BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR

PhD tézisek

(tanszéki vitára)

Kötött és kötetlen gabonaszár-halmazok hőtechnikai viselkedésének laboratóriumi vizsgálata és modellezése

CSANÁDY DÁNIEL
okl. építőmérnök

tudományos vezető:
DR. FENYVESI OLIVÉR
PhD, egyetemi docens

Budapest, 2022

1. A KUTATÁSI FELADAT RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA, MOTIVÁCIÓJA ÉS TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEI

Jelenleg az építőanyag-kutatás egyik legfontosabb célkitűzése, hogy csökkentse az építőanyagok előállítási energia- és nyersanyagigényét, majd az élettartam végén a keletkező hulladék mennyiséget megőrizve a megfelelő minőséget. Ehhez egy megoldást kínál, ha melléktermékeket, ipari vagy mezőgazdasági másodnyersanyagot használunk. Nagyságrendileg hatékonyabb a természetes eredetű melléktermék (hulladék, másodnyersanyag) használata, ami csak kis mértékben igényel további feldolgozást. Például a növényi melléktermékek, gabonafélék, elérhetősége mindig biztosított, mivel az élelmiszerellátás miatt szükségszerűen meg kell termelni a gabonát, aminek a szára nagy mennyiségben rendelkezésre álló, hőszigetelési célra hasznosítható mezőgazdasági melléktermék [1].

Napjainkban az energiafelhasználás 30-40%-át fűtés-hűtésre fordítjuk [2], ennek csökkentése kulcsfontosságú feladat, amihez a homlokzatok megfelelő hőszigetelése hatékonyan képes hozzájárulni. A legelterjedtebb hőszigetelő anyagok szerves műanyag habok és szerves kötőanyaggal összeragasztott, szervetlen szárakból álló kompozitok [3][4], amik jó műszaki paraméterekkel rendelkeznek, de nyersanyagigényük, gyártási energiafelhasználásuk nagy [5], vagy újrahasznosításuk korlátozottan lehetséges [6]. Az elérhető környezetbarát alternatívák drágák vagy anyagjellemzőik nem versenyképesek, illetve csak névleg környezetkímélők.

A felvetett problémákra megoldás lehet egy gabonaszár alapú hőszigetelő anyag létrehozása. A szalmát természetes porózus anyagszerkezete alkalmassá teszi erre, ezért már alkalmazzák természetes állapotában, szalmabála-házakban [7][8], illetve előregyártott paneles könnyűszerkezetekben [9][10]. A panelos vagy bálás szerkezeteken végzett vizsgálatok alapján belátható, hogy a természetes szalma csak nagy szerkezeti vastagságban tud megfelelő mértékben hőszigetelni, ellenben jól szabályozza a belső terek páraháztartását [11], megfelelő testsűrűség mellett kiváló hangelnyelő [12], illetve kiegyenlíti a külső és belső terek közti páratartalom ingadozást [8][13]. Szalmaházak megfelelő kivitelezéséről, mechanikai viselkedéséről továbbá hő és páratechnikai tulajdonságairól nagy mennyiségű szakirodalom áll rendelkezésre, ellenben mesterségesen módosított szárak/szárhalmazok viselkedését már jóval kevesebb kutatás vizsgálja. Jelenleg Közép-Európa és ezen belül Magyarország lakásállománya [14][15] energetikailag korszerűtlen, aminek korszerűsítésére nagy az igény és ezt minél nagyobb részben célszerű fenntartható hőszigetelő anyaggal megoldani. Kisméretű szalmabálák alkalmazása felmerülhet, de a rögzítési, fellazulási, tető túlnyúlási, illetve (vakolat) tapadási [16] problémák csak igen nagy körültekintéssel kezelhetőek, ez utóbbi probléma szalmatörek/-szár-polimer-kompozitok fejlesztésével kapcsolatban is fellelhető [17]. A tapadási problémák legelterjedtebb és ipari léptékben is alkalmazható megoldásai általában nagyobb mértékben roncsolják a szárak [18][19] szerkezetét,

ezzel nagy mértékben csökkentik a szárak porozitását (pl. ásványosítás), így a hőszigetelő képességet is rontják. A természetes állapotú szárakat körültekintően kell védeni a környezeti hatásoktól, elsősorban a nedvességtől a szerkezet átgondolt tervezésével, mert a bennük található gombaspórák aktívvá válhatnak és továbbterjedhetnek, ami ronthatja a szerkezet és a belső élettér minőségét [20][21]. A szárak ragasztott formában történő táblásítása megoldás lehet az alkalmazási és a tartóssági problémákra, mert a kötőanyag merevséget ad a szárhalmaznak, továbbá védi azt a környezeti hatásokkal szemben. A fellelhető kutatásokban alkalmazott kötőanyagok nem felelnek meg az összes kritériumnak, ami táblásított természetes szárak alkalmazása esetén szükséges. Egy részük megfelelő védelmet nyújt a környezeti és a mechanikai hatásokkal szemben, viszont nagy mennyiségű alkalmazásuk jelentősen növeli a hővezetést, és rontja a fenntarthatóságot (pl.: cement, mész) [22][23]. Más részük a mechanikai és hőtechnikai kritériumokat kielégíti, de nagymértékben romlik a tűzállóság és a fenntarthatóság (pl. műgyanták) [24][25]. Azok az anyagok amik valóban fenntarthatóak és hővezetési, mechanikai szempontból is megfelelőek általában rossz tűz, illetve vízállósággal rendelkeznek (pl.: keményítő, enyv, kazein) [26][27][28]. Egy minden kritériumot kielégítő kötőanyag megalkotása jelentősen előremozdíthatja a természetes hőszigetelések terjedését. Mivel ezen hőszigetelések alkalmazása nem terjedt még el, ezért a bennük lezajló hőtranszport folyamatok modellezése sincsen kellőképpen kidolgozva. Azonban egyéb mesterséges száras [29][30][31] és hab hőszigetelések [32][33] modellezése fejlett és megfelelő szakirodalmi háttérrel rendelkezik, amelyekből felépíthető egy szalma alapú hőszigetelés modellezése.

A környezetbarát szigetelések széles körű elterjedését akadályozza a kellő mennyiségű kutatási ismeretanyag hiánya, a társadalom bizalmatlansága, illetve a tapasztalat hiánya, ami az előző két okból ered. Értekezésem elkészítése során a fenti hiányterületet kutattam.

2. AZ ÉRTEKEZÉS CÉLKITŰZÉSEI

A természetes szárakból készített szigetelőanyagokkal foglalkozó tudományos munkák a kutatásom kezdetén még számukban és többnyire mélységükben elmaradtak az egyéb mesterséges szigetelőanyagokkal foglalkozó tanulmányoktól. Ez általánosan elmondható a fenntartható vagy környezetbarát építőanyagokról. A fejlesztések túlnyomó része kimerült a természetes szalmabálák alkalmazásában szalmaházakban vagy utólagos szigetelésként, néhány esetben a szárak valamely, már ismert, a piacon elérhető kötőanyaggal való keverésében majd a formázásában. Különböző gabonaszárak hőtechnikai tulajdonságaival kapcsolatban többnyire csak a természetes (nem kezelt) állapotú szárak adatai állnak rendelkezésre. Ezek az eredmények jelentős mértékben szórnak az anyagszerkezetet jelentősen befolyásoló tényezők nagy száma miatt (fajta, csapadékmennyiség, napsütéses órák száma, talajminőség, stb.), tehát a szórást okozó környezeti tényezők ismertek, de az, hogy a kialakult anyagszerkezet és a hővezetés között mi az összefüggés feltáratlanul maradnak. Ugyanazon gabonaszárakat kötetlen vagy kötött állapotban vizsgálják, ritka mindkét állapot

elemzése egy tanulmányon belül, így kevés információ áll rendelkezésre a kötőanyagok szárhalmazok hővezetésére gyakorolt hatásáról. Kutatásom alapvető célja feltérképezni, hogy a szalma tulajdonságai javíthatók-e mesterséges beavatkozással, hordoz-e ez az anyag magában tartalékokat, amivel hővezetése csökkenthető és ha igen, milyen okok állnak a jelenség mögött. Milyen szár-, anyagszerkezeti módosítás alkalmazható mikro- és makroszinten, amivel elérheti a mai igényeket kielégítő szigetelési teljesítményt egy kötött szalmaszár-halmaz, ezzel csökkentve a környezetterhelést.

A természetes gabonaszárak táblásítása szintén egy megoldandó probléma. Ennek fő oka a gabonaszárak felületén található, tapadást gátló réteg (viaszok és felület lipidek, nagyon összetett keverékei, elemei a hosszú láncú alkánok, elágazó láncú alkánok, alkének, a zsírsavak és primer alkoholok, aldehidek, ketonok stb.) [34] és a kötőanyag zsugorodása. Tehát fontos részt képez a megfelelő kötőanyag kiválasztása, fejlesztése. A szárak és a kötőanyag közti tapadás javítási lehetőségeinek feltárása, a kompozit anyag mechanikai viselkedésének javítása és a hatásmechanizmusok megfejtése.

Mivel a mesterséges hőszigetelő anyagok hőtranszport folyamatainak modellezéséről nagyobb mennyiségű szakirodalom áll rendelkezésre, egy hasonló modell megalkotása a gabonaszár alapú szigetelések fejlődését is nagyban segítheti.

Az értekezés céljai a következők:

I. ***Természetes állapotú*** *gabonaszár halmazok* ***hővezetési tényezőjének vizsgálata a halmazsűrűség függvényében*** *kötetlen állapotban. A halmazok* ***mikro- és makroszerkezeti jellemzői alapján*** *az összefüggést leíró* ***modell paramétereinek meghatározása*** *és a modell validálása laboratóriumi mérésekkel.*

II. *Megállapítani a* ***kötőanyag*** *milyen hatást gyakorol a szárhalmazok* ***hővezetési tényező-halmazsűrűség*** *összefüggésére.* ***Optimális halmazsűrűség****(ek) keresése illetve a hővezetési tényező optimum érték(ek)* ***anyagszerkezeti alapú*** *indoklása.*

III. *A* ***szárak és a kötőanyag közti tapadás*** *vizsgálata szárfelület kezelés és szárítási metódus függvényében, a hatásmechanizmusok feltárása. A* ***kompozit anyag mechanikai viselkedésének, nyomószilárdságának javítása****.*

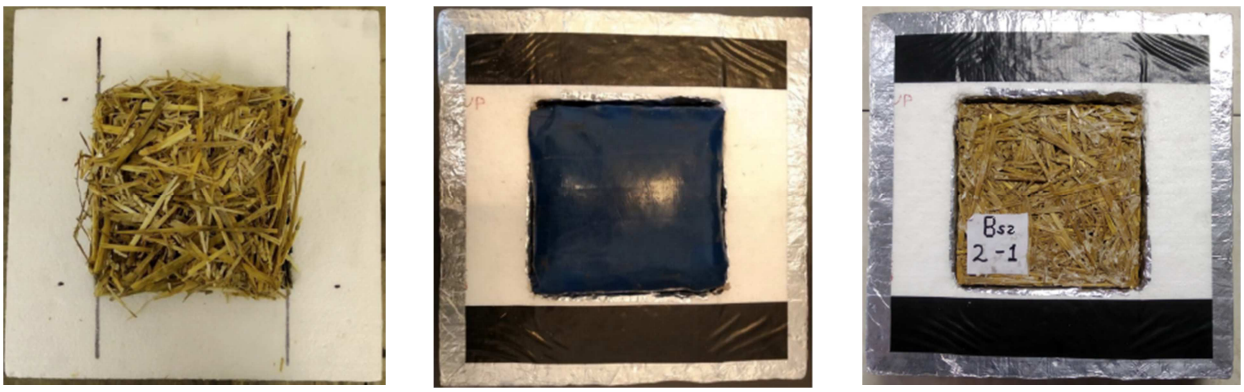
IV. *A* ***szárak mikroszintű módosítása*** *szárkezelésekkel (kémiai, fizikai, vegyes) milyen hatással van a szárhalmazok* ***hővezetési tényezőjére****, illetve milyen kezelési ciklusszám és kezelőoldat alkalmazása adja a legkedvezőbb eredményeket. Célom feltárni, hogy a modifikációk milyen hatásmechanizmussal befolyásolják a vizsgált hővezetést.*

V. ***Szilikát*** *(vízüveg) alapú* ***kötőanyag vízzel szembeni ellenállásának*** *vizsgálata az idő és az* ***alkalmazott modifikáló szerek*** *függvényében. Feltárni, hogy a modifikáló szerek milyen anyagszerkezei változást okoznak, amelyek hatással lehetnek az oldhatóságra.*

3. KUTATÁSI MÓDSZERTAN

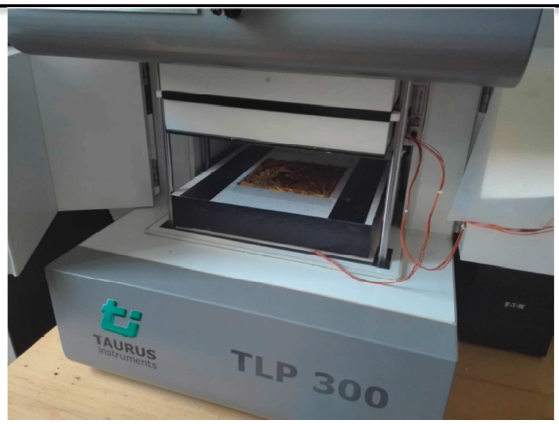
3.1 Halmazsűrűség, porozitás és hővezetési tényező összefüggései, modellalkotás

A halmazsűrűség függő hővezetési tényező meghatározásához két típusú szalmát (árpa, búza) és két állapotú (kötetlen, kötött) szárhalmazt használtam. Mindkét állapotban és mindkét típusnál 80-180 kg/m^3-es tartományban vizsgáltam a halmazsűrűség-hővezetési tényező összefüggését. Minden esetben 150×150×50 mm-es próbatesteket alkalmaztam, 300×300×50 mm-es ESP hab kalodába helyezve *(T1. ábra)*. A kötetlen szárhalmazokat egy vékonyfalú, perforált felületű fólia „dobozba" töltve, a kötött szárhalmazokat közvetlen módon tettem a kalodába. A próbatesteket 80 °C-on tömegállandóságig szárítottam, majd ebben a kiindulási állapotban végeztem a méréseket segédfűtőlapos és hőárammérős eljárással az MSZ EN 12667 szabvány szerint (a bemutatott hővezetési tényezők 10 °C-os középhőmérséklethez tartoznak) *(T2. **ábra**)*. A szalma típusok porozitását laboratóriumi, hagyományos test- (archimedesi) és anyagsűrűség (piknométerrel) mérési módszerrel határoztam meg. Fontos tapasztalat volt, hogy természetes gabonaszárak térfogatának meghatározása során korrekciókat kell bevezetni a szár duzzadása és a méréstechnika sajátosságai miatt. Ezután a szár porozitásának és a pórusrendszer sajátosságainak vizsgálatát egy képelemzési módszerrel is elvégeztem, aminek során közel sérülésmentes keresztmetszeti képeket készítettem pásztázó elektronmikroszkóppal mindkét szalmatípusról. A képek kiértékelése rengeteg többletinformációt tartalmazott. Az itt kapott adatokat is felhasználtam a későbbi modellalkotáshoz. A szalma alapanyag anyagtulajdonságainak természetes varianciája miatt Outlier analízist végeztem a mérési eredmények kiértékelése előtt.



(a) **(b)** **(c)**

T1. ábra: (a)-(b) A mérésekhez alkalmazott kötetlen és (c) kötött próbatestek EPS kalodába helyezve



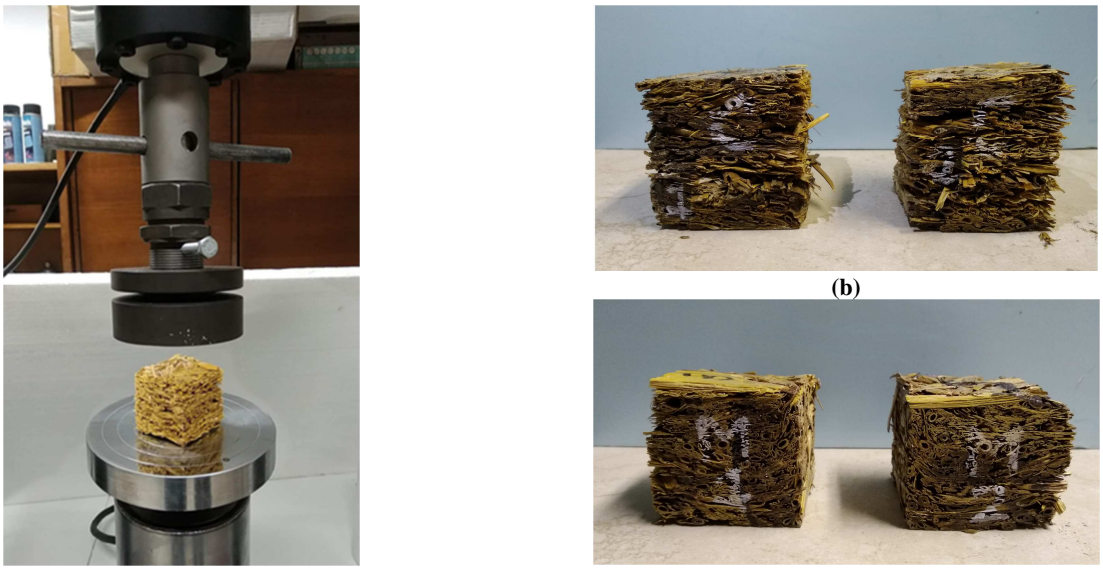
T2. ábra: Szárhalmaz hővezetésének mérése peremvédett segédfűtőlapos eljárással

A modellalkotás során a természetes szárak hővezetésének és halmazsűrűségének fizikai paramétereken alapuló összefüggését vizsgáltam. A modell beállításának alapjául a két szalmatípus kísérleti úton megállapított hővezetés-testsűrűség görbéi szolgáltak. Az első típusú (továbbiakban árpa) szalma kísérleti eredményei alapján határoztam meg a modell paramétereit, majd a második típusú (továbbiakban búza) szalma eredményeivel validáltam a modellt. A modell szerkezeti illetve elméleti felépítésének alapjai már létező és publikált száras illetve porózus anyagokra vonatkozó fizikai modellek voltak, melyeket részben összevontam, részben kiegészítettem és új paramétereket vezettem be. A korrigált modellek így jól követték a gabonaszár halmazok egyszerre száras és porózus jellegét. A paraméterek beállításához egyéb kísérleti úton megállapított anyagjellemzőkre is szükség volt, mint például porozitás, halmaz-, test- és anyagsűrűség, cellulóztartalom, szárak átmérője és falvastagsága. Azon paramétereket, amelyek az anyag elemi összetevőire vonatkoznak, nem a szár szerkezetétől függenek vagy mérésükre nem volt lehetőség, szakirodalmi adatok alapján állapítottam meg.

3.2 A szárak és a kötőanyag közti tapadás vizsgálata

Hőszigetelések esetén a legfontosabb mechanikai jellemző a nyomószilárdság, mivel a lépésállósági kritériumot ez alapján állapítjuk meg. Ezért a szárak és az kötőanyag közti tapadás minőségének jellemzésére nyomószilárdsági vizsgálatokat végeztem. A próbatesteket 150×150×50 mm-es méretben állítottam elő, majd ezekből vágtam ki a szabványos vizsgálatokhoz szükséges 50×50×50 mm-es próbatesteket, amelyeken a nyomószilárdsági vizsgálatot a MSZ EN 826 szabvány szerint végeztem el *(T3. ábra)*. A kísérletek során a próbatesteket két nagy csoportra osztottam, a konvencionálisan (kényszeráramú szárítószekrény) és a mikrohullámú technológiával szárított próbatestekre, alapvetően e két szárítási metódus hatásának a különbségét kívántam megállapítani. A két főcsoport további két, egymástól jelentősen eltérő szár-kötőanyag arányú keverék alcsoportot tartalmazott, melyekből mindegyiket az említett két módon szárítottam ki. Az első keveréknél árpaszalmát használtam fel természetes szárhosszeloszlással és kezezés

alkalmazása nélkül, az kötőanyag tiszta káliumszilikát volt. A második keveréknél búzaszalmát használtam fel beállított szárhosszal és kezelés alkalmazásával egy kukoricakeményítővel modifikált mátrix-szal. A szabványos 50×50×50 mm-es próbatesteket tömegállandóságig szárítottam, figyelembe véve, hogy a próbatesteket ért maximális hőmérséklet megegyezzen, a méréseket a laborlevegőre visszahűtött állapotban végeztem el. A szilárdsági eltérések okait optikai mikroszkópiával, továbbá az eltérő szárítási technológiák sajátosságait figyelembe véve tártam fel.



T3. ábra: (a) Nyomószilárdság vizsgálat, Az alkalmazott próbatestek (b) konvencionálisan szárított, (c) mikrohullámmal szárított

3.3 A szárkezelés hatása a hővezetési tényezőre

A szárkezelések mikroszerkezetre és így a hővezetésre gyakorolt hatását vizsgáltam. A szárak hővezetésének mérését 80 kg/m^3 halmazsűrűség mellett, öt eltérő állapotban végeztem el (természetes, négy fajta kezelés). Itt a kezelések nedves hőkezelések voltak eltérő pH értékű oldatokban, azonos szár-kezelőoldat tömegarány, hőmérséklet és kezelési idő mellett. A szalmát egy vékony géz rétegbe csomagoltam (ez biztosította a szárak elrendeződésének állandóságát, ezzel a struktúra változásból adódó hatásokat kizártam), tömegállandósságig szárítottam, majd 150×150×20 mm-es vékonyfalú papírdobozba helyeztem és megmértem a halmaz hővezetését kezelés előtt és után. Ezek hatását mindkét alkalmazott szalmatípus esetén segédfűtőlapos és hőárammérős eljárással az MSZ EN 12667 szabvány szerint vizsgáltam *(T4. ábra).* A hővezetést legnagyobb mértékben redukáló kezelést kiválasztottam további vizsgálatok céljára.

(a) **(b)** **(c)**

T4. ábra: (a) A kezelések hővezetésre gyakorolt hatásának mérése papírdobozba töltve és kalodába helyezve. (b)-(c) A szárak pórusszerkezetének vizsgálatához használt minták magas pH értékű oldatban való kezelés előtt és után

(a) **(b)**

T5. ábra: (a) Kötetlen szárhalmaz hővezetésének mérése mérődobozban és (b) kötött szárhalmaz hővezetésének mérése felületi szenzorral

Ezt követően egy hordozható, hőárammérős felületi szenzorral vizsgáltam tovább a kiválasztott (hővezetést leghatékonyabban csökkentő) kezelés ciklusszámának hatását a kötött és kötetlen szárhalmazokon *(T5. ábra)*. Ennek köszönhetően nagyobb számú próbatestet vizsgálhattam és összehasonlíthatóvá váltak a két mérési módszerrel kapott eredmények. A kezelések ciklusszámát három ciklusban maximalizáltam. A kezeléseket és méréseket a természetes állapotú szárhalmazhoz tartozó, állandó halmazsűrűség, illetve állandó származennyiség mellett is elvégeztem mindkét típusú szalmán. A kötetlen állapotú szárhalmazokat egy 150×150×50 mm-es belső méretű, erre a célra kialakított dobozban mértem, a kötött próbatestek paraméterei megegyeztek a korábbiakkal. Ez az összehasonlítás megmutatja, hogy a korábban természetes szárak vizsgálata során kiválasztott optimális (legkisebb hővezetésű) értéket kezelt szárak esetén a halmazsűrűség jellemzi-e jobban vagy a származennyiség, tehát melyik paramétert célszerű fixen tartani. A kötetlen és kötött szárhalmazok kezelésének a hővezetésre gyakorolt hatását 120±2 kg/m^3 névleges halmazsűrűség mellett vizsgáltam. Így összehasonlíthatóak a kötött és kötetlen két szalmatípus eredményei kezelt és természetes próbatestek esetén is. A méréseket tömegállandóságig szárított mintákon végeztem. A tulajdonságok változásának okát a pórusszerkezet alakulásában, a tömegveszteségben és a kioldódó

anyagokban kerestem, minden ciklus után pásztázó elektronmikroszkóppal térképeztem fel, majd detektáltam a pórusrendszer változásait *(T5. ábra)*.

A szárhalmazok hőkezelését kötetlen állapotban nem csak nedves, hanem száraz (levegővel töltött, tehát oxidatív) közegben is elvégeztem. A szárhalmazokat 60 °C-on tömegállandóságig szárított állapotban helyeztem a fa mérődobozba majd felületi szenzorral mértem meg a hővezetést 120±2 kg/m^3 halmazsűrűség mellett. Ezt követően a szárhalmazt a mérődobozzal együtt helyeztem a szárítószekrénybe 24 órára 90 °C, 120 °C, 150 °C és 180 °C-ra. A kezelés után a mérődobozt és halmazokat egy hőálló fóliában hűtöttem 20 °C-ra majd ebből kivéve klímaszobában azonos ideig kondicionáltam. A halmazok hővezetési tényezőjét mindegyik kezelési ciklus után megmértem. A kezeléseket és méréseket mindkét típusú szalmán elvégeztem. A tulajdonságok változásának okát egyrészt a pórus- és anyagszerkezet változásaiban kerestem elektronmikroszkópos képalkotással, illetve elemanalízissel. Emellett mértem a szárhalmazok tömegveszteségét és szemrevételeztem a színváltozását minden kezelési hőmérsékleten és elvégeztem a szalmatípusok derivatográfos vizsgálatait is *(T6. ábra)*.

T6. ábra: A szárak színének megváltozása a hőkezelés hatására (60-180°C)

Kísérleteim során mindkét típusú szalmán vizsgáltam a szárhossz megváltoztatásának hatását. A szalmát adott szárhossz mellett egy 300×300×20 mm-es, vékonyfalú papírtálcába töltöttem *(T7. ábra)*. Mindkét szalmatípus esetén két kiinduló hosszt alkalmaztam 80 és 60 mm-t. A szárhalmazok hővezetését megmértem majd az adott szárhalmaz elemeit fele hosszúságúra vágtam és újramértem, így adott méréssorozaton belül részben kiejthető volt a természetes anyag tulajdonságainak szórása és csak egy paraméter változott. Az alkalmazott módszer hatására a 80, 40, 20, 10 és a 60, 30 mm szárhossz sorozatok melletti hővezetéseket mértem. A méréseket 60 °C-on tömegállandóságig szárított mintákon végeztem.

(a) **(b)** **(c)**

T7. ábra: (a) A mérődoboz méretei, (b) a mérődobozba töltött definiált hosszúságú szárak, (c) szárhalmaz hővezetési tényezőjének mérése

3.4 A kötőanyag vizsgálata

Az ágyazó mátrix vízzel szembeni ellenállását két szilikátalapú kötőanyagon vizsgáltam kiindulásként, nátrium- és káliumszilikátot, ismertebb nevükön vízüveget (továbbiakban kötőanyag). Ezeket az alap kötőanyagokat modifikáltam hulladéküveggel (csomagolási és laborüveg), illetve savakkal, lúgokkal. A disszertációban a hulladéküveg hatását mutatom be részletesen. Minden méréssorozatot n×3×2 darab (alap és modifikált kötőanyag párok) párhuzamos méréssel végeztem el, melyek során a mintapárokban a beadagolt tiszta nedves kötőanyag közelítőleg megegyezett, a modifikálószer ezen felül került bele. Az oldódási veszteség mérésekor a kiegészítő anyag tömegét nem vettem figyelembe, így a tiszta és modifikált minta összehasonlítható. A mintákat 100 °C-on tömegállandóságig szárítottam, majd két napig laborlevegőn pihentettem. Minden mintasorozatot öt órás ciklusokban oldottam azonos tömegarányú desztillált vízben (ami az oldás tisztasága szempontjából kedvező, mert nem tartalmaz oldott anyagokat), majd ismételt tömegállandóságig szárítás után visszamértem a tömeget. Ezt a folyamatot a minták integritásának megszűnéséig vagy maximum öt ciklusig ismételtem *(T8. ábra)*. A különböző összetételű minták anyagszerkezetének időbeli változását pásztázó elektronmikroszkóp alatt vizsgáltam úgy, hogy ugyanazon mintákról azonos szenzorpozícióban (időben előre haladva) készítettem felvételeket. A tiszta és modifikált kötőanyagok felületi struktúrájának eltérését egyértelműen érzékelni lehetett, amiből következtetni lehet a vízzel szembeni eltérő viselkedés okára.

(a) **(b)**

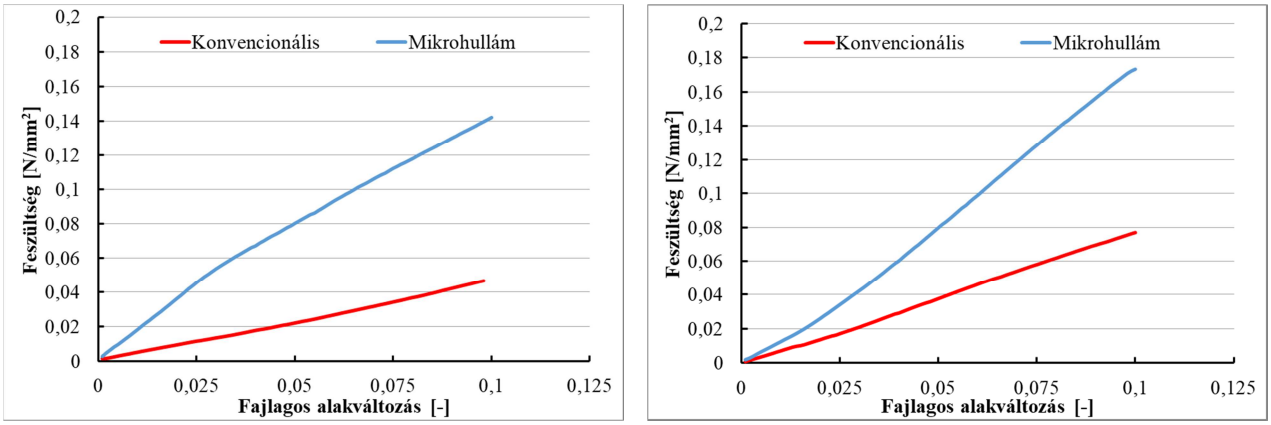
T8. ábra: (a) A szilikát kötőanyag minták oldási kísérlete (b) Az üvegpor adalékos próbatestek megtartják integritásukat három oldási ciklus után

4. AZ ÉRTEKEZÉS ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI

A vastagon szedett szövegrészek ismertetik az új tudományos megállapításokat, a nem vastagon szedettek azok tárgykörének bevezetését, illetve értelmezését adják.

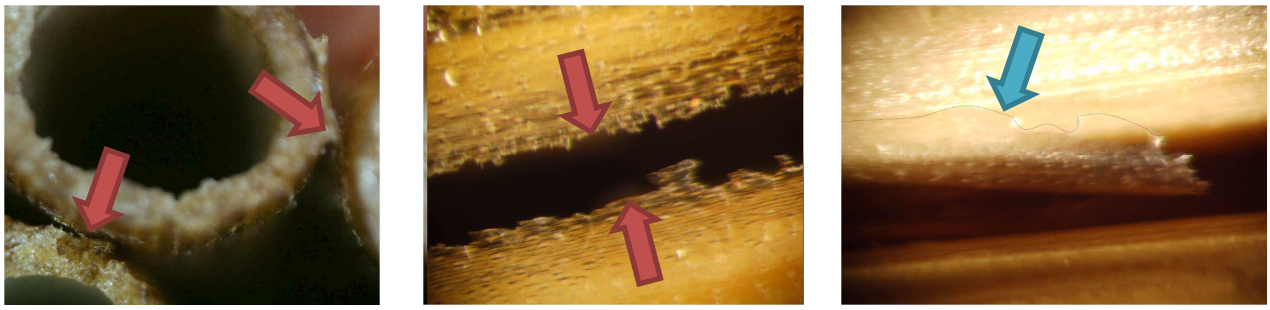
1. tézis: Szilikát kötőanyagú gabonaszár- kompozitok nyomószilárdsága [CsD 1]

Kísérletileg igazoltam, hogy természetes állapotú vagy kezelt gabonaszárakból és tiszta, vagy modifikált káliumszilikát kötőanyagból álló szárkompozit nyomószilárdsága azonos összetétel mellett növekszik, ha a frissen kevert és zsaluzatba bedolgozott, nedves kompozit nedvességtartalmát konvencionális módszer helyett mikrohullámú szárítással redukáljuk nullához közelítő nedvességtartalom értékre *(T9. ábra.-T11. ábra)*.



(a) **(b)**

T9. ábra: Konvencionális és mikrohullámú technológiával szárított szilikát-szárkompozit próbatestek nyomószilárdsága. (a) Természetes állapotú szár tiszta káliumszilikát, (b) kezelt szár modifikált káliumszilikát, (minden görbe 9 próbatest mérési eredményének az átlaga)

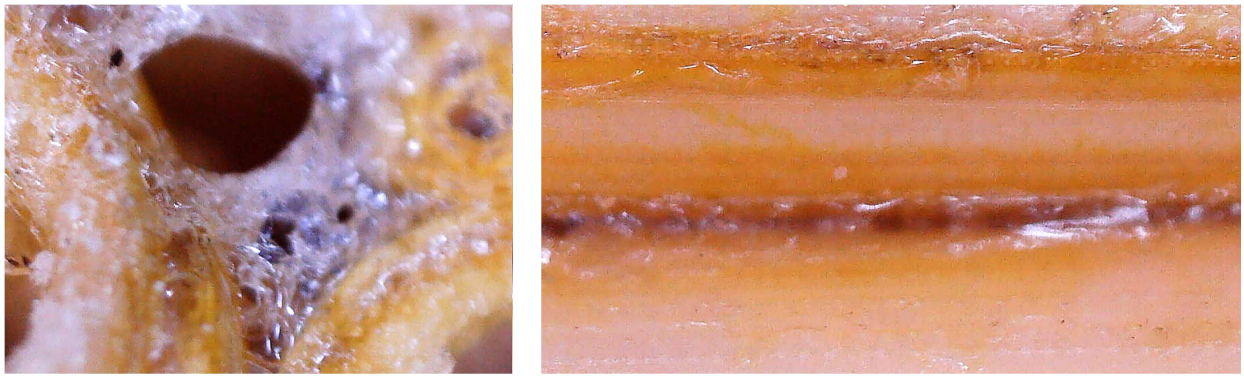


(a) **(b)** **(c)**

T10. ábra: (a, b) Konvencionálisan szárított szárkompozit szár-kötőanyag-szár kapcsolatainak repedései, (c) illetve a kötőanyag leválása a szár kötőanyag kapcsolatnál

A kompozitok száradás (kötés) közbeni alakváltozása a keresztmetszet mentén, az alkalmazott szárítási módszer függvényében változik az energiabevitel jellegétől és a hőterjedés sebességétől függően. Az alakváltozásból származó belső feszültségek rontják a szár-kötőanyag-szár kapcsolatokat. Emellett a száradás idő- és térbeli folyamata a szár-kötőanyag közti tapadást is befolyásolja, mivel hatással van arra, hogy a szárak, illetve a szárakat burkoló kötőanyag mátrix végső (száraz állapothoz tartozó) alakjának felvétele időben mennyire tér el egymástól. A vizsgált próbatestek 170 kg/m^3-es testsűrűségűek voltak. Az első keveréknél árpaszalmát használtam

természetes szárhosszeloszlással, kezezés nélkül, tiszta káliumszilikát kötőanyaggal. A második keveréknél kezelt búzaszalmát használtam fel beállított szárhosszal egy kukoricakeményítővel modifikált kötőanyaggal. A megalapítások a fentebb bemutatott tulajdonságokkal rendelkező anyagokra értelmezési tartományára érvényesek, bár valószínűsíthetően egyéb szalmatípusok esetén is hasonló eredményeket kapnánk.

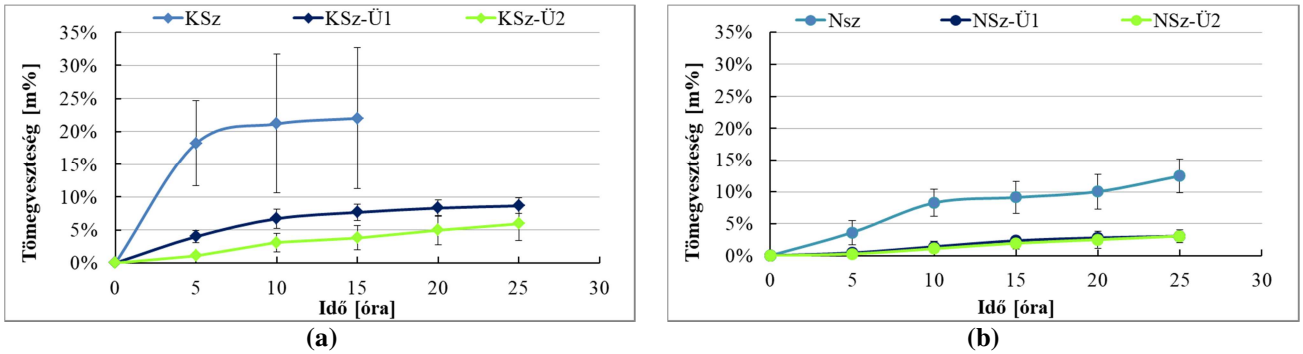


(a) **(b)**

T11. ábra: (a) Mikrohullámmal szárított szárkompozit szár-kötőanyag-szár kapcsolatai, keresztmetszet, (b) hossz-nézet

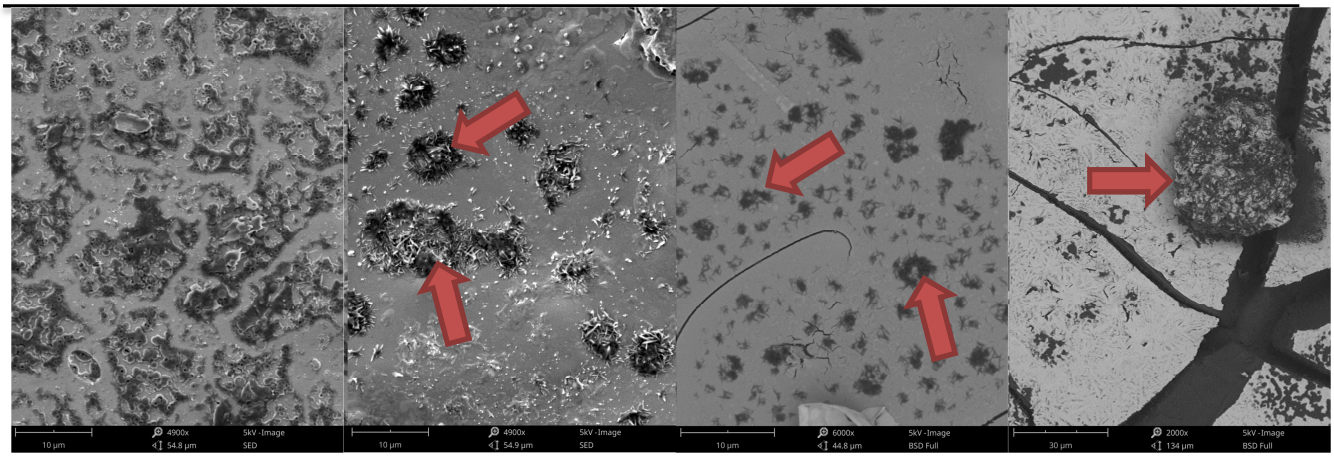
2. tézis: Porított üveg hatása a vízüveg vízzel szembeni stabilitására [CsD 1, CsD 2]

Kísérletileg igazoltam, hogy folyékony állapotú nátrium- és káliumszilikáthoz adagolt kis mennyiségű (~2 m/m%) porított (d_{max}≤ 0,063 mm), porított üveg hatására a kiszárított nátrium- és káliumszilikát minták vízzel szembeni stabilitása növekszik, illetve anyagminősége egyenletesebbé válik. Mikroszerkezeti analízissel igazoltam, hogy a porított üveg adagolása kalcium-szilikát-hidrát (CSH) kristályokat képez a nátrium- és káliumszilikát alapmátrixban *(T12. ábra-T15. ábra).*



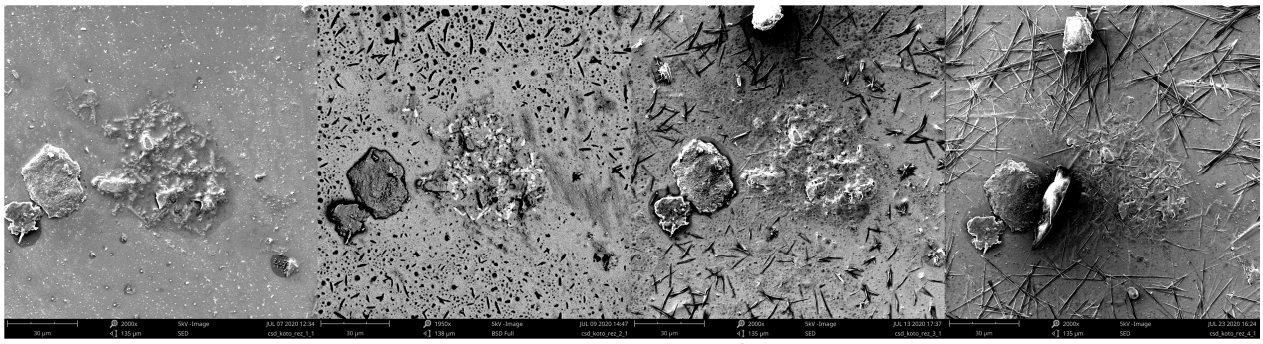
(a) **(b)**

T12. ábra: (a) Tiszta és porított hulladéküveg kiegészítőanyagú kálium-szilikát próbatestek tömegvesztesége vízben oldás során az idő függvényében, (b) Tiszta és porított amorf szilikát kiegészítőanyagú nátriumszilikát próbatestek tömegvesztesége vízben oldás során az idő függvényében (minden pont 9 próbatest mérési eredményének az átlaga)



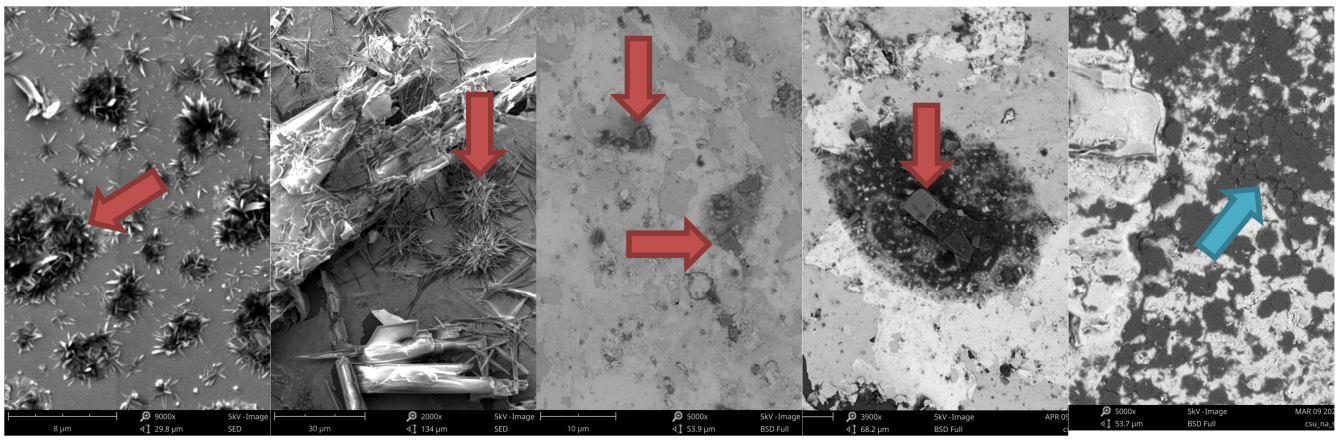
(a) **(b)** **(c)** **(d)**

T13. ábra: Tiszta nátrium-szilikát mikroszerkezete CSH kristályok nélkül, (b) nátrium-szilikát beoldott 1. típusú üvegporral és jól látható tűszerű CSH kristályokkal, (c) kálium-szilikát beoldott 2. típusú üvegporral és jól látható tűszerű CSH kristályokkal, (d) Kristályosodó üvegszemcse



Idő előrehaladása →

T14. ábra: A kötőanyag időbeli átalakulása, kristályok fejlődése (Kálium szilikátban oldott 1. típusú amorf szilikáttal)



(a) **(b)** **(c)** **(d)** **(e)**

T15. ábra: Beoldott amorf szilikát hatására növekvő CSH kristályok: (a) xonotlit, (b) hillebrandit, (c) kicsi és (d) nagy köbös CSH részecskék

A folyékony nátrium- és káliumszilikátokban az erősen lúgos (pH ~ 11) kémhatásuk miatt, a nem alkáliálló, finomra őrölt (jelentősen megnő a reakcióképes fajlagos felület), amorf állapotú szilikát oldódik és beépül a szilikátmátrixba, ahol kristálykezdeményeket (csírákat) képez, illetve térhálósító szerepe van (angol szakkifejezéssel: crosslinking-agent). Jól azonosítható az üvegből kioldódó mész, amely később hexagonális kalcium-hidrát kristályokat képez *(T15. ábra).* A vizsgált amorf szilikátok tartalmazzák azokat az anyagokat (B_2O_3, SiO_2, Na_2CO_3, CaO, MgO, Al_2O_3) [35], amelyek a tiszta portland cementben is megtalálhatóak és hasonló CSH kristályokat képeznek. Ezen anyagok által

képzett csírák idővel növekedni kezdenek, aminek hatására az alapmátrix is hatékonyabban kristályosodik és több, eltérő típusú, illetve nagyobb mennyiségű CSH kristály képződik, mint a tiszta nátrium- és káliumszilikátokban. A leglátványosabban talán a hillebrandit (Ca_2SiO_3 $(OH)_2$) és xonotlit (Ca_6 $[Si_6O_{17}]$ $(OH)_2$) [36], továbbá egyéb köbös CSH részecskék [37] [38] jelennek meg és vízzel szemben ellenállóbbá teszik az anyagot *(T12. ábra.-T15. ábra).* Saját kísérleteimben a modifikált minták oldási vesztesége a tiszta nátrium- és káliumszilikát tömegszázalékos oldási veszteségeinek csak 30-40%-a, illetve a szórás káli vízüveg esetén 10%-ról 2% alá, nátron vízüveg esetén 2%-ról 1% alá csökkent.

3. téziscsoport: Kötetlen szárhalmazok halmazűrűségének és az egyedi szárak anyagtulajdonságainak fizikai modell alapú összefüggése a szárhalmazok hővezetési tényezőjével.

A következő megállapítások 80-180 kg/m^3 halmazsűrűségű kötetlen állapotú búza és árpa szárhalmazokra vonatkoznak, 10-30 °C hőmérsékleti tartományban.

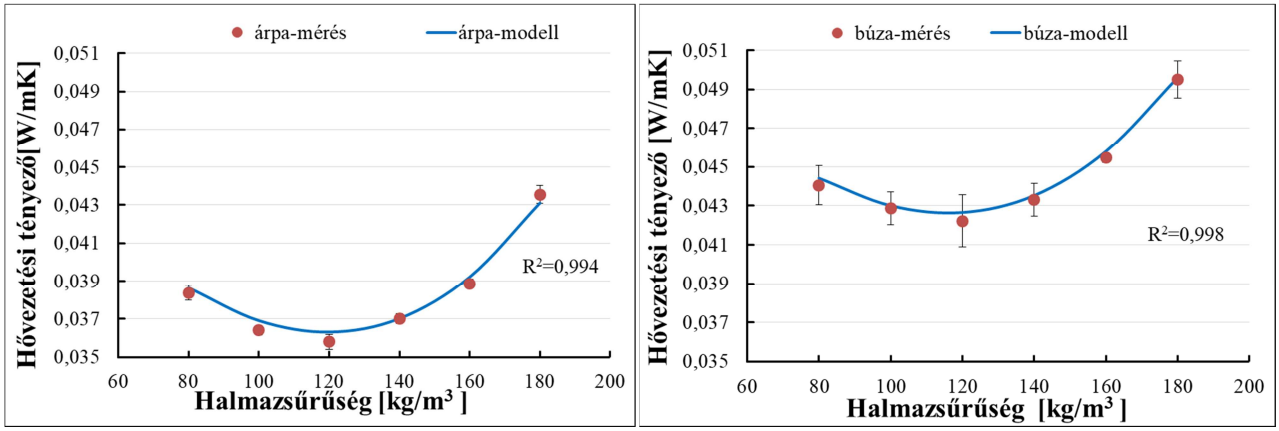
3.1. tézis [CsD 3]

Kísérleti mérésekre alapozva modellalkotással bebizonyítottam, hogy kötetlen gabona szárhalmazok hőtechnikai viselkedése 80 és 180 kg/m^3 halmazsűrűség között a szálas és hab hőszigetelések sajátosságait is magában hordozza. Az egyedi szár fala, mint porózus hőszigetelés vehető figyelembe, ezzel szemben ezek sokasága szárhalmazként szálas hőszigetelésként *(T16. ábra)*.

Olyan gabonaszár halmazok viselkedése, amelyekben az egyedi szárak üregeinek, illetve a szárak közötti térnek a térfogata zérustól eltérő, nem írható le tisztán a száras vagy a porózus szigetelésekhez alkalmazott modellekkel. Ennek oka, hogy az egyedi szár fala, mint természetes polimerkompozit és a szárfal pórusaiba bezárt gáz hőtechnikai szempontból sorosan kapcsolt rendszerét kell figyelembe venni és így megállapítani a habszerű szárfal hővezetését. A szárhalmaz viselkedése (az egyedi szárak csöves szerkezetébe, illetve a szárak közé bezárt gázokkal együtt), figyelembevéve a szárhalmaz hővezetésének tendenciáját a halmazsűrűség változása mellett a szálas hőszigetelésekre jellemző viselkedést mutat. A halmazsűrűség és a hővezetőképesség grafikonjából megfigyelhető, hogy a görbe karakterisztikája nem függ erősen a különböző (árpa és búza) szalmák anyagi tulajdonságaitól *(T16. ábra, T17. ábra)*, viszont a hővezetőképesség abszolút értékét az egyes szárak belső szerkezete és fizikai tulajdonságai szignifikánsan meghatározzák. Az előbbiek miatt, eltérő belső összetétel mellett a hasonló karakterisztikájú görbe y tengelyen (hővezetési tényező) eltolt változata érhető el mindkét szalmánál. Ennek pontosabb, anyagtulajdonságokban és hőtranszport folyamatokban rejlő hátterét az eltérő szalmafajták laboratóriumi vizsgálatával és modellalkotással tártam fel. A modellből tisztán látszik, hogy a hőtechnikai paramétereket legjobban

befolyásoló anyagtulajdonság (természetes szárak esetén) a szárak porozitása és cellulóztartalma. Fontos, hogy a modell érzékeny a szalmaszárak fizikai tulajdonságaira, és csak akkor alkalmazható a szalmaszár halmazok hővezető képességének becsléséhez, ha a használt szalma anyagtulajdonságait pontosan meghatározzák.

Az állítást alátámasztja, hogy a 80 és 180 kg/m^3 közti testsűrűség intervallumban a szárhalmazok hővezetési tényezőjét az általam alkotott modell a testsűrűség függvényében 99%-os biztonsággal becsülni.



(a) **(b)**

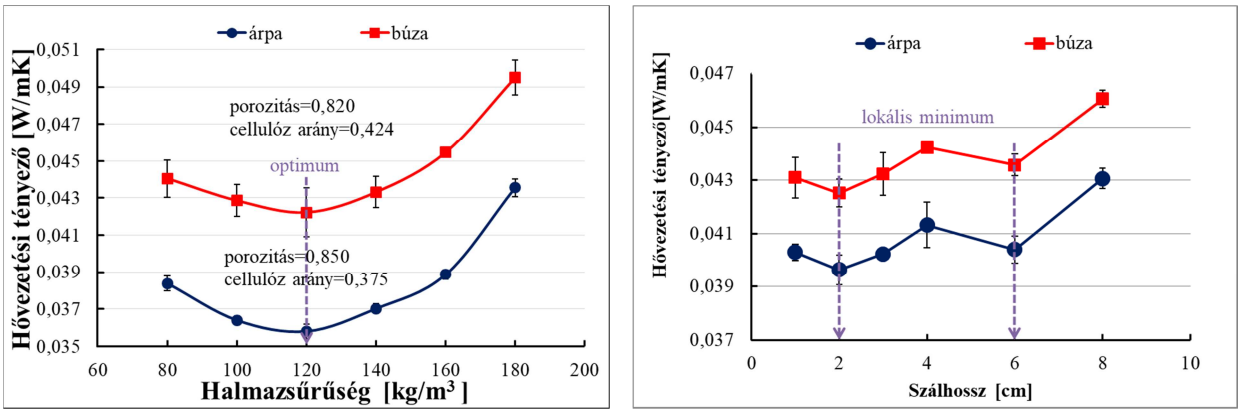
T16. ábra:Az általam alkotott modellel és paraméterekkel becsült, illetve a kísérleti úton meghatározott hővezetési tényezők, a halmazsűrűség függvényében: (a) árpa szalma-modellalkotáshoz használt, (b) búza szalma-validációhoz használt (minden pont 5 próbatest mérési eredményének az átlaga)

3.2. tézis [CsD 3, CsD 4, CsD 5, CsD 8]

A szalma szárhalmazok halmazsűrűség és a hővezető képesség, illetve a szárhossz és a hővezető képesség összefüggésének karakterisztikáját és függvényének minimumhelyét (vagy minimumhelyeit) a különböző árpa- és búzaszalmák egyedi szárra jellemző anyagi tulajdonságai elhanyagolható mértékben befolyásolják, viszont a hővezető képesség abszolút értékét az egyes szárak belső szerkezete és fizikai tulajdonságai szignifikánsan meghatározzák, azt a hővezetési tényező tengellyel párhozamosan eltolják *(T17. ábra)*.

Kötetlen szalma halmazok halmazsűrűség-hővezetési tényező összefüggéséből megfigyelhető, hogy a görbe karakterisztikája független a vizsgált árpa- és búzaszalmák anyagi, egyedi szárra jellemző tulajdonságaitól. Eltérő anyagi összetétel mellett hasonló alakú görbe jellemzi az halmazsűrűség-hővezetési tényező összefüggést mindkét vizsgált szalma esetén, mert a természetes állapotú szárhalmazok makro struktúrája (vagy belső geometriája) hasonló, viszont az eltérő mikrostruktúrájuk miatt azonos mértékben változik (tolódik el) minden vizsgált (diszkrét) halmazsűrűség esetén a hővezetési tényező. A hővezető képesség abszolút értékét az egyes szárak belső geometriája és fizikai tulajdonságai határozzák meg. A legfontosabb paraméter a szárak porozitása és száralkotó anyagok tömegszázalékos aránya *(T17. ábra-a)*.

A fentebb tárgyalt hasonlóság a két típusú gabonaszár halmaz között akkor is megmarad, ha az elemi szárak hosszát egységesítjük, ezt az *T17. ábra-b* egyértelműen mutatja. Továbbá ezen eredményekből is arra a következtetésre juthatunk, hogy a pórusszerkezetében nem módosított szárhalmazoknál a hővezetési tényező- „egyéb makroszintű változó" görbék alakja csak a makroszintű szárhalmaz struktúra változtatásoktól függ és nem függ az anyagi tulajdonságoktól. Ez úgy is megfogalmazható, hogy ha egy koordinátarendszer y tengelyén a hővezetési tényezőt ábrázoljuk és az x tengelyen bármely olyan változót, ami a szárfal pórusrendszerére nincs nagy hatással, akkor eltérő gabonaszárak esetén a kapott görbék alakja hasonló lesz, csak az y tengelyen elcsúsznak egymáshoz képest. Magyarán csak az anyagi tulajdonságok, mint például a szárak porozitása és a cellulóztartalom befolyásolják a görbék abszolút értékét.



T17. ábra: (a) Eltérő anyagtulajdonságokkal rendelkező gabonaszár halmazok hővezetési tényező-halmazsűrűség görbéi közel azonos karakterisztikával és eltérő hővezetési tényező abszolút értékekkel. (b) Eltérő anyagtulajdonságokkal rendelkező gabonaszár halmazok hővezetési tényező-szárhossz görbéi közel azonos karakterisztikával és eltérő hővezetési tényező abszolút értékekkel. (minden pont minimum 5 próbatest mérési eredményének az átlaga)

3.3. [CsD 3]

Kötetlen gabonaszár halmazok esetén a gáz fázisban történő hővezetés a következő három szubkomponensre bontható: hővezetés a szár pórusgázában, hővezetés a szár üregében és hővezetés a szárak közötti hézagokban lévő gázokban. A pórusgáz hővezetési szubkomponensét a szár (szilárd és gáz fázisokat tartalmazó kompozit) eredő hővezetésének számítása során kell figyelembe venni. A szárüreg és a szárak közötti hézagokat kitöltő gáz hővezetési szubkomponenseket a gázokban való hővezetés eredő értékének számításában kell figyelembe venni *(T16. ábra-T18. ábra)*.

$$k_{g.v} = \lambda_g \times \mathrm{Fl}_{rev} \qquad \textit{Egy. 1.}$$

$$k_{g.g} = \lambda_g \times p_{ins} \qquad \textit{Egy. 2.}$$

$$k_{g.tot} = k_{g.v} + k_{g.g} \qquad \textit{Egy. 3.}$$

$$\lambda_{s,g} = \frac{\lambda_{solid} * \lambda_g}{(1-p) * \lambda_g + p * \lambda_{solid}} \qquad \textit{Egy. 4.}$$

Ahol: $k_{g,v}$: gázokban való hővezetés faktora a szárak üregeiben, λ_{solid}: a szár szilárd részének hővezetési tényezője, Fl_{rev}: fordított lapultsági tényező, $k_{g,g}$: gázokban való hővezetés faktora a szárak közti hézagokban, p_{ins}: a hézagok térfogataránya a mintában, $\lambda_{s,g}$: a szár eredő hővezetési tényezője, λ_{solid}: a szár szilárd részének hővezetési tényezője, p: porozitás.

Mindhárom szubkomponens gáz anyag hővezetéséhez kapcsolódik, de részben vagy egészben eltérő környezettel és eltérő kapcsolatrendszerrel rendelkezik, így az őket befolyásoló paraméterek is különböznek, tehát nem kezelhetőek együtt. A három szubkomponensből a szár pórusgáz nincs közvetlen kapcsolatban a másik kettővel az a gáz-lignocellulóz kompozit sorosan kapcsolt részét képezi, ezért elkülönítendő. A másik két komponens értékei ugyan más befolyásoló paraméterek szerint (matematikai/fizikai leírás) változnak, de egymással közvetlen kapcsolatban állnak, így értékük összegezhető.

3.4. tézis [CsD 3]

Az önálló gabonaszár természetes biokompozit anyag, amely különböző szilárd anyagokat és gáz fázisokat tartalmaz. A gabona szárak szilárd részének hővezetési tényezője kiszámítható a szilárd biopolimer alkotóanyagok hővezetési tényezőjének és tömegarányának szorzatösszegéből. Feltételezve, hogy a pórusgáz fázis hővezetése a stacioner állapotú levegőével egyenlő, az eredő hővezetési tényező faktor a szilárd és gáz fázisú komponensek sorosan kapcsolt rendszerével, analitikus modellel számítható a fázisok térfogatarányának ismeretében *(T16. ábra-T18. ábra)*.

$$\lambda_{s,g} = \frac{\lambda_{solid} * \lambda_{air}}{(1-p) * \lambda_{air} + p * \lambda_{solid}} \qquad \textit{Egy. 4.}$$

$$\lambda_{solid} = (1 - r_c) * \lambda_{l,h} + r_c * \lambda_c \qquad \textit{Egy. 5.}$$

Ahol: λ_{solid}: a szár szilárd részének hővezetési tényezője, r_c: cellulóz tömegarány, $\lambda_{l,h}$: a lignin és a hemicellulóz összevont hővezetési tényezője, λ_c: cellulóz hővezetési tényezője, $\lambda_{s,g}$: a szár eredő hővezetési tényezője, λ_{solid}: a szár szilárd részének hővezetési tényezője, λ_{air}: a szár gáz komponensének hővezetési tényezője, p: porozitás.

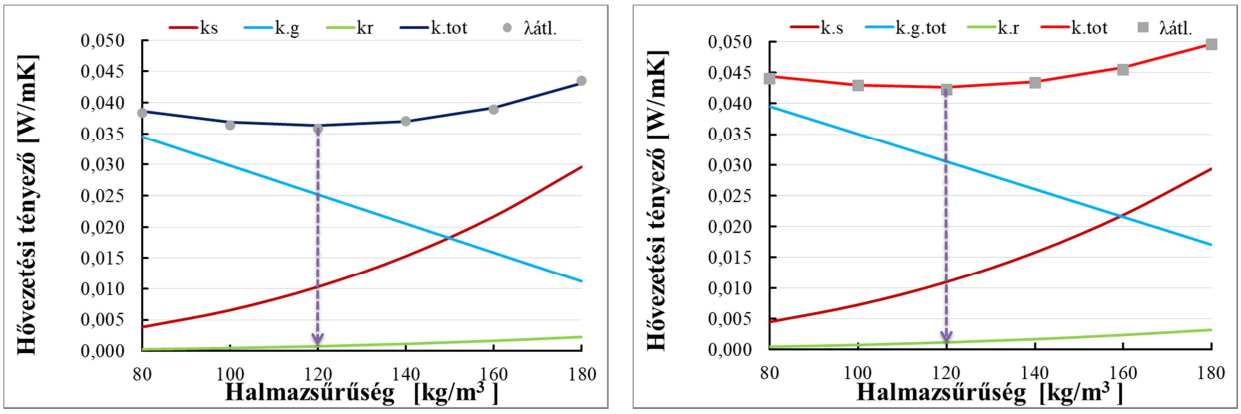
Az eredmények jól mutatják, hogy a m%-ban több cellulózt tartalmazó búzaszalma szilárd részének hővezetése nagyobb. Emellett a kisebb porozitása miatt az eredő hővezetése is nagyobb az árpaszalma értékeinél. Ez a sorrendiség a szárhalmazok értékénél is visszaköszön.

3.5. tézis [CsD 3]

A szárhalmaz halmazsűrűségének változásával az egyes gabonaszárak keresztmetszeti összenyomódása (lapultsága) változik. Ezzel arányosan változik a hőáramlás feltételezett úthossza a szárfalban, és a szár üregeibe zárt levegő mennyisége. Az átlagos úthossz változás hőtranszportra gyakorolt hatásának jellemzésére egy vektort vezettem be, amit lapultsági tényezőnek neveztem el. A lapultsági tényező pontosan jellemzi a szárfalban történő hővezetés változását, illetve ennek fordított vektora[1] a szárüregekben a gáz hővezetési szubkomponens változását a halmazsűrűség függvényében. Ha a szárak összenyomódnak belátható, hogy a szárfalban a hőáramlás feltételezett úthossza csökken, amivel a szárfalban végbemenő hőtranszport aránya növekszik, viszont a szárüregekből folyamatosan kiszorulnak a gázrészecskék, így itt a hőtranszport aránya csökken *(T16. ábra-T18. ábra).*

[1] A fordított vektor nem azonos az inverz vektor matematikai értelmezéssel, a fordított lapultsági tényező vektort egy főátlóiban csak 1 értékű elemeket tartalmazó fordítómátrixszal kaphatjuk meg.

Az idealizált szárfal szemközti félkörívei az összenyomódás során torzulnak, a belső falak egyre nagyobb felületen érintkeznek, így a hőnek rövidebb utat kell megtenni amíg a keresztmetszeten át egy szomszédos szárhoz ér. Ezzel egy időben, a szárüregben csökken a vezetőképes gáz mennyisége (ezzel a gáz részecskék száma) és ez látszólagosan (habár a stacioner állapotú levegő hővezetése konstans) csökkenti a hővezetést, ami a hővezetési szubkomponens csökkenésében mutatkozik meg.



(a) **(b)**

T18. ábra: A modell hővezetési tényező faktorai (k_s-hővezetés a szilárd anyagban, k_g-hővezetés a gázokban, k_r-hősugárzás), illetve a kísérleti úton meghatározott hővezetési tényezők, a halmazsűrűség függvényében. (a) Árpaszalma, (b)Búza (minden pont minimum 5 próbatest mérési eredményének az átlaga)

Az előző öt állítás együtt értelmezhető szemléletesen, mert összegzésük hasonlítható össze a mért értékekkel és helytállóságukat igazolja, hogy: megállapítható, hogy az így figyelembe vett, majd később az összegzett (hővezetési tényező szubkomponensekből álló) hővezetési tényező faktorok a mérési eredményeket jól közelítő becslést adnak. Továbbá a görbék *karakterisztikája* a fellelhető szakirodalomban publikált, kísérleti úton megállapított görbealakokhoz hasonló [39][40].

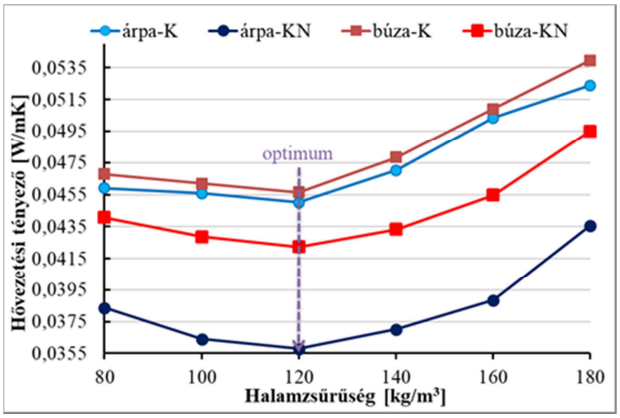
4. tézis: Kötött és kötetlen szárhalmazok halmazűrűségének empirikus összefüggése a szárhalmazok hővezetési tényezőjével [CsD 6, CsD 7].

A két szalmatípus (árpa, búza) testsűrűség-hővezetési tényező görbéi kötetlen állapotban nagyon hasonló karakterisztikát mutatnak, de abszolút értékük eltérő. Kötött állapotban minkét szalmatípus a vizsgált diszkrét halmazsűrűségi értékeknél ugyanolyan szalma-kötőanyag tömegaránnyal rendelkezett, tehát közelítőleg minden mért mintában azonos rétegvastagságú és anyagú kötőanyag rétegnek kell kialakulnia a szárak felületén. Így feltételezhető, hogy a kötetlen állapotú szárhalmazok eredményeihez képest egy közel konstans eltolódású kötött szárhalmaz görbepárt kapjunk, mely görbepár abszolút érték különbségei közel azonosak a kötetlen állapotban kapott görbepár különbségeivel. Kötőanyaggal kevert kompozit esetén az egyedi szalmaszárak felületét vékony rétegben bevonja a szilikát mátrix, ami mindkét szalmatípus esetén azonos tömegarányban van jelen. Ennek egyik következménye, hogy a rendszerhez adunk a porózus lignocellulóz szárakénál nagyságrendileg nagyobb hővezetési tényezővel rendelkező elemet (0,57-1,63 W/mK) [41], amiben a hő kisebb ellenállással tud terjedni, így az energiatranszport a kötőanyagban válik dominánssá. Másrészt a szárak a korábbi indirekt mód helyett direkt „kötőanyag hidakkal” kapcsolódnak egymáshoz, ami tovább növeli annak a valószínűségét, hogy a hő dominánsan a kötőanyagban terjedjen. Emellett a kötőanyag burok és kötőanyag hidak közelítik egymáshoz a két eltérő gabonaszár halmazból készült kompozit belső szerkezetét. Ezen jelenségek összessége okozza a görbék közeledését, viszont a természetes szárak továbbra is eltérő szerkezetűek, ezért a két típusú szárhalmaz hővezetési tényezői nem ugyanazon értéket veszik fel. Fontos, hogy az egyedi szárak által alkotott halmaz makrostruktúrája (geometriája) alapvetően nem változik meg a hozzáadott kötőanyag hatására, viszont a kötőanyag javítja a szárak közti hőtranszport minőségét, így a görbék csak eltolódnak a függőleges tengely mentén, de a karakterisztikájuk csak kis mértékben változik [42].

Kísérletileg megállapítottam, hogy azonos halmazsűrűség mellett a kötött, kezelés nélküli búza és árpa szárhalmazok hővezetési tényező értékei közti különbség jelentősen csökken a kötetlen szárhalmazok eredményeihez képest, mivel a kötőanyag hozzáadásával annak tulajdonságai dominálnak a szilikát-szárkompozit hőtranszportjában a szárak jellemzőivel szemben. A kötőanyag hozzáadásának hatására a hővezetési tényező-halmazsűrűség görbék karakterisztikája csak kis mértékben változik és a minimum pont helye változatlan marad. Így megállapítható, hogy a kötött szalma-szárhalmazok eredő hővezetési tényezője adott halmazsűrűség mellett nem egyszerűen a kötetlen szárhalmaz a kötőanyag burok hővezetési tényezőjével megnövelt értéke *(T19. ábra)*.

A kötőanyag hozzáadásának hatására a görbék karakterisztikája csak kis mértékben változik, de a minimum pont változatlan marad. A rendszerhez adunk egy a porózus lignocellulóz szárakénál

(0,028-0,029 W/mK), de a tömör lignocellulózoknál is jelentősen nagyobb (0,26-1,04 W/mK) hővezetési tényezővel rendelkező tömör komponenst (0,57-1,63 W/mK), amiben a hő kisebb ellenállással tud terjedni, így az energiatranszport a kötőanyagban válik dominánssá. A szárak a korábbi indirekt mód helyett direkt „kötőanyag hidakkal" kapcsolódnak egymáshoz, ami tovább növeli annak a valószínűségét, hogy a hő dominánsan a kötőanyagban terjedjen, mivel ez a direkt kontakt energiatranszport szempontjából kedvezőbb, mint amikor a szárak csak egymáshoz támaszkodnak. Az előbbiekből adódóan a kötőanyag burok és kötőanyag hidak közelítik egymáshoz a két eltérő gabonaszár halmazból készült kompozit belső szerkezetét. Mivel a szárhalmaz struktúrája kötetlen állapotban is hasonló volt, szinte csak az azt alkotó elemek belső szerkezete tér el. Azzal, hogy a rendszerhez adtam egy mindkét szalmatípus kompozitban megegyező anyagot, arányaiban csökkennek az eltérő szárhalmazok felépítésbeli különbségei.



T19. ábra: A vizsgált szalmatípusok halmazsűrűségének és hővezetési tényezőjének összefüggése kötetlen, illetve kötött állapotban (minden pont minimum 5 próbatest mérési eredményének az átlaga)

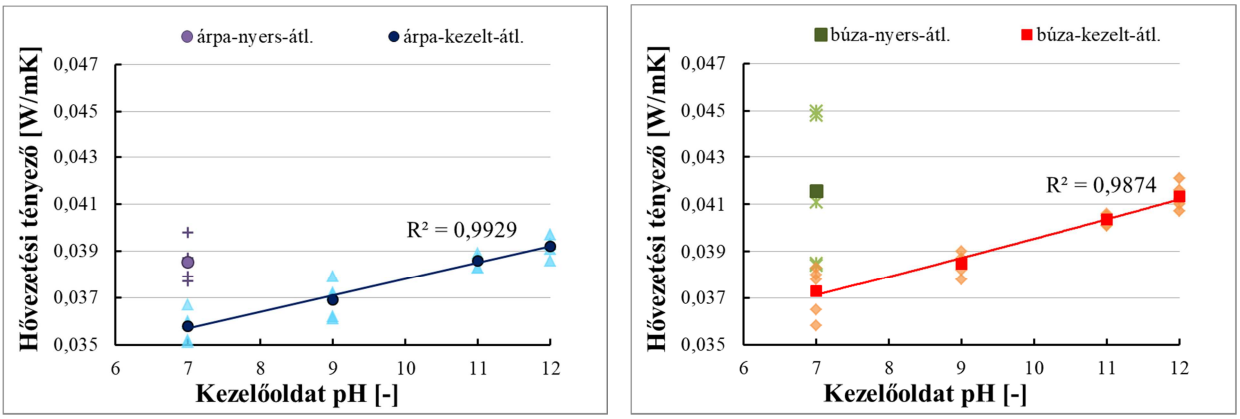
5. téziscsoport: Szárhalmazok makro- és mikrostruktúra változásának hatása a szárhalmazok hővezetési tényezőjére

5.1. tézis [CsD 4, CsD 8]

Kísérletileg megállapítottam, hogy a vizsgált árpa- és búzaszalma gabonaszár halmazok nedves hőkezeléséhez használt kezelőoldat pH növekménye (pH 7 és 12 között), és a kezelés után mosott, majd kiszárított állapotban a szárhalmazon mért hővezetési tényező közötti összefüggés lineáris azonos kezelési hőmérséklet és időtartam mellett *(T20. ábra, T21. ábra)*.

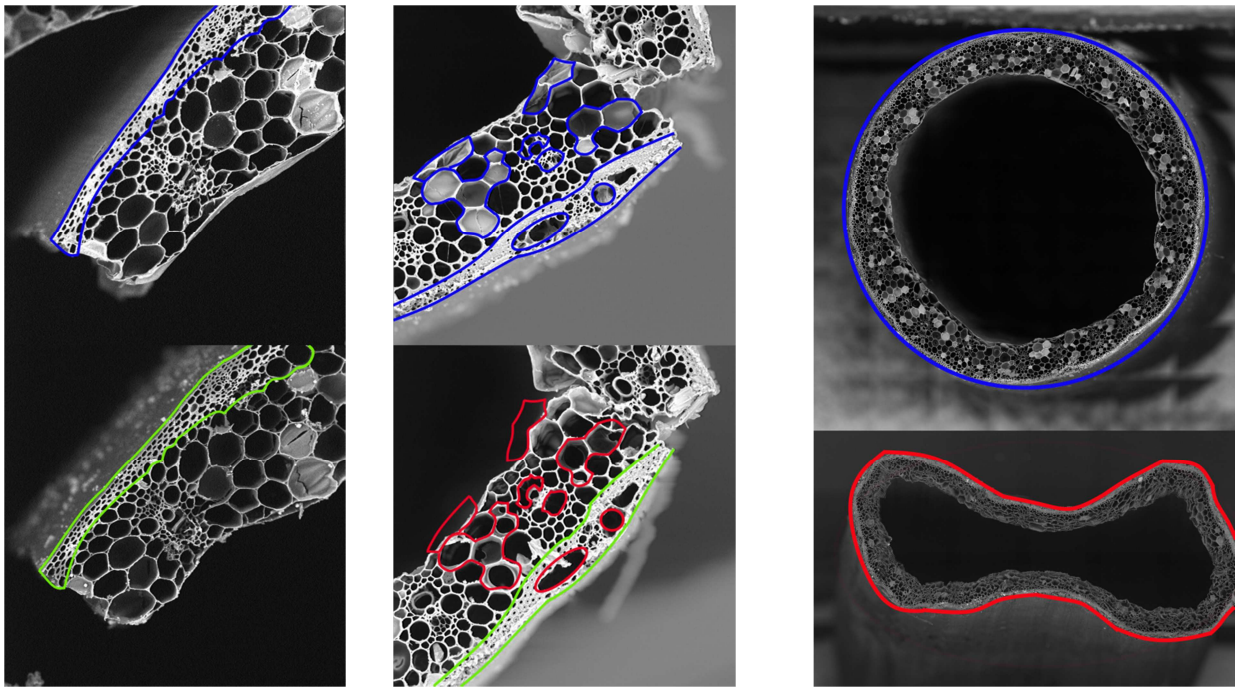
A lignocellulóz alapú biopolimerek, mint például a gabonafélék szerkezetében, bár kevésbé érzékenyek a lúgos oldatokra, mint a savakra, a lúgos oldatok is képesek változást (roncsolást) okozni. A megemelkedett hőmérséklet katalizálja a szárakban az oldatok hatására végbemenő folyamatokat, amelyek jelentősége a pH érték növekedésével fokozódik. A kezelések során ugyan adott pH értékhatárok között növelhető a szárak porozitása, illetve csökkenthető a pórusfalak vastagsága (szárfalon belül), viszont a pórusszerkezet roncsolódik, sérül a pórusok sugár és hosszirányú tagoltsága is, illetve elvékonyodhat a porózus szárfal. Ez egyrészt növeli a gázok szabad

áramlásának lehetőségét, másrészt csökkenti annak a porózus szárfalnak a vastagságát, ahol az elkülönített pórusokban statikus légbuborékokat feltételezhetünk.



(a) **(b)**

T20. ábra: A kezelőoldat pH értékének és a kezelt szálhalmazok hővezetési tényezőjének összefüggése (a) árpa, (b) búza (minden pont 5 próbatest mérési eredményének az átlaga)



(a) **(b)** **(c)**

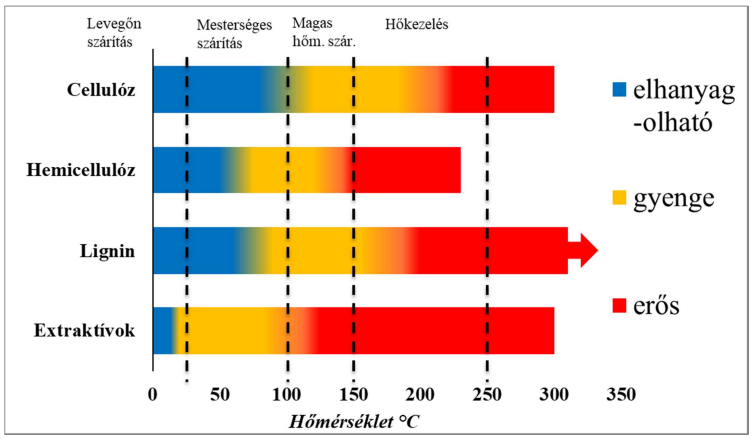
T21. ábra: Szálkezelő oldat pH értékének hatása a szál mikroszekrezetére. Kék-zöld: pozitív változás, Kék-piros negatív változás, jobbról balra a pH érték: (a) 7, (b) 9, (c) 12

5.2. tézis [CsD 9]

Kísérletileg megállapítottam, hogy a vizsgált, kötetlen árpa és búza gabonaszár halmazok oxidatív, légszáraz környezetben való kezelése esetén, a kezelési (szárítási) hőmérséklet növekménye és a kezelés után 20 °C-on kondicionált szárhalmazon mért hővezetési tényező közötti összefüggés lineárisan jól közelíthető a 60-150 C közötti hőmérsékleti tartományban *(T23. ábra, T24. ábra)*.

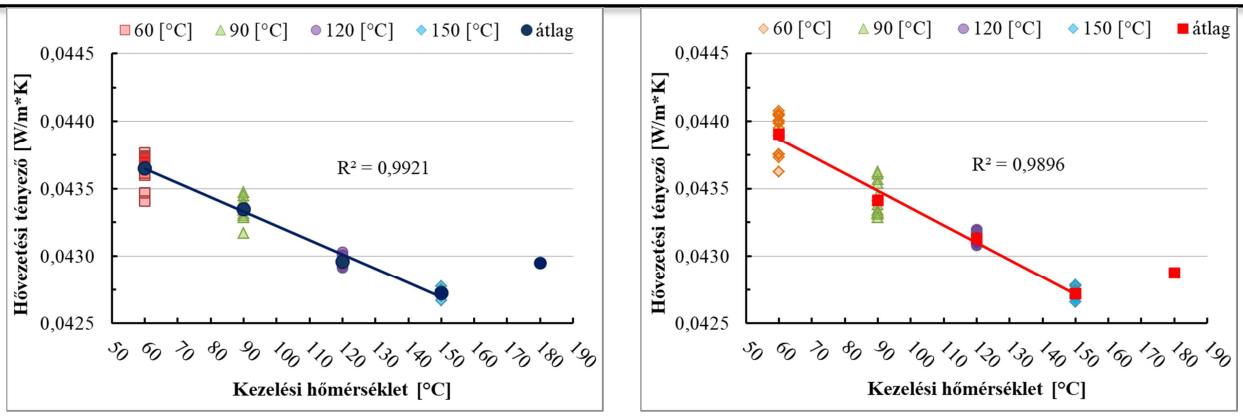
Ebben a kísérletsorozatban az a legfontosabb, hogy a szalma szerves anyag, így a hőterhelés miatt lejátszódó folyamatok leginkább a fő komponensek jellegének és kapcsolatainak változásában

nyilvánulnak meg, amiket jelentősen befolyásolhatnak a kis mennyiségben jelenlévő járulékos anyagok is. A lignocellulózokban már 40 °C és 90 °C között lejátszódik néhány kémiai változás, főként az extraktív/illékony komponensekben [43], bár a 100 °C-ig bekövetkező változások dominánsan a dehidratációhoz köthetőek. Ebben a tartományban a szín változása is megfigyelhető, ami a szénhidrátok és az extraktív anyagok hidrolíziséből származó vegyületek és egyéb komponensek közti későbbi reakciók következménye [44]. Ebben a hőmérséklet tartományban mennek végbe a hidrogénhidas kötésben bekövetkező változásokhoz kapcsolható átalakulások is, emellett 100 °C-fellett már felbomolnak bizonyos gyengébb kémiai kötések is [45] [46]. 100 °C és 130 °C között tapasztalható fellágyulás, ami a lignin szerkezetének változásával magyarázható [47]. A cellulóz és hemicellulóz 130 °C feletti 24 órás hevítés esetén már kimutathatóan veszt a tömegéből [48]. 100 °C és 150 °C között csökken a lignocellulózok higroszkópossága, ami miatt az egyensúlyi nedvességtartalom is csökken [49] [50] [51] [52][53]. A járulékos alkotórészek oxidációja miatt a szárak ebben a tartományban jobban elszíneződhetnek, illetve kisebb mennyiségben már keletkeznek gázok is a hevítés során. Továbbá ezen a hőmérsékleten bizonyos lignocellulózok kondenzátumában kimutathatók monoterpének és kisebb mennyiségű kibocsátott formaldehid, furfurol, ecetsav, metanol, diterpének stb. [54] [55].



T22. ábra: A lignocellulózokat alkotó anyagok bomlása/átalakulása a hőmérséklet függvényében, adat forrás:[56]

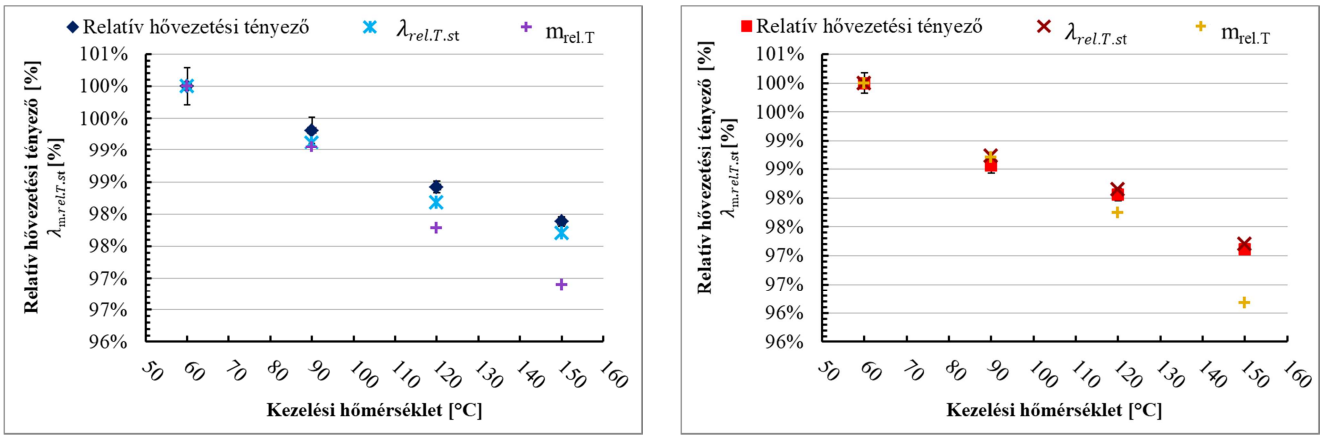
A növekvő kezelési hőmérsékletek hatására az anyagot elemi szinten felépítő komponensek (C, H, O) közül a szén és oxigén atomok tömeg és atomszám arányának változása kimérhető, a szén aránya nő, míg az oxigéné csökken (egyéb kisebb arányban jelenlévő anyagokat elhanyagoltam a vizsgálatok során). Ezen ismeretek alapján kijelenthető, hogy a szárak szerkezete elemi szinten változik (ha csak kis mértékben is), minek hatására változik a hővezető képesség.



(a) **(b)**

T23. ábra: A szárhalmazok szárítási hőmérsékletének és hővezetési tényezőjének összefüggése, árpa: (a), búza: (b) (minden pont 10 próbatest mérési eredményének az átlaga)

A kezdeti állapotban tömegállandóságig szárított gabonaszárak kezelési (szárítási) hőmérsékletének növekményével a szárak tömegvesztesége növekszik. Továbbá (ezzel egyidejűleg) a szárak elemanalíziséből megállapított tömegszázalékos oxigén arány csökken, miközben a szén aránya növekszik. Ha a relatív tömegveszteséget a relatív oxigén arány és a relatív szén arány (a hőmérséklet függvényében tekintve) abszolút értékeinek hányadosának hatványára emeljük $\lambda_{rel.T.st} \approx m_{rel.T}^{(O_{rel.T}/C_{rel.T})}$, a kapott görbe jól közelíti a szárhalmazok relatív hővezetési tényező görbéjét a kezelési hőmérséklet függvényében. Ez matematikai összefüggést teremt, a hőkezelés hatására bekövetkező anyagszerkezeti változások és a hővezetési tényező megváltozása között a 60-150 °C közötti hőmérsékleti tartományban.



a) **b)**

T24. ábra: A szárhalmazok szárítási hőmérséklet és a hővezetési tényező görbéjének összefüggése az anyagszerkezeti változásokkal, árpa: (a), búza: (b) (minden pont legalább 13 próbatest mérési eredményének az átlaga)

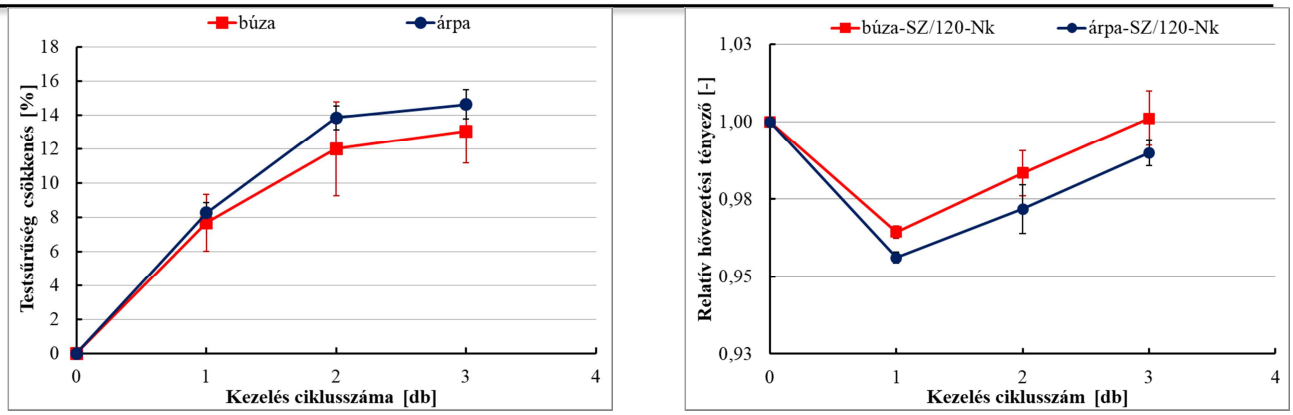
A szárkezelések során a szárak tömeget vesztenek, mialatt befoglaló térfogatuk közel állandó marad, így csökken a testsűrűségük. Felmerül a kérdés, hogy ha két eltérő testsűrűségű, elemi szárakból álló szárhalmaz hővezetési tényező minimuma azonos halmazsűrűség értékhez tartozik, akkor a szárak csökkent testsűrűség mellett a kezelt gabonaszárak hővezetési minimuma is tartozhat-e ugyanahhoz a halmazsűrűséghez. Illetve a kezelési ciklusszám milyen összefüggésben van a pórusrendszerben létrejövő változásokkal és azok hővezetésre gyakorolt hatásával. Ez megállapítható

úgy, hogy az adott hővezetési minimumhoz természetes állapotú szárhalmazok estén a testsűrűség mellett az általuk tartalmazott átlagos szármennyiséget (átlagosan tartalmazott szárak összhosszát) is hozzárendeljük. A kezeléseket elvégeztem olyan szárhalmazokon, amelyek egy csoportjában a kezelések növekvő ciklusszáma mellett a halmazsűrűséget, egy másik csoportban az átlagos szármennyiséget tekintettem állandónak. A két csoport hővezetési tényezőjét minden kezelési ciklus után megmértem, illetve külön mintákon, mikroszkóp alatt vizsgáltam a pórusszerkezet változást. Ez az összehasonlítás megmutatja, hogy a természetes szárak vizsgálata során kiválasztott optimális (legkisebb hővezetésű) értéket a kezelt szárak esetén a halmazsűrűség jellemzi-e (befolyásolja) jobban vagy a szármennyiség, tehát melyik paramétert célszerű konstans értéken tartani.

5.3. tézis [CsD 10]

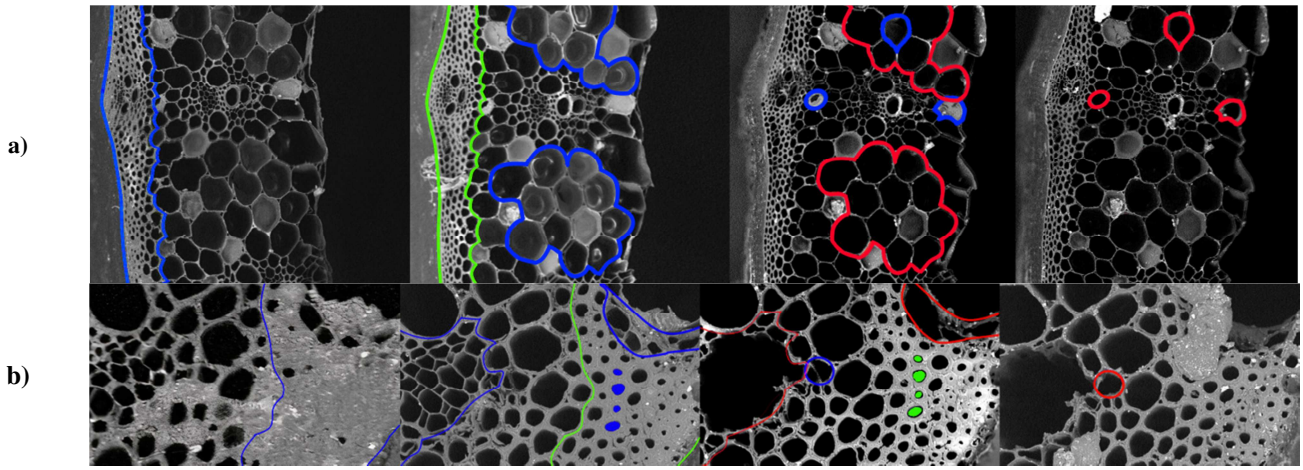
Kísérletileg megállapítottam, hogy a szárak semleges pH érték mellett végzett, nedves hőkezelésének ciklusszáma és a kezelés után kiszárított állapotban mért hővezetési tényező megváltozása (csökkenése) között nincs egyértelmű irányultságú tendencia. Annak ellenére, hogy a szárhalmaz porozitása a kezelési ciklusszámok növelésével egy határértékig növekszik, hővezetési tényezője a ciklusszám növekménye mellett nem mutat monoton csökkenő tendenciát az előző kezelés utáni hővezetési tényezőhöz képest. Tehát kezelt szálak esetén a porozitás és a szárhalmaz hővezetési tényezője között sincs egyértelmű irányultságú tendencia *(T25. ábra, T26. ábra)*.

Semleges pH érték mellett nedves hőkezeléssel is lehetséges a gabonaszárakból kioldani extraktív (nem szerkezeti) anyagokat, aminek hatására a porozitás növekszik. Állandó szármennyiségű szárhalmazok esetében, bár minden kezelési ciklus után nő a porozitás, a hővezetési tényező az első kezelés után csökken majd további kezelés hatására növekedni kezd. Ennek oka a porózus szárfal többszöri kezelés hatására (magas hőmérsékletnek és belső pórusnyomásnak, illetve a duzzadásnak és zsugorodásnak többszöri kitettség) való sérülése, melynek során a szárcsomók között a szárfalban végigfutó hosszanti csövecskék pórusfala és az ezeket hosszirányban határoló hártyák sérülnek vagy eltűnnek. Így nő az egybefüggő gázzal kitöltött terek átlagos mérete, ezért bennük a gáz részecskék szabadabban áramolhatnak, és egymással interakcióba léphetnek, ami javítja az energiatranszportot a rendszerben.



a) b)

T25. ábra: (a) A szárhalmazok százalékos testsűrűség csökkenése a kezelési ciklusszám függvényében, (b) a szárhalmazok relatív hővezetési tényezőjének változása a kezelési ciklusszám függvényében (minden pont minimum 5 próbatest mérési eredményének az átlaga)



T26. ábra: Szárkezelés ciklusszámának hatása a szár mikroszerkezetére.400x nagyítás: a), 1600 x nagyítás: b) Kék-zöld: pozitív változás, Kék-piros negatív változás

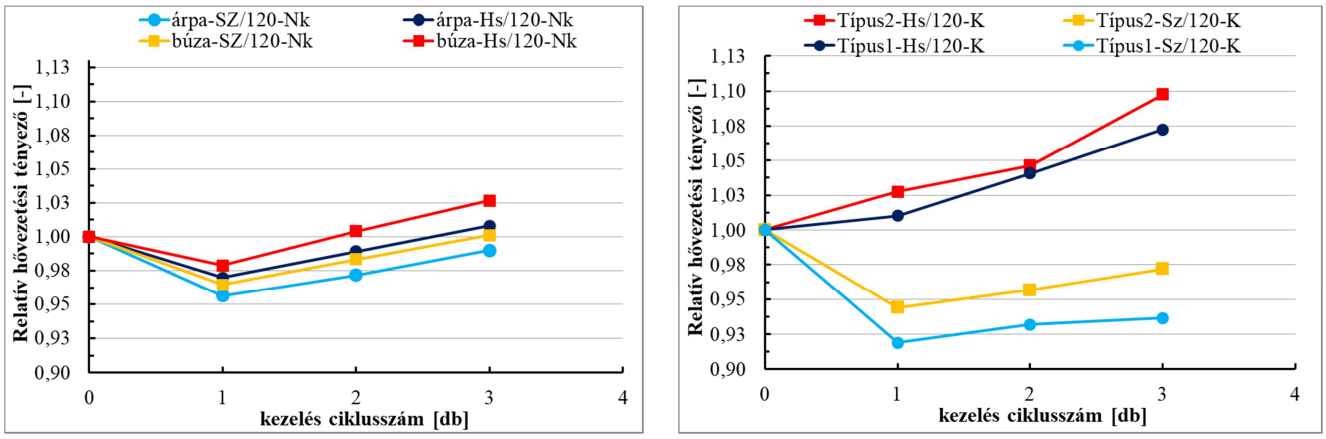
Fontos észrevenni, hogy annak ellenére, hogy adott fajta szalmánál a ciklusonkénti porozitás növekedést nem követi a hővezetési tényező csökkenése, a két típusú szalma közül adott ciklusszám után annak csökken nagyobb mértékben a hővezetése, amelyiknek arányaiban ciklusonként nagyobb a porozitás növekedése. A porózus, habszerű hőszigetelő anyagok (legtöbbször habok) többségénél az egyik legfontosabb tényező a porozitás, az átlagos (illetve minimum és maximum) pórusátmérő mellett. Ha csak a hőszigetelő képesség minimalizálását tartjuk szem előtt és eltekintünk egyéb anyagtulajdonságoktól (mint például nyomószilárdság, stb.) általában a porozitás maximalizálása a cél minél kisebb átlag pórusátmérő elérése mellett. Jó példa erre az aerogél, amely ezen törekvések jelenlegi technológiai határát jelöli, porozitása jóval nagyobb és pórusméretei jóval kisebbek az átlagos porózus hőszigetelő anyagokénál. Bár fontos kiemelni, hogy ilyen kis méretek esetén az említett anyagban a hőtranszport eltérő módon épül fel az átlagos hőszigetelő anyagokhoz képest.

5.4. tézis: [CsD 10]

Egy természetes állapotú gabona szárhalmazt, adott kezdeti hővezetési tényező mellett, (ami a természetes állapotú szalma hővezetési tényező-halmazsűrűség görbéjének minimumához tartozik) a

halmazsűrűségével vagy az átlagos származennyiségével (szártartalmával) is jellemezhetjük. **Amennyiben a vizsgált árpa és búza szárhalmazokat azonos ciklusú (jelen esetben 3) szárkezelésnek (vizes főzés) vetjük alá állandó halmazsűrűség vagy átlagos származennyiség mellett, akkor az eredeti természetes szárhalmaz jellemző értékeiből kiindulva állandó halmazsűrűség mellett kisebb mértékben csökkenthető a hővezetési tényező, mint állandó származennyiség mellett. Tehát a hővezetés minimuma jobban jellemezhető az átlagos szártartalommal, mint a halmazsűrűséggel *(T27. ábra)*.**

A szárkezelések csökkentik a szárhalazok hővezetését azáltal, hogy növelik annak porozitását, de fontos, hogy a 6.1 tézisben bemutatottak alapján a két változás se nem arányos se nem feltétlenül azonos irányú egymással. Konstans halmazsűrűség (névleges és tényleges120±2 kg/m^3) mellett kisebb hővezetési tényező csökkenés érhető el, mint konstans származennyiség mellett, ennek oka az, hogy miközben az egyéni szár hővezetése lecsökken a kezelés hatására, a szárak mennyisége növekszik egységnyi térfogatban. Tehát miközben a kezelés csökkenti a szárhalmaz hővezetését, a nagyobb származennyiség növeli azt. A két hatás közül a kötött próbatestekénél a növekvő származennyiség hatását a hővezetési értékekre növeli a bevitt kötőanyag többlet, ez az oka a kötött próbatestek némileg eltérő viselkedésnek konstans halmazsűrűség esetén.



a) **b)**

T27. ábra: A kezelési ciklusszám és a kezelt szárhalmazok relatív hővezetési tényezőjének összefüggése, kötetlen szárhalmazok (a), kötött szárhalmazok (b) (minden pont minimum 5 próbatest mérési eredményének az átlaga)

5.5. tézis:

Kísérletileg igazoltam és matematikailag alátámasztottam, hogy kötetlen, állandó halmazsűrűségű (120 kg/m^3) adott számú, nedves hőkezelési ciklus utáni szárhalmazok relatív hővezetése számítható adott számú, nedves hőkezelési ciklus utáni az állandó szármennyiségű halmazoknál tapasztalt relatív hővezetés, illetve a kezelés nélküli száraknál is tapasztalt szársűrűség hatására megváltozó relatív hővezetés szorzataként *(T28. ábra)*.

$$\lambda_{rel.Hs.n} \approx \lambda_{rel.sz.n} * \lambda_{rel.term.n} \qquad \textit{Egy. 6.}$$

Ahol: $\lambda_{rel.Hs.n}$: az állandó halmazsűrűségű szárhalmaz hővezetési tényezője n kezelési ciklus után, $\lambda_{rel.SZ.n}$: az állandó szálmennyiségű szárhalmaz hővezetési tényezője n kezelési ciklus után, $\lambda_{rel.term.n}$: Az n kezelési ciklus után egy 120+x kg/m^3 halmazsűrűségű kezelés nélküli szalmának megfeleltetett szárhalmaz hővezetési tényezője

Természetes állapotban állandó testsűrűségű szárak mennyiségének növekedésével nő a halmazsűrűség és a hővezetési tényező *(T17. ábra)*. A hővezetés változás mértéke adott halmazsűrűség intervallumban a görbék alapján számítható.

Kezelt változó testsűrűségű szárak és állandó szármennyiségű mintáknál csökken a halmazsűrűség, miközben csökken (nem monoton módon) a hővezetés. Konstans szármennyiségű kezelt szárhalmazok hővezetési tényezőjének megváltozása a kezelési ciklusszám függvényében jól számszerűsíthető (és a porozitás értékének, illetve struktúrájának változásaiból ered).

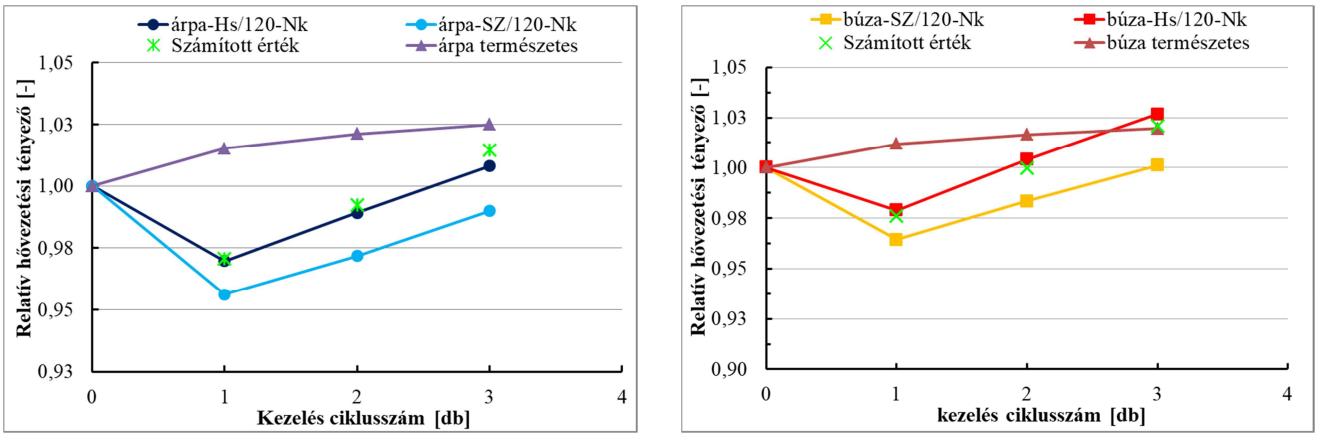
Állandó halmazsűrűségű kezelt halmazok a fentebb említett két állapot metszetében helyezkednek el, tehát a kezelés és a szármennyiség növekedésének hatása párhuzamosan jelenik meg.

1. táblázat: A vizsgált állapotok jellemző változásainak összehasonlító táblázata

Szárhalmaz típus	Kezelés	Szár testsűrűség	Szártartalom	Halmazsűrűség
Természetes	nincs	állandó	nő	nő
Állandó szármennyiség	van	csökken	állandó	csökken
Állandó halmazsűrűség	van	csökken	nő	állandó

Minden kezelés utáni szárhalmaz (aminek az állandó halmazsűrűsége 120 kg/m^3) megfeleltethető egy 120+x kg/m^3 halmazsűrűségű természetes, kezelés nélküli szárhalmaznak, ha ismert az átlagos szártartalom és a szárak tömegvesztesége (és így testsűrűségek csökkenése) a kezelésszám függvényében. Tehát ez a változás nagyon hasonló és jól leírható az alapján, amit a természetes állapotú szalma halmazsűrűségének növekedése közben tapasztalunk *(T17. ábra: árpa és búza-120 kg/m^3-140 kg/m^3 közt)* a hővezetési tényezőben, de ebben az esetben a halmazsűrűség nem, csak a szársűrűség növekszik. Ha ezt a változást összegezzük a kezelés hatásával a hővezetésre,

megkaphatjuk az állandó halmazsűrűségű kezelt szárak relatív hővezetési tényező-kezelési ciklusszám görbéjét. Fontos még egyszer kiemelni, hogy kötetlen állandó halmazsűrűségű szárhalmazokban egyidejűleg játszódik le a kezelések hővezetést redukáló hatása és a szársűrűség hővezetést növelő hatás.



a) b)

T28. ábra: Állandó halmazsűrűségű szárhalmaz kezelés és szársűrűség változás hatásából számított és mért relatív hővezetési tényezői közti különbség a ciklusszám függvényében:árpa (a), búza (b)

4. AZ ÉRTEKEZÉS EREDMÉNYEINEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI, TOVÁBBI KUTATÁSI KITEKINTÉS

A doktori értekezésemben található új tudományos eredmények és egyéb kísérleti eredmények bővítik, kiegészítik a természetes állapotú és a (makro- és mikroszinten) módosított szerkezetű szalmákról rendelkezésre álló információinkat kötetlen illetve kötött állapotban.

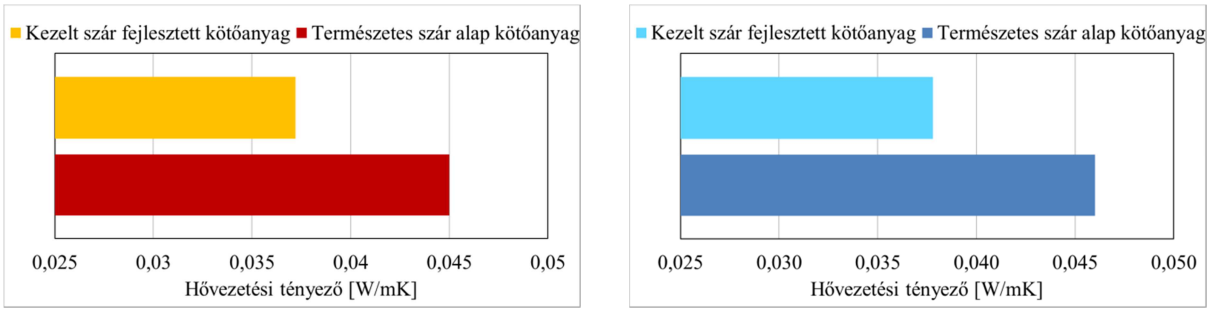
Javaslatot teszek, az ilyen típusú természetes szálaknál használható új kötőanyag típusra melynek segítségével, környezetbarát szigetelés készíthető, illetve a kötőanyagnak egy környezetterhelést csökkentő lehetséges fejlesztési irányát is felvetettem. A bemutatott kiegészítő anyag alkalmazása rámutat, hogy már kis mennyiségű, helyesen megválasztott adalék mennyit képes javítani a kötőanyag tulajdonságain. Például egyszerre növelhető a duktilitás és a szilárdság, miközben a vízállóság is javul. Bemutatom, hogy a kötetlen szárhalmazok hőtranszport tulajdonságait milyen módon befolyásolja a kötőanyag alkalmazása, ami mérsékelheti a gyártók alapanyag minőség ingadozásával kapcsolatos félelmeket, így ösztönözheti az ilyen szigetelések elterjedését. A kötőanyag kikeményítésével foglalkozó fejezet szemlélteti, hogy modern ipari technológiák alkalmazhatók az építőiparban is, ami jelentős energia megtakarításhoz vezet.

A környezetbarát úton módosított szárszerkezetről nyert információk megalapozhatnak egy új szemléletet a gabonaszárakból készített, fenntartható hőszigetelések kutatásában. Az eredmények rámutatnak, hogy mennyi energiát, nyersanyagot célszerű befektetni, illetve milyen technológiát érdemes alkalmazni az anyagtulajdonságok javítására, hogy a felületmódosítási, mechanikai és a mikrostruktúra szempontjából is optimális legyen. A kezelések tanulmányozásának további eredménye, hogy tovább csökkentheti a gyártókban a természetes anyagok minőségének ingadozásával szembeni fenntartásokat.

Szálas, illetve porózus hőszigetelő anyagokat leíró hőtranszport modellek nagy számban elérhetőek, azon modellek azonban, amelyek a hibrid jellegű anyagokat (pl. aerogélpaplan) tárgyalják, már jóval kisebb számban jelennek meg. A természetes polimer kompozitok (pl. fa, szalma) hőtechnikai viselkedését leíró modellekkel szintén keveset foglalkozik a szakirodalom. A szalma szárhalmazok hőtechnikai viselkedésének megértéséhez hozzájárul az általam alkotott modell, így a gabonaszár alapú szigetelések további fejlesztési lehetőségeihez is.

Összességében a kutatás legfontosabb eredménye, hogy a hővezetési tényező bizonyítottan csökkenthető, miközben egyéb anyagtulajdonságok javíthatóak. A jövőben várható hulladékkezelési problémák miatt, illetve a károsanyag kibocsátás redukálása érdekében érdemes szalma-szárkompozit hőszigetelés használatára ösztönözni az építőipart. Fontos előnye a tárgyalt szigetelésnek, hogy nem tartalmaz környezetkárosító összetevőket, így élettartama lejárta után könnyen, szennyezés nélkül visszaforgatható a természetbe. A napjainkban tapasztalható építőanyag hiány a hőszigetelések esetén különösen jelentős, így bármely eddig nem alkalmazott technológia (így a dolgozatban tárgyalt is) bevezetése a piacra lehetőséget nyújt egyéb nyersanyagforrások bevonására ezzel növelve a hőszigetelés termelést és csökkentve az építőanyag hiányt.

Fontos kiemelni, hogy a tárgyalt új tudományos eredmények alapját is jelentő kutatás jóval szélesebb körű az itt bemutatottnál. A tárgyalt szigetelőanyag egyéb fejlesztéseinek köszönhetően jobb teljesítményt ér el az itt feltüntetett értékeknél, ezt jól mutatja az ugyanazon árpa- és búzaszalmából előállított szigetelőanyag minta hővezetésében elért csökkenés a kutatás elejétől a jelenlegi állapotig *(T29. ábra).*



(a) **(b)**

T29. ábra: A fejlesztés során elért hővezetési tényező csökkenés a kötött (a) árpa és (b) búza szárhalmazok esetén

5. HIVATKOZÁSOK A TÉZISFÜZETBEN

[1] H., Tuomas *és mtsai.*, Deliverable D1.1: Availability of lignocellulosic biomass types of interest in the study regions, *BIOCOmmodity REfinery*. 2012, [Online]. Elérhető: http://www.biocore-europe.org/file/D1_1 Availability of lignocellulosic biomass types of interest in the study regions.pdf.

[2] D., Ürge-Vorsatz *és mtsai.*, 2015 Heating and cooling energy trends and drivers in buildings *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41, 85–98 https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.039.

[3] D., Bozsaky, 2010 The historical development of thermal insulation materials *Periodica Polytechnica Architecture* 41, 49 https://doi.org/10.3311/pp.ar.2010-2.02.

[4] Grand_view_Research, Building Thermal Insulation Market Size | Industry Report, 2019-2025, 2019. https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/building-thermal-insulation-market (elérés ápr. 23, 2020).

[5] J., Bull, Embodied Carbon of Insulation, *Embodied Carbon of Insulation*, 2012. http://www.greenspec.co.uk/building-design/embodied-carbon-of-insulation/.

[6] O., Väntsi, T., Kärki, Mineral wool waste in Europe: A review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16,. Springer Tokyo, 62–72, 2014, https://doi.org/10.1007/s10163-013-0170-5.

[7] C., Cornaro *és mtsai.*, 2020 An innovative straw bale wall package for sustainable buildings: experimental characterization, energy and environmental performance assessment *Energy and Buildings* 208, https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109636.

[8] O., Douzane *és mtsai.*, 2016 Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations *Journal of Building Engineering* 8, 91–98 https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.10.002.

[9] X., Yin *és mtsai.*, 2020 Energy-Saving Potential of Applying Prefabricated Straw Bale Construction (PSBC) in domestic buildings in Northern China *Sustainability (Switzerland)* https://doi.org/10.3390/SU12083464.

[10] K., Beaudry, C., MacDougall, 2019 Structural performance of non-plastered modular straw bale wall panels under transverse and gravity loads *Construction and Building Materials* https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.186.

[11] L., Shi *és mtsai.*, 2018 Analysis of moisture buffering effect of straw-based board in civil defence shelters by field measurements and numerical simulations *Building and Environment* 143, 366–377 https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.018.

[12] M., Fan, F., Fu, 2016 *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction* ISBN:9780081004302 https://doi.org/10.1016/c2014-0-03942-1.

[13] T., Ashour *és mtsai.*, 2011 Performance of straw bale wall: A case of study *Energy and Buildings* https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.001.

[14] P., Csanády, 2013 Szerkesztőségi bevezető *Metszet* 3, https://doi.org/ISSN: 2061-2710.

[15] A.,Z., Bajomi, N., Feldmár, ÉVES JELENTÉS A LAKHATÁSI SZEGÉNYSÉGRŐL 2018-Lakásminőség és energiaszegénység, 2018. https://www.habitat.hu/mivel-foglalkozunk/lakhatasi-jelentesek/lakhatasi-jelentes-2018/lakasminoseg-es-energiaszegenyseg/.

[16] C., Smith, C., Macdougall, 2008 An Investigation of Bond Strength in Straw Bale Construction *International Conference on Flax and Other Bast Plants* ISBN:9780980966404.

[17] O., Faruk *és mtsai.*, Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010, *Progress in Polymer Science*, 37,. 1552–1596, 2012, https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.

[18] Š., Hýsek *és mtsai.*, 2019 Influence of lignocellulosic waste pre-treatment on the characteristics of bond rupture *Sustainability (Switzerland)* https://doi.org/10.3390/su11174784.

[19] D., Jiang *és mtsai.*, 2020 Effect of Modification Methods of Wheat Straw Fibers on Water Absorbency and Mechanical Properties of Wheat Straw Fiber Cement-Based Composites *Advances in Materials Science and Engineering* 2020, https://doi.org/10.1155/2020/5031025.

[20] A.,M., Tobon *és mtsai.*, 2020 Impacts of test methods on the assessment of insulation materials' resistance against moulds *Building and Environment* 179, https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106963.

[21] X., Yin *és mtsai.*, 2020 Research on prediction model for durability of straw bale walls in warm (humid) continental climate-a case study in northeast china *Materials* https://doi.org/10.3390/ma13133007.

[22] I.,O., Miron *és mtsai.*, 2017 Organic Thermal Insulation Based on Wheat Straw *Procedia Engineering* https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.449.

[23] B., Ismail *és mtsai.*, 2020 Optimizing performance of insulation materials based on wheat straw, lime and gypsum plaster composites using natural additives *Construction and Building Materials* https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118959.

[24] L.,K., Norford *és mtsai.*, 1999 Development of low-cost wheat-straw insulation board *HVAC and R Research* 5, 249–263 https://doi.org/10.1080/10789669.1999.10391236.

[25] Z., Balador *és mtsai.*, Thermal and acoustic building insulations from agricultural wastes, in *Handbook of Ecomaterials*, 3, 2019, 2237–2257.

[26] E., Tůmová *és mtsai.*, 2017 Development of Organic and Biodegradable Insulating Material for ETICS *Procedia Engineering* https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.527.

[27] G., Bumanis *és mtsai.*, 2020 Gypsum, geopolymers, and starch-alternative binders for bio-based building materials: A review and life-cycle assessment *Sustainability (Switzerland)* 12, https://doi.org/10.3390/su12145666.

[28] M., La Gennusa *és mtsai.*, 2017 Composite building materials: Thermal and mechanical performances of samples realized with hay and natural resins *Sustainability (Switzerland)* https://doi.org/10.3390/su9030373.

[29] A., Karamanos *és mtsai.*, 2004 Heat transfer phenomena in fibrous insulating materials *Proceedings of 2004 WSEAS/IASME International Conference on Heat and Mass Transfer* 7 [Online]. Elérhető: http://www.geolan.gr/sappek/docs/publications/article_6.pdf.

[30] T., Xie *és mtsai.*, Theoretical and Numerical Study on Thermal Properties of Fibrous Insulation Materials. 2012, Elérés: dec. 08, 2019. [Online]. Elérhető: https://www.semanticscholar.org/paper/THEORETICAL-AND-NUMERICAL-STUDY-ON-THERMAL-OF-Xie-He/8ed568d9cbf39d8294b468cf5a166292bd113277.

[31] A., Hoseini *és mtsai.*, 2016 Aerogel blankets: From mathematical modeling to material characterization and experimental analysis *International Journal of Heat and Mass Transfer* 93, 1124–1131 https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.11.030.

[32] M.,A., Schuetz, L.,R., Glicksman, 1984 A basic study of heat transfer through foam insulation *Journal of Cellular Plastics* https://doi.org/10.1177/0021955X8402000203.

[33] G., Wang *és mtsai.*, 2017 Modelling of thermal transport through a nanocellular polymer foam: Toward the generation of a new superinsulating material *Nanoscale* https://doi.org/10.1039/c7nr00327g.

[34] S.,K., Wiśniewska *és mtsai.*, 2003 Surface properties of barley straw *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* https://doi.org/10.1016/S0927-7765(02)00178-9.

[35] B., Szostak, G.,L., Golewski, 2020 Improvement of strength parameters of cement matrix with the addition of siliceous fly ash by using nanometric C-S-H seeds *Energies* https://doi.org/10.3390/en13246734.

[36] E., John *és mtsai.*, 2019 Accelerating cement hydration with C-S-H seedstle *ZKG-Cement, lime, gypsum* 4,.

[37] S.,E., Moghaddam *és mtsai.*, 2017 Morphogenesis of cement hydrate *Journal of Materials Chemistry A* https://doi.org/10.1039/C6TA09389B.

[38] Z., Zhang *és mtsai.*, 2018 Morphology of cementitious material during early hydration *Cement and Concrete Research* https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.004.

[39] K., Song, P., Mukhopadhyaya, 2016 Vacuum insulation panels (VIPS) in building envelope constructions: An overview *International Review of Applied Sciences and Engineering* 7, 113–119 https://doi.org/10.1556/1848.2016.7.2.7.

[40] A., Karamanos *és mtsai.*, 2008 The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool *Energy and Buildings* 40, 1402–1411 https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.01.004.

[41] R.,A., Shishkin *és mtsai.*, 2014 Water-glass-based thermal paste for high-temperature applications *Journal of Ceramic Science and Technology* https://doi.org/10.4416/JCST2014-00005.

[42] A., Bakatovich, F., Gaspar, 2019 Composite material for thermal insulation based on moss raw material *Construction and Building Materials* https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116699.

[43] F., Englund, R.,M., Nussbaum, 2000 Monoterpenes in Scots pine and Norway spruce and their emission during kiln drying *Holzforschung* https://doi.org/10.1515/HF.2000.075.

[44] D., Fengel, 1966 Über die Veränderungen des Holzes und seiner Komponenten im Temperaturbereich bis 200°C—Dritte Mitteilung: Thermisch und mechanisch bedingte Strukturänderungen bei FichtenholzOn the changes of the wood and its components within the temperature range up to *Holz als Roh- und Werkstoff* https://doi.org/10.1007/bf02610356.

[45] K., Németh, 1989 A faanyag abiotikus degradációja.

[46] R.,H., White, M.,A., Dietenberger, Wood Products: Thermal Degradation and Fire, in *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 2001.

[47] B., Košiková *és mtsai.*, 1999 Interaction of lignin and polysaccharides in beech wood (Fagus sylvatica) during drying processes *Wood Science and Technology* https://doi.org/10.1007/s002260050123.

[48] F., Kollman, D., Fengel, 1965 Changes in the chemical composition of wood by thermal treatment *Holz als Roh- und Werkstoff* 23, 461–468.

[49] F., Kollmann, A., Schneider, 1963 On the Sorption Behaviour of Heat Stabilized Wood *Holz als Roh - und Werkstoff*.

[50] S., Nikolov, E., Encev, 1967 Effect of heat treatment on the sorption dynamics of Beech wood *Nauc. Trud. Lesoteh.* 14, 71–77.

[51] K., D'Jakonov, T., Konepleva, 1967 Moisture absorption by scots pine wood after heat treatment *Arhangel'sk* 10, 112–114.

[52] A., Schneider, 1971 Investigations on the influence of heat treatements within a range of temperature from 100°C to 200°C on the modulus of elasticity, maximum crushing strength, and impact work of Pine sapwood and Beechwood *Holzforschung* 29, 431–440.

[53] A., Schneider, 1973 Investigation on the convection drying of lumber at extremely high temperatures. Part II: Drying degrade, changes in sorption, colour and strength of pine sapwood and beech wood at drying temperatures from 110° to 180 °C *Holz als Roh- und Werkstoff* 31, 198–206.

[54] A.,G., McDonald *és mtsai.*, 1999 Characterisation of the condensate generated from vacuum-drying of radiata pine wood *Holz als Roh - und Werkstoff* https://doi.org/10.1007/s001070050052.

[55] A.,G., McDonald *és mtsai.*, 2002 Assessment of air emissions from industrial kiln drying of pinus radiata wood *Holz als Roh - und Werkstoff* https://doi.org/10.1007/s00107-002-0293-1.

[56] B., Sundqvist, 2004 Colour changes and acid formation in wood during heating *Doctoral thesis* 154.

AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓIM

[1] O., Fenyvesi, D., Csanády, 2021 Effect of drying method on compressive strength of straw-based thermal insulations *Materials Structures Technology* https://doi.org/10.31448/mstj.03.01.2020.108-116.

[2] D., Csanády, O., Fenyvesi, 2021 Shear behaviour of silicate-based structural adhesives for timber *Epitoanyag - Journal of Silicate Based and Composite Materials* https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2021.12.

[3] D., Csanády, O., Fenyvesi, B., Nagy, 2021, Heat transfer in straw-based thermal insulating materials, Materials, ISSN 1996-1944.

[4] D., Csanády, B., Nagy, 2020 Biodegradable and fire-resistant thermal insulation boards made of wheat straw [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/344418814_Biodegradable_and_fire-resistant_thermal_insulation_boards_made_of_wheat_straw.

[5] D., Csanády, O., Fenyvesi, Development of new-generation, eco-friendly thermal insulation board, in Proc. of the 13th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Paris: FIB, 2020, 10–17.

[6] D., Csanády et al., 2019 Effect of Binder on Thermal Conductivity of Environmentally Friendly Straw-based Thermal Insulation Boards International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures –SMSS 2019 7–8 ISBN:9780333227794.

[7] D., Csanády, O., Fenyvesi, 2018 Opportunities for biodegradable straw-based thermal insulations Proceedings of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering ISBN:9788001064016.

[8] D., Csanády, O., Fenyvesi, Kötetlen szalmaszár halmazok mikro- és mikrostruktúrája módosításának hatása a hővezetésére, in XXIV. Nemzetközi Építéstudományi Online Konferencia – ÉPKO, G. Köllő, Ed. Csíksomlyó: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2020, 32–38.

[9] D., Csanády, O., Fenyvesi, B., Nagy, 2022, Empirical model of heat treated straw bulks thermal conductivity based on changes in mass and chemical composition, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, ISSN 1588-2926., (leadva)

[10] D., Csanády, O., Fenyvesi, Kötött és kötetlen szalmaszár halmazok kezelési ciklusszámának hatása a halmazok hővezetésére és felületi tulajdonságira, in XXV. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia – ÉPKO2021, G. Köllő, Ed. Csíksomlyó, 2021, 48–54.

[11] D., Csanády, K., Kapitány, 2021, Stem porosity determination of cereals using conventional laboratory tests and image processing on scanning electron microscope images, Journal of natural fibres. ISSN: 1544-0478., (bevéve)

[13] D., Csanády, O., Fenyvesi, Biológiailag lebomló táblás hőszigetelő anyag tűzállósága, in XXII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia-ÉPKO 2018, G. Köllő, Ed. Csíksomlyó: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2018, 52–57.

[13] D., Csanády, G., Balczó, 2017 Biológiailag lebomló táblás hőszigetelő anyagok Válogatott munkák a BME Építőmérnöki Karának 2016. évi TDK Konferenciájáról : TDK SZEMELVÉNYEK 2016.

[14] D., Csanády, D., Szagi, B., Nagy, 2021, Természetes és újrahasznosított anyagokból készülő hőszigetelések fejlesztése, In: Szalay, László Épületeink és Műemlékeink 2021 , Budapest, Magyarország : Konferencia Iroda Bt. (2021) p. 32 , 6 p., ISBN: 9786155831225