

Varga Dénes

A GŐZÖLÉS MODIFIKÁLÓ HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA  
KÉT EURÓPAI ÉS KÉT TRÓPUSI FAFAJ EGYES FIZIKAI-  
MECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK TÜKRÉBEN

Doktori (PhD) értekezés

Témavezető:  
Dr. Tolvaj László  
egyetemi tanár

Nyugat-magyarországi Egyetem  
Faipari Mérnöki Kar  
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola

2008

# A GŐZÖLÉS MODIFIKÁLÓ HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA KÉT EURÓPAI ÉS KÉT TRÓPUSI FAJAJ EGYES FIZIKAI- MECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK TÜKRÉBEN

Értekezés a doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:

Varga Dénes

Készült a Nyugat-magyarországi Egyetem Cziráki József Faanyagtudomány és  
Technológiák Doktori Iskola  
Faanyagtudomány programja keretében

Témavezető: Dr. Tolvaj László

Elfogadásra javaslom (igen / nem) .....  
aláírás

A jelölt a doktori szigorlaton .....%-ot ért el.

Sopron,

.....  
a Szigorlati Bizottság elnöke

Az értekezést bírálóként elfogadásra javaslom (igen / nem)

Első bíráló: Dr. Németh Róbert            igen / nem            .....  
aláírás

Második bíráló: Dr. Nyárs József            igen / nem            .....  
aláírás

A jelölt az értekezés nyilvános vitáján .....%-ot ért el.

Sopron, 2008. .... hó ..... nap

.....  
a Bírálóbizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése .....

.....  
az EDT elnöke

# Tartalomjegyzék

<b>I</b>	<b>BEVEZETÉS</b>	<b>9</b>
<b>II</b>	<b>TÉMAVÁZLAT: A KUTATÁS ELMÉLETI HÁTTERE</b>	<b>11</b>
II.1	A FAANYAG MOLEKULÁRIS FELÉPÍTÉSE	11
II.1.1	CELLULÓZ	11
II.1.2	HEMICELLULÓZ	12
II.1.3	LIGNIN	13
II.1.4	JÁRULÉKOS ANYAGOK	13
II.2	A HŐMÉRSÉKLET HATÁSA A FAANYAGRA	16
II.3	A FAANYAG DEGRADÁCIÓJA FÉNY HATÁSÁRA	20
II.4	A HIDROTERMİKUS KEZELÉS TECHNOLÓGIÁJA	23
II.4.1	GŐZÖLÉS	24
II.4.2	FŐZÉSI ELJÁRÁS	27
II.4.3	A FAANYAGBAN LEJÁTSZÓDÓ FIZIKAI FOLYAMATOK	28
II.5	A HIDROTERMİKUS KEZELÉS HATÁSA A FAANYAG TULAJDONSÁGAIRA	30
II.5.1	KÉMIAI VÁLTOZÁSOK	30
II.5.2	FIZIKAI VÁLTOZÁSOK	30
II.5.3	SZILÁRDSÁGVÁLTOZÁSOK	31
II.5.4	A FAANYAG TERMÉSZETES TARTÓSSÁGÁT ÉRINTŐ VÁLTOZÁSOK	32
II.6	A FAANYAG SZÍNE	33
II.6.1	A LAB SZÍNTÉR	34
II.6.2	GŐZÖLÉS ÉS SZÍNMÉRÉS – SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	37
II.7	A FAANYAG FELÜLETI ENERGIÁJA	42
<b>III</b>	<b>ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK</b>	<b>47</b>
III.1	A KUTATÁS SORÁN FELHASZNÁLT FAFAJOK BEMUTATÁSA	47
III.1.1	FEHÉR AKÁC ( <i>ROBINIA PSEUDOACACIA</i> L.)	47
III.1.2	KOCSÁNYOS TÖLGY ( <i>QUERCUS ROBUR</i> L.)	50
III.1.3	MERBAU ( <i>INTSIA BIJUGA</i> )	52
III.1.4	ANGELIM PEDRA ( <i>HYMENOLOBIUM PETRAEUM</i> )	55
III.2	ANYAGSZÜKSÉGLET, AZ ALKALMAZOTT TECHNOLÓGIA ISMERTETÉSE	57
III.3	A KEZELETLEN ÉS HŐKEZELT FAANYAGON ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK	59
III.3.1	FANEDVESSÉG-TARTALOM MEGHATÁROZÁSA	59
III.3.2	HAJLÍTÓSZILÁRDSÁG MEGHATÁROZÁSA	59
III.3.3	KEMÉNYSÉGMÉRÉS	60
III.3.4	A GŐZÖLÉS HATÁSA A FAANYAGOK SZÍNÉRE	60
III.3.5	FELÜLETI SZABAD ENERGIA MEGHATÁROZÁSA	61
III.3.6	A SZÍNVÁLTOZÁS MÉRÉSE AZ UV BESUGÁRZÁS FOLYAMÁN	63
III.3.7	RAGASZTOTT KÖTÉS ADHÉZIÓS VIZSGÁLATA	64
III.4	A MÉRT ÉS SZÁMÍTOTT ADATOK ÉRTÉKELÉSÉNEK MÓDSZEREI	66
<b>IV</b>	<b>A VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI</b>	<b>67</b>
IV.1	A GŐZÖLÉS SORÁN BEKÖVETKEZŐ SZÍNVÁLTOZÁS	67
IV.2	A HŐKEZELÉS HATÁSA A SZÍNSTABILITÁSRA	75
IV.3	A FELÜLETKEZELÉS HATÁSA A BESUGÁRZÁST KÖVETŐ ELSZÍNEZŐDÉSRE	79

IV.4	A PRÓBATESTEK NEDVESSÉGTARTALMA.....	81
IV.5	A GŐZÖLÉS HATÁSA A FAANYAG MECHANIKAI TULAJDONSÁGAIRA .....	83
IV.6	A GŐZÖLÉSI PARAMÉTEREK HATÁSA AZ ILLESZKEDÉSI SZÖGRE ÉS A FELÜLETI ENERGIÁRA .....	86
IV.7	RAGASZTOTT KÖTÉS NYÍRÓSZILÁRDSÁGÁNAK VÁLTOZÁSA GŐZÖLÉS HATÁSÁRA .....	90
<b>V</b>	<b><u>ÖSSZEGZÉS .....</u></b>	<b>93</b>
<b>VI</b>	<b><u>TÉZISEK.....</u></b>	<b>95</b>
<b>VII</b>	<b><u>IRODALOMJEGYZÉK.....</u></b>	<b>97</b>
<b>VIII</b>	<b><u>FÜGGELÉK .....</u></b>	<b>103</b>

## Kivonat

A disszertáció a gőzölés két európai (*Robinia pseudoacacia* L., *Quercus robur* L.) és két trópusi (*Intsia bijuga*, *Hymenolobium petraeum*) fafaj különböző mechanikai és fizikai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgálja. E fafajok ragasztott szerkezetekben történő felhasználásához megfelelő kötőanyag rendszerek szükségeltetnek az erősen reaktív felületük miatt. Az itt tárgyalt faanyagok ragasztási tulajdonságainak optimalizálására a szerző gőzölési eljárásokat hajtott végre öt különböző paraméterpár (idő és hőmérséklet) mellett. Az adhéziós tulajdonságok vizsgálatán felül a modifikált faanyag hajlítószilárdságát, keménységét és színét mérte.

A gőzölés eredménye erősen függ a fafajtól. A gőzölés jól alkalmazható eljárás az akác faanyag színének homogenizálására, megváltoztatására. Rövid idejű, alacsony hőmérsékleten végzett kezelés az adhéziós teljesítményt is javítja, míg a színváltozás mértéke hosszú ideig tartó, magas hőmérsékleten végzett gőzölés esetében éri el maximumát. A szapupira és a tölgy színezetváltozása bármely paraméterpár alkalmazása mellett elhanyagolható volt, mindössze a világosság csekély mértékű csökkenése volt megfigyelhető magasabb hőmérsékleteken. A merbau minták színe enyhén változott a kezelés során. Mind a négy fafaj hajlítószilárdsága és keménysége csökkent a kezelés folyamán, a gőzölési idő azonban sokkal fontosabb paraméter mint a gőzölési hőmérséklet, míg a színváltozás szempontjából mind az idő, mind a hőmérséklet ugyanolyan jelentőséggel bír. A szapupira adhéziós tulajdonságai jelentős mértékben javíthatóak hidrotermikus kezeléssel.

# Investigation of the influence of steaming on selected mechanical and physical properties of two european and two tropical hardwood species

## Abstract

Influence of steaming on various mechanical and physical properties of two European (*Robinia pseudoacacia* L., *Quercus robur* L.) and two tropical (*Intsia bijuga*, *Hymenolobium petraeum*) hardwood species were investigated. Each of these wood species require adequate adhesive systems for use as dimensional stock because of their highly reactive surface chemistry. In order to optimize the gluing behaviour of the timbers involved, steaming processes with five different sets of parameters (steaming time and temperature) were carried out. In addition to the adhesive test, bending strength, hardness, and colour of the modified timbers were examined.

The result of steaming highly depends on wood species. For black locust, steaming is a suitable method of colour homogenization and colourization. Short term, low temperature treatment improves the adhesion performance also, whereas colour change value reaches its maximum in the case of long term, high temperature steaming. Hue shift of oak and sapupira was inconsiderable at any applied set of parameters, only a small L\* decrease was observable at higher temperatures. The colour of merbau samples shifted slightly during the treatment. Bending strength and hardness of wood samples in all of the four wood species decreased during the treatment. However, steaming time is more important than temperature while aspect of colour change, both time and temperature have the same significance. Adhesive properties of sapupira can be greatly improved by hydrothermal treatment.

## Előszó – köszönetnyilvánítás

Talán rendhagyó, hogy e köszönetnyilvánítás tudományos dolgozatom első oldalain jelenik meg, de az alább felsorolt kutatók nélkül e dolgozat nem, vagy csak jóval később születhetett volna meg. Mindenek előtt köszönet illeti magyarországi konzulensemét, Dr. Tolvaj Lászlót, egyetemünk Fizika Intézetének tanárát, akinek nemcsak a tudományos életbe történő bevezetést, illetve a kutatómunka iránti szeretet és tisztelet elsajátítását köszönhetem, de jelen dolgozat alapjául szolgáló nemzetközi kapcsolat kiépítését is.

A dolgozat alapját képező tudományos eredmények egy közös holland-magyar faanyag-modifikációs projekt eredményei. Az anyagi forrást a „European Marie Curie Wood Modification Project” által szolgáltatott ösztöndíj jelentette. A kísérletek technikai háttérét a wageningeni SHR Houth Research ([www.shr.nl](http://www.shr.nl)) Faanyagkutató Intézet biztosította. Köszönet illeti Marina E. van der Zee-t, hollandiai konzulensemét a faanyag-modifikáció tudományterületén nyújtott elméleti és gyakorlati segítségéért, illetve a kísérletek tervezéséhez adott tanácsaiért. Hálás köszönet az SHR Intézet minden dolgozójának, különösen a következő kutatóknak, technikusoknak: Johan Nienhuis, Arjan van Hunnik, Bart Pfeiffer, Ewald Pfeiffer, Wiro Cobben.

Külön köszönet feleségemnek, Ágnesnek – aki dolgozatom megfogalmazásakor az egyetlen magyar volt mellettem – a nyugodt családi háttér biztosításáért és a lelki támogatásért.

Köszönet mindazoknak, akik bármilyen módon hozzájárultak e dolgozat létrejöttéhez, de nevük itt nyomtatásban nem jelent meg.

## I BEVEZETÉS

A fa – szemben az arannyal, kőolajjal vagy földgázzal – olyan megújuló nyersanyagforrás, mely napjainkban ismét egyre jobban előtérbe kerül. Ez a tendencia azonban nemcsak gyorsan újratemelődő jellegének köszönhető: a faanyag azon kevés anyagok egyike, mely beépítés, szerkezeti elemmé vagy bútorrá válás után is lélegzik, környezetébe nedvességet ad le, vagy onnét nedvességet vesz fel, s ezer arcával minden egyes embert kivétel nélkül gyönyörködtet. Vannak azonban olyan felhasználási területek, melyek különleges faanyagjellemzőket igényelnek, valamint olyan fafajok, melyek valamely fizikai vagy mechanikai tulajdonsága az adott alkalmazási célnak nem, vagy csak bizonyos változtatások után felel meg. Az ilyen jellegű változtatásokat eszközlő technológiákat együttesen modifikációnak nevezzük.

A faanyagok modifikációja mind a kutatás-fejlesztést, mind a másodlagos fafeldolgozást illetően mára külön szakterületté vált. Az eltérő célok más-más technológiákat igényelnek; egyes technológiák kemikáliákat, mások magas hőmérsékletet, megint mások különféle hullámhosszúságú fényvel történő besugárzást alkalmaznak.

A gőzölés, mint modifikáló, hidrotermikus kezelés során a faanyagot légnemű halmazállapotú víz segítségével hő hatásának tesszük ki. A kezelés során a gőz által közölt hő hatására a természetes állapotú faanyagok szerkezete és alkotórészei fizikai és kémiai átalakuláson mennek keresztül. Ennek következtében egyes tulajdonságai átmenetileg vagy végleg megváltoznak. Az átmeneti tulajdonságváltozások általában a könnyebb megmunkálhatóságot segítik elő, míg a maradandó változások a faanyag nemesítését szolgálják.

Ipari méretű technológiákat tekintve a gőzölés csak egyes fafajok (pl. akác, bükk) esetében rendelkezik nagy hagyományokkal. A laboratóriumi körülmények között végzett kutatás-fejlesztés célú kísérletek beszámolóit mára mind jobban szaporodnak, s egyre több fafajt érintenek (Mitsui 2006, Rozas et al. 1996, Çolak et al. 1996a, Çolak et al. 1996b, Lenth et al. 2003, Ledig et al. 2004).

E tudományos kutatómunka célja két európai, és két trópusi fafaj egyes fizikai, mechanikai tulajdonságának vizsgálata különböző paraméterekkel gőzölt, illetve kezeletlen próbatesteken. A kocsányos tölgy (*Quercus robur* L.), mint Európában őshonos fafaj gőzölésének célja a ragaszthatóság, felületkezelhetőség javítása, az esztétikai megjelenés változtatása lehet. A fehér akác (*Robinia pseudoacacia*) – mely Európában ugyan nem őshonos faj, de térnyerése mára jelentős – hidrotermikus kezelése nagy hagyományokkal rendelkezik, de számos, a felületre jellemző paramétert nem vizsgáltak még, melyek a továbbfeldolgozás szempontjából (pl. felületkezelés) nagy jelentőséggel bírhatnak. A Merbau (*Intsia bijuga*) és az Angelim (*Angelim pedra*) két olyan trópusi fafaj, melyek felhasználása jó mechanikai tulajdonságaiknak, és különleges megjelenésüknek köszönhetően Európában is jellemző. E két fafajnál fellépő egyes technológiai problémákra (ragasztási, felületkezelési nehézségek) a gőzölés megoldást nyújthat.



*A vizsgálatok célja és a célokhoz köthető hipotézisek*

- A. A vizsgált fafajok gőzölés közbeni viselkedésének összehasonlítása széles idő- és hőmérsékleti skálán elvégzett hidrotermikus kezelések révén.

*Hipotézis:* Az eddigi tapasztalatok alapján az akác a gőzölésre legérzékenyebb fafaj, bármely fizikai-, mechanikai jellemző tekintetében.

- B. A gőzölés hatására bekövetkező színváltozás objektív mérése és a színváltozás szempontjából optimális gőzölési paraméterek meghatározása a vizsgált fafajokra. A gőzölési paraméterek hatása a színváltozásra.

*Hipotézis:* Az akáchoz hasonlóan a merbau, a sapupira, és a tölgy színe is megváltozik gőzölés hatására. Hosszabb gőzölési idő és/vagy magasabb gőzölési hőmérséklet nagyobb színváltozást eredményez.

- C. A gőzölés hatására megváltozott szín stabilitásának vizsgálata UV-besugárzás során, illetve a gőzölési paraméterek hatása a színtartósságra.

*Hipotézis:* A vizsgált fafajok színstabilitása gőzöléssel javítható.

- D. Hidrotermikus kezelést követő felületkezelés hatásának vizsgálata az UV-besugárzás során bekövetkező elszíneződésre.

*Hipotézis:* A gőzölés után felületkezelt próbatestek színváltozása kisebb, mint a bevonat nélkül UV sugárzásnak kitett felületeké.

- E. A gőzölési paraméterek befolyásának vizsgálata a szilárdsági tulajdonságok megváltozására.

*Hipotézis:* Gőzölés hatására a vizsgált mechanikai tulajdonságok (hajlítószilárdság, keménység) fafajtól függetlenül romlanak. Hosszabb gőzölési idő és/vagy magasabb gőzölési hőmérséklet nagyobb szilárdságváltozást eredményez.

- F. Az egyes fafajokra jellemző illeszkedési szög meghatározás gőzölés előtt és különböző paraméterű hidrotermikus kezelések után.

*Hipotézis:* Gőzöléssel az egyes fafelületek és a víz között kialakuló illeszkedési szög csökkenthető, ezzel a fafelület nedvesítésén alapuló technológiák javíthatók.

- G. A vizsgált fafajok felületi szabad energiájának meghatározása gőzölés előtt és különböző paraméterű hidrotermikus kezelések után.

*Hipotézis:* Gőzöléssel a faanyagok felületi szabad energiája növelhető.

- H. Kezeletlen és gőzölt faanyagok adhéziós tulajdonságainak vizsgálata ragasztott felületek nyírószilárdságának mérésével.

*Hipotézis:* Gőzöléssel az adhéziós tulajdonságok javíthatók.

## II TÉMAVÁZLAT: A KUTATÁS ELMÉLETI HÁTTERE

### II.1 A faanyag molekuláris felépítése

A faanyag molekuláris szerkezetét azért fontos ismernünk, mert a bekövetkező változásokra annak módosulása ad magyarázatot. A fa fő kémiai összetevői a cellulóz, a hemicellulóz és a lignin. A fő összetevőket még különböző organikus és nem organikus anyagok egészítik ki, melyek a sejttöregekben rakódnak le. Az összetevők százalékos eloszlását az 1. táblázat mutatja.

Összetevő	Mennyiség %-ban	
	fenyők	lombos fák
Cellulóz	40-45	45-50
Hemicellulóz	25-30	22-35
Lignin	26-34	22-30
Extrakt anyagok	0-5	0-10

1. táblázat A fa fő kémiai összetevőinek százalékos aránya (Faipari kézikönyv I.)

#### II.1.1 Cellulóz

A cellulóz a növényi sejtek szerkezeti alapja, ebből következően az élő organizmusok által előállított legfontosabb természetes anyag. Ugyanez a megállapítás érvényes a cellulóz mennyiségi előfordulására is. A bioszférában  $27 \cdot 10^{10}$  t szén található kötött állapotban az élő organizmusokban, ebből a növényekben több mint 99% (Neumüller 1973). Feltételezhetően hozzávetőleg 40%-a a növényekben található szénnek cellulózban kötött, ami azt jelenti, hogy az összes cellulózmennyiség a növényvilágban  $26,5 \cdot 10^{10}$  t.

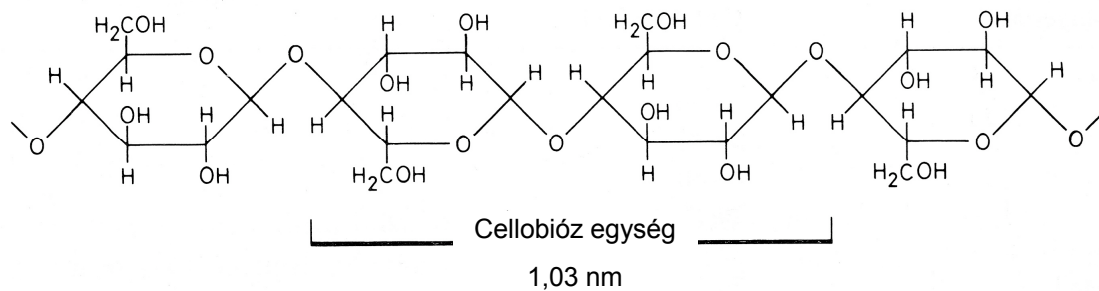
A cellulóz megtalálható minden egyes növényben a legfejlettebb fáktól az olyan primitív organizmusokig, mint a tengeri moszat, az ostorosok, vagy a baktérium. Sőt, a cellulóz még az állatvilágban is fellelhető: a zsákállat hártájának felhám összetevője azonos a növényi cellulózzal (Wardrop 1970). A növényi anyagokban lévő cellulóz mennyisége az eredettől függ. A mag-bolyhok (pamut, kapok) és a hancsrostok (len, kender) magas cellulóztartalmúak. A mohafélék, a zsurló és a baktériumok kevés cellulózt tartalmaznak. A cellulóz izolációja erősen befolyásolt a sejtfal egyéb kísérő összetevőitől. Az olyan vegyületek, mint a zsírok, viaszok, proteinek, pektin könnyen extrahálhatók szerves oldószerek és hígított lúgok segítségével.

A fában a poliózok és a lignin nemcsak a cellulóz kísérőanyagai, de közvetlenül kapcsolódnak is ahhoz, így az elválasztás intenzív kémiai kezelést igényel. Az elválasztott cellulóz többé-kevésbé „szennyezett” marad. Faanyagból 100%-os tisztaságú cellulózt az alfa-cellulóz további intenzív feldolgozásával (részleges hidrolízissel, oldással és kicsapatással) nyerhetünk. A végtermék igen rövid molekula láncokból áll (Jayme, Knolle 1965).

A cellulóz hosszú láncú óriásmolekulája szőlőcukor (D-glükóz) molekulákból épül fel. A D-glükóz molekulák kapcsolódását az 1. ábra szemlélteti. A hatoldalú gyűrűs molekulát 1 oxigén- és 5 szénatom alkotja. Minden glükózmolekulához egy elsődleges és két másodlagos hidroxil- (OH) csoport kapcsolódik. A polimerizáció során a szőlőcukor  $C_6H_{12}O_6$  molekulája egy vízmolekulát veszít, így a cellulózmolekula képlete  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . Az anhidro-glükopiranoz egységek  $\beta$ -(1-4) glükozid-kötéssel kapcsolódnak. Két szomszédos glükóz egység egy vízmolekula eliminációjával kapcsolódik az 1 és 4 szénatomok hidroxil csoportján keresztül. A polimerizáció fokától (n) függően a cellulózmolekula 8000-10000 cukormolekulából épül

fel, s a cellulózmolekula hossza 5  $\mu\text{m}$ . A hidroxil-csoport a kristályos cellulóz régióban a molekulák közötti kötést biztosítja, míg a nem kristályos régióban a vízmolekulákat köti meg. Az egymás után következő glükóz-egységek egymáshoz képest  $180^\circ$ -kal elfordult állapotban vannak, és hosszú egyenes molekulaláncot alkotnak. Bár a cellulózlánc mindkét végén találunk 1-1 OH-csoportot, ezek eltérő viselkedést mutatnak. A C1 OH-csoport a gyűrűképződésből egy molekulán belüli hemiacetál kötésből származó aldehid hidrát csoport, redukáló tulajdonságokkal. A lánc másik végének C4 OH-csoportja nem-redukáló alkoholos hidroxil.

A fában lévő cellulóz mintegy 70 %-a kristályos formában van jelen. Itt a cellulózmolekulák meghatározott sík rétegben helyezkednek el, és a rétegeken belül erős hidrogénkötések vannak. A kristályos régió a víz számára átjárhatatlan.



**1. ábra** A glükóz egységek kapcsolódása, a molekulalánc középső része (cellubióz egység)



**2. ábra** Redukáló és nem-redukáló csoportok a cellulózlánc végén

Az egyes kristályos régiók hossza kb. 60 nm, s köztük nem kristályos (amorf) régiók helyezkednek el. Az amorf részben a víz erősen kötődik a hidroxil-csoportokhoz. A cellulózmolekula a nem kristályos zónában is megtartja nagyfokú hosszanti rendezettségét, s ezzel biztosítja a faanyagok nagy szálirányú húzószilárdságát. Az egymás melletti rétegekben elhelyezkedő cellulózmolekula-láncok a másik két fő alkotóelemből ágazottak, vagyis hemicellulózba és ligninbe. A beágyazott cellulóz molekulaláncok alkotják a mikrofibrillát.

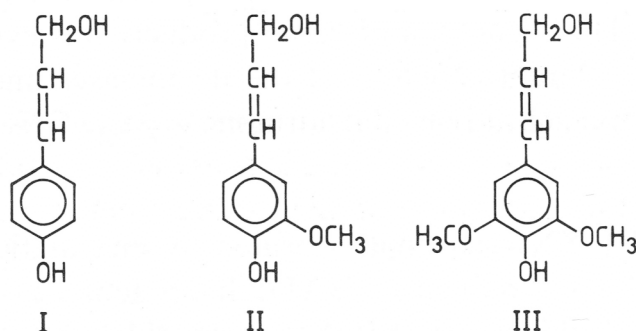
## II.1.2 Hemicellulóz

Szintén szénhidrát. Összetétele különböző a fenyőfélékben és a lombos fafajokban. A hemicellulóz különböző poliszacharidok keveréke, melyeknek alkotó monomer elemei a glükózok, mannózok, galaktózok, xilózok, arabinózok, metil-glükuronsavak és galakturonsavak. A fenyőfélékben a fő alkotóelemek a galakto-glükomannan és az arabino-glükoronoxilán, míg lombos fafajokban a glükoron-oxilán és a glükomannan. Ezeknek a keverékeknek a kristályosodási foka alacsony és a polimerizáció foka is csak 150-200 közötti. A molekulaláncok rendezettsége messze elmarad a cellulózmolekula rendezettségétől, ezért a hemicellulóz szilárdsága mind nyomásra, mind húzásra kisebb.

### II.1.3 Lignin

A cellulóz mellett a legfontosabb, nagy mennyiségben előforduló szerves polimer összetevő a növényvilágban. A lignin sejtfalba épülése biztosítja a növények számára a Föld talajának meghódítását, s oly mértékben növeli a mechanikai szilárdságot, hogy az olyan magas növények, mint a fák, függőleges helyzetben tudnak maradni. A faanyagban 20-40%-ban van jelen. A ligninnek döntő szerepe van a víztranszport szempontjából is. A növényi sejtfal poliszacharid összetevői erősen hidrofil tulajdonsággal rendelkeznek, ezért víz által könnyedén átjárhatóak. Ezzel szemben a lignin sokkal inkább hidrofób. A poliszacharidok lignin által történő térhálósodása ezáltal a víz abszorpciójának gátját jelenti. Ilyen módon a lignin lehetővé teszi az edények effektív vízszállítását.

A lignin makromolekulák keletkezése a növényekben bonyolult biológiai, biokémiai és kémiai rendszereket foglal magába, melyeket alaposan tanulmányoztak, és több ízben felülvizsgáltak. Számos radioaktív szénnel ( $^{14}\text{C}$ ) végzett kísérlet bizonyította, hogy a lignin alapvető szerkezeti egysége a fenil-propán vegyületcsoport: a p-kumarilalkohol (I), a koniferil alkohol (II) és a szinapil alkohol (III). A lignin bioszintézis során a képződő három alkoholból gyökös mechanizmusú polimerizációs folyamatban szintetizálódik.



3. ábra A lignin építőelemei: p-kumarilalkohol (I), koniferil alkohol (II) és szinapil alkohol (III).

A lignin bioszintézise különbözik a fenyőfélékben és a lombos fafajokban, ezért kémiai összetétele is más-más lehet. A fenyőfélékben keletkező lignin a fenyőalkohol polimerizációja során keletkezik, és a fa tömegének 25-34%-át teszi ki. A lignin két jól elkülöníthető helyen található a fában: cellulózzal és hemicellulózzal együtt a sejtfalon belül, és mint kötőanyag az egyes sejtek külső felületén.

### II.1.4 Járolékos anyagok

A faanyag a makromolekulás komponensek mellett viszonylag kis mennyiségben tartalmaz vízben, vagy szerves oldószerben oldódó vegyületeket is. Az oldhatóság miatt ezeket a vegyületeket extraktanyagoknak, a fa tulajdonságaiban betöltött szerepük miatt járulékos anyagoknak nevezik.

A járulékos anyag fogalma egy sor olyan vegyületet takar, melyek a faanyagból kioldhatók poláros vagy nem-poláros oldószerekkel. Szűkebb értelemben az extraktívok azok a vegyületek, melyek oldhatóak szerves oldószerekben, és ilyen értelemben az extraktív fogalom használatos a faanyag analízisekor. A vízdoldékony karbohidrátok és a szervesetlen vegyületek azonban szintén a kivonható összetevőkhöz tartoznak.

A szerves oldószerekben oldódó rész mindössze néhány százalék a mérsékelt övi faanyagok esetében, ám a koncentráció sokkal magasabb lehet a fatest bizonyos részeiben, pl. az

ágakban, a gyökérben, a gesztben és a sérült helyeken. Viszonylag nagy mennyiségű extraktanyagot tartalmaznak bizonyos trópusi és szubtrópusi fafajok (2. táblázat).

A járulékos anyagok összetétele és mennyisége fafajonként eltérő, de függ a földrajzi elhelyezkedéstől és az évszaktól is (Swan 1968; Dahm 1970; Snajberg, Zavarin 1976).

Fafaj tudományos neve	Holocellulóz %	Cellulóz %	Polióz %	Pentozán %	Lignin %	Etanol-benzol extraktum %	Forróvizes extraktum %	Hamu %
<i>Abies alba</i>		42,3		11,5	28,9	2,3		0,8
<i>Picea abies</i>	80,9	46,0	15,3	8,3	27,3	2,0	2,0	
<i>Fagus spec.</i>	69,5		28,3	16,1	22,8	1,4	0,9	
<i>Quercus robur</i>		41,1		22,2	29,6	0,4	12,2	0,3
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	81,7	50,1		23,7	20,6	2,8	4,6	0,3
<i>Tectona grandis</i> (Congo)		39,1		13,0	29,3	13,0	1,8	0,7
<i>Aucoumea klaineana</i>		47,9		15,0	31,4	1,4	0,9	0,4

**2. táblázat** Néhány fafaj kémiai összetétele (Fengel és Wegener 1984)

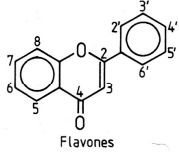
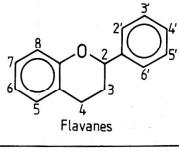
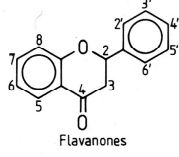
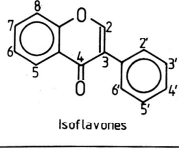
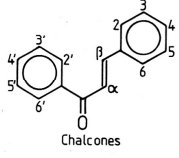
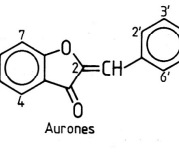
Az alkalmazott extrahálószer alapján a járulékos anyagok a következőképpen csoportosíthatók:

- Egyszerű fenolok és polifenolok, melyek tovább osztályozhatók lignánokra és flavanoidokra.
- Terpének és gyanták.
- Cukrok, ciklitek, zsírok, viaszok és alkaloidok.

A járulékos anyagok zömében utólagos elváltozások eredményeképpen jönnek létre, és rakódnak le a sejtüregekben. A fa növekedésekor a belső évgyűrűk felhagynak a víz szállításával majd az élettevékenységgel, és a faparenchima, valamint a bélsugársejtek elhalnak. Az elhaló parenchima-elemek gesztesítő anyagokat választanak ki és raknak be a sejtüregekbe. A gesztesítő-anyagok közé sorolhatók a cserzőanyagok, a festőanyagok, a gyanták, a fagumi, a lignánok, a flavonoidok, a stilbének, valamint egyéb szerves és szervetlen anyagok. Ez utóbbiak fafaj-specifikusak is lehetnek, pl. a Pinus-félékben a pinosylvin, az akácban a robinetin, a tölgyben a tannin. A *Quercus* illetve *Robinia* fajok fájában nagy mennyiségben található meg a quercetin és robinetin nevű flavonoid (3. táblázat).

A gesztesedési folyamatban egyrészt az említett anyagok rakódnak le a sejtüregekbe, másrészt ún. töltősejtek (tiliszek) hatolnak be az edényekbe, és eltömik azokat.

Az extrakt anyagoknak nagy jelentőségük van a faanyag tartóssága és színe szempontjából.

Alapszerkezet	OH-(OCH <sub>3</sub> )- csoport helyzete	Elnevezés	Előfordulás
 <p>Flavones</p>	3, 7, 3', 4'	Fisetin	<i>Acacia, Rhus, Schinopsis</i>
	3, 5, 7, 4' 3, 7, 3', 4', 5'	Kaempferol Robinetin	<i>Afzelia</i> <i>Acacia, Robinia, Schinopsis</i>
	3, 5, 7, 3', 4'	Quercetin	<i>Acacia, Aesculus, Quercus</i>
	3, 5, 7, 2', 4'	Morin	<i>Chlorophora</i>
 <p>Flavanes</p>	3, 7, 3', 4'	Fisetinidol	<i>Acacia</i>
	3, 4, 7, 3', 4'	Mollisacacidin	<i>Acacia, Gleditsia</i>
	3, 5, 7, 3', 4'	Catechin	<i>Acacia, Schinopsis</i>
	3, 4, 5, 7, 3', 4'	Leucocyanidin	<i>Schinopsis</i>
 <p>Flavanones</p>	7, 3', 4'	Butin	<i>Acacia</i>
	3, 7, 3', 4'	Fustin	<i>Acacia, Schinopsis</i>
 <p>Isoflavones</p>	5, 4', (7)	Prunetin	<i>Prunus, Pterocarpus</i>
	5, 3', 4', (7)	Santal	<i>Pterocarpus, Santalum</i>
 <p>Chalcones</p>	3, 4, 2', 4'	Butein	<i>Acacia, Pseudosindora</i>
	3, 4, 2', 3', 4'	Okanin	<i>Cyclicodiscus</i>
	α, 3, 4, 2', 4'	Pentahydroxy-chalcone	<i>Peltogyne, Trachylobium</i>
 <p>Aurones</p>	6, 3', 4'	Sulfuretin	<i>Pseudosindora</i>
	6, 3', 4', (4)	Rengasin	<i>Melanorrhoea, Pseudosindora</i>
	2, 6, 3', 4'	Tetrahydroxybenzylcoumaranone	<i>Schinopsis</i>
	2, 6, 3', (4')	Methoxy trihydroxybenzylcoumaranone	<i>Schinopsis</i>

3. táblázat Különböző keményfa fajokból izolált flavonoidok (Fengel és Wegener 1984)

## II.2 A hőmérséklet hatása a faanyagra

A feldolgozás több területén a faanyagot magas hőmérsékletnek tesszük ki. Ilyen művelet pl. a szárítás, a méretstabilizálás, a rostosítás, a farostlemez- és forgácslapgyártás. Mivel a hőmérséklet befolyásolja a faanyag fizikai, szerkezeti és kémiai tulajdonságait, számtalan tudományos közlemény érinti ezt a területet. Sandermann és Augustin (1963), Košik et al. (1968) valamint Beall és Eickner (1970) publikációikban a korábbi eredmények összefoglalásáról olvashatunk.

Az említett technológiai műveletek során alkalmazott hőmérsékletek általában nem haladják meg a 200°C-ot a degradáció elkerülése érdekében. Mindazonáltal nem a hőmérséklet az egyedüli, mely változásokat idézhet elő a faanyagban. Vannak más tényezők is, melyek befolyásolják a hődegradációs folyamatokat. Ilyenek a kezelés időtartama, a környezet, a nyomás és a nedvességtartalom. Ilyen okok miatt bizonyos körülmények között már 100°C hőmérséklettől megfigyelhetők a faanyagban bekövetkező változások.

Kollmann és Schneider (1963, 1964) egyes fizikai tulajdonságok, pl. szorpció, száraz fatömeg, száraz faanyag dimenziói megváltozását figyelték meg. Lucfenyő (*Picea abies*) 24 órán át tartó melegítése során a tömegvesztés 120°C-nál 0,8%, és ez az érték 15,5%-ra növekedik 200°C hőmérsékletnél (Fengel 1966).

A nedvességtartalom jelentősége pl. a faanyagok termikus lágyításán keresztül érthető meg. A puha- és keményfák lágyulása már 180°C-tól megfigyelhető, a maximum 380°C-nál van (Chow, Pickles 1971). Nedvesség jelenlétében egy másik lágyulási maximum is megjelenik 180°C alatt. Minél magasabb a nedvességtartalom, annál nagyobb az abszolút lágyulás értéke, és annál alacsonyabb a lágyulási hőmérséklet. A faanyag vízben történő melegítése (hidrotermikus kezelése) során bekövetkező változásokat túlnyomó részben hidrolitikus reakciók határozzák meg.

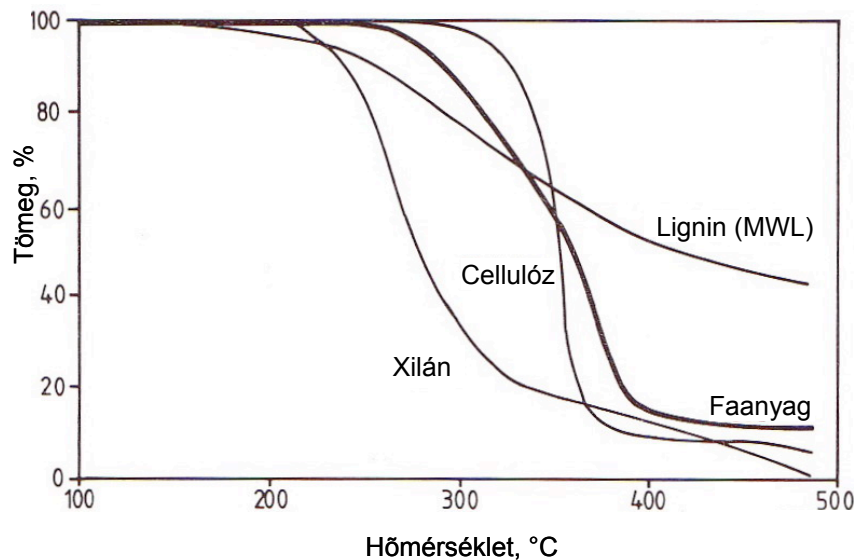
Szerkezeti változások, az összetevők átalakulása, gáznemű degradációs anyagok megjelenése 200°C feletti hőmérsékletnél figyelhetők meg. A faanyag pirolízise 270°C felett kezdődik. Emelkedő hőmérséklet a gáznemű anyagok gyarapodását eredményezi, az 500°C feletti hőmérsékleteket pedig a faanyag elgázosítására használják.

A faanyag összetevői termikus kezelés során más változásokat mutathatnak elkülönített állapotban, mint a sejtfalban egyesülve. Mint azt a 4. ábrán bemutatott tömegvesztés is bizonyítja, a cellulóz, a poliózok és a lignin degradációja jelentős mértékben eltérhet egymástól ill. a faanyag egészének degradációjától.

A differenciális termikus analízis (DTA) módszere lehetővé teszi a hő okozta reakciók mérését folyamatosan növekvő hőmérséklettel melegített faanyagban. Ennek során az összehasonlító inert, és a változást szenvedő vizsgálandó anyag közötti hőmérsékletkülönbséget regisztráljuk. Ezt a módszert több faanyag esetében alkalmazták, így pl. lucfenyőn (*Picea abies*), duglászfenyőn (*Pseudotsuga menziesii*), bükkön (*Fagus sylvatica*), vörös égeren (*Alnus rubra*) (Arseneau 1961; Sandermann, Augustin 1963; Košik et al. 1968b; Chow, Pickles 1971; Shafizadeh, McGinnins 1971). Keylwerth és Christoph (1960) akác (*Robinia pseudoacacia*) és teak (*Tectona grandis*) faanyag 220°C hőmérsékletnél kezdődő termogramját készítették el.

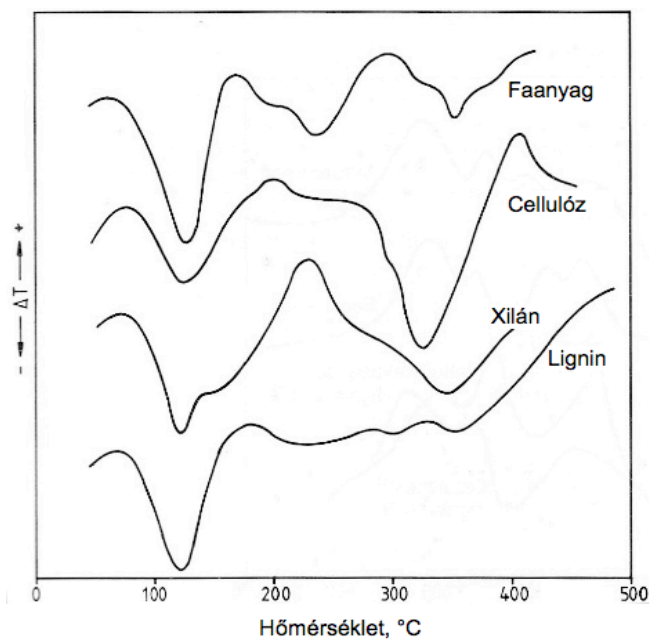
Általánosságban a termogramok először egy endoterm maximumot mutatnak a 120-150°C tartományban, melyet a sokkal erősebben abszorbeált víz kigőzölgésének tulajdonítanak (5. ábra). Az exoterm maximumok 200-250°C és 280-320°C hőmérsékleteknél, valamint 400°C

felett a faanyag összetevőinek degradációját jelzik. A 5. ábrán bemutatott cellulóz, xylán és lignin termogramok egymástól és a faanyag termogramjától is különböznek. A faanyag termogramján megjelenő endoterm és exoterm maximumok csak bizonyos határok között vezethetők vissza az egyes összetevők maximumaira.



4. ábra Nyárfa (*Populus spp*) és összetevőinek termogravimetrikus diagramja (Shafizadeh, DeGroot 1976)

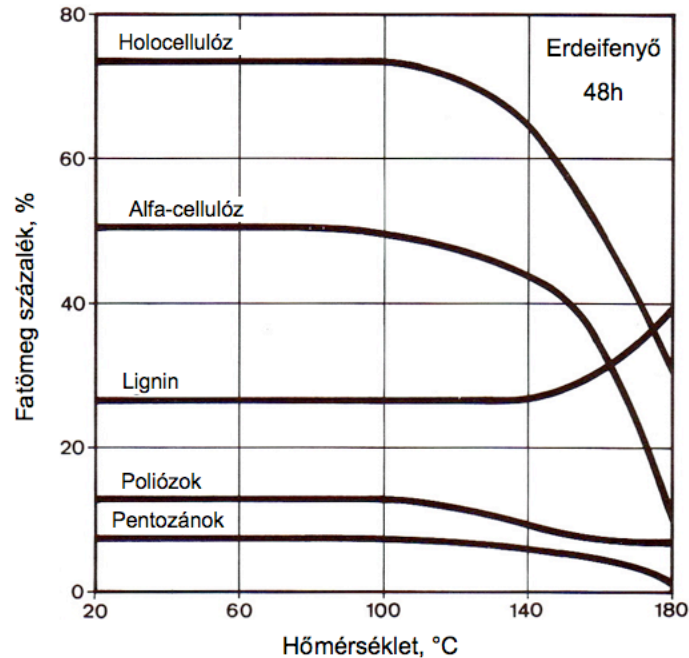
Egy hasonló módszer (differenciális kalorimetrikus analízis, DCA) segítségével Beall (1971) számos polióz egyedi termogramját fedezte fel a 20-800°C tartományban. A cellulóz, a poliózok és a lignin termogramjait ráadásul az összetevő izolációjának módja is befolyásolja. Az oxigénmentes környezetben végrehajtott termikus analízisek esetében az exoterm maximumok a magasabb hőmérsékletek irányába tolnak. Az összetevők oxidációja fontos tényezőnek látszik a termikus csúcsok szempontjából. Sandermann és Augustin (1963) rámutattak, hogy az oxidált faanyag-komponensek endo- és exoterm csúcsai alacsonyabb hőmérsékleteknél találhatóak, mint a megfelelő, nem-oxidált összetevőké.



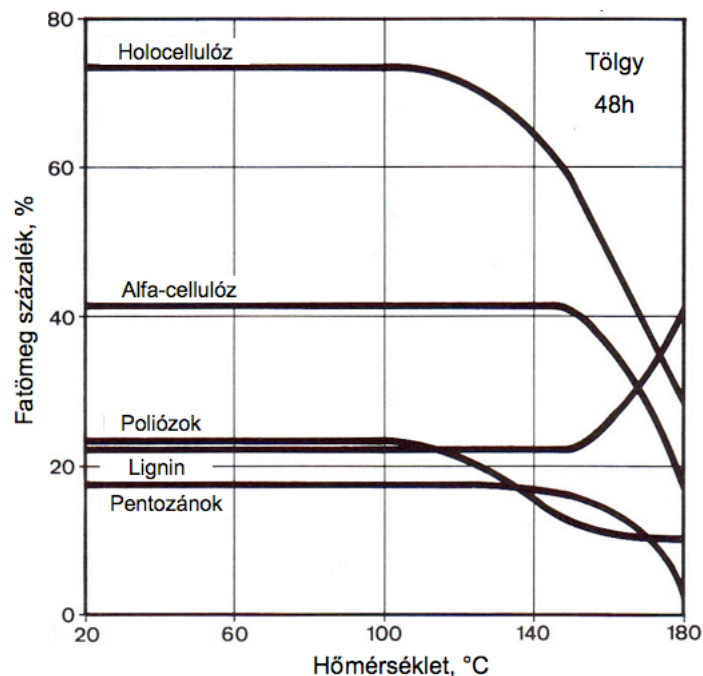
5. ábra Bükkfa (*Fagus sylvatica*) és összetevőinek differenciális termikus analízise (DTA) (Košík et al. 1968b)



A különböző hőmérsékleten hőkezelt faanyagok kémiai elemzése az összetevők viszonylag nagy stabilitását mutatják, amennyiben a kezelési hőmérséklet nem haladja meg a 100°C-ot, a kezelési idő pedig a 48 órát (6. és 7. ábra). Magasabb hőmérsékleteken a poliszacharid-tartalom egyre inkább csökken, a poliózok nyilvánvalóan sokkal érzékenyebben reagálnak, mint a cellulóz.



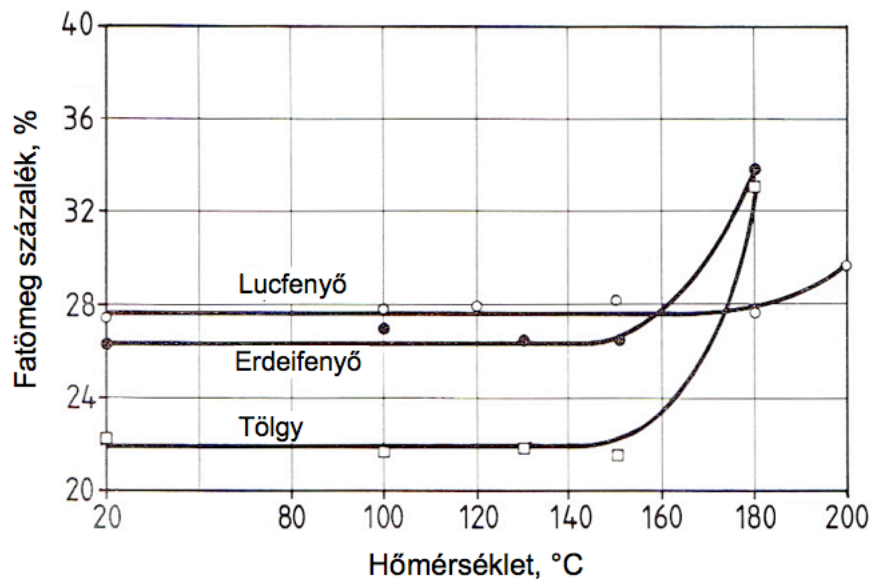
6. ábra Erdeifenyő (*Pinus sylvestris*) összetételének módosulása különböző hőmérsékleten végzett, 48 órás időtartamú melegítés után (Kollmann és Fengel 1965)



7. ábra Tölgy (*Quercus robur*) összetételének módosulása különböző hőmérsékleten történő, 48 órás időtartamú melegítés után (Kollmann és Fengel 1965)

A tűlevelűek alfa-cellulóza viszonylag nagy mennyiségű poliózt és visszamaradt lignint tartalmaz. Az alfa-cellulóz csökkenése, mely 100°C-nál kezdődik, e kísérő vegyületek csökkenésére vezethető vissza, tehát a tiszta cellulóz mennyisége konstans marad 150°C-ig

tülevelűekben is (Fengel 1967). A lignintartalom szintén állandó marad egy széles hőmérsékleti tartományban; mennyisége 140-150°C felett növekszik (8. ábra).



**8. ábra** Lucfenyő, erdeifenyő és tölgy fafajokból izolált, savban nem oldódó lignin mennyiségének változása különböző hőmérsékleteken, 24 óráig tartó melegítés következtében (abszolút száraz, extraktmentes faanyagra vonatkoztatva) (Kollmann és Fengel 1965, Fengel és Przyklenk 1970)

A cellulóz termikus degradációjának első lépése a makromolekulák hasadása. A visszamaradt cellulóz polimerizációs foka szintén csökken. Hőkezelt lucfenyőből nyert cellulóz polimerizációs foka (DP) 120°C-ig állandó marad, majd a hőmérséklet emelkedésével rohamosan csökken (Fengel 1967). Izolált cellulóz hőkezelése a polimerizációs fok csökkenését eredményezte már 100°C-on is, bár a melegítési idő csak 20 perc volt (Roffael, Schaller 1971). A degradáció mértékét a mintadarab nedvességtartalma is befolyásolta.

A cellulóz kristályszerkezete nem változik egy bizonyos hőmérsékletig, mely a körülményektől függően akár 200°C is lehet. A hőkezelt lucfenyőből nyert lúgálló cellulóz kristályossága 200°C-ig növekedett a kevésbé rendezett molekulák degradációja miatt (Fengel 1967).

Bár hőtani szempontból a lignin tűnik a faanyag legstabilabb összetevőjének, különböző változásokat figyeltek meg már 200°C alatt is. Hőkezelt faanyagok lignintartalmának meghatározása a hőmérséklet 200°C-ig történő emelésével a nem-hidrolizálható gyökök gyarapodásáról tanúskodott (Kollmann, Fengel 1965; Fengel, Przyklenk 1970). Kürschner és Melcerová (1965) bükk faanyagon elvégzett kísérleteik során a lignin tartalom emelkedését figyelték meg 100°C felett, mintegy 28 napig tartó felmelegítés mellett. A 28. napon, 160°C-ot elérve a savban nem oldódó lignin tartalom kevesebb, mint 1% volt.

### II.3 A faanyag degradációja fény hatására

A faanyag – mint a legtöbb természetes és szintetikus polimer – a napfény UV sugarait abszorbeálja, s az elnyelt energia hatására fotolitikus, foto-oxidatív, és termo-oxidatív reakciók mennek benne végbe (Andrady et al. 1998), melyek végül annak degradációját eredményezik (Rabek 1995; Scott 1990). A degradáció az esztétikai értéket csökkentő pusztas felületi elszíneződéstől a mechanikai tulajdonságok nagymértékű csökkenéséig terjedhet (Andrady 1998; Derbyshire 1995; Kiguchi és Evans 1998). Kültéri alkalmazásoknál a fény, a nedvesség és a hőmérséklet együttes hatása képes a lignocellulóz hálózat teljes megsemmisítésére.

A fény és az ionizált sugarak hatásai érdekesek technológiai szempontból. A fény ilyen szempontból elektromágneses hullámok sorozata, mely ultraviola, látható és infravörös sugarakat foglal magába. A látható és a szomszédos ultraviola fény a faanyag színét fafajtól függően világosabbra vagy sötétebbre változtathatja. Néhány fafaj színe elhalványodik vagy szürke lesz, mások sárgulnak, vöröses vagy barnás színezetet nyernek. A szín a faanyag összetételétől, sok esetben főképpen a járulékos anyagoktól függ (Sandermann, Schlumbom 1962). E színváltozások javíthatják egyes fafajok felületének megjelenését, más fafajok ellenben esztétikailag károsodnak.

A színváltozást további tényezők is befolyásolják. Ilyen a hőmérséklet, a nedvesség és a légkör. A lucfenyő és a vörösfenyő például napfény és eső együttes hatására elszürkül; esőtől védett helyen azonban sötét vörösesbarnára színeződnek (Kleinert 1970).

Az öregedés további látható jele a fafelület durvulása, mely makroszkopikusan a faszerkezet degradációjáról, mállásáról tanúskodik.

Kémiai reakciót csak olyan hullámhosszúságú fény indít, amelyiknek fotonja képes felhasítani kémiai kötést. A faanyag, ill. a fakomponensek látható és UV abszorbancia-spektrumát megvizsgálva megállapítható, hogy a szénhidrát komponensekben csak a napfény spektrumában lévő rövidebb hullámhosszúságú fény tud kémiai kötést hasítani (Fengel és Wegener 1984). Mivel a fény behatolóképesége a fába csekély, a fény hatására lejátszódó reakció tipikusan felületi reakció.

A vegytani vizsgálatokon kívül számos mikroszkópos megfigyelést is végeztek a faanyag szerkezetében öregítés során bekövetkező változások vizsgálatára. Futó (1974) megfigyelései szerint a degradáció viszonylag alacsony besugárzási energia mellett a középlamellában kezdődik. Hosszabb és intenzívebb kitettség esetén a másodlagos sejtfal is sérül. A sejtfal összetevőinek degradációja UV besugárzás hatására annak zsugorodását eredményezi, mely a középlamella mentén, valamint – különösen a kései farészben – az S1 és S2 rétegek határán hajszáltrepedésekhez vezet (Miniutti 1973). Az S2 réteg mikrofibrilla elrendeződését követő repedések szintén megfigyelhetők. A fenyők udvaros gödörkéi hajszáltrepedések által megnagyobbodnak, megrepednek.

Futó (1974, 1976) az UV besugárzás hatására bekövetkező tömegveszteséget tanulmányozta 240-310 nm-es hullámhossz tartományban. Tapasztalata szerint a tömegveszteséget nagymértékben befolyásolta a hőmérséklet és a sugárzási energia. A tömegveszteség alacsony hőmérsékleten is nagyobb volt, ha a mintákat víz alatt sugározta be, ami azt jelzi, hogy az illékony anyagok mellett vízben oldódó anyagok is keletkeznek.

Bár a faanyag minden összetevőjét támadja a sugárzás, a famintákat és más lignocellulóz alapú anyagokat UV sugárzásnak alávető kísérletek megerősítik azt a tényt, hogy a lignin jelenléte gátolja a cellulóz fotolitikus degradációját. Ez a jelenség a lignin erős UV abszorpciójával és jó autooxidációs képességével magyarázható (Kleinert 1970). Ezért a

faanyag ultraviola fényabszorpcióját elsősorban a lignintartalom határozza meg. Norrström (1969) szerint a lignin 80-95%-ban, a szénhidrátok 5-20%-ban, az extraktívok pedig kb. 2%-ban járulnak hozzá az abszorpciós állandóhoz.

A tiszta cellulózban 340 nm-nél nagyobb hullámhosszúságú fény hatására csak oxigén jelenlétében indul meg lassú degradáció. A potenciális kromofór csoport a glükozidos kötés a polimerben. Gyorsabb a gyökképződés oxigén jelenlétében 280 nm-nél rövidebb hullámhosszúságú fénysugárzás esetében. Ekkor gyökös mechanizmusú lánchasadás mellett – mely a polimerizációs fok csökkenését eredményezi – elsősorban hidroperoxidok képződése mutatható ki. A legintenzívebb a bomlás a 254 nm-nél rövidebb hullámhosszúságú fény esetében. A cellulóz a napfény hatására csak kismértékben degradálódik. Jelentős hatása van a degradációra a cellulóz morfológiájának, kristályosságának. A kristályos cellulóz kevésbé degradálódik, mint az amorf.

Fény hatására elsősorban a ligninben keletkeznek gyökök, ebben találhatóak a fő kromofór vegyületek, így az védi a cellulózt a fény ellen, mintegy tárolva az energiát. A ligninnek 280 nm-nél van egy abszorpciós csúcsa, amelyik 400 nm fölé is elnyúlik. Ezért az abszorbanciáért a ligninben lévő éterkötések, primer és szekunder alkoholos, valamint a fenolos hidroxilcsoportok, a karboxil- és karbonilcsoportok és az aromás szerkezet – az előbbi funkciók csoportokkal való speciális kölcsönhatásban – a felelősek. A kromofór csoportoknak és szerkezeteknek a fényvel való kölcsönhatása szabad gyök képződéséhez vezető reakciókat indít. A lignin összetett szerkezete miatt azonban e gyökök azonosítása meglehetősen bonyolult.

A lignin bomlás és a karbonilkötés képződés az oxidációs folyamat során kimutatható Fourier transzformációs (FT) IR-ATR technikák segítségével (Anderson, 1991). Hon és Ifju (1978) megállapították, hogy a fény behatolása a fába a hullámhossz függvénye, és az UV behatolás nagyjából 75 $\mu$ m. Egy későbbi kutatás (Kataoka és Kiguchi, 2001) szintén az FT-IR technikát felhasználva rámutatott, hogy a besugárzás ideje és a degradálódott réteg vastagsága exponenciális viszonyban van. Az aromás és karbonil kötéseket vizsgálva megállapították, hogy a roncsoló hatás folyamatosan mélyebbre hatol a fába, noha a penetráció sebessége a besugárzási idő előrehaladtával csökken.

A lignocellulóz anyagok és a fafelületek sárgulása jelzi a lignin és a holocellulóz modifikációját (Heitner, 1993; Hon, 2000; Mitsui, 2001). Számos tanulmány foglalkozik a sárgulással vagy a világosság változásával, bemutatva, hogy a sárgulás vagy a világosság mérése felhasználható a lignocellulóz anyagok fotodegradációjának jellemzésére.

Lucfenyő UV sugárzás hatására bekövetkező sárgulását vizsgálva megállapították, hogy a fafelület változása az IR spektrumban bizonyítja az UV fény kémiai szerkezetet változtató hatását. Az UV fény abszorpciója a lignin degradációját és a – CH<sub>2</sub> – vagy – CH(OH) – csoportok fotooxidációját idézi elő.

Tolvaj és Faix (1995) lucfenyő, erdeifenyő, vörösfenyő, nyár és akác fafajok 200 órás UV besugárzását végezték el. A CIE L\*a\*b\* színrendszer segítségével a színinger különbség ( $\Delta E^*$ ) gyors változását állapították meg a besugárzás első 25-50 órájában. Megfigyelték az egyes mintadarabok sárgulását, azaz egy jellegzetes meredek eltolódást  $\Delta b^*$  pozitív irányába a  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  koordináta rendszerben. Az akác járulékosan egy vörös irányú eltolódást mutatott. DRIFT mérések az aromás szerkezet degradációját és nem konjugált karbonil és karboxil csoportok képződését tárták fel.

Gőzölt faanyag kitétségi vizsgálatával eddig kevés kutatómunka foglalkozott. Tolvaj és Papp (1999) 24 hónapig tartó kültéri kitétségi vizsgálat során megállapították, hogy a gőzölt akác is veszít barna színéből, tehát a kültéri felhasználásra szánt faanyagot felületkezeleni kell az

eredeti szín megóvása érdekében. A természetes állapotú akác faanyag érdeessége növekedett, de kisebb mértékben, mint a kontrollnak használt tölgyé, tehát jól helyettesítheti azt kültéri alkalmazásokban.

## II.4 A hidrotermikus kezelés technológiája

A faanyag hidrotermikus kezelésének – amely általában gőzölés vagy főzés útján történik – két alapvető célja van: a megmunkálhatóság javítása és a nemesítés. A kezelés során minden esetben a fa valamilyen eredeti tulajdonságának vagy állapotának (szilárdság, rugalmasság, nedvességtartalom, szín, zsugorodás-dagadás stb.) megváltoztatására törekszünk.

A hidrotermikus kezelés általában az alábbi előnyökkel jár:

- a faanyag megmunkálhatósága könnyebbé válik,
- jobb méretstabilitás; zsugorodás-, dagadás mértéke csökken,
- a fában lévő feszültségek megfelelő technológia alkalmazásával csökkenhetnek,
- a faanyag sterilizálódik,
- könnyebb technikai szárítás, egyes szárítási paraméterek javulnak,
- a faanyag színe megváltozik,
- telítés, impregnálás előkészítése, megkönnyítése,
- a vízben oldódó anyagok kilugozódnak.

A faanyag kezelése azonban nem kívánatos hátrányos tulajdonságok kialakulását is eredményezheti:

- csökken a hajlító- és egyéb szilárdság,
- a gomba- és rovarfagyás lehetősége fokozódik,
- a fülledés állapota nem javul, esetenként romlik.

Ezek figyelembevételével a hidrotermikus kezelés egyik vagy másik módszerét a gyakorlatban a fafeldolgozás következő területein alkalmazzák:

1. A furnér- és lemezgyártásban, a rönkök vagy prizmák késelésének vagy hámozásának előkészítésére.
2. Hajlított fagyártmányok előállításánál az alakíthatóság fokozására.
3. Rostanyagok előállításánál a fa belső kötéseinek fellazítására.
4. Bizonyos fafajok nemesítésénél, a felhasználás szempontjából kedvezőtlen tulajdonságok megváltoztatására.

A hidrotermikus kezelés módszerét és technológiáját és ennek paramétereit (időtartam, hőmérséklet, nyomás) mindig az elérendő feldolgozási vagy nemesítési cél, és a kezelésre kerülő faanyag jellemzői (fafaj, méret, nedvességtartalom) határozzák meg.

A faipari gyakorlatban – az alkalmazott hőközvetítő közeg, vagyis a víz halmazállapota szerint – kétféle hidrotermikus kezelési eljárás fordul elő:

- a gőzölés és
- a főzés.

A két eljárás, lényegét tekintve, legtöbbször ugyanazon cél elérésére alkalmazható, de ezen túlmenően a kezelendő faanyag állapota és felhasználási területe, valamint egyéb mellékkörülmények (adottságok) és gazdaságossági szempontok döntik el a kedvezőbb eljárás megválasztását.

## II.4.1 Gőzölés

Gőzöléssel végrehajtott hőkezelést alkalmaznak a furnér- és lemezgyártásban, hajlított fa alkatrészek előállításánál, farostlemez-gyártásban és bizonyos fafajok nemesítésére. A gőzölés leggyakoribb formája a fűrészáru (és egyéb fűrészelt félkészgyártmány, pl. fríz) gőzölése és a rönkgőzölés.

A faanyag a gőzben hőt vesz fel és azt a belső rétegekbe vezeti. Ennek során többé-kevésbé képlékennyé válik. A kémiai átalakulás miatt egyes fafajoknál színváltozás lép fel, és a fa ellenállása csökken a gombafertőzéssel szemben. A túlzott gőzölés károsodáshoz vezet, ezért nagy gondot kell fordítani a fafajtól függő hőmérséklet és gőzölési időtartam helyes megválasztására és betartására.

A *fűrészáru* gőzölése általában a faanyag nemesítését, ill. fizikai-mechanikai tulajdonságainak kedvező megváltoztatását szolgálja. A *rönkök ill. prizmák* gőzölését rendszerint a furnér- és lemezgyártásban alkalmazzák azért, hogy a faanyag állapota a késelés és hámozás útján történő megmunkáláshoz megfelelőbb, kedvezőbb legyen.

A faanyag gőzölésének egyik legérzékenyebb hatása a színváltozás (4. táblázat).

Fafaj	Természetes szín	Gőzölés utáni szín
Akác	zöldes sárgától aranybarnáig	világossárgától sötétbarnáig
Tölgy	szürkés sárga, világostól sötétbarnáig	szürkésbarna, barna
Bükk	világos szürkétől halvány sárgáig és halvány vörösig	vörös, mahagónihoz hasonló
Juhar	sárgás-fehér	vöröses-sárga
Éger	halvány vöröses sárga	barna

4. táblázat Néhány fafaj gőzölés előtti és gőzölés utáni színe. Forrás: Faipari kézikönyv I.

A felhasznált gőz hőmérséklete és nyomása szerint a gőzölés történhet:

- 100 °C alatti hőmérsékleten, atmoszférikus nyomás mellett,
- 100 °C feletti hőmérsékleten, túlnyomásos gőztérben.

Rönkök gőzölésére, valamint a hazai gyakorlatban fűrészáru gőzölésére általában 100 °C alatti hőmérsékletet alkalmaznak. A gőzölési hőmérséklet megválasztása elsősorban fafajfüggő, de befolyásolja még a faanyag szerkezeti felépítése és a gőzölési cél (furnérgyártás, hajlítás, színezése stb.) is. A 100 °C feletti gőzölésnek – az erős hatás miatt – rostosításnál és különleges fanemesítési eljárásoknál van jelentősége.

A gyakorlatban kétféle gőzölési eljárást különböztetünk meg:

- közvetlen és
- közvetett gőzölési eljárást.

### *Közvetlen gőzölés*

Közvetlen gőzölést problémamentesen csak rosttelítettségi határ feletti fanedvesség-tartalomnál lehetséges végezni.

A gőzbefűvés a gőzölő kamra alján, ill. oldalán elhelyezett csőkiágásokból történhet. A gőzt ún. terelő-, elosztó lemezek fogják fel a fűrészáru előtt, mivel a szórásponiban erős elszíneződés illetve „elszenesedés” léphet fel.

Az eljárás előnyei:

- a gőzvezeték rendszer rendkívül egyszerű,
- a faanyag nemesítéséhez alacsony nyomású vízgőz (1,08-1,1 bar) elegendő,
- egyszerű a kamra, ill. gőzölő harang felépítése,
- a faanyag alacsonyabb végső nedvességtartalommal rendelkezik.

Hátrányai:

- rendkívül gyors, ezért a faanyag károsodás veszélye fennáll,
- csak tiszta, olajtalanított gőz alkalmazható,
- külön gőzkazán szükséges,
- a faanyag nedvességtartalma jóval a rosttelítettségi határ felett kell legyen,
- a kondenzvíz elvezetésére elfolyó beszerelését igényli,
- érzékeny fafajok gőzölésére nem ajánlott.

#### *Közvetett gőzölés*

A közvetett gőzölés a faanyag gőzölés szempontjából kíméletesebb és egyenletesebb kezelést biztosít. Hőgazdálkodás szempontjából szintén előnyösebb.

A közvetett gőzölés esetében a gőzölőtér alján lévő vízréteg melegítésével biztosítjuk a technológiához szükséges gőzt. A berendezés kialakításától függően a hőátadásnak több módja is ismert: történhet fűtőszálakkal elektromos úton, a vízrétegben elhelyezett csőrendszerben fűtőközeget áramoltatva (ez lehet fűtőgőz vagy olaj), de léteznek olyan berendezések is, melyek dupla falú köpenyében forró olaj áramoltatható. Bármely fűtési módot választjuk is, a közvetett gőzölés az alábbi előnyökkel jár:

- egyenletes és kíméletes faanyag felmelegítést, ill. kezelést biztosít,
- üzemeltetése gazdaságos a kondenzvíz visszanyerése miatt,
- alacsony olajtartalmú használt gőz is alkalmazható,
- nincs szükség nagy nyomású forró víz vagy gőz előállítására (kazán),
- a kondenzvíz folyamatos elvezetéséről nem kell gondoskodni.

#### *II.4.1.1 Gőzölő berendezések*

A faanyagok gőzölésére használatos legelterjedtebb berendezések a következők:

- a) Gőzölő kamrák
- b) Gőzölő harangok
- c) Gőzölő tartályok (autoklávok)
- d) kombinált berendezések



#### a) Gőzölő kamrák

Földbe helyezett, vasbeton falazattal vagy saválló klinker felhasználásával készültek korábban, a felszíntől minimum 1 m szintmagasságig (balesetveszély). A falazatot, a daruval történő be- és kirakodás miatt függőleges irányban elhelyezett pallókkal védték a károsodástól. A kamra fedelét alumínium borítású vörösfenyőből vagy vasbetonból alakították ki és a hőveszteségek csökkentése érdekében körbefutó un. vízzárral látták el.

Ma már a konvekciós szárító berendezésekhez hasonlóan panelos, szendvics-szerkezettel épülnek. Így a gőzölő kamrák telepítése történhet beton alapzatra is, melyben a gőz és villamos csatlakozásokat előre kialakítják. Az előregyártott kamrák az erős korrózióveszély miatt alumínium-magnézium-mangán ötvözetből is készülhetnek, így nem igényelnek állandó felületi védelmet. Különösen a kamraajtó kialakítása nagyon fontos a jó tömítettség biztosítása érdekében.

A gőzölő kamra közvetett, vagy közvetlen fűtémódjától függetlenül a csőrendszer csak alumíniumból, vagy rézből készülhet.

A gőzölő kamrák nagysága az üzem kapacitásához, ill. a fafajhoz igazodik. Nagy figyelmet kell fordítani arra, hogy a gőzölő kamrák kihasználtsága fűrészáru gőzölése esetén lehetőleg 85-90%-os legyen.

#### b) Gőzölő harangok

A gőzölő harang abban különbözik a kamrától, hogy a faanyagot egy függőleges irányba mozgatható fém búrával fedjük le, melynek pereme „U” alakú vízzáró betonhoronyban helyezkedik el. Merevségét idomacél váz biztosítja, ami üzemeltetés szempontjából igen előnyös. A belső felületeket, amelyek erős korrózióknak vannak kitéve (szerves savak stb.), 3 mm vastagságú alumíniumlemezzel borítják. A szigetelés külső oldalát védő borítóréteg 2 mm vastagságú időjárásálló bevonattal ellátott (pl. festett, szinterezett) acéllemez. Szigetelés céljára kőgyapotot vagy izolitot használnak.

A gőzölő harangok kialakításuktól függően 2500-3500 kg tömeggel rendelkeznek, így darus mozgatásuk viszonylag könnyen megoldható. Telepítéskor mindig egy fogadóalappal többet készítenek, így a folyamatos üzemelés biztosított. Befogadó képességük 30-40 m<sup>3</sup> űrtérfogat, ezáltal a targoncás anyagmozgatás lehetséges.

#### c) Gőzölő tartályok (autoklávok)

A gőznyomás növelhetősége céljából hengeres kivitelben készülnek 1,2 – 2,5 m átmérővel 30 m hosszúságig. A biztonság fokozása érdekében az ajtókat domború felülettel, csavarzárakkal rögzítik a hengerpalásthöz.

Az acélból készült tartály belső részét korrózióálló alumíniumborítással látják el, külső részére a hőveszteség csökkentése érdekében vastag szigetelő réteget helyeznek. A szigetelésre faborítást és/vagy alumíniumborítást helyeznek.

A faanyagot a gőzölő tartályokba rendszerint íves oldalhatároló elemekkel ellátott pályakocsik segítségével juttatják be. Az autoklávok 1-3 bar túlnyomás mellett üzemelnek, ezáltal a gőzölési idő jelentősen lecsökkenthető.

Előnye:

- csekély hőveszteség a jó szigetelés, az alumínium hővisszaverő-képessége és a jó tömítettség miatt,
- magas korrózióállóság,

- megnövelt túlnyomás esetén rövidebb gőzölési idő (3 – 6 óra),
- egyenletes minőség a gőzölt fűrészárúnál,
- helyváltoztatás lehetősége üzemátépítés esetén.

#### d) Kombinált berendezések

A legújabb kutatások keretében olyan kombinált berendezéseket fejlesztettek ki, melyek segítségével lehetőség van egy technológiai lépésben a faanyag szárítására és gőzölésére. E berendezések a vákuumszárítás gyorsaságát egyesítik a túlhevített gőz előnyeivel (Richter et al. 2000)

### **II.4.2 Főzési eljárás**

A főzési eljárásnál a hőátadó közeg a víz, mely által a felmelegítés mellett a faanyag megfelelő nedvesítése is biztosított. Azonos feltételek mellett a főzés erősebb változásokat okoz a fában, mint a gőzölés, de megvan az az előnye, hogy az alkalmazható alacsony hőmérsékletek következtében a fát kíméletesebben és jobb hőgazdálkodással lágyítja meg. Főzni kell a faanyagot, ha belőle bizonyos anyagokat (cserzőanyagot, gyantát stb.) akarunk eltávolítani. A főzővízhez kevert vegyszerekkel fokozni lehet a főzés eredményességét.

### II.4.3 A faanyagban lejátszódó fizikai folyamatok

A hidrotermikus kezelés folytán a faanyag hőmérséklete és nedvességtartalma a kezdeti állapothoz képest jelentősen megváltozik. Ez a változás a fa belsejében – a gőzölő kamrában (tartályban) létrehozott gőztér fizikai állapotának jellemzőitől függően – hőcsere és nedvességcsere útján jön létre.

#### *Hőcsere*

Gőzölés alkalmával a fának gőzzel és vízzel való közvetlen érintkezése útján következik be a faanyag felmelegedése. Ennek eredménye a fa teljes keresztmetszetének fokozatos hőmérsékletnövekedése.

Gőzölés esetében kezdetben a gőz egy része érintkezik a hidegebb faanyaggal, és hőmérséklete csökken. A fa felületére vízpára csapódik le, melynek következtében a felszabaduló hőtartalom felmelegíti a faanyagot és a fában található vizet. Közben a gőz fokozatosan behatol a faanyag belső rétegeibe is, ahol hasonló hőátadási folyamat zajlik le. Az egyes rétegekben és farészekben létrejövő különböző hőmérsékletek következtében folyadék és gőz alakban áramlás indul meg, amelynek erősségét a hőtartalmak különbségeként jelenlévő hőpotenciál is befolyásolja.

A szilárd anyagokban a molekulák makroszkopikus nyugalomban vannak, ezért azokban, - így a fában is -, a hő vezetéssel terjed. A faanyag hővezető képességére, a hőáramlás intenzitására jellemző szám a hővezetési tényező. A fa sajátos szerkezete miatt a többi anyagjellemzőhöz hasonlóan a hővezetési tényező is függ a hőáramlás irányától, a fa sűrűségétől, a nedvességtartalomtól, a hőmérséklettől stb. Néhány Magyarországon is honos fafaj átlagos hővezetési tényezőjét mutatja az 5. táblázat.

Fafaj	Hővezetési tényező $\lambda$ [W/mK]	
	rostokkal párhuzamosan	rostokra merőlegesen
Lucfenyő	0,221	0,1163
Bükk	0,2559	0,2093...0,221
Tölgy	0,2908	0,1593...0,1803
Juhar	0,4303	0,1593...0,1814
Kőris	0,3059	0,1628...0,1756

**5. táblázat** Néhány fafaj átlagos hővezetési tényezője. Forrás: Faipari kézikönyv I.

A faanyag felmelegedésének gyorsasága elsősorban a fa méreteitől és a faanyag hővezető képességétől függ. Ezek függvényében a megfelelő hőmérséklet eléréséhez eltérő felfűtési időtartamra van szükség. A kezelés időtartamát lényegesen befolyásolja még az alkalmazott hőmérséklet és gőznyomás is.

A kezelés során a faanyag keresztmetszetét tekintve a legmagasabb a hőmérséklet a felületen, és fokozatosan csökken a középrész felé haladva. Az egyes rétegek közötti hőmérsékletkülönbség bizonyos határon túl káros feszültségeket idéz elő a faanyagban. Mivel a gőzöléskor nedvességcsere is végbemegy, olyan gőzölési hőmérsékleteket kell választani, amelyek a fa kezdeti nedvessége szempontjából nem eredményeznek káros egyensúlyi fanedvességet. Ellenkező esetben, túl magas gőzölési hőmérséklet mellett erős külső repedések (szíjács repedések), túl alacsony hőmérsékleten pedig gesztrepedések keletkeznek.

### *Nedvességcsere*

A biológiai anyagok közös tulajdonsága, hogy normál állapotban vizet tartalmaznak. A jelenlevő víz mennyisége és kötési formája lényegesen befolyásolja az anyag fizikai, mechanikai tulajdonságait.

A faanyagokban a kötött víz, amely fafajtól függően kb. 30% alatti nedvességtartalomnak felel meg, a sejtfalon belül található. A kötött víz közelebből a kristályos cellulózlánc-köteget körülvevő nem kristályos cellulóz-, hemicellulóz- és ligninmolekulákhoz kötődik, amelyek mindegyikének van hidroxil-csoportja. A mikrofibrilla kristályos magjába a víz nem hatol be. A cellulózlánc rövid, amorf szakaszaiban azonban bizonyos mennyiségű víz lehet. A kötött víz mennyiségét a mikrofibrilla mátrixában a szorpciós helyek száma határozza meg. Amikor minden szorpciós hely telített, rosttelítettségről beszélünk. A rosttelítettség hőmérsékletfüggő, és 1 °C hőmérséklet-növekedés hatására kb. 0,1%-kal csökken.

A kötött víz csak járulékos energia befektetése útján távolítható el, mivel a hidroxilkötéseket le kell győzni. A kötött víz eltávolításakor az egyes mikrofibrillák közelebb kerülnek egymáshoz, s egyúttal növekszik a mikrofibrillák közötti kötés. Ennek két fontos következménye lesz: egyrészt zsugorodik az anyag, másrészt növekednek a szilárdsági jellemzők.

A zsugorodás és az extrakt anyagok mennyisége között korreláció figyelhető meg. A legkevésbé zsugorodó anyagok extrakt tartalma nagy, míg a legnagyobb zsugorodást mutató fafajok kevés extrakt anyagot tartalmaznak.

A molekuláris adszorpció útján megkötött víz mellett, bizonyos nedvességtartalom fölött a faanyag kapilláris adszorpció útján tárolja a vizet. Ennek folyamán a sejttrendszerben levő kapilláris méretű üregek tartják a vizet a felületi feszültség adta erők segítségével.

Az élő fa nedvességtartalma függ a fafajtól, az éghajlati viszonyoktól, de kisebb mértékben az évszaktól is. A geszt nedvességtartalma általában kisebb, mint a szíjácsé, mivel az előbbiben a nedvesség szállítása megszűnt. Ez a megállapítás nem vonatkozik a nyárfélékre. A fenyők szíjácsának nedvességtartalma közel kétszerese a gesztének (100% ill. 50%). A keménylombos fákban ez a különbség lényegesen kisebb. Az európai fenyők átlagos élő nedvességtartalma közelítőleg 60%-ra, a lombos fafajoké 40-50%-ra tehető.

A gőzölés kezdetén a hideg faanyag felületére lecsapódott vízpárát a külső rétegek (ha azok nincsenek vízzel telítve) felveszik. Ez a folyamat addig tart, amíg a külső rétegek a gőzölőtérben lévő levegő-gőz keverék harmatpontja fölé nem melegszenek. Időközben a felvett kondenzvíz a fa belseje felé vándorol. A gőztér harmatpontja feletti hőmérsékleten a fa külső rétege vizet kezd leadni. Ha tehát a kezdeti fanedvesség a telítettségi határ alatt van, akkor a gőzölés kezdetén vagy annak megszakítása esetén, valamint a fa erős lehülésénél a faanyag egyes rétegeiben nagyobb nedvességtartalmú zónák, ún. nedvesség-csúcsok jönnek létre. Ezek fokozatosan befelé haladnak, míg végül bekövetkezik a nedvesség kiegyenlítődése. Ha viszont a fa teljesen, vagy megközelítőleg vízzel telített, akkor a lecsapódott kondenzvíz lefolyik a fáról. A kellően felmelegedett faanyag külső rétegei száradni kezdenek. A száradási folyamat során e rétegek annál jobban megközelítik a rosttelítettségnek megfelelő egyensúlyi nedvességet, minél tovább tart a gőzölési eljárás.

A bekövetkezett nedvesség-kiegyenlítődéssel és a fának a gőzölőből való kivétele után a legkülső rétegek nedvessége a környező száraz levegő hatására, a fa felülete körül uralkodó klímának megfelelő végnedvességre csökken. A gőzölés befejezésekor a külső rétegek nedvessége annál nagyobb, minél alacsonyabb volt a gőzölési hőmérséklet. 100 °C feletti hőmérsékletnél a helyzet fordított: kívül a nedvesség alacsonyabb, mint belül, és az átlagos fanedvesség a kezdeti nedvességtartalomhoz képest csökken.

## **II.5 A hidrotermikus kezelés hatása a faanyag tulajdonságaira**

Hidrotermikus kezelése során a faanyagot különféle eljárásokkal folyékony vagy légnemű halmazállapotú víz segítségével hő hatásának tesszük ki, hogy ezáltal többirányú felhasználásra és feldolgozásra tegyük alkalmassá. A kezelés során a víz vagy gőz által közölt hő hatására a természetes állapotú faanyagok szerkezete és alkotórészei bizonyos mértékű fizikai és kémiai átalakuláson mennek keresztül. Ennek következtében a fa egyes tulajdonságai átmenetileg vagy végleg megváltoznak. Az átmeneti tulajdonságváltozások általában a könnyebb megmunkálhatóságot segítik elő, míg a maradandó változások a faanyag nemesítését szolgálják.

A hő és a nedvesség elválaszthatatlan együttműködése folytán a faanyagban, pontosabban a fa egyes alkotórészeiben változások mennek végbe, melyek hatással vannak a fa tulajdonságaira. Az anyagátalakulás és az ezzel kapcsolatos higroszkopikus nemesedés előrehaladásának jele a színváltozás, az eredeti szín sötétebbé válása. Egyúttal csökken a térfogatsúly és a szilárdság is, mégpedig annál jobban, minél magasabb a gőzölési hőmérséklet, vagy minél hosszabb a gőzölési időtartam.

A faanyag tulajdonságaiban bekövetkező változásokat az alábbi négy csoportba oszthatjuk:

- kémiai változások,
- fizikai változások,
- szilárdságváltozások,
- faanyagvédelmi változások.

### **II.5.1 Kémiai változások**

A hidrotermikus kezelés során először és legerősebben a hidrolizálható szénhidrátok, ezek közül is a pentozánok bomlása megy végbe. Mivel a lombosfák több pentozánt tartalmaznak, ezeknél a bomlás erőteljesebb, mint a fenyőknél. Ebből az következik, hogy gőzölés útján a lombos fafajok könnyebben formálhatók, alakíthatók.

A hőmérséklet növelésével a hemicellulózok bomlása után egyéb, a lignint és a cellulózt is érintő kémiai változások is végbemennek. A lignin átalakulása és a többi anyag kilúgozódásának mértéke a gőzölés paramétereivel (hőmérséklet, időtartam) szabályozható. Minél erősebb a gőzölés, annál nagyobb mértékű a lignin plasztifikálódása, kilúgozódása és a faanyag zsugorodási hajlama.

A gőzölés során a cellulóz lényeges változáson nem megy keresztül. Ezzel magyarázható, hogy a faanyag jórészt megőrzi dagadási-zsugorodási képességét és hő hatására bekövetkező fokozódó képlékenységét.

A 100 °C alatti hőmérsékleten végrehajtott gőzölés hatására a fából kioldott anyagok mennyisége viszonylag csekély és a vegyi bomlás mértéke is alacsony.

### **II.5.2 Fizikai változások**

#### **a) Színváltozás**

Megfelelő ideig tartó hidrotermikus kezelés következtében a faanyag teljes tömegére kiterjedő színváltozás lép fel. A színváltozás oxidációs folyamatok következménye. Minél magasabb az alkalmazott hőmérséklet, annál intenzívebb az elszíneződés. A szín és a tónus mélysége alapvetően a fafajtól (5. táblázat), de ezen túlmenően a gőzölés időtartamától függ.

#### **b) Nedvességfelvő képesség változása**

A faanyag eredeti higroszkópos tulajdonsága is megváltozik a gőzölés következtében. Azonos hőmérséklet és légnedvesség mellett a kezelt fa kevesebb nedvességet vesz fel, mint a kezeletlen. E változás mértéke azonban nem jelentős, és gyakorlatilag is számottevő mértékben csak 100 °C feletti intenzív gőzölés mellett jelentkezik. A gyakorlati tapasztalatok szerint a gőzölt faanyag higroszkopikus egyensúlyi nedvességtartalma általában csak 2-8 %-kal alacsonyabb, mint a gőzöletlen faanyagé.

A nedvességfelvevő képesség csökkenése a hidroxil-csoportok és a cellulóz molekulák között végbemenő átalakulással magyarázható. A hő és nedvesség hatására a vízmolekulák közötti kapcsolat annyira meglazul, hogy a faanyag a kiszáradás utáni nedvesedéskor már nem képes ugyanannyi vizet felvenni.

A higroszkópos tulajdonság mértékének csökkenése általában arányos a hőkezelés időtartamával és a gőzölési hőmérséklettel.

#### c) Dagadási – zsugorodási tulajdonságok változása

A dagadást elősegítő hemicellulózok bomlása, és a fában lévő savak hatására gyantaszerű testekké alakuló, vízben oldódó lignin részek kondenzációja következtében a gőzölt faanyag dagadási (zsugorodási) értékei maradandóan csökkennek. Ennek mértékét az alkalmazott hőmérséklet és a gőzölési idő határozzák meg. 100 °C alatti gőzölésnél a húrirányú dagadás-csökkenés 1,5-2,0 %, a sugárirányú csökkenés pedig 0,5-1,5 % az eredeti értékhez képest. Túlnyomásos gőzölésnél a dagadás-csökkenés nagyobb mértékű.

#### d) A képlékenység, hajlíthatóság változása

Mivel a faanyag termoplasztikus anyag, e tulajdonsága következtében a hidrotermikus kezelés során képlékenysége növekszik. Ez csak meleg állapotban áll fenn, és nagysága a hőmérséklettől és a faanyag nedvességtartalmától függ. A gőzölt fa kihűlés után már nem alakítható. Emelkedő hőmérséklet mellett abszolút száraz fánál is elérhető a maradandó alakváltozás, amely azt igazolja, hogy képlékenység szempontjából a hőmérséklet a döntő tényező.

### II.5.3 Szilárdságváltozások

Gőzölés következtében a faanyag valamennyi szilárdsági tulajdonsága kedvezőtlenül változik. A szilárdsági értékek csökkenése általában a sűrűség csökkenésével van arányban. A gőzölt fa már nem éri el a gőzöletlen rugalmassági modulusát. A hőkezelés hatására a legnagyobb mértékben az ütő-hajlító szilárdság csökken, de nagy mértékű a hajlítoszilárdság és a szakítoszilárdság változása is. Nagyobb mértékű szilárdságcsökkenést csak a 100 °C feletti hidrotermikus kezelés eredményez (6. táblázat). A kezelési idő növelésével a szilárdság általában csökken.

Szilárdsági jellemző	Gőzölés után mért csökkent érték a kiinduló érték százalékában	
	1 att túlnyomáson	2 att túlnyomáson
Rostokkal párhuzamos nyomószilárdság	88-82%	82-59%
Rostokkal párhuzamos szakítoszilárdság	85-78%	80-58%
Hajlítoszilárdság	84-96%	85-61%
Ütő-hajlító szilárdság	86-74%	79-45%
Nyírószilárdság	98-86%	95-56%

**6. táblázat** A túlnyomáson végzett gőzölés hatása az akác faanyag szilárdsági tulajdonságaira (Fábián 1976), megjegyzés: 1 att = 2 at = 2 \* 98066,5 N/m<sup>2</sup>

A gőzölési paraméterek szilárdsági jellemzőkre gyakorolt hatásáról, különösen a trópusi fajok vonatkozásában, kevés irodalmi adat áll rendelkezésre, szerkezeti célú felhasználáskor azonban ez is fontos szempont. A 6. táblázatban láthatjuk, hogy a gőzölés akár 2/3 részére is csökkentheti az eredeti szilárdsági mutatókat.

#### **II.5.4 A faanyag természetes tartósságát érintő változások**

A hidrotermikus kezelés egyik nem elhanyagolható célja lehet a faanyag tartósítása, és károsítók elleni védelme. A kellően magas hőmérsékleten végzett gőzölés megakadályozza a fülledés továbbterjedését, és általában elpusztítja a faanyagot károsító gombák hifáit és a rovarok álcáit, lárváit. Az alkalmazott gőzölési hőmérséklet és időtartam azonban nem minden esetben biztosítja a faanyag teljes csírátlanítását. Egyes károsítók betokosodott petéi, spórái gyakran átvészelik a gőzölést, és ha a faanyag felhasználása során kedvező életkörülmények közé kerülnek, életműködésüket újra megkezdik. 100 °C alatti kezeléssel a faanyag teljes sterilizálását nem lehet elérni.

## II.6 A faanyag színe

A faanyag optikai tulajdonságai közül a színnek, illetve az egyes kezelések hatására bekövetkező színváltozásnak van a legnagyobb jelentősége. Mivel a színérzékelés általában szubjektív dolog, célszerű a pontos színmeghatározáshoz objektív, műszeres színmerést alkalmazni.

A fa egyike az emberiség által legrégebben használt alapanyagoknak. Népszerűségét nemcsak kitűnő mechanikai tulajdonságainak, könnyű alakíthatóságának, hanem kiváló esztétikai tulajdonságainak is köszönheti. A szép faanyag színével és változatos rajzolatával bármely anyaggal képes felvenni a versenyt, de vannak kevésbé esztétikus megjelenésű, színű faanyagok is.

A természetes faanyag színe a sárga-vörös tartományba esik. A világosabb árnyalatok a sárgához, a sötétebbek a vöröshöz vannak közelebb. A különböző faanyagok színének világossága nagyon széles tartományt ölel fel, telítettségük viszont egy keskeny sávba esik, és elég kicsiny értéket mutat (Németh 1981, 1982, 1984).

A nem fényforrásként viselkedő tárgyak, így a faanyag színét is a felületről diffúz módon visszaverődő, és a szemünkbe jutó fénysugarak hullámhossz szerinti intenzitás-eloszlása (spektruma) határozza meg. Az emberi szem rendkívül érzékeny, így homogén felületi reflexiójú mintákon már nagyon kicsiny színkülönbségeket képesek vagyunk érzékelni. Inhomogén felületek esetén (változatos, szabálytalan rajzolat, bélsugártükrök jelenléte) a megkülönböztetés már lényegesen nehezebb, mivel az egyes anatómiai elemek eltérő színükkel, mintázatukkal képesek a tényleges szint háttérbe szorítani (Tolvaj 1994).

Mivel a színérzékelés szubjektív, az egyes személyek színérzete egyazon minta esetén is eltérhet egymástól. Ezért fontos a mérésen alapuló, objektív színmeghatározás. Az objektív színmérés azon a felismerésen alapszik, hogy az emberi szem retinájának csapjai a vörös, a zöld és a kék színre szelektíven érzékenyek.

Az objektív színmerést ezidáig csak laboratóriumi körülmények között, kutatómunkákban alkalmazták. Németh (1981, 1982, 1984, 1989) kezeletlen, szárított (hőkezelt), illetve napfény hatásának kitett faanyag CIELAB színrendszerben történő színmeghatározására, illetve színváltozásának vizsgálatára irányuló kutatásai alapozták meg ezt a tudományterületet.

A látható elektromágneses sugárzásból a faanyag felületéről visszaverődő sugárzás a szemben vizuális színingert eredményez, amelyet a visszavert sugárzás hullámhossz-összetétele határoz meg. Az érzékelt szín számszerűsítve is megadható. Lehetőség van etalon mintákkal történő összehasonlításra, de a meghatározás történhet objektív színmérő műszerek segítségével is. A színmérés tudományában több színmérő rendszer is kialakult (pl.: XYZ, xyY,  $L^*a^*b^*$ ,  $L^*u^*v^*$ ). A CIE (Commissio Internationale de L'Eclairage = Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság) 1976-ban több javaslat közül két színinger-mérő rendszert fogadott el, az egyik a CIELAB ( $L^*a^*b^*$ ), a másik a CIELUV ( $L^*a^*v^*$ ) rendszer volt. Magyarországon is e kettőt szabványosították (MSZ 9619/3-75, 1975; MSZ 9619/3-75 K, 1978). Mindkettőnek vannak előnyei és hátrányai. Szakterületenként változó, hogy melyiket célszerű használni. A CIELAB mellett szól, hogy sokkal szélesebb körű az ipari felhasználása (pl.: festék-, papír-, műanyag-, textilipar). Németh vizsgálatai szerint is a CIELAB-rendszer alkalmasabb a fa színének jellemzésére, ez ad jobban felhasználható információkat a lejátszódó változások értékeléséhez.



## II.6.1 A Lab színtér

A Lab két különböző színtér rövidített elnevezése. A leginkább ismert rendszer a CIELAB (pontosabban CIE 1976  $L^*a^*b^*$ ), a másik a Hunter Lab (pontosabban Hunter L, a, b). A *Lab* egy nem hivatalos elnevezés, amely azonban nem alkalmas annak eldöntésére, hogy melyik rendszerről van szó. Mindkét rendszer a CIE 1931 XYZ színtérből származtatható, de míg a CIELAB köbgyökök felhasználásával számítható, addig a Hunter Lab négyzetgyököket használ. Új alkalmazásoknál ajánlott a CIELAB rendszer használata, hacsak nem már létező Hunter L, a, b adatokat kell összevetni új adatainkkal.

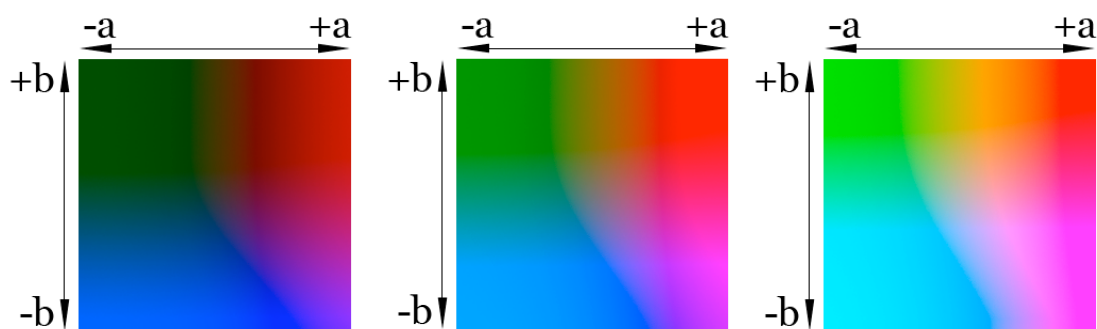
Mindkét tér célja egy olyan színtér létrehozása, melynek „észlelése” minden eddigi rendszerekénél lineárisabb. E linearitás azt jelenti, hogy a szín értékének ugyanolyan mértékű változása hozzávetőleg azonos vizuális fontosságú változást eredményez. Mindkét rendszer abszolút színtér, tehát a színeket pontosan definiálják, míg például az RGB vagy a CMYK rendszerek nem definiálják egzakt módon a színeket, csak keverési előírásokat nyújtanak fény (RGB) illetve tinta (CMYK) esetében.

### A CIE 1976 $L^*a^*b^*$ színtér (CIELAB)

A CIE  $L^*a^*b^*$  (CIELAB) a legtökéletesebb modell, melyet az emberi szem által észlelhető színek leírására alkottak. A CIELAB-színingertér minden egyes színingerhez egy pontot rendel az  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  térbeli derékszögű koordináta-rendszerben, ezeket színkoordinátáknak nevezzük (Lukács 1982). Az  $a^*$  tengely pozitív irányban a vörös, negatív irányban a zöld színezetet jelenti, a  $b^*$  tengely pozitív irányban a sárgát, negatív irányban a kéket. Az  $a^*$ ,  $b^*$  tengelyekre merőlegesen helyezkedik el az  $L^*$  tengely, amelyen a színinger világosságát ábrázoljuk.

A Lab színteret eszközfüggetlen, abszolút modellnek alkották, amely referenciaként használható. Ezért döntő fontosságú megérteni, hogy a színek teljes skálájának vizuális megjelenítése e modellben sosem lehet szabatos. Csupán a fogalom megértését segíti, de velejáróan hibás.

Mivel a Lab modell egy háromdimenziós modell, ezért pontosan csak háromdimenziós térben ábrázolható. A modell hasznos tulajdonsága azonban, hogy első paramétere rendkívül intuitív: értékének változtatása olyan, mintha egy TV készülék világosságát szabályoznánk. Ezért elegendő a modell mindössze néhány horizontális „szeletének” ábrázolása a teljes színskála vizualizálásához, feltéve, hogy a fényerősség a függőleges tengelyen helyezkedik el (9. ábra).



9. ábra Lab színskála 25%, 50% és 75% fényerősség esetén

$L^*$ ,  $a^*$  és  $b^*$  nem-lineáris összefüggései a szem logaritmikus reakcióját hivatottak kifejezni. Meghatározásukhoz az alapot a méréssel meghatározott  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  színíngert-összetevők adják, amelyekből a színkoordináták a következő összefüggésekkel számíthatók:

$$a^* = 500 [(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}]$$

$$b^* = 200 [(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}]$$

$$L^* = 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16$$

ahol:  $X, Y, Z$  – a vizsgált anyag színíngert-összetevői,

$X_0, Y_0, Z_0$  – a fehér etalon színíngert-összetevői.

Az így meghatározott színpont színezetét a

$$h^*_{ab} = \text{arc tg} (b^*/a^*)$$

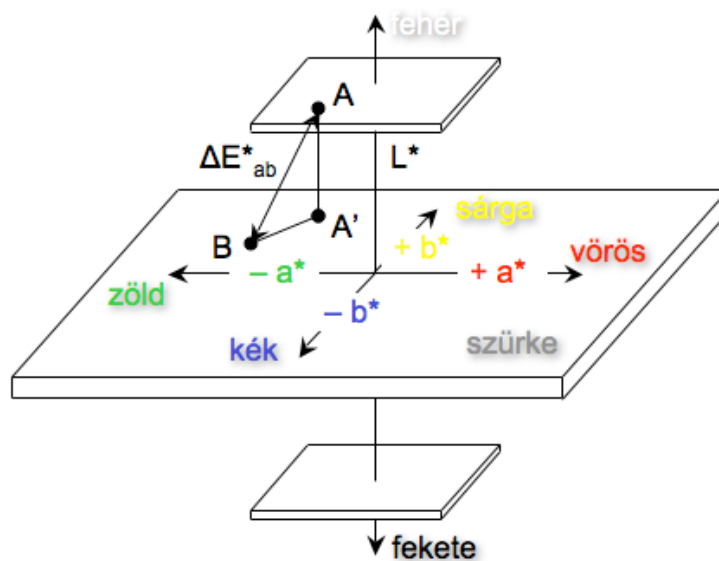
telítettségét a

$$c^*_{ab} = [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2}$$

világosságát pedig az  $L^*$  koordináta adja meg.

A színíngert-különbség értékét, azaz  $\Delta E^*$ -t (két színpont távolságát) a koordinátákból a térbeli Pitagorasz-tétel adja meg (10. ábra):

$$\Delta E^* = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2]^{1/2}$$



**10. ábra** Az  $L^*a^*b^*$  színrendszer és a  $\Delta E^*$  színíngert-különbség sematikus ábrázolása

A 7. táblázat 17 vizsgált fafaj színére vonatkozó átlagadatokat tartalmaz. A táblázat a vizsgált fafajokat a vizuális érzékelés szerinti világossági sorrendben tartalmazza. Az  $L^*$  világosságértékei jól követik a vizuálisan megállapított sorrendet.

Az anyagok színezetének jellemzésére a  $h^*_{ab}$  színezeti szög egyetlen adatként jól alkalmazható. A faanyagok színezeti szög értéke általában  $45^\circ$  fölött van, és a  $90^\circ$ -ot nem éri el. Mérések szerint (Németh 1982) lineáris összefüggés állapítható meg a színezeti szög és a világosság között.

	Fafaj	X	Y	Z	a*	b*	L*	$h^*_{ab}$	$C^*_{ab}$
1	Kőris	61,76	60,67	49,02	5,27	20,17	82,20	75,35	20,84
2	Hárs	59,52	59,07	42,31	3,80	25,81	83,33	81,62	26,08
3	Amingeri	55,50	54,59	40,32	4,94	23,72	78,86	78,23	24,22
4	Nyár	55,00	54,30	39,86	4,42	23,96	78,64	79,54	24,36
5	Avodir	44,27	43,19	31,34	5,84	22,61	71,63	75,51	23,35
6	Körte	46,50	44,29	29,79	8,76	26,13	72,42	71,46	27,55
7	Bükk	44,58	42,31	33,12	9,09	19,28	71,08	64,75	21,31
8	Vörösfenyő I. (késelt)	45,58	41,93	27,48	13,07	26,72	70,82	63,93	29,74
9	Afv. Cseresznye	44,59	42,82	30,08	7,61	23,14	71,43	71,49	24,35
10	Tölgy	39,86	37,85	25,49	8,69	24,74	67,91	70,64	26,22
11	Csertölgy	40,66	38,44	27,90	9,28	21,83	68,34	66,96	23,72
12	Vörösfenyő II. (hámozott)	36,52	33,14	19,54	13,71	28,64	64,27	64,41	31,75
13	Aformasie	29,40	27,73	17,53	8,58	24,56	59,64	70,70	26,01
14	Cseresznye	30,13	27,35	19,06	12,83	20,97	59,30	57,54	24,58
15	Dió II.	24,01	22,60	17,50	8,23	16,03	54,66	62,82	18,01
16	Mutenye	21,71	20,14	12,37	9,38	22,99	52,00	67,80	24,82
17	Dió I.	20,41	19,53	15,55	6,21	14,32	51,30	66,55	15,60
18	Mahagóni	16,47	14,65	10,61	12,28	15,89	45,15	52,30	20,08
19	Kókuszdió	12,57	11,69	10,17	7,62	9,50	40,72	51,26	12,17

**7. táblázat** Néhány fafaj színjellemezői

A faanyag színének telítettsége lényegesen keskenyebb tartományba esik, mint a világosság vagy a színezeti szög értéke. Ez a jellemző nem mutat kapcsolatot sem a világossággal, sem a színezeti szöggel. Mivel a telítettség csak kis értéktartományon belül változik, a színezeti szög és a világosság között viszont lineáris kapcsolat van, ezért a nagy pontosságot nem igénylő szín-összehasonlításokhoz elegendő a világosságok összehasonlítása. A világosságot viszont csak az Y színinger-összetevő determinálja, ezért elegendő az Y színinger-összetevők tekintetbe vétele (Tolvaj 1994).

## II.6.2 Gőzölés és színmérés – szakirodalmi áttekintés

A gőzölés során bekövetkező színváltozást a faanyag kémiai szerkezetének (elsősorban az extrakt anyagok) módosulása (modifikációja) okozza. A természetes faanyag színe a sárga-vörös tartományba esik. Akác esetében a szín sárga tartalma nagy, vörös tartalma kicsi. A színérzet a felületéről diffúz módon visszaverődő és a szemünkbe jutó fénysugarak spektrumától (hullámhossz szerinti intenzitás eloszlásától) függ. A fafajra jellemző színt a járulékos anyagokban lévő kromofor szerkezetek alakítják ki, s ezek nagyfokú érzékenysége a felelős a színváltozásért. A kromofor szerkezetek tehát olyan kémiai szerkezetek, melyek elektronjait a fény energiája gerjeszteni tudja, és ezáltal fény elnyelésére képesek (Németh 1998).

Az akác fája járulékos anyagaiban jelentős mennyiségben tartalmaz színeképző vegyületeket. Gőzölés hatására a szín jelentősen sötétedik, és a vörös felé tolódik. A trópusi fák felhasználásával kapcsolatos ellenállás megnövelte az akác szerepét, mivel gőzöléssel azokhoz hasonló szín érhető el. Természetes állapotában az akác faanyagának színe a sárgás-szürkétől a zöldes-sárgáig tág határok között változik, s ez az inhomogenitás egy mintán belül is megfigyelhető. A gőzölés másik fontos eredménye a faanyag színének homogenizálódása.

A korábbi kutatások elsősorban a gőzölés fizikai-mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával foglalkoztak, a színváltozás vizsgálata csak az utóbbi évek kutató munkájára jellemző, hiszen ehhez megfelelő berendezés, és a faanyag színezetét egzakt módon megjelenítő számítógépes szoftver szükséges.

Hazai (Dessewffy 1982, Molnár 1988) és külföldi (Richter és Kühl 1998) laboratóriumi gőzölési kísérletek bebizonyították, hogy az akácfa különböző hőfokú (nyomású) és időtartamú gőzölésével a faanyag színe teljes keresztmetszetben változtatható a sárgászöldtől a sötétbarnáig. A gőzöléssel nemesített akác tölgyre, dióra, mahagónira emlékeztető színárnyalatai ma már ismertek. A kedvező esztétikai tulajdonságokat fokozza, hogy a mélyebb, sötétebb színtónusoknál az erezet határozottabb kiemelkedését figyelhetjük meg. A megmunkálás és a színtartósság szempontjából fontos, hogy az elszíneződés az anyag teljes keresztmetszetében történik. Hátrányos azonban, hogy a szín-egyöntetűség csak válogatással érhető el. Nemesítéssel a fa szilárdsági értékei 0-60 %-kal csökkennek (Molnár 1987), ezáltal javul a megmunkálhatósága. Kedvezőtlenül változnak a zsugorodási tulajdonságok. A húrirányú zsugorodás 2,7 %-kal, a sugár irányú zsugorodás pedig 1,4 %-kal növekedett. Érdekes jelenségként kell megemlítenünk, hogy a gőzölés hatására az akác elveszti a természetes faanyagok azon jellemző sajátosságát, mely szerint nagyobb sűrűségi érték esetében nagyobbak a keménységi és szilárdsági értékek is. Esetében ellentétes folyamat állapítható meg: a kezelés következtében megnövekvő sűrűséghez mérsékeltebb keménységi és szilárdsági értékek kapcsolódnak. E rendkívüli jelenség azzal magyarázható, hogy a hőkezelés hatására a fában lejátszódó fizikai és kémiai folyamatok megbontják, fellazítják a sejtek, szövetek közötti természetes kapcsolatokat, s ennek következtében csökkennek a keménységi és szilárdsági értékek. A vizsgálatok azonban feltárták azt a jelenséget is, hogy a túlnyomásos gőzölés hatására a faanyag zsugorodik, és ezáltal sűrűsége megnövekszik. E két körülmény együttesen ad magyarázatot a részletezett jelenségre. A szakmai közvéleményben elterjedt fogalom, az "akác megszelídülése", túlzott következtetésekre ad okot. Az akác forgácsolása, ha kisebb eltéréseket mutat is a tölgyvel szemben, gyakorlatilag igen közel áll ahhoz, viszonylag jól megmunkálható még természetes állapotban is. A gőzölés "szelídítő", forgácsolást könnyítő hatásáról jórészt irreálisak az elképzelések. A gőzölt, nemesített akác is keménylombos fafaj marad, ha tulajdonságai módosulnak is.

A gőzölés hatásosságát a gőzölési hőmérséklet és az időtartam határozza meg. A faanyag nedvességtartalmának meghatározó szerepét mutatják az elvégzett vizsgálatok. A száraz

faanyag lényegesen kisebb színváltozást szenved azonos körülmények között, mint a nedves. A hőmérséklet rendkívül fontos tényező nemcsak a színváltozás, hanem a gőzölésben uralkodó nyomás szempontjából is. A nyomást meghatározó szerepéből kifolyólag határt kell húznunk az atmoszférikus nyomás alatti, és az azt meghaladó hidrotermikus kezelés között. Az atmoszférikus nyomáson, 100°C alatt végzett laboratóriumi gőzölési kísérletek bizonyították (Varga 2002), hogy ilyen körülmények között is elérhető az akác faanyag színezetének részbeni homogenizálódása. Légköri nyomásnál a hatásos gőzölés az első 4 napban történik, és 9 nap után már nem lesz jelentős változás. Így is elérhető tehát olyan színhatás, mely az akác fáját egzóta fafajokhoz teszi hasonlónak. A végső szín nem korlátozódik partikulárisan bizonyos helyekre (felszíni vagy belső rétegek), hanem a keresztmetszet teljes területére kiterjed. Másodlagos modifikáció veszélye nem áll fenn további felhasználás esetén sem.

Ipari mennyiségek esetén jellemző a légköri nyomáson történő gőzölés. Ennek előnye, hogy kíméletesebb, kevésbé károsítja az anyagot. A hőkezelési szakasz folyamán játszódhatnak le a különböző kémiai folyamatok az anyagban. A vegyi reakciók gyorsaságát nagyban megnöveli a magasabb hőmérséklet alkalmazása, ez azonban gyakori repedést, görbüléseket okoz. Tapasztalatok alapján nem javasolt a 120°C-nál magasabb hőmérsékletek alkalmazása (Molnár 1976). Az anyag károsodása lineáris összefüggésben van a hőkezelés időtartamával is, de így is lényegesen kedvezőbb az alacsonyabb hőfokok (100-110°C) melletti hosszabb idejű nemesítés, mint az intenzív, magasabb hőmérsékletű gőzölés rövidebb időtartam mellett. A különböző színárnyalatok kialakítását elsősorban az időfaktor módosításával lehet szabályozni. A túlnyomásos gőzölés előnye, hogy a faanyag gyorsabban éri el a kívánt színhatást, s a magasabb hőfok lehetővé teszi sötétebb (akác esetén csokoládébarna) árnyalat megvalósíthatóságát is. Egy gőzölési feladatnál az elérendő szín, a gőzölési hőmérséklet és idő összhangjára kell figyelni a lehető legkisebb költségek mellett.

Molnár és munkatársai (Molnár 1979; Kovács és Molnár 1980; Molnár et al. 1994; Molnár et al. 1998; Molnár 1998) akác gőzöléssel kapcsolatos kísérleteket végeztek, melyek során a faanyag műszaki tulajdonságait vizsgálták. Az atmoszférikus nyomáson történő gőzölés fejlesztése érdekében laboratóriumi gőzöléseket hajtottak végre. 95°C -on a színváltozás időszükségletének meghatározására fizikai és mechanikai vizsgálatokat folytattak természetes és hőkezelt akácfával. Megállapították, hogy az ide vonatkozó szabvány nem ad használható információkat az akácfa gőzölésének elvégzéséhez. Ehelyett megfogalmazták az akácfa atmoszférikus gőzölésének technológiai előírásait. A fizikai és mechanikai vizsgálatok tapasztalata, hogy az akácfa atmoszférikus gőzölése során a faanyag tulajdonságai kis mértékben megváltoznak. A sűrűség 6-8 %-kal nő, a szilárdsági jellemzők (pl. a statikus hajlítószilárdság, az ütő-hajlító szilárdság) csökkenő értéket mutatnak. A farontó gombákkal, rovarokkal szemben kevésbé lesz ellenálló, ezért a gőzölt faanyag kültéri felhasználása nem célszerű.

Kollmann (1951, 1969) és munkatársai az 1950-es évek elején a szárításkor bekövetkező világosságcsökkenést vizsgálták a hőmérséklet és a relatív légnedvesség függvényében. Megállapították, hogy a hőmérséklet növekedésével exponenciálisan nő a színváltozás mértéke. A lombos fafajokon végzett kísérletek azt mutatták, hogy csak a magas hőmérséklet és a nagy relatív légnedvesség-tartalom mellett végzett szárítás okoz világosságváltozást és színezet eltolódást. Ipari méretű szárítás esetén a kezdeti magas fanedvesség-tartalom miatt pontosan a gőzölés körülményei adóttak. A faanyag fokozatos száradásával a száraz termikus kezelés felé tart a folyamat.

A gőzölés színváltoztató hatásának leírásával először a magyar szakirodalomban találkozunk. Dessewffyné (1964) és kollégái a Faipari Kutató Intézetében a gőzölésnek az akác faanyag fizikai-mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatásával foglalkoztak. Laboratóriumi

körülmények között, 100°C feletti hőmérsékleteken gőzölték a faanyagot, és azt tapasztalták, hogy a minták 0,1-0,4 MPa gőztúlnyomás mellett fokozatosan sötétre színeződtek.

A kezeletlen fafelület objektív színmérésével foglalkozó első kutatások közül a legrészletesebb Sullivan (1967) nevéhez fűződik. Németh (1981a, 1982) kezeletlen faanyagra vonatkozó mérései szerint a világossági koordináták ( $L^*$ ) jól követik a vizuálisan megállapított sorrendet. Ugyanazon a faanyagon lévő sötétebb és világosabb részek színezete közel azonos, a különbség csupán a világosságértékek eltéréséből adódik. A szórást is figyelembe véve a fafajok 5 világosság-egységnyi tartománynak megfelelő világossági osztályba sorolhatók.

Phelps és Ginnes (1983a, 1983b) szintén a kezeletlen faanyag felületének színmérésével foglalkozott, különös tekintettel a rajzolat jelentőségére.

Durisova és munkatársai (1986) a szubjektív színérzékelés és az objektív színmérés eredményeit hasonlították össze néhány fafajon végzett mérés alapján.

Gőzölés hatására bekövetkező színváltozás objektív mérésével először Stubenvoll (1984) munkájában találkozhatunk. Akác próbatesteket gőzölt 100°C-on, bükköt 70 és 100°C -on, egy-egy mintacsoportot 6, 9, 12, 24 és 48 óráig. A színmérést Momcolor-D műszerrel végezte, és megállapította, hogy a vizsgált faanyagok egyikénél sem lépett fel számottevő telítettség- és színezet-változás, a folyamatot a világossági tényező változásával jól lehetett jellemezni. A kondenzvíz akác esetében 0-9 óráig erősen sárga színű, ezután átlátszó volt. Megállapítható volt, hogy a gőzölés kezdeti szakaszában a könnyen oldódó színezékanyagok, illékony vegyületek, kimosódtak, és az akác jellegzetes szaga is csökkent.

Tolvaj (1989, 1992) akác és bükk 90°C-os hőmérsékleten történő gőzölés hatására bekövetkező színváltozását vizsgálta. Akác esetében azt tapasztalta, hogy a minták színeltolódása az első hét során egyenletesen változott, azt követően a változás lelassult, majd megállt. A gőzölési idő előrehaladtával az egyes minták közötti színeltérés csökkent, a fa rajzolata pedig egyre erősebben előtűnt. Megállapította, hogy a vízgőz jelenléte a színváltozás alapvető feltétele, továbbá az akác atmoszférikus nyomáson történő gőzölésekor nem állítható elő az a sötétbarna szín, melyet a túlnyomásos gőzölés eredményez. A CIELAB színindex-mérő rendszer bonyolult számításokat igénylő formulái helyett egy lényegesen egyszerűbb színkoordináta rendszert javasolt: mivel a gőzölés során a színindex-összetevők (X, Y, Z) csak egy irányban változnak, ezeket az összetevőket közvetlenül színkoordinátaként is felfoghatjuk. A színváltozás mértékét vagy a kezeletlen anyag színkoordinátáihoz, vagy az abszolút fekete test színkoordinátáihoz viszonyíthatjuk. Ha egy adott színre gőzölés a cél, akkor az utóbbi ad pontosabb eredményt, bár a kezeletlen mintához való hasonlítás sem jelent nagy hibát azoknál a fafajoknál, ahol a fafajon belüli színbeli inhomogenitás nem nagy. Tolvaj és Faix (Tolvaj 1994, Tolvaj és Faix 1996) akác, nyár, lucfenyő, erdei fenyő és vörösfenyő 90°C -os gőzölés során bekövetkező színváltozását vizsgálták a CIELAB-rendszerben. Valamennyi fafaj esetében azt tapasztalták, hogy a kezelési idő előrehaladtával a világosság és a színezeti szög változása lelassul, és a szín a folyamat döntő részében a vörös felé tolódik el. A sárga tartalom eleinte növekszik, majd csökken. A folyamat során meghatározó mértékben változik az  $L^*$  világosság koordináta, mégpedig a gőzölési idő függvényében eleinte rohamosan csökken, majd telítődést mutat. A kezelési idő előrehaladtával a pontok már alig térnek el egymástól, tehát a világosság és a színezeti szög változása lelassul. A minták színpontjai az  $a^*$ ,  $b^*$  síkban egy patkószerű görbe mentén helyezkednek el, a szín a folyamat döntő részében a vörös felé tolódik el. A telítettség (a színpont és az origó távolsága) eleinte növekszik, majd erőteljesen csökken.

Tolvaj és Faix az extrakt anyag-tartalom színváltozásban játszott szerepére is rámutattak. Richter és Kühl (1998) szerint az akác faanyag gőzölése során a színváltozást az okozza, hogy

a járulékos anyagok jelentős mennyiségben kimosódnak, illetve kémiai összetételükben megváltoznak. Megállapították, hogy a gőzölés ipari megvalósítása során figyelmet kell szentelni a folyamatot kísérő erősen savas természetű gőzlecsapódásnak.

Tolvaj és Papp (1999) kimutatták, hogy egy éves szabadba való kihelyezés után a gőzölt akác faanyag ugyanúgy elszürkül, mint a gőzöletlen.

A gyakorlatban elsősorban élőnedves, vagy ehhez közel álló nedvességtartalmú faanyagot gőzölnek. A faanyag körüli telített gőztér elsősorban a vízvesztés megakadályozását szolgálja. Az elszíneződés sebességét és mértékét döntően az alkalmazott hőmérséklet határozza meg (Horváth-Szováti 2000, Horváth-Szováti és Varga 2000). Magasabb hőmérsékleten a termikus folyamatok felgyorsulnak, így intenzívebb lesz a színváltozás. A gőztelítettség kritériuma a megfelelő nyomás meglétét is megköveteli.

Napjainkban egyre fontosabb lenne az objektív színmérés az akác gőzölésével kapcsolatos tervezés, gyártás és minőség-ellenőrzés során. Ennek ellenére a színmeghatározásokat általában etalonok felhasználásával, vizuális összehasonlító módszerrel végzik. Az összehasonlítással történő szubjektív színmeghatározás mellett szól a fa színének évszázados meghatározási tapasztalata. Sokáig nem volt a birtokunkban olyan módszer, mely a színt, mint számadatok sokaságát adta volna meg. További problémát jelentett a fa rajzos színe, ez azonban kiküszöbölhető oly módon, hogy ugyanazon mintán több ponton mérjük a színkoordinátákat (Németh 1981a). A korszerű faipar célja a nagy sorozatú, reprodukálható színű termékek gyártása, így mindenképpen szükséges a modern, műszeres vizsgálati módszer bevezetése.

1994-ben a Soproni Egyetem Kémiai Intézetébe került egy korszerű Minolta CM-2002 típusú spektrofotométer, amellyel Németh összehasonlította a faanyagok termikus hatásokra bekövetkező színváltozásait extrakt anyagok kivonása előtt és után. Megállapította, hogy a színváltozást döntően az extrakt anyagok okozzák. Oxidatív és nem oxidatív közegben elvégezve a kísérleteket azt tapasztalta, hogy oxigén jelenlétében erőteljesebben változik a szín (Németh 1998).

Németh és Faix (1988a) kutatásai szerint a faanyag különböző hatásokra (pl. fénysugárzás, termikus kezelések, stb.) bekövetkező színeltolódásáról általánosságban is megállapították, hogy legjelentősebb szerepet a világosságcsökkenés játszik, kisebb a színezetváltozás, legkisebb a telítettség hatása. Termikus kezelés során a szín 100-200°C között változik a legjelentősebben. A nagy extrakttartalmú faanyagok hő hatására kezdetben gyorsan változtatják a színüket, majd rövid kezelési idő után a színváltozás lelassul. Extraktmentes, illetve kis extrakttartalmú faanyagok esetében a kezdeti színváltozás sebessége kisebb, de a további kezelés során azonos ütemben folytatódik tovább (Németh 1988b, 1989). A faanyag hőkezelés hatására bekövetkező átalakulásáról infravörös spektroszkópiával kapott adatok alapján megállapította, hogy a folyamat két részre osztható: egy degradációs, karboxilcsoportok csökkenésével járó, és egy oxidációs, karboxilcsoportok növekedésével járó szakaszra. Az oxidatív folyamatok 180-190°C feletti hőmérsékleten már rövid idő alatt túlsúlyba jutnak a degradációs folyamatokkal szemben. A telítettség időfüggésének vizsgálatakor azt tapasztalta, hogy a járulékos anyagaiban gazdagabb fafajok telítettsége kezdetben gyorsan, majd fokozatosan csökkenő sebességgel nő. Az alacsony extrakttartalmú, vagy extraktmentes fajok telítettsége viszont kisebb sebességgel, de folyamatosan növekszik.

Tolvaj (1994) kutatásai szerint a 90°C -os gőzölés során a Németh által tapasztalt  $L^*$  ( $h^*_{ab}$ ) lineáris kapcsolat csak rövid gőzölési idő (kis színváltozás) esetén marad meg, és az egyes fafajokhoz tartozó egyenesek meredeksége eltérő.

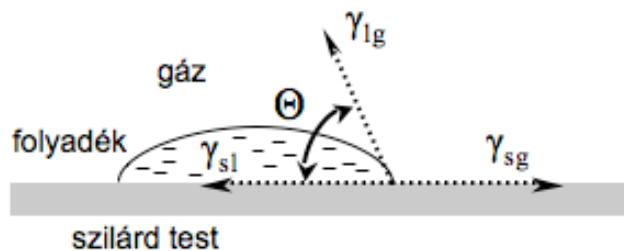
A legújabb (Horváth-Szováti 2000a, Horváth-Szováti 2000b, Horváth-Szováti és Varga 2000, Varga 2002) kutatási eredmények az akác faanyag 90-115°C-os hőmérsékleti tartományban történő gőzölése során bekövetkező színváltozásának vizsgálatáról szólnak. A folyamat jól jellemezhető a világosság-változással. A világosság változását sikerült két független változó, a gőzölési hőmérsékletet és a gőzölési időt tartalmazó függvénnyel leírni. A korrelációs indexek értékei azt mutatják, hogy a számítással meghatározott és a gőzölés során kialakuló világosságváltozás között nincs jelentős eltérés. Ez nagy előrelépés az ipari gőzölések szempontjából, hiszen a célként kitűzött világossági értékhez számítással megközelítőleg megállapítható a szükséges gőzölési hőmérséklet és gőzölési idő. Továbbra is problémát jelent azonban, hogy az ipari volumenű gőzölés eredményét nagyban befolyásolják az alkalmazott berendezés paraméterei. Az ipari és labor feltételek mellett folytatott kísérletek különbségeit tárgyalta többek között az „Innovation for Beach“ elnevezésű, 6. Keretprogram által támogatott EU-CRAFT projekt is, melyben egyetemünk kutatói is részt vettek ([www.innobeech.uni-freiburg.de](http://www.innobeech.uni-freiburg.de)). A laboratóriumi körülményekre számított gőzölési paramétereket tehát csak kellő körültekintéssel szabad elfogadni.



## II.7 A faanyag felületi energiája

A fa cellulózból, ligninből, hemicellulózból és járulékos anyagokból felépülő, rendkívül komplex anyag. Nedvesíthetőségi tulajdonságait leíró jellemzői, mint az illeszkedési szög, a felületi szabad energia és a felületek közötti adhéziós munka több tényezőtől függenek. Ilyen pl. a fafaj, különböző kezelések, szijács vagy geszt, előzmények (nedvességnek és fénynek való kitettség, biológiai károsodások, stb.), a felület tisztasága, a szárítás módja, szálirány (Nguyen és Johns 1979, Kalnins és Knaebe 1992).

Az illeszkedési szög a folyadékfelszínhez húzható érintő és a folyadék/szilárd anyag határfelülete által bezárt szög a folyadék és a szilárd felület érintkezési pontjánál (11. ábra).



**11. ábra** Az illeszkedési szög ( $\theta$ ), illetve a Young-egyenlőségben szereplő feszültségvektorok szemléltetése

A felületi feszültség atomos és molekuláris erők hatására jön létre szilárd anyagok vagy folyadékok felületén (Zoll 1995). Ezek az erők képesek adhéziós munkát végezni. A teljes felületi szabad energia a Lifshitz-van der Waals és a sav-bázis komponensekből tevődik össze.

A fafelületre jellemző a domináns Lifshitz-van der Waals komponens. A fafelület sav-bázis összetevőjének mérése nem tűnik túl megbízhatónak, mert erősen függ a mérés feltételeitől. Erre vonatkozóan meg kell jegyezni, hogy a Young-egyenlet által feltételezett termodinamikai egyensúly feltételei általában nem teljesülnek fafelület estében a kémiai heterogenitás, a felületi érdesség és a vizsgálati oldószer adszorpciója miatt.

A felületi energia adatok a faanyagnak különböző folyadékokkal (felületkezelő anyagok és ragasztók) történő nedvesítésének leírására és előrejelzésre használhatók (Scheikl és Dunky 1998, Boehme és Hora 1996, Gray 1961). Az illeszkedési szög és a felületi energia adatai lehetővé teszik az elméleti adhéziós munka értékeinek számítását fa és más anyag határfelületén (Meijer és Militz 1998), vagy használhatók a felület kémiai összetevői változásának felbecsülésére különböző kezelések, (Pecina és Paprzycki 1990, Pecina és Paprzycki 1988, Casilla et al. 1981), öregítés (Kalnins és Knaebe 1992, Nguyen és Johns 1979, Nussbaum 1995) után.

A legkorábbi kutatások (Gray 1962, Herczeg 1965) a kritikus felületi feszültség ( $\gamma_c$ ) mérésén alapulnak (Zisman 1972), később a felületi energia poláros ( $\gamma^p$ ) és diszperz ( $\gamma^D$ ) vagy nem poláros energia-összetevőit mérték vagy a geometriai (Girifalco és Good 1957) vagy a harmonikus közép (Wu 1971) módszer szerint (Scheikl és Dunky 1998, Nguyen és Johns 1978, Liptáková et al. 1995, Gardner 1996). Újabban a Lifshitz-van der Waals ( $\gamma^{LW}$ ) és a (Lewis) sav-bázis összetevőket ( $\gamma^{AB}$ ) (Van Oss et al. 1988) használják a felületi szabad energia mérésére (Gardner 1996, Shen et al. 1998). A teljes felületi szabad energia itt a Lifshitz-van der Waals és az egyesített sav ( $\gamma^+$ ) és bázis ( $\gamma^-$ ) komponensek összege. A Lewis által megadott összefüggésben a felület savasságát az elektron megkötés vagy proton leadás

lehetősége határozza meg. A lúgosságot az elektronleadás és protonfelvétel képessége irányítja. A sav-bázis kölcsönhatás hidrogénkötést tartalmaz.

A faanyag felületi energiájának meghatározására irányuló módszerek rendszerint a rögzített csepp statikus illeszkedési szögének vagy a dinamikus illeszkedési szög mérésén alapulnak (Gardner et al. 1991). Ki kell hangsúlyozni azt is, hogy e módszerek mind a Young-egyenlőségre épülnek:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos \theta$$

ahol  $\gamma$  a felületi feszültség ( $\text{mNm}^{-1}$  vagy  $\text{mJm}^{-2}$ ) a szilárd test-gáz (sg), a szilárd test-folyadék (sl) és a folyadék-gáz (lg) határfelületet illetően. Általában a Young-egyenlet feltételezi, hogy a szilárd felület kémiaiilag homogén, sík, és nem befolyásolt kémiai kölcsönhatások vagy a folyadék felületbe történő adszorpciója által.

A 8. táblázat az irodalomban megtalálható felületi energia adatok áttekintése különböző fafajokra és eljárásokra vonatkozóan. A legtöbb fafaj kritikus felületi feszültsége egy viszonylag keskeny tartományban helyezkedik el 40 és 55  $\text{mJm}^{-2}$  között, noha a fafajok kémiai összetételükben változatosak, és a különböző kutatások eltérő vizsgálati folyadékokat alkalmaznak. A poláros és diszperz összetevőkön alapuló teljes felületi szabad energia kisebb változatosságot mutat és általában magasabb is, mint a kritikus felületi feszültség. A poláros és diszperz komponensek terjedelme igen változó. Egyik komponens sem tűnik következetesen meghatározónak. Egy bizonyos fafaj esetében is nagyon változóak az értékek. Pl. a bükk poláros felületi energiája 19,6 és 53,1  $\text{mJm}^{-2}$  között, a diszperz komponens 6,9 és 32,1  $\text{mJm}^{-2}$  között van.

A számítási elv szintén nagy hatással van az eredményre; a geometriai átlag elvén kapott adatok (Owens és Wendt 1969) általában magasabbak, mint a harmonikus átlaggal számítottak (Wu 1971). Lifshitz-van der Waals közelítéssel a teljes felületi szabad energia általában kisebb vagy hasonló érték, mint a kritikus felületi feszültség. A felületi szabad energiát elsődlegesen a Lifshitz-van der Waals összetevő alkotja, de a legtöbb fafaj jelentős bázikus paramétert is mutat igen alacsony sav összetevővel. Eltekintve a számítási módszerekből adódó eltérésektől, a különböző megállapítások közötti variációk nagy részét megmagyarázhatja a felület komplex természete az illeszkedési szög mérésére vonatkozóan. Először is a fa porózus, ami az illeszkedési szög folyamatos csökkenését idézi elő a „sessile drop” méréseknél a kapilláris penetráció következtében (Liptáková és Kúdela 1994, Borhan és Rungta 1993, Meijer et al. 2001). Másodszor a fa szerkezete és megmunkálása felületi érdekességet eredményez. Ennek következményeként a folyadék területe sokkal jelentősebb a fasejtek irányára merőlegesen, mint azokkal párhuzamosan (Shen et al. 1998, Gardner et al. 1991), és a felület érdekessége befolyásolni fogja a mért illeszkedési szög-adatot (Huh és Mason 1977).

További bonyolító összetevő a felület kémiai heterogenitása. A faanyag fő alkotóelemein (cellulóz (40-50%), hemicellulóz (15-25%) és lignin (20-35)) kívül tartalmazhat 5-15%-nyi, terpének, olajok és polifenolok széles skálájából álló anyagot. Ezeknek az un. extrakt anyagoknak erős negatív hatása lehet a fafelület nedvesíthetőségére (Chen 1970). A szétválasztott komponensekre vonatkozó adatok azt mutatják, hogy cellulóz esetében  $\gamma^{LW} = 44 \text{ mJm}^{-2}$ ,  $\gamma^{AB} = 17,2 \text{ mJm}^{-2}$ ,  $\gamma^+ = 1,62 \text{ mJm}^{-2}$ ,  $\gamma^- = 17,2 \text{ mJm}^{-2}$  és hemicellulóz esetében  $\gamma^{LW} = 37,6 \text{ mJm}^{-2}$ ,  $\gamma^{AB} = 12,6 \text{ mJm}^{-2}$ ,  $\gamma^+ = 0,75 \text{ mJm}^{-2}$ ,  $\gamma^- = 53,1 \text{ mJm}^{-2}$  (Van Oss 1994). Extrahált ligninnél  $\gamma^{AB} = 10-13 \text{ mJm}^{-2}$  és  $\gamma^D = 45-50 \text{ mJm}^{-2}$  (Shen et al. 1998). Mivel a sejtfa-komponensek nem egyenletesen oszlanak el a sejtfa-között, a szétterülő folyadék különbségekkel fog találkozni a felület kémiai összetételében attól függően, hogy ez a sejtfa-külső, belső vagy kereszt részében van. Továbbá a sejtfalra adszorbeált víz mindig nagy

jelentőséggel bír; a pontos mennyiség azonban fafajonként eltérő és a környezet relatív páratartalmától is függ. Az illeszkedési szög méréséhez használt folyadékok szintén adszorbeálódnak a felületre, és diffundálódhatnak is abba. Ez azt jelenti, hogy a szétterülő folyadék előtt vékony folyadékgőz réteg lesz jelen.

Mint az a szakirodalomban is következetesen fellelhető (Nguyen és Johns 1979, Gardner et al. 1991, Liu et al. 1995, Nussbaum 1999), az öregedő fafelület nedvesítési tulajdonságait illetően nem meglepő, hogy a friss fafelület sokkal könnyebben nedvesíthető vízzel, mint az érettebb fa. A fafelület poláros jellege csökken, mivel a szén aránya az idő függvényében növekszik, ugyanakkor az oxigén aránya csökken, s ezzel a hidrofób jelleg erősebb lesz (Gindl et al. 2004). A vizes oldószeres bevonatok illeszkedési szöge azonban csökken az időben, jelezve ezzel az idősebb fafelület könnyebb nedvesíthetőségét. E meglepő jelenség a felület erősödő hidrofób jellegével, és a vízdékony bevonat vízhez képesti alacsonyabb poláros karakterével magyarázható. A jó nedvesítés azonban nem jelent feltétlenül jó adhéziót. A nedvesítés és az érintkező felületek adhéziós munkája olyan paraméterek, melyek nem alkalmazhatók a faanyag-bevonat-rendszer pontos leírására. Kizárólag a felületkezelő anyag kikeményedés utáni felületi szabad energiájának és összetevőinek ismerete teszi lehetővé a felületek közötti adhéziós munka kiszámítását a faanyag-bevonat-rendszerben.

Nussbaum (1995, 1999) természetes fafelületek inaktivitását vizsgálta az illeszkedési szög mérésével. Mérései során a frissen gyalult felületre jellemző nedvesítési szög állandósulásához szükséges időt határozta meg. Tapasztalatai alapján az erdei fenyő jellemzően 4 nap, a lucfenyő 6 nap alatt vált inaktívvá. Szignifikáns különbségeket talált geszt és szijács között erdei fenyőnél, illetve erdei fenyő és luc radiális és tangenciális felületein kialakuló értékek között. A különbségeket az extraktok összetételével és előfordulásával magyarázta. Hameed és Roffael (1999) szintén egyes fafajok gesztjének és szijácsának nedvesíthetőségét hasonlították össze. Radiális-, kereszt-, és tangenciális felületeken végzett vizsgálataik bizonyították, hogy a szijács vízzel és különböző ragasztóanyagokkal jobban nedvesíthető, mint a geszt.

A faanyag kötési tulajdonságait befolyásoló felületi változásokért a következő mechanizmusok felelősek: (Christiansen 1994): 1) hidrofób extraktívok vándorlása szárítás során, 2) oxidáció, 3) mikro-üregek penetrációt gátló bezáródása a faállományban, 4) extraktívok kötési időt befolyásoló savassága vagy reaktivitása, 5) funkciós csoportok reorientációja a felületen.

Vizes oldószeres bevonatok tulajdonságai és penetrációja közti viszony mennyiségi tanulmányozására az illeszkedési szög mérése is alkalmas (De Meijer et al. 2001). Az illeszkedési szög dinamikus mérése, a csepp alakja és térfogata a bevonat penetrációjának kezdeti szakaszáról nyújt információt. A nedvesítési folyamatot erősen befolyásolja a kapilláris penetráció, ami azt jelenti, hogy a viszkozitás fontos jelentőséggel bír a nedvesítés szempontjából is.

Lucfenyő és hőre lágyuló polimer közti adhézió jelentősen javítható a faanyag termikus előkezelésével (Follrich et al. 2006). A 200°C-on hőkezelt faanyag felületének hidrophil jellege jelentősen csökkent, amelynek eredményeképpen az illeszkedési szög nagymértékben növekedett. Az eredményeket a kezelési idő is befolyásolta. A kettős konzoltartón (DCB) végzett vizsgálatok a kezdeti törőerő és töréshez szükséges energia növekedését mutatták, a ragasztott felület nyírószilárdságát azonban nem befolyásolta a hőkezelés.

Fafaj	Mérés típusa	$\gamma_c$	$\gamma^P$	$\gamma^D$	$\gamma^{S1}$	$\gamma^{LW}$	$\gamma^+$	$\gamma^-$	$\gamma^{AB}$	$\gamma^{S2}$	Forrás
kőris	Wilhelmy plate	42,9	85,16	2,68	87,8	42,6	0	67,35	0,6	43,2	A
kőris	Wilhelmy plate		60,15	13,87	74						A
rezgő nyár	Wilhelmy plate		13,2	41,8	55 <sup>8</sup>	45	0,02	12,64	0,91	45,9	B <sup>7</sup>
bükk	sessile drop		19,18	31,88	50						C
bükk	sessile drop <sup>3</sup>		45,53	24,48	68,8						C
bükk	sessile drop	50,6	53,1	6,9	60						D
cseresznye	Wilhelmy plate	48,1	38,1	16,19	54,3	47,5	0,42	28	6,84	54,3	A
cseresznye	Wilhelmy plate		35,1	20,09	55,2 <sup>8</sup>						A
douglas	Wilhelmy plate		11,8	36,2	48 <sup>8</sup>	38,7	2,86	3,29	6,13	44,8	B <sup>7</sup>
douglas	sessile drop	52,8	19,2	28,8	48 <sup>8</sup>						E
douglas	sessile drop		11,5	37,5	49						F
juhar	Wilhelmy plate	46,8	56,07	8,77	64,8	45,5	0,46	33,19	7,85	53,3	A
juhar	Wilhelmy plate		40,93	20,13	61,1 <sup>8</sup>						A
juhar	Wilhelmy plate	42	16,4	40,2	56,6 <sup>8</sup>	43,2	0,71	13,29	6,15	49,4	B <sup>7</sup>
erdei fenyő <sup>4</sup>	sessile drop					40,7	1,73	8,41	7,63	48,3	G
erdei fenyő <sup>4</sup>	Wilhelmy plate					38,9	0,05	17,33	1,86	40,8	G
erdei fenyő <sup>5</sup>	sessile drop	50,9	83,4	0,4	83,8						D
erdei fenyő <sup>6</sup>	sessile drop	54,3	68,1	3	71,1						D
nyár	sessile drop	53,1	28,5	25,2	53,7						D
vörös juhar	sessile drop		72,7	3,9	76,6	45,5	0,02	57,01	2,14	47,7	H
vörös tölgy	Wilhelmy plate	46,8	42,2	10,4	52,6 <sup>8</sup>	39,7	0,46	37,74	8,3	48	A
vörös tölgy	Wilhelmy plate		35,04	16,87	51,9 <sup>8</sup>						A
vörösfenyő	sessile drop	57	31,5	22,7	54,2 <sup>8</sup>						F
lucfenyő	Wilhelmy plate	45	16,5	45	61,5 <sup>8</sup>	49,4	0,81	11,35	6,06	55,5	B <sup>7</sup>
lucfenyő <sup>5</sup>	sessile drop	51,8	71,6	2	73,6						D
lucfenyő <sup>6</sup>	sessile drop	53,2	41,9	13,9	55,8						D
dió	Wilhelmy plate	10,8	86,14	1,28	87,4	37,9	0,09	58,93	4,63	42,6	A
fehértölgy	Wilhelmy plate	31,4	41,65	5,29	46,9	34	0,39	22,8	5,98	40	A
fehértölgy	Wilhelmy plate		38,31	8,59	46,9 <sup>8</sup>						A

### 8. táblázat Egyes fajok szakirodalomban fellelhető szabad felületi energia adatai (mJm<sup>-2</sup>)

Megjegyzések: <sup>1</sup>  $\gamma^S = \gamma^P + \gamma^D$

<sup>2</sup>  $\gamma^S = \gamma^{LW} + \gamma^{AB}$

<sup>3</sup> ideális felületre

<sup>4</sup> rostiránnyal párhuzamosan

<sup>5</sup> korai pászta

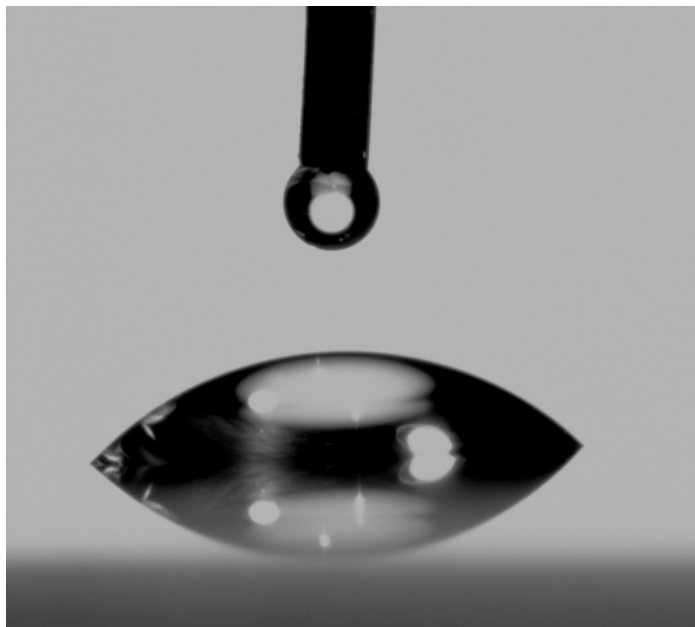
<sup>6</sup> késői pászta

<sup>7</sup> a közölt illeszkedési szögből számított adatok

<sup>8</sup> a harmónikus közép módszerével számított értékek (Wu 1971), egyébként a geometriai közép módszerét alkalmaztuk

Hivatkozások: A: Gardner 1996, B: Mantanis és Young 1997, C: Liptáková és Kúdela 1994, D: Scheikl és Dunky 1998, E: Nguyen és Johns 1978, F: Nguyen és Johns 1979, G: Shen et al. 1998.

Wulf és munkatársai (Wulf et al. 1997) MDF lapok nedvesíthetőségét vizsgálták illeszkedési szög mérésével. Tapasztalatuk szerint a mérést erősen befolyásolta a folyadék penetrációja az MDF lapba, valamint a felület érdessége, ezért eredményeik elsősorban kvalitatív jellegűek.



**12. ábra** A folyadékcsepp geometriájából meghatározható illeszkedési szög információt nyújt a felület nedvesíthetőségéről

Meijer (1999) három módszert hasonlított össze az illeszkedési szög fafelületen történő mérésére. A szétterülő csepp illeszkedési szögének közvetlen mérése (sessile drop) és a dinamikus illeszkedési szög mérése mellett a kapilláris emelkedés módszerét alkalmazta. Megállapította, hogy a mérési technikától függetlenül a fafelület alacsony felületi energiával rendelkezik, jellemzően 30 és 50 mJm<sup>-2</sup> között. A fa felületi szabad energiájának fő komponense az elektromágneses Lifshitz-van der Waals összetevő volt. A sav-bázis komponens alacsony, sőt bizonyos körülmények között negatív értéket vesz fel. A „sessile drop” eljárás fő hátránya, hogy erősen függ a faszövet irányától, így a mérés eredménye más-más eretire merőleges, illetve azzal párhuzamos irányban. Kétséges maradt, hogy ez valóban összefügg-e a kémiai heterogenitással, vagy az a folyadék különböző reakciója a kapilláris penetrációra. Mindazonáltal a „sessile drop” eljárás a legjobb módszernek tűnik fa esetében azért is, mert kiegészítő mérések nem szükségesek. Végül az eredmények világosan mutatják, hogy a Young-egyenlőség által feltételezett sok kikötés, mint a kémiai homogenitás, a megfelelő érdesség nem biztosítható, illetve az oldat abszorpciója és a kapilláris penetráció nem kerülhető el (Meijer et al. 2000). A „sessile drop” eljárás során az illeszkedési szöget a folyadékcsepp geometriájából határozzuk meg. A fafelületre cseppentett folyadék területét kamera segítségével rögzítjük két dimenzióban, majd a videofelvételt számítógép segítségével elemezzük. Az eljárás eredménye nagyan függ a mérés irányától. A növekvő fanedvesség tartalom csökkenő Lifshitz-van der Waals komponenst és növekvő sav-bázis felületi energia összetevőt jelent.

### III ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

#### III.1 A kutatás során felhasznált fafajok bemutatása

##### III.1.1 Fehér akác (*Robinia pseudoacacia* L)

###### *Elterjedés*

Őshazája Észak-Amerika. Európába 1601-ben J. Robin párizsi királyi főkertész hozta sok egyéb növényfajjal együtt. Magyarországra 1710-ben Tessedik Sámuel evangélikus lelkész révén került. Szerepe a magyar erdőgazdálkodásban rendkívüli, hiszen - Európában egyedülálló módon - Magyarországon mára az összes erdőterület több, mint 20 %-át e fafaj foglalja el (345 ezer hektár). Így a fakereskedelemben nem véletlenül tekintik az akácot tipikus magyar fafajnak. Európában jelentős állományok találhatóak Szlovákiában, Romániában, Franciaországban, Ukrajnában, Bulgáriában és Oroszországban is. Az akácerdők területe azonban nemcsak Európában nőtt ilyen sebesen, hanem a Közel-Keleten, valamint Kínában és Koreában is. Az akác a harmadik helyet foglalja el a föld gyorsan növekvő lombosfái között a *Populus* és az *Eucalyptus* fajok után. A szárazanyag termelés tekintetében az akác egyike a legértékesebb fajoknak. Termőhelyét azonban gyorsan kiéli, azt teljesen átalakítja, az eredeti növényzetből semmi sem marad vissza. Erőteljes vegetatív felújuló képessége miatt szinte kiirthatatlan, s ez különösen a még megmaradt természetes erdeinkben okoz nagy gondot. Az akácmánia következtében sok alföldi kocsányos tölgyesünk, de a hegy- és dombvidéken cseres-tölgyeseink, gyertyános-tölgyeseink, sőt bükköseink helyére is akácerdőt telepítettek. Kevés reményünk van arra, hogy a jövőben ezeken a területeken visszaalakítják az eredeti, természetes erdőállományt.

Év	Terület (ezer hektár)	Területarány %
1885*	24,2	2,1
1911	109,3	9,7
1923	110,6	10,1
1953	191,1	15,3
1993	291,7	18,8
2000	318,1	19

**9. táblázat** Az akácok területváltozása hazánkban (\* az ország mai területére vonatkoztatva) (Bartha 1998)

###### *Az élő fa jellemzői*

20-25 m magasságig nő és 30-60 cm mellmagassági átmérőt fejleszt. Növekedése 25 év után lecsökken, így 25-40 éves korban általában kitermelik. Kérge hálózatosan repedezett, vastag, szürkésbarna. Zárt állományban viszonylag egyenes, hengeres törzset fejleszt.

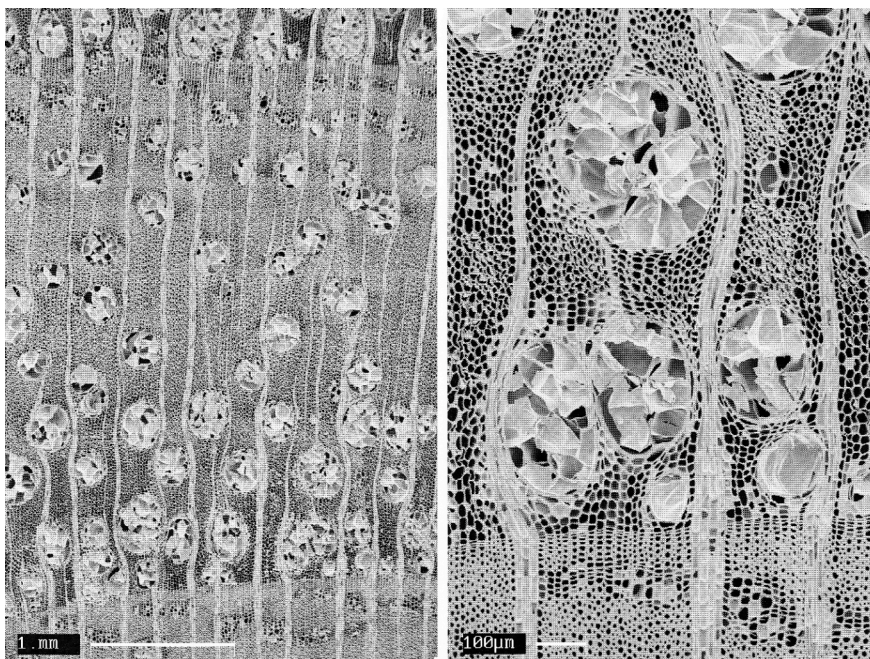
###### *Makroszkópikus jellemzők*

Szövetszerkezeti szempontból a gyűrűs likacsú fafajokhoz tartozik. Vékony, 2-6 évgyűrűt tartalmazó szijácsa világossárga, a geszt színe a sárgásbarnától a zöldesszürkéig változik. A szijácsban a gesztelő anyagok hiányoznak, ezért mechanikai jellemzői és tartóssága elmarad a gesztétől. Magas víz- és szerves anyag tartalma miatt a gombák és a rovarok elsősorban a

fának ezt a részét támadják. A gesztesítő anyagok közül különösen a csersav- és a robinetinféleségek jelentősek az akác tartóssága szempontjából. A gesztesítő anyagok lerakódása mellett a gesztesedési folyamat fontos tényezője a tiliszek behatolása az edényekbe.

#### *Mikroszkópikus jellemzők*

A fatest alapállományát képező vastag falú libriform rostok mennyiségi részaránya 58%, átlagos hosszúságuk 1 mm. A nagy átmérőjű edények (150-220  $\mu\text{m}$ ) a korai pásztában, 2-3 sorban helyezkednek el, a gesztben tiliszekkel erősen tömítettek. A késői pászta kisebb átmérőjű edényei (70-140  $\mu\text{m}$ ) egyesével vagy kisebb húr- és sugárirányú csoportokat alkotva helyezkednek el. Az edények részaránya kb. 15%. A bélsugarak keskenyek (1-3 sejtsor), részarányuk kb. 21%. A kis számú, gyakran emeletes elrendezésű hosszparenchimák az edények körül paratracheálisan helyezkednek el. A tömítőanyagok és tiliszsejtek jelenléte következtében az akác fája semmilyen irányban nem engedi át a folyadékokat (13. ábra).



**13. ábra** Tiliszek az akác mikroszkópikus képén (Forrás: Molnár és Bariska 2002)

#### *Fizikai, mechanikai tulajdonságok, tartósság*

Az akácfa jó néhány tekintetben egyedülálló az európai fafajok között. Vegyszeres kezelés nélkül is kiemelkedő tartóssága miatt különösen környezetbarát anyagnak tekinthető. Az akác fája felhasználás szempontjából jó tulajdonságokat egyesít. Az egyetlen fafaj Európában, melyet az EN 350–2 nemzetközi szabvány alapján az 1–2. rezisztenciaosztályba soroltak, amely átmenet az igen ellenálló és az ellenálló fokozat között. Magyarországi és külföldi tapasztalatok alapján gyakorlati tartóssága szabadban, talajjal érintkezve 25-40 év, szabadban, talajjal nem érintkezve 80-100 év, épületben száraz helyen, illetve víz alatt több, mint 500 év. Ezáltal válnak értékes felhasználási területté a vízparti létesítmények, gátak, kerti és játszótéri berendezések.

A frissen kitermelt akácfa mindössze 35-45% nettó nedvességet tartalmaz, ezért frissen vágva is jól ég. Rosttelítettségi pontját 21,8-22,5% nettó nedvességtartalomban határozták meg. Az akácfaiban igen jelentős belső feszültségek vannak, melyek a gyors növekedéssel, az inhomogén évgyűrűszerkezettel, a nagy juvenilisfa részarányával és a gyakori külpontos bélelhelyezkedéssel magyarázhatók.

Viszonylag nehezen gyullad nagy sűrűsége miatt. A nagy sűrűség okozza azt is, hogy a nyírrel, bükkal és a gyertyánnal együtt a legnagyobb fűtőértékkel rendelkeznek a közép-európai fafajok között (12633 MJ/m<sup>3</sup>). Kiemelkedő tüzelési sajátossága a hosszú utóizzási szakasz. Az alacsony kezdő nedvesség miatt az akác tűzifát elegendő egy évig tárolni, és szakszerű tárolás esetén gomba- és rovarkárosítások sem jelentkeznek. E tulajdonságai indokolják, hogy Magyarországon egyre nagyobb területet foglaljanak el az akác fafajból álló energetikai célú ültetvények, melyek 25 év alatt kis költséggel nagy mennyiségű és jól égethető dendromasszát adnak.

A hazai fajok közül a legkeményebb, legsűrűbb, legszilárdabb fák közé tartozik. Az akác fontosabb műszaki jellemzőit a 10. táblázat tartalmazza.

#### Megmunkálási sajátosságok, felhasználás

Kopásállósága és keménysége rendkívül kedvező értékeket mutat, melyeket elsősorban a padlóburkolatok kialakításánál lehet kihasználni. Dinamikus és statikus igénybevételekkel szembeni nagy ellenálló képességét sportszerek, épületszerkezetek, lépcsők gyártásánál aknázzák ki.

Fafaj	Sűrűség [kg/m <sup>3</sup> ] (u=12%)	Statikus szilárdsági jellemzők [MPa]			
		rostirányú húzó	nyomó	hajlító	nyíró
Fehér akác ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )	580-770-900	88-136-184	62-72-81	103-136-169	11-13-16
Kocsányos tölgy ( <i>Quercus robur</i> )	430-690-960	50-90-180	54-61-67	74-88-105	6-11-13
Bükk ( <i>Fagus silvatica</i> )	540-720-910	57-135-180	41-62-99	74-123-210	6,5-8-19

Fafaj	Statikus rugal- massági modulus [MPa]	Ütő-hajlító szilárdság [J/cm <sup>2</sup> ]	Keménység [MPa, Brinell]	
			bütü	oldal
Fehér akác ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )	9000-11300-13600	12-14-18	67-78-88	28-34-47
Kocsányos tölgy ( <i>Quercus robur</i> )	10000-11700-13200	1-6-16	66	34
Bükk ( <i>Fagus silvatica</i> )	10000-16000-18000	3-10-19	72	34

**10. táblázat** Az akác és a kocsányos tölgy egyes fizikai, mechanikai jellemzői (összehasonlítás céljából a táblázat tartalmazza a bükk adatait is) (Forrás: Molnár és Bariska 2002)

Az akácfa a forgácslemez-gyártásban, mint keverék fafajnak van szerepe. Érdekes, hogy a kész farostlemezek is megőrzik az akácfa sajátos sárgászöldes színét.

A magyar bútortipar az akácot kezdetben csak nem látható (például kárpitozott) szerkezeti elemként használta. Az 1970-es évek közepén konyhai székeket és asztalállványokat kezdtek akácból készíteni, ezután megjelent lakószobai székek és asztalok alapanyagaként is. A belsőtéri bútorok elterjedését színbeli tarkasága, a sokak számára előnytelen sárgászöldes színe és a faanyag nehéz megmunkálhatósága egyaránt gátolta. E problémákra megoldást jelent az akácfa gözölése és a korszerű keményfémlapkás szerszámok alkalmazása.

Gyártanak belőle szerszámnyelet és bútorlécet. Igen kiváló hordóipari alapanyag, mivel bármilyen vágásirányt alkalmazva sem engedi át a folyadékot, és a dongák hajlításakor ritkán fordul elő törés. Kiváló hangtani tulajdonságainak köszönhetően jó hangszerfaanyag bizonyul (xilofon-, marimba- hanglapok). Készülhet belőle hídfá, kerítés- és ládaelem. Mechanikai



tulajdonságai, tartóssága alapján, mihelyt színváltoztatásnak vetjük alá, sok területen képes helyettesíteni egyes trópusi fafajokat. Kopásállóságából kifolyólag kiváló parkett alapanyag. Az akác méhészeti felhasználása is jelentős. A vegyszermentesség, a halványsárga szín és az enyhe illat szolgálhatott alapul a japán mézkereskedők kijelentésének: "A világon a legjobb ízű mézet a Kárpát-medencében termelik."

### III.1.2 Kocsányos tölgy (*Quercus robur* L.)

#### *Elterjedés*

A kocsányos tölgy a sík és a dombvidék egyik legfontosabb állományalkotó faja. Szinte egész Európában elterjedt (északi határa Stockholm vonala), Magyarországon is őshonos. Általában szillel, gyertyánnal, cserrel, erdeifenyővel, mezei juharral elegyedik. Meghatározó fafaj az Alföldön, Dél- és Nyugat-Dunántúl dombságain. Területe hazánkban kb. 143000 ha (9,2%). Rendkívül fényigényes, de jól bírja a klíma szélsőségeit.

#### *Az élő fa jellemzői*

A kocsányos tölgy magassága 40-50 m, átmérője 2-3 m is lehet. A törzs zárt állásban hengeres, egyenes, szabad állásban elterebélyesedő. Kérge fiatalon sima, ezüstszürke, idősebb korban hosszanti irányban repedezett, szürkésbarnás fekete színű. A tölgyek kiemelkedően fontos szerepet töltenek be az erdei életközösségek kialakításában, hiszen 1000 rovarfajjal, számtalan gombafajjal és kis állattal képeznek egyetlen ökorendszert.

#### *Makroszkópikus jellemzők*

Szövetszerkezeti szempontból a gyűrűs likacsú fafajokhoz tartozik. Az évgyűrűhatár mentén szabályos sorokban elhelyezkedő nagy átmérőjű edények szabad szemmel is jól láthatók. A kocsányos tölgy keskeny szijácsa sárgásfehér, gesztje sárgásbarna. Rendkívül inhomogén évgyűrű szélességet mutat, és gyakori a rendellenes gesztesedés, a színbeli tarkaság is. A keskeny és széles bélsugarak váltakozva helyezkednek el: a nagyméretű bélsugarak a húrmetszeten széles (0,5-1,0 mm), sötét, 1-3 cm hosszú vonalak, a sugármetszeten pedig szabálytalan alakú, tükröző felületű csíkok (bélsugár tükrök). A nagyméretű edények, az elkülönülő pászták, a széles bélsugarak és a kellemes sárgásbarnás színárnyalat sajátos szépségű rajzolatot, és ezáltal rusztikus hatású megjelenést kölcsönöznek a tölgyfának.

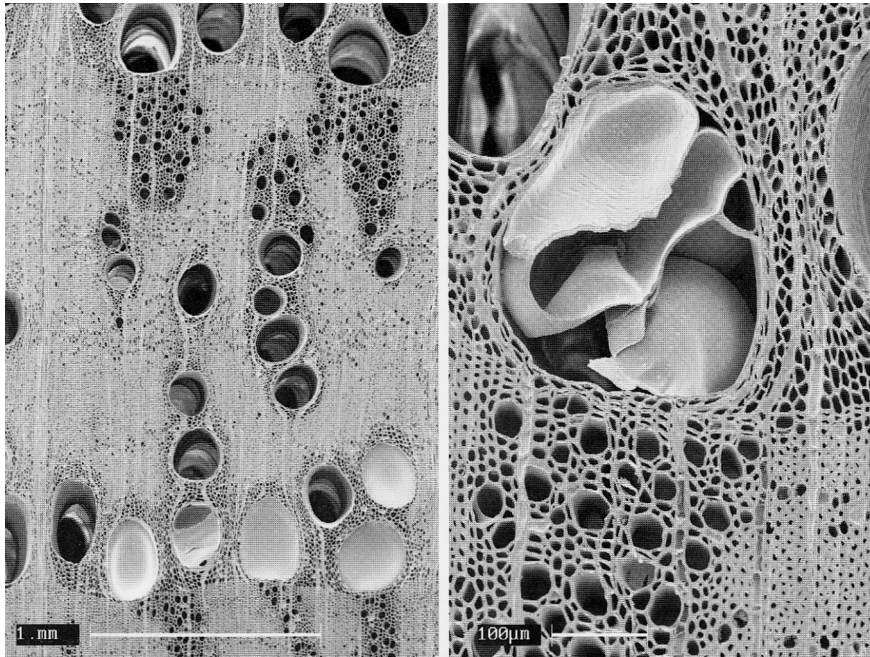


14 ábra A tölgy levélzete és termése (Forrás: [www.classes.hortla.wsu.edu](http://www.classes.hortla.wsu.edu))

#### *Mikroszkópikus jellemzők*

A korai pászta edényei 0,15-0,30 mm, a késői pásztáé 0,03-0,15 mm átmérőjűek. Átlagos részarányuk 25%. Az edényüregek gyakran tiliszekkel tömítettek (15. ábra). A vékonyfalú, kisméretű hosszparenchimák apotracheális hálózatos elrendezésűek, mennyiségi részarányuk kb. 5%. A bélsugarak homogén szerkezetűek, rendszertelenek. Az egysejtsoros keskeny bélsugarak magassága kb. 25 sejtsor, a széles (0,5-1 mm) bélsugarak magassága elérheti az 50

sejtsort (1-3 cm) is. A farostok viszonylag rövidek (0,88 mm), de vastag falúak (átlagosan 4,2  $\mu\text{m}$ ), mennyiségi részarányuk 58%.



**15. ábra** A tölgy keresztmetszete (Forrás: Molnár és Bariska 2002)

#### *Fizikai, mechanikai tulajdonságok, tartósság*

A frissen kitermelt kocsányos tölgy fája az erős gesztesedés ellenére viszonylag nagy nedvességtartalmú és a szöveti sajátosságok miatt szárítása nagy körültekintést, kíméletes menetrendeket igényel. Fontosabb műszaki jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza.

A kedvező esztétikai és műszaki tulajdonságai, valamint tartóssága (az EN 350–2 nemzetközi szabvány szerint a II. tartóssági osztályba tartoznak) miatt a tölgyek a világ legkeresettebb fái közé tartoznak.

A fatest sajátos minőségi problémája az erős színbeli tarkaság és az évgyűrűszélesség erős ingadozása. A sötét elszíneződés különösen a károsodott, beteg törzseknél gyűrű alakú is lehet. Az ilyen elszíneződés általában még nem mutat gombafertőzést, csak egy erős tiliszesedés, preventív gesztesedés eredménye. Gyakoriak a fatestben a vastag bélsugarak mentén a bélrepedések, sőt a korai pásztában a gyűrűs elválások is. Nyári időszakban ügyelni kell a viszonylag gyors feldolgozásra, mert hamar bekövetkezhet a szijács korhadása.

#### *Megmunkálási sajátosságok, felhasználás*

A tölgyek ősi anyagai a mélyépítésnek, a szilárd és tartós épületszerkezeteknek, fahidaknak. Felhasználják a hajó-, a kocs- és a vagongyártásban. Kültéri alkalmazásoknál vasúti váltótálpfák, karók, oszlopok, cölöpök pótolhatatlan alapanyaga. Belsőépítészetben a tölgy a legértékesebb lépcső-, korlát-, parketta-, és falburkolat. Készítenek belőle értékes ajtókat és ablakokat egyaránt. Felhasználják furnér és tömörfa formájában is. A boroshordó és az egyéb kádáripari termékek legfontosabb alapanyaga. A tölgyeket széleskörűen alkalmazzák játszótéri és különböző kerti berendezések kialakítására is.

A gőzölést tölgyek esetében hidrotermikus előkezelés, lágyítás céljára használják furnérhasításnál, hámozásnál, illetve a tömörfa alkatrészek tartós hajlításánál. A tölgyek szárításakor jelentős esztétikai károk keletkezhetnek az oxidációs elszíneződések, foltosodás által. E színbeli tarkaság jelentősen csökkenthető egy utólagos gőzölési folyamat beiktatásával.

### III.1.3 Merbau (*Intsia bijuga*)

Egyéb elnevezések: vesi-Fiji, kwila-PNG, ipil-Fülöp-szigetek

#### *Elterjedés*

Botanikai neve az *intsia* szóból ered, mely egy indiai növény elnevezése; a *bijuga* fajtanév a latin *bi* (jelentése: kettő), valamint *juga* (jelentése: összekapcsolt, összekötött) szavakból ered, utalva ezzel a párosával elhelyezkedő levelekre.

Botanikailag a vesi, vagy kereskedelemben használatos nevén merbau a hüvelyesek családjához, azon belül a Caesalpinoideae nevű alcsaládkhoz tartozik. Származási helye a Csendes-óceán térsége és Pápua-Új-Guinea (PNG). Az alacsonyan fekvő esőerdők fája, melynek növedéke Dél-kelet Ázsia legértékesebb faanyaga. Megtalálható Madagaszkáron, Malaysiában, Indonéziában, a Fülöp-szigeteken, Thaiföldön és több, a Csendes-óceán nyugati részén fekvő szigeten, valamint Ausztráliában is. A vesi a környezeti feltételek rendkívül széles skáláját tudja elviselni: durva, mészköves síkvidéki területen, homokos és iszapos tengerparti földön vagy rendkívül száraz klímán ugyanúgy megél, mint időszakosan száraz, szeles tengerparton, belterületi vízfolyások mentén.

#### *Az élő fa jellemzői*

Az érett, kifejlett fa magassága 7-25 m, de szélsőséges esetben a 40 m-t is elérheti. Szabad állásban (75-100%-os napfényben) egyenesen, árnyékban (25-50%-os napfényben) szerteágazóan növekedik. A fatörzs átmérője elérheti a 0,5-1 métert, általában hosszú, egyenes, de tengerparti élőhely esetén gyakran görbe. A kéreg jellegzetes világos pirosas, vörösbarna, idősebb korban világos szürke, szabálytalan foltokban leváló, néha pikkelyes. A szíjács fehér, a geszt vörösbarna színű.

Egy növényen megtalálhatók a bibés és porzós virágok. Az egyes virágok közepesen nagyok négy zöld csészelevéllel, egy nagy szíromlevéllel és három porzószállal. A szíromlevél fehér (középen vöröses), vagy lilásrózsaszín (16. ábra). A beporzást rovarok (például méhek), madarak és a szél végezheti.

A merbau világos, fénylő, világoszöld lombkoronájával élesen elkülönül az erdő többi növényétől. A levelek szárnyaltak, rendszerint négy, 8-15 cm hosszú, nagyjából elliptikus, aszimmetrikus levélkével. A két függő véglevélke rendkívül jellegzetes. Bár a merbau örökzöld, hajlamos periódikusan lehullatni lombzatát egy fajtaspecifikus parazita, az *Insnesia glabrascuta* fertőzése következtében.

Gyümölcse vastag, kemény, hosszúkás téglalap, vagy körte alakú hüvely, mely akár 10 cm széles és 30 cm hosszú is lehet (17. ábra). Minden egyes hüvely kemény maghéjjal rendelkező, 2-8 fakó-barna, kerek, lapos magot tartalmaz, melyek átmérője kb. 2-4 cm.

A merbau gyökérképződése meglehetősen különleges jelenség. A felnőtt egyedek széles támasztógyökerekkel rendelkeznek, melyek kifejlett állapotban akár 4 m szélesek is lehetnek. Egyes esetekben enyhe gyökérduzzadás is előfordul a termőhelyi adottságoktól függően. Ahogy a fa növekszik elegendő ásványi anyagra, és megfelelő támasztékra van szüksége a növekedés és fejlődés fenntartásához. A rostrendszer erre nem lenne megfelelő, ezért a fás gyökérszövet vertikális irányban terjeszkedik, a törzs oldalsó részeiből kiinduló radiális falakat (támasztékot) formálva. Ez a gyökérszövet lehetővé teszi a fa számára a trópusi környezetre, illetve a mészkő és szikla szigetekre jellemző gyakorta vékony termőtalaj védelmét. A dúcok lehetetlenné teszik a konkurens egyedek megtelepedését az általuk elfoglalt területen, valamint olyan kiegészítő húzóerőt biztosítanak, melyek hathatósan megakadályozzák, hogy a ciklonok gyökereitől kitépjék a fát.



**16. ábra** Az *Intsia bijuga* virágzata  
(Forrás: www.agroforestry.net)

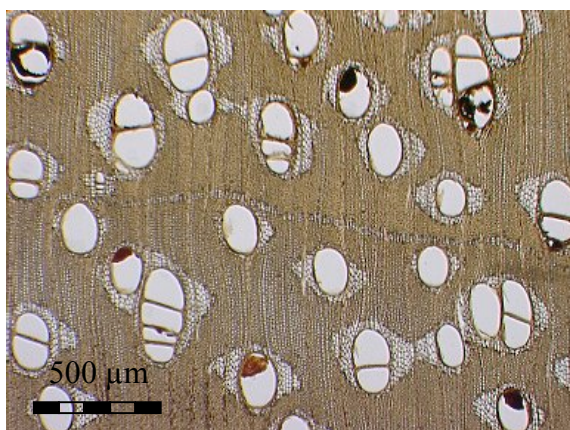


**17. ábra** Az *Intsia bijuga* termése  
(Forrás: www.agroforestry.net)

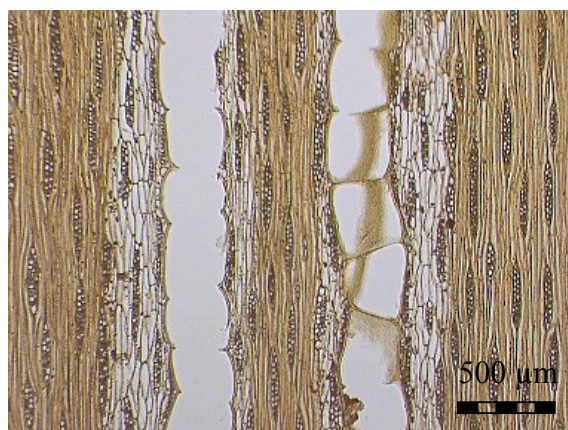
A kezdeti gyors növekedési szakasz ellenére a merbau viszonylag lassan növekvő fafaj, 75-80 éves korára éri el az érett kort. Az első néhány évben fokozott védelmet igényel a konkurens gyomokkal szemben. A fűrészáru termeléséhez szükséges vágásérettségi kort 50-60 év alatt éri el, mely trópusi fafajok esetében meglehetősen hosszú vágásfordulót jelent. E hátránya miatt gazdaságossági szempontból sokan megkérdőjelezik a fafaj fűrészárúként történő felhasználását.

#### *Mikroszkópikus jellemzők*

Pórusai nagyok (150-200  $\mu\text{m}$ ), szórtan elhelyezkedők, magányosan, vagy 2-3-asával, csoportokban, radiális sorokba rendeződve fordulhatnak elő (18. ábra). Tiliszekkel tömítettek, sárgásfehér, részben fekete töltőanyagot tartalmaznak. E kristályokat tiszta robinetinként azonosították. A parenchimák apotracheális elrendezésűek. A bélsugarak lehetnek egy- vagy több sejtsorosak. Szélességük 50-120  $\mu\text{m}$ , magasságuk 300-400  $\mu\text{m}$  (19. ábra).



**18. ábra** Az *Intsia bijuga* keresztmetszete  
(Forrás: Richter és Dallwitz 2000)



**19. ábra** Az *Intsia bijuga* tangenciális metszete (Forrás: Richter és Dallwitz 2000)

### *Fizikai, mechanikai jellemzők*

Nagy sűrűségű fafaj ( $740-900 \text{ kg/m}^3$  12%-os nedvességtartalom mellett), mely közepes zsugorodási tulajdonságokkal rendelkezik (tangenciális irányban 4,4%, radiális irányban 2,7%). Rugalmassági modulusa igen nagy ( $13000-16500 \text{ N/mm}^2$ ), rostirányú nyomószilárdsága illetve nyírószilárdsága rendkívül nagy. Statikus hajlítószilárdsága  $1156-155 \text{ N/mm}^2$ , Janka-keménysége  $89 \text{ N/mm}^2$  rostokkal párhuzamosan,  $95 \text{ N/mm}^2$  rostokra merőlegesen. Rosttelítettségi pontját 27%-ban állapították meg. Fája gőzölés után könnyen hajlítható. Minden különösebb nehézség nélkül ragasztható. Felületkezelés előtt a fafelület zsirtalanítása, illetve különleges lakkok alkalmazása szükséges a nagy mennyiségű vízdékony, sárgászörös berakódások jelenléte miatt.

### *Felhasználás*

A merbau mint élő fa eredményesen alkalmazható a talajerózió megakadályozására. A szélnek erősen ellenálló tulajdonsága miatt kiváló eleme lehet a védelmi funkciót betöltő erdősávoknak, különösen tengerparti területeken, mivel a sós permetet is tűri. Több beporzást végző rovar – köztük a méhek – gyakran látogatják. Kellemesen világos, fénylő, világoszöld lombkoronájának és gyönyörű, orchideához hasonlatos virágzatának köszönhetően rendkívül díszes fa.



**20. ábra** A merbau gesztje (saját felvétel)



**21. ábra** A merbau exkluzív padlóburkolatok kedvelt alapanyaga (Forrás: [www.kenneallytimber.co.nz](http://www.kenneallytimber.co.nz))

Fontos kiemelni e faj gyógyászati célú felhasználását. Fijin az emberek gyakran használják a kéregből nyert extraktumot belső bántalmakra. A kéreg főzete felnőtteknél reuma, hidegrázás, hasmenés, izommerevség és ízületi gyulladás kezelésére használatos. Más növények párlatával együtt törött csontok gyógyítására alkalmas. A törzs levét asztma, a belső kéreg levét pedig csontokban előforduló fájások, meghülés, influenza kezelésére használják. A levelek főzetét a szellemtől megszállt test kezelésére, más növények párlatával együtt fogfájás, torokgyulladás gyógyítására isszák (Cambie és Ash 1994).

Tartóssága alapján négy faj közül a merbau volt az egyik, melynek engedélyezték kerítésoszlopként történő felhasználását a Salamon-szigeteken az 1970-es évek közepén. A kiemelkedő faanyag-tulajdonságok (szilárdság, sűrűség, kedvező zsugorodás-dagadási tulajdonságok) kombinációja miatt a fafaragás, kézműipar ideális és igen értékes alapanyaga. Tradicionálisan kenek, a hasított gong (egy dobfajta), házak, épületek, bútorok és puskatások kedvelt faanyaga. Bár jó tűzifa, de fáját túl értékesnek tartják ilyen célokra. A fatestben jelenlévő olajos összetevőkből barna és sárga színezőanyag nyerhető. Európában ma főleg lépcsők, padlóburkolatok alapanyagaként hasznosítják exkluzív helyeken (21. ábra). Hangszerek, dekoratív esztergályozott és műbútorasztalos termékek értékes faanyaga. Hollandiában, széles körben alkalmazzák ajtó- és ablakszerkezetek gyártására is, de ottani tapasztalatok szerint – ellentétben az irodalomban fellelhető leírások állításaival – nehezen felületkezelhető.

#### III.1.4 Angelim pedra (*Hymenolobium petraeum*)

Egyéb elnevezések: Sapupira

##### *Az élő fa jellemzői*

A Fabaceae családba tartozó faj. Dél-Amerika északi részének trópusi esőerdőiben a szárazföldi erdőállományok uralkodó fajtája. Magassága akár a 60 m-t, átmérője a 2 m-t is elérheti (23. ábra).

##### *Makro- és mikroszkópikus jellemzők*

A növekedési zónák nem különülnek el élesen egymástól. A geszt vágás után sárgásbarna színű, de kitettség következtében narancsbarnától sötét barnáig színeződhet. A geszt jellegzetes világos csíkos. A szijács színben eltér a geszttől.

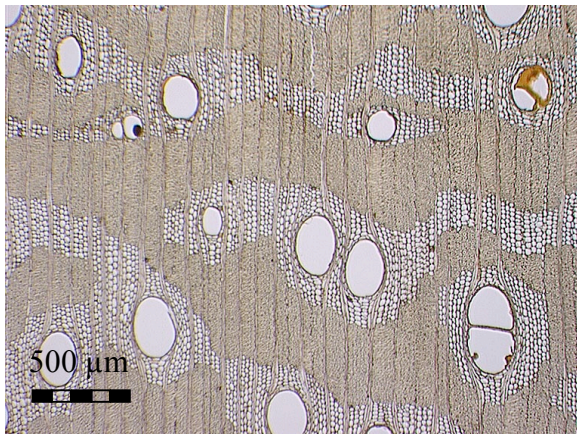
Szórtlikacsú fafaj. Az edények általában rövid (2-3 edény) radiális sorokba rendeződnek. Az átlagos edényátmérő 135-230-325 µm, az edényüregek kicsik (24. ábra). Tiliszek az edényekben nem találhatóak. Barna és fekete berakódások előfordulnak. A farostok vastag falúak. A hosszparenchima sejtek három sejtsornál is szélesebb nyalábokba rendeződnek, paratracheális elhelyezkedésűek. A bélsugarak kettő- vagy többféle sejtípusból állnak, 2-3 sejtsor szélességűek (25. ábra).



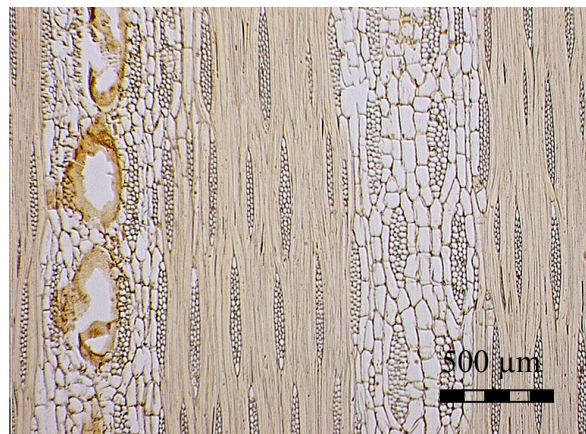
22. ábra *Hymenolobium petraeum* (Forrás: [www.bigfoot.hu](http://www.bigfoot.hu))



**23. ábra** A *Hymenolobium petraeum* törzsátmérője a 2 métert is elérheti (Forrás: [www.bigfoot.hu](http://www.bigfoot.hu))



**24. ábra** *Hymenolobium petraeum* keresztmetszete (Forrás: Richter és Dallwitz 2000)



**25. ábra** *Hymenolobium petraeum* tangenciális metszete (Forrás: Richter és Dallwitz 2000)

#### *Fizikai, mechanikai jellemzők, felhasználás*

Közepes sűrűségű fafaj ( $770 \text{ kg/m}^3$  12%-os nedvességtartalom mellett), mely jó szilárdsági és zsugorodás-dagadási tulajdonságokkal rendelkezik. Könnyen szárítható, kevés szárítási hibával. Épületasztalos- és bútortipari célokra egyaránt felhasználják, csakúgy, mint a hajógyártás egyes területein. Nehezen ragasztható, felületkezelhető a felületre kirakódott olaj- és viaszfoltok miatt.

### III.2 Anyagszükséglet, az alkalmazott technológia ismertetése

A vizsgálatokhoz felhasznált próbatestek alapanyagait szín, rostlefutás és évgyűrű szerkezet alapján gondosan válogattuk. Mivel egy gőzölési ciklusban a gőzölöhenger mérete miatt csak korlátozott mennyiségű faanyagot képes befogadni, ezért a kis elemszám mellett törekedni kellett az anyagtulajdonságok tekintetében a szélsőségek elkerülésére. Az akác (*Robinia pseudoacacia*) származási helye Magyarország, a tölgyet (*Quercus robur*) Németországból szállították. Az egzóta fajok pontos származása ismeretlen, mivel ezeket olyan nyílászárógyártó cégektől szereztük be, melyek egyéb fafajok mellett az angelim (*Hymenolobium petraeum*) és a merbau (*Intsia bijuga*) továbbfeldolgozói. A deszka méretekben beérkezett fűrészárut feldolgozás előtt 2-3 hétig normál klímán (20°C, 65% relatív légnedvesség) tároltuk. A pontos méretek kialakítása fűrészelés után gyalulással történt. A próbatestek faanyagszükséglete fafajonként:

Vizsgálat típusa	Próbatest mérete	Darabszám
1) Hajlítószilárdság, E-modulus	20x20x350 mm	40
2) Keménység, szín, illeszkedési szög, felületkezelés (lakkozás) tartóssága	40x70x350 mm	16
3) Ragasztott kötés szilárdsága	10x130x350 mm	32

A kész méretek kialakítása után újabb válogatás következett, így a táblázat már a válogatás utáni darabszámokat tartalmazza. A kész próbatesteket újabb két hétig tároltuk klimatizált kamrában. A klimatizálás ideje alatt egy előkísérlet sorozatot végeztünk, melynek célja az egyes fafajokra vonatkozó optimális gőzölési paraméterek meghatározása volt. Az előkísérletek eredményeképpen megállapítottuk a gőzölés két meghatározó paraméterének, a gőzölési hőmérsékletnek és a gőzölési időnek maximális és minimális értékeit. A gőzölési idő maximumát a gazdaságosság, a gőzölési hőmérséklet maximumát a faanyag mechanikai tulajdonságai határozták meg.

Az elvégzett kísérletek paraméterei (hőmérséklet, kezelési idő), és az ismétlések száma:

a) akác, merbau és sapupira esetében:

	3 óra	7,5 óra	20 óra
108 °C	x		x
115 °C		xxx	
122 °C	x		x

b) tölgy esetében:

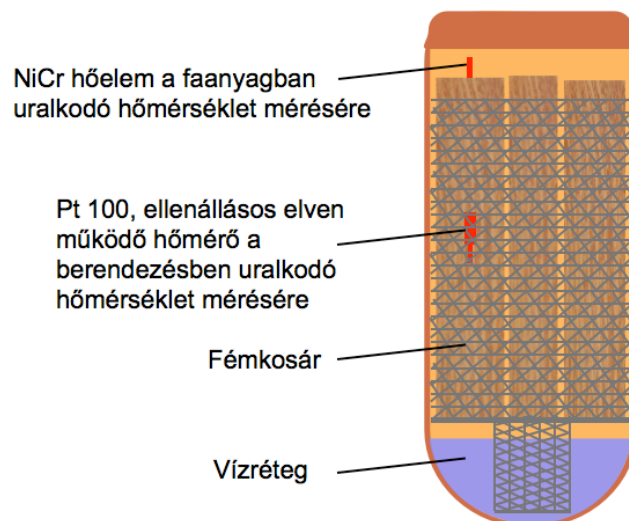
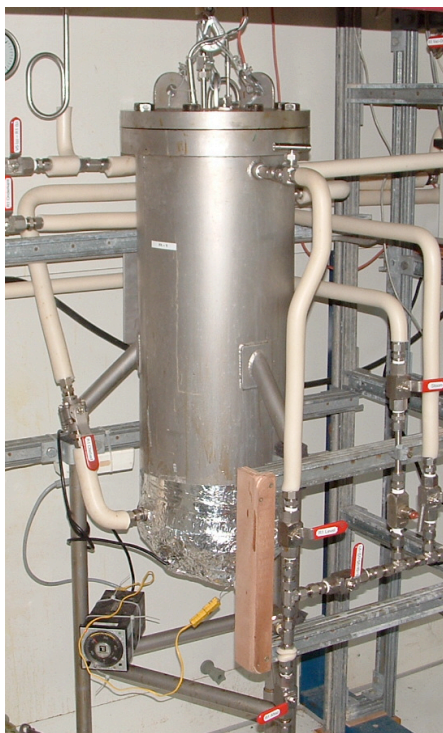
	3 óra	7,5 óra	20 óra
92 °C	x		x
100 °C		xxx	
108 °C	x		x

Mint látható, tölgy esetében a gőzölési hőmérsékleteket csökkenteni kellett a gyengébb mechanikai tulajdonságok, a repedékenység miatt. A másik három fafaj kevésbé kényes, így a teljes hőmérsékleti skálán túlnyomósan gőzölés alkalmazható volt.

Az egyes fafajokat külön-külön kezeltük. A nyomástartó edény, melyben a gőzölést végeztük egy duplafalú, szigetelt, kb. 0,025 m<sup>3</sup> hasznos térfogatú üst. Fűtési rendszere három különböző részből tevődik össze: körben, a hengerpalást teljes magasságban olajfűtéssel van



ellátva; a henger alulról elektromosan fűthető, illetve lehetőség van szintén alulról gőz bevezetésére. Mivel a közvetlen gőzbevezetés a faanyag szempontjából nem előnyös, ezért a tartály alján lévő vízréteggel biztosítottuk a sokkal kíméletesebb módszert képviselő közvetett gőzölési eljárás feltételeit. A hőmérsékletet a modifikáló hengerben egy Pt-100-as ellenállásos elven működő berendezéssel, közvetlenül a faanyag belsejében pedig NiCr hőelem (K-elem) segítségével mértük. A gőzölendő faanyagot egy fémkosárban helyeztük el, majd ezt a fémkosarat tettük a hengerbe. A felfűtés 2 órát vett igénybe. A számítógéppel összekötött szabályzó berendezés lehetővé tette a beállított hőmérséklet  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ -os intervallumon belül tartását, illetve a folyamat teljes időtartama alatt a hőmérsékletváltozás nyomon követését. A grafikonok alapján a faanyag minden esetben jól követte a környezeti (a gőzölőhengerben uralkodó) hőmérséklet változását. A fenti táblázatokban feltüntetett időértékek a tiszta (felfűtési és lehűtési idő nélküli) gőzölési időket adják meg. Az atmoszférikus nyomás elérése után (tehát  $100^\circ\text{C}$  alatt) a gőzölőedény kinyitható, így a lehűtés 10-20 percet vett igénybe. Tapasztalataink szerint hosszabb kondicionálási időre nincs szükség, mivel a bütürepedések nem a gőzölés után, hanem a folyamat közben keletkeznek. A kezelés után a próbatesteket egy hétig klímakamrában, normál klímán tároltuk.



**26 ábra** A gőzölőberendezésről készült fotó illetve vázlatrajz az érzékelőkkel

Egy gőzölési eljárás során a következő méretű és számú próbatestek gőzölésére volt lehetőség:

- 20x20x350 mm, 5 darab,
- 40x70x350 mm, 2 darab,
- 10x130x350 mm, 4 darab.

Mint ahogy az a fent leírtakból kiderült, fafajonként 8 mintasorozatot kellett kialakítanunk. Ebből egy sorozat darabjain gőzöletlenül végeztük el a szükséges méréseket, vizsgálatokat, míg 7 sorozatot gőzölés után mértünk.

### III.3 A kezeletlen és hőkezelt faanyagon elvégzett vizsgálatok

#### III.3.1 Fanedvesség-tartalom meghatározása

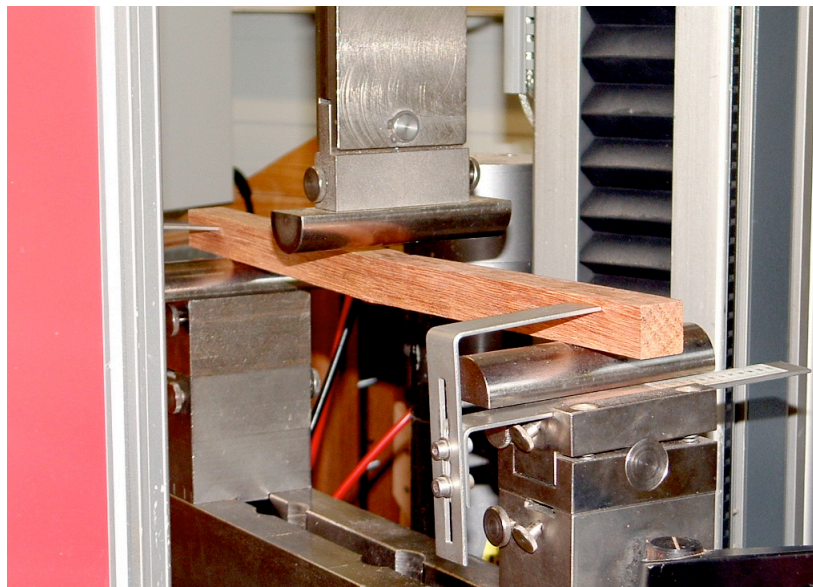
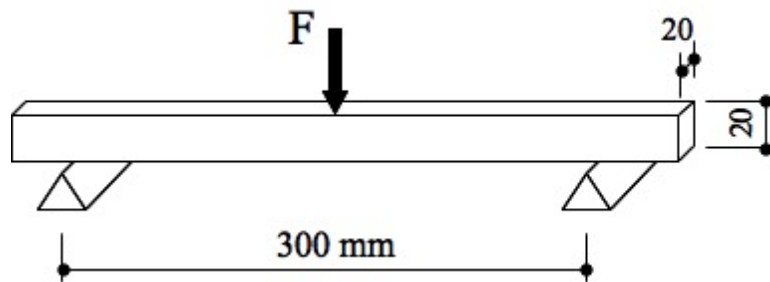
A hajlítóvizsgálat próbadarabjainak nedvességtartalmát tömegméréssel abszolút száraz bázison határoztuk meg a következő összefüggés alapján (ISO 3130/1975):

$$u = \frac{m_n - m_0}{m_0} \cdot 100, [\%]$$

ahol:  $m_n$  – a nedves faanyag tömege,  $m_0$  – a 105°C-on tömegállandóságig szárított faanyag tömege.

#### III.3.2 Hajlítószilárdság meghatározása

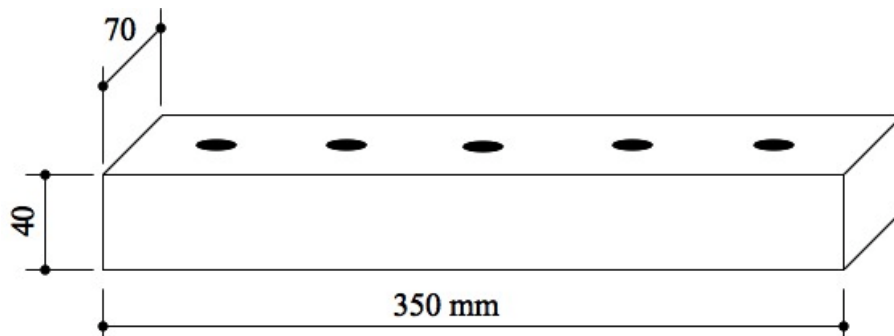
A rostokkal párhuzamos hajlítószilárdságot a DIN 52186 szabvány szerint hárompontos hajlító igénybevétellel határoztuk meg. A 20x20 mm keresztmetszetű próbatesteket 300 mm-es támaszközzel, Zwick Z020 típusú anyagvizsgáló gépen vizsgáltuk (27. ábra). A vizsgálatok próbadarabjait úgy válogattuk össze, hogy azok egyenes rostlefutásúak, homogén szerkezetűek legyenek. A próbatestek bütün mérhető évgyűrűállása  $\alpha = 25-45^\circ$  volt.



27. ábra Hajlító igénybevétel kísérleti elrendezése és kivitelezése

### III.3.3 Keménységmérés

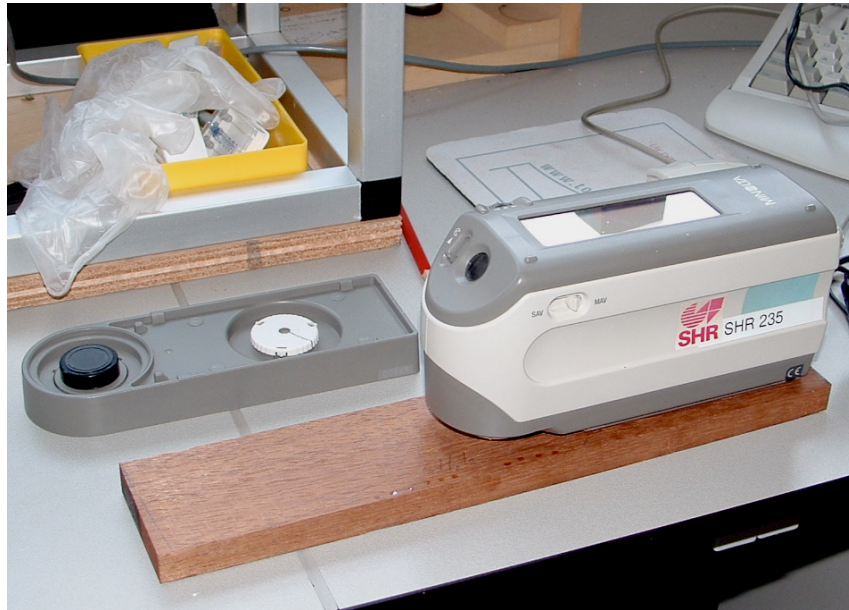
A Janka szerinti keménységmérés során egy 11,284 mm átmérőjű polírozott acélgolyót feléig a mintadarabba nyomtunk. A benyomáshoz szükséges erő közvetlenül a keménységet adja. Vizsgálataink során a faanyag oldalkeménységét a 40x70 mm keresztmetszetű próbatetek két nagyobbik oldalfelületén mértük Zwick Z020 típusú anyagvizsgáló gépen (28. ábra).



28. ábra Keménységmérés Janka-módszerrel: a próbatetek kialakítása, mérési pontok, és a mérés kivitelezése

### III.3.4 A gőzölés hatása a faanyagok színére

A faanyag gőzölése során végbemenő színváltozás objektív mérésére spektrofotométert használtunk. A 40x70 mm keresztmetszetű próbateteket nagyobbik oldalukkal párhuzamos irányban kettévágtuk. Az így nyert két friss felületet gyalultuk, majd az egyiket CIELab rendszer segítségével, Minolta CM 2600d színmérő berendezéssel meghatároztuk a világosságot, illetve a színezetet (29. ábra). A mérőberendezés a színkoordinátákat közvetlenül szolgáltatja, így kiegészítő számításokra nincs szükség, a módszer igen gyors. A színinger-különbséget ( $\Delta E^*$ ), azaz két színpont távolságát a koordinátákból a térbeli Pitagorasz-tétel adja meg. Az  $a^*(t)$ ,  $b^*(t)$ , és az  $L^*(t)$  diagramok a végbemenő színváltozást jól szemléltetik.



29. ábra Színmérés Minolta CM 2600d berendezéssel

### III.3.5 Felületi szabad energia meghatározása

A felületi szabad energia kísérleti meghatározásához egy geometriai mérési és számítási módszert, az ún. „rögzített csepp” módszert alkalmaztuk (30. ábra). A méréshez a kettévágott, gyalult friss felületeket használtuk fel. Az illeszkedési szöget három különböző folyadék (víz, diiodometán, formamid) esetében mértük. A három szögértékből a felületi szabad energia kiszámítható.

Mindegyik vizsgálati folyadék legalább 99%-os tisztaságú volt. Tárolásuk száraz, vízmentes körülmények között történt, megakadályozva ezzel a vízzel bekövetkező szennyeződést. A fontosabb fizikai adatokat és felületi feszültség értékeket a 11. táblázatban foglaltuk össze.

Folyadék	sűrűség kg/m <sup>3</sup>	viszkozitás mPa s	$\gamma_L$ mJ m <sup>-2</sup>	$\gamma^{LW}$ mJ m <sup>-2</sup>	$\gamma^+$ mJ m <sup>-2</sup>	$\gamma^-$ mJ m <sup>-2</sup>	$\gamma^{AB}$ mJ m <sup>-2</sup>
dijodometán	3325	2,8	50,8	50,8	0	0	0
víz	1000	1,00	72,8	21,8	25,5	25,5	51,0
formamid	799	1,02	58	39	2,28	39,6	19

11. táblázat Az illeszkedési szög méréséhez használt folyadékok fizikai adatai és felületi feszültsége 20°C-on. A felületi energia adatok forrása (Van Oss 1994).

A felületi szabad energia komponenseit a diiodometán, a formamid és a víz illeszkedési szögéből, az alábbi egyenlőség alapján számítottuk ki (Good 193):

$$0,5\gamma_1(1 + \cos \Theta) = \sqrt{\gamma_s^{LW} \cdot \gamma_l^{LW}} + \sqrt{\gamma_s^- \cdot \gamma_l^+} + \sqrt{\gamma_s^+ \cdot \gamma_l^-}$$

A felületi szabad energia Lifshitz-van der Waals komponense ( $\gamma_s^{LW}$ ) diiodometán (1-es index) illeszkedési szögéből nyerhető:

$$\gamma_s^{LW} = 0,25\gamma_1^{LW} (1 + \cos \Theta)^2$$

$\gamma_s^{LW}$  ismeretében a felületi szabad energia sav ( $\gamma_s^+$ ) és a bázis ( $\gamma_s^-$ ) tényezői kiszámíthatóak a víz (2-es index) és a formamid (3-as index) illeszkedési szögéből:

$$\sqrt{\gamma_s^+} = \frac{AF - BD}{CF - CE} \quad \text{és} \quad \sqrt{\gamma_s^-} = \frac{BC - AE}{CF - CE}$$

$$A = \gamma_2(1 + \cos \Theta) - 2\sqrt{\gamma_s^{LW} \cdot \gamma_2^{LW}} \quad \text{és} \quad B = \gamma_3(1 + \cos \Theta) - 2\sqrt{\gamma_s^{LW} \cdot \gamma_3^{LW}}$$

$$C = 2\sqrt{\gamma_2^-} \quad D = 2\sqrt{\gamma_2^+} \quad E = 2\sqrt{\gamma_3^-} \quad F = 2\sqrt{\gamma_3^+}$$

A felületi energia teljes sav-bázis összetevője ( $\gamma_s^{AB}$ ):

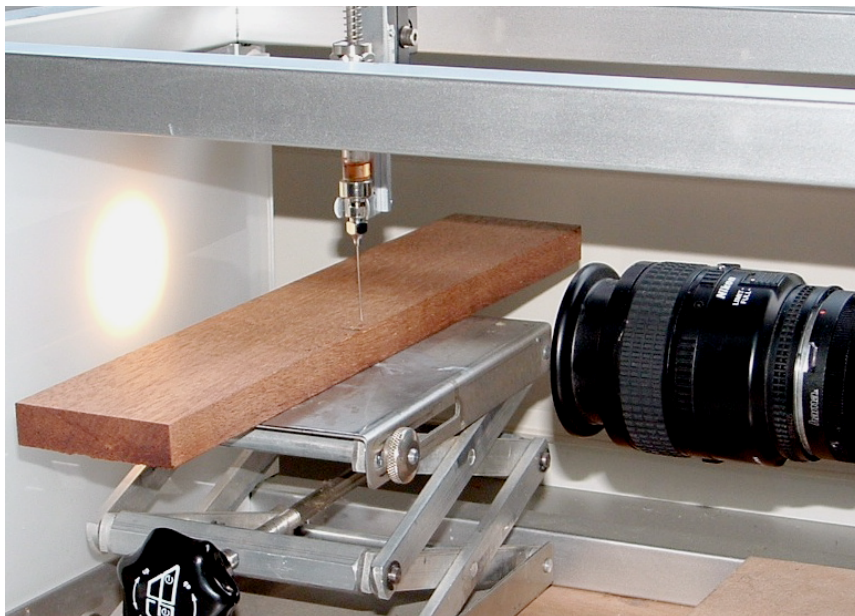
$$\gamma_s^{AB} = 2\sqrt{\gamma_s^+ \cdot \gamma_s^-}$$

A faanyag teljes felületi szabad energiája ( $\gamma_s$ ):

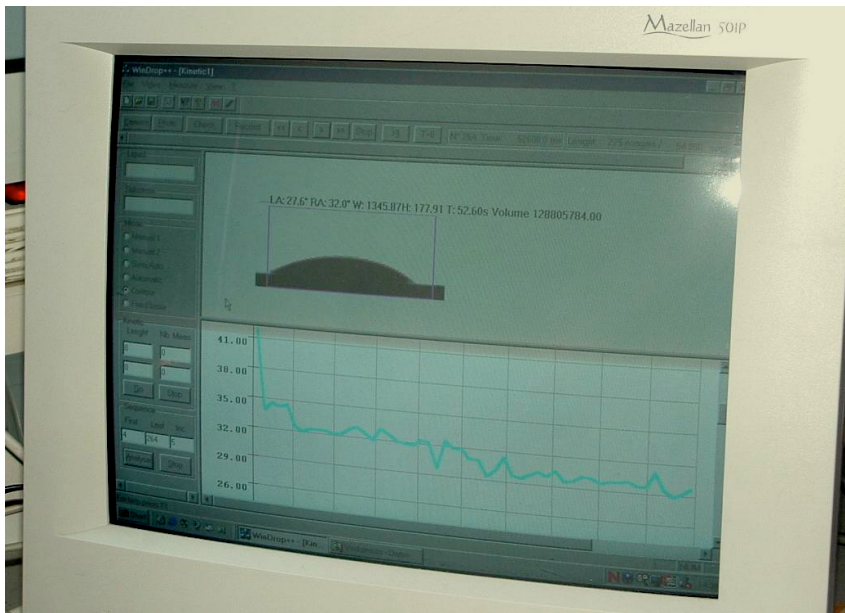
$$\gamma_s = \gamma_s^{LW} + \gamma_s^{AB}$$

Tapasztalatunk szerint mindegyik folyadékánál elegendő volt 40 másodperc ahhoz, hogy a felületre cseppentett folyadék egy viszonylag stabil alakot vegyen fel, vagyis a jellemző szögérték kialakuljon. A mérőberendezés és a vizsgálati elrendezés lehetővé tette, hogy 0,2 másodpercenként készítsünk felvételt a csepp állapotáról, a felvételek közül azonban elegendőnek bizonyult csak minden ötödiket analizálni. Ilyen módon 1 másodpercenként állt rendelkezésünkre információ a csepp alakjáról, így a pillanatnyi illeszkedési szögről (31. ábra). A mérést minden esetben tangenciális felületeken végeztük el.

Az illeszkedési szög mérésére minden egyes gőzölési eljárás esetében 2 fafelület állt rendelkezésre. Egy felületen 10 folyadékcsepp jobb, illetve bal oldali szögértékét rögzítettük. A 20 szögértéket átlagolva nyertük az adott fafelület és nedvesítő folyadék között érvényes illeszkedési szög értékét. A felületi szabad energiát e szögérték felhasználásával számítottuk ki, tehát gőzölési eljárásunként két fafelület energia értéke áll rendelkezésre.



30. ábra Illeszkedési szög mérése az un. sessile drop módszerrel



**31. ábra** A kamera által rögzített felvétel és a folyadékcsepp területét megjelenítő grafikon a monitoron

### III.3.6 A színváltozás mérése az UV besugárzás folyamán.

Vizsgálataink során elvégeztük a gőzöletlen, illetve gőzölt faanyagok rövid idejű (338 óras) besugárzását QUV típusú mesterséges öregítő berendezésben. A használt UVA-340 lámpa sugárzási tartománya: 295-390 nm, intenzitása:  $0,7 \text{ W/m}^2$ . Az öregítési vizsgálat előtt minden egyes gőzölési sorozatból két, egyenként  $40 \times 350 \text{ mm}$  felületű próbatestet alakítottunk ki. E felületeken a 12. táblázat szerinti kezeléseket hajtottuk végre.

	felületkezelés módja
1. zóna	kezeletlen (natúr) felület
2. zóna	BASF - diszperziós alap és fedőlakk, transzparens (2x)
3. zóna	Sigma - transzparens favédő, mahagóni szín (2x)
4. zóna	Sikkens - alap: PUR kötőanyag bázisú, vízzel hígítható, gyorsan száradó, kül- és beltéri alapozó
	Sikkens - fedő: vízzel hígítható, gyorsan száradó, selyemfényű fedőlakk, PUR bázis

### 12. táblázat A felületkezelés típusa az egyes zónákban

A felületkezelt darabokat klimatizálás ( $23^\circ\text{C}$ -on, 50% relatív légnedvesség mellett) és színmérés után helyeztük az UV szekrénybe (32. ábra). A színváltozás vizsgálatához 1, 2, 7 és 14 nap besugárzási idő után végeztünk újabb színméréseket.

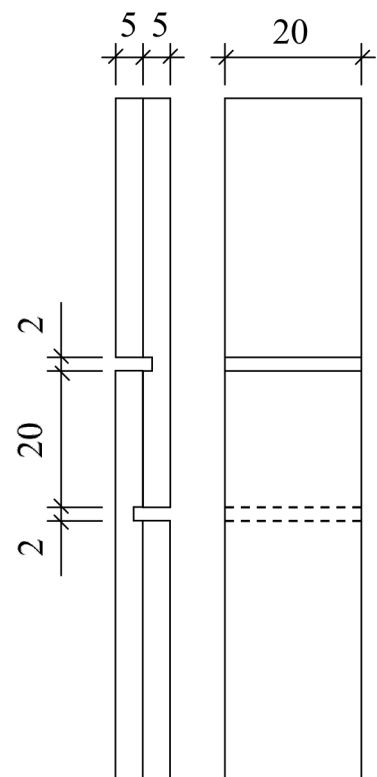


32. ábra Próbatestek az öregítő berendezésben

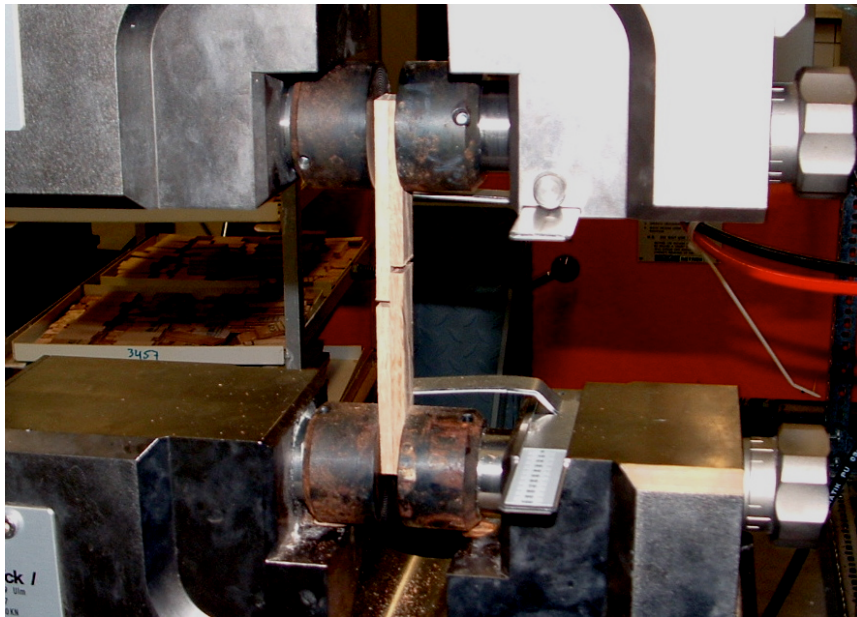
### III.3.7 Ragasztott kötés adhéziós vizsgálata

Vizsgálataink során olyan próbatesteket is gőzöltünk, melyek lehetővé tették az EN 205 1998 szabvány szerinti adhéziós vizsgálathoz szükséges próbadarabok kialakítását (33. ábra). Az általános, beltéri PVAC ragasztóval, hideg préselés útján összeragasztott faanyagokból klimatizálás után fafajonként két sorozatot alakítottunk ki. A 1. sorozat nyírószilárdságát normálklimán történő tárolás után rögtön mértük, míg a 2. sorozat vizsgálatát 24 órás hideg vizes áztatást követően végeztük el. A ragasztott felület elnyírásához szükséges erőt anyagvizsgáló gépen mértük (33. ábra), gőzölési paraméterpáronként 10 próbatesten. A nyíróerő ( $F$ ) és az igénybevett felület ( $A$ ) ismeretében a nyírófeszültség az alábbi egyenletből adódik:

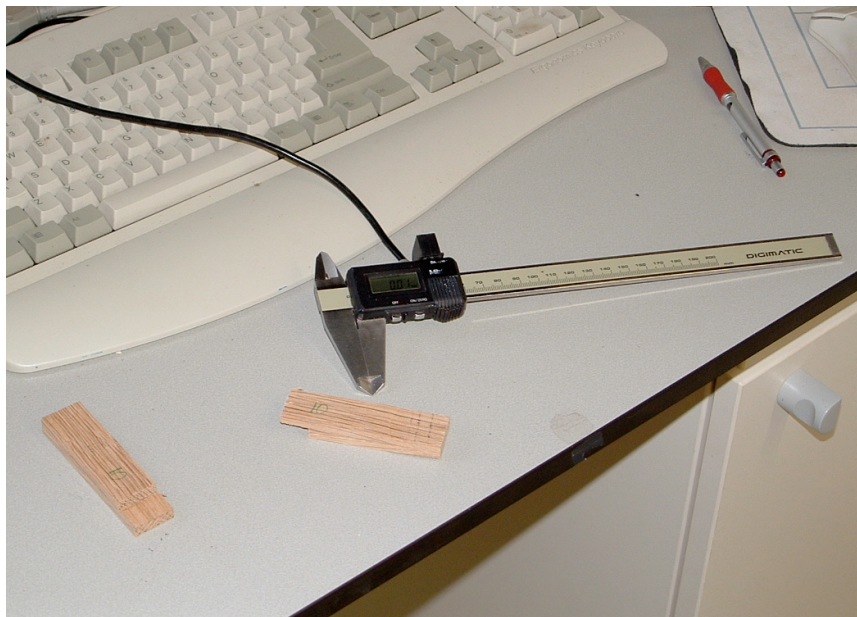
$$\tau = \frac{F}{A}$$



33. ábra A ragasztott kötés nyírószilárdságának megállapításához használt próbatestek kialakítása



**34. ábra** Ragasztott felület nyírószilárdságának vizsgálata



**35. ábra** Az igénybevett ragasztási terület megállapítása



### III.4 A mért és számított adatok értékelésének módszerei

A vizsgált fajok mért és számított jellemzőit, praktikussági és áttekinthetőségi szempontokat figyelembe véve, táblázatokban, vonalas vagy oszlopdiagramokon tüntettem fel. Az ezekből levonható következtetések alátámasztására, valamint az egyes esetekben előforduló kis mintaszám okozta tévedés lehetőségének kizárására variancia analízist (ANOVA) végeztem 5%-os szignifikancia szinten. A statisztikai vizsgálatból nyert táblázatokat a mért jellemzők szerint, illetve fajonként csoportosítva a függelékben helyeztem el (*F1.-F7. táblázat*). A statisztikai vizsgálatnak alávetett jellemzők közül kivételt képez a felületi szabad energia, mivel esetében gőzölési eljárásonként csak két energia érték áll rendelkezésre (lásd a III.3.5 fejezetet), így e jellemzőre ANOVA táblázat nem készült.

Szintén az értekezés végére, egy helyre kerültek a leíró statisztikai táblázatok (*F8.-F18. táblázat*) a mért és számított jellemzők minimum, maximum, átlagértékeivel, segítve a könnyebb áttekinthetőséget.

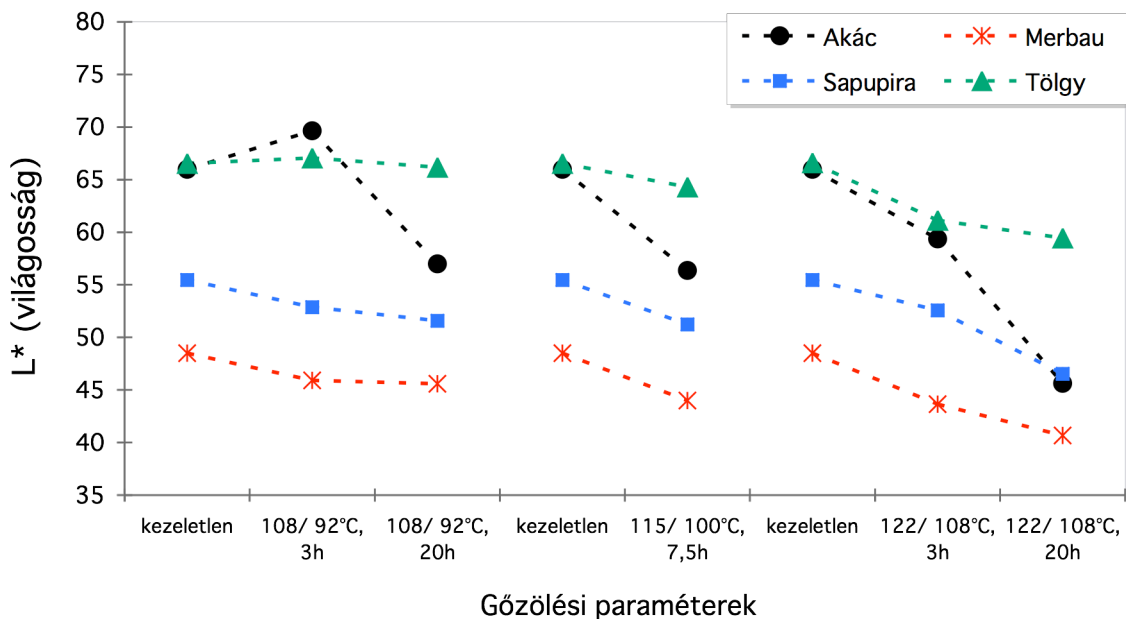
## IV A VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

### IV.1 A gőzölés során bekövetkező színváltozás

A 36., 37. és 38. ábrák rendre a világosság ( $L^*$ ), a vörös színezet ( $a^*$ ) és a sárga színezet ( $b^*$ ) átlagértékeit mutatják a gőzölési paraméterek függvényében, a vizsgált fajok esetében. Az egyes ábrákon a három különböző gőzölési hőmérsékletnek megfelelően három pontcsoport látható. Egy hőmérsékleti értéken belül a vizsgálatokat növekvő gőzölési idő szerint állítottuk sorrendbe. Az ábrák alapján összevethetjük az egyes fajok színezetváltozását, illetve egy fajon belül megállapíthatjuk, hogy a színezetváltozás szempontjából melyik gőzölési paraméternek, a hőmérsékletnek vagy az időnek van nagyobb szerepe. Mindhárom ábrát tekintve megállapítható, hogy a legnagyobb mértékű színváltozáson az akác megy keresztül (Függelék: F1. és F3. ábra). Ezt tükrözik a számítás útján kapott színínges-különbség ( $\Delta E^*$ ) értékei is (13. táblázat).

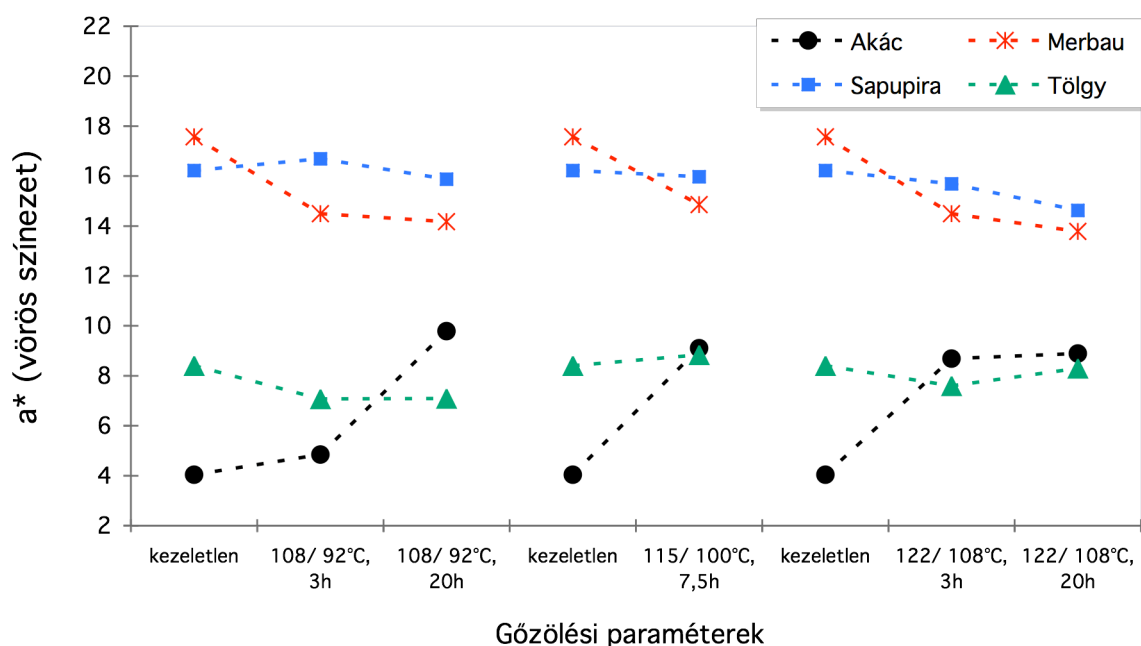
$\Delta E^*$	Akác	Merbau	Sapupira	Tölgy
108/ 92°C, 3h	5,08	7,69	2,84	2,00
108/ 92°C, 20h	14,33	7,79	4,57	1,80
115/ 100°C, 7,5h	11,43	6,65	4,42	2,46
122/ 108°C, 3h	9,25	7,11	3,63	5,56
122/ 108°C, 20h	28,86	11,36	9,32	7,11

**13. táblázat** A kezeletlen faanyaghoz viszonyított színínges-különbségek a négy faj estében. A második hőmérsékleti érték mindig a tölgyre vonatkozó gőzölési hőmérséklet.



**36. ábra** A világosság ( $L^*$  koordináta) változása az egyes fajok esetében különböző gőzölési paraméterek (hőmérséklet és időtartam) mellett

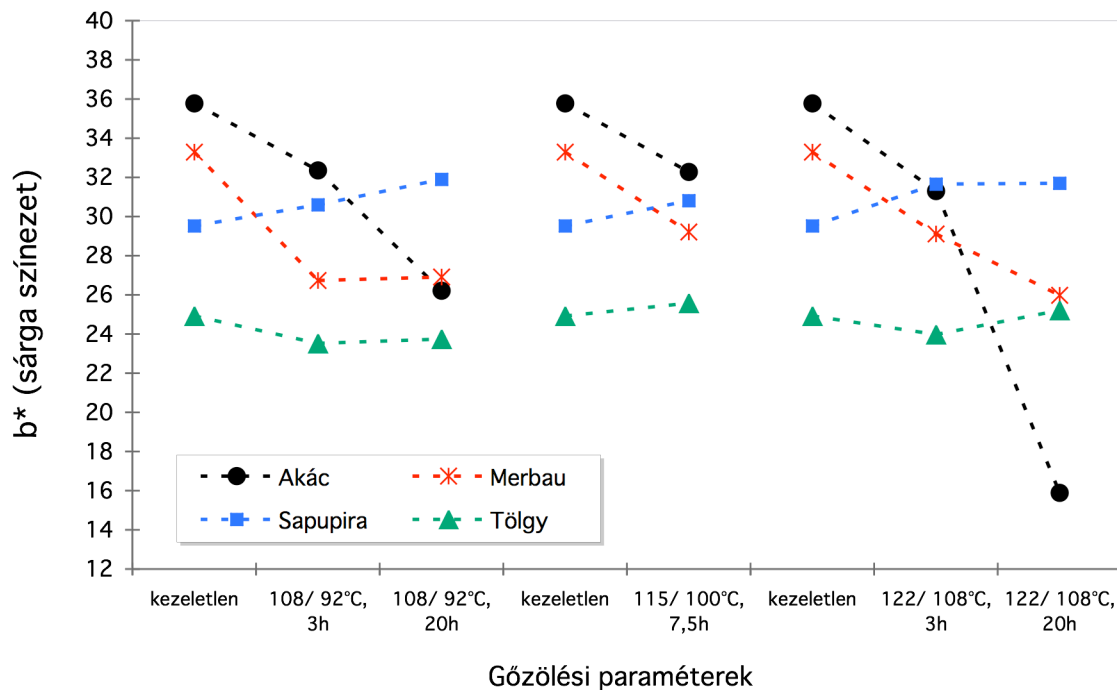
A legalacsonyabb hőmérsékleti értéken, 20 óráig gőzölt faanyagoknál ez a  $\Delta E^*$  érték akár esetében 14,33, merbau esetében 7,79, sapupiránál 4,57, tölgnél pedig 1,80. A számsorozat a vizuális tapasztalatokat is alátámasztja. Az akác mintadarabokon erőteljes barnulás figyelhető meg; világossága csökken, színezete a vörös felé tolódik, előnytelen sárgás színezete erőteljesen csökken. Látható, hogy a 108°C-on 20 óráig végzett gőzölés hasonló eredményt hozott, mint a 115°C, 7,5 óras, illetve a 120°C, 3 óras gőzölés (lásd a 41., 42., 43. ábrákat is). Ez a gazdaságosság szempontjából nem elhanyagolható. A legintenzívebb változás 122°C-on 20 óras gőzölési idő mellett következett be. Ilyen mélybarna színek alacsonyabb hőmérsékleteken nem érhetőek el hosszú gőzölési idők esetén sem (Varga 2002). Érdekes szélsőséget mutat a 108°C, 3 óra paraméterpárhoz tartozó pont, mely nagyobb világossági értéket képvisel, mint a kezeltlen minta színpontja. Ez a deviancia az akác faanyag rendkívüli színbeli inhomogenitásából adódik, melyen csak hosszú idejű, magasabb hőmérsékleten végzett gőzöléssel lehet javítani, teljesen megszüntetni.



**37. ábra** A vörös színezet( $a^*$  koordináta) változása az egyes fafajok esetében különböző gőzölési paraméterek (hőmérséklet és időtartam) mellett

A világosság csökkenése mind a négy fafaj gőzölése során megfigyelhető. A végbemenő színváltozás azonban a tölgy esetében szinte jelentéktelen, bár itt a hőmérsékleti értékek is kisebbek a kíméletesebb gőzölés érdekében. A 37. és 38. ábrákon megfigyelhető, hogy a színezetváltozás alig 1-2 egységnyi. Ekkora változás szabad szemmel nem is érzékelhető (F6. ábra). A magas hőmérsékleten végzett gőzölés során bekövetkező világosságcsökkenés ugyan szabad szemmel is látható, de ennek gazdaságossága és esztétikai értéke megkérdőjelezhető, ha csupán a színváltozás szempontjából vizsgáljuk a modifikációt. A későbbiekben azonban látni fogjuk, hogy a kezelésnek egyéb (hasznos és kevésbé hasznos) következményei is lesznek. Az akác mellett a merbau fájában ment végbe a legnagyobb mértékű színváltozás (F4. ábra). Esetében mind a vörös, mind a sárga színezet csökkent, s tapasztalataink szerint ez a változás (figyelembe véve a fafaji sajátosságokból adódó inhomogenitást is) független a gőzölés két meghatározó paraméterétől az általunk vizsgált hőmérsékleti értékeket és időtartamokat alkalmazva (37. és 38. ábra). A vörös színezet gőzölési paraméterektől való függetlenségét támasztja alá az elvégzett statisztikai analízis is (függelék: F1. táblázat). A világosság azonban erősen függ az alkalmazott hőmérséklettől, s úgy tűnik, a két paraméter

közül ennek van nagyobb jelentősége (39. ábra). A merbau egyébként is nagyon sötét fája még sötétebbé válik.

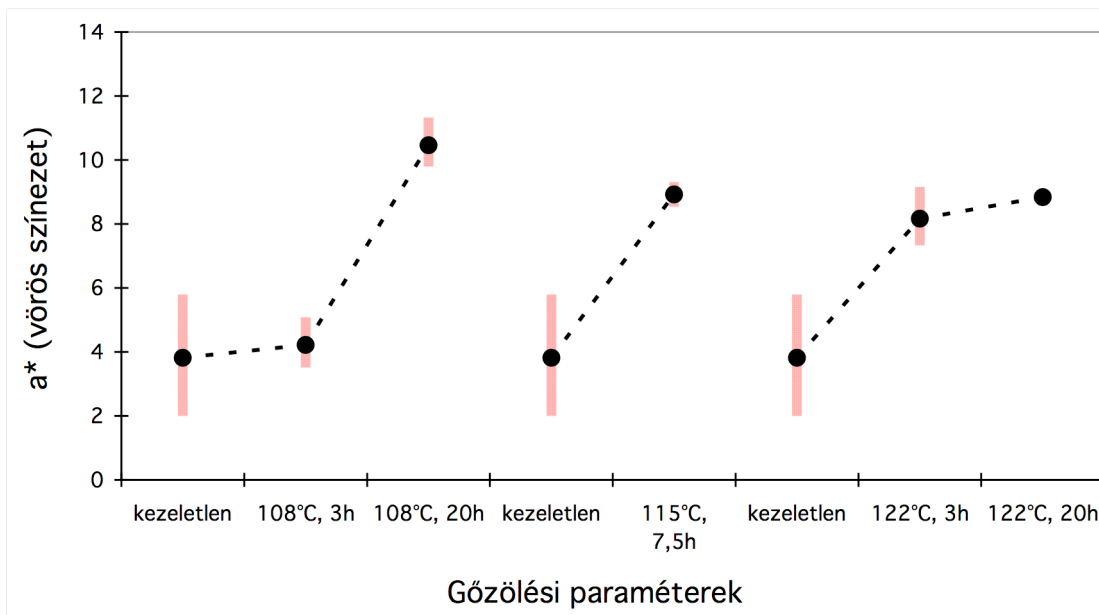


**38. ábra** A sárga színezet ( $b^*$  koordináta) változása az egyes fafajok esetében különböző gőzölési paraméterek (hőmérséklet és időtartam) mellett

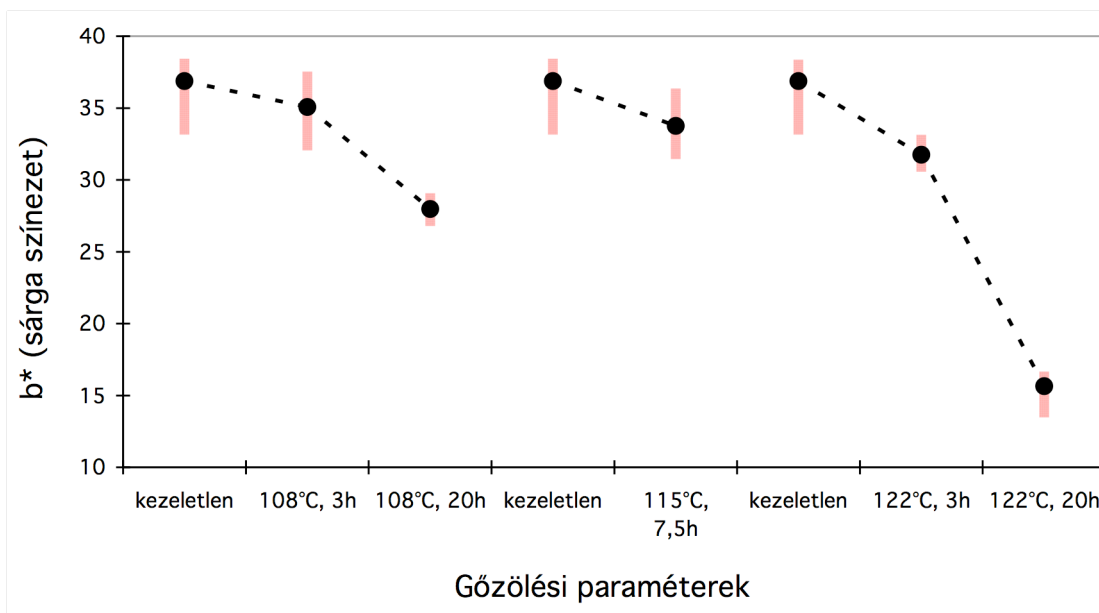
Érdekes összehasonlítani az akác és a merbau kezdeti világosságát (36. ábra). Magas hőmérsékletű, hosszú ideig tartó gőzöléssel az akác hasonlóan sötét színű lesz, mint a kezeletlen merbau. Látszik tehát, hogy megfelelő hidrotermikus kezeléssel a Magyarországon nagy mennyiségben rendelkezésre álló akác faanyag (kitűnő mechanikai tulajdonságait is figyelembe véve) helyettesíthet egyes trópusi fafajokat.

A sapupira világossága hasonló mértékben csökken, mint a merbaué, de esztétikailag ennek más eredménye lesz, hiszen a sapupira kezeletlenül világosabb, rajzolata erőteljesebb. A gőzölés a rajzolatot még jobban kiemeli. Magas hőmérsékleten, hosszú ideig gőzölve színe kevésbé lesz vöröses (37. ábra), sárga tartalma viszont növekszik (38. ábra), de ez a változás igen csekély mértékű, s független a gőzölés hőmérsékletétől (F1 táblázat). Ezt támasztják alá a vizuális tapasztalatok is (F5. ábra).

Ismert tény, hogy a gőzölés képes megszüntetni az akác faanyag színbeli inhomogenitását. Ezt bizonyítja a 39. ábra is, melyen nem csak az átlagértéket képviselő pontokat tüntettük fel, hanem az adott felületen mért minimum és maximum értékeket is. Jól látható, hogy a magasabb gőzölési hőmérsékletek illetve a hosszabb gőzölési idők felé haladva a színértékek által elfoglalt sávok egyre kisebbek, azaz az egy felülethez tartozó színkoordináták egyre kisebb szórást mutatnak. A sárga színezet változása gőzölés hatására hasonló jellegzetességet mutat (40. ábra). A többi fafajnál ekkora színbeli inhomogenitás nem figyelhető meg. Továbbra is e színjellemzőt tekintve a merbau 16,82-18,66, a sapupira 15,06-17,07, a tölgy 7,64-9,02 közötti vörös tartalmat mutat gőzölésen kívül állapotban, de a hőkezelés után is hasonló nagyságú szórás mutatkozik.

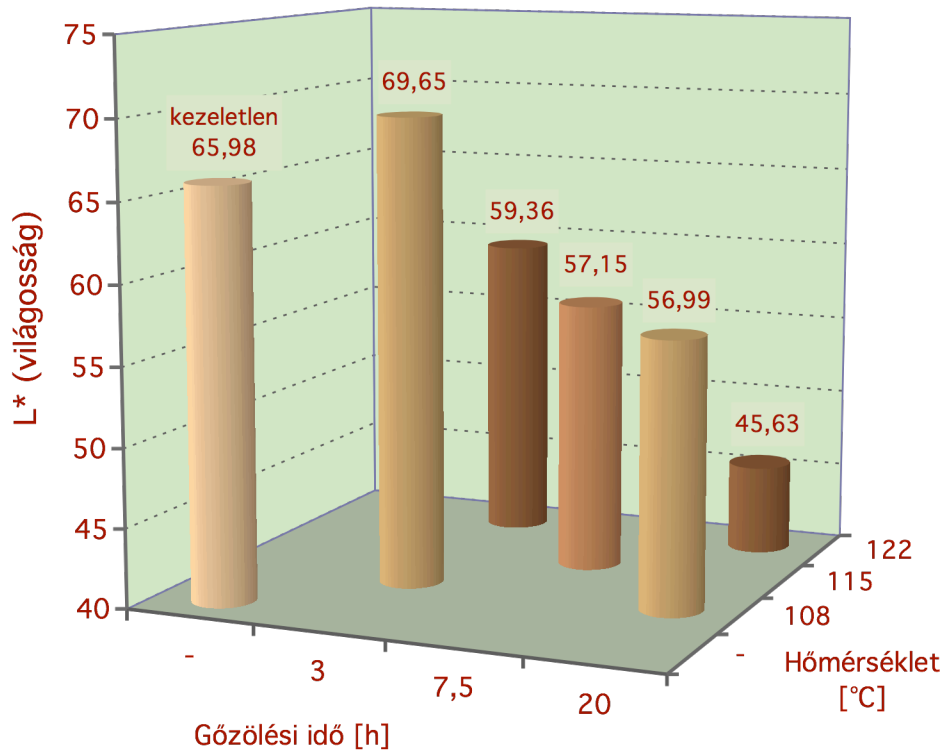


**39. ábra** A vörös színezet változása a gőzlési paraméterek függvényében akác faanyag esetében. A diagramon feltüntettük az egyes mérések minimumát és maximumát is. A pontok a mért értékek átlagait jelölik.

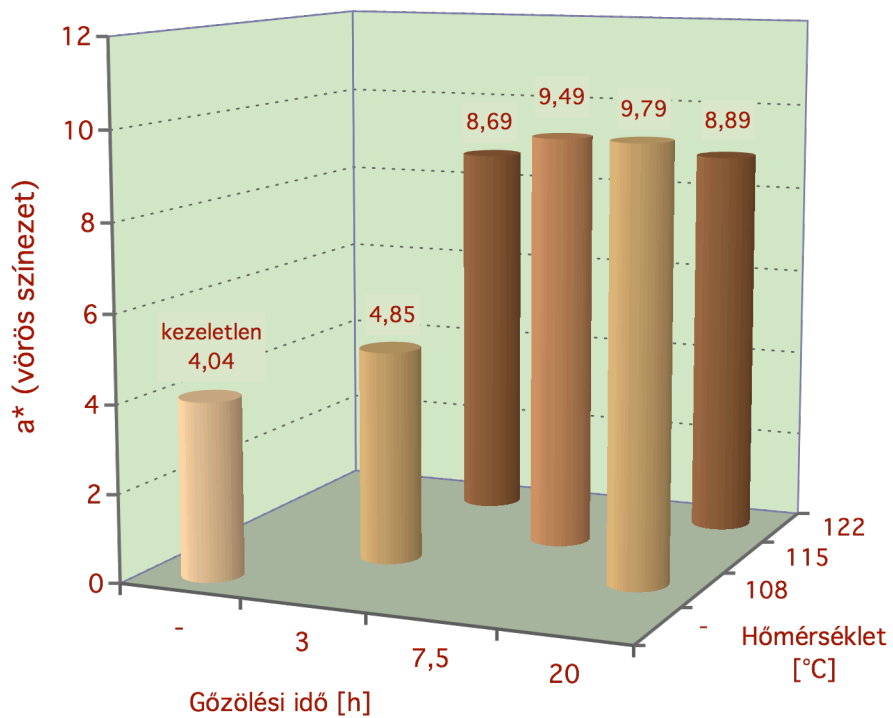


**40. ábra** Akác faanyag sárga színezetének változása a gőzlési paraméterek függvényében. A diagramon feltüntettük az egyes mérések minimumát és maximumát is. A pontok a mért értékek átlagait jelölik.

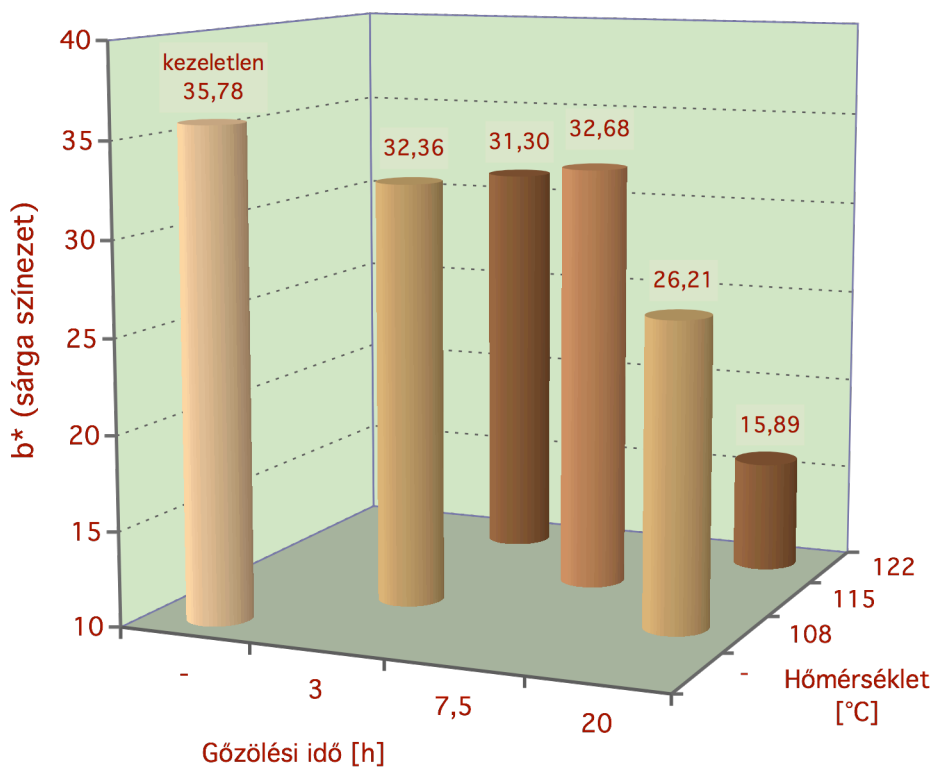
A 41., 42. és 43. ábra rendre az akác faanyag világosságának, vörös színezetének és sárga színezetének gőzölés hatására bekövetkező változását szemlélteti. A diagramok lehetőséget nyújtanak az effektív kezelési paraméterek kiválasztására, illetve az egyes kezelések (paraméterpárok) színezetre gyakorolt hatásának összehasonlítására. Az egyes színinger-jellemzőket külön-külön vizsgálva megállapítható, hogy a világosság és a sárga színezet csökkenése döntő jelentőségű, a vörös színezet növekedése alacsony értékeket mutat. Megállapítható, hogy alacsony hőmérsékleten, rövid ideig végzett gőzölés (108°C, 3h) nem változtatja meg a színt. Az L\* és b\* színekoordináta szempontjából mind a gőzölési idő, mind a gőzölési hőmérséklet fontos paraméter. Ezt az elvégzett variancia analízis is alátámasztja (F1 táblázat).



**41. ábra** Kezeletlen és gőzölt akác faanyag világossága a gőzölési paraméterek függvényében

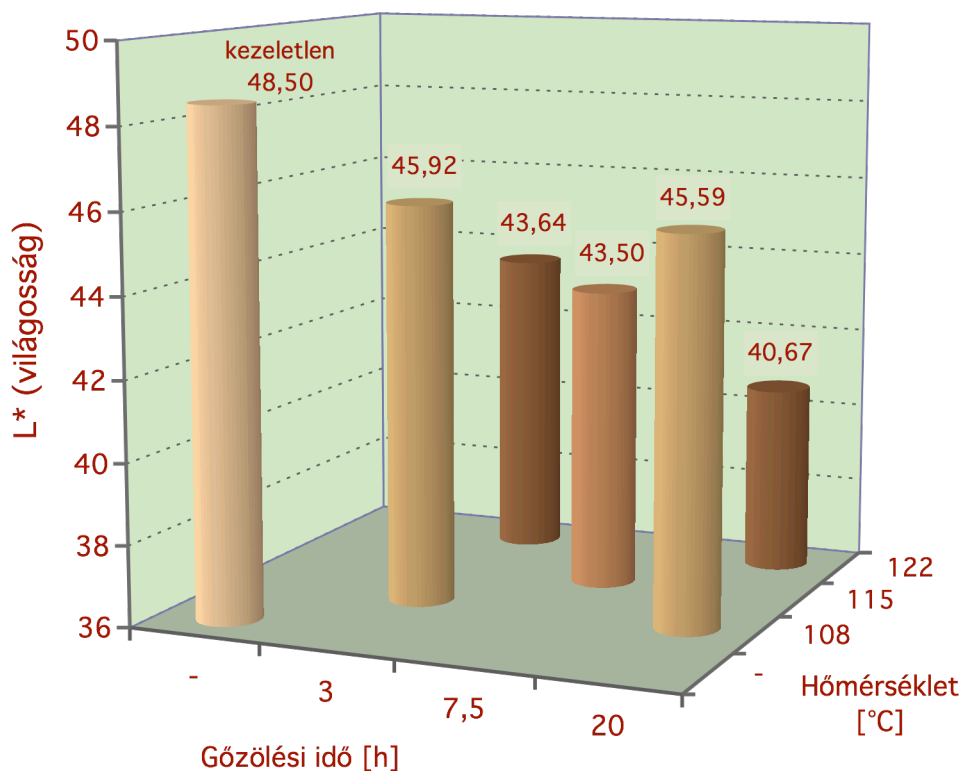


42. ábra Kezeletlen és gőzölt akác faanyag vörös színezete a gőzölési paraméterek függvényében



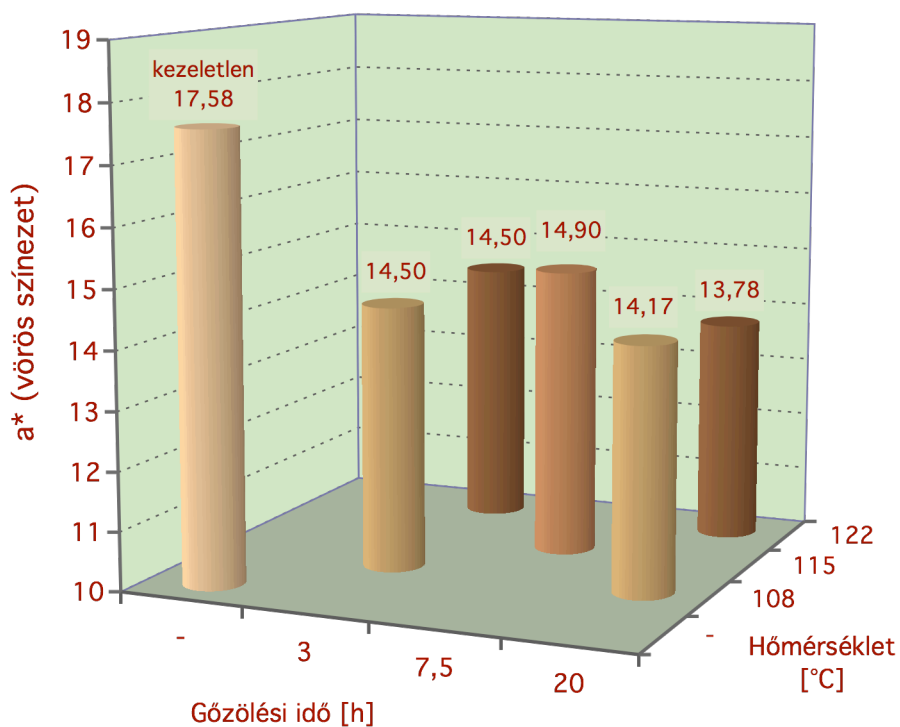
43. ábra Kezeletlen és gőzölt akác faanyag sárga színezete a gőzölési paraméterek függvényében

Összegzésképpen megállapíthatjuk, hogy a sapupira és a tölgy fafajok gőzölésekor a színváltoztatás nem lehet elsődleges cél, hiszen a végbemenő színváltozás magas hőmérsékleten, hosszú gőzölési idő mellett is olyan kis mértékű, hogy a technológiai folyamatba beiktatott hidrotermikus kezelés az egész gyártási folyamatot gazdaságtalanná tenné, illetve a végtermék versenyképességét veszélyeztetné. Az akác és merbau faanyagok gőzölésének egyik célja lehet az esztétikai megjelenés megváltoztatása. Ez különösen fontos lehet az akác esetében, mivel annak felhasználását gyakran előnytelen színe korlátozza. Az akác és a merbau erőteljes színváltozását a fájukban fellelhető nagy mennyiségű járulékos anyagnak tulajdoníthatjuk. A merbau színezetváltozása független volt az alkalmazott gőzölési paraméterektől, világosságát a hőmérséklet befolyásolta jobban (44., 45., 46. ábra).

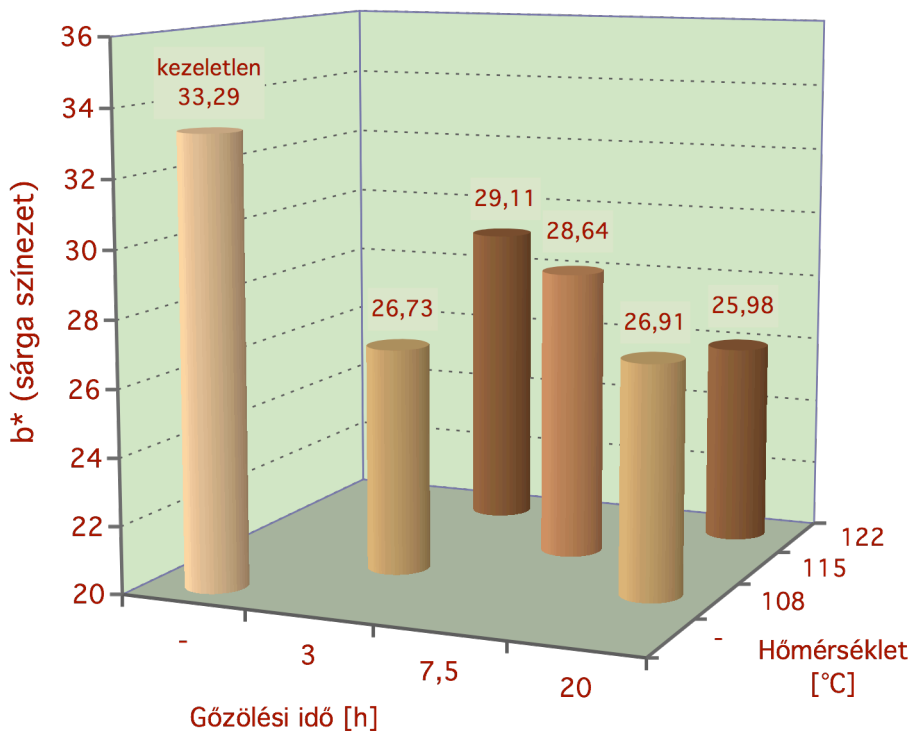


**44. ábra** Kezeletlen és gőzölt merbau faanyag világossága a gőzölési paraméterek függvényében





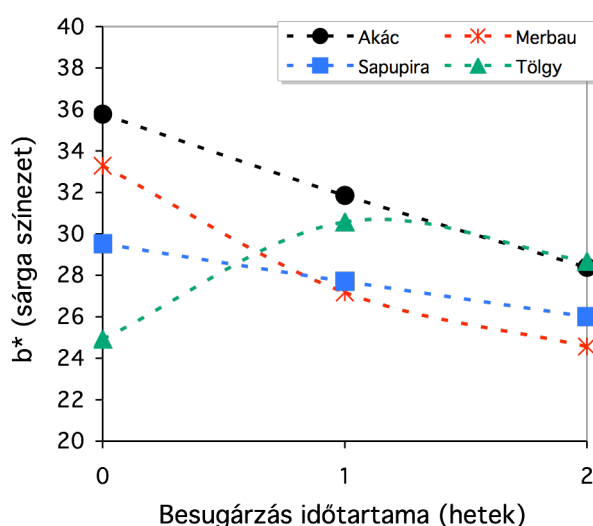
45. ábra Kezeletlen és gőzölt merbau faanyag vörös színezete a gőzölési paraméterek függvényében



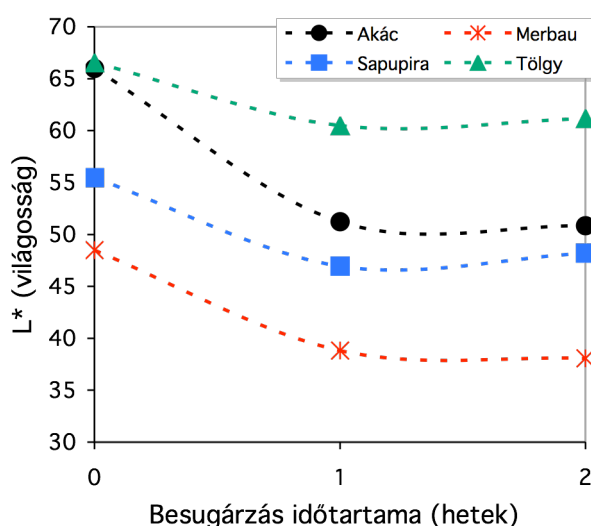
46. ábra Kezeletlen és gőzölt merbau faanyag sárga színezete a gőzölési paraméterek függvényében

## IV.2 A hőkezelés hatása a színstabilitásra

A 47. ábrán az egyes gőzöletlen fafajok felületén  $0,7 \text{ W/m}^2$  intenzitású UV besugárzás hatására bekövetkező sárga színezet változást mutatjuk be az 1 jelű (tehát feleületkezelés nélküli) zónában. Látható, hogy az akác, a merbau, és a sapupira sárga színéből veszít a besugárzás teljes időtartama alatt. Az irodalomban leírtaknak csak a tölgy viselkedése felel meg, ti. a felülete sárgább lesz. Az akác degradációjáról szóló szakirodalmak általában a sárga színezet növekedéséről számolnak be. Ezzel szemben méréseink a sárga színezet csökkenéséről tanúskodnak. Ez a kiinduló színezet szélsőségesen magas (31,36-38,51) sárga tartalmával magyarázható, mely 10-12 egységgel nagyobb érték, mint egy nagy elemszámú mintából számolható átlag érték. A két trópusi fafaj színezetére szintén jellemző a magas sárga tartalom. Az eltérő viselkedésre további magyarázat lehet a magas extrakttartalom. Mint ahogy természetes színüket is ezek az anyagok határozzák meg, így elsősorban ezek módosulása (degradációja) irányítja az UV besugárzás következtében a felületen végbemenő színváltozást is. A 48. ábra alapján a világosság változásáról hasonlóak mondhatók el. A két trópusi fafaj és az akác intenzív világosságcsökkenésével szemben a tölgy sötétedése lassú folyamat, szinte alig észrevehető ( $\Delta L^* = -5.37$ ).



**47. ábra** A sárga színezet változása UV besugárzás hatására az egyes fafajoknál, natúr felületeken

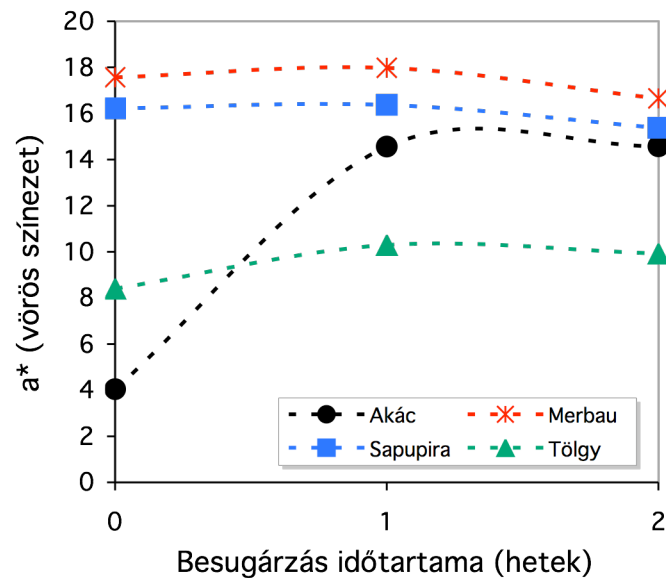


**48. ábra** A világosság változása UV besugárzás hatására az egyes fafajoknál, natúr felületeken

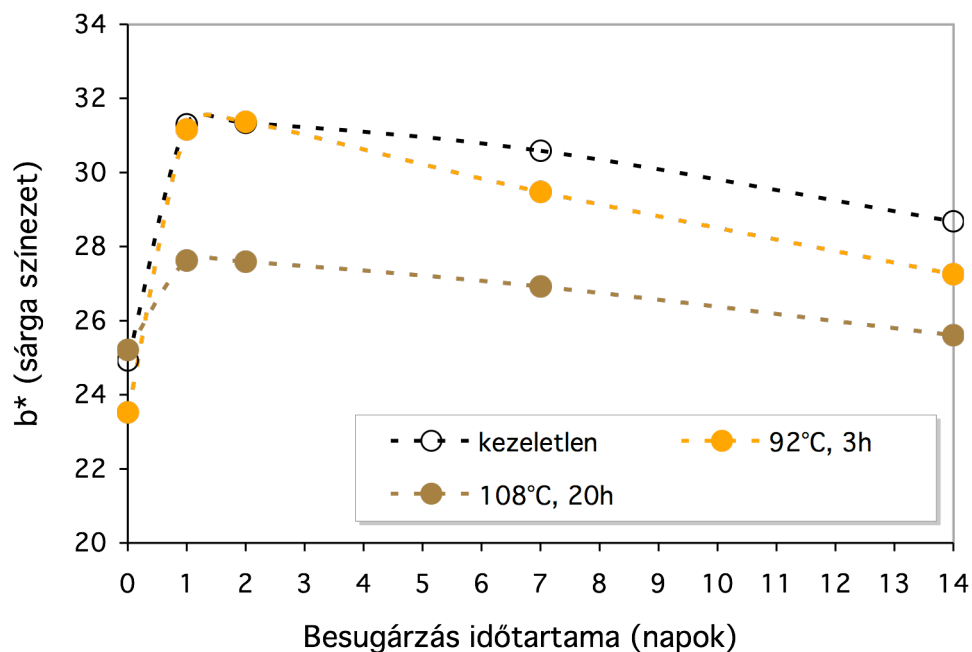
Már a gőzölés során végbemenő színváltozást bemutató ábrán is láttuk, hogy a vörös színezet változása az akác esetében a legnagyobb. Hasonló jelenség figyelhető meg UV sugárzás hatására is. A teljes folyamatra itt a következő  $\Delta a^*$  értékek érvényesek az egyes fafajokra: akác 10,54, merbau  $-0,92$ , sapupira  $-0,84$ , tölgy 1,9. A vörös színezet változása tehát csak az akác esetében meghatározó, a többi fafajnál ez az érték elhanyagolható, a változás szabad szemmel nem érzékelhető (49. ábra).

Az 50. és 51. ábrákon jól látható, hogy az elszíneződési folyamat döntő része már 1 nap alatt végbemegy, az utána bekövetkező változások sebessége is, és mértéke is jóval kisebb. Ez a tendencia az összes vizsgált fafajra és az összes vizsgált felületre igaz (függetlenül attól, hogy az gőzölt, gőzöletlen, vagy feleületkezelt), a vizsgált besugárzási időtartamban. Az 50. és 51. ábrával a gőzölés jelentőségét próbáltuk szemléltetni a besugárzás során fellépő elszíneződés

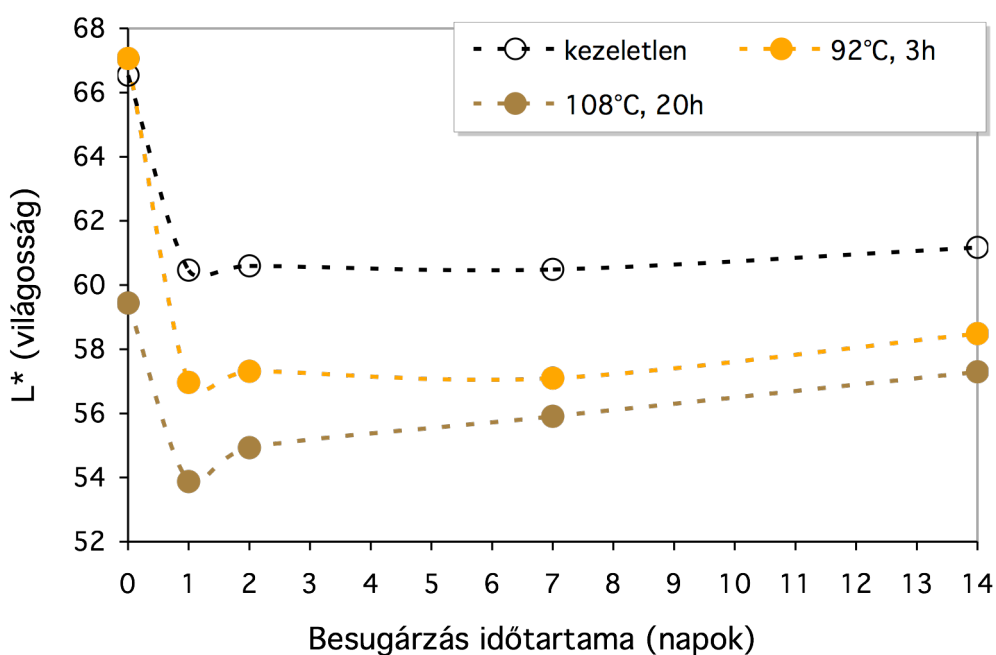
vonatkozásában, tölgy faanyag esetében. Látható, hogy a világosságváltozás szempontjából a magas hőmérsékleten (108°C), hosszú ideig (20h) gőzölt próbatest hasonló eredményt nyújtott (a 2 hetes  $\Delta L^*$  értéke itt csak -2,14), mint a gőzöletlen. A sárga színezet változását összevetve a két esetben viszont világosan látszik a gőzölés jótékony hatása. Az 1 napos  $\Delta b^*$  értékeket összehasonlítva: 5,95 és 2,41.



49. ábra A vörös színezet változása UV besugárzás hatására az egyes fafajoknál, natúr felületeken

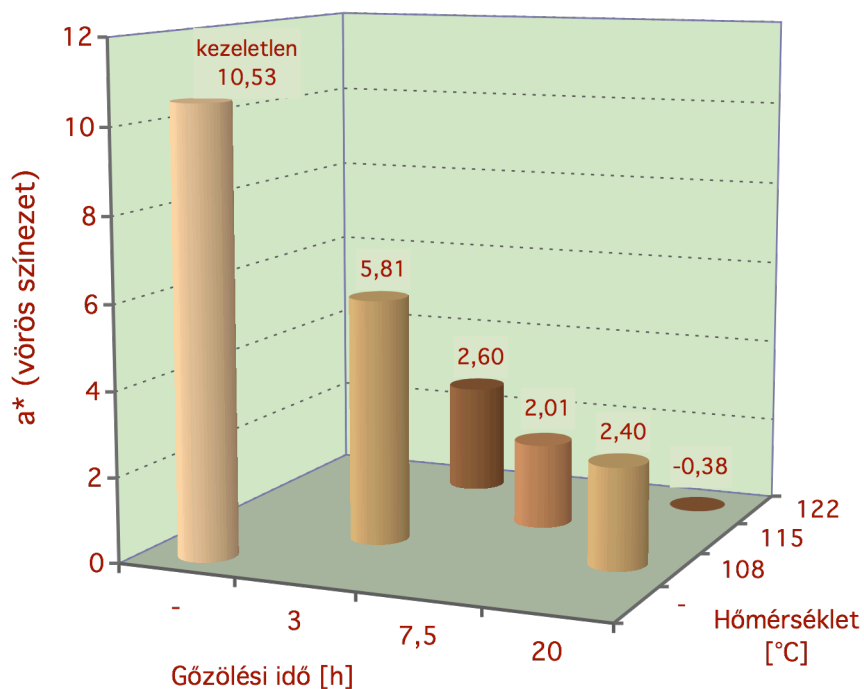


50. ábra Kezeletlen és hőkezelt tölgy faanyag sárga színezetének változása UV besugárzás folyamán



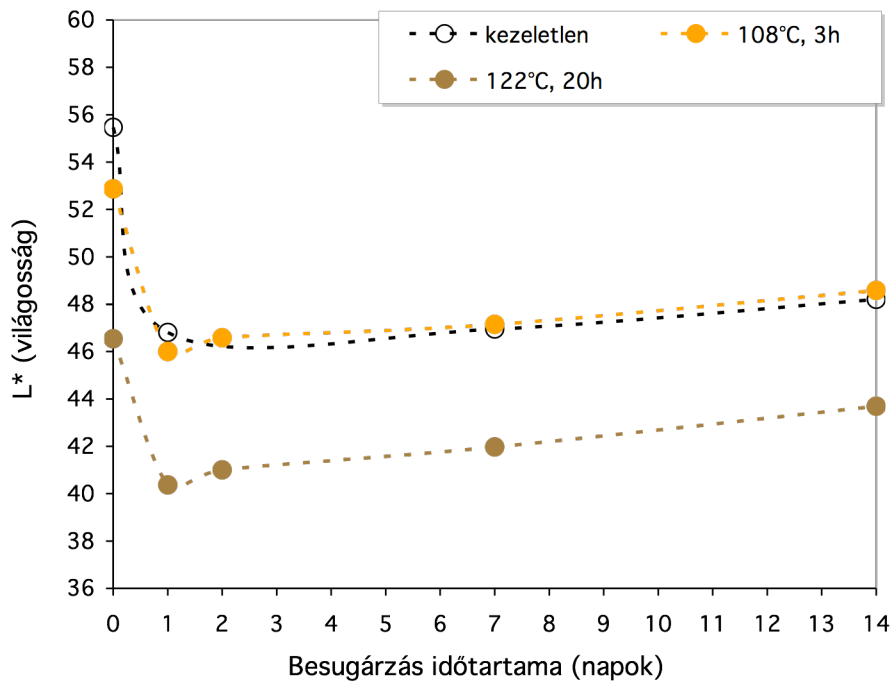
**51. ábra** Kezeletlen és hőkezelt tölgy faanyag világosságának változása UV besugárzás folyamán

Amint azt már az előzőekben megállapítottuk, a vörös színezet változásának csak az akác szempontjából van jelentősége. Az 52. ábrán látható, hogy már az alacsony hőmérsékletű, rövid idejű (108°C, 3h) gőzölés hatására is csekélyebb mértékű a besugárzást követő elszíneződés, míg magas hőmérsékleten, hosszú ideig gőzölve a faanyagot, annak vörös tartalma alig változik az UV sugárzás hatására.



**52. ábra** Gőzölt és gőzöletlen akác faanyag színváltozása 1 hétig tartó UV besugárzás hatására

A merbau és a sapupira (53. ábra) gőzöletlen, illetve gőzölt állapotban is hasonló mértékben színeződik el a besugárzás hatására, számottevő különbségek nem adódtak.



**53. ábra** Kezeletlen és hőkezelt sapupira faanyag világosságának változása UV besugárzás folyamán

### IV.3 A felületkezelés hatása a besugárzást követő elszíneződésre

A háromféle felületkezelés közül a 4. zónában átlátszatlan, fehér színű lakkot alkalmaztunk, így az a gőzöléstől függetlenül, mind a négy fafajnál hasonló módon viselkedett az UV besugárzással szemben. A méréssel észlelt különbségek szabad szemmel nem észrevehetőek, s adódhatnak a felületkezelés esetlegesen megváltozott körülményeiből is.

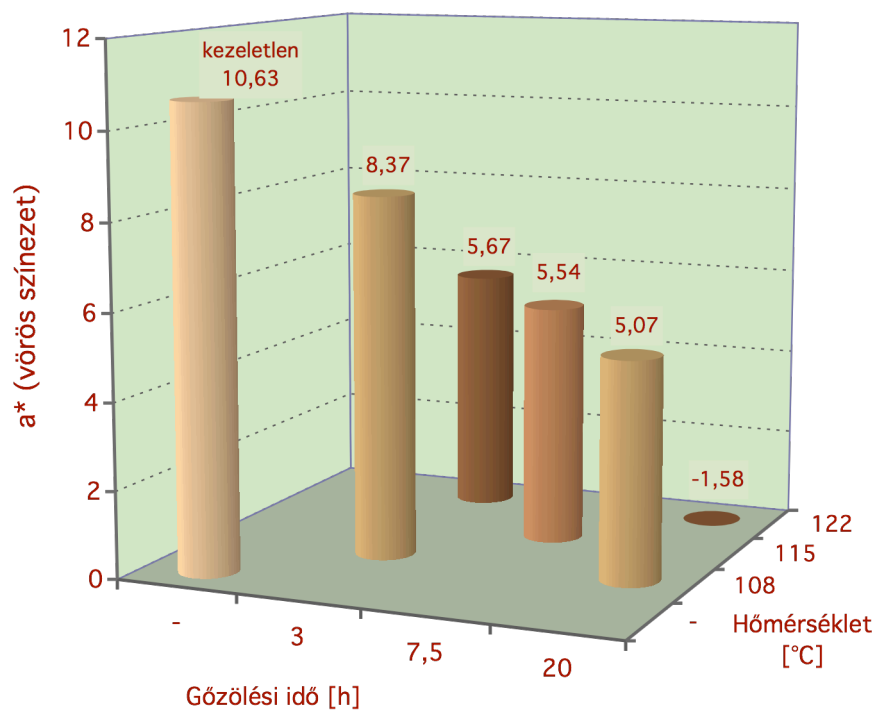
A besugárzás során keletkező különbségekről csak a transzparens lakkok esetében beszélhetünk. A 14. táblázatban feltüntettük az 1, 2 és 3 zónákon besugárzás előtt ill. 1 hetes besugárzás után mérhető színinger-különbségeket mind a négy fafaj esetében. Látható, hogy az 1-es számú (natúr) felülethez képest a másik két felület színváltozása kisebb értéket mutat. Ez alól kivétel a tölgy 2-essel jelölt felülete, de ez az anomália adódhat a faanyag inhomogenitásából, a nem helyes módon válogatott mintadarabokból is. Megállapíthatjuk, hogy a pigmentált felületkezelő anyag (a 3-assal jelölt zónában) nagyobb védelmet biztosít a felületnek mind a négy fafaj esetében, azonban teljes védelmet egyik lakkal sem lehet elérni.

Fafaj	$\Delta E^*_1$	$\Delta E^*_2$	$\Delta E^*_3$
Akác	18,55	16,21	3,44
Merbau	11,46	5,17	4,88
Sapupira	8,71	6,75	4,90
Tölgy	8,50	10,35	4,28

**14. táblázat** Az egyes, gőzöletlen fafelületek színjellemzőinek átlagaiból számított színinger különbségek 1 hetes UV besugárzást követően

Az 54. ábra transzparens lakkal borított akác felület (2. zóna) színváltozását mutatja be. Megállapítható, hogy a vörös színezet változása hasonló a 52. ábrán látottakhoz, tehát a lakk alatt a gőzöletlen felület ugyanúgy elszíneződött. A gőzölt felület nagyobb színtartósságát bizonyítja, hogy a magas hőmérsékleten, hosszú ideig gőzölt faanyag vörös színezete csak kis mértékben csökkent a besugárzás következtében. A színtartósság szempontjából a gőzölési idő és a gőzölési hőmérséklet egyformán fontos paraméterek; hosszabb és/vagy magasabb hőmérsékletű gőzölés nagyobb színtartósságot biztosít. A 122°C-on, 3 óráig gőzölt akác faanyag színtartóssága hasonló mértékben nőtt, mint a 108°C-on, 20 óráig kezelt faanyagé. Ez a tény lehetővé teszi, hogy a megfelelő gőzölési paramétereket egyéb, a gőzöléssel megváltozó faanyagjellemző (pl. hajlítószilárdság értéke) alapján válasszuk ki.

Merbau és sapupira esetében a felületkezelt próbatetek hasonló elszíneződést mutattak gőzölt és gőzöletlen állapotban is. E két fafaj esetében tehát a gőzölés nem nyújt megoldást az UV besugárzással szembeni színtartósság problémájára.



**54. ábra** Transzparens lakkal felületkezelt gőzölt illetve gőzöletlen akác faanyag vörös színezete 1 hétig taró UV ságárást követően

#### IV.4 A próbatestek nedvességtartalma

Az egyes fafajokhoz tartozó, abszolút száraz bázisra vonatkoztatott nedvességtartalmi értékeket a 15. táblázatban foglaltuk össze. A különböző fizikai-kémiai jellemzőknek megfelelően mind a négy esetben más-más egyensúlyi nedvességtartalom alakult ki. Az egyes fafajok közti viszonylag nagy különbségekre további magyarázat lehet, hogy két hasonló minta egyensúlyi nedvességtartalma is jelentősen különbözhet, amennyiben az egyik adszorpció, a másik deszorpció útján éri el az egyensúlyi nedvességtartalmat. Ismerve az akác minták származási helyét, e fafaj mintái feltehetőleg az adszorpció feltételei mellett érték el az egyensúlyi nedvességtartalmat. E helyen ismét hangsúlyozni kell továbbá, hogy az akác fája anatómiai felépítéséből adódóan, ti. edényeit tiliszek tömítik el, folyadékok számára szinte átjárhatatlan.

A nedves tömeget a gőzölendő mintasorozatok esetében is kezelés előtt mértük, azonban ahogy az adatokból látszik, ezek nettó nedvességtartalma a számítások alapján minden fafaj esetében többnek adódott, mint a gőzöletlen próbatesteké (vastagon szedve). Mivel a tárolási körülmények fafajtól és próbatesttől függetlenül azonosak voltak, tehát elméletileg a nedvességtartalmi értékek egy fafajon belül megegyeztek, ez csak úgy lehetséges, ha a gőzölés során tömegveszteség következett be. Ez a tömegveszteség a vízben oldódó tartalmi anyagok kimosódásával hozható összefüggésbe. A gőzölés után tömegállandóságig szárított faanyag abszolút száraz tömeg tehát a vártnál kevesebbnek adódik, mert itt a szárítás során nem csak a víz távozott a fából, de tömege a gőzölés során kioldott járulékos anyagok tömegével is csökkent.

Fafaj	T [°C]	t [h]	u [%]	Fafaj	T [°C]	t [h]	u [%]
Akác	kezeletlen		<b>6,49</b>	Sapupira	kezeletlen		<b>10,66</b>
	108	3	7,01		108	3	10,93
	108	20	7,45		108	20	12,25
	122	3	7,04		122	3	11,35
	122	20	10,20		122	20	12,16
Merbau	kezeletlen		<b>13,00</b>	Tölgy	kezeletlen		<b>9,41</b>
	108	3	14,38		92	3	9,65
	108	20	16,75		92	20	10,67
	122	3	15,06		108	3	9,61
	122	20	18,39		108	20	13,10

**15. táblázat** A gőzöletlen próbatestek nettó nedvességtartalma és a gőzölt faanyagban kialakuló látszólagos nedvességtartalmi értékek

A számított nedvességtartalmi értékekből tehát egyértelműen következtethetünk a szárazanyagtartalom csökkenésére, azaz a gőzölés során kioldódó extraktanyagok mennyiségére. Amennyiben ez az érték nagyobb, úgy nagyobb a fából eltávozott anyagok mennyisége is. Ha egy fafajon belül összehasonlítjuk a számított nedvességtartalmi értékeket, láthatjuk, hogy magasabb hőmérséklethez magasabb, vagy hasonló érték tartozik (ha a másik paramétert, azaz a gőzölési időt konstans értéken tartjuk). Egy gőzölési hőmérsékleten belül a hosszabb kezelési időhöz szintén nagyobb érték tartozik. A legnagyobb mértékű extraktanyag kimosódást a legmagasabb hőmérséklet mellett a leghosszabb ideig gőzölt próbatesteknél figyelhetjük meg.

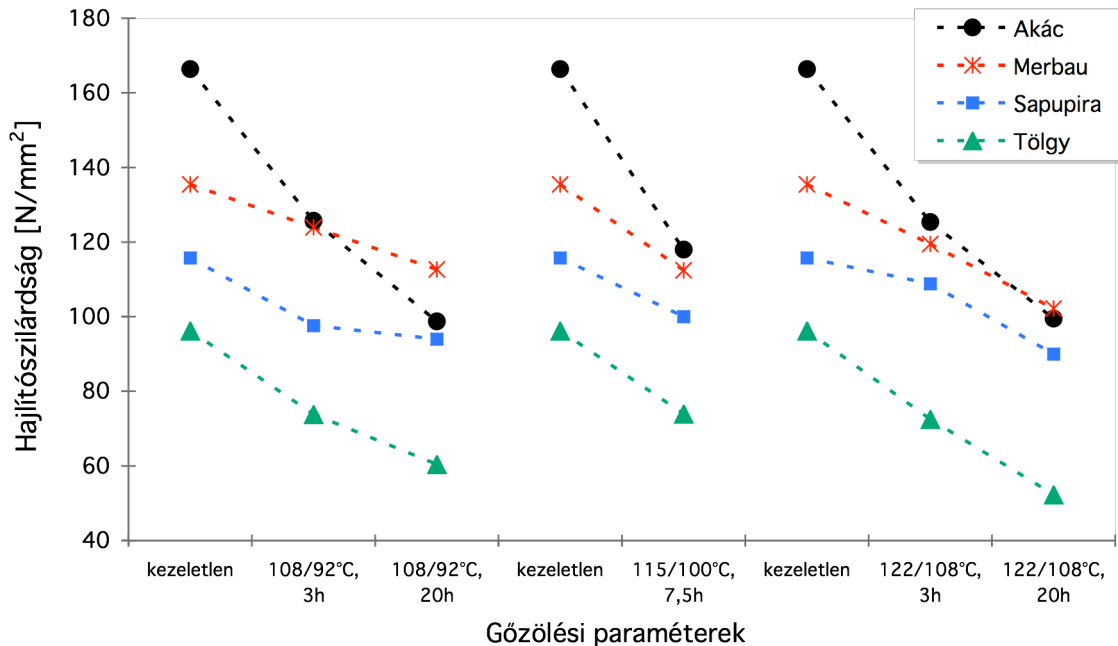
A vizsgált fafajok közül számított értékeim alapján a merbau mutatja a legnagyobb tömegveszteséget, ami nem meglepő, hiszen igen magas az extraktanyag tartalma (Hillis



1996, Imamura et al. 1974). A legkisebb eltérést a valódi nedvességtartalmi értéktől a sapupira mutatja. Mivel ez a fafaj is gazdag járulékos anyagokban, ezért feltételezhető, hogy ezen anyagok kioldása vízzel (ill. vízgőzzel) csak kis mértékben valósul meg.

## IV.5 A gőzölés hatása a faanyag mechanikai tulajdonságaira

Az 55. ábrán a hajlítószilárdság változását mutatjuk be a négy fafaj esetében különböző gőzölési paraméterek mellett. Megállapíthatjuk, hogy a hajlítószilárdság már alacsony hőmérsékleten, rövid gőzölési időt alkalmazva is csökkent. A legmeredekebb változást az akác produkálta minden esetben, azonban még a magas hőmérsékleten, hosszú ideig végzett gőzölés után is magasabb szilárdsággal rendelkezik, mint a kezeletlen tölgy.



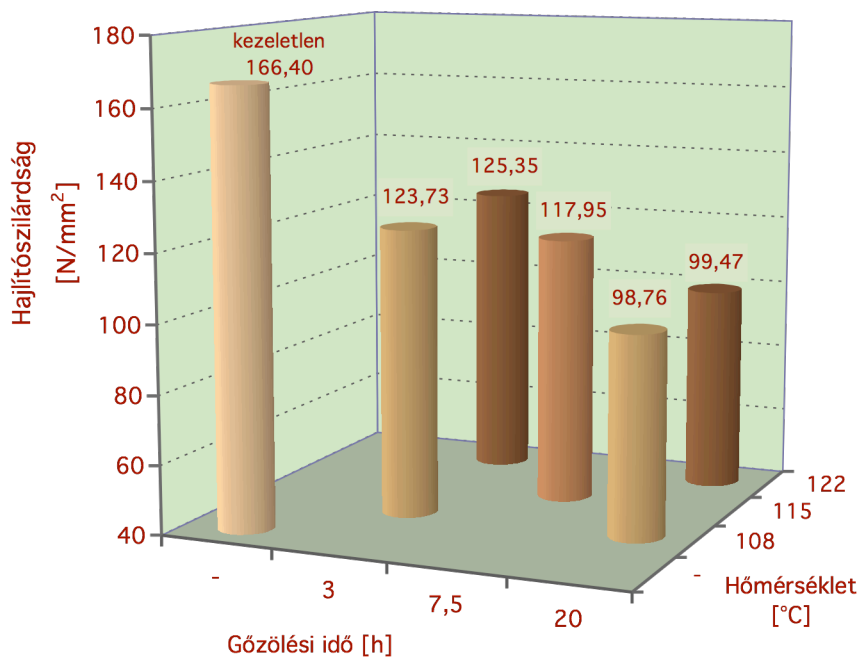
**55. ábra** A vizsgált fafajok hajlítószilárdsága gőzölés előtt, valamint különböző paraméterű hőkezelések után (20°-on, 65% rel. páratartalom mellett klimatizált próbatestek)

A 16. táblázatban az 5. táblázathoz hasonlóan saját tapasztalatainkat foglaltuk össze a 20 órás gőzölésekhez tartozó hajlítószilárdsági értékek és a kiinduló szilárdsági értékek százalékos arányát. A tölgyhöz és az akáchoz képest a két trópusi faj csak kis változáson ment keresztül. Tekintve, hogy az akác kiinduló szilárdsági tulajdonságai kiemelkedően jók, így akár magas hőmérsékleten, hosszú ideig végzett gőzölés után is jó mechanikai jellemzőkkel bír. E fafaj esetében azt is láthattuk, hogy a bekövetkező szilárdságváltozás a gőzölési hőmérséklettől független, az inkább a gőzölés időtartamától függ (56. ábra). Ezt a megállapítást a függelék F3. jelű ANOVA táblázata is alátámasztja. A szintartósság vizsgálatánál láttuk, hogy a vörös színezet (52. és 54. ábra) három különböző gőzölési paraméterpár (108°C/20 óra, 115°C/7,5 óra, 122°C/3 óra) estében is hasonló mértékben változott az UV besugárzás hatására. A szintartósságot és a hajlítószilárdságot is figyelembe véve tehát akác esetében magas hőmérsékletű, rövid idejű gőzölés javasolható. Az 57. ábra alapján a tölgyről hasonló megállapítás tehető, mint az akácról: hajlítószilárdságát a gőzölési hőmérséklet nem befolyásolta (F3 táblázat). A kezelési idő fontosságát az magyarázza, hogy 200°C alatt a faanyag összetevőinek degradációja önmagában nem jelentős, amennyiben kizárólag a hőmérsékletet, mint befolyásoló tényezőt vizsgáljuk. A II.2 fejezetben azonban láttuk, hogy nem a hőmérséklet az egyedüli tényező, mely a hődegradációs folyamatot befolyásolhatja. A vizsgált hőmérsékleti tartományban tehát a kezelési időnek döntő szerep jut a mechanikai jellemzők változása szempontjából. Az F3 táblázat alapján, a sapupira hajlítószilárdságát vizsgálva azt találtuk, hogy sem a kezelési idő, sem a gőzölési hőmérséklet nem szignifikáns,

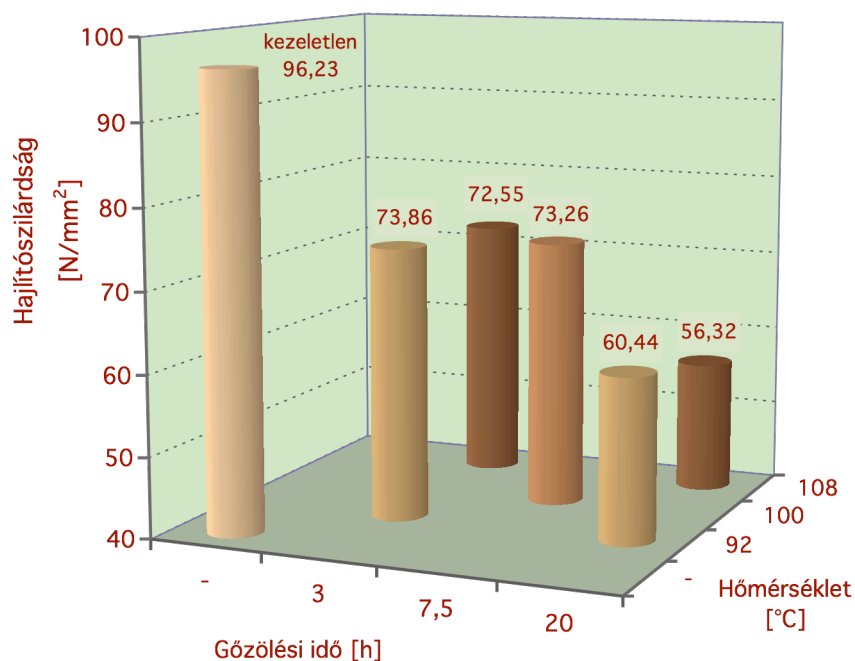
míg merbau esetében bármely paraméter változása statisztikailag kimutatható lehet, bár csak csekély mértékű hajlítószilárdság csökkenést eredményez.

Gőzölési paraméterek	Akác	Merbau	Sapupira	Tölgy
108/92°C, 20h	59%	83%	81%	63%
122/108°C, 20h	60%	75%	78%	54%

**16. táblázat** A gőzölés után mérhető átlagos hajlítószilárdsági értékek a kiinduló értékek százalékában

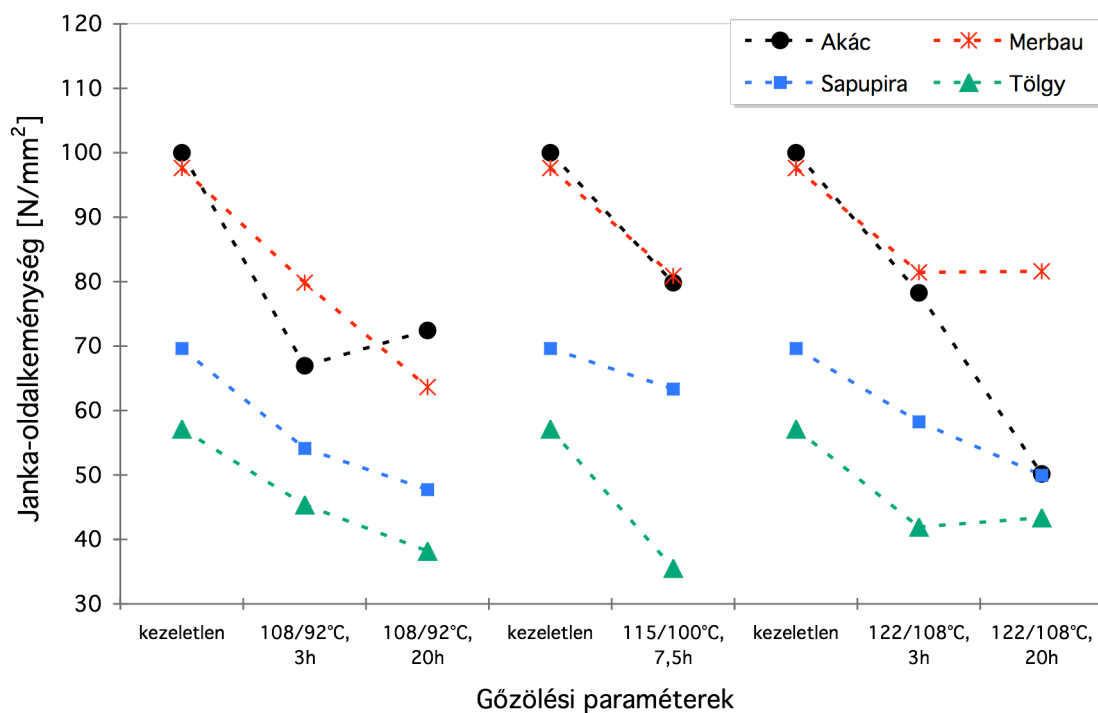


**56. ábra** Az akác gőzölés előtt, valamint különböző paraméterű hőkezelések után mérhető átlagos hajlítószilárdsága



**57. ábra** A tölgy gőzölés előtt, valamint különböző paraméterű hőkezelések után mérhető átlagos hajlítószilárdsága

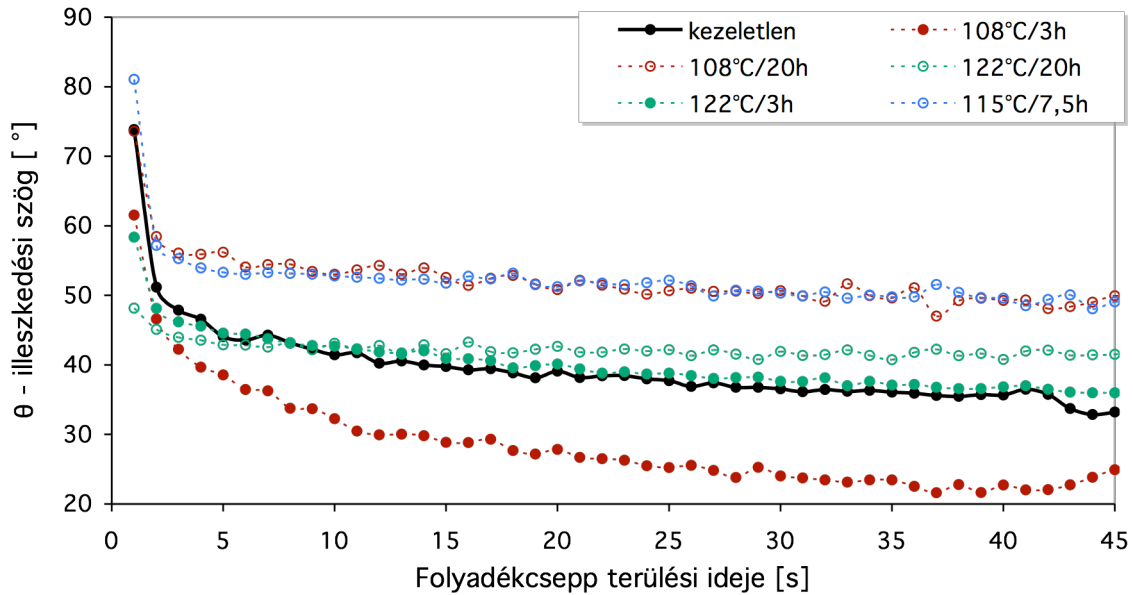
Az 58. ábra a Janka által kidolgozott módszerrel mért oldalkeménységi értékeket mutatja az alkalmazott gőzölési paraméterek függvényében. A keménység minden esetben csökkent. A legintenzívebb változást itt is az akác mutatja, mind a gőzölési hőmérséklet, mind a kezelési idő szignifikáns paraméternek adódott (*F4 táblázat*). Merbau esetében, hasonlóan az akáchoz, az analízis mindkét paramétert szignifikánsnak mutatta.



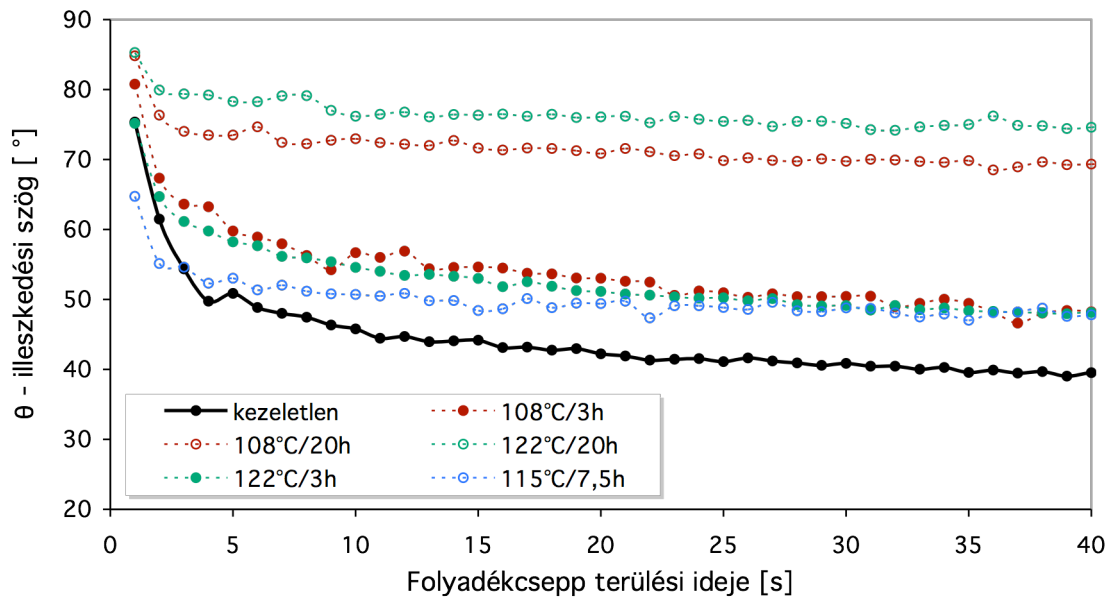
**58. ábra** A vizsgált fafajok Janka-oldalkeménysége gőzölés előtt, valamint különböző paraméterű hőkezelések után

#### IV.6 A gőzölési paraméterek hatása az illeszkedési szögre és a felületi energiára

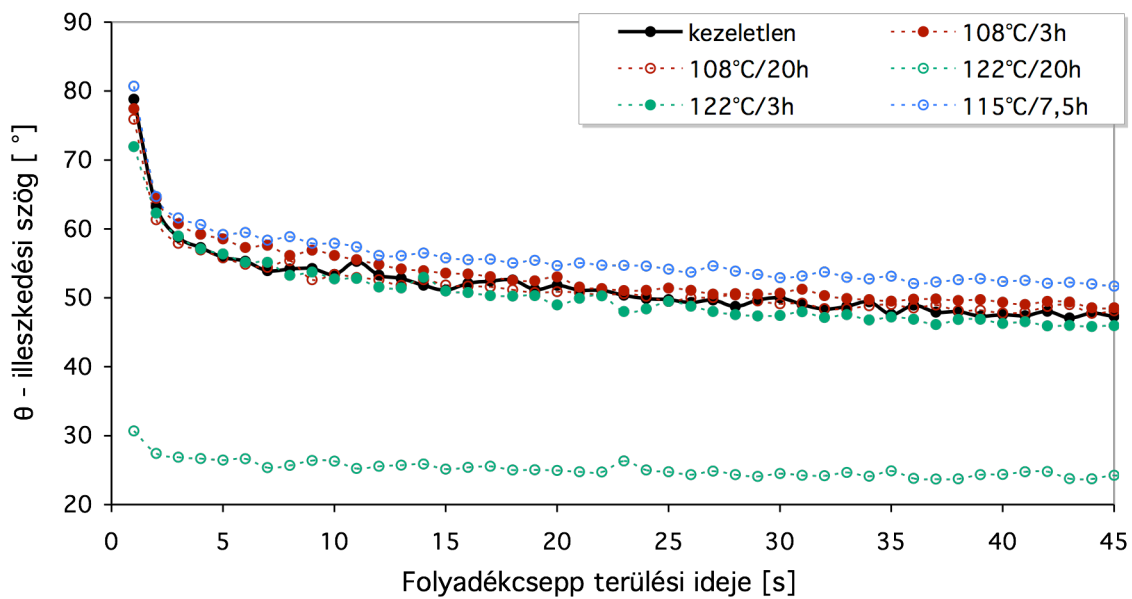
Az 59., 60., 61. és 62. ábra rendre akác, merbau, sapupira és tölgy fafelületeken kialakuló illeszkedési szög értékeit mutatja gőzölés előtt, illetve különböző paraméterű gőzölés után. A nedvesítő folyadék víz volt. Látható, hogy a víz és a szilárd faanyag között kialakuló illeszkedési szög fafajonként eltérő, és gőzölés hatására változik. A kezeletlen akác fafelületen kialakuló illeszkedési szög 35-36° volt 40 sec után. Merbau esetében ez az érték 39-40°, sapupiránál 46-47°. Tölgy felületen mértük a legmagasabb értéket: 55-56°-ot.



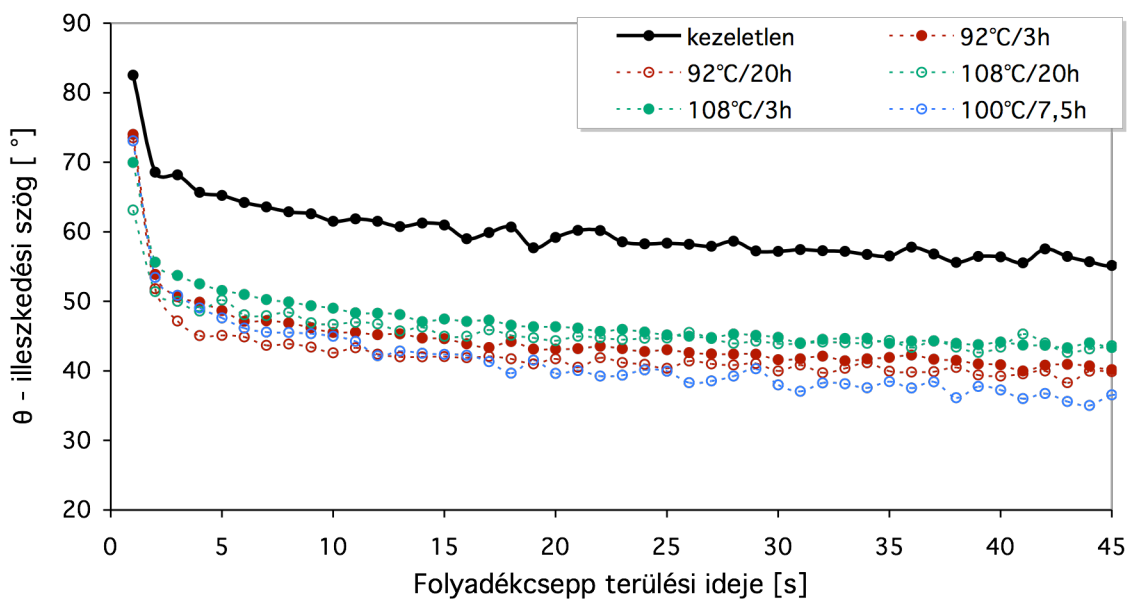
59. ábra Gőzölt ill. gőzöletlen akác fafelületen kialakuló illeszkedési szög víz esetében



60. ábra Gőzölt ill. gőzöletlen merbau fafelületen kialakuló illeszkedési szög víz esetében



61. ábra Gőzölt ill. gőzöletlen sapupira fafelületen kialakuló illeszkedési szög víz esetében



62. ábra Gőzölt ill. gőzöletlen tölgy fafelületen kialakuló illeszkedési szög víz esetében

Akác esetében az illeszkedési szög gőzölés hatására növekszik. Ez alól egyetlen kivétel a 108°C-on 3 óráig hőkezelt mintához tartozó adatsor, mely a szög csökkenését mutatja. Erre magyarázat lehet a vizsgálati folyadék fafelületbe történő túlzott kapilláris penetrációja, melyet a görbe folyamatosan csökkenő jellege is bizonyít. A merbaura jellemző illeszkedési szög szintén növekedik gőzölés hatására. Hosszabb gőzölés idő, vagy magasabb hőmérsékleten végzett gőzölés nagyobb szögértéket eredményez. Magas hőmérsékleten 20 óráig gőzölve a merbau felülete erőteljesen hidrofób jellegűvé válik. Sapupira felületre ejtett vízcsepp illeszkedési szöge nem változik lényegesen gőzölés hatására. A 122°C/20h paraméterpárhoz tartozó adatsorhoz tartozó alacsony szögérték a folyadék faanyagba történő azonnali, gyors penetrációjának eredménye.

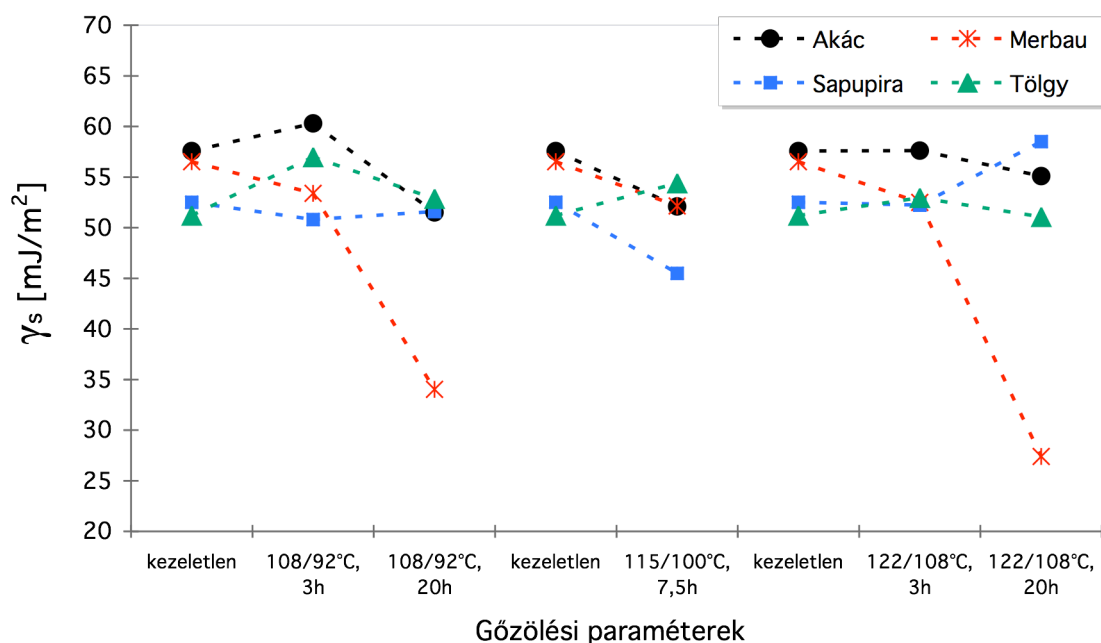
A tölgy fafelületre jellemző, viszonylag magas illeszkedési szög gőzöléssel csökkenthető. A kezelés után kialakuló szögértéket a kezelés paramétereit együttesen befolyásolják.

A felületi feszültséget a már ismertett összefüggések értelmében a dijudometán és a formamid illeszkedési szöge is befolyásolja. A 17. táblázatban bemutatjuk, hogyan változott az egyes folyadékok és fafelületek között kialakuló illeszkedési szög gőzölés hatására.

Fafaj	Dijodometán	Víz	Formamid
Akác	↓	↑	↓
Merbau	↓	↑	-
Sapupira	↓	↑	-
Tölgy	↑	↓	↑

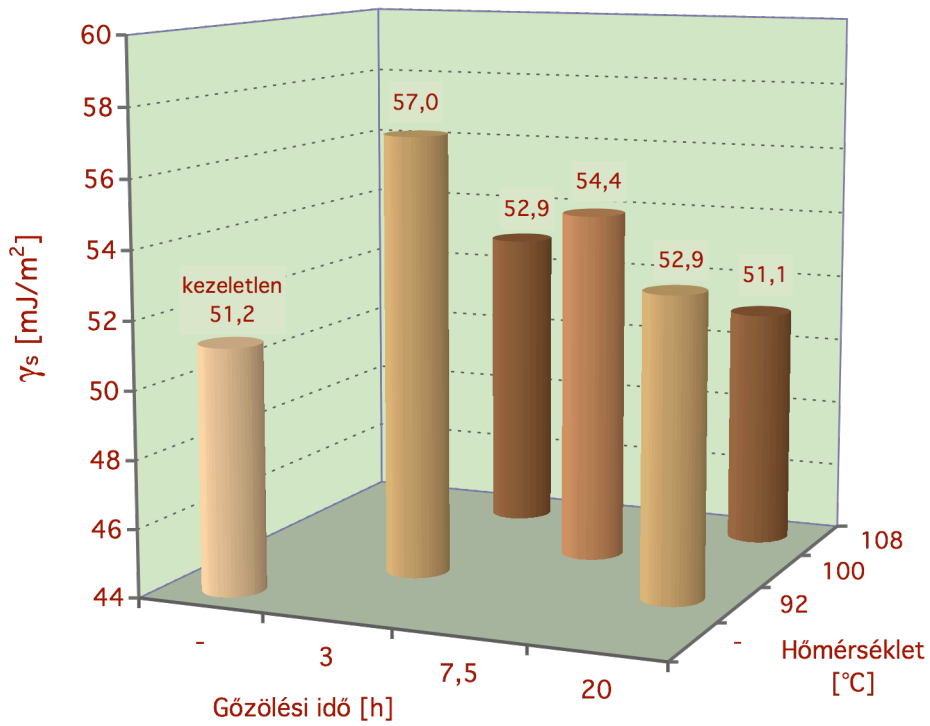
**17. táblázat** Az illeszkedési szög változása gőzölés hatására különböző anyagpároknál

Az illeszkedési szög értékeinek változása maga után vonja a faanyag felületi szabad energiájának megváltozását is. A 63. ábra ezt a változást szemlélteti a négy fafaj esetében. Kizárólag a tölgy esetében beszélhetünk minden egyes gőzölési paraméter mellett előnyös változásról. Rövid idejű, alacsony hőmérsékleten végzett modifikáció 15%-os felületi energianövekedést eredményezett. Érdekes módon a hőmérséklet és/vagy a gőzölési idő növelésével a felületi energia értéke kevésbé emelkedett. Az elért energiaérték mindkét gőzölés paraméter függvénye (64. ábra).

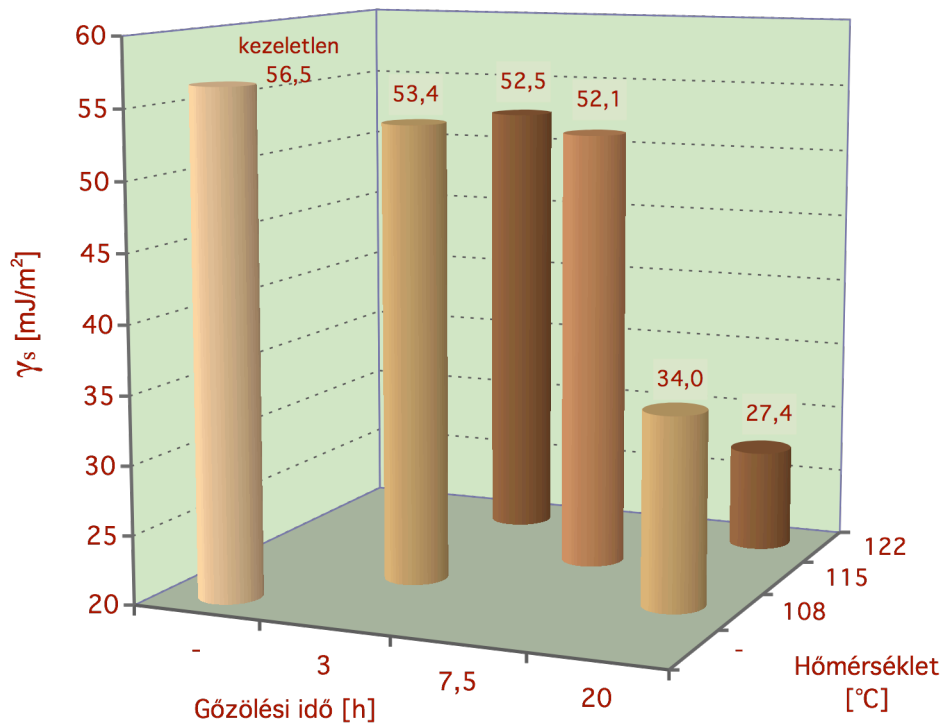


**63. ábra** Akác, merbau, sapupira és tölgy felületi szabad energiája ( $\gamma_s$ ) kezeletlen és hőkezelt állapotban

Hosszú ideig tartó, magas hőmérsékletű kezelés a sapupira felületi szabad energiáját is növelte (a növekedés 12%-os volt), de a kevésbé intenzív gőzölési eljárások számottevő változást nem eredményeztek.



64. ábra Tölgy faanyag felületi szabad energiája ( $\gamma_s$ ) kezeletlen és hőkezelt állapotban



65. ábra Merbau faanyag felületi szabad energiája ( $\gamma_s$ ) kezeletlen és hőkezelt állapotban



A felületi energia tekintetében a legmeredekebb változást a merbau produkálta, ez a módosulás azonban kedvezőtlen irányú volt, s erősen függött a gőzölés paramétereitől (65. ábra). Magasabb kezelési hőmérséklet, vagy hosszabb gőzölési idő már erőteljes felületi szabad energia csökkenést eredményez, így az akár a kiinduló érték felére is csökkenhet. Akác esetében vizsgálataink alapján csak annyit állapíthatunk meg, hogy a felületi szabad energia értéke csökken, vagy változatlan marad, és ezt a változást a folyamat két paramétere együttesen befolyásolta.

#### IV.7 Ragasztott kötés nyírószilárdságának változása gőzölés hatására

A 18. táblázatban összefoglaltuk az 1. (normálklímán tárolt) sorozatra vonatkozó nyírószilárdsági értékeket. Megállapíthatjuk, hogy a merbau adhéziós tulajdonságaiban számottevő változás nem következett be gőzölés hatására. A statisztikai analízis eredményei (F.6. táblázat), nevezetesen hogy sem a gőzölési idő, sem a gőzölési hőmérséklet hatása nem szignifikáns, szintén alátámasztják ezt a megállapítást. A legnagyobb változás a sapupira esetében volt megfigyelhető. Az adatok alapján megállapítható, hogy a hőmérsékletet nem célszerű minden határon túl növelni, mert túl magas hőmérséklettel csak kisebb mértékben növekszik a nyírószilárdság (66. ábra). Fontosabb tényező a gőzölési idő; minél hosszabb ideig tart a kezelés, annál kedvezőbb eredményt kapunk. Az ANOVA táblázat adatai szerint egyik paraméter sem szignifikáns. Ez érthető, hiszen a két paraméter értékének növelése csak egy bizonyos határig előnyös a ragasztott felületek nyírószilárdsága szempontjából. A sapupira nehéz ragaszthatóságára tehát megoldást nyújthat egy közepes hőmérsékletű, hosszú idejű gőzölés, de ügyelni kell a paraméterek helyes megválasztására. Hasonló a helyzet az akác esetében, de itt a paraméterek helytelen megválasztása (túl magas gőzölési hőmérséklet) akár a nyírószilárdság csökkenését is eredményezheti. A paraméterek megfelelő megválasztásával a ragasztott akácfelület nyírószilárdsága kis mértékben növelhető (67. ábra). A tölgy esetében elvégzett vizsgálatok a nyírószilárdság csökkenéséről tanúskodnak. Magas hőmérsékletű, hosszú idejű gőzölésnél a szilárdsági érték akár a felére is csökkenhet.

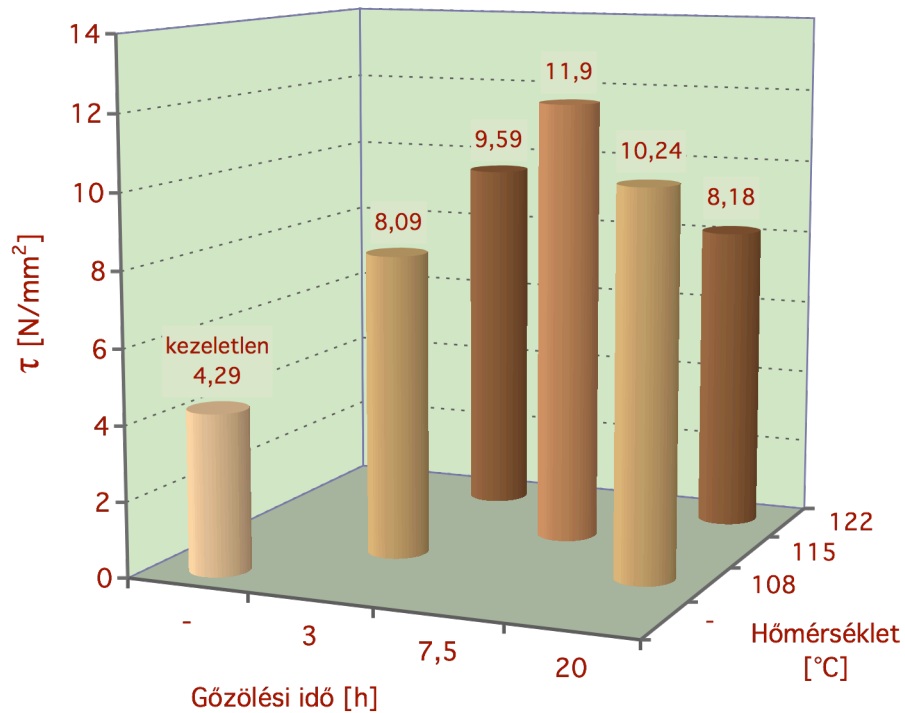
Gőzölési paraméterek		$\tau$ [N/mm <sup>2</sup> ]			
		Akác	Merbau	Sapupira	Tölgy
kezeletlen		<b>12,86</b>	<b>11,46</b>	<b>4,29</b>	<b>13,23</b>
108/92°C	3h	15,05	10,68	8,09	8,96
108/92°C	20h	14,5	11,76	10,24	8,55
115/100°C	7,5h	13,56	11,68	11,9	9,01
122/108°C	3h	13,7	10,31	7,91	8,6
122/108°C	20h	10,81	10,01	8,63	5,65

**18. táblázat** Ragasztott kötés nyírószilárdságának átlagértéke fafajonként, különböző gőzölési paraméterek mellett (az alkalmazott ragasztó típusa: általános, beltéri PVAC ragasztó)

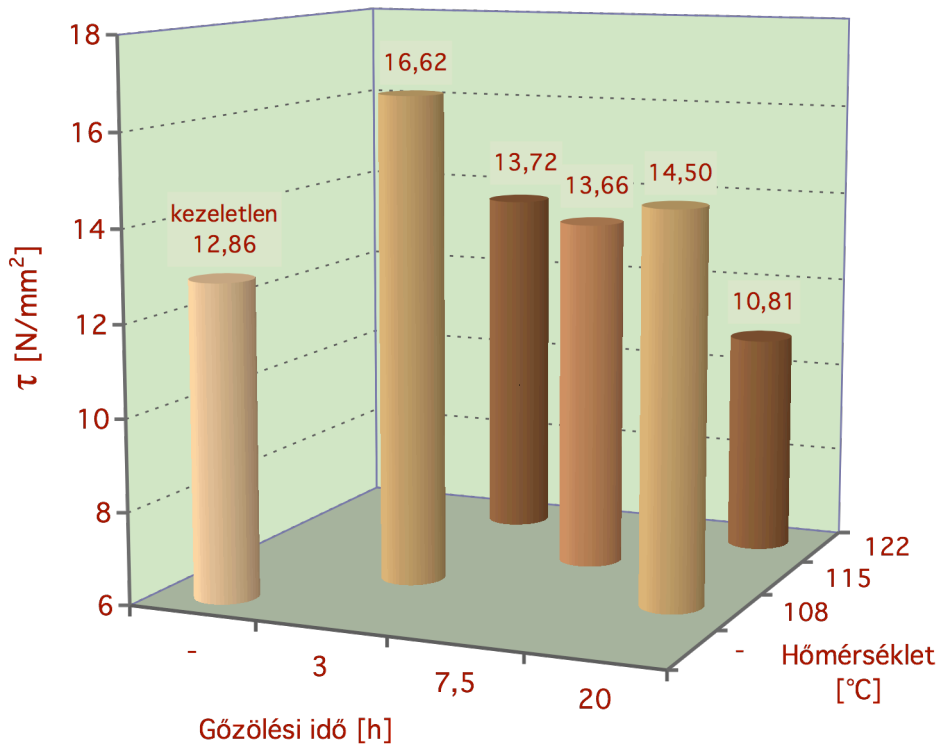
A 68. ábra a 2. (hideg vízben áztatott) sorozaton elvégzett mérések eredményeit mutatja. A vizes áztatás következtében már a kiinduló szilárdsági érték is csak 50-60%-a az ugyanazon fafajhoz tartozó, de szárazon vizsgált próbatestek szilárdsági értékeinek. Ez az érték a sapupira kivételével a vizsgált fajok mindegyikénél tovább csökkent gőzölés hatására. A csökkenés mértéke függött a gőzölés időtartamától és a gőzölési hőmérséklettől. Magasabb hőmérséklethez és hosszabb kezelési időhöz alacsonyabb nyírószilárdság tartozik. Sapupira esetében ennél a sorozatnál is a ragasztott felület nyírószilárdságának növekedését

tapasztaltuk. A maximális értéket azonban itt a legmagasabb hőmérsékletű, leghosszabb idejű gőzölésnél értük el.

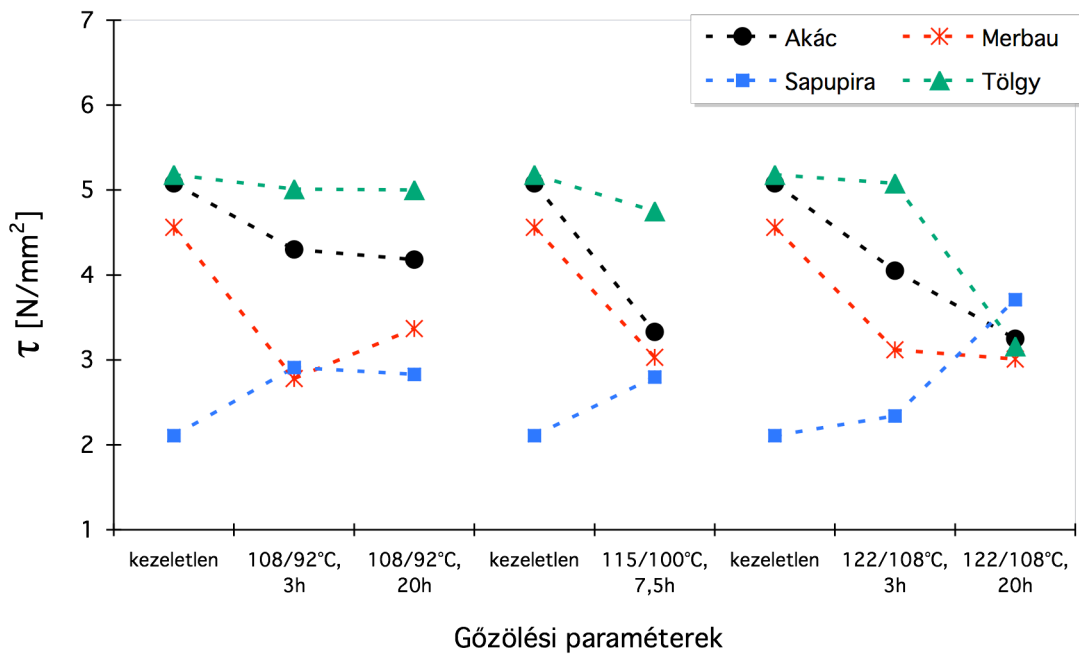
Megállapíthatjuk tehát, hogy a sapupira alapanyagból készült ragasztott termékek kötésfelületen kialakuló nyírószilárdsága gőzöléssel jelentős mértékben javítható. Megjegyezzük azonban, hogy a másik három vizsgált fafaj tekintetében a ragasztott felület nyírószilárdságára a gőzölés káros hatással van, vagy közömbös.



**66. ábra** Sapupira faanyagból kialakított, ragasztott próbatestek átlagos nyírószilárdsága



67. ábra Akác faanyagból kialakított, ragasztott próbatetek átlagos nyírószilárdsága



68. ábra Gőzölt ill. gőzöletlen faanyagból kialakított, ragasztás után 24 óráig hideg vízben áztatott próbatetek nyírószilárdsága

## V ÖSSZEGZÉS

A faanyagok kémiai szerkezetének módosulása következtében a vizsgált fajok minden egyes mért fizikai és mechanikai jellemzője megváltozott a hő és a nedvesség együttes hatásának köszönhetően. A faanyagban fellelhető extrakt anyagok kioldódása, oxidációja és bomlása a fő iniciátorai annak a - hőkezelés paramétereitől erősen függő - folyamatnak, melynek következtében a szín illetve a felület kémiai jellemzői megváltoznak. 100°C-ot meghaladó hőmérsékleten végzett hőkezelés esetében azonban számolni kell a faanyag fő komponenseinek, nevezetesen a cellulóz, a lignin és a hemicellulózok szerkezetének módosulásával is. Mivel a cellulóz felelős a faanyag húzószilárdságáért, a lignin pedig a nyomószilárdság jelentős részét szolgáltatja, ezen összetevők átalakulása maga után vonja az egész faanyag mechanikai tulajdonságainak megváltozását is.

Az akác és a merbau nagy mennyiségű vízdékony járulékos anyagot tartalmaz, ezért e fajok színváltozása volt a legintenzívebb. A merbau a\* és b\* színkoordinátái a hőkezelés paramétereitől függetlenül csökkentek, míg az akác L\* és b\* koordinátáit, valamint a merbau L\* koordinátáját erősen befolyásolta a gőzölési hőmérséklet és a gőzölési idő. Az akác vörös színezete magasabb hőmérsékleteken végzett gőzölés esetében a paramétereiktől függetlenül változott. A sapupira és a tölgy vörös illetve sárga színezetének eltolódása bármely vizsgált gőzölési paraméterpár mellett elhanyagolható volt; a magasabb hőmérsékleten, hosszabb ideig végzett hőkezelés hatására bekövetkező, szabad szemmel is tapasztalható színváltozás a világosság csökkenésével magyarázható.

A gőzölt faanyag UV sugárzás hatására másként viselkedik, mint a kezeletlen. A sugárzás hatására bekövetkező színváltozás döntő része mind a kezeletlen, mind a hőkezelt faanyag esetében a besugárzás első 1-2 napjában bekövetkezett, azonban a felületek elszíneződése nem fejeződött be. Sem a kezeletlen, sem a gőzölt akác faanyag sárga színezetének változása nem volt jelentős, ami feltehetően a szélsőségesen sárga színt okozó magas robinetin tartalomnak köszönhető. Általánosságban megállapítható, hogy a vizsgált fafajok világossága csökkent, vörös színezete erősödött. Az UV sugárzás hatására bekövetkező színváltozás mértéke befolyásolható megfelelő paraméterű gőzölési eljárással. 122°C-on, 20 órás előkezelést biztosítva az akác UV fény által indukált elszíneződése szinte teljes mértékben elkerülhető. A robinetin és egyéb, az akác színét meghatározó vegyületek módosulása már a hidrotermikus előkezelés során bekövetkezett, így a gőzölés eredményezte szín alig változott az UV besugárzás folyamán. Tölgy faanyag sárga színezete előzetes hőkezelés után nagyobb stabilitást mutatott.

Általánosságban a vizsgált mechanikai jellemzők magasabb gőzölési hőmérséklet és/vagy hosszabb kezelés esetében nagyobb mértékben csökkentek. Az akác és a tölgy hajlítószilárdságát a gőzölési idő nagyobb mértékben befolyásolta, mint a gőzölési hőmérséklet.

A ragasztott kötések nyírószilárdságát döntően két folyamat befolyásolta: a fafelület kémiai tulajdonságainak megváltozása, illetve a faanyag mechanikai tulajdonságainak romlása. A kémiai tulajdonságok megváltozása következtében a felület nedvesíthetősége fafajtól függően javult vagy romlott. Világossá vált, hogy az illeszkedési szög mérése az ún. „sessile drop“ módszerrel nehezen kivitelezhető eljárás a gőzölés során bekövetkező változások leírására, mivel a mérés eredményeit erősen befolyásolják egyéb körülmények, mint például az anatómiai szerkezet, mely a tesztfolyadék nemkívánt penetrációját okozhatja. Tapasztalati tény azonban, hogy az akác és a sapupira adhéziós tulajdonságai megfelelő paraméterű gőzöléssel javíthatóak. Tölgy fafelület és víz között kialakuló nedvesedési szög jelentős

mértékben csökkent gőzölés hatására, mely maga után vonta a felületi szabad energia növekedését is jobb nedvesíthetőséget eredményezve. A szilárdsági tulajdonságok drasztikus csökkenése azonban a ragasztott kötések nyírószilárdságának jelentős gyengülését eredményezi.

## VI TÉZISEK

- I) Megállapítottam, hogy a gőzölést követő színváltozás szempontjából a vizsgált fafajok közül az akác a legérzékenyebb; színváltozása a világosság- ( $L^*$ ) és sárga színezet- ( $b^*$ ) koordinátákkal jól jellemezhető. Az elért szint a gőzölés két paramétere (hőmérséklet és idő) együttesen határozza meg. A merbau kezelés során kialakuló vörös ( $a^*$ ) és sárga ( $b^*$ ) színezetét a gőzölés paraméterei nem befolyásolják, világosságát az alkalmazott hőmérséklet határozza meg. A sapupira és a tölgy színezete és világossága magas hőmérsékleten hosszú ideig végzett gőzölés mellett sem változott jelentős mértékben.
- II) Kimutattam, hogy az akác faanyag UV sugárzás hatására bekövetkező elszíneződése jelentős mértékben csökkenthető hidrotermikus kezeléssel; kezeletlen minták besugárzás előtti és egy hétig tartó UV sugárzás utáni átlagos színíngert-különbség ( $\Delta E^*$ ) értéke 18,55, ugyanez az érték  $108^\circ\text{C}$ -on, 20 óráig végzett előkezelést feltételezve 10,33. Magas hőmérsékleten ( $122^\circ\text{C}$ ) hosszú ideig (20h) végzett gőzölést követő UV sugárzás által okozott vörös színezet változás közel zérus. A színestabilitást a gőzölési hőmérséklet és a gőzölési idő azonos mértékben befolyásolja. A hőkezelt ( $108^\circ\text{C}$ , 20h) tölgy faanyag nagyobb színestabilitást mutat, s ez a sárga színezet gőzölést követő nagyobb stabilitásával van összefüggésben. Tölgy faanyag gőzölést követő rövid idejű, UV fénnel történő besugárzása érdekes kombinált technológiai megoldás lehet a fafelület rajzolatának kiemelésére. A merbau és a sapupira kezeletlen illetve hőkezelt állapotban hasonló mértékben színeződik el.
- A vizsgált felületkezelő anyagokkal kezelt faanyagok kevésbé színeződtek el UV besugárzás hatására. Transzparens lakkal felületkezelt akác faanyag színestabilitása gőzöléssel javítható. Merbau és sapupira esetében a felületkezelt próbatestek hasonló elszíneződést mutattak gőzölt és gőzöletlen állapotban is; a hőkezelés tehát nem nyújt megoldást a színestabilitás problémájára. Pigmentált lakkal az elszíneződés minimálisra csökkenthető; a különböző fafajok hasonló színíngert-különbség ( $\Delta E^*$ ) értékeiből a lakk elszíneződésére következtethetünk.
- III) Kísérleteim során minden egyes mintasorozat abszolút száraz bázison számított átlagos nedvességtartalmát meghatároztam. A kezeletlen próbatestek nettó nedvességtartalma és a gőzölésre szánt faanyagra vonatkozó nedvességtartalmi értékek között azonban jelentős különbséget mutattam ki. Az eltérés a száraz bázis értékek különbségeivel magyarázható, mivel a tömegállandóságig történő szárítást a gőzölt próbatestek esetében kezelés után végeztem. E különbség a gőzölés során bekövetkező szárazanyagtartalom csökkenését jelzi, melyből számolható a gőzölés során távozó vízdékony járulékos anyagok mennyisége, azonos kiindulási egyensúlyi fanedvesség tartalmat feltételezve. A különbségi értéket a gőzölési paraméterek együttesen befolyásolják: hosszabb hőkezelés és/vagy magasabb hőmérséklet az extraktanyagok erőteljesebb kimosódását eredményezi. A különbségi érték fafajtól szintén függ: merbau faanyagnál adódott a legnagyobb különbség a nedvességtartalmi értékek között. A legkisebb értéket a sapupira esetében mértem.
- IV) Kimutattam, hogy a vizsgált mechanikai jellemzők gőzölés hatására mind a négy fafaj esetében romlottak. A trópusi fafajok kisebb hajlítózilárdság-csökkenést szenvedtek, mint az akác és a tölgy. A legdrasztikusabb változás akác esetében következett be, de a magas kiinduló értékeknek köszönhetően hajlítózilárdsága hosszú idejű (20h), magas hőmérsékleten ( $122^\circ\text{C}$ ) végzett gőzölés után is magasabb, mint a kezeletlen tölgyé. Megállapítottam, hogy a vizsgált fafajok gőzölés után mérhető hajlítózilárdsága csak kis

mértékben függ a gőzölési hőmérséklettől, azt inkább a gőzölés időtartama befolyásolja. Ennek magyarázata, hogy a 200°C alatti hőmérséklet önmagában nem elegendő feltétel a faanyag fő építőelemeinek, azaz a lignin és cellulóz hődegradációjához, a kezelés időtartamának növelésével azonban ezek az összetevők kémiai szerkezetükben módosulnak.

- V) Kísérleteimmel igazoltam, hogy víz és szilárd faanyag között kialakuló illeszkedési szög fafajonként eltérő, gőzölés hatására változik. Az akácra jellemző illeszkedési szög 108°C-on 3 óráig végzett kezelés hatására csökkent. Magasabb hőmérsékleten és/vagy hosszabb ideig végzett gőzölés nagyobb szögértéket eredményezett. Sapupira felületre ejtett vízcsepp illeszkedési szöge nem változik számottevően gőzölés hatására. A tölgy fafelületre jellemző, viszonylag magas illeszkedési szög gőzöléssel csökkenthető; a kezelés után kialakuló szögérték és a kezelés paraméterei között nincs összefüggés. Merbau fafelületre jellemző illeszkedési szög gőzölés hatására növekszik.
- A gőzölés után kialakuló felületi szabad energia értékeket a folyamat mindkét paramétere befolyásolja fafajtól függetlenül. A merbau felületi szabad energiája 122°C-on, 20 óráig végzett hőkezelés következtében felére csökken. Tölgy faanyag felületi szabad energiája rövid ideig (3h), alacsony hőmérsékleten (108°C) végzett modifikációval, míg a sapupira felületi energiája hosszan tartó (20h), magas hőmérsékletű (122°C) modifikációval növelhető.
- VI) PVAC ragasztóanyag felhasználásával végzett adhéziós vizsgálataim kimutatták, hogy az akác és a sapupira ragasztási tulajdonságai megfelelő paraméterű gőzöléssel javíthatók; akác esetében a rövid idejű (3h), alacsony hőmérsékleten (108°C) végzett modifikáció csökkentette a víz-fa anyagpárra jellemző illeszkedési szöget (V. tézis), minek következtében a vizes PVAC ragasztóval kialakított kötés szilárdsága is nőtt. Sapupira esetében közepes hőmérsékleten (115°C) 7,5 óráig végzett gőzölés javasolható. A merbau adhéziós tulajdonságai nem változnak, a tölgyé bármely gőzölési paraméterpárt alkalmazva romlanak.

## VII IRODALOMJEGYZÉK

- Anderson E. L., Pawlak Z., Owen N. L., Feist W. 1991, Appl. Spectroscopy 45: 641-652
- Andrady A. L., Hamid S. H., Hu X., Torikai A. 1998, Journal of Photochemistry and Photobiology 46: 96-103
- Arseneau, D. F. 1961, Can. J. Chem. 39, 1915-1919
- Bartha D. 1998, Jövevények, Élet és Tudomány 1998. 18. szám
- Beall, F. C. és Eickner, H. W. 1970, Thermal Degradation of Wood Components: A Review of Literature. USDA For. Service Res. Paper FPL 130
- Boehme, C., Hora, G. 1996, Water adsorption and contact angle measurements of native european, north american and tropical wood species to predict glueing properties. Holzforschung 50: 269-276
- Borhan, A., Rungta, K. K. 1993, An experimental study of the radial penetration liquids in thin porous substrates. Journal of Colloid and Interface Science 158: 403-411
- Cambie, R. C., és J. Ash. 1994. Fijian Medical Plants. CSIRO, Canberra, Australia.
- Casilla, R. C., Chow, S., Steiner, P. R. 1981, An immersion technique for studying wood wettability. Wood Science and Technology 15: 31-43
- Chen, C-M. 1970, Effect of extractive removal on adhesion and wettability of some tropical woods. Forests Products Journal 20 (1): 36-41
- Chow, S. Z., Pickles, K. J. 1971, Wood Fibre 3, 166-178
- Christiansen, A. W. 1994, Effect of overdrying of yellow-poplar veneer on physical properties and bonding. Holz als Roh- und Werkstoff 52: 139-149
- Çolak, S., Çolakoğlu, G. 1996a, The effect of steaming on some mechanical properties of Okumumè Plywoods. Holz als Roh- und Werkstoff 54, 332
- Çolak, S., Çolakoğlu, G., Usta, M. 1996b, The effect of steaming and drying on the chemical compositions of the Pine (*Pinus brutia* ten.) veneers. Holz als Roh- und Werkstoff 54, 422
- Dahm, H. P. 1970, Svensk Papperstid. 73, 613-618
- Derbyshire H., Miller E. R., Turkulin H. 1995, Holz als Roh- und Werkstoff 53: 339-345
- Dessewffy I-né 1964, Az akác anyagának hidrotermikus kezelése. Kutatási jelentés, FAKI
- Durisova, L. Katuscah, S., Mahdakova, O. 1986, Farebne zmeny smrekoveno dreva prirodneho a chraneneno drevodekorom pocas trojrosnej expozicie. Drevársky Vyskum, 111, 277-41
- Fábián T. 1976, A faanyagok hidrotermikus kezelése. Faipari Kutató Intézet 1976.
- Fengel, D. 1966, Holz als Roh- und Werkstoff 24, 9-14, 98-109, 529-536
- Fengel, D. 1967, Holz als Roh- und Werkstoff 25, 102-111
- Fengel, D. és Przyklenk, M. 1970, Holz als Roh- und Werkstoff 28, 254-263
- Fengel, D. és Wegener, G. 1984, Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions
- Follrich, J., Müller, U., Gindl, W. 2006, Effects of thermal modification on the adhesion between spruce wood (*Picea abies* Karst.) and a thermoplastic polymer. Holz als Roh- und Werkstoff 64: 373-376
- Futó L. 1974, Holz als Roh- und Werkstoff 32: 303-311
- Futó L. 1976, Holz als Roh- und Werkstoff 34: 31-36, 49-54
- Gardner, D. J. 1996, Application of the Lifshitz-van der Waals acid-base approach to determine wood surface tension components. Wood and Fiber Science 28 (4): 422-428
- Gardner, D. J., Generella, N. C., Gunnells, D. W., Wolcott, M. C. 1991, Dynamic wetting of wood. Langmuir 7: 2498-2502
- Gindl, M., Reiterer, A., Sinn, G., Stanzl-Tschegg, S. E. 2004, Effects of surface ageing on wettability, surface chemistry, and adhesion of wood. Holz als Roh- und Werkstoff 62: 273-280



- Girifalco, L. A., Good, R. J. 1957, A theory for the estimation of surface and interfacial energies I. Derivation and application to interfacial tension. *Journal of Physical Chemistry* 61: 904
- Good, R. J. 1993, Contact angle, wetting, and adhesion: a critical review. In: *Contact angle, wettability and adhesion*, Ed. Mittal, K. L.
- Gray, V. R. 1961, The wetting, adhesion and penetration of surface coatings on wood. *Journal of the Oil and Colour Chemist Association* 44: 756-786
- Gray, V. R. 1962, The wettability of wood. *Forest Products Journal* 12 (9): 452-461
- Guild, J. (1931). "The colorimetric properties of the spectrum". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A230*: 149-187.
- Hameed, M., Roffael, E. 1999, Über die Benetzbarkeit von Splint- und Kernholz der Kiefer, Douglasie und Lärche. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57: 287-293
- Heitner, C. 1993, Light-induced yellowing of wood containing papers, in: Heitner C, Scaiano JC (Eds.) *Photochemistry of lignocellulosic materials*, ACS Symposium Series, 531, American Chemical society, 3-25
- Herczeg, A. 1965, Wettability of wood. *Forest Products Journal* 15 (11): 499-505
- Hillis, W. E. 1996, Formation of robinetin crystals in vessels of *Intsia* species. *IAWA Journal* 17 (4): 405-419
- Hon DN-S. 2000, Weathering and photochemistry of wood, in: Hon D.N.-S., Shiraishi N. (Eds.) *Wood and cellulosic chemistry*, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York, 512-546
- Hon DN-S., Ifju G. 1978, *Wood Science* 11: 118-127
- Horváth-Szováti E. 2000a, Az akác faanyag gőzölése során bekövetkező színváltozás vizsgálata. Doktori (Ph.D.) értekezés, NYME Sopron 2000.
- Horváth-Szováti E. 2000b, A gőzölt akác világosság-változásának hőmérséklet- és időfüggése. *SE Tudományos Közleményei* (2000) 46 179-189
- Horváth-Szováti E., Varga D. 2000, Az akác faanyag gőzölése során bekövetkező színváltozás vizsgálata II. A 105, 110 és 115°C-on történő gőzölés eredményei, javaslat az ipari hasznosításra. *Faipar* (4) 11-13
- Huh, C., Mansos, S. G. 1977, Effects of surface roughness on wetting. *Journal of Colloid and Interface Science* 60 (1): 11-38
- Imamura H., Nomura K., Hibino Y., Ohashi H. 1974, A new flavonol in the shake of *Merbau* wood (*Intsia* sp.). *Res. Bull. Fac. Agr. Gifu Univ.* 36: 93-101
- Jayme, G. és Knolle, H. 1965, *Holz als Roh- und Werkstoff* 23, 438-440
- Kainins, M. A., Knaebe, M. T. 1992, Wettability of weathered wood. In: *Contact Angle, Wettability and Adhesion*, Ed. K. L. Mittal, 469-474
- Kataoka Y., Kiguchi M. 2001, Depth profiling of photo-induced degradation in wood by FT-IR microspectroscopy. *Wood Sci* 47: 325-327
- Keylwerth, R. és Christoph, N. 1960, *Materialprüfung* 2, 281-288
- Kiguchi M., Evans P. D. 1998, *Polym degradation Stability* 61: 33-45
- Kleinert, T. N. 1970, *Holzforsch. Holzverwert.* 22, 21-24
- Kollmann, F. és Fengel, D. 1965, *Holz als Roh- und Werkstoff* 23, 461-468
- Kollmann, F. és Schneider, A. 1963, *Holz als Roh- und Werkstoff* 21, 77-85
- Kollmann, F. és Schneider, A. 1964, Untersuchungen über den Einfluß von Wärmebehandlungen im Temperaturbereich bis 200°C und von Wasserlagerung bis 100°C auf wichtige physikalische und physikalisch-chemische Eigenschaften des Holzes. Forschungsbericht. Nordrhein-Westfalen No. 1399. Westdeutscher Verlag, Köln, Opladen
- Kollmann, F. et al. 1951, Verfärbungen des Vollholzes und der Furniere bei der künstlichen Holzröckung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 9(10), 382-391
- Kollmann, F. et al. 1969, Gefüge- und Eigenschaftsänderungen im Holz durch mechanische und thermische Beanspruchung. *Holz als Roh- und Werkstoff* 27(11), 407-425

- Košik, M., Gerátová, L., Rendoš, F. és Domanský, R. 1968b, *Holzforsch. Holzverw.* 20, 15-19
- Košik, M., Kozmál, F., Reiser, V. és Domanský, R. 1968a, *Holzforsch. Holzverw.* 20, 11-15
- Kovács I., Molnár S. 1980, A gőzölés hatása az akác műszaki tulajdonságaira. *Az Erdő*, 1980. március, 103-107
- Kürschner, K. és Melcerová, A. 1965, *Holzforschung* 19, 161-178
- Leding, S. F., Slavik, I., Broege, M., Mollekopf, N. 2004, Characterization of effluent from direct and indirect steaming of beech timber. *Holz als Roh- und Werkstoff* 62, 346-348
- Lenth, C. A., Haslett, A. N., 2003, Moisture uptake patterns in pressure steaming of Radiata Pine. *Holz als Roh- und Werkstoff* 61, 444-448
- Liptáková, E., Kúdela, J. 1994, Analysis of the wood wetting process. *Holzforschung* 48: 139-144
- Liptáková, E., Kúdela, J., Bastl, Z., Spirovová, I. 1995, Influence of mechanical surface treatment of wood on the wetting process. *Holzforschung* 49: 369-375
- Liu, F. P., Gardner, J. D., Wolcott, M. P. 1995, A model for the description of polymer surface dynamic behaviour. Contact angle vs. polymers surface properties. *Langmuir* 11: 2674-2681
- Lukács Gy. 1982, *Színmérés. Műszaki Könyvkiadó*, Budapest 1982, 125-262.
- MacAdam, D.L., Visual sensitivities to color differences in daylight, *J. Opt. Soc. Am.*, 32, 247 (1942).
- Maldas, D. C., Kamdem, D. P. 1998, Surface tension and wettability of CCA-treated red maple. *Wood and Fibre Science* 30 (4): 368-373
- Mantanis, G. I., Young, R. A. 1997, Wetting of wood. *Wood Science and Technology* 31: 339-353
- Meijer, M. de 1999, Interactions between wood and coatings with low organic solvent content. Thesis Wageningen
- Meijer, M. de, Haemers, S., Cobben, W., Militz, H. 2000, Surface energy determinations of wood; comparison of methods and wood species. *Langmuir* 16: 9352-9359
- Meijer, M. de, Militz, H. 1998, Adhesion of Low-VOC Coatings on Wood: A Quantitative Analysis, Proceedings XXIV Fatipecc Conference, Interlaken, Switzerland
- Meijer, M. de, Thurich, K., Militz, H. 2001, *Holz als Roh- und Werkstoff* 59: 35-45
- Meijer, M. de, Thurich, K., Militz, H. 2001, Quantitative measurements of capillary coating penetration in relation to wood and coating properties. *Holz als Roh- und Werkstoff* 59: 35-45
- Miniutti, V. P. 1973, *J. Paint Technol.* 45, 27-34
- Mitsui K. 2006, Changes in color of spruce by repetitive treatment of light-irradiation and heat treatment. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64, 243-244
- Mitsui, K., Takada, H., Sugiyama, M., Hasegawa, R. 2001, *Holzforschung* 55: 601-605
- Molnár S. 1976, Akácfanemesítés Pusztavacson. *Az erdő* (1976) 490-492
- Molnár S. 1979, A természetes állapotú és hőkezelt akác mechanikai megmunkálásának főbb technikai és technológiai jellemzői. Műszaki doktori értekezés, Sopron 1979.
- Molnár S. 1998, Die technischen Eigenschaften und hydrotermische Behandlung des Robinienholzes. In: *Die Robinie Rohstoff für die Zukunft (Erfahrungen und Forschungsergebnisse)*, Stiftung für die Holzwissenschaft, Budapest 1998, 50-63.
- Molnár S. 2000, *Faipari kézikönyv I. Faipari Tudományos Alapítvány*, Sopron 2000.
- Molnár S., Bariska M. 2002, Magyarország ipari fái. Szaktudás Kiadó Ház, Budapest 2002.
- Molnár S. et al. 1987, Az akácfa gőzölésének célja és hatása a faanyag tulajdonságaira, Kutatási jelentés, EFE Fizika-Elektrotechnika Tanszék, 1987.
- Molnár S. et al. 1994, Az akácfa hidrotermikus nemesítése atmoszférikus könnyűszerkezetes gőzölő kamrában, Kutatási jelentés, EFE Faanyagismerettani Tanszék, 1994.

- Molnár S., Peszlen I., Richter, H. G., Tolvaj L., Varga F. 1998, Influence of steaming on selected wood properties of black locust (*Robinia pseudoacacia*). Acta Facultatis Ligniensis 38-45
- Németh K. 1981a, Színmérés a faiparban I. A természetes fa színmeghatározása, Faipar 31(9), 257-261
- Németh K. 1981b, Színmérés a faiparban II. Felületkezelés hatása a fa színére, Faipar 31(9), 261-264.
- Németh K. 1981c, Színmérés a faiparban III. Pácolás hatása a fa színére, Faipar 31(12), 370-373.
- Németh K. 1982, A fa színének értékelése a CIELAB-rendszerben, Az Erdészeti és Faipari Egyetem Tudományos Közleményei 1982/2
- Németh K. 1984, Színmérés a faiparban IV. A CIELAB színíngermérő rendszer alkalmazása, Faipar 33(5), 156-159
- Németh K. 1989, A faanyag abiotikus degradációja. Doktori Értekezés, Sopron 1989.
- Németh K. 1998, A faanyag degradációja. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest 1998.
- Németh K., Faix O. 1988a, Farbmessung zur Beobachtung der Photodegradation des Holzes. Holz als Roh- und Werkstoff 46: 472
- Németh, K. 1988b, Die abiotische Degradation des Akazienholzes. Grundforschung zur komplex Holznutzung. VII. Symp. Smolenyca
- Neumüller, O. A. 1973, Römpps Chemie-Lexikon. 7th Ed., Vol. 3. Francksche Verlagshandlung, Stuttgart, p. 1812
- Nguyen, T., Johns, W. E. 1979, Polar and dispersion force contributions to the total surface free energy of wood. Wood Science and Technology 12: 63-74
- Nguyen, T., Johns, W. E. 1979, The effects of aging and extraction on the surface free energy of Douglas-Fir and Redwood. Wood Sci Tech 13: 29-40
- Norrström, H. 1969, Svensk Papperstid. 72, 25-38
- Nussbaum, R. M. 1995, The critical time limit to avoid natural inactivation of spruce surfaces (*Picea abies*) intended for painting or gluing. Holz als Roh- und Werkstoff 53: 384
- Nussbaum, R. M. 1999, Natural surface inactivation of Scots pine and Norway spruce evaluated by contact angle measurements. Holz als Roh- und Werkstoff 57: 419-424
- Owens, C. K., Wendt, K. C. 1969, Estimation of the surface free energy of polymers. Journal of Applied Polymer Science 12: 1741-1747
- Pecina, H., Paprzycki, O. 1988, Wechselbeziehungen zwischen der Temperaturbehandlung des Holzes und seiner Benetzbarkeit. Holzforschung und Holzverwertung 40: 5-8
- Pecina, H., Paprzycki, O. 1990, Untersuchungen über die Benetzbarkeit chemisch modifizierter Hölzer. Holz als Roh- und Werkstoff 48: 61-65
- Phelps, J. E. és Mc Ginnes, E. A. 1983b, Growth-quality evaluation of black-walnut wood P. III. An anatomical study of color characteristic of black-walnut veneer. Wood Fiber Sci. 15(3) 212-218
- Phelps, J. E. et al. 1983a, Growth-quality evaluation of black-walnut wood P II. Color analyses of veneer produced on different sites. Wood Fiber Sci. 15(2) 177-185
- Rabek J. F. 1995, Polymer degradation, Chapman and Hall, London
- Richter, H., Köhl, J. 1998, Technische Farbanderung von Robinienholz – Vorteile und Einschränkungen. In: Die Robinie Rohstoff für die Zukunft (Erfahrungen und Forschungsergebnisse), Stiftung für die Holzwissenschaft Budapest, 1998, 64-66
- Richter, H.G., és Dallwitz, M.J. 2000 onwards. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 16th April 2006. <http://delta-intkey.com>
- Richter, H. G., Meinert, K., Riehl, T., Welling, J. 2000, Drying experiments under vacuum / super-heated steam. INCO-COPERNICUS Project No. PL 96-4114. Final report

- Roffael, E. és Schaller, K. 1971, Holz als Roh- und Werkstoff 29, 275-278
- Rozas, C., Steinhagen, H. P. 1996, Effect of kerfing followed by steaming on the relaxation of growth stresses in eucalyptus wood. Holz als Roh- und Werkstoff 54, 312
- Sandermann, W. és Augustin, H. 1963, Holz als Roh- und Werkstoff 21, 256-265, 305-315
- Sandermann, W. és Schlumbom, F. 1962,
- Schafizadeh, V. és DeGroot, W. F. 1976, Combustion Characteristics of Cellulosic Fuels. In: Thermal Uses and Properties of Carbonhydrates and Lignins. Academic Press, New York, San Francisco, London, 1-17
- Scheikl, M., Dunky, M. 1998, Measurement of dynamic and static contact angles on wood for the determination of its surface tension and the penetration of liquids into the wood surface. Holzforschung 52: 89-94
- Scott G. G. 1990, Polymer degradation and stabilization, Elsevier Applied Science, London
- Shafizadeh, F. és McGinnins, G. D. 1971, Carbonhydr. Res. 16, 273-277
- Shen, Q., Nylund, J., Rosenholm, J. B. 1998, Estimation of the surface energy and acid-base properties of wood by means of wetting method. Holzforschung 52: 521-529
- Shen, W., Parker, I. H., Sheng, Y. G. 1998, The effects of surface extractives and lignin on the surface energy of eucalypt kraft pulp fibres. Journal of Adhesion Science and Technology 12 (2): 161-174
- Snajberg, K. és Zavarin, E. 1976, Biochem. Syst. Ecol. 4, 159-163
- Stubenvoll A. 1984, A gőzölés hatása a fa színének alakulására. Faipar 37. (1988)/1., 26-33
- Sullivan, J. D. 1966, Color characterization of wood: Color parameters in individual species. Forest Prod. I. 17(8), 25-29
- Swan, B. 1968, Svensk Papperstid. 71, 436-440
- Tolvaj L. 1989, Az akác gőzölés újabb kísérleti eredményei. Faipar 38.(1989)/4., 119-120
- Tolvaj L. 1992, A diffúz reflexiós spektroszkópia alkalmazása a faanyagok felületén fény és termikus hatásokra bekövetkező változások vizsgálatakor. Kandidátusi Értekezés, Sopron 1992.
- Tolvaj L. 1994, A faanyag optikai tulajdonságai. In: A faipari műveletek elmélete. Szerkesztette: Dr. Sitkei György, Mezőgazdasági Kiadó, Budapest. 87-103
- Tolvaj L., Faix, O. 1995, Artificial ageing of wood monitored by DRIFT spectroscopy and CIE L\*a\*b\* color measurements. Holzforschung 49: 397-404
- Tolvaj L., Faix, O. 1996, Modification of Wood Colour by Steaming. ICWSF'96 Conf. (10-12 April, 1996), Sopron, 10-19.
- Tolvaj L., Papp Gy. 1999, Outdoor Weathering of Impregnated and Steamed Black locust ICWSF'99 Conference (14-16. July) High Wycombe (UK).
- Van Oss, C. J. 1994, Interfacial forces in aqueous media. New York
- Van Oss, C. J., Chaudhury, M. K., Good, R. J. 1988, Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems. Chemical Review 88: 927-941
- Varga D. 2002, A gőzölés színváltoztató hatásának vizsgálata félszáraz és élőnedves akác faanyag esetében. Diplomadolgozat, NYME FMK Fizika Intézet 2002
- Wardrop, A. B. 1970, Protoplasma 70, 73-86
- Wright, W. D. 1928. "A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours". Transactions of the Optical Society 30: 141-164.
- Wu, S. 1971, Calculation of interfacial tension in polymer systems. Journal of Polymer Science Part C 34: 19-30
- Wulf, M., Netuschil, P., Hora, G., Schmich, P., Cammenga, H. K. 1997, Investigation of the wetting characteristics of medium density fibreboards (MDF) by means of contact angle measurements. Holz als Roh- und Werkstoff 55: 331-335
- Zisman, W. A. 1972, Surface energetics of wetting spreading and adhesion. Journal of Paint Technology 44 (564): 42-57

Zoll U (1995) Lack auf Holz: Einflussgrößen und Wechselwirkungen. Vincentz, Hannover

*Internetes források*

[www.classes.hortla.wsu.edu](http://www.classes.hortla.wsu.edu)

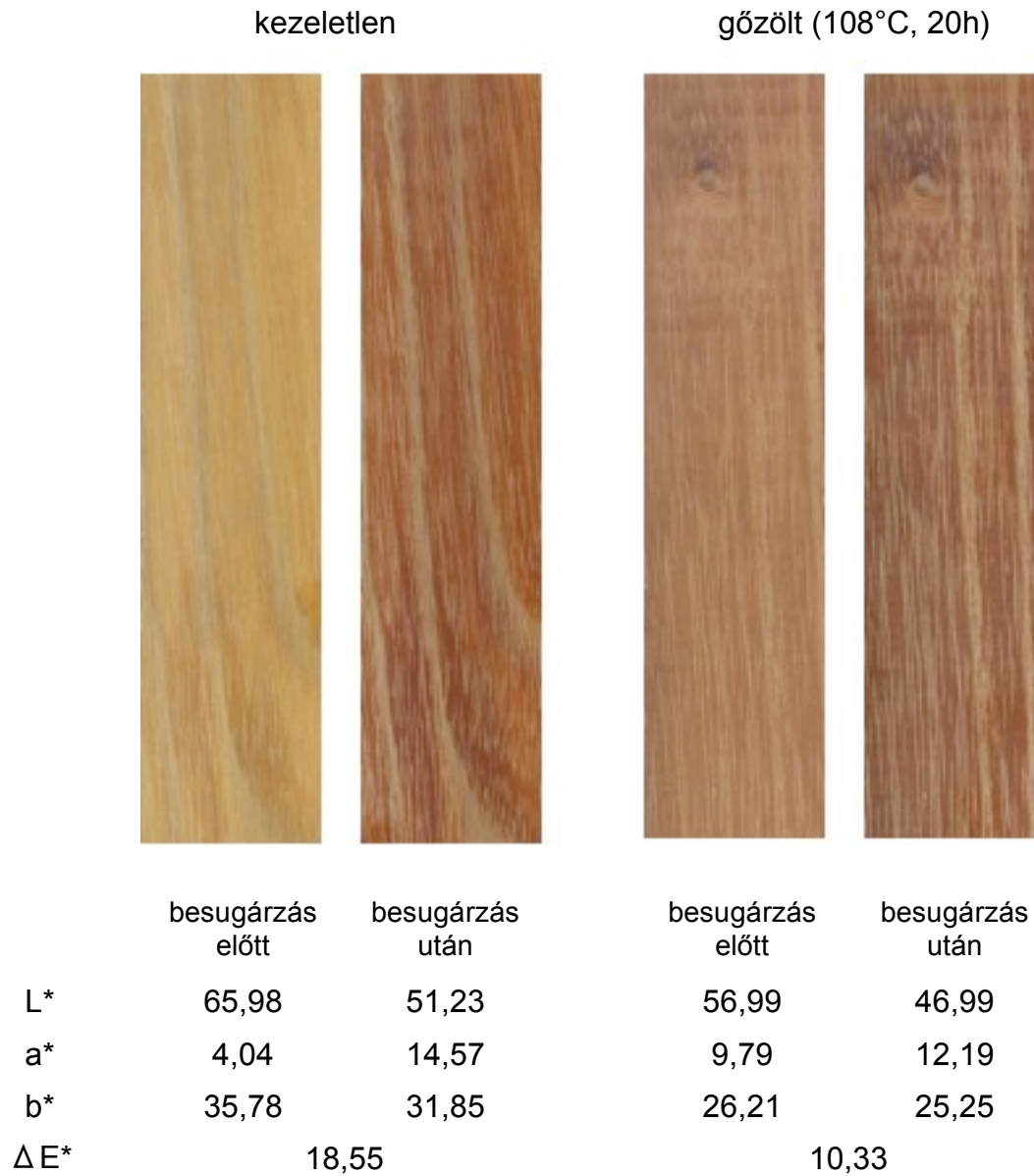
[www.agroforestry.net/tti/Intsia-vesi.pdf](http://www.agroforestry.net/tti/Intsia-vesi.pdf)

[www.kenneallytimber.co.nz](http://www.kenneallytimber.co.nz)

[www.bigfoot.hu](http://www.bigfoot.hu)

## VIII FÜGGELÉK

F1. ábra Kezeletlen és gőzölt akác színváltozása 1 hétig tartó UV sugárzás hatására



**F2. ábra** Kezeletlen és gőzölt tölgy színváltozása 1 hétig tartó UV sugárzás hatására



**F3. ábra** Kezeletlen és különböző paraméterekkel gőzölt akác fafelületek





**F4. ábra** Kezeletlen és különböző paraméterekkel gőzölt merbau fafelületek



**F5. ábra** Kezeletlen és különböző paraméterekkel gőzölt sapupira fafelületek



**F6. ábra** Kezeletlen és különböző paraméterekkel gőzölt tölgy fafelületek



## ANOVA táblázatok

**F1. táblázat** A gőzölési paraméterek hatása a színváltozásra

Fafaj	Mért jellemző	Variáció oka	Négyzet-összegek	Szabadság-fok	Átlagos négyzetösszegek	Számított F érték	p-érték P > F
Akác	L*	A-idő	3031,70	1	3031,70	267,33	< 0,0001
		B-hőmérséklet	2342,61	1	2342,61	206,57	< 0,0001
		AB	5,76	1	5,76	0,51	0,4773
		Véletlen hiba	1073,66	135	7,95		
		Teljes	6922,40	139			
	a*	A-idő	72,32	1	72,32	49,70	< 0,0001
		B-hőmérséklet	43,56	1	43,56	29,94	< 0,0001
		AB	112,46	1	112,46	77,29	< 0,0001
		Véletlen hiba	67,07	135	0,50		
		Teljes	426,23	139			
	b*	A-idő	3228,32	1	3228,32	459,15	< 0,0001
		B-hőmérséklet	646,33	1	646,33	91,93	< 0,0001
		AB	429,11	1	429,11	61,03	< 0,0001
		Véletlen hiba	527,15	135	3,90		
		Teljes	5259,99	139			
Merbau	L*	A-idő	39,35	1	39,35	10,54	0,0015
		B-hőmérséklet	259,61	1	259,61	69,54	< 0,0001
		AB	35,01	1	35,01	9,38	0,0026
		Véletlen hiba	485,86	135	3,60		
		Teljes	841,71	139			
	a*	A-idő	11,18	1	11,18	37,02	< 0,0001
		B-hőmérséklet	0,78	1	0,78	2,58	0,1107
		AB	0,74	1	0,74	2,44	0,1205
		Véletlen hiba	31,77	135	0,24		
		Teljes	53,76	139			
	b*	A-idő	77,80	1	77,80	30,04	< 0,0001
		B-hőmérséklet	10,40	1	10,40	4,02	0,0470
		AB	54,46	1	54,46	21,03	< 0,0001
		Véletlen hiba	313,46	135	2,32		
		Teljes	494,87	139			

Fafaj	Mért jellemző	Variáció oka	Négyzet-összegek	Szabadság-fok	Átlagos négyzetösszegek	Számított F érték	p-érték P > F
Sapupira	L*	A-idő	273,39	1	273,39	61,27	< 0,0001
		B-hőmérséklet	142,26	1	142,26	31,88	< 0,0001
		AB	112,14	1	112,14	25,13	< 0,0001
		Véletlen hiba	602,78	135	4,47		
		Teljes	1134,60	139			
	a*	A-idő	17,40	1	17,40	29,89	< 0,0001
		B-hőmérséklet	25,25	1	25,25	43,38	< 0,0001
		AB	0,31	1	0,31	0,53	0,4665
		Véletlen hiba	78,61	135	0,58		
		Teljes	122,11	139			
b*	A-idő	16,33	1	16,33	16,43	< 0,0001	
	B-hőmérséklet	3,56	1	3,56	3,58	0,0605	
	AB	7,94	1	7,94	7,99	0,0054	
	Véletlen hiba	126,77	135	0,94			
	Teljes	162,99	139				
Tölgy	L*	A-idő	5,13	1	5,13	0,31	0,5790
		B-hőmérséklet	804,02	1	804,02	48,53	< 0,0001
		AB	3,26	1	3,26	0,20	0,6582
		Véletlen hiba	1534,61	135	11,37		
		Teljes	3065,62	139			
	a*	A-idő	0,02	1	0,02	0,03	0,8608
		B-hőmérséklet	14,80	1	14,80	29,05	< 0,0001
		AB	2,36	1	2,36	4,62	0,0333
		Véletlen hiba	43,81	135	0,32		
		Teljes	86,47	139			
b*	A-idő	2,10	1	2,10	2,24	0,1364	
	B-hőmérséklet	18,36	1	18,36	19,60	< 0,0001	
	AB	5,13	1	5,13	5,48	0,0207	
	Véletlen hiba	87,11	135	0,65			
	Teljes	152,96	139				

**F2. táblázat** A gőzölési paraméterek hatása a színstabilitásra

Fafaj	Mért jellemző	Variáció oka	Négyzet-összegek	Szabadság-fok	Átlagos négyzetösszegek	Számított F érték	p-érték P > F
Alkác	L*	A-idő	2479,81	1	2479,81	305,84	< 0,0001
		B-hőmérséklet	850,90	1	850,90	104,94	< 0,0001
		AB	330,89	1	330,89	40,81	< 0,0001
		Véletlen hiba	712,34	135	5,28		
		Teljes	4764,32	139			
	a*	A-idő	17,02	1	17,02	14,91	0,0002
		B-hőmérséklet	46,23	1	46,23	40,51	< 0,0001
		AB	93,28	1	93,28	81,72	< 0,0001
		Véletlen hiba	139,94	135	1,04		
		Teljes	311,77	139			
	b*	A-idő	580,9653	1	580,9653	179,2104	< 0,0001
		B-hőmérséklet	724,3295	1	724,3295	223,4340	< 0,0001
		AB	0,0003	1	0,0003	0,0001	0,9922
		Véletlen hiba	408,09	135	3,02		
		Teljes	1746,181	139			
Merbau	L*	A-idő	170,06	1	170,06	51,02	< 0,0001
		B-hőmérséklet	122,26	1	122,26	36,68	< 0,0001
		AB	8,90	1	8,90	2,67	0,1048
		Véletlen hiba	419,95	125	3,36		
		Teljes	721,17	129			
	a*	A-idő	4,11	1	4,11	3,53	0,0626
		B-hőmérséklet	16,80	1	16,80	14,41	0,0002
		AB	45,16	1	45,16	38,73	< 0,0001
		Véletlen hiba	146,82	125	1,17		
		Teljes	212,99	129			
	b*	A-idő	10,43	1	10,43	3,87	0,0514
		B-hőmérséklet	48,57	1	48,57	18,02	< 0,0001
		AB	150,56	1	150,56	55,86	< 0,0001
		Véletlen hiba	326,38	125	2,61		
		Teljes	549,17	129			

Fafaj	Mért jellemző	Variáció oka	Négyzet-összegek	Szabadság-fok	Átlagos négyzetösszegek	Számított F érték	p-érték P > F
Sapupira	L*	A-idő	37,43	1	37,43	8,24	0,0048
		B-hőmérséklet	271,77	1	271,77	59,80	< 0,0001
		AB	11,56	1	11,56	2,54	0,1130
		Véletlen hiba	609,88	135	4,52		
		Teljes	938,87	139			
	a*	A-idő	70,81	1	70,81	68,76	< 0,0001
		B-hőmérséklet	39,25	1	39,25	38,11	< 0,0001
		AB	1,84	1	1,84	1,79	0,1831
		Véletlen hiba	136,20	135	1,01		
		Teljes	251,96	139			
	b*	A-idő	74,04	1	74,04	56,40	< 0,0001
		B-hőmérséklet	146,52	1	146,52	111,61	< 0,0001
		AB	2,21	1	2,21	1,68	0,1971
		Véletlen hiba	177,76	135	1,32		
		Teljes	401,31	139			
Tölgy	L*	A-idő	55,54	1	55,54	5,42	0,0214
		B-hőmérséklet	52,72	1	52,72	5,14	0,0249
		AB	1,73	1	1,73	0,17	0,6820
		Véletlen hiba	1081,64	135	8,01		
		Teljes	1504,01	139			
	a*	A-idő	1,68	1	1,68	12,09	0,0007
		B-hőmérséklet	11,33	1	11,33	81,76	< 0,0001
		AB	2,04	1	2,04	14,70	0,0002
		Véletlen hiba	18,46	135	0,14		
		Teljes	33,90	139			
b*	A-idő	8,75	1	8,75	8,40	0,0044	
	B-hőmérséklet	72,72	1	72,72	69,76	< 0,0001	
	AB	8,81	1	8,81	8,46	0,0043	
	Véletlen hiba	141,74	135	1,05			
	Teljes	232,06	139				

**F3. táblázat** A gőzölési paraméterek hatása a hajlítószilárdságra

Fafaj	Mért jellemző	Variáció oka	Négyzet-összegek	Szabadság-fok	Átlagos négyzetösszegek	Számított F érték	p-érték P > F
Akác	$\sigma_H$	A-idő	3553,2241	1	3553,2241	22,5404	< 0,0001
		B-hőmérséklet	6,7849	1	6,7849	0,0430	0,8370
		AB	1,0539	1	1,0539	0,0067	0,9354
		Véletlen hiba	4886,62	30	162,89		
		Teljes	8447,8405	34			
Merbau	$\sigma_H$	A-idő	902,7496	1	902,7496	37,3065	< 0,0001
		B-hőmérséklet	279,2720	1	279,2720	11,5410	0,0019
		AB	44,8821	1	44,8821	1,8548	0,1830
		Véletlen hiba	634,17	30	21,14		
		Teljes	1977,0478	34			
Sapupira	$\sigma_H$	A-idő	668,9066	1	668,9066	1,6062	0,2145
		B-hőmérséklet	66,0786	1	66,0786	0,1587	0,6931
		AB	291,5095	1	291,5095	0,7000	0,4092
		Véletlen hiba	12908,76	30	430,29		
		Teljes	13936,522	34			
Tölgy	$\sigma_H$	A-idő	1870,9187	1	1870,9187	17,5525	0,0002
		B-hőmérséklet	111,3305	1	111,3305	1,0445	0,3147
		AB	58,0368	1	58,0368	0,5445	0,4661
		Véletlen hiba	3145,09	30	104,84		
		Teljes	5344,5781	34			



**F4. táblázat** A gőzölési paraméterek hatása a keménységre

Fafaj	Mért jellemző	Variáció oka	Négyzet-összegek	Szabadság-fok	Átlagos négyzetösszegek	Számított F érték	p-érték P > F
Akác	H <sub>J</sub>	A-idő	38842527,22	1	38842527,22	26,66	< 0,0001
		B-hőmérséklet	5975300,02	1	5975300,02	4,10	0,0448
		AB	56409635,32	1	56409635,32	38,71	< 0,0001
		Véletlen hiba	188986007,29	135	1399896,35		
		Teljes	299403651,44	139			
Merbau	H <sub>J</sub>	A-idő	18161840,39	1	18161840,39	24,98	< 0,0001
		B-hőmérséklet	18087164,11	1	18087164,11	24,88	< 0,0001
		AB	14260564,96	1	14260564,96	19,62	< 0,0001
		Véletlen hiba	92311915,33	132	699332,69		
		Teljes	147197349,01	136			
Sapupira	H <sub>J</sub>	A-idő	26120427,12	1	26120427,12	47,33	< 0,0001
		B-hőmérséklet	1367549,81	1	1367549,81	2,48	0,1179
		AB	12864,71	1	12864,71	0,02	0,8789
		Véletlen hiba	50275312,51	130	386733,17		
		Teljes	100626737,36	134			
Tölgy	H <sub>J</sub>	A-idő	786814,26	1	786814,26	2,96	0,0874
		B-hőmérséklet	155277,13	1	155277,13	0,58	0,4457
		AB	3733477,99	1	3733477,99	14,06	0,0003
		Véletlen hiba	33952549,21	135	251500,36		
		Teljes	40784150,76	139			

**F5. táblázat** A gőzölési paraméterek hatása a víz és különböző fafelületek között kialakuló illeszkedési szögre

Fafaj	Mért jellemző	Variáció oka	Négyzet-összegek	Szabadság-fok	Átlagos négyzetösszegek	Számított F érték	p-érték P > F
Akác	⊖	A-idő	1827,33	1	1827,33	16,61	< 0,0001
		B-hőmérséklet	133,41	1	133,41	1,21	0,2717
		AB	4905,12	1	4905,12	44,60	< 0,0001
		Véletlen hiba	12247,32	275	44,54		
		Teljes	37222,01	279			
Merbau	⊖	A-idő	4715,85	1	4715,85	42,00	< 0,0001
		B-hőmérséklet	1773,56	1	1773,56	15,80	< 0,0001
		AB	862,58	1	862,58	7,68	0,0060
		Véletlen hiba	26535,85	275	96,49		
		Teljes	38338,19	279			
Sapupira	⊖	A-idő	7642,87	1	7642,87	105,55	< 0,0001
		B-hőmérséklet	5632,32	1	5632,32	77,78	< 0,0001
		AB	3072,13	1	3072,13	42,43	< 0,0001
		Véletlen hiba	15315,13	275	55,69		
		Teljes	36333,15	279			
Tölgy	⊖	A-idő	848,37	1	848,37	17,97	< 0,0001
		B-hőmérséklet	888,31	1	888,31	18,82	< 0,0001
		AB	18,91	1	18,91	0,40	0,5274
		Véletlen hiba	11701,50	275	42,55		
		Teljes	14784,80	279			

**F6. táblázat** A gőzölési paraméterek hatása a ragasztott felületek nyírószilárdságára

Fafaj	Mért jellemző	Variáció oka	Négyzet-összegek	Szabadság-fok	Átlagos négyzetösszegek	Számított F érték	p-érték P > F
Akác	$\tau$	A-idő	18,68	1	18,68	4,18	0,0409
		B-hőmérséklet	34,12	1	34,12	5,63	0,0254
		AB	0,32	1	0,32	0,05	0,8206
		Véletlen hiba	152,39	25	6,10		
		Teljes	219,89	29			
Merbau	$\tau$	A-idő	0,64	1	0,64	0,14	0,7088
		B-hőmérséklet	2,60	1	2,60	0,58	0,4557
		AB	2,10	1	2,10	0,47	0,5023
		Véletlen hiba	80,45	17	4,73		
		Teljes	87,38	21			
Sapupira	$\tau$	A-idő	1,83	1	1,83	0,22	0,6443
		B-hőmérséklet	0,39	1	0,39	0,05	0,8304
		AB	15,79	1	15,79	1,87	0,1808
		Véletlen hiba	208,78	30	6,96		
		Teljes	279,20	34			
Tölgy	$\tau$	A-idő	51,10	1	51,10	12,83	0,0007
		B-hőmérséklet	25,00	1	25,00	6,28	0,0149
		AB	17,85	1	17,85	4,48	0,0382
		Véletlen hiba	194,10	61	3,18		
		Teljes	352,35	65			

**F7. táblázat** A gőzölési paraméterek hatása az előzőleg vízben áztatott próbatestekből kialakított ragasztott felületek nyírószilárdságára

Fafaj	Mért jellemző	Variáció oka	Négyzet-összegek	Szabadság-fok	Átlagos négyzetösszegek	Számított F érték	p-érték P > F
Akác	$\tau$	A-idő	0,02	1	0,02	0,04	0,8437
		B-hőmérséklet	1,17	1	1,17	2,69	0,1167
		AB	1,61	1	1,61	3,69	0,0690
		Véletlen hiba	5,85	19	0,31		
		Teljes	10,84	23			
Merbau	$\tau$	A-idő	0,1776	1	0,1776	1,9082	0,1904
		B-hőmérséklet	0,0003	1	0,0003	0,0036	0,9529
		AB	0,3221	1	0,3221	3,4610	0,0856
		Véletlen hiba	1,21	12	0,10		
		Teljes	1,7561	16			
Sapupira	$\tau$	A-idő	1,7190	1	1,7190	2,5161	0,1239
		B-hőmérséklet	0,0031	1	0,0031	0,0045	0,9470
		AB	3,9274	1	3,9274	5,7486	0,0234
		Véletlen hiba	17,99	27	0,67		
		Teljes	24,4790	31			
Tölgy	$\tau$	A-idő	11,99	1	11,99	16,90	0,0001
		B-hőmérséklet	4,52	1	4,52	6,37	0,0142
		AB	12,05	1	12,05	16,99	0,0001
		Véletlen hiba	44,22	62	0,71		
		Teljes	72,69	66			

## A mért és számított jellemzők összefoglaló, leíró statisztikai táblázatai

**F8. táblázat** Hajlítószilárdság

Fafaj	Gőzölési paraméterek	Hajlítószilárdság [N/mm <sup>2</sup> ]				Mintaszám
		Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	
Akác	kezeletlen	155,83	187,82	166,40	12,63	5
	108°C, 3h	109,98	161,52	123,73	21,45	5
	108°C, 20h	83,68	116,57	98,76	11,78	5
	122°C, 3h	113,54	135,80	125,35	9,60	5
	122°C, 20h	95,45	104,86	99,47	3,54	5
	115°C, 7,5h	103,84	135,20	116,15	14,17	5
	115°C, 7,5h	96,98	137,31	119,74	15,86	5
	115°C, 7,5h	111,83	130,94	117,96	7,58	5
Merbau	kezeletlen	129,18	141,05	135,44	4,89	5
	108°C, 3h	117,78	130,32	123,94	5,00	5
	108°C, 20h	106,89	116,93	112,68	3,87	5
	122°C, 3h	114,06	124,15	119,47	4,06	5
	122°C, 20h	96,42	107,10	102,21	4,21	5
	115°C, 7,5h	114,15	123,12	118,88	3,35	5
	115°C, 7,5h	108,83	116,11	112,45	2,60	5
	115°C, 7,5h	105,68	115,56	110,91	4,66	5
Sapupira	kezeletlen	81,62	150,74	115,76	26,67	5
	108°C, 3h	70,40	142,56	97,58	29,24	5
	108°C, 20h	63,53	120,58	94,01	21,86	5
	122°C, 3h	90,78	137,31	108,85	19,06	5
	122°C, 20h	82,74	105,42	90,01	9,52	5
	115°C, 7,5h	77,67	119,74	100,90	19,56	5
	115°C, 7,5h	64,14	125,59	98,64	22,19	5
	115°C, 7,5h	59,54	117,34	100,00	23,72	5
Tölgy	kezeletlen	84,47	104,51	96,23	7,64	5
	92°C, 3h	63,76	83,27	73,86	8,30	5
	92°C, 20h	48,07	74,22	60,44	11,56	5
	108°C, 3h	62,68	87,36	72,55	9,74	5
	108°C, 20h	46,44	63,92	52,32	6,81	5
	100°C, 7,5h	63,43	92,87	76,73	11,33	5
	100°C, 7,5h	55,28	89,68	69,10	14,14	5
	100°C, 7,5h	65,00	87,98	73,96	8,77	5

**F9. táblázat** Janka oldalkeménység

Fafaj	Gőzölési paraméterek	Janka oldalkeménység [N/mm <sup>2</sup> ]				
		Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintaszám
Akác	kezeletlen	86,37	115,15	98,51	9,80	20
	108°C, 3h	51,73	76,98	66,95	6,56	20
	108°C, 20h	52,98	99,62	72,42	14,86	20
	122°C, 3h	64,70	97,05	78,27	11,63	20
	122°C, 20h	31,57	67,77	50,16	12,88	20
	115°C, 7,5h	63,45	92,67	80,59	10,77	20
	115°C, 7,5h	66,27	100,47	79,85	10,82	20
	115°C, 7,5h	54,82	75,11	64,60	5,25	20
Merbau	kezeletlen	83,52	112,99	97,63	9,17	20
	108°C, 3h	67,24	100,75	79,85	10,81	20
	108°C, 20h	47,03	85,68	63,64	11,33	20
	122°C, 3h	68,10	89,73	81,45	7,27	20
	122°C, 20h	69,32	91,45	81,60	5,59	20
	115°C, 7,5h	74,08	92,11	84,74	5,57	20
	115°C, 7,5h	62,16	97,80	80,89	9,74	20
	115°C, 7,5h	71,58	94,20	80,53	5,59	20
Sapupira	kezeletlen	59,71	89,89	69,62	8,77	20
	108°C, 3h	46,86	61,49	54,12	4,49	20
	108°C, 20h	41,02	53,24	47,75	3,42	20
	122°C, 3h	49,00	64,02	58,28	3,74	20
	122°C, 20h	40,90	70,64	49,98	7,35	20
	115°C, 7,5h	55,02	78,17	64,78	7,00	20
	115°C, 7,5h	50,64	82,65	61,17	7,45	20
	115°C, 7,5h	50,96	82,63	63,34	7,64	20
Tölgy	kezeletlen	53,27	64,25	57,14	2,84	20
	92°C, 3h	41,61	49,53	45,37	2,62	20
	92°C, 20h	33,78	41,19	38,19	1,80	20
	108°C, 3h	35,42	47,07	41,93	2,88	20
	108°C, 20h	38,78	49,17	43,39	3,18	20
	100°C, 7,5h	31,58	39,90	35,53	2,06	20
	100°C, 7,5h	44,01	58,95	49,38	3,27	20
	100°C, 7,5h	32,06	39,92	36,14	2,03	20

**F10. táblázat** Világosság (L\*)

Fafaj	Gőzölési paraméterek	Világosság (L*)				
		Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintas szám
Akác	kezeletlen	61,44	70,56	65,98	2,43	20
	108°C, 3h	64,13	74,43	69,65	3,63	20
	108°C, 20h	52,07	61,68	56,99	2,66	20
	122°C, 3h	53,91	65,93	59,36	3,94	20
	122°C, 20h	41,48	48,59	45,63	1,89	20
	115°C, 7,5h	54,06	64,14	58,35	2,51	20
	115°C, 7,5h	51,19	59,86	56,36	2,53	20
	115°C, 7,5h	54,16	58,99	56,73	1,46	20
Merbau	kezeletlen	45,31	50,89	48,50	1,83	20
	108°C, 3h	43,92	48,02	45,92	1,22	20
	108°C, 20h	42,93	47,20	45,59	1,05	20
	122°C, 3h	38,75	48,45	43,64	2,82	20
	122°C, 20h	38,11	42,00	40,67	1,19	20
	115°C, 7,5h	40,47	47,40	44,43	1,85	20
	115°C, 7,5h	41,05	48,27	43,99	1,44	20
	115°C, 7,5h	37,46	45,09	42,10	2,21	20
Sapupira	kezeletlen	52,73	59,14	55,47	1,79	20
	108°C, 3h	47,41	56,64	52,87	2,43	20
	108°C, 20h	48,97	54,01	51,58	1,46	20
	122°C, 3h	49,76	57,36	52,58	1,80	20
	122°C, 20h	42,05	50,68	46,54	2,50	20
	115°C, 7,5h	47,08	55,85	50,91	2,05	20
	115°C, 7,5h	45,49	55,79	51,24	2,52	20
	115°C, 7,5h	48,58	56,08	52,04	1,71	20
Tölgy	kezeletlen	51,02	60,09	56,28	2,39	20
	92°C, 3h	60,78	72,42	67,06	3,18	20
	92°C, 20h	61,05	71,88	66,19	3,13	20
	108°C, 3h	56,02	65,52	61,13	2,05	20
	108°C, 20h	57,29	61,99	59,44	1,56	20
	100°C, 7,5h	53,10	57,85	56,32	1,48	20
	100°C, 7,5h	61,23	65,39	64,30	1,19	20
	100°C, 7,5h	51,02	60,09	56,28	2,39	20

**F11. táblázat** Vörös színezet (a\*)

Fafaj	Gőzölési paraméterek	Vörös színezet (a*)				
		Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintaszám
Akác	kezeletlen	2,00	5,80	4,04	0,90	20
	108°C, 3h	3,52	6,09	4,85	0,87	20
	108°C, 20h	8,33	11,33	9,79	0,85	20
	122°C, 3h	7,34	9,85	8,69	0,78	20
	122°C, 20h	8,28	9,34	8,89	0,25	20
	115°C, 7,5h	8,44	11,18	9,95	0,74	20
	115°C, 7,5h	8,54	9,58	9,11	0,28	20
	115°C, 7,5h	8,61	10,55	9,42	0,62	20
Merbau	kezeletlen	16,82	18,66	17,58	0,50	20
	108°C, 3h	13,53	15,55	14,50	0,62	20
	108°C, 20h	13,69	15,34	14,17	0,35	20
	122°C, 3h	13,80	15,59	14,49	0,38	20
	122°C, 20h	12,90	15,23	13,78	0,58	20
	115°C, 7,5h	13,79	15,81	14,72	0,48	20
	115°C, 7,5h	14,21	15,46	14,86	0,33	20
	115°C, 7,5h	14,31	16,11	15,13	0,50	20
Sapupira	kezeletlen	15,06	17,07	16,22	0,62	20
	108°C, 3h	15,63	17,57	16,69	0,49	20
	108°C, 20h	14,92	16,85	15,88	0,65	20
	122°C, 3h	14,15	17,31	15,69	0,80	20
	122°C, 20h	13,34	16,38	14,63	0,82	20
	115°C, 7,5h	14,15	17,60	15,69	0,99	20
	115°C, 7,5h	14,10	17,82	15,97	0,84	20
	115°C, 7,5h	14,66	16,95	15,77	0,65	20
Tölgy	kezeletlen	7,64	9,02	8,40	0,38	20
	92°C, 3h	5,92	8,32	7,08	0,68	20
	92°C, 20h	6,24	8,11	7,09	0,57	20
	108°C, 3h	6,85	8,49	7,60	0,41	20
	108°C, 20h	7,74	9,23	8,30	0,39	20
	100°C, 7,5h	8,42	9,54	8,84	0,28	20
	100°C, 7,5h	7,23	8,38	7,57	0,26	20
	100°C, 7,5h	7,98	9,04	8,59	0,32	20



**F12. táblázat** Sárga színezet (b\*)

Fafaj	Gőzölési paraméterek	Sárga színezet (b*)				
		Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintaszám
Akác	kezeletlen	31,36	38,51	35,78	2,11	20
	108°C, 3h	27,44	37,54	32,36	3,31	20
	108°C, 20h	22,71	29,08	26,21	1,93	20
	122°C, 3h	29,72	33,14	31,30	0,95	20
	122°C, 20h	13,47	16,66	15,89	0,73	20
	115°C, 7,5h	28,96	33,91	31,95	1,62	20
	115°C, 7,5h	29,78	36,36	32,28	1,92	20
	115°C, 7,5h	30,92	37,27	33,81	1,80	20
Merbau	kezeletlen	29,89	35,50	33,29	1,55	20
	108°C, 3h	23,60	28,65	26,73	1,62	20
	108°C, 20h	25,34	30,60	26,91	1,19	20
	122°C, 3h	26,81	32,01	29,11	1,30	20
	122°C, 20h	24,24	27,58	25,98	1,12	20
	115°C, 7,5h	26,67	31,50	28,99	1,27	20
	115°C, 7,5h	26,52	31,83	29,21	1,30	20
	115°C, 7,5h	21,71	31,25	27,73	2,21	20
Sapupira	kezeletlen	28,14	30,89	29,53	0,58	20
	108°C, 3h	29,14	31,91	30,60	0,82	20
	108°C, 20h	30,22	33,39	31,90	0,79	20
	122°C, 3h	28,96	35,35	31,65	1,27	20
	122°C, 20h	29,89	33,42	31,70	0,99	20
	115°C, 7,5h	29,09	31,85	30,69	0,80	20
	115°C, 7,5h	28,77	33,16	30,81	1,12	20
	115°C, 7,5h	29,24	32,30	30,87	0,93	20
Tölgy	kezeletlen	23,72	25,82	24,93	0,67	20
	92°C, 3h	22,15	25,16	23,52	0,82	20
	92°C, 20h	22,30	25,59	23,75	0,91	20
	108°C, 3h	22,48	25,00	23,98	0,75	20
	108°C, 20h	23,99	26,57	25,21	0,69	20
	100°C, 7,5h	24,16	26,68	25,58	0,65	20
	100°C, 7,5h	23,52	25,05	24,40	0,47	20
	100°C, 7,5h	23,98	26,40	25,25	0,79	20

**F13. táblázat** UV fényvel besugárzott fafelületek világossága (L\*) egy hétig tartó kezelés után

Fafaj	Gőzölési paraméterek	Világosság egy hetes UV besugárzás után (L*)				
		Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintaszám
Akác	kezeletlen	46,21	55,22	51,23	2,73	20
	108°C, 3h	60,64	64,66	63,00	1,22	20
	108°C, 20h	43,15	51,56	46,99	2,70	20
	122°C, 3h	48,65	55,53	52,41	2,31	20
	122°C, 20h	41,39	49,81	44,54	2,55	20
	115°C, 7,5h	46,81	53,58	50,16	2,27	20
	115°C, 7,5h	46,34	55,67	51,70	2,50	20
	115°C, 7,5h	47,67	54,43	51,19	2,04	20
Merbau	kezeletlen	36,54	41,29	38,82	1,25	20
	108°C, 3h	36,63	42,00	38,21	1,11	20
	108°C, 20h	31,89	40,26	36,08	2,58	20
	122°C, 3h	33,46	40,58	36,40	2,18	20
	122°C, 20h	30,53	35,74	32,94	1,35	20
	115°C, 7,5h	33,76	39,99	37,50	1,61	20
	115°C, 7,5h	34,76	38,38	36,45	1,23	20
	115°C, 7,5h	32,69	38,77	35,71	1,63	20
Sapupira	kezeletlen	43,51	49,49	46,95	1,82	20
	108°C, 3h	43,07	50,97	47,15	2,10	20
	108°C, 20h	40,16	50,41	46,42	2,83	20
	122°C, 3h	35,86	45,92	44,23	2,16	20
	122°C, 20h	39,78	45,29	41,97	1,66	20
	115°C, 7,5h	41,18	47,33	45,44	1,69	20
	115°C, 7,5h	34,67	47,08	44,47	2,53	20
	115°C, 7,5h	42,09	48,20	44,43	1,52	20
Tölgy	kezeletlen	57,77	63,36	60,49	1,56	20
	92°C, 3h	55,35	59,69	57,10	1,33	20
	92°C, 20h	54,12	60,56	57,82	1,65	20
	108°C, 3h	52,73	57,59	55,77	1,19	20
	108°C, 20h	54,07	59,14	55,91	1,34	20
	100°C, 7,5h	49,15	53,19	51,01	1,33	20
	100°C, 7,5h	56,18	61,25	58,68	1,30	20
	100°C, 7,5h	48,26	52,33	50,48	1,22	20

**F14. táblázat** UV fényel besugárzott fafelületek vörös színezete (a\*) egy hétig tartó kezelés után

Vörös színezet egy hetes UV besugárzás után (a*)						
Fafaj	Gőzölési paraméterek	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintaság
Akác	kezeletlen	12,48	16,03	14,57	0,92	20
	108°C, 3h	9,06	12,33	10,65	0,75	20
	108°C, 20h	10,66	13,40	12,19	0,74	20
	122°C, 3h	10,30	12,45	11,29	0,63	20
	122°C, 20h	6,90	10,45	8,51	0,82	20
	115°C, 7,5h	10,07	13,85	12,34	0,96	20
	115°C, 7,5h	7,92	12,63	10,43	1,19	20
	115°C, 7,5h	9,99	13,36	11,76	0,92	20
Merbau	kezeletlen	16,61	19,70	17,99	0,93	20
	108°C, 3h	14,38	18,11	15,90	1,23	20
	108°C, 20h	14,04	19,15	16,95	1,64	20
	122°C, 3h	15,30	17,84	16,49	0,67	20
	122°C, 20h	13,08	16,35	14,53	0,82	20
	115°C, 7,5h	14,90	18,47	16,19	1,13	20
	115°C, 7,5h	14,42	16,96	16,06	0,78	20
	115°C, 7,5h	14,34	17,44	15,81	0,88	20
Sapupira	kezeletlen	15,58	17,13	16,38	0,47	20
	108°C, 3h	13,41	16,39	14,93	0,77	20
	108°C, 20h	12,13	15,68	13,56	1,09	20
	122°C, 3h	12,92	18,10	13,83	1,20	20
	122°C, 20h	11,04	12,93	11,86	0,51	20
	115°C, 7,5h	13,13	14,83	13,96	0,53	20
	115°C, 7,5h	12,84	19,48	14,62	1,48	20
	115°C, 7,5h	12,37	15,77	14,29	1,00	20
Tölgy	kezeletlen	9,61	11,25	10,30	0,50	20
	92°C, 3h	9,11	10,80	9,99	0,39	20
	92°C, 20h	8,50	10,33	9,44	0,43	20
	108°C, 3h	8,20	9,86	8,92	0,42	20
	108°C, 20h	8,39	9,54	9,00	0,32	20
	100°C, 7,5h	9,16	9,95	9,44	0,23	20
	100°C, 7,5h	8,44	9,84	9,33	0,36	20
	100°C, 7,5h	9,28	10,18	9,75	0,27	20

**F15. táblázat** UV fényvel besugárzott fafelületek sárga színezete (b\*) egy hétig tartó kezelés után

Sárga színezet egy hetes UV besugárzás után (b*)						
Fafaj	Gőzölési paraméterek	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintaszám
Akác	kezeletlen	26,57	37,99	31,85	3,12	20
	108°C, 3h	27,24	33,39	30,77	1,59	20
	108°C, 20h	22,43	28,50	25,25	1,71	20
	122°C, 3h	23,08	27,76	24,76	1,34	20
	122°C, 20h	16,39	21,47	19,22	1,27	20
	115°C, 7,5h	21,31	28,77	25,82	1,75	20
	115°C, 7,5h	20,01	29,12	24,56	2,44	20
	115°C, 7,5h	22,36	28,41	25,45	1,65	20
Merbau	kezeletlen	23,45	31,54	27,17	2,27	20
	108°C, 3h	21,07	28,46	24,51	2,04	20
	108°C, 20h	23,37	29,21	26,34	1,63	20
	122°C, 3h	22,65	28,31	25,70	1,45	20
	122°C, 20h	19,38	24,22	22,03	1,47	20
	115°C, 7,5h	20,89	26,67	24,23	1,80	20
	115°C, 7,5h	22,08	26,43	24,35	1,46	20
	115°C, 7,5h	21,32	26,77	24,04	1,35	20
Sapupira	kezeletlen	26,49	29,39	27,71	0,84	20
	108°C, 3h	24,05	28,46	26,64	1,14	20
	108°C, 20h	21,86	28,00	25,07	1,83	20
	122°C, 3h	23,05	26,65	24,26	0,78	20
	122°C, 20h	21,05	23,78	22,04	0,76	20
	115°C, 7,5h	23,85	26,40	24,93	0,64	20
	115°C, 7,5h	22,79	27,08	24,75	1,23	20
	115°C, 7,5h	22,48	26,97	24,69	1,26	20
Tölgy	kezeletlen	26,76	28,86	27,75	0,57	20
	92°C, 3h	27,91	31,03	29,48	0,83	20
	92°C, 20h	26,53	30,71	28,17	1,09	20
	108°C, 3h	25,53	29,46	26,91	1,00	20
	108°C, 20h	25,23	28,21	26,93	0,71	20
	100°C, 7,5h	26,03	28,55	27,01	0,71	20
	100°C, 7,5h	27,14	30,40	29,20	0,81	20
	100°C, 7,5h	26,76	28,86	27,75	0,57	20

**F16. táblázat** Fafelület és víz között kialakuló illeszkedési szög [ °]

Fafaj	Gőzölési paraméterek	Illeszkedési szög víz esetében [ °]				
		Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintasza
Akác	kezeletlen	23,4	43,4	33,9	5,0	40
	108°C, 3h	9,9	30,7	21,9	5,5	40
	108°C, 20h	26,1	60,2	45,7	10,3	40
	122°C, 3h	28,1	42,8	34,8	3,5	40
	122°C, 20h	23,6	46,7	36,4	6,3	40
	115°C, 7,5h	37,7	55,9	44,5	4,7	40
	115°C, 7,5h	40,5	63,5	52,5	6,9	40
	115°C, 7,5h	36,3	59,1	49,1	4,9	40
Merbau	kezeletlen	28,6	47,4	37,7	4,4	40
	108°C, 3h	34,9	70,6	51,9	11,0	40
	108°C, 20h	49,5	73,4	63,8	5,4	40
	122°C, 3h	19,6	66,7	49,9	9,0	40
	122°C, 20h	27,9	81,1	52,5	19,1	40
	115°C, 7,5h	34,3	53,8	44,4	4,9	40
	115°C, 7,5h	36,2	59,3	46,5	5,2	40
	115°C, 7,5h	32,9	53,4	42,3	4,9	40
Sapupira	kezeletlen	25,8	56,3	44,8	6,5	40
	108°C, 3h	37,3	56,1	47,8	5,1	40
	108°C, 20h	34,2	58,4	46,6	5,6	40
	122°C, 3h	13,4	40,2	25,9	6,7	40
	122°C, 20h	34,5	55,7	44,7	5,3	40
	115°C, 7,5h	48,4	71,6	58,5	6,3	40
	115°C, 7,5h	31,2	54,5	43,9	6,9	40
	115°C, 7,5h	37,2	69,5	54,4	7,8	40
Tölgy	kezeletlen	34,3	67,4	50,1	7,8	40
	92°C, 3h	25,6	44,6	36,4	4,3	40
	92°C, 20h	29,9	51,4	39,8	5,8	40
	108°C, 3h	28,6	60,6	43,8	7,1	40
	108°C, 20h	34,6	49,1	41,8	3,9	40
	100°C, 7,5h	19,3	55,4	36,3	9,6	40
	100°C, 7,5h	18,6	42,4	31,5	6,0	40
	100°C, 7,5h	20,2	48,5	37,8	5,6	40

**F17. táblázat** Ragasztott fafelületek nyírószilárdsága normálklímán tárolt próbatestek esetében [N/mm<sup>2</sup>]

Normálklímán tárolt, ragasztott próbatestek nyírószilárdsága [N/mm <sup>2</sup> ]						
Fafaj	Gőzölési paraméterek	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintaság
Akác	kezeletlen	11,25	13,78	12,86	0,97	10
	108°C, 3h	12,07	22,94	16,62	4,87	10
	108°C, 20h	12,40	16,60	14,50	2,97	10
	122°C, 3h	12,18	15,88	13,70	1,37	10
	122°C, 20h	10,57	11,28	10,81	0,40	10
	115°C, 7,5h	11,85	14,69	13,14	1,09	10
	115°C, 7,5h	11,46	15,86	13,56	1,71	10
	115°C, 7,5h	11,44	17,41	14,27	2,30	10
Merbau	kezeletlen	9,97	13,64	11,46	1,56	10
	108°C, 3h	9,09	12,98	10,45	2,20	10
	108°C, 20h	9,65	14,20	11,76	2,38	10
	122°C, 3h	9,42	11,21	10,31	1,27	10
	122°C, 20h	7,27	12,67	10,01	2,32	10
	115°C, 7,5h	10,25	13,39	12,03	1,61	10
	115°C, 7,5h	7,07	9,53	8,32	1,23	10
	115°C, 7,5h	10,62	12,94	11,68	1,17	10
Sapupira	kezeletlen	0,00	11,25	4,29	5,28	10
	108°C, 3h	4,13	12,30	8,09	3,47	10
	108°C, 20h	8,29	13,05	10,24	1,91	10
	122°C, 3h	5,79	12,81	9,59	2,65	10
	122°C, 20h	5,26	9,87	8,18	1,75	10
	115°C, 7,5h	7,72	12,97	9,90	2,08	10
	115°C, 7,5h	11,87	16,96	14,12	1,91	10
	115°C, 7,5h	8,72	14,10	11,90	1,95	10
Tölgy	kezeletlen	10,60	14,79	13,23	1,28	10
	92°C, 3h	7,36	10,77	8,95	0,94	10
	92°C, 20h	7,01	10,04	8,55	1,01	10
	108°C, 3h	6,15	12,66	8,69	1,91	10
	108°C, 20h	3,51	6,91	5,65	1,06	10
	100°C, 7,5h	7,01	11,67	8,91	1,43	10
	100°C, 7,5h	10,46	16,63	12,63	1,74	10
	100°C, 7,5h	7,84	10,72	9,01	0,77	10

**F18. táblázat** Ragasztott fafelületek nyírószilárdsága vízben áztatott próbatetek esetében [N/mm<sup>2</sup>]

Vízben áztatott, ragasztott próbatetek nyírószilárdsága [N/mm <sup>2</sup> ]						
Fafaj	Gőzölési paraméterek	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás	Mintaszám
Akác	kezeletlen	4,25	5,58	5,08	0,62	10
	108°C, 3h	2,53	4,79	3,94	1,01	10
	108°C, 20h	4,61	4,77	4,69	0,11	10
	122°C, 3h	3,66	4,49	4,05	0,34	10
	122°C, 20h	3,04	3,45	3,25	0,29	10
	115°C, 7,5h	2,81	4,20	3,33	0,62	10
	115°C, 7,5h	2,83	3,44	3,17	0,32	10
	115°C, 7,5h	2,74	3,98	3,37	0,51	10
Merbau	kezeletlen	3,66	5,37	4,56	0,70	10
	108°C, 3h	2,35	3,22	2,78	0,43	10
	108°C, 20h	2,92	3,82	3,37	0,45	10
	122°C, 3h	3,04	3,20	3,12	0,12	10
	122°C, 20h	2,97	3,06	3,01	0,05	10
	115°C, 7,5h	3,20	3,39	3,29	0,14	10
	115°C, 7,5h	2,61	2,75	2,68	0,10	10
	115°C, 7,5h	2,99	3,08	3,03	0,06	10
Sapupira	kezeletlen	1,23	2,96	2,11	0,87	10
	108°C, 3h	2,40	3,73	2,91	0,58	10
	108°C, 20h	2,08	3,37	2,74	0,46	10
	122°C, 3h	1,43	2,83	1,98	0,60	10
	122°C, 20h	3,22	4,15	3,71	0,48	10
	115°C, 7,5h	3,41	5,18	4,12	0,58	10
	115°C, 7,5h	2,04	3,91	2,80	0,59	10
	115°C, 7,5h	1,65	3,32	2,22	0,55	10
Tölgy	kezeletlen	4,22	6,44	5,18	0,63	10
	92°C, 3h	3,44	5,62	5,01	0,69	10
	92°C, 20h	3,77	5,60	5,00	0,57	10
	108°C, 3h	4,22	6,95	5,46	0,90	10
	108°C, 20h	2,05	3,88	3,16	0,56	10
	100°C, 7,5h	2,85	6,52	4,75	1,30	10
	100°C, 7,5h	2,83	5,98	4,43	0,99	10
	100°C, 7,5h	4,31	5,95	5,09	0,49	10