

Tézisfüzet

**Közönséges gyertyán (*Carpinus betulus* L.) faanyag acetilezése
kültéri alkalmazásokhoz**

Készítette:

Pozsgayné Fodor Fanni

Témavezető:

Prof. Dr. Németh Róbert

Doktori program:

Faanyagtudomány



Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Soproni Egyetem

Sopron

2023

BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben fokozottan előtérbe került a környezetünk sérülékenysége. A fenntartható erdőgazdálkodás, az őshonos fafajok alkalmazása és a szállítás minimalizálása csak egy része az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását csökkentő megoldásoknak. Számos európai fafaj, köztük a közönséges gyertyán (*Carpinus betulus* L.) is, alacsony tartósságúak, ami miatt nem használhatók kültérben további kezelés nélkül. Ezt évtizedek óta biocid védőszerekkel végzik, amelyek a környezetre és az emberre is egyaránt károsak. Napjainkban a faanyag tartósításához a nem mérgező módszereket részesítik előnyben, köztük a modifikálási módszereket, kiemelve az acetilezést (Pozsgayné Fodor 2016, 2017).

A faanyag ecetsavanhidrides kezelése a sejtfalban elérhető hidroxil (OH)-csoportok észterezését eredményezi, és melléktermékként ecetsav képződik. Acetilezés során a faanyag sejtfalalkotó polimerjeiben az OH csoportok egy részét acetilcsoportok helyettesítik, ami csökkenti a sejtfal higroszkóposágát avagy vízfelvételeit. Ez alacsonyabb egyensúlyi nedvességtartalmat, rosttelítési határt és laposabb szorpciós izotermát eredményez. Ugyan a mechanikai tulajdonságok nem változnak jelentősen az acetilezés hatására, de nedves állapotban lényegesen jobbak a kezeletlen fához képest. Az acetilezett faanyag nagyon ellenálló a mikroorganizmusokkal és az időjárással szemben is (Rowell, 2006).

Ipari körülmények között jelenleg a hollandiai Arnhemben található Accsys Technologies cég állít elő acetilezett faanyagot. Ma Accoya® kereskedelmi néven forgalmazzák, túlnyomórészt radiáta fenyőből (*Pinus radiata* D. Don), és kisebb mértékben bükkből (*Fagus sylvatica* L.) és égerből (*Alnus* sp.), 20%-os átlag acetiltartalommal. Az Accoya® eljárás során a faanyagot magas hőmérsékleten szárítják, majd az acetilezés előtt 5-7%-os nedvességtartalomra klimatizálják. A faanyagot túlnyomásos autoklávban impregnálják, így a reagens áthatol a faanyagon egészen be a sejtfalakba. Körülbelül 120-140 °C-ra felmelegítik, lehetővé téve, hogy a reagens a fában lévő hidroxilcsoportokkal reakcióba lépjen (Larsson-Brelid, 2013). Mivel az iparilag kezelt faanyag százalékos tömegnövekedése (WPG) a száraz tömegből nem számítható ki pontosan, ezért az acetilezés mértékét kémiai módszerekkel határozzák meg.

Napjainkban az Accoya® világszerte elérhető, és fő felhasználási területei jellemzően kültérben vannak, talaj felett vagy talajjal érintkezve. Árfekvése miatt elsősorban közlekedési iparban, sportfelszerelés gyártásában, hadiiparban és az építőiparban használják fel hozzáadott értékű termékekhez. Eddig bejáratni ajtók és ablakok, lakóépületi teraszburkolatok, falburkolatok, kültéri bútorok, hangszerek, vizes helyiségek, üvegházak, hidak, kültéri szobrok, stb. gyártásához használták fel (Mantanis, 2017).

CÉLKITŰZÉSEK

A disszertáció elején egy alapos szakirodalmi kutatás történt a közönséges gyertyán állományainak, területeinek jelenlegi helyzetéről és jövőjéről, erdészeti és faipari szempontból egyaránt. Térkép készült a közönséges gyertyán élőfakészletéről országokra lebontva.

Az acetilezés okozta fakémiai átalakulásokat és a faszerkezet anatómiai változásait kémiai analitikai módszerekkel, Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiával, világos látóterű mikroszkópiával és pásztázó elektronmikroszkópiával elemeztük.

Hasznosítás szempontjából termékspecifikus tulajdonságok vizsgálatát is kitértük célul, mint a tartósság talajjal való érintkezés esetén, a fotostabilitás időjárásnak és öregítésnek való kitettség esetén, illetve a felületkezelőanyagokkal és ragasztókkal való kompatibilitás.

Az eredmények alapján meghatároztuk az acetilezett gyertyán lehetséges termékcsoportjait és felhasználási osztályait, termékjellemzést végeztünk, és egy átfogó GYELV elemzést készítettünk.

ANYAG

A közönséges gyertyán (*Carpinus betulus* L.) a mediterrán területek kivételével egész Európában megtalálható. Hazánkon kívül számos országban található szép számmal: Szlovákiában, Ukrajnában, Németországban, Lengyelországban, Horvátországban, Bulgáriában, Szerbiában, Szlovéniában és Ausztriában. Sok gyertyánerdő található Franciaországban, Romániában és Iránban. A magyar erdőterület 5%-át (97 231 ha) teszi ki (NFK, 2021).

A gyertyánok közepes magasságúak (15-25 m), általában domb- és hegyvidéki erdőkben nőnek, mivel ott kedvező éghajlati viszonyok vannak számára. Optimális éghajlat esetén síkságokon is nőhet. A törzse gyakran görbe, terpeszes, bordás és csavaros. Vannak sima, hengeres, egyenes törzsű populációk is, de ezek több tervezést és munkát igényelnek. Átmérőjük 35-50 cm, ritkán 90 cm. Az éghajlatváltozás miatt területe északi területekre, vagy síkságról magasabb tengerszint feletti magasságba tolódik, ahol a talajviszonyok nem korlátozzák elterjedését (Varol et al., 2022). Déli területeken, köztük Magyarországon is csökkenni fog potenciális élőhelye. Állandó állománya viszont rövid távon még növekedhet az erdőpolitikai döntések, az erdőgazdálkodási változások, váratlan események, például új fakártevők függvényében. A jövőben a gyertyán kísérfajként jó választás lesz azokon a területeken, ahol a területe növekedni fog. A bükk-, luc- és fenyőerdők területén fog megjelenni, amelyeket a klímaváltozás okozta aszály, száraz éghajlat miatt gyertyános-tölgyes erdőkre kell cserélni (Sikkema et al., 2016).

Szörtlikacsú fafaj, fakó fehértől szürkés színűig terjed a színe, gyakran hullámos rostlefutással. Magyarországon a legnagyobb sűrűségű ipari fafajok közé tartozik. Közepesen nagy a vetemedési hajlama, közepesen gyors a nedvességfelvétele és magas a rosttelítettségi határa. Fizikai és mechanikai tulajdonságai alapján a gyertyán egy nagyon sűrű, kemény, kopásálló és nagy szilárdságú faanyag. A gyertyán az 5-ös tartóssági osztályba tartozik (nem tartós). Nagy sűrűsége, nyomószilárdsága, hajlítószilárdsága, Brinell keménysége és rugalmassági modulusa tökéletes olyan alkalmazásokhoz, ahol a keménység és a kopásállóság kulcsfontosságúak. A gyertyán hasznosítása problémás, mivel a fahibák nehezítik a megmunkálást, az alacsony dimenzióstabilitás és tartósság szűkíti a lehetséges felhasználási területeket beltérre és tűzifára (Molnár and Bariska, 2002).

A modifikálás javíthatja a gyertyán hasznosítását akadályozó hátrányait. A gyertyán termikus módosítása több hazai és külföldi kutatás tárgyát képezte, ahol minden publikáció megállapította a mechanikai tulajdonságok változását, a fizikai tulajdonságok csökkenését, a tömegvesztéséget, a szín sötétedését és a tartósság javulását. Ha jó minőségű alapanyagot választunk és a megfelelő feldolgozási paramétereket választjuk meg a kezelés során, akkor a gyertyán nagyobb részesedést szerezhet a piacon (Fodor et al., 2016).

Ezáltal tökéletes alapanyag lehet parkettáknak, falburkolatoknak, kerti bútoroknak, kerti eszközöknek, játszótéri elemeknek, kapuknak, kerítéseknek, teraszburkolatoknak, homlokzati elemeknek, lambériának, vasúti talpfának, nehéziparban, kerékgyártásban és faalapú panelek gyártásában. mérnöki faipari termékekhez.

Az elmúlt évszázadban különféle fafajokat acetileztek, mind laboratóriumi, mind (fél)ipari szinten. Sikeresen acetilezhetők azok a fafajok, amelyek könnyen száríthatók, impregnálhatók, és amelyek sűrűsége alacsony és közepes ($300-700 \text{ kg/m}^3$) (Bongers et al., 2008).

Egy korábbi munkában (Fodor és Németh 2016, Fodor et al. 2017a) a közönséges gyertyánt ipari körülmények között acetilezték a tulajdonságainak javítása és felhasználásának bővítése érdekében. A WPG átlagosan 15,3% volt. Fizikai, mechanikai és tartóssági tulajdonságait illetően ígéretes eredmények születtek. A gyertyán tulajdonságainak ipari acetilezéssel történő javítására irányuló kutatás 2014 óta egyedülálló kutatási forma (Pozsgayné Fodor, 2015).

MÓDSZEREK

Kémiai vizsgálatok

Az volt a cél, hogy felmérjük a gyertyán kémiai tulajdonságaiban bekövetkezett változásokat acetilezés után, és hogy következtetéseket vonjunk le a fizikai és mechanikai tulajdonságok változására vonatkozóan. Kezeletlen és acetilezett gyertyán cellulóztartalmát (Kürschner-Hoffer-módszer), a lignintartalmát (Klason-módszer), a járulékos anyagtartalmát (Soxhlet-extrakció) és a hamutartalmát (EN 15403:2011) határoztuk meg és hasonlítottuk össze. A hemicellulóz-tartalmat úgy határoztuk meg, hogy ezeket a kémiai komponenseket 100%-ból kivontuk. Mivel a százalékos változások csak a vegyületek egymáshoz viszonyított relatív növekedését vagy csökkenését mutatják, néhány speciális markert is meghatároztunk (hangyasav, ecetsav, levulinsav, furfurool) HPLC-PDA-ESI-MS/MS módszerrel. A szerkezeti szénhidrátok és a lignin lehetséges bomlástermékeinek nyomon követése érdekében megmértük az összes oldható szénhidrát tartalmat (Dubois módszer) és a totálfenol tartalmat (Folin-Ciocalteu módszer). Megvizsgáltuk a pH (pH-mérő) és a pufferkapacitás (titrálás) változásait is.

Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópiai vizsgálat

A kutatás során DRIFT és ATR spektroszkópiát is alkalmaztunk. A faanyag kémiai változásait a különbségi szinképek figyelembevételével értékeltük, ahol az abszorpció növekedését pozitív, míg az abszorpció csökkenést negatív csúcsok képviselik. Az abszorpciós sávok azonosítása a különbségi szinképek alapján történt.

FTIR vizsgálatokat végeztünk, amikor a kezeletlen gyertyán változását vizsgáltuk acetilezés után, a kezeletlen gyertyán Klason ligninjének változását acetilezés után, az acetilezett gyertyán változását tartóssági vizsgálat után, valamint a kezeletlen és acetilezett gyertyán változását higanygőzlámpás besugárzás után.

Mikroszkópos vizsgálatok

A kezeletlen és acetilezett gyertyán mintákat, az ép és gombakárosított mintákat, valamint a PVAc és PUR ragasztókkal kötött próbatesteket világos látóterű mikroszkóppal és pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) elemeztük.

Világos látóterű mikroszkópiához a metszeteket lágyítás után mikrotommal vágtuk. Két percig szafraninnal és metilénkékkel vagy kálium-permanganáttal (1%-os oldat) festettük, majd Euparalba ágyaztuk. A festés lehetővé tette az acetilezés és a gombakárosítás okozta kémiai változások vizsgálatát. A szafranin a lignint, a metilénkék a poliszacharidokat emelte ki.

SEM esetében a metszetekhez lágyítás után szikével sima felületet képeztünk. Megmértük a kezeletlen és acetilezett gyertyán sejtalfvastagságát, hogy megnézzük, változott-e az acetilezés után. Ehhez 50 mérést végeztünk mindkét faj esetében.

Tartósságvizsgálat talajjal való érintkezés esetén

A cél az volt, hogy megvizsgáljuk, hogy az acetilezett gyertyán hasznosítható-e kültéri termékként valós körülmények között, ahol sok különböző mikroorganizmus támadhatja meg együttműködve vagy külön-külön. A vizsgálat az EN 252 szabvány szerint történt, $20 \times 50 \times 300 \text{ mm}^3$ méretű próbatestekkel. 12 cövek készült kezeletlen és acetilezett gyertyánból, illetve szabvány szerint bükkből és erdeifenyő szijácsból.

A cövekeket 2016 áprilisában helyeztük el a Soproni Egyetem kültéri kiterítési vizsgálatjában (47°40'41.4" É 16°34'32.6" K), a vizsgálat azóta is tart. Mivel a degradáció sebességét nagymértékben befolyásolja a talaj és az éghajlat, a talaj jellemzőit (váztartalom, pH, mésztartalom, szerves anyagtartalom, szemcseösszetétel) és az időjárási paramétereket (átlaghőmérséklet, maximum hőmérséklet, havi csapadék, 0,25 mm feletti csapadékos napok száma, napsütéses órák száma, napsugárzás, relatív páratartalom, Scheffer klímaindex) is meghatároztuk. A degradáció mértékét vizuálisan, valamint a sűrűség és a tömegvesztés kiszámításával határoztuk meg.

Nedvesíthetőség, nyírószilárdság és ragasztási szilárdság vizsgálata

A nyugvó csepp módszerhez vizet (poláris) és dijud-metánt (DIM) (nem poláris) használtunk tesztfolyadékként. A peremszög mérése előtt a felületeket ugyanúgy csiszoltuk, mintha ragasztáshoz készítettük volna elő őket (EN 205: 2016). A vizsgálathoz PGX goniométert használtunk. A folyadékok térfogata 5 µL volt, a peremszögeket 0, 0,1, 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40 és 50 másodpercnél határoztuk meg. A felületi energiát az Owens–Wendt egyenlet alapján számítottuk ki. A kezeletlen és acetilezett gyertyán minták húr- és sugármetszeteit is megvizsgáltuk.

A nyírószilárdságot az MSZ 6786-6:1977 szerint határoztuk meg az EN 204:2016 szabványban meghatározott kondicionálási ciklusok (CS) alapján. A nyírószilárdságot Instron 4208 univerzális vizsgálógéppel vizsgáltuk, a minták főzéséhez Memmert WNB 7-45 vízfürdőt használtunk. A nyíró sebesség 1 mm/perc volt.

A ragasztási szilárdságot az EN 205:2016 szabvány szerint határoztuk meg bükk, gyertyán és acetilezett gyertyán szabványos próbatestek felhasználásával. A ragasztók egy D3-as PVAc ragasztó ('Ponal Super 3'), egy D4-es PVAc ragasztó ('Ponal Super 3' + 5% 'Ponal D4 edző') és egy egykomponensű PUR ragasztó ('Ponal Pur-Leim') voltak, a Henkel Magyarország Kft.-től. A húrmetszetű felületre hordtuk fel a ragasztókat, utána legalább 1 órán keresztül 0,5 N/mm² présnyomást alkalmaztunk 20 °C-on és 65%-os relatív páratartalom mellett. A ragasztási szilárdságot Tinius Olsen H10KT univerzális vizsgálógéppel határoztuk meg. Memmert WNB 7-45 vízfürdőt használtunk a forró vízben áztatáshoz. A tartóssági osztályokat az EN 204:2016 szabvány szerint határoztuk meg.

Minden fafajból 20 minta volt minden kondicionáló ciklushoz (CS 1, 3, 4 és 5). A vizsgálati sebesség 50 mm/perc volt. A SEM képeket manuálisan vizsgáltuk az AutoCAD 2019 szoftverben, hogy meghatározzuk a hasznos penetrációt (a ragasztóanyag teljes területe osztva a kötés szélességével) és a maximális penetrációt (az öt legmélyebb behatolás átlaga) a látómezőben.

Szín és fotostabilitás

Egyik vizsgálatban a kezeletlen és acetilezett gyertyán minták 2016 júliusa és 2018 januárja között egy 45 fokban megdöntött fémállványon kerültek kihelyezésre a kültéri kitettségi vizsgálóban (47°40'41.4"N 16°34'32.6"E). A másik vizsgálatban a Soproni Egyetem Központi Könyvtárának (47°40'54.3"N 16°34'40.6"E) tetején egy 45 fokban megdöntött fa állványon kerültek kihelyezésre 2018 áprilisa és 2020 áprilisa között. Az időjárási paramétereket (átlaghőmérséklet, maximum hőmérséklet, havi csapadék, 0,25 mm feletti csapadékos napok száma, napsütéses órák száma, napsugárzás, relatív páratartalom, Scheffer klímaindex) itt is figyelembe vettük.

Az UV besugárzási vizsgálatokat egy mesterséges öregítő kamrában végeztük. Az egyik tesztben két higanygőz lámpát (800 Watt, 76 W/m²), a másikban két xenonlámpát (482 W/m²) használtunk. A lámpák 64 cm-re voltak a minták felett, és a berendezés hőmérsékletét maximum 50 °C-ra állítottuk be.

A színt CIE L*a*b* színtérben fejeztük ki egy hordozható koloriméterrel. Itt az L* a világosságot jelöli (0 a fekete és 100 a fehér), az a* a vörös/zöld színezetet jelöli (pozitív értékek a piros, negatív értékek a zöld árnyalatot jelentik), a b* pedig a sárga/kék színezetet (pozitív értékek a sárga, negatív a kék árnyalatot jelentik). A színmérő 8 mm átmérőjű felületet mért. A színt a D65 fényforrásra vonatkozóan és 10°-os megfigyelési szög mellett mértük és számítottuk ki. A színt 0-5-10-20-30-60-120-200 óra besugárzás után mértük, illetve az időjárási vizsgálatok során az első hetekben, majd hónapokban. A színkoordinátákat az ISO 11664:2019 szabvány szerint számítottuk ki. A mintákról aktuális állapotukban fényképeket és szkennelt képeket készítettünk az összehasonlításhoz.

Acetilezett gyertyán felületkezelése a fotostabilitás javítása érdekében

Egy előzetes tesztet végeztünk el az acetilezett gyertyán színváltozására és felületkezelési tulajdonságaira vonatkozóan lenolajkencével. A lenolajkencét két rétegben hordtuk fel a felületre, a gyártó utasításai szerint.

Később egy újabb tesztet végeztünk, immár különböző olajokkal és lazúrokkal: Oli-Natura színtelen olaj (OO0), Auro színtelen lazúr (AS0), -umbra színű (ASU), Biopin színtelen lazúr (BS0), -svédvörös színű (BSR), -paliszander színű (BSP), Auro teak olaj (AOT), Biopin teak olaj (BOT) és -piros színű olaj (BOR). Az OO0, AS0, AOT és ASU felületkezelő anyagok lenolaj alapúak voltak; a többi főként természetes olajokból, zsírsavakból és gyantákból készült polimerek voltak. A felületkezelő anyagokat ecsettel hordtuk fel a gyártó utasításai szerint. Kitétségi és öregítési vizsgálatokat is végeztünk rajtuk.

Statisztikai elemzés

A statisztikai elemzést a Dell Statistica szoftverrel végeztük. Korrelációs vizsgálatokat, t-próbákat és varianciaanalíziseket (ANOVA) Fisher-féle LSD-vizsgálattal kombinálva végeztünk, és a különbségeket szignifikánsnak tekintettük $p < 0,05$ értékeknél.

EREDMÉNYEK ÉS A KUTATÁS TÉZISEI

1. tézis: A gyertyán kémiai vizsgálata acetilezés után

Megállapítottam, hogy a hemicellulóztartalom arányos növekedését (+11,10%) a cellulóz (-8,55%) és a lignin (-2,86%) csökkenése kompenzálta. Bizonyítottam, hogy az extraktanyag tartalom 1,91%-ra nőtt, a pH pedig 4,73-ra csökkent. Megállapítottam, hogy az acetilezett gyertyán kissé sötétebb, dióhoz hasonló színe a lignin szerkezetének megváltozása (oxidáció, furfurollal való reakció), valamint a járulékosanyag tartalom növekedése miatt következett be. HPLC analízissel arra a következtetésre jutottam, hogy a gyertyánban acetilezés során a hemicellulóz frakció acetileződik, amely elsősorban a WPG-ért felelős, ugyanakkor a hemicellulóz enyhén degradálódik is (Fodor et al. 2016, 2018b).

2. tézis: Acetilezés okozta, illetve ultraibolya besugárzás okozta kémiai változások FTIR vizsgálata

Bebizonyítottam, hogy a metin-, metilén- és metilcsoportok abszorpciójának növekedése 2970 cm^{-1} -nél az OH-csoportok acetilcsoportokká történő cseréjének köszönhető, ami megfelel az acetilezett gyertyán nedvességfelvétel csökkenésének. Bebizonyítottam, hogy a hemicellulóz frakció acetileződött, mivel magasabb abszorpció jellemezte a C=O (karbonil) csoportokat 1769 cm^{-1} -nél és a C-O nyúlást xilánban 1270 cm^{-1} -nél. A konjugált karbonilcsoportok abszorpciója 1597 cm^{-1} -nél enyhén csökkent az acetilezett fában, valószínűleg a xilánok savas közegben történő kismértékű degradációja miatt.

Bebizonyítottam, hogy az acetilezés hatására a lignin degradálódott, mivel csökkent az abszorpciója az aromás vázrengésnek sziringil ligninben 1597 cm^{-1} -nél és guajacil-ligninben 1505 cm^{-1} -nél, az aszimmetrikus C-H deformációnak ligninben 1464 és 1432 cm^{-1} -nél, valamint az aromás C-H vázrengésnek 1136 cm^{-1} -nél. Bebizonyítottam, hogy mivel a totálfenoltartalom csökkent, ezért a lignintartalom valós csökkenése csak csekély mértékű lehet, ezért a színkép változása pedig csak a lignin mátrix belső szerkezeti változásait mutatja. Az izolált ligninminták FTIR-vizsgálata is megerősítette ezt a megállapítást (Fodor et al. 2016, 2018b).

Megállapítottam, hogy az acetilezett gyertyán UV besugárzása során ~1600, 1500, 1470, 1270, 1150 cm^{-1} -nél csökkent a funkciós csoportok abszorpciója ligninben, ugyanakkor a metán-, metilén-, metil- és karbonilcsoportoké ~2900 cm^{-1} -nél nőtt. A degradáció és a szerkezeti változások mértéke az acetilezett minták esetében volt a legnagyobb, de a szilárdító polimerek nem degradálódtak jelentősen (Fodor és Németh 2017, 2018b, Fodor et al. 2017b, 2017d).

3. tézis: Acetilezett gyertyán mikroszkópos vizsgálata

Megállapítottam, hogy az acetilezett gyertyán lágyítása csak acetonban lehetséges a sértetlen metszetek elkészítéséhez, vízben nem, mint a kezeletlen fa esetében. A szafranin minimális festőhatása szintén bebizonyította a gyertyán sikeres acetilezését.

Megállapítottam, hogy az acetilezés nem károsította a faanyag mikroszerkezetét, és 7%-kal növelte a sejtfal vastagságát. Udvaros gödörkéi jóval keskenyebbek voltak, a megduzzadt sejtfal miatt.

Az acetilezett gyertyán parenchyma sejtjeiben új barna lerakódásokat találtam. A sejtek kis mennyiségű kioldhatatlan anyagot tartalmaztak, ami ahhoz a hipotézishez vezetett, hogy a sejtek egy természetes összetevője (pl. lignánok) az acetilezés során oldhatatlanná váltak (Rousek és Fodor 2017, Rousek et al. 2022).

4. tézis: Acetilezett gyertyán tartósságvizsgálata

Egy hosszútávú, talajjal érintkező kitétségi vizsgálat során az acetilezett gyertyán nagy ellenállást mutatott a gombakárosítás, a farontó rovarok és a nedvesség ellen, míg a gyertyán, bükk és erdeifenyő kontrollmintái 0,5-6 év után tönkrementek, tömegük 23-39%-át elveszítették. A megmaradt acetilezett gyertyán cövekék még a talajban vannak további vizsgálatok céljából, eddig korhadás vagy rovarkárosítás jelei nélkül (Fodor et al. 2017c, 2022a, b).

Mikroszkópos vizsgálatok kimutatták, hogy a gombák képesek voltak kolonizálni az acetilezett gyertyán sejtüregeit a kitétségi vizsgálatok és laboratóriumi gombaállósági vizsgálatok során *Coniophora puteana*, *Rhodonía (Poria) placenta*, és *Trametes (Coriolus) versicolor* ellen (Rousek and Fodor 2017, Rousek et al. 2022).

5. tézis: Acetilezett gyertyán nedvesíthetőségének, nyírószilárdságának és ragasztási szilárdságának vizsgálata

Bebizonyítottam, hogy az acetilezett gyertyán kevésbé nedvesíthető, felületi energiája 64-ről 55 mJ/m²-re csökkent a poláris komponens csökkenése miatt. A diszperzív komponens nem változott. A víz peremszöge jelentősen, 18°-kal nőtt acetilezés után. Bebizonyítottam, hogy nincs szignifikáns különbség a húrmetszetek és sugármetszetek nedvesíthetősége között.

Bebizonyítottam, hogy a normál klímán kondicionált minták nyírószilárdsága acetilezés után csökkent, de alacsonyabb vízfelvétele miatt az acetilezett gyertyán szignifikánsan nagyobb nyírószilárdságot mutatott áztatás illetve főzés után a kezeletlen gyertyánhoz képest.

Bebizonyítottam, hogy az acetilezett gyertyán a kezeletlentől eltérően áztatás és főzés után is megtartotta ragasztási szilárdságát. PUR ragasztóval jobb eredményeket értünk el, mint PVAc ragasztókkal, és nagyobb ragasztási szilárdsága volt a PUR-al ragasztott acetilezett gyertyánnak, mint a kezeletlennek. Mikroszkópos vizsgálataim során igazoltam, hogy az acetilezett gyertyán PUR ragasztási szilárdsága magasabb volt és jobban behatolt a ragasztó a faanyagba, míg a PVAc ragasztási szilárdsága a túlzott penetráció miatt kisebb volt. Utóbbi esetben nagy maximális penetráció értékeket értünk el, míg a hasznos penetrációs értékek (amelyek jobban befolyásolják a ragasztási szilárdságot) alacsonyabbak voltak (Fodor et al. 2018a, 2018b, 2023, Pozsgayné Fodor et al. 2018).

6. tézis: Acetilezett gyertyán fotostabilitás vizsgálata

Bebizonyítottam, hogy az acetilezett gyertyán UV besugárzás hatására világosodik, szabadban pedig végül elszürkül. Bebizonyítottam, hogy az acetilezett gyertyán szürkülése során a világosság (L^*) nőtt, míg a vörös (a^*) és sárga (b^*) színezet csökkent. Arra a következtetésre jutottam, hogy ennek oka a járulékos anyagok átalakulása és a lignin bomlása. Ezek a bomlástermékek csapadék esetén kimosódnak. Bebizonyítottam, hogy az acetilezett gyertyán ellenáll a változó időjárás és csapadék okozta méretváltozásoknak, de darázs megrághatja, illetve penészedhet, de kisebb mértékben, mint a kezeletlen fa. 200 óra besugárzás okozta színváltozást egy vagy annál kevesebb hónapnyi kitettségi vizsgálattal értünk el (Fodor et al. 2017b, 2017d, 2022c, Fodor és Németh 2017, 2018a, 2018b).

7. tézis: Acetilezett gyertyán fotostabilitásának javítása felületkezelő anyagokkal

Bebizonyítottam, hogy a gyertyán kevesebb felületkezelő anyagot szív be acetilezés után, az alacsonyabb nedvességfelvétel miatt. Bebizonyítottam, hogy színtartóssága nagymértékben javítható sötét színű lazúrokkal, mint pl. Auro nr. 160 kültéri lazúr vagy a Biopin időjárásálló lazúr (legalább két évre vonatkozóan). Ugyanakkor a színtelen lazúrok, a színtelen és pigmentált olajok nem voltak tartós hatással a fotostabilitásra. Az Oli-Natura színtelen olajnak és az Auro színtelen lazúrnak nem volt szignifikáns hatása a színtabilitásra a vizsgált körülmények között (Fodor et al. 2022c, Fodor és Németh 2018a).

TERMÉKJELLEMZÉS

Ezen eredmények alapján az acetilezett gyertyánt termékként jellemeztük. A legoptimálisabb országok (ár, mennyiség és gyártól való távolság alapján) a 3 vagy 4 oldalon fűrészelt gyertyán pallók beszerzésére Franciaország, Németország, Lengyelország és Románia lehetnek.

Az acetilezett gyertyán faanyag árfekvése megegyezne az Accoya® faanyagáéval, mert az alapanyag hasonló árfekvésű vagy olcsóbb, mint az Accoya® gyártásához beszerzett radiáta fenyő, bükk vagy éger. A gyertyán sűrűsége és szerkezete hasonló a bükkéhez, ezért hasonló acetilezési beállításokra optimalizálható. Az acetilezett gyertyán fizikai és mechanikai tulajdonságai hasonlóak az acetilezett bükkéhez, sőt bizonyos esetekben még jobbak is.

Az acetilezett gyertyán termékcsoportjai a következők lehetnek: beltéri bútorok (P1), padlóburkolat és nem szerkezeti belső felhasználás (P2), kültéri asztalosmunkák (P3), teraszburkolatok (P5), kerítések (P6). Használható lenne kültéri bútorokhoz (P7) és földdel érintkező beépített faanyaghoz (P9), de nagy sűrűsége miatt falburkolatokhoz (P4) és építőipari termékekhez (P8) kevésbé. Szerkezeti elemek alapanyaga lehetne, pl. lépcsők, padlók, küszöbök, stb. Ugyanakkor az acetilezett faanyag kevésbé ajánlott beltéri használatra az ecetsavszag miatt, különösen felületkezelés nélkül.

GYELV analízis is kidolgozásra került. Meghatározták főbb termék versenytársait, mint a termikusan módosított faanyag, furfurilezett faanyag, trópusi faanyag, WPC, kompozitok, stb. Tulajdonságai összevethetőek más általánosan használt alapanyagokéhoz, mint az alumínium, beton, porcelán, PVC vagy gumi, pl. alacsony hővezető képessége és nagy szilárdság/sűrűség aránya kedvező. Előnyei lehetnek még pl. a hosszú élettartam, amely rendszeres karbantartással tovább hosszabbítható, a fenntarthatóság, hogy újrahasználatos, újrahasznosítható, komposztálható, élettartama végén elégethető.

Általánosságban, a módosított faanyagnak meg kell találnia a piaci rést, ahol megbecsülik és kiváló termékként ismerik el. Akár új, nem faipari piacokra is beléphet. Fontos kihangsúlyozni, hogy a módosított faanyag nem a védőszerrel kezelt fát hivatott helyettesíteni, hanem ideális esetben a nem faalapú anyagokat.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Bongers, F., Rowell, R., Roberts, M., 2008. Enhancement of Lower Value Tropical Wood Species Acetylation for Improved Sustainability & Carbon Sequestration, in: Proceedings of FORTROP II International Conference. Bangkok, pp. 29–45.
- Fodor, F., Ábrahám, J., Horváth, N., Bak, M., Csupor, K., Komán, S., Báder, M., Lankveld, C., Németh, R., 2016. Modification methods of hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood in order to achieve high-quality products, in: Proceedings of COST Action FP1407 2nd Conference: Innovative Production Technologies and Increased Wood Products Recycling and Reuse. Mendel University in Brno, Brno, pp. 31–32.
- Larsson-Brelid, P., 2013. Benchmarking and state-of-the-art report for modified wood (No. SP Report 2013:54). SP Technical Research Institute of Sweden, Borås.
- Mantanis, G.I., 2017. Chemical Modification of Wood by Acetylation or Furfurylation: A Review of the Present Scaled-up Technologies. *BioResources* 12, 4478–4489.
- Molnár, S., Bariska, M., 2002. Magyarország ipari fá. Szaktudás Kiadó Ház Zrt, Budapest.
- NFK, 2021. Erdeink egészségi állapota 2021-ben. Jelentés a 16x16 km-es EVH hálózat alapján.
- Pozsgayné Fodor, F., 2015. Modification of hornbeam (*Carpinus betulus* L.) by acetylation. University of West Hungary, Sopron.
- Rowell, R.M., 2006. Acetylation of wood: Journey from analytical technique to commercial reality. *Forest products journal* 56, 4–12.
- Sikkema, R., Caudullo, G., de Rigo, D., 2016. *Carpinus betulus* in Europe: distribution, habitat, usage and threats, in: European Atlas of Forest Tree Species. Publication Office of the European Union, pp. 74–75.
- Varol, T., Cetin, M., Ozel, H.B., Sevik, H., Zeren Cetin, I., 2022. The Effects of Climate Change Scenarios on *Carpinus betulus* and *Carpinus orientalis* in Europe. *Water, Air, & Soil Pollution* 233, 45. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05516-w>

KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

Folyóiratcikkek:

- Fodor, F., Ábrahám, J., Németh, R., 2018a. Bonding acetylated hornbeam wood (*Carpinus betulus* L.). *Pro Ligno* 14, 31–38. <https://www.proligno.ro/en/articles/2018/4/FODOR.pdf>
- Fodor, F., Bak, M., 2023. Studying the Wettability and Bonding Properties of Acetylated Hornbeam Wood Using PVAc and PUR Adhesives. *Materials* 16, 2046. <https://doi.org/10.3390/ma16052046>
- Fodor, F., Bak, M., Bidló, A., Bolodár-Varga, B., Németh, R., 2022a. Biological Durability of Acetylated Hornbeam Wood with Soil Contact in Hungary. *Forests* 13, 1003. <https://doi.org/10.3390/f13071003>
- Fodor, F., Bak, M., Németh, R., 2022c. Photostability of Oil-Coated and Stain-Coated Acetylated Hornbeam Wood against Natural Weather and Artificial Aging. *Coatings* 12, 817. <https://doi.org/10.3390/coatings12060817>
- Fodor, F., Lankveld, C., Németh, R., 2017a. Testing common hornbeam (*Carpinus betulus* L.) acetylated with the Accoya method under industrial conditions. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10, 948. <https://doi.org/10.3832/ifor2359-010>
- Fodor, F., Lankveld, C., Németh, R., 2017b. The influence of acetylation on the colour and photostability of common hornbeam wood (*Carpinus betulus* L.). *Pro Ligno* 13, 323–330. <https://www.proligno.ro/en/articles/2017/4/FODOR.pdf>
- Fodor, F., Németh, R., 2017. Testing the Photostability of Acetylated and Boiled Linseed Oil-coated Common Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) Wood. *Acta Sylvatica et Lignaria Hungarica* 13, 81–94. <https://doi.org/10.1515/aslh-2017-0006>
- Fodor, F., Németh, R., Lankveld, C., Hofmann, T., 2018b. Effect of acetylation on the chemical composition of hornbeam (*Carpinus betulus* L.) in relation with the physical and mechanical properties. *Wood Material Science & Engineering* 13, 271–278. (published online in 2017) <https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1316773>

Rousek, R., Fodor, F., Németh, R., 2022. Microscopic characterization of sound and decayed acetylated hornbeam (*Carpinus betulus* L.). *Wood Material Science & Engineering*.
<https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2057817>

Szakcikkek:

Pozsgayné Fodor, F., Ábrahám, J., Németh, R., 2018. Miben más acetilezett faanyagot ragasztani? *Magyar Asztalos- és Faipar: Az Országos Asztalos- és Faipari Szövetség Hivatalos Fóruma* 28, 108–109.
<https://faipar.hu/data/file/8026/8667,miben-mas-acetilezett-faanyagot-javitani>

Pozsgayné Fodor, F., 2017. A faanyagok kémiai modifikációja – Acetilezés. *Magyar Asztalos- és Faipar: Az Országos Asztalos- és Faipari Szövetség Hivatalos Fóruma* 27, 62–65.
<https://faipar.hu/data/file/4465/8103,faanyagok-kemiai-modifikacioja>

Pozsgayné Fodor, F., 2016. A famodifikálás. *Magyar Asztalos- és Faipar: Az Országos Asztalos- és Faipari Szövetség Hivatalos Fóruma* 25, 48–50.

Konferenci cikkek:

Fodor, F., Ábrahám, J., Németh, R., 2018b. Bonding acetylated hornbeam wood (*Carpinus betulus* L.), in: *Proceedings of the 5th Processing Technologies for the Forest and Biobased Products Industries*. Technische Universität München, Freising, Germany, pp. 132–139.

Fodor, F., Bak, M., Bidló, A., Bolodár-Varga, B., Németh, R., 2022b. Can acetylation make hornbeam wood last? Results of 6-year-long field stake test, in: *10th Hardwood Conference Proceedings*. University of Sopron Press, Sopron, Hungary, pp. 194–202.

- Fodor, F., Lankveld, C., Németh, R., 2017c. Improving the durability of common hornbeam wood (*Carpinus betulus* L.) acetylated with Accoya® method, in: Proceedings of the 11th Edition of the International Conference “Wood Science and Engineering in the Third Millenium.” Transilvania University of Brasov, Brasov, Romania, pp. 811–815.
- Fodor, F., Lankveld, C., Németh, R., 2017d. The influence of acetylation on the colour and photostability of common hornbeam wood (*Carpinus betulus* L.), in: Proceedings of the 11th Edition of the International Conference “Wood Science and Engineering in the Third Millenium.” Transilvania University of Brasov, Brasov, Romania, pp. 436–443.
- Fodor, F., Németh, R., 2018a. Examining the coating performance of finishes on acetylated hornbeam wood (*Carpinus betulus* L.), in: Book of Abstracts of the 9th Conference on Wood Modification. SHR B.V., Arnhem, the Netherlands, p. 37.
- Fodor, F., Németh, R., 2018b. Photodegradation of acetylated wood irradiated by xenon lamp and mercury-vapour lamp, in: Proceedings of the 8th Hardwood Conference - With Special Focus on “New Aspects of Hardwood Utilization from Science to Technology.” University of Sopron Press, Sopron, Hungary, pp. 129–130.
- Fodor, F., Németh, R., 2016. Gyertyán (*Carpinus betulus* L.) faanyag acetilezése a szilárdság és tartósság javításának céljából, in: V. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia Konferenciakötet. Pécsi Tudományegyetem Doktorandusz Önkormányzat, Pécs, Hungary, pp. 106–117.
- Fodor, F., Németh, R., Hofmann, T., 2016. Chemical analysis of acetylated hornbeam (*Carpinus betulus* L.) wood, in: Proceedings of the 7th Hardwood Conference: Eco-Efficient Resource Wood with Special Focus on Hardwoods. University of West Hungary Press, Sopron, Hungary, pp. 47–48.
- Rousek, R., Fodor, F., 2017. Microscopic investigation of acetylated hornbeam and densified beech, in: Proceedings of COST Action FP1407 - 3rd Conference: Wood Modification Research & Applications. Salzburg University of Applied Sciences, Salzburg, Austria, pp. 49–50.