanyagokat kilenc különböző csoportba. Ezek a csoportok:

- abszolút száraz állapot: $u=0\%$
- túlszáritott állapot: $u < 8\%$
- szobaszáraz állapot: $u=8-12\%$
- légszáraz állapot: $u=12-18\%$
- félszáraz állapot: $u= \text{kb. } 25\%$
- rosttelítettségi állapot: $u= \text{kb. } 30\%$
- félnedves állapot: $u= \text{kb. } 50\%$
- élő nedves állapot: $u= \text{kb. } 89\%$
- abszolút nedves állapot: $u= \text{kb. } 138\%$ (Fainfo.hu 2023).

A feladatkiírásban megtalálható nedvességtartalmi állapotok élnedves faanyagot alapul véve sokféleképpen beállíthatók. A faiparban napjainkig legtöbbet használt megoldást a konvekciós szárítók (3. ábra) jelentik, amik a faanyagok mesterséges szárítására

alkalmazott szárítóberendezések. A faanyag felületével érintkező szárítóközeg levegő-vízgőz keverék, mely ventilátorokkal működtetve folyamatosan áramlik. A légáramlás eltávolítja a nedves levegőt, és helyébe alacsonyabb nedvességtartalmút szállít. A légcseré egy csappantyún keresztül zajlik. A magas hőmérsékletű szárítóközeg a faanyaggal érintkezve felmelegíti annak felületeit, így a száradás mindig a külső rétegeken kezdődik el. Az anyag közepe lényegesen később melegszik fel, így nedvessége a szárítás teljes időtartama alatt magasabb lesz, mint a felületeké. A szárítás időtartama a fafajtól, anyagvastagságtól és a kezdeti nedvességtartalomtól függően akár 3 hónap is lehet. A szárítás folyamata három szakaszra bontható:

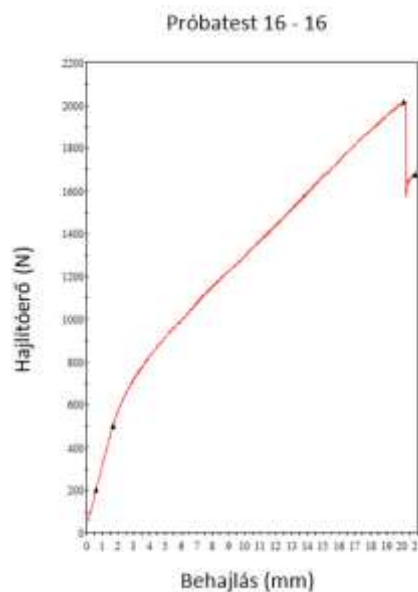
- 1. szakasz: felfűtés
- 2. szakasz: száradás
- 3. szakasz: kiegyenlítés (faipar.com 2023)



3. ábra A kutatás során használt konvekciós szárító

Hajlítási vizsgálatokat a faanyagtudományok területén éppúgy, mint a faiparban rendszeresen végeznek, hiszen a hajlítási vizsgálatok eredményeivel rengeteg dolgot lehet megállapítani minden anyagnál, nem csak a faanyag esetében. Több fajta hajlító berendezés létezik (gépek gyártóitól függ, főleg teljesítménybeli a különbség), több fajta hajlítási eszközzel, gondolhatunk itt a hajlító egységre (például egy vagy kettő nyomófejjel rendelkezik). Mindezek elvégzéséhez különböző képletek, ismeretek

szükségesek. A kutatásunk során arra voltunk kíváncsiak, hogy a tölgy faanyagok más-más nedvességtartalmi százaléka kihatással van-e a minták teherbíró képességeire, és ha igen, akkor milyen mértékben. A minták nagy részét rostirányú tömörítés után különböző nedvességtartalmi fokokra leszártva vizsgáltuk, mekkora mechanikai tulajdonság által feljegyzett adatok közti különbség. Így megtudhatjuk, hogy a faanyag milyen nedvességtartalmon milyen erőket képes kibírni törés nélkül, illetve milyen terhelésen megy tönkre. A mérés akkor állt meg, amikor a faanyagra ható terhelés negyven százalékot csökkent (sok esetben hirtelen), ez jelezte a „törést” (4. ábra).



4. ábra: hajlítóvizsgálat során bekövetkező törés diagramképe

Amíg a rugalmasság kifejezi, hogy milyen mértékben képes az anyag külső erő ellenében alakját megtartani, a szilárdság azt jellemzi, hogy mennyire terhelhető az anyag a törésig, szakadásig. Nyomó igénybevétel esetén a mintára ható terhelés az erő irányába eső méretét rövidíti, a merőleges felület méretét pedig növeli. Tiszta nyomó igénybevételről akkor beszélhetünk, ha a szerkezetnek a terhelés irányával párhuzamos mérete nem haladja meg az igénybevett keresztmetszet méreteinek háromszorosát. Ennél hosszabb alkatrész már kihajlást is szenvedhet. A nyomó igénybevétel gyakran előforduló terhelés a különböző faszerkezeteknél. Száliránnyal párhuzamos terhelés alakul ki bútorállványoknál, tartószerkezeteknél, illetve szálirányra merőleges nyomó igénybevételt szenvednek a padlóburkolatok, talpfák. A nyomófeszültségek megjelennek a hajlító igénybevételeknél is. A tömörfa száliránnyal párhuzamos nyomószilárdsága

többszöröse (kb. 5-7 szerese) a rostra merőleges értéknek. A göcsök, a csavarodott növény, nagyfokú sudarlósság és egyéb fahibák csökkentik a rostirányú nyomószilárdságot. A kötött víz 1%-os növekedése a nyomószilárdság 4-5%-os csökkenését okozza. A hazai fafajok átlagos, légszáraz, rostirányú nyomószilárdsága 25-80 N/mm². A szálirányra merőleges nyomószilárdságnak három típusát különböztetjük meg, ezek a hasáb-, a talpfa-, és a pecsétszilárdság. Az igénybevétel jellegéből adódóan a talpfa- és a pecsétszilárdság lényegesen magasabb (50-80%-kal), mint a hasábszilárdság. Az agglomerált termékek (faforgácslapok, farostlemezek) lapsíkkal párhuzamos nyomószilárdsága alulmúlja a tömörfát. A rétegelt lemezek lappal párhuzamos nyomószilárdsága átlagosan kisebb, lapra merőleges értéke viszont nagyobb, mint a tömörfáé (Veres 2013).

A kötött víz mennyiségi változásával, 0% és a rosttelítettség határ között a faanyag dagad vagy zsugorodik. Mivel a fa inhomogén és anizotróp anyag, a három anatómiai irányban (rost, sugár, húr) különböző méretekben változtatja méreteit. A méretváltozás az eltérő irányokban a következő:

- rostirányban a legkisebb: 0,1-0,9%
- sugárirányban a mértéke már fokozottabb: 2,4-7,0%
- húrirányban a legnagyobb: 4,6-12,0%
- a térfogati dagadás és zsugorodás: 8,0-19,0%

A dagadási és zsugorodási anizotrópia mértékét megadja egy fafaj húrirányú és sugárirányú méretváltozásának hányadosa. Ha ez az érték kettőnél nagyobb, a fafaj száradás során nagyfokú vetemedésre és repedezésre hajlamos, ezért óvatosan, lassan kell szárítani. A faanyagok méretváltozását számos dolog befolyásolhatja, az anatómiai irányokon kívül az alábbi tényezők is:

- faanyag sűrűsége: a vastagabb sejtfalú tömörebb fa általában jobban dagad és zsugorodik, melynek oka, hogy a vastagabb sejtfalakban nagyobb mennyiségű kötött víz rakódhat le.
- korai és késői pászta aránya: A kemény lombos fák erőteljesebben dagadnak és zsugorodnak a tűlevelűekhez képest, mivel azok évgyűrűi nagyobb részét a korai pászta alkotja. A lágylombos fák méretváltozása a tűlevelűekhez hasonló, fafajtól függően lehet annál nagyobb, vagy kisebb mértékű.
- szíjács és geszt: a színes geszt a szíjácsból alakul ki úgy, hogy gesztesítő anyagok raktározódnak el sejtfalakban. Így kevesebb kötött víz épülhet be a geszt

sejtfalaiba. Ennek következtében a színes geszt kisebb mértékben dagad és zsugorodik, mint a szíjács.

- fahibák: egyes szövetszerkezeti elváltozások (csavartrostúság, hullámos rostúság, nyomott fa, göcsösség, stb.) növelik a rostirányú dagadás és zsugorodás mértékét. Más fahibák (például elgyantásodás) csökkentik a kötött víz mennyiségét és ezáltal a méretváltozásokat is (Veres 2013).

Számomra ez a téma mindig is érdekes volt, hiszen amikor láttam olyan bútorokat szállodákban, háztartásokban, amelyek hajlítási eljárással készültek mindig elgondolkodtam, vajon milyen módszerekkel, nedvességtartalommal tudták a faanyagot ilyen módokon meghajlítani. Az egyetemi tanulmányaim során már megismerhettem ennek módszereit, fajtáit, hogy milyen fafajok alkalmasak hajlításra, és hogy milyen szabályokat kell követni a sikeres hajlítás elvégzéséhez. Nyilván a témaköröm nem a bútorok alkatrészeinek hajlításáról szól, de a kísérletek nagymértékben segítenek abban, hogy a bútorok hajlítási körülményeit jobban megértsük. A dolgozat a kutatásunk minden lépését feltünteti, mit milyen eszközökkel, megoldásokkal valósítottunk meg.

2 Anyagok és módszerek

2.1 A minták kiválasztása

A tömörítés során a T10 jelű rönkből kivágott (rönksorrendi számozás) kocsánytalan tölgy mintákat (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) használtuk élőnedves állapotban. A mintákat úgy alakítottuk ki, hogy a beltől a tizenötödik évgyűrűig kihagyjuk a juvenilis részt, vagyis kizárólag érett fával dolgoztunk. Faanyagaink előre méretre vágva, lefagyasztva voltak tárolva, ezzel megőriztük a faanyag élőnedves nedvességtartalmát. Amint kivettük a faanyagokat a fagyasztóból, először a felesleges jeget, ami a faanyagból származott leszedtük, és szétválasztottuk az összefagyott mintadarabokat. A szeparált fahasábokat egyenként megvizsgáltuk, fahibákat keresve rajtuk, ilyen fahiba például:

- göcsök
- rovarrágás
- ferdeszálúság
- repedések.

A válogatásnál a szeparálás célja nem volt más, mint hogy igyekezzünk egységes mintasorokat kapni. A minták hasonló tulajdonságai által lehetséges lesz összehasonlítani

a különböző eredményeket, amiket a vizsgálatok során mértünk. A kiválogatott, megfelelőnek ítélt fahasábokat egy golyóstoll segítségével megszámoztam a nyomonkövethetőség végett.

2.2 A fahasábok gőzölése

A fahasábokat a válogatás után egy gőzölőkuktaiban (5. ábra) kezeltük. Először vizet töltöttünk az gőzölőkukta fenekére, a forráspont elérése után ez a víz szolgáltatja a gőzt.



5. ábra Gőzölőberendezés

Fontos, hogy a fenéken található fémlap pereméig szabad csak a vizet önteni, nehogy elérje a faanyagot és főzés történjen a gőzölés helyett. Ezután a fémlapra kettő nagyobb alátétfát raktunk, hogy ne érjenek a minták a fém laphoz, mivel sokkal nehezebb lett volna kivenni a mintákat, és befolyásolhatta volna a nedvességtartalmi-hőmérsékleti állapotukat. Nagyjából tizenöt percig hagytuk melegedni a gőzölőkuktát, amint felforrt a víz a mintadarabokat tízesével rakatolva fektetve, elválasztók segítségével egymásra pakoltuk úgy, hogy a mintadarabok ne érjenek egymáshoz, így a gőz minden felszínre eljuthatott. A fedelét a gőzölőkuktának egyedi módon kellett lezárni, mégpedig oly módon, hogy a kukta nyelén és a fedelén lévő nyilak egymás felé nézzenek, lenyomni a fedelét, majd elfordítani a fedelét. Ezzel az eljárással a tömítőgyűrű megfeszült és a faanyag nagyobb hatékonysággal gőzölődött. Maga a gőzölési folyamat negyvenöt percig tartott a minták elhelyezését követően, közben figyelni kellett a vízállásra, mivel ha a víz már elpárolgott, de a faanyag még a kuktában van, akkor a faanyagból párologtatja el a

vizet, a faanyag így kiszárad és a mintadarabok alkalmatlanná váltak volna a kísérlet folytatásához.

2.3 Tömörítés folyamata

Amíg a gőzölés tartott, előkészültünk a tömörítéshez, amely egy több lépcsős rendszer formájában valósult meg az Instron 4208 típusú golyósorsós univerzális anyagvizsgáló gépen (6. ábra).



6. ábra Instron 4208 típusú golyósorsós univerzális anyagvizsgáló gép

Először a fahasábok tömörítését segítő, falmelegítéssel ellátott egységet helyeztük fel a gépre (7. ábra). Ezt négy csavar fogta a gép alsó fémlapján, felfogatás után magát a tömörítő szerszámot fogattuk be a helyére egy csavar segítségével az erőmérő cellához. A tömörítő egység egy tálcán állt, amelynek a szerepe nem volt más, mint a tömörítés során esetlegesen keletkező vizet kifolyassa egy pohárba, így a tömörítő egység nem állt vízben. Az egységet teljesen hátratóltuk koppanásig a vizet gyűjtő tálcán, majd meggyőződöttünk róla, hogy a tömörítő egység tetején található nyílás pontosan a tömörítő szerszám alatt van, és nem ütközik semmivel. Amikor ez megtörtént, kettő darab asztalos szorítóval rögzítettük az egységet, így elkerülve az esetleges elmozdulást, ütdés rezgés esetén, majd újra megnéztük, hogy nem ütközik-e a tömörítő szerszám semmivel. Az egység előlapi oldala kiszedhető, itt rakjuk be és ki a faanyagot, ezt is a helyére tesszük, így teljesen felmelegszik a rendszer. Ezek után az egységet áram alá helyeztük a kapcsolóval, ezáltal felgyulladt két fény, egy zöld és egy sárga. A zöld jelentette, hogy

áram alatt van (így elkezdett melegedni), a sárga, hogy még melegszik, nem érte el a megfelelő hőfokot. Amint a sárga elaludt, az egység tömörítésre alkalmassá vált.



7. ábra Faanyag a tömörítést segítő gépegységben.

Ezt követően nekiálltunk bekalibrálni a gépet a tömörítési kezelésünkhöz. Először áram alá helyeztük a gépet, majd manuálisan beállítottuk a nullpontot, oly módon, hogy a gépegységen elöl, a felső híddal egy síkba álljon a szerszám, majd egy etalon faanyagot raktunk a tömörítő gépegységbe. Ezt követően az előlapot a helyére tettük, lezártuk az elülső tartókat, így nem tudott kiesni. Az anyagvizsgáló gép saját rendszerén folytattuk a kalibrációt, először a „LOAD BAL” gombot nyomtuk be, felette felvillant a lámpa, majd egy „ENTER” gombot nyomtunk, és kialudt a lámpa, majd „LOAD CAL” gombot nyomva ugyanúgy felgyulladt egy lámpa, újra „ENTER” gombot nyomva kialudt, így beállítottuk az erők és feszültségek nullpontját. Ezután „G.L.RESET” gombot nyomtuk meg a keresztfej elmozdulását nullázva és az „IEEE” gombot, mind a két gomb fölötti lámpa kigyulladt, így összeköttetésbe hoztuk a számítógéppel. Ezután bekapcsoltuk a számítógépet.

A számítógépen bekapcsolás után a „Bluehill 2 (Instron Corporation, USA) 2.8-as számú szoftverét használjuk, ezen keresztül tudjuk a gép által kifejtett erőt, illetve a keresztfej elmozdulás mértékét vezérelni, látni és feljegyezni, elmenteni. A programon belül a „TESZT” funkciót választottuk és kiválasztottuk a rostirányú tömörítéshez szükséges

előre előkészített feladattípust. A programon belül megtaláltuk a feladat rövid leírását illetve pár alapadatot. Ilyen például, hogy a teszt során 66 mm tömörítést enged a tömörítő berendezés a rugó eltávolítása után, hogy egy percig összenyomva tartja a mintákat tömörítést követően és hogy 50 mm/min előtolási sebességgel dolgozik a gép. Majd egy számunkra szimpatikus fájlnevet adtunk ahová a gép menti el az adatokat. Megadtuk a faanyag vastagsági (20 mm) és szélességi (30 mm) paramétereit Manuálisan lehet a szerszámot emelni vagy süllyeszteni két gomb segítségével. Az első lépésben a szerszámot addig kellett lefelé mozgatni, amíg a monitoron a kifejtett erőnél 100-200 Newton közti értéket láttunk. Ezután a „KERESÉS” gombot lenyomva lenulláztuk az elmozdulást, és felfele vittük a szerszámot pontosan négy milliméternyit, majd újra „KERESÉS” gombot lenyomva lenulláztuk az elmozdulást. Ezzel bekalibráltuk a számítógépen a nullpontot, elkezdhattuk a munkát. Az első mintát beraktuk a tömörítő egységbe, melynek oldalán illetve elején lévő menetes szorítókat meghúztuk, ezzel segítve, hogy ne görbüljön, mozduljon el a faanyag oldalirányban a tömörítés közben. Majd egyenként elnevezve a kísérleteket az éppen aktuális próbatesten lévő számot beírtuk a programba, hogy a program össze tudja rakni a készülő grafikonnal és elvégeztük a tömörítési műveletet.

Vizsgálat közben, amikor nem tömörítettünk, és szabadon állt a tömörítő szerszám figyelni kellett az aktuális nyomóerőt. Ha több volt, mint 16 Newton, akkor a „KIEGYENLÍTŐ TERHELÉS” gombot megnyomva nulláztuk terhelést. Amint megtörtént a tömörítés, egy perc összenyomva tartást követően a tömörítő szerszám visszaállt a nullpontba, majd kilazítottuk az egységen a menetes szorítókat, és az előlapot kisdeltük a helyéről és egy célszerszámmal kisdeltük a faanyagot. A mintákat megvizsgáltuk, azt keresve, hogy valamilyen irányba elhajlott-e, amennyiben igen, kézzel vissza lehetett egyenesíteni, ameddig meleg a faanyag. Visszahajlítás után egy tolómérővel megmértük a tömörített faanyag hosszát (8. ábra) A bütü középső pontjára helyeztük a tolómérő csúcsát mindkét oldalon, majd feljegyeztük a mért értéket.



8. ábra: próbatest hosszának lemérése tolómérő használatával

Amikor végeztünk a tömörítéssel és nem volt több mintánk a programban a VÉGE gomb megnyomása után a MINTA BEFEJEZÉSE gombot megnyomva tudtuk lezárni és elmenteni a tömörítési eredményeket.

2.4 Faanyagok kondicionálása nedvességtartalom szerint

A mintacsoportok egy részének kondicionálását egy klímaszoba segítségével hajtottuk végre 20 °C és 65% relatív páratartalomra nagyjából 12%-os nedvességtartalomra, a többi mintacsoport (18%, 6%, 0%-os nedvességgel rendelkező mintacsoportok) szárítását Memmert szárítószekrények és Binder KBF-115 (Binder GmbH., Németország) klímaszekrény segítségével végeztük el. Egyéb szárítási módszer, amit alkalmaztunk a konvekciós szárítás. A többi mintát vagy nem kellett különleges nedvességtartalomra szárítani (gőzölt, valamint kezeletlen minták) vagy fagyasztással biztosítottuk magas nedvességének megtartását (rosttelítettség feletti mintacsoport). A különböző mintacsoportok egyenkénti kezelése a következők voltak:

1. Fagyasztás rosttelítettség feletti nedvességtartalommal: A mintákat korábban sorszámoztuk, e csoportban a Δ00-09-ig lévők találhatóak. Amint a tömörítést elvégeztük, a mintadarabokat kiegyesítettük, lemértük a hosszukat, feljegyeztük, és egy fatartón zacskóba helyeztük, hogy ne veszítsen a nedvességtartalmából. Amint mind a tíz minta tömörítésével végeztünk, behelyeztük őket a fagyasztóba, figyelve arra, hogy a fahasábok ne érjenek egymáshoz.
2. Fagyasztás kicsivel rosttelítettség alatti nedvességtartalommal (18%): E csoportban a Δ10-19-ig számozott faanyagok szerepelnek. A mintákat a rosttelítettség feletti csoporthoz hasonlóan tömörítés után kiegyesítettük, és

fagyasztóban tároltuk, hogy megőrizze a nedvességtartamát egészen addig, amíg el nem kezdtük a kondicionálásukat a Binder klímaszekrényben (9. ábra). Ahhoz, hogy a mintáink a megfelelő nedvességtartalommal rendelkezzenek, első lépésként be kellett állítanunk a kondicionáló szekrényen a megfelelő hőfokot és páratartalmat. Ezen értékeket egy levegő nedvességtartalmi diagramjáról diagramból olvastuk le. A végleges paraméterek 20 °C és 85%-os páratartalommal történtek beállításra. Miután beállítottuk a kondicionáló szekrényt behelyeztük a fahasábokat hézaglécek segítségével máglyarakásos megoldással úgy, hogy a levegő egyenletesen tudjon járni köztük és azok ne érjenek egymáshoz. A mintacsoportot egészen addig vetettük alá a kondicionálásnak, ameddig az állandó tömeg elérése meg nem történt. Amint a mintacsoport elérte az állandó tömeget készen állt a hajlítási vizsgálatra.



9. ábra: Binder KBF-115 (Binder GmbH Németország) klímaszekrény

3. 12% nedvességtartalomra kondicionálva normál körülmények között (20 °C; 65% relatív páratartalom): E csoportban a Δ20-29-ig számozott faanyagok szerepelnek. Amint a tíz fahasáb tömörítésével, kiegyenesítésével végeztünk, egy fatartóra fektetve elhelyeztük a fahasábokat klímaszobában úgy, hogy a levegő egyenletesen tudjon járni köztük és azok ne érjenek egymáshoz. Így a levegő minden részét elérte a mintáknak. A fahasábokat hézaglécek segítségével máglyarakásos megoldással raktuk egymásra úgy, hogy legyen köztük hézag, így nincsenek egymásra hatással, és könnyebben száradt a faanyag. A mintacsoportot

addig tároltuk a klímaszobában (10. ábra), ameddig az el nem érte az állandó tömeget. Miután beállt az állandó tömeg a minták készen álltak a hajlítási vizsgálatra.



10. ábra A kutatás során használt klímaszoba

4. 6% nedvességtartalomra kondicionálva: E csoportba a $\Delta 30-39$ -ig számozott faanyagok tartoznak. A mintacsoportot az előzőekkel megegyező tömörítéssel járó kezelést követően klímaszobába helyeztük, egészen addig, ameddig el nem kezdtük a kondicionálást. A kondicionálás hasonlóan a 18%-os nedvességtartalommal rendelkező csoporthoz, klímaszekrényben történt, azonban jelen esetben a Memmert HPPZ260 típusút használtuk (11. ábra). A megfelelő kondicionálási paramétereket szintén levegő nedvességtartalmi diagramjáról diagramról olvastuk le. A végleges paraméterek $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ és 30 %-os páratartalommal történtek beállításra. A fahasábokat hézaglécek segítségével máglyarakásos megoldással helyeztük a klímaszekrénybe úgy, hogy a levegő egyenletesen járhatott köztük és azok nem érték egymáshoz. A mintacsoport egészen addig maradt a klímaszekrényben, ameddig a fahasábok el nem érték az állandó tömegüket. Amint elérték az állandó tömeget, a mintacsoport készen állt a hajlítási vizsgálatra.



11. ábra: Memmert HPPZ 260 típusú klímaszekrény

5. 0% nedvességtartalomra szárítva: E csoportban a $\Delta 40$ -49-ig számozott faanyagok szerepelnek. Ezt a mintacsoportot is az előzőekkel megegyező tömörítéssel járó kezelést követően klímaszobába helyeztük egészen addig, ameddig el nem kezdtük a kondicionálást. Ennek a csoportnak a kondicionálása némiképp eltért az eddigi csoportokéhoz képest. Mivel ennél a csoportnál állt fent az egyik legjobban a repedések kialakulásának veszélye a kondicionálás során. Ahhoz hogy az esetleges repedések kialakulását elkerüljük, a kondicionálást két szakaszban végeztük el. Az első szakaszban a mintacsoportot a 6%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoporttal együtt helyeztük a Memmert klímaszekrénybe 20 °C és 30% relatív páratartalom mellett egészen addig, amíg a mintacsoport el nem érte a tömegállandóságot. A második szakaszban a mintacsoportot behelyeztük egy Memmert UFP 500 típusú szárítoszekrénybe (12. ábra) 103 °C-ra, ahol egészen addig tartottuk őket ameddig az állandó tömegüket el nem érték. Ezzel a technikával csökkentettük a faanyagban fellépő erőket, amelyek a szárítás során alakulnak ki és a mintáink ennek köszönhetően repedésmentesek maradtak. Amint a fahasábok elérték az állandó tömegüket, készen álltak a hajlítási vizsgálatra.



12. ábra: Memmert UFP 500 típusú szárítószekrény

6. Abszolút szárazra szárítva, majd kondicionálva 12% nedvességtartalomra: Ebbe a csoportba az $\Delta 50$ -59-ig számozott faanyagok szerepelnek. A mintacsoportot az előző csoportokhoz hasonlóan a tömörítéssel járó kezelést követően klímaszobába helyeztük egészen addig, ameddig el nem kezdtük a kondicionálást. Ezen csoportnak csakúgy, mint a 0%-os nedvességtartalomra szárított csoportnál két szakaszra bontva történt a kondicionálása. Ugyan úgy a 12%-os csoporttal helyeztük be a Memmert klímasekrénybe, majd amint elérte az állandó tömeget áthelyeztük a Memmert szárítószekrénybe, ahol szintén addig tartottuk ameddig el nem érte az állandó tömeget. Amint elérték a fahasábok az abszolút száraz állapotot (állandó tömeg a szárítószekrénybe) a mintacsoportot visszahelyeztük a klímakamrába, ahol egészen addig tároltuk őket ameddig ismét el nem érték az állandó tömeget és ezzel a 12%-os nedvességtartalmat. Amint elérték a 12%-os nedvességtartalmat újra a minták készen álltak a hajlítási vizsgálatokra.
7. Műszárítva normál konvekciós szárítási menetrend szerint 10-12%-ra, majd kondicionálva: E csoportban a $\Delta 60$ -69-ig számozott faanyagok szerepelnek. Ezek a faanyagok külön bánásmódot igényeltek, mivel a konvekciós szárításra a tömörítést követően jóval később került sor. Ezért a nedvesség megtartása végett a faanyagokat a korábban ismertetett módszerrel, tömörítés után zacskóban fagyaszttva tároltuk egészen addig, ameddig el nem kezdtük a kondicionálást. A mintákat behelyeztük a konvekciós szárítóba mindaddig, ameddig a program a kondicionálási műveletet késznek nem jelezte. Ezt követően visszavittük a

mintacsoportokat klímaszobába, ahol 12% nedvességtartalomra kondicionáltuk a mintákat.

8. Gőzölt faanyagok: E csoportba a $\Delta 70$ -79-ig számozott faanyagok tartoznak. Ezeket a faanyagokat a gőzölőkukta segítségével negyvenöt percig gőzöltük, majd a gőzölés után a klímaszobába helyeztük őket.
9. Kezeletlen minták: E csoportba a $\Delta 80$ -89-ig számozott faanyagok tartoznak. A válogatás és az egyedi megjelölés után máglyázva a klímaszobába helyeztük őket. Ennek a csoportnak a segítségével később képesek leszünk megnézni, milyen eltéréseket okoz a faanyagok gőzölése, tömörítése, különböző nedvességtartalmi fokokra szárítása, miután összehasonlítottuk a többi mintacsoport adataival.

2.5 A minták hajlítási vizsgálatra való felkészítése

A mintákat ahhoz, hogy hajlító vizsgálatokat tudjunk rajtuk végezni, a kísérlethez előírt méretre kellett darabolnunk. A darabolást egy EMCO Maiser Ges.m.b.H asztalos körfűrészgéppel (13. ábra) végeztük vezetővonalzó mellett olyan módon, hogy a minta két centiméteres éle érintetlen maradt, csak tisztítóvágást végeztünk a felületen. A tisztító vágást követően a vágott élre felírtam a faanyag sorszámát és jelöltem az első felét (pl.: $\Delta 01/1$). Ezután a vezetővonalzót beállítottuk 11 mm vastagságú vágásra, majd felszeltük az anyagot. Az így készült 11 mm vastag fahasáb másik felét újra áttoltuk a gépen, így a faanyag másik élén is egy tisztító vágást végeztünk. Majd az így keletkezett tiszta felületre felírtam a minta sorszámát és jelöltem, hogy a másik fele (pl.: $\Delta 01/2$). Miután végeztünk a minták felszelésével, újra máglyába rakva visszatettük a klímaszobába. A fagyasztóban lévő faanyagokat külön kezeltük, mivel a jég miatt nem tudtunk pontos vágást csinálni, ezért a jeget lekapartuk róluk, és a lehető leghamarabb felszeltük a mintákat, hogy ne kezdjenek el száradni, majd a felszelés után zacskóba helyezve visszaraktuk a fagyasztóba.



13. ábra EMCO Maiser Ges.m.b.H asztalos körfűrészgép

2.6 Az „Instron” anyagvizsgáló gép hajlítási vizsgálatra való felkészítése

A gép alapjára egy alátámasztó egységet raktunk, ami úgy nézett ki, hogy egy beméretezett sínbe két alátámasztó henger volt felhelyezve (oldalanként 1-1). Ezeket az alátámasztó egységeket 140 mm távolságra állítottuk egymástól, ezt egy villáskulcs segítségével meglazítottuk, majd a helyére toltuk őket. Itt figyelni kellett, hogy az alátámasztó egység közepén lévő jelzéshez (középpontjához) állítsuk a 140 mm különbséget. Majd magát a felső hajlítófej egységet helyeztük be, itt volt egy biztonsági retesz is, mivel nagy erőviszonyok lépnek fel a hajlítás során. A hajlítófejen két darab görgő volt egymástól 50 mm-re, ezt ellenőriztük egy digitális tolómérő segítségével. Amint a helyére helyeztük a hajlító egységet, annak síkjával párhuzamosan beállítottuk egy etalon fa segítségével (14. ábra). Így könnyebben látszott, ha a két sík nem párhuzamos az alátámasztó egységgel, majd egy kézi szorítóval fixáltuk utóbbit, hogy ne mozduljon el hajlítás közben. Majd pár mintát felhelyeztünk az alátámasztó egységre és addig engedték lefelé a hajlítófejet, amíg a görgők a mintákhoz nem értek annyira, hogy még épp ki lehessen alóluk venni kényelmesen a mintát és ne feszítse azt. Ezzel a módszerrel a vizsgálat hamarabb el tudott indulni, így nem vesztettünk időt sem és az erő-elmozdulásgörbe is pontosabb (szebb) lett. Ezután a beállított hajlítófejnek megmértük a még biztonságos távolságát, amit még lefelé megtehet. majd ennek a távolságnak a végére

beállítottuk az automata vészleállító kapcsoló ütközőjét, így a gép nem tudja magát tönkre tenni.



14. ábra Hajlító egységek párhuzamossági beállítása

Miután ezt végrehajtottuk az anyagvizsgáló gép saját rendszerén (Bluehill 2 (Instron Corporation, USA) 2.8-as számú szoftvere) folytattuk a kalibrációt, programindítást és beállításokat a korábban leírtak szerint. Ezután megadtuk a próbatest sorszámát, vastagsági és szélességi méreteit (ezt minden egyes próbatestnél meg kell tenni) és betettük az alátámasztó egységre. Ha az aktuális nyomóerő terheletlen állapotban több volt, mint 16 Newton, akkor a „KIEGYENLÍTŐ TERHELÉS” gombot megnyomva nulláztuk terhelést. Figyelni kellett arra, hogy a minták ugyanakkora távolsággal lógiának túl mindkét oldalon az alátámasztó görgőkön, és hogy párhuzamosan álljanak az egységek síkjával, majd amikor ezek teljesültek elindítottuk a mérést. Amint megtörtént a hajlítás, a maximális terheléstől való 40%-kal való erőcsökkenést követően a hajlítófej visszaállt a nullpontba, majd miután kivettük a mintát, lemértük annak tömegét.

Amikor végeztünk a hajlítással és nem volt több mintánk a programban a VÉGE gomb megnyomása után a MINTA BEFEJEZÉSE gombot megnyomva tudtuk menteni a hajlítási eredményeket.

2.7 A mintacsoportok előkészítése nyomószilárdsági vizsgálatokhoz

A próbatesteket ahhoz, hogy nyomószilárdsági vizsgálatokat tudjunk elvégezni, a vizsgálatához előírt szabvány szerinti méretre kellett őket alakítani. A vizsgálat során az ISO 13061-17 (2017) szabvány előírásait használtuk, kivétel a próbatestek méreténél, mert ott igazodnunk kellett a rendelkezésre álló keresztmetszethez (17x11x11mm (hossz x szélesség x vastagság)). Az alapvető kritériumokat ezzel teljesítettük, mert a négyzetes keresztmetszethez az oldalhossz legalább másfélszeresének megfelelő rostirányú hosszúság társult. A feldaraboláshoz egy Proxxon gyártmányú kis asztali körfűrész használtunk (15. ábra). A méretre vágás során különösen ügyelni kellett arra, hogy a hajlító vizsgálatokon átesett próbadarabok azon része, amely a mérés során az alátámasztások által benyomódott semmi képpen se kerüljön a továbbiakban felhasználni kívánt próbatest részébe. Ez azért volt nagyon fontos, mivel a benyomódott részekben a faanyag deformálódott, ezáltal mérés során pontatlan eredményeket kaphattunk volna. A próbatestek feldarabolása után az új méretekkel rendelkező mintákat ugyanolyan módszerrel tároltuk, mint a darabolás előtt annak érdekében, hogy a próbatestek nedvességtartalma ne változzon.



15. ábra: A próbatestek méretre vágásához használt Proxxon körfűrész

2.8 Az „Instron” anyagvizsgáló gép nyomószilárdsági vizsgálatra való felkészítése

Első lépésként a hajlítószilárdság vizsgálat során használt alátámasztási egységet lecseréltük egy sík felületű fém alátámasztási egységre. Amint az alátámasztási egységet kicseréltük, a felső hajlítási vizsgálatra alkalmas fej cseréje következett. A fejet egy retesz tartotta a helyén, amely kivétele után könnyedén levettünk, majd a helyére egy új, nyomószilárdsági vizsgálatokhoz használt fejet raktunk. A nyomófej kialakítása hasonlóan az alátámasztáshoz sík felületű. Ezt követően beállítottuk a magasságot, amely egy próbatest segítségével történt. A próbatestet az nyomófejek közé raktuk és a felső fejet olyan közel állítottuk be, hogy az a mintadarabot még épp el ne érje. Erre azért volt szükség, hogy a vizsgálat során a gép minél kevesebb időt töltsön „üres járatban”, majd beállítottuk a biztonsági magassági ütközőt. Amint megbizonyosodtunk róla, hogy minden elem biztosan meg van szorítva elkezdhattuk a számítógépen a vizsgálati program létrehozását a Bluehill 2 szoftverrel. Az eddigi vizsgálatokhoz hasonlóan végrehajtottuk a gép saját rendszerén a kalibrációt, és a programindítást. Ez után a programban kiválasztottuk a nyomószilárdsági vizsgálatához szükséges vezérlést. Első lépésként a nyomóvizsgálat során alkalmazandó sebességet kellett megadnunk. Külön sebességet használtunk azon mintacsoportoknál, amelyek gőzölve voltak és azokhoz, amelyek nem. A tömörített mintacsoportok esetén 2,0 mm/min, míg a nem tömörített mintacsoportok esetén 0,4 mm/min sebességgel történt a nyomószilárdsági vizsgálat ezt a sebességet korábbi tapasztalatok alapján hoztuk létre, hogy a mérések az ISO13061-17 (2017) szabvány szint 1-5 perc között érjenek véget. Ezt követően beírtuk a próbatest sorszámát, szélességi és vastagsági méreteit, majd az alátámasztó egység közepére raktuk a próbatestet. A „KIEGYENLÍTŐ TERHELÉS” gomb megnyomása után elindítottuk a vizsgálatot. A vizsgálat egészen addig tartott, ameddig a programban kirajzolódó diagramon a nyomóerő elérte a maximumot, majd ezt követően csökkenni kezdett. Amint ez bekövetkezett leállítottuk a vizsgálatot. Fontos volt, hogy mindegyik próbatestet a vizsgálat után vissza kellett rakni a klímaszobába, vagy fagyasztóba, annak érdekében, hogy megtartsák nedvességtartalmi értékeiket.

Amikor végeztünk a nyomószilárdsági vizsgálatokkal és nem volt több mintánk, a programban a VÉGE gomb megnyomása után a MINTA BEFEJEZÉSE gombot megnyomva tudtuk menteni az eredményeket.

2.9 A mintacsoportok zsugorodás-dagadási vizsgálatának lépései

A zsugorodás-dagadási vizsgálatok során csupán a következő négy csoportot vizsgáltuk:

- Tömörített, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport,
- Tömörített, normál konvekciós szárítási menetrend szerint 10-12%-ra műszárított, majd kondicionált mintacsoport,
- Nem tömörített, kezeletlen, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport,
- Nem tömörített, gőzölt, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport.

A zsugorodás-dagadási vizsgálatokra azért csak ezt a négy csoportot választottuk ki, mivel a felsorolt négy csoport más-más kezelést kapott a fentiek szerint (kezeletlen, gőzölt, tömörített, műszárított-tömörített).

Mivel a zsugorodás-dagadási vizsgálat során a próbatestek telítésen-szárításon mentek keresztül, emiatt a korábban beállított kondicionált nedvességtartalom nem befolyásolja az alábbi vizsgálat végkimenetelét. Annak érdekében, hogy a zsugorodás-dagadási vizsgálatok paramétereinek pontos lemérése minél időtakarékosabban és hatékonyabban történjen, a mérésekhez egy állványra szerelt digitális mérőórát alkalmaztunk. A digitális mérőóra egyik nagy előnye volt, hogy egy gomb megnyomásával a mért adatot továbbította egy általunk létrehozott Excel táblázatba. A digitális mérőóra és a számítógép közötti kapcsolatot az „Optoface” nevezetű programmal hoztuk létre. A programon belül megszabtuk, hogy minden harmadik gombnyomás után egy sorral lejjebb és három oszloppal vissza ugorjon a cella, amibe az adatokat töltötte fel. Ennek köszönhetően gördülékenyen történt a próbatestek méreteinek feljegyzése. Amint beállítottuk az „Optoface” programot kivettük a mintacsoportokat a klímakamrából és a fagyasztóládából. Először a fagyasztóból kivett minták tömeg mértük le annak érdekében, hogy ne veszítsenek nedvességet. Mielőtt a méréseket elvégeztük lekapartuk a jégreteget, amelyek a próbatestek oldalára kicsapódtak. Amint a fagyasztóból kivett minták adatait feljegyeztük, következhetek a klímakamrában tárolt mintacsoportok adatainak feljegyzése. A mintákat egy rácsos tálcára, majd egy szárítószekrénybe helyeztük 103 °C hőmérsékletre egészen addig, ameddig el nem érték az abszolút száraz állapotot. Amint elérték az abszolút száraz nedvességtartalmi állapotot kivettük a mintákat a szárítószekrényből, hogy újból lemértük a tömegüket és méreteiket. Ezt követően a mintákat csoportonként egy-egy gumigyűrű segítségével szeparáltuk egymástól és víz alá

helyeztük őket 49 óra időtartamra, amíg elérték a telített állapotot. A mintacsoportokat kivettük a vízből, és ismét lemértük tömegeiket és méreteiket. Ezt a vizsgálatsorozatot kétszer végeztük el ugyanazon mintadarabokon. A kapott értékekből kiszámoltuk a mintacsoportok keresztirányú zsugorodását (ISO13061-13 2016) és dagadását (ISO 13061-15 2016), valamint a térfogati zsugorodását (ISO 13061-14 2016) és dagadását (ISO 13061-16 2016). A zsugorodás-dagadási vizsgálatokhoz két képletet alkalmaztunk, amelyek az alábbiak voltak:

- Zsugorodás számításához használt képlet [%]:

$$ZS_{R,S,H} = \frac{l_{Rn,Sn,Hn} - l_{Rsz,ssz,hsz}}{l_{Rn,Sn,Hn}} \cdot 100$$

- Dagadáshoz használt képlet [%]:

$$D_{R,S,H} = \frac{l_{Rsz,ssz,hsz} - l_{Rn,Sn,Hn}}{l_{Rsz,ssz,hsz}} \cdot 100$$

Ahol:

$l_{Rn,Sn,Hn} \rightarrow$ *Próbatestek paraméterei vízzel telített állapotban*

$l_{Rsz,ssz,hsz} \rightarrow$ *Próbatestek paraméterei abszolút száraz állapotban*

3 Eredmények, következtetések

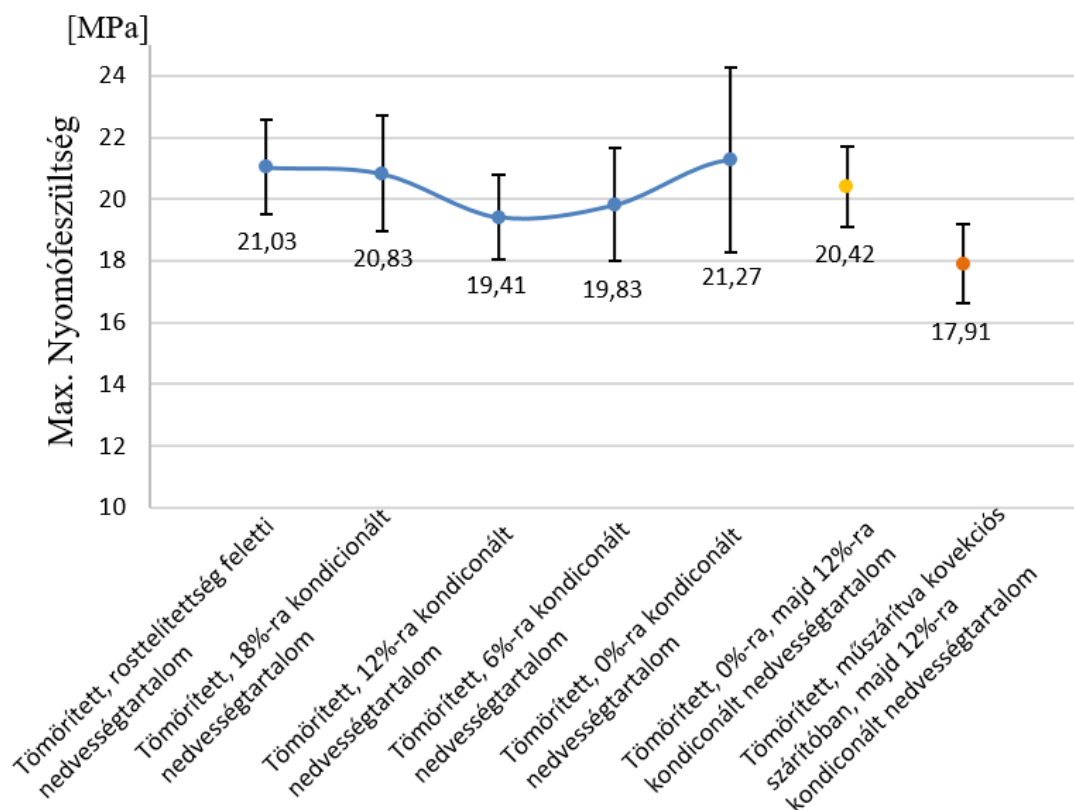
Összesen négy mérési adatokkal járó modifikációt-vizsgálatot végeztünk el. A hajlítószilárdság, hajlítórugalmissági modulus és nyomószilárdság mérésekkel megfigyelhetjük, hogy a mintacsoportok közti nedvességtartalmi különbségek mekkora eltéréseket okoznak a faanyagok szilárdsági jellemzőiben. A negyedik vizsgálat, amely a mintacsoportok zsugorodás-dagadási vizsgálata volt, azt figyelhettük meg milyen mértékben változik a mintacsoportok faanyagának a mérete nedvességtartalmi százaléktól függően. Az eddigi tanulmányaim, és kutatómunkáim során tanultakból kialakítottunk egy hipotézist, hogy várhatóan milyen kimenetele lesz a vizsgálatoknak. A hipotézisünk szerint a nagyobb nedvességtartalommal rendelkező mintacsoportok kevesebb terhelést fognak elviselni, azonban a faanyag jóval plasztikusabb lesz. Az alacsonyabb nedvességtartalommal rendelkező mintacsoportok pedig nagy terhelést lesznek képesek elviselni, azonban a faanyag rideg, törékeny lesz. A mért adatokból és diagramokból tiszta képet kaphatunk, hogy a hipotézisünk igaz, vagy hamis.

3.1 Rostiránnyal párhuzamos tömörítési kezelésnél mért adatok:

A rostirányú tömörítés célja, hogy módosítja az anyag tulajdonságait. Számunkra azért volt szükség módosításra, mert a vizsgálatok során a próbatestek nagymértékű roncsolódást szenvedtek volna, azonban mivel a rostirányú tömörítés hatására plasztikusabb lett a próbatestek faanyaga nagymértékben ellenállóbb volt a vizsgálatok során történő igénybevétel ellen.

3.1.1 Maximális nyomófeszültség:

A maximális nyomófeszültség mérése során a kezeletlen, illetve a gőzölt csoportoknak nem voltak adataik, hiszen azokat nem vetettük alá tömörítésnek. A maximális nyomófeszültség csoportonkénti átlagolt és szórási értékeit az 16. ábra mutatja be.



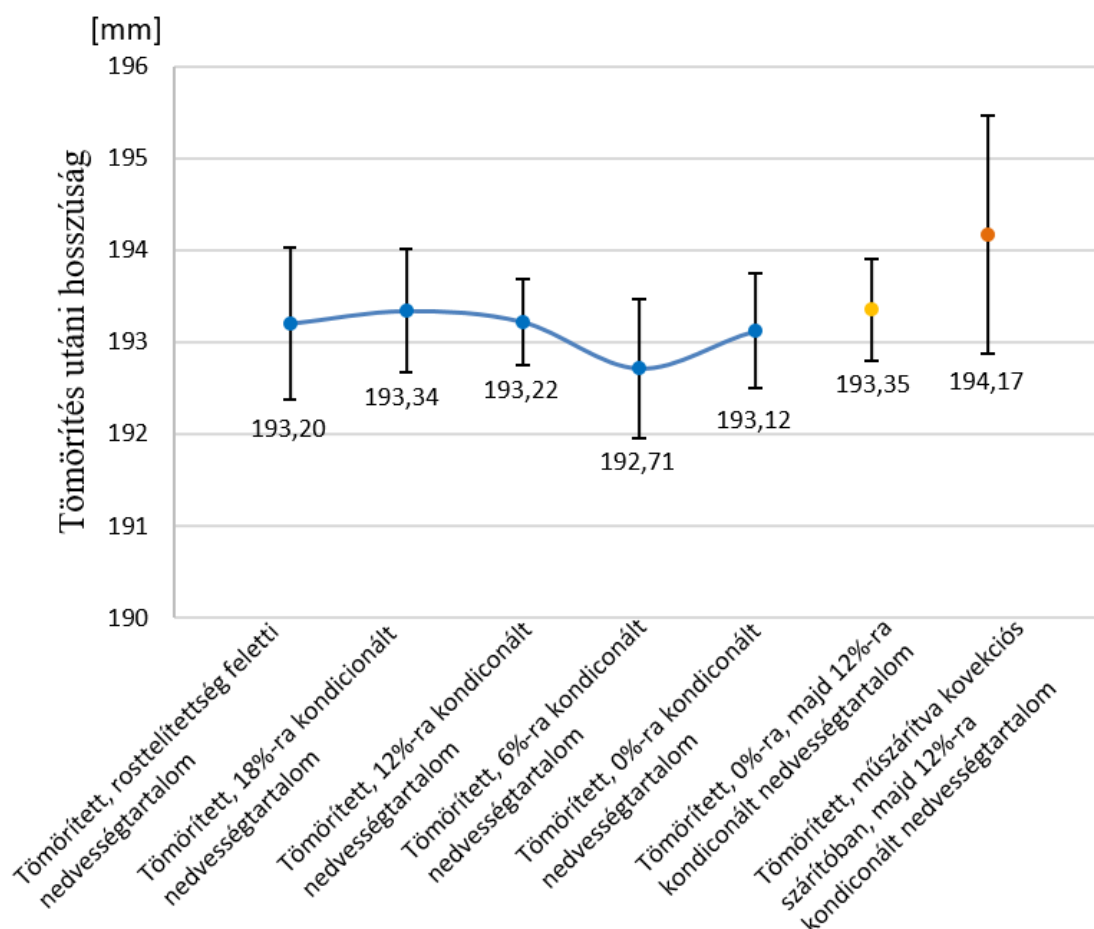
16. ábra: Maximális nyomófeszültség csoportonkénti átlagai és szórási értékei

A nyomófeszültségi vizsgálatokat akkor tekinthetjük csak sikeresnek, ha a mért maximális nyomófeszültségek többnyire megegyeznek, nincs köztük nagy eltérés. Ez a vizsgálat nagyrészt a faanyag minőségének ellenőrzésére szolgál, hiszen ha a faanyagok nyomófeszültségi, és maradandó méretváltozási értékei nagyrészt megegyeznek, akkor a

minták válogatása sikeresnek mondható, nincs jelentős eltérés a minták faanyagában. Ez azért előnyös, mert így láthatjuk, hogy a további vizsgálatok során a faanyagban a nedvességtartalmi százalékon kívül semmi nem változott, ezért kijelenthetjük, hogy a további mérések során a minták mért adatainak változását a nedvességtartalom változás okozta. A mi esetünkben a mintacsoportok átlagolt eredményei közel állnak egymáshoz, szórási értékeik nem kimagaslóak, ezért bátran kijelenthetjük, hogy a mintáink válogatása megfelelő volt, a faanyagok között nincs számottevő eltérés.

3.1.2 Tömörítési utáni hosszúság:

A maximális nyomó feszültségen kívül egy másik mérési módszer elvégzésével is igazoltuk, hogy a mintáink nem különböznek egymástól. Ez a mérés a faanyagok tömörítés utáni hosszúsága. Minden mintát egy tolómérő segítségével megmértünk a tömörítés utáni percekben. A csoportonkénti átlagolt és szórási értékeket a 17. ábra mutatja be.



17. ábra: Tömörítés utáni hosszúság csoportonkénti átlagai és szórási értékei

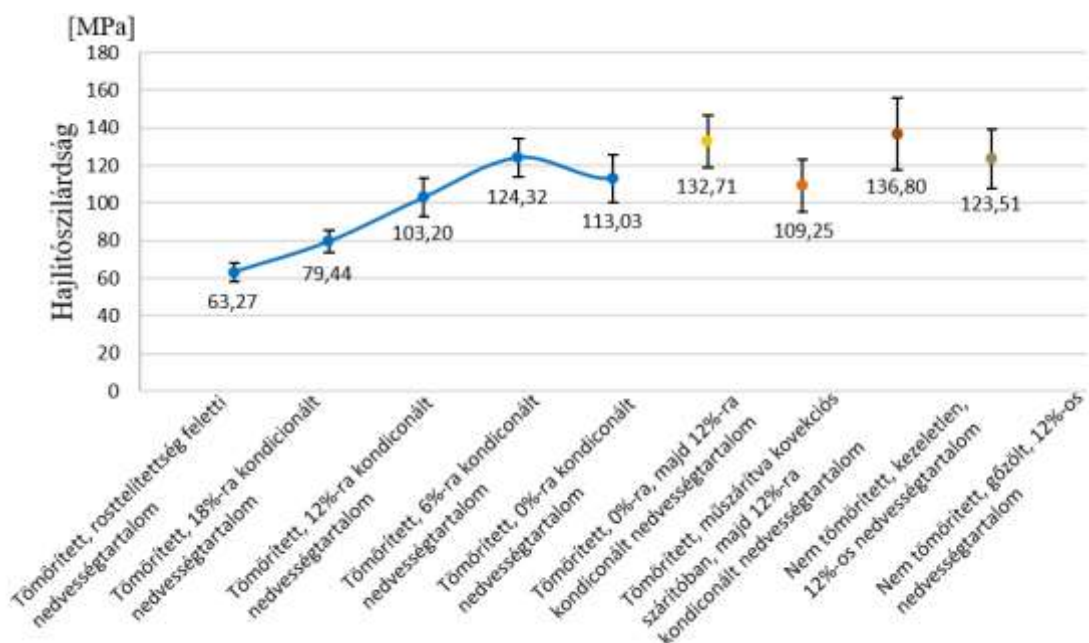
A kapott értékekből hasonlóan a maximális nyomófeszültségi méréshez, azt figyelhettük meg, hogy a mintacsoportok hosszúsági méretei között nincs számottevő eltérés, tehát a mintacsoportok azonos kiindulási tényezőkkel rendelkeznek. Ezeknek a mérési adatoknak a tudatában elkezdhattuk a mintacsoportok kondicionálását.

3.2 Hajlítószilárdsági vizsgálatok:

Amint a mintacsoportok kondicionálása sikeresen megtörtént, elkezdhattuk a hajlítószilárdsági vizsgálatok elvégzését, ahol a mért eredményeink az alábbiak lettek:

3.2.1 Hajlítószilárdság:

A 18. ábra a hajlítószilárdsági vizsgálatok csoportonkénti átlag és szórás eredményeit mutatja be:



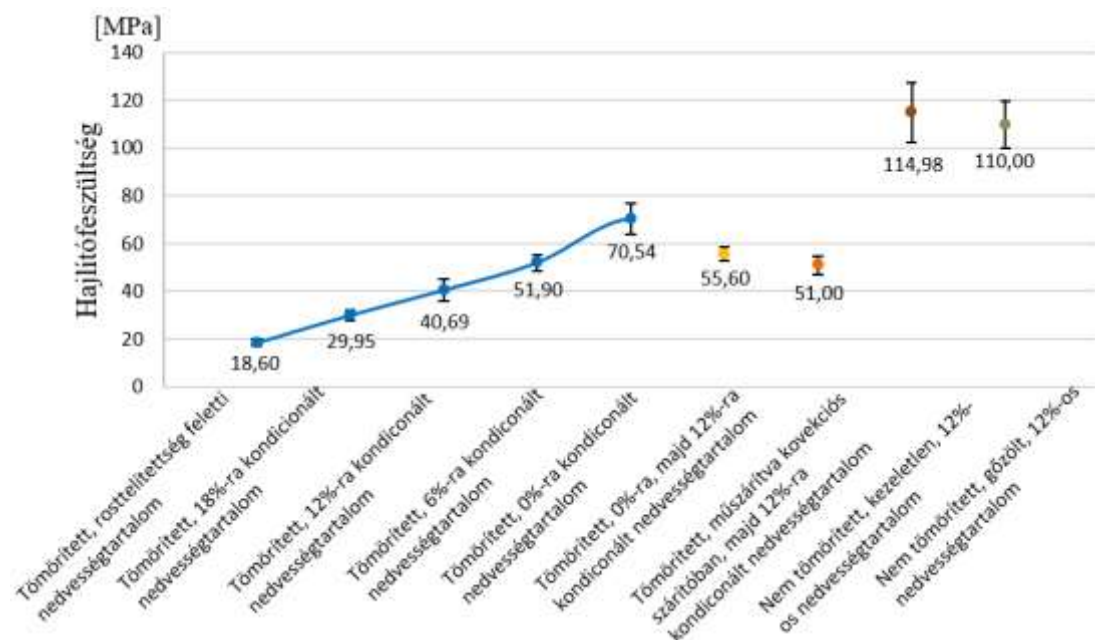
18. ábra: Hajlítószilárdsági vizsgálatok csoportonkénti átlagai és szórás eredményei

A két végén alátámasztott mintáinkat a támaszok között megterheltük, így a faanyag lehajlott. A hajlító igénybevétel hatására a szerkezet alsó övében húzófeszültség, felső övében nyomófeszültség keletkezett. Jól megfigyelhető, hogy azon csoportok, amelyek magasabb nedvességtartalommal rendelkeztek, kisebb terhelést viseltek el. Ilyen látványos különbség például, hogy a rosttelítettség feletti és az abszolút szárazra szárított mintacsoportok átlagértékei között kicsivel több, mint 49 MPa különbség van, ami 78,6%-

os eltérést jelent. Ez a faanyagban lévő kötött víznek köszönhető, ugyanis a kevesebb kötött víz általában jobb szilárdsági tulajdonságokat eredményez (Sulinet.hu 2024a). Az eredmények között az is remekül látható, hogy az alacsonyabb nedvességtartalommal rendelkező csoportok esetén a hajlítószilárdsági értékek megnövekedtek. Azon csoportok esetén, amelyeknél nem került sor tömörítésre, jóval magasabb értékeket kaptunk, azonban erre számítottunk is, hiszen a sejtfalak nem roncsolódtak, ezáltal nagyobb terhelést voltak képesek elviselni (Sulinet.hu 2024b).

3.2.2 Hajlítófeszültség 4 mm behajlásnál:

A hajlítófeszültség a hajlító vizsgálat során mért érték, mely jellemzően egészen a minta töréséig növekszik. A rostirányú tömörítés megváltoztatja a faanyagok tulajdonságait, ezért sok esetben a legmagasabb feszültséget elérve csökkenni kezd a minta további hajlításához szükséges erőszükséglet és a minta tönkremenetele csak később következik be. A minták hajlítási erőszükségletének demonstrálására a 4 mm behajlásnál mért erőből számított feszültségérték egy megfelelő jellemző: ilyen behajlásnál a kezeletlen minták jellemzően még nem törnek el, a rostirányban tömörített minták pedig már értékelhetően magas hajlítóerőt vesznek fel. Hajlítófeszültség 4 mm behajlási eredményeinek átlag és szórási értékeit a 19. ábra mutatja be.

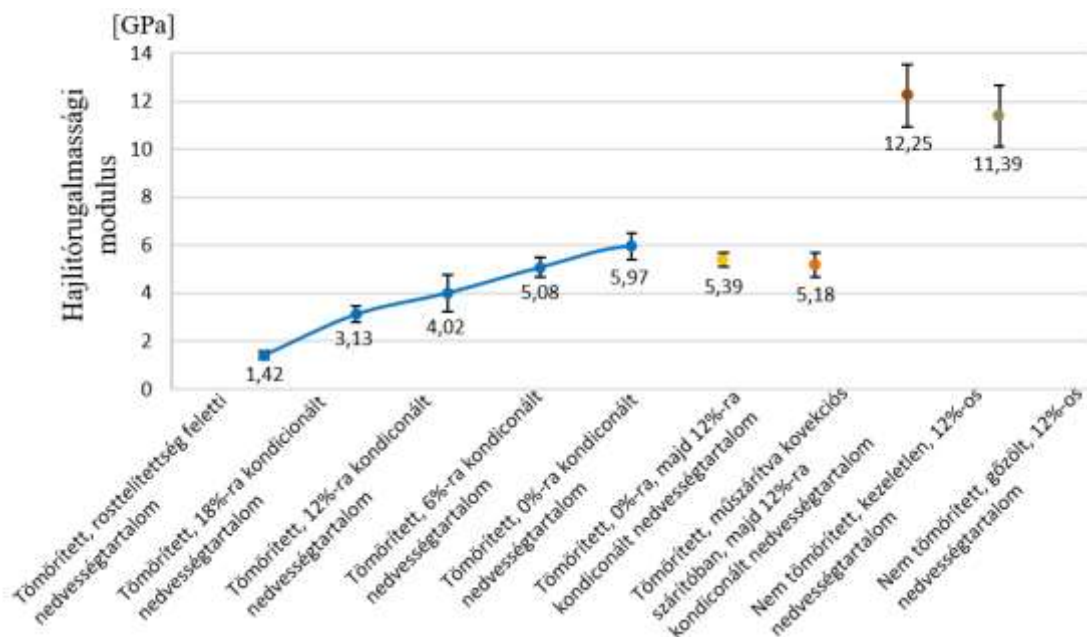


19. ábra: Hajlítófeszültség 4 mm behajlási eredményeinek átlagai és szórási értékei

A kapott eredményekből jól látható, hogy a nem tömörített és tömörített csoportok között hatalmas különbség van. Ez a hatalmas eltérés a tömörítés során végbemenő sejtfalroncsolódás hatására jelenik meg. A faanyag a tömörítés hatására maradandóan plasztikusabb lesz, mint előtte. A tömörített csoportok értékei között jól látszik, hogy azon csoportok, amelyek nagyobb nedvességtartalommal rendelkeztek kisebb értéket mutattak. Például rosttelítettség feletti csoport esetén 18,60 MPa, míg az abszolút szárazra kondicionált csoport esetén 70,54 MPa. Ezt a szemmel látható különbséget főként a faanyagban lévő hemicellulóz okozza, mivel nedvesség hatására plasztikussá válik. Tehát kijelenthetjük, hogy a faanyagban minél több a nedvesség, annál kisebb ellenállást képes kifejteni. Érdeemes megfigyelni, hogy a konvekciós szárítással kondicionált csoport értékei a „normál eljárással” kondicionált csoportok értékei közül a 6%-os nedvességtartalomra kondicionált csoport mért adataival azonosnak tekinthetők. Ez számunkra azért érdekes információ, mivel a két csoportot más-más kezelési eljárást kapott. A konvekciós szárítóban kezelt anyagokat hosszabb ideig tartottuk 70 °C feletti hőmérsékleten, míg a másik csoportot konstans 20 °C hőmérsékletnek tettük ki. Azonban mivel a két mintacsoport kapott értékeinek átlaga és szórási értékei azonosnak tekinthetők, ezért arra tudunk következtetni, hogy valamilyen okból kifolyólag hatékonyabban lágyít a víz a szobahőmérsékleten kezelt mintáknál, mint a konvekciós szárítás alá vetett mintacsoportok esetén. A kapott adatokból az is jól látható, hogy azon csoportok, amely alacsonyabb nedvességtartalommal rendelkeztek a mérés során sokkal nagyobb feszültségi értéket mutattak. A kapott értékekből az is megfigyelhető, hogy a tömörített, abszolút szárazra szárítva, majd 12%-os nedvességtartalomra kondicionálva (*ezentúl teljes szárítás után 12%-ra kondicionált csoport*), valamint a tömörített, műszárítva normál konvekciós szárítási menetrend szerint 10-12%-ra majd kondicionált (*ezentúl konvekciós szárítás után 12%-ra kondicionált csoport*) mintacsoportok értékei azonosnak tekinthetők. Azonban a tömörített, 12%-ra kondicionált mintacsoport értékei ~23-24%-al alacsonyabbak, mint az imént említett csoportok. Ez az eredménybeli különbség azért lehet, mert más-más kezelést kaptak a mintacsoportok.

3.2.3 Hajlítórugalmassági modulus

A hajlítórugalmassági modulusból származó eredmények csoportonkénti átlagértékeit és szórási értékeit az 20. ábra mutatja be.

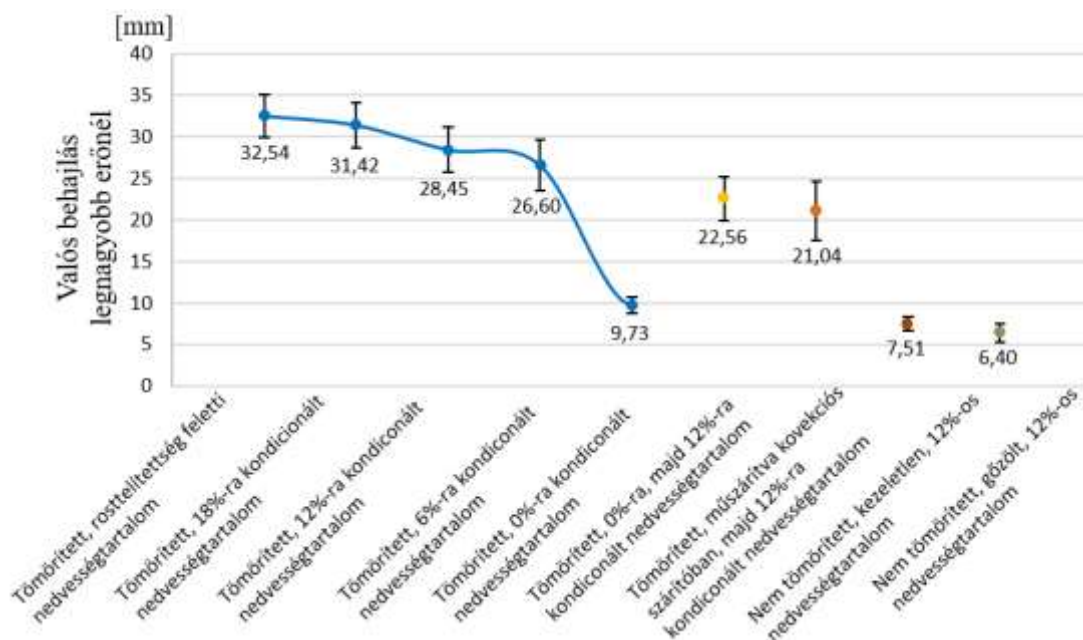


20. ábra: Hajlítórugalmassági modulus átlagértékei és szórási értékei

A mintacsoportok hajlítórugalmassági modulusa a faanyagok merevségéről, hajlékonyságáról nyújt számunkra információt. Minél kisebb egy minta rugalmassági modulusa annál kevésbé merev az anyaga. Ezen állítás remekül megfigyelhető a mintacsoportok mért eredményeiből, hiszen a minták rugalmassági modulusa csökkent a nedvességtartalom növekedésével arányosan. A nedvességtartalom növekedésével a próbatestek faanyaga is plasztikusabb volt, ez a faanyagban található, már korábban említett hemicellulóz és lignin hatására történik, amely nedvesség hatására plasztikusabban viselkedik. A faanyagok plasztikusságát úgy is megfigyelhettük, hogy a nagyobb nedvességtartalommal rendelkező csoportok esetén hajlítás során a minták kevésbé repedtek el és sokkal jobban visszaigazodtak egyenes alakjuk közelébe, vagyis sokkal nagyobb mértékű volt a visszarugózásuk. A mért adatokból az is kiválóan látszik, hogy a nem tömörített csoportokhoz képest a tömörítés alá vetett mintacsoportok rugalmassági modulusának értékei közel a fele, mint a kezeletlen mintáké. Ezen jelenség a korábban említett tömörítés közben bekövetkező sejtfalroncsolódás hatására történik. Érdeemes megfigyelni, hogy hasonlóan a hajlítófeszültség eredményeihez, a *teljes szárítás után 12%-ra kondicionált és konvekciós szárítás után 12%-ra kondicionált* csoportok értékei a „normál eljárással” kondicionált csoportok értékei közül a 12%-os nedvességtartalomra kondicionált csoport mért adataihoz képest magasabbak. Amely ugyancsak a szárítás során történő magasabb hőmérsékletű kezelés miatt alakulhatott ki.

3.2.4 Valós behajlás a legnagyobb erőnél

A legnagyobb erőnél történő behajlásból származó eredmények csoportonkénti átlagértékeit és szórási értékeit a 21. ábra mutatja be.



21. ábra: Legnagyobb erőnél történő behajlás átlagértékei és szórási értékei

A legnagyobb erőnél történt behajlás értéke szintén a faanyag merevségéről és hajlékonyságáról nyújt számunkra információt. Minél kisebb az a táv, amit törés, vagy repedés előtt a faanyag megtett, annál nagyobb a merevsége. Hasonlóan, mint az eddigi vizsgálatok során, azon csoportok, amelyek nagyobb nedvességtartalommal rendelkeztek nagymértékben plasztikusabban viselkedtek. Ennek köszönhetően a magasabb nedvességtartalommal rendelkező csoportok mélyebbre voltak képesek hajolni. Ez ismét főként a faanyagban lévő hemicellulóz hatására történt, hiszen nedvességtartalom hatására plasztifikálódik, ezáltal gyengébbek a kötéseik és az anyag nagyobb nyúlásra képes. A faanyag a plasztikusságát nem csak a nedvességtartalom növekedéséből nyerte, hanem a már korábban említett tömörítés során végbemenő sejtfalroncsolódás által is. A kapott értékekből remekül megfigyelhető, hogy hiába lett a próbatest 0%-os nedvességtartalomra szárítva, mégis nagyobb mértékben tudott hajolni a faanyag törése nélkül (9,73 mm), mint azon csoportok 12% nedvességtartalommal, amelyek nem voltak tömörítésnek kitéve (~7,2 mm). Jelen esetben azt lehet megfigyelni, hogy az eddigiektől eltérő módon a teljes szárítás után 12%-ra kondicionált és konvekciós szárítás után 12%-

ra kondicionált csoportok értékei a „normál eljárással” kondicionált csoportok értékei közül a 12%-os nedvességtartalomra kondicionált csoport mért adataihoz képest alacsonyabbak. Hasonlóan az eddigi mérésekhez, jelen esetben is a különbségről a műszárítás miatti különbségek tehetnek.

A hajlítóvizsgálatok során kiderült, hogy azon mintáink, amelyeket tömörítettünk jóval hajlékonyabbak, plasztikusabbak voltak a tömörítetlen mintacsoportjainknál. Ez alátámasztja azt az irodalmi tényt, hogy a gőzölt-tömörített faanyag ugyan gyengébb lesz (kisebb erő hatására hajlik), mint a kontroll faanyag, viszont nagyobb lehajlást visel el, mivel a hajlítás során nehezen törik el, mert a rostok meg tudnak nyúlni (22. ábra). Ezen rugalmasságot a korábban említett faanyagban található lignin és hemicellulóz adta, amelyek nedvesség hatására plasztikusan viselkednek. Azonban azt is megfigyeltük, hogy a nagyobb nedvességtartalommal rendelkező minták kevesebb terhelést képesek elviselni, mint az alacsonyabb nedvességtartalommal rendelkező minták, mivel azok rostjai sokkal lazábbak a nedvességnek köszönhetően. Kísérleteink során azt is tapasztaltuk, hogy a nedvesebb, nagyobb nedvességtartalmi százalékokkal rendelkező próbatestek hajlamosabbak voltak az eredeti alakjuk visszanyerésére, hajlítás után közel sem volt megfigyelhető akkora maradandó deformáció, mint a kisebb nedvességtartalommal rendelkező mintáknál.

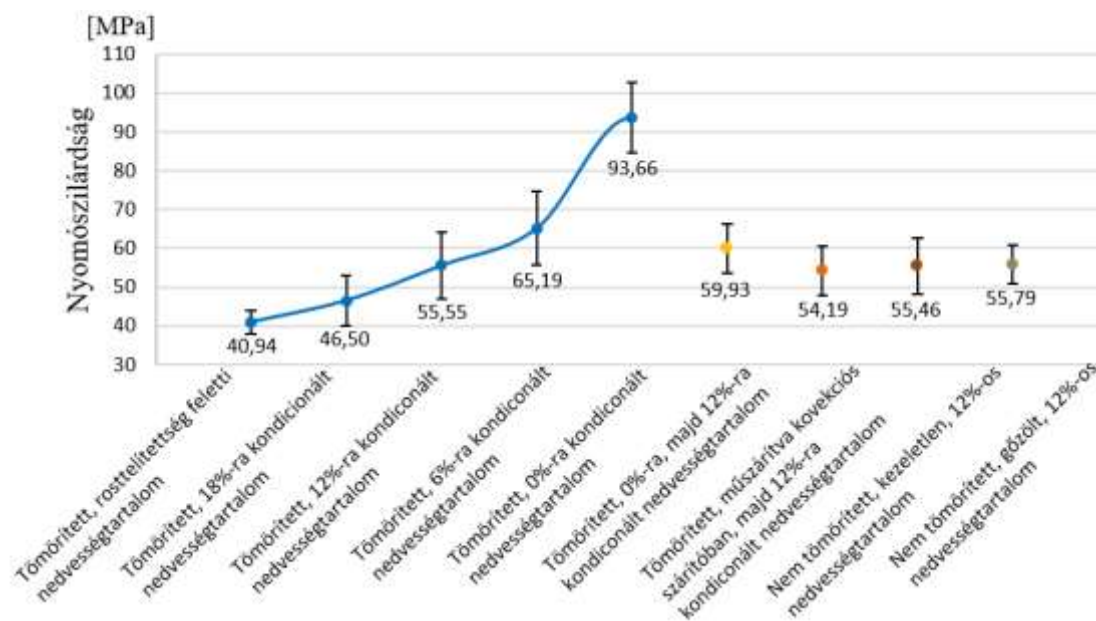


22. ábra: D20-29 mintacsoport faanyaga hajlítási vizsgálat közben

3.3 Nyomószilárdsági vizsgálatok:

3.3.1 Nyomószilárdság (abban a pontban ahol az erőnövekedés megáll)

A nyomószilárdsági vizsgálatból származó eredmények csoportonkénti átlag és szórási adatainak átlagértékét a 23. ábra mutatja be.



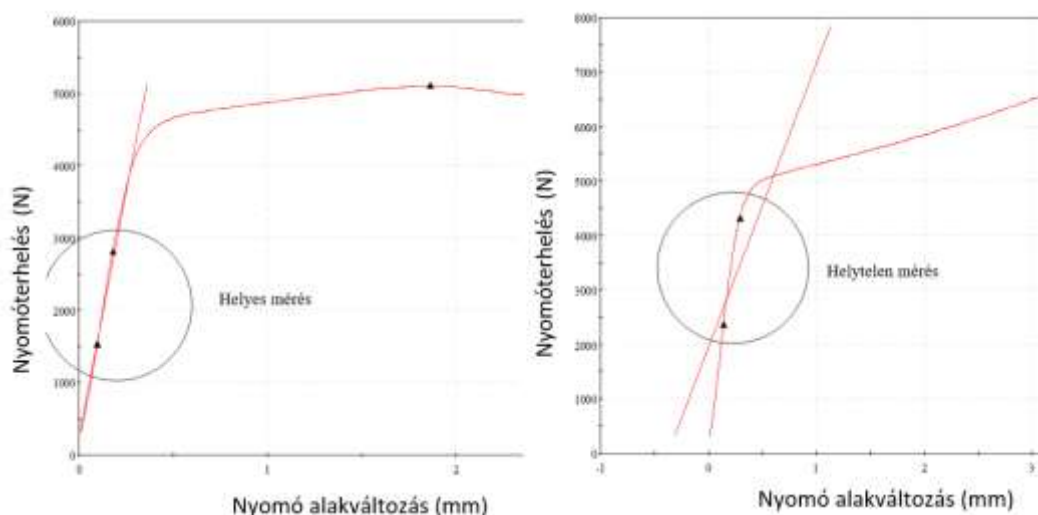
23. ábra: Nyomószilárdság csoportonkénti átlagértékei szórásokkal

A nyomószilárdsági mérés során arra voltunk kíváncsiak, hogy próbatestek mért adatai között mekkora különbség van csak a nedvességtartalom változása által. A mért adatok alapján azt jelenthetjük ki, hogy minél alacsonyabb nedvességtartalommal rendelkezik egy faanyag, annál magasabb a nyomószilárdsága. A hemicellulóz nedvesség hatására plasztikussá válik, ennek köszönhetően a faanyag is plasztikusabbá válik. Jelen esetben (ahogy azt már bizonyítottuk tömörítéskor a maximális nyomófeszültségekkel) a próbatestek ugyanolyannak tekinthető fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek. Ezáltal kijelenthetjük, hogy az egyetlen oka annak, hogy az adatok eltérnek, csakis a nedvességtartalom változás lehet. A tömörítés hatása jelen vizsgálat során nem számottevő, ez az eredményekből is látszik, hiszen a tömörített, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport mért adatainak átlaga-szórása megegyezik a nem tömörített, szintén 12%-os nedvességtartalommal rendelkező csoportokéval. Megfigyeltük azt is, hogy a konvekciós szárítás által kondicionált és a

klímakamrában kondicionált csoportok mért adatainak átlaga között alig van eltérés, tehát a műszárítás, a szárítási technológia sem okoz eltérést a nyomószilárdsági értékekben. Azon csoport esetén, amelyet először abszolút szárazra, majd 12%-os nedvességtartalomra kondicionáltunk a mért adatok átlaga magasabb volt, mint a normál 12%-os nedvességtartalomra kondicionált csoport a mért adatainak átlaga. Ez a különbség azért jelenhetett meg, mivel a kondicionálás során az abszolút szárazra, majd 12%-os nedvességtartalomra kondicionált mintacsoportból teljesen kiszárítottuk a kötött vizet, majd amikor 12%-os nedvességtartalomra visszakondicionáltuk, a kötött víz már nem olyan formában jelent meg, mint a szárítás előtt (Molnár 2004).

3.3.2 Nyomórugalmassági modulus

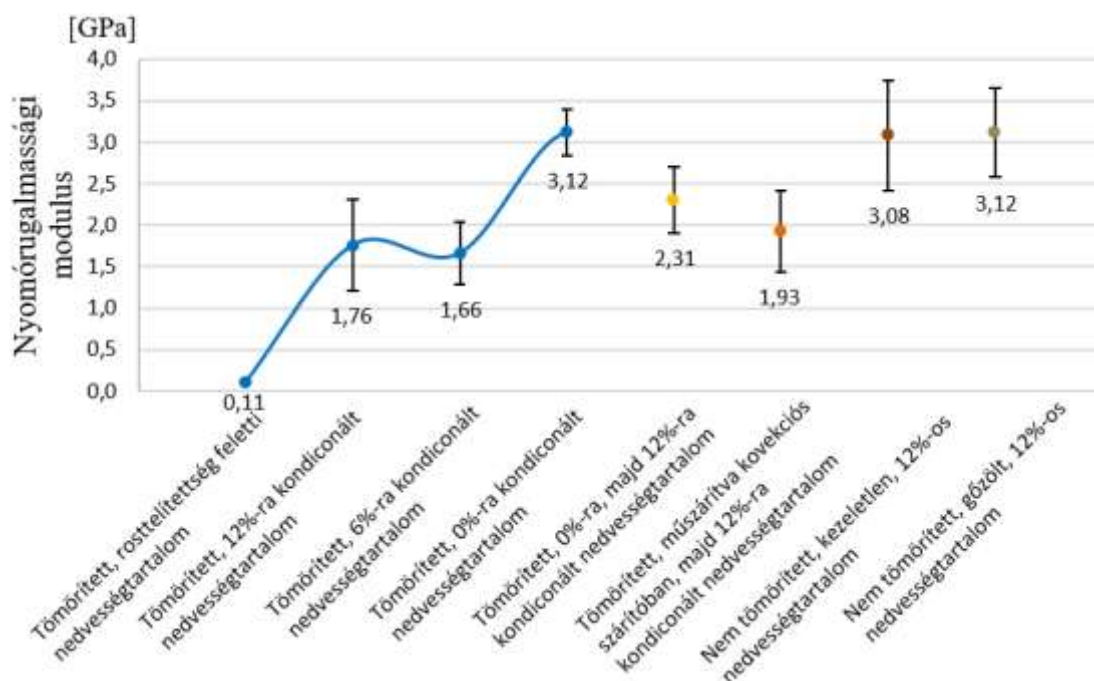
Ezen mérés során a próbatestek nyomórugalmassági modulusát mértük meg, azonban praktikus okokból csak a legmagasabb erőhatás 30-35%-a között lévő terhelési szakaszt vizsgáltuk. A mérés során a program egy egyenest illesztett a mérés során létrehozott görbe szakaszára. Amennyiben a szakaszon az egyenes párhuzamosan helyezkedett el a mérési diagram görbéjével, abban az esetben a mérés megfelelő volt, ellenkező esetben nem megfelelő. A mérési csoportok közül a „Tömörített, kicsivel rosttelítettség alatti (18%) nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport” értékei nem voltak megfelelőek, így azok eredményeit jelen esetben nem tüntettük fel. A kizáró ok a mérések során készült grafikonokon látszott (24. ábra).



24. ábra: Nyomórugalmassági modulus helyes és helytelen mérési görbéje

A grafikonokon az látszott, hogy a görbére helyezett érintő nem volt párhuzamos a görbe azon részével, amely a nyomóvizsgálat 30-55% közötti szakasza volt. Ezáltal a mérési eredmény, vagyis a modulus kalkulációja tévesnek volt tekinthető.

A nyomórugalmassági modulusból származó eredmények csoportonkénti átlag és szórási értékeinek átlagértékét a 25. ábra mutatja be.



25. ábra: Nyomórugalmassági modulus átlagai és szórásai

A mintacsoportok nyomórugalmassági modulusa a faanyagok merevségéről, plasztikusságáról nyújt számunkra információt, hasonlóan a hajlítórugalmassági modulusához. Minél kisebb egy minta rugalmassági modulusa annál kevésbé merev az anyaga. Ezt állítást remekül alátámasztják a mintacsoportok mért eredményei, hiszen a minták nyomórugalmassági modulusa csökkent a nedvességtartalom növekedésével arányosan. A nedvességtartalom növekedésével a próbatestek faanyaga plasztikusabbá vált. Ez ugyancsak a korábban említett hemicellulóz hatására történik főként, amely nedvesség hatására plasztikussá válik. A faanyagok plasztikusságát csakúgy, mint a hajlítórugalmassági modulus esetén, úgy is megfigyelhettük, hogy a nagyobb nedvességtartalommal rendelkező csoportok esetén hajlítás során a minták kevésbé repedtek el és sokkal jobban visszaigazodtak eredeti alakjuk közelébe. Külön érdekesség volt, hogy azon csoportok, amely csekély nedvességtartalommal rendelkeztek a

nyomóvizsgálat után külsőre szinte nem is látszódott roncsolódás a nagyobb nedvességtartalommal rendelkező csoportokhoz képest, ahol szinte fele akkorára tömörödtek a próbatestek (26. ábra). Ennek oka a próbatestek merevsége volt, hiszen a kevés nedvességgel rendelkező anyagok lényegesen merevebb tulajdonságokkal rendelkeztek, így hamar megrepedtek, amely következtében megállt a mérés. A nyomórugalmassági modulusnál nagy szerepet játszott a tömörítés, hiszen a diagramból is jól látható, hogy azon csoportok, amelyek nem voltak tömörítésnek kitéve sokkal magasabb nyomórugalmassági értékkel rendelkeztek, mint azon csoportok, amelyek igen. Ez ugyancsak a tömörítés során történő sejtfal roncsolásnak köszönhető, hiszen a sejtfalak roncsolódásával a faanyag veszített a merevségéből, ezáltal a nyomórugalmassági modulusa is csökkent.



26. ábra: Különböző módokon kezelt próbatestek nyomószilárdság vizsgálat után. Jelölések: 24/2: Tömörített, 12%-os nedvességtartalom; 59/1: Tömörített, abszolút szárazra szárítva, majd 12%-os nedvességtartalomra kondicionálva; 72/2: Kezeletlen, 12%-os nedvességtartalom

3.4 Zsugorodás-dagadási vizsgálatok:

A zsugorodás-dagadási vizsgálatok során a mintacsoportok próbatestjeinek rost, sugár és húr irányú, valamint a térfogati méretváltozás százalékos zsugorodási és dagadási értékét határoztuk meg. Fontos megjegyezni, hogy a mérés során felhasznált mintacsoportok különböző kezelési módszerekkel lettek 12%-os nedvességtartalmi százalékra kondicionálva. Ezen vizsgálat során nem a próbatestek nedvességtartalma volt a

befolyásoló tényező, hanem a próbatestek kondicionálásának módja. A zsugorodás-dagadási vizsgálatot kétszer végeztük el egymás után ugyanazon próbatesteken, ennek megfelelően tárgyaljuk az eredményeket. A mintacsoportok első alkalommal történő dagadási átlag és szórási százalékos értékeit a 9. táblázat mutatja be:

3.4.1 I. kör. Dagadás abszolút száraz állapotból vízzel telített állapotba :

1. táblázat: Dagadás értékei abszolút száraz állapotból vízzel telített állapotba

Mintacsoport megnevezése:	Rost irány (%)	Sugár irány (%)	Húr irány (%)	Térfogati dagadás (%)
Tömörített, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	2,76±0,57%	7,22±0,68%	12,03±1,07%	23,43±1,64%
Tömörített, műszárítva normál konvekciós szárítási menetrend szerint 10-12%-ra majd kondicionált mintacsoport	2,43±0,31%	7,07±0,73%	11,47±0,69%	22,26±1,36%
Nem tömörített, kezeletlen, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	0,59±0,12%	6,19±0,63%	9,70±0,76%	17,18±1,21%
Nem tömörített, gőzölt, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	0,57±0,15%	6,36±0,73%	9,23±1,00%	16,84±1,53%

A mintacsoportok dagadási vizsgálatának első köréből azt figyelhetjük meg első sorban, hogy azon csoportok esetén, amelyek tömörítésnek voltak alávetve az rost irányban ötször nagyobb mértékű dagadás történt, mint azon csoportoknál, amelyek nem voltak tömörítve. Ez a jelenség amiatt történt, mivel a tömörítés során a sejtfalak roncsolódtak, összenyomódtak ezáltal pedig a próbatestek faanyaga vízzel való érintkezés következtében képlékenyebb és alkalmas a nagyobb mértékű méretváltozásra. Ezt a jelenséget „memória hatásnak” nevezzük, mivel a faanyag vízzel való érintkezés következtében „megpróbál” visszaalakulni régi (még nem tömörített) állapotába, a benne maradt feszültségek hatására. A térfogati dagadásból azt figyelhetjük meg, hogy a különböző kondicionálási eljárások mekkora százalékbéli dagadási eltérést jelentenek. Jól látható, hogy itt is a tömörítés nélküli csoportok dagadási értéke kisebb a sejtfalak épsége miatt, azonban az is kiválóan látható, hogy a gőzölés némiképp csökkentette a próbatestek dagadását. A tömörített csoportok esetén a konvekciós szárításnak

köszönhetően a próbatestek kisebb mértékben dagadtak meg. Ez a konvekciós szárítás menete miatt következett be, hiszen a szárítás során a próbatestek tartós hőkezelést kaptak (sok idő 70 °C felett). Ezáltal a faanyagukból a kötött víz nagyobb mértékben volt képes elpárologni, amely kisebb dagadáshoz vezetett.

3.4.2 I. Kör Zsugorodás vízzel telített állapotból abszolút száraz állapotra:

A mintacsoportok első alkalommal történő átlag és szórási százalékos zsugorodási értékeit a 10. táblázat mutatja be:

2. táblázat: Zsugorodás értékei vízzel telített állapotból abszolút száraz állapotra

Mintacsoport megnevezése:	Rost irány (%)	Sugár irány (%)	Húr irány (%)	Térfogati zsugorodás (%)
Tömörített, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	1,80±0,35%	5,98±0,60%	9,58±0,68%	19,80±0,94%
Tömörített, műszárítva normál konvekciós szárítási menetrend szerint 10-12%-ra majd kondicionált mintacsoport	1,76±0,31%	6,24±0,66%	9,08±0,73%	19,43±1,52%
Nem tömörített, kezeletlen, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	0,20±0,09%	5,87±0,67%	8,15±0,60%	15,92±1,26%
Nem tömörített, gőzölt, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	0,16±0,23%	6,00±0,72%	7,85±0,82%	15,65±1,45%

A mintacsoportok zsugorodási vizsgálatának első körében hasonlóan a dagadási vizsgálat első köréhez, jelentős különbség volt azon csoportok között, amelyeket tömörítettünk és azok között, amelyeket nem. A legnagyobb különbség az rost irányon látható, amely ugyancsak a tömörítés következtében végbemenő sejtfalroncsolódás miatt alakult ki. A dagadási vizsgálat során ezek a roncsolt sejtfalak víz hatására elkezdtek visszanyerni eredeti (roncsolódás előtti) alakjukat. Azonban a szárítás közel sem okozott akkora méretváltozást, amelyet a dagadási vizsgálat. Ennek oka, hogy a nedvességvesztés hatására a rostirányban tömörített faanyag zsugorodik, azonban közel sem akkora mértékben, mint ahogy víz hatására megdagadt. Ez a különbség kiválóan látszik például a 9. és a 10. táblázat összehasonlítása esetén. Mindezek mellett, a térfogati zsugorodás

százalékos értékei azt mutatják, hogy a nem tömörített csoportok kisebb zsugorodáson mentek keresztül, mint azok a csoportok, amelyek tömörítési kezelésnek voltak kitéve. Ez ugyancsak a tömörítésnek köszönhető, hiszen azon sejtfaalak, amelyek roncsolódtak jelentősen könnyebben képesek nyúlni és összemenni, melynek oka a rostok bizonyos szintű károsodása.

3.4.3 II. kör. Dagadás abszolút száraz állapotból vízzel telített állapotba

A mintacsoportok második alkalommal történő átlag és szórási százalékos dagadási értékeit a 3. táblázat mutatja be:

3. táblázat: Dagadás értékei abszolút száraz állapotból vízzel telített állapotba

Mintacsoport megnevezése:	Rost irány (%)	Sugár irány (%)	Húr irány (%)	Térfogati dagadás (%)
Tömörített, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	2,25±0,47%	6,62±0,66%	10,62±0,62%	20,60±1,05%
Tömörített, műszárítva normál konvekciós szárítási menetrend szerint 10-12%-ra majd kondicionált mintacsoport	2,10±0,36%	6,59±0,47%	10,00±0,99%	19,72±1,36%
Nem tömörített, kezeletlen, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	0,31±0,14%	6,48±0,75%	9,52±0,64%	16,99±1,07%
Nem tömörített, gőzölt, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	0,32±0,14%	6,47±0,85%	9,21±0,95%	16,64±1,27%

A mintacsoportok dagadási vizsgálatának második köréből ismét jól látszik, hogy azon csoportok esetén, amelyek nem voltak tömörítésnek kitéve számottevően alacsonyabb dagadás történt, mint azon csoportok esetén, amelyeket tömörítettünk. Ez ugyancsak a tömörítés hatására bekövetkező maradandó sejtfaalroncsolódás, gyűrődés következménye. Azt is megfigyeltük, hogy az első alkalommal történő nedvességfelvételtől származó százalékos értékek (1. táblázat) nagyobbak, mint a második alkalommal mért értékek (3. táblázat). Ez a jelenség szintén a tömörítés hatására bekövetkező maradandó sejtfaalroncsolódás miatt történik. Az első alkalommal történő dagadás után a próbatestek faanyaga némi képpen visszanyerte eredeti alakját (memória hatás), azonban amikor

második alkalommal abszolút szárazra szárítottuk a sejtfalak már nem voltak olyan „össze gyűrött” állapotban, mint az első zsugorodás-dagadás vizsgálat előtt. Mivel a próbatestek sejtfalai kevésbé voltak összenyomva, ezért a dagadás mértéke is kisebb volt, mivel kisebb alakváltozással is elérték eredeti alakjuk egy részét. Ez a jelenség természetesen csak azon csoportoknál volt jelen, amelyeket rostirányban tömörítettünk. A térfogati dagadási értékek esetén azt figyeltük meg, hogy a tömörítés nélküli mintacsoportok eredményei közelebb kerültek egymáshoz, elhanyagolható a különbség, míg a tömörített csoportok között továbbra is fennáll a különbség (~1%) a két csoport között.

3.4.4 II. Kör Zsugorodás vízzel telített állapotból abszolút száraz állapotra:

A mintacsoportok második alkalommal történő zsugorodási átlag és szórási százalékos értékeit a 4. táblázat mutatja be:

4. táblázat: Zsugorodás értékei vízzel telített állapotból abszolút száraz állapotra

Mintacsoport megnevezése:	Rost irány (%)	Sugár irány (%)	Húr irány (%)	Térfogati zsugorodás (%)
Tömörített, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	1,71±0,39%	5,89±0,66%	9,42±0,76%	16,21±1,03%
Tömörített, műszárítva normál konvekciós szárítási menetrend szerint 10-12%-ra majd kondicionált mintacsoport	1,67±0,31%	6,09±0,76%	9,06±0,90%	16,03±1,38%
Nem tömörített, kezeletlen, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	0,13±0,05%	5,63±0,98%	9,24±0,81%	14,46±1,05%
Nem tömörített, gőzölt, 12%-os nedvességtartalommal rendelkező mintacsoport	0,14±0,07%	5,40±0,96%	8,88±0,89%	13,92±1,04%

A mintacsoportok második körében történő zsugorodási vizsgálatai azt mutatták, hogy a próbatestek a második szárítási ciklus alatt kisebb mértékben zsugorodtak, mint az első körben. Ennek oka a korábban említetteknek megfelelően, hogy az első dagadási vizsgálat során történő „rostkiegyenesedés” a második ciklusban kisebb, mint az elsőben. Jelen esetben is ez az állítás csak azon csoportokra igaz, amelyek tömörítési kezelésen estek át, hiszen a sejtfalroncsolódás csak ezeknél a csoportoknál állt fent. Mivel a második

ciklusban a sejtfalak kisebb mértékben képesek csak „kiegyenesedni”, ezért a zsugorodás is egyenesen arányos mértékben csökken.

3.5 Egyéb vizsgálatok:

3.5.1 Alapanyag kiindulási nedvességtartalmának vizsgálata:

Szükséges volt tudni az alapanyagunk valódi nedvességtartalmi százalékát. Ehhez azon kezeletlen faanyagok közül, amelyek a válogatás során megmaradtak kiválasztottunk öt darabot. A jégréteg (amely a fagyasztóban tárolástól alakult ki) lekaparása után lemértük tömegeiket.

Ezt követően egy kondicionáló szekrény segítségével abszolút szárazra szárítottuk a próbatesteket és újra lemértük tömegeiket, amelyek a következők voltak:

A kapott eredményekből nettó nedvességtartalmat számoltunk, amelyhez a képlet a következőképpen nézett ki:

$$U = \frac{m_n - m_o}{m_o} \cdot 100 [\%]$$

A minták kezdeti nedvességtartalmának átlageredménye 61,12% volt alacsony, 2,14% szórás mellett. Ami számunkra kiváló hír, hiszen a faanyag nem veszített sok nedvességet a szállítás, raktározás, fagyasztás és fagyasztva tárolás közben.

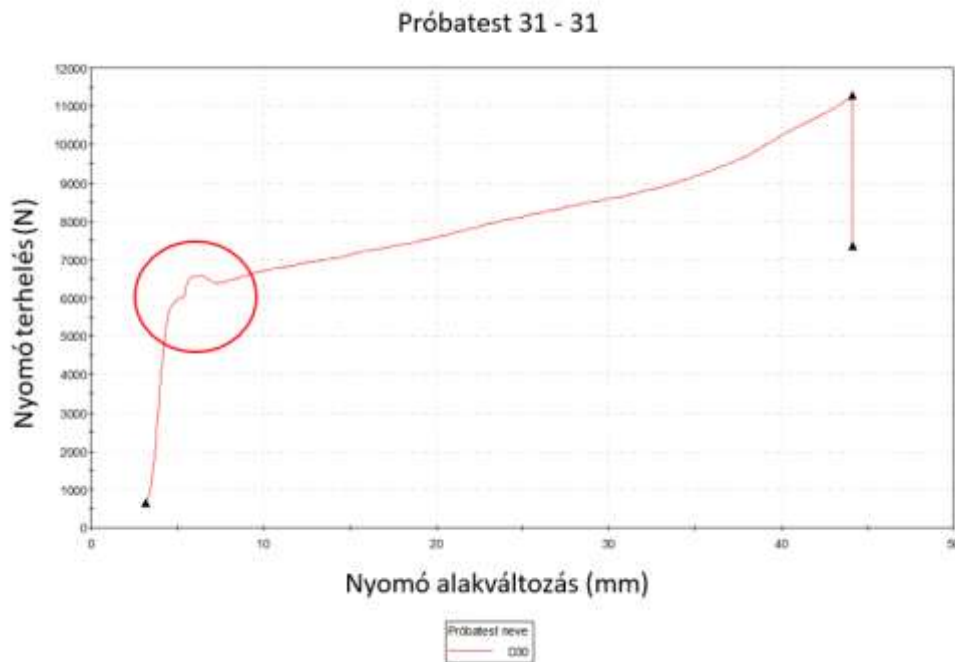
3.5.2 Egyéb érdekes észrevételek, megfigyelések a vizsgálatok során:

- Fekete lett a faanyag:

A tölgyfa minta a tömörítés után befeketedett. Ez a kémiai folyamat a csersavnak köszönhető, mivel a csersav vassal érintkezve reagál és fekete lesz.

- Fahibák miatti grafikonváltozás:

Egy-két faanyagmintánál tömörítés során az erő-elmozdulás görbe hullámos volt az elején (27. ábra). Ez annak köszönhető, hogy a faanyag a göcs, esetünkben tűgöcs közelében másként viselkedik, könnyebben megindul a tönkremeneteli folyamat. Ezen minták esetében a tönkremenetel nem következett be, valamint a mintáknak csak a végei közelében volt göcs, amelyek így nem befolyásolják a hajlítóvizsgálati eredményeket.



27. ábra Fahibák által létrehozott grafikonváltozás piros karikával jelölve

4 Összefoglalás

A feladattal a fő célunk az volt, hogy bebizonyítsuk, hogy a faanyag a nedvességtartalom változásának köze van a faanyag mechanikai tulajdonságainak változásához mechanikailag modifikált faanyag esetében is. A mérési adatokból az első észrevételünk az volt, hogy a tömörített csoportok eredményeinél a faanyagok kisebb terhet voltak képesek elviselni, s faanyaguk jóval gyengébb rugalmassági jellemzőkkel bírt, mint a kezeletlen csoport mintái (Kezeletlen hajlítószilárdság 136,80 MPa, a tömörítetté 12%-os nedvességen 103,20 MPa). Ez a tömörítés során végbemenő sejtfalröncsolódásnak volt köszönhető. Megfigyeltük, hogy a tömörítés következtében a faanyag véglegesen plasztikusabbá válik, mint előtte. A nagyobb nedvességtartalmi százalékkal rendelkező csoportok rugalmassági modulusa (élőnedves, 1,42 GPa) sokkal kisebb, mint a 12%-ra kondicionált (4,02 GPa), vagy a 0%-ra kondicionált (5,97 GPa) csoportoknak. Ezt a jelenséget faanyagban lévő hemicellulóz okozta, amelyek nedvesség hatására plasztikussá válnak. Ez a befolyásoló tényező a maximális behajlási adatoknál is remekül látszott. A nagyobb nedvességgel rendelkező faanyagok mélyebbre tudtak hajolni, és gyorsabban próbálták visszanyerni eredeti alakjukat a hemicellulóz plasztifikálódásának

hatására. A nyomószilárdság esetén azon csoportok, amely alacsonyabb nedvességtartalmi százalékkal rendelkeztek nagyobb terhelést voltak képesek elviselni (Tömörített, abszolút 0%-ra kondicionált mintacsoport 93,66 MPa), mint azon csoportok, amelyek nagyobb nedvességtartalmi százalékkal rendelkeztek (például tömörített, rosttelítettség feletti mintacsoport 40,94 MPa). Ez megintcsak a hemicellulóz plasztifikálódása hatására jött létre. A tömörítés a próbatestek nyomószilárdsági értékeit nem befolyásolta, a tömörítetlen csoportok (Kezeletlen 55,46 MPa, Gőzölt 55,79 MPa) és a tömörített csoport (Tömörített 12%-os nedvességtartalomra kondicionált 55,55 MPa) eredményei közti különbség elhanyagolható. Ha egy próbatest minél nagyobb nedvességgel rendelkezett, faanyaga annál plasztifikusabb jellemzőkkel rendelkezett, és ennek okán nyomórugalmassági modulusa is arányosan csökkent (Tömörített, rosttelítettség feletti mintacsoport 0,11 GPa, Tömörített 0%-ra kondicionált mintacsoport 3,12 GPa).

Azon csoportok, amelyek azonos nedvességtartalmi százalékra voltak kondicionálva, de más-más kezelést kaptak, hajlítószilárdsági és nyomószilárdsági eredményeik kis nagymértékben eltérőek voltak (1-3% különbség). A zsugorodás-dagadási vizsgálatok során nem a próbatestek nedvességtartalma volt a befolyásoló tényező, hanem a próbatestek kondicionálási módja és kezelése. A zsugorodás-dagadási vizsgálatot kétszer végeztük el egymás után ugyanazon próbatesteken. Az első dagadás során érték el a próbatestek a legnagyobb százalékos méretváltozást, melynek oka a tömörítés volt. A sejtfalak összegyűrődtek tömörítéskor, azonban nedvesség hatására visszanyerték eredeti (tömörítés előtti) méreteik egy részét. A zsugorodás kisebb mértékű volt, mint a dagadás, mivel a próbatestek sejtfalai nem gyűrődtek újra össze a szárítás következtében, csupán nedvességet veszítettek, amely a zsugorodást eredményezte. A második dagadási vizsgálatnál kisebb arányban dagadtak a faanyagok (tömörített csoportok esetén 15,99% és 17,03% térfogati érték), mint az első kör során (19,80% és 19,43%). Kutatásunk során rengeteg új dolgot tanultam és el tudtam sajátítani olyan ismereteket a labormunkák során, amire eddig korábbi tanulmányim során nem volt példa. Remélem, hogy a kutatásom segített megérteni, hogy a rostirányban tömörített tölgy faanyag nedvesség hatására milyen változásokon megy keresztül.

5 Köszönetnyilvánítás

A dolgozat végső részén szeretném megköszönni a közös munkát Dr. Báder Mátyás konzulensemnek. Többek között a közös munkánkba fordított rengeteg időt, türelmet, biztatást, tanácsot. Kutatásunk során számos konferencián mutattuk be munkánkat jelentős sikerekkel, amely számomra hatalmas örömet jelentett és jelent a mai napig is. Szeretném megköszönni Horváth Imre segítő munkáját a próbatések létrehozásában. Szeretném megköszönni a TDK felkészülési ösztöndíj keretében kapott támogatást, amely kutatásom során hasznos segítséget jelentett. Külön köszönetemet fejezem ki a 2024-2.11-EKÖP-2024-00007 számú projektnek, amely a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs alapból nyújtott támogatásával, az EKÖP-24-1-I pályázati projekt finanszírozásában valósult meg. Alapvető szerepet játszott munkám sikeres megvalósításában, és lehetővé tette a kutatásom magas színvonalú kivitelezését.



6 Irodalomjegyzék

- Báder M (2015) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése I. rész: Az alapanyagok és előkészítésük, a tömörítés elmélete. Faipar 63 (1): 1-9. <https://doi.org/10.14602/WOODSCI.2015.1.8>
- Báder M (2015) Faanyag rostirányú tömörítésével kapcsolatos elméleti és gyakorlati kérdések áttekintése III. rész: A tömörített fa mechanikai tulajdonságai, felhasználási lehetőségei. FAIPAR, 63 (2). pp. 52-63. ISSN 0014-6897
- Báder M és Németh R (2017) A faanyagok rostirányú tömörítésének kísérleti körülményei I. rész GRADUS, 4 (2). pp. 403-411. ISSN 2064-8014
- Báder M és Németh R (2017) A faanyagok rostirányú tömörítésének kísérleti körülményei II. GRADUS, 4 (2). pp. 412-418. ISSN 2064-8014
- Fainfo.hu (2023) A faanyag nedvességtartalma II.: Szabad víz, kötött víz. Megtekintve: 2023.10.25. <https://www.fainfo.hu/a-faanyag-nedvessegtartalma-ii/>
- Faipar.hu (2023) Energia megmaradás és környezetvédelem a szárításban: konvekciós szárítók. Megtekintve: 2023.10.25 <https://www.fainfo.hu/a-faanyag-nedvessegtartalma-i/>
- Fatáj.hu (2024) A faipregnálás új generációja- WOODFIX, Megtekintve: 2024.10.12 https://fataj.hu/archiv/2009/05/271/200905271_WoodfixFaimpregnalo.php
- ISO 13061-13:2016(E), Physical and mechanical properties of wood - test methods for small clear wood specimens - Part 13: Determination of radial and tangential shrinkage, Szabvány, International Organization for Standardization (ISO), Genf, Svájc, 10 p.
- ISO 13061-14:2016(E), Physical and mechanical properties of wood - test methods for small clear wood specimens - Part 14: Determination of volumetric shrinkage, Szabvány, International Organization for Standardization (ISO), Genf, Svájc, 11 p.
- ISO 13061-15:2016(E), Physical and mechanical properties of wood - test methods for small clear wood specimens - Part 15: Determination of radial and tangential swelling, Szabvány, International Organization for Standardization (ISO), Genf, Svájc, 8 p.
- ISO 13061-16:2016(E), Physical and mechanical properties of wood - test methods for small clear wood specimens - Part 16: Determination of volumetric swelling, Szabvány, International Organization for Standardization (ISO), Genf, Svájc, 9 p

- ISO 13061-17:2016(E), Physical and mechanical properties of wood - test methods for small clear wood specimens - Part 17: Determination of ultimate stress in compression parallel to grain, Szabvány, International Organization for Standardization (ISO), Genf, Svájc, 10 p
- Kreativlakas.com (2023) Faanyagok mesterséges szárítására: konvekciós, kondenzációs vákuumszáritók. Megtekintve: 2023.10.10.
<https://kreativlakas.com/parkettazas/faanyagok-mesterseges-szaritasara-konvekcios-kondenzacios-vakuumszaritok/>
- Meier E (2023) Sessile oak. Megtekintve: 2023.11.23. <https://www.wood-database.com/sessile-oak/>
- Molnár S. (2004) Faanyagismeret. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 201 p
- Sulinet.hu (2024a) A kötött víz faanyagra gyakorolt hatása. Megtekintve: 2024.10.29.
<https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/faipar/faanyagismeret/a-fa-nedvessegtartalmanak-elofordulasi-formai-fatesten-belul/a-kotott-viz-faanyagra-gyakorolt-hatasa>
- Sulinet.hu (2024b) A faanyag, mint sejtfalrendszer. Megtekintve: 2024.10.29.
<https://tudasbazis.sulinet.hu/hu/szakkepzes/faipar/faanyagismeret/a-faanyag-mint-sejtfalrendszer/vastagfalu-sejtekbol-allo-faanyag-surusege>
- Technologystudent.com (2023) Michael Thonet and the No 14 chair. Megtekintve: 2023.11.23. <https://technologystudent.com/prddes1/thonet1.html>
- Veres R (2013) Faipari anyag- és gyártásismeret. Szega Books Kft, Pécs, 368 p.