



**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR
OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA**

Lignocellulóz szálakkal erősített polimer kompozitok:
szemcseszerkezeti jellemzők, kölcsönhatások, tulajdonságok

PhD értekezés tézisei

Szerző: Faludi Gábor
Témavezető: Pukánszky Béla

Polimerfizikai Kutatócsoport
Anyag- és Környezetkémiai Intézet
Természettudományi Kutatóközpont



Műanyag- és Gumiipari Laboratórium
Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem



2020.

1. Bevezetés

A műanyagok a mindennapi élet számos területén megtalálhatóak az ipari alkalmazásoktól a háztartásokban található termékekig. A műanyagok, változatosak és kielégítik a legkülönbözőbb igényeket kezdve az olcsó tömegműanyagokból készített termékekkel a csúcstechnológiát képviselő alkalmazásokig, mint például a repülőgépipari, elektronikai vagy egészségügyi termékek. A tömegműanyagok jelentős felhasználása ugyanakkor nagymennyiségű lakossági hulladék megjelenését, és a környezetvédelmi aggályok további növekedését eredményezi. A lakosság növekvő környezettudatossága pedig az ipart új, egyre környezetbarátabb anyagok alkalmazásának irányába tereli. Ennek megfelelően egyre gyakoribb a természetes polimerek, mint például a cellulóz és a keményítő alkalmazása, és számos polimer előállítása történhet már természetes, megújuló nyersanyagforrásból. Néhány közülük, mint a bio-polietilén vagy bio-polietilén-tereftalát teljes mértékben azonos a technológiával előállított párjával, azaz nem bonthatók le biológiailag. A Politejsav (PLA) ezzel szemben komposztálható és mindemellett tulajdonságai és ára is elfogadható. Nem meglepő módon az érdeklődés ez iránt az anyag iránt mind a tudományos társadalom mind az ipar részéről elképesztő mértékben megnőtt.

Annak ellenére, hogy napjainkban a PLA és más biopolimerek jelentősége, így felhasználásuk is számottevően növekedett, de természetesen vannak hátrányos tulajdonságaik is. Feldolgozhatóságuk általában rosszabb, mint a hagyományos tömegműanyagok feldolgozhatósága, hő- és nedvesség érzékenyek és tulajdonságaik sok esetben nem elégítik ki az igényes alkalmazások által támasztott követelményeket. A PLA fizikai öregedése a tulajdonságok gyors változásához, ridegedéshez vezet, alacsony üvegesedési hőmérséklete tovább korlátozza alkalmazhatóságát nagyon sok felhasználási területen. Ennek eredményeként sok más biopolimerhez hasonlóan a PLA-t is gyakran módosít-

ják különböző eljárásokkal. A deformálhatóság és a ridegség kompenzálható lágyítószer vagy ütésálló adalékanyag alkalmazásával. A mérettartás és a me-revség javítása ásványi töltőanyagok vagy szálak alkalmazásával történhet. Egyre gyakrabban használnak természetes szálakat is biopolimerek tulajdonsá-gainak módosítására, mivel a két anyag kombinálása környezetbarát anyagokat eredményez. A módosítás azonban gyakran további problémákat eredményez, ezért ezeknek a rendszereknek az alapos tanulmányozása és mélyebb megisme-rése elengedhetetlen a jövőbeni alkalmazások szempontjából.

A természetes töltő- és erősítőanyagok felhasználása nem tekinthető újnak a műanyagiparban, de ezek az anyagok világszerte újra reneszánszukat élik. Lignocellulóz alapú komponenseket tartalmazó kompozitok az 1900-as évek óta ismertek, elsősorban az építő- és bútoripar¹, de természetesen egyéb területeken is használták őket. A természetes töltőanyagok és szálak előnyös tulajdonságainak felismerése után, egyre több kutatócsoport kezdett munkál-kodni azon, hogy a kompozitokban eddig alkalmazott üveg és szénszálakat helyettesítse azokkal, és intenzíven tanulmányozták a természetes szálakkal erősített hőre keményedő polimer mátrixú kompozitokat^{2,3,4}.

Napjainkban a fa-műanyag kompozitok (WPC) mátrixanyagaként fel-használt hőre lágyuló polimerek száma folyamatosan növekszik. Az egyik nagy előnye ezeknek az anyagoknak, hogy a belőlük hagyományos műanyagfeldolgozási technológiákkal készíthetők termékek a legkülönbözőbb alkalmazások számára. A leggyakrabban tömegműanyagokat használnak a

¹ Youngquist, J. A.: *Wood Handbook. Wood as an Engineering Material*. Forest Products Laboratory: Madison 1999.

² Abdelmouleh, M.; Boufi, S.; Belgacem, M. N.; Dufresne, A.; Gandini, A.: *J. Appl. Polym. Sci.* **98**, 974-984 (2005)

³ Gassan, J.; Bledzki, A. K.: *Compos. Sci. Technol.* **59**, 1303-1309 (1999)

⁴ Mishra, S.; Naik, J. B.; Patil, Y. P.: *Compos. Sci. Technol.* **60**, 1729-1735 (2000)

kompozitok előállítására⁵; és a konkrét polimer kiválasztása a tervezett alkalmazásnak megfelelően történik.

A természetes erősítőanyagok számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek. Nagy mennyiségben állnak rendelkezésünkre⁶, áruk alacsonyabb, mint a hagyományos erősítőanyagoké és versenyképes az ásványi töltőanyagokkal szemben is. Szilárdságuk és merevségük nagy, és mindemellett sűrűségük is alacsony. További fontos előnyös tulajdonságuk, hogy megújuló nyersanyagforrásból származó anyagok, gyakran egyéb technológiák melléktermékei. Biológiailag lebomlanak és a hulladékok kezelése is könnyedén megoldható. A felsorolt előnyök mellett azonban hátrányos tulajdonságaik is vannak. Ezek az erősítőanyagok hő- és nedvességérzékenyek, keresztirányú szilárdságuk kicsi és a legtöbb polimer mátrixszal gyenge kölcsönhatás kialakítására képesek csak alacsony felületi energiájuk miatt.

2. Elméleti háttér

Annak ellenére, hogy természetes szálakkal erősített hőre lágyuló kompozitokat nagyon sok területen használnak, még mindig intenzív kutatások folynak ezen a területen. Ezeknek a kutatásoknak célja a kompozitok hátrányos jellemzőinek kiküszöbölése, a tulajdonságok javítása és gyakran az ár csökkentése. Az ár és a teljesítőképesség optimalizálása kizárólag abban az esetben lehetséges, ha a tulajdonságokat meghatározó tényezők ismertek. A természetes szálakkal erősített polimerek heterogén anyagok, ennek megfelelően tulajdonságaikat a komponensek jellemzői, az összetétel, a határfelületi kölcsönhatások és a szerkezet határozzák meg. Mind a négy tényező egyaránt fontos és

⁵ Markarian, J.: *Plastics, Additives and Compounding* **4**, 18-21 (2002)

⁶ Suddell, B. C.; Evans, W. J.: in *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*, Mohanty, A. K.; Mishra, M.; Drzal, L. T. eds. CRC Press: Boca Raton 2005. 231-259.

ezek megfelelő beállítása szükséges az optimális teljesítőképesség és gazdaságosság eléréséhez.

A mátrix polimer jellemzői jelentősen befolyásolják a szálaknak a kompozitok tulajdonságaira gyakorolt hatását; a merevség nagy valószínűséggel az egyik legfontosabb jellemzője a mátrixnak, míg a szálak tulajdonságainak hatása sokkal bonyolultabb és nehezebben értelmezhető. A kémiai összetétel, a szemcseszerkezet, a felületi energia és természetesen egyéb jellemzők mind szerepet játszanak a kompozitok tulajdonságainak meghatározásában. A szemcseszerkezet és különösképpen a szemcsék alakja bír nagy fontossággal a fa-műanyag kompozitok esetében. A kis szemcsék gyakran aggregálódnak, míg a nagyobb méretűek nagyon gyengén kötődnek a legtöbb polimer mátrixhoz, ami könnyedén a határfelületek elválásához, azaz a fázisok szeparációjához vezet. Az anizotrop részecskék mindig orientálódnak a feldolgozás során, és az erősítés mértéke nagymértékben függ a relatív orientáció és a terhelő erő irányától.

Az összetétel, azaz a kompozitok száltartalma széles határok között változhat. A szálak adagolásának célja általában a kompozitok szilárdságának és a merevségének javítása. Ehhez a lehető legnagyobb mennyiségű szál alkalmazására van szükség, de figyelembe kell vennünk, hogy a kitűzött tulajdonságok javulása más jellemzők romlásával járhat együtt. Mivel a különböző tulajdonságok eltérő mértékben és módon függenek a száltartalomtól, ezért a kompozitok tulajdonságait minden esetben a száltartalom függvényében célszerű vizsgálni.

A töltőanyagot, illetve rövid szálakat tartalmazó kompozitok szerkezetét gyakran kisebb figyelem kíséri, mint amennyire fontosságuk alapján szükséges lenne. A legtöbbször a részecskék homogén eloszlását tételezik fel a polimer mátrixban, ami a legritkább esetben teljesül csak, és nagyon gyakran a szemcsékhez köthető szerkezetek alakulnak ki a kompozitban. A WPC tekinte-

tében a leggyakoribb ilyen szerkezeti hatások az aggregáció, az orientáció, és a szemcsék, vagy szálak feldolgozás során bekövetkező tördelődése. Az aggregáció nagy felületi energiával és kis szemcsemérettel rendelkező töltőanyag alkalmazása mellett a leggyakoribb. Az orientáció, ha lehet még fontosabb szerkezeti hatás a természetes töltő-és erősítőanyagot tartalmazó kompozitokban. Minden feldolgozás technológia esetén bekövetkezik valamilyen mértékű orientáció, ami a kompozit szilárdságának és a merevségének növekedését eredményezi az orientáció irányával megegyező irányban

A határfelületi kölcsönhatások szerepe döntőfontosságú minden kompozitban, de legfőképp a szálerősítésű polimerekben. Az erős szemcse-szemcse kölcsönhatás aggregációhoz vezet, míg a mátrix/töltőanyag kölcsönhatás eredménye egy határfázis kialakulása, melynek tulajdonságai jelentősen eltérnek a két komponens tulajdonságaitól. A kölcsönhatások módosíthatók fizikai és kémiai módszerekkel. Az egyik gyakran alkalmazott fizikai módszer a merce-rizálás, azaz a cellulóz szálak alkáli kezelése, ami növeli a szálak szakítószilárdságát⁷. A szálak felületmódosítása valószínűleg még szélesebb körben alkalmazott eljárás. Ez az eljárás a szálak bevonását jelenti egy kis molekula-tömeggű, apoláris, szerves molekulával, a szemcse-szemcse kölcsönhatásokat csökkentése érdekében. Sajnálatos módon ez az eljárás nemcsak a szemcse-szemcse kölcsönhatást, hanem a kompozitok szilárdságát is csökkenti⁸.

A kémiai felületmódosítás célja vagy a szál polaritásának és reaktivitásának csökkentése, vagy a kémiai kapcsolás. Az első kategóriába az éteresítés és az észteresítés^{9,10} tartozik. A cellulóz molekulák hidroxil csoportjainak kevésbé poláris csoportokra történő cseréje csökkenti a nedvességfelvételt és az aggregációt, de ezzel egy időben csökkenti a határfelületi kölcsönhatások erős-

⁷ Gassan, J.; Bledzki, A. K.: *J Appl. Polym. Sci.* **71**, 623-629 (1999)

⁸ Dányádi, L.; Mócsó, J.; Pukánszky, B.: *Compos. Part A-Appl. S.* **41**, 199-206 (2010)

⁹ Baiardo, M.; Frisoni, G.; Scandola, M.; Licciardello, A.: *J. Appl. Polym. Sci.* **83**, 38-45 (2002)

ségét is. A szükséges feszültségátvitel eléréséhez erős kölcsönhatások szükségesek, amit a mátrix és a szál közötti kovalens kötés kialakításával érhetünk el. A funkcionizált polimerekkel történő kezelés egy szintén gyakran alkalmazott módszer, elsősorban poliolefin mátrixú kompozitokban. A funkcionizált polimer poláris csoportja reagál a szál felületével, amíg a polimer láncnak a mátrixba történő interdiffúziója megfelelő feszültségátvitelt, így a kompozit szilárdságának növekedését eredményezi^{11,12,13}. A kapcsolóanyagok^{14,15}, viszont kovalens kötésekkel létesítenek a mátrix és a szál között reagálva mindkettővel. A kapcsolóanyagot úgy kell megválasztani, hogy olyan funkciós csoportokat tartalmazzon, amelyek képesek reagálni mindkét komponenssel.

A kölcsönhatások nagyon gyakran meghatározzák a heterogenitások környezetében lejátszódó lokális deformációs folyamatokat. Felmerülhet a kérdés, hogy mennyire fontosak is ezek a folyamatok, de végső soron ezek fogják meghatározni az egész kompozit tönkremenetelét, teljesítőképességét és makroszkopikus tulajdonságait. Ennek megfelelően a deformációs folyamatok ellenőrzése, és a domináló folyamatok megindulásához tartozó feszültség értékek növelése nagy fontossággal bír. Nagyon gyakran a szálak tördelődése indítja el ezeket a folyamatokat, amelyek a kompozit tönkremeneteléhez vezetnek, ezért nagy belső szilárdsággal rendelkező szálak választása, vagy a belső szilárdság növelése jobb teljesítőképességű kompozitokat eredményezhet.

Mivel a természetes szálakkal erősített polimer kompozitok az anyagok egy relatív új csoportjába tartoznak, a fent említett tényezők tulajdonságokat befolyásoló hatásáról rendelkezésünkre álló megbízható információ nagyon

¹⁰ Freire, C. S. R.; Silvestre, A. J. D.; Neto, C. P.; Belgacem, M. N.; Gandini, A.: *J. Appl. Polym. Sci.* **100**, 1093-1102 (2006)

¹¹ Bledzki, A. K.; Fink, H. P.; Specht, K.: *J. Appl. Polym. Sci.* **93**, 2150-2156 (2004)

¹² Karnani, R.; Krishnan, M.; Narayan, R.: *Polym. Eng. Sci.* **37**, 476-483 (1997)

¹³ Felix, J. M.; Gatenholm, P.: *J. Appl. Polym. Sci.* **42**, 609-620 (1991)

¹⁴ Gassan, J.; Gutowski, V. S.; Bledzki, A. K.: *Macromol. Mater. Eng.* **283**, 132-139 (2000)

¹⁵ Maldas, D.; Kokta, B. V.; Daneault, C.: *J. Appl. Polym. Sci.* **37**, 751-775 (1989)

ritka. A határfelületi adhézióról közölt adatok gyakran kétségbe vonhatóak, a szerkezeti hatásokat szinte soha sem vizsgálják, és még kevesebbet tudunk a nagyon komplex szerkezettel rendelkező cellulóz szálak deformációs és tönkremeneteli folyamatokat befolyásoló hatásáról. A deformációs folyamatok vizsgálatát szintén gyakran mellőzik a legtöbb tanulmányban, ami ahhoz vezet, hogy legtöbbször próbálgatással igyekeznek kifejleszteni elfogadható tulajdonságokkal rendelkező anyagokat. Az anyag tönkremeneteléséhez vezető alapvető folyamatok ismerete azonban lehetővé teszi azok kontrollálását és így a kompozitok jellemzőinek javítását, optimalizálását és beállítását az adott alkalmazásnak leginkább megfelelő tulajdonságokra.

A Műanyag- és Gumiipari Laboratórium és az MTA TTK Anyag- és Környezetkémiai Intézetével együttműködve hosszú ideje foglalkozik heterogén polimer rendszerek, beleértve rövidszál erősítésű kompozitok kutatásával és fejlesztésével. Számos publikáció és két PhD disszertáció is született a témában, a Laboratóriumban a közelmúltban. Az első a határfelületi kölcsönhatások vizsgálatával foglalkozott polipropilén (PP)/faliszt kompozitokban¹⁶ míg a második a heterogén polimer rendszerekben, elsősorban a faliszt erősítésű PP kompozitokban lejátszódó mikromechanikai deformáció folyamatok vizsgálatára fókuszált¹⁷. Az így megszerzett információk kellő mélységű tudást eredményeztek és megnyitották ez előtt a disszertáció az utat. Laboratóriumunk résztvevő volt az Erdei erőforrások fenntarthatósága biológiai alapú kompozitok fejlesztésén (FORBIOPLAST) keresztül című, 2008-ban kezdődő FP7-es projektben is. Csoportunk feladata a lehetőségek feltárása és eljárások kifejlesztése volt, amelyek lehetővé teszik a PP/falisz és PLA/falisz kompozitok tulajdonságainak javítását a határfelületi kölcsönhatások és a fa-

¹⁶ Dányádi, L.: *Interfacial Interactions in Fiber Reinforced Thermoplastic Composites*, PhD thesis. Budapest University of Technology and Economics: Budapest 2009.

¹⁷ Renner, K.: *Micromechanical Deformation Processes in Polymer Composites*, PhD Thesis. Budapest University of Technology and Economics: Budapest 2010.

liszt jellemzőinek módosításán keresztül. Tudományos eredményeinket számos publikációban foglaltuk össze, de néhány esetben sikerült a gyakorlati alkalmazások fejlesztésébe is átültetni eredményeinket, illetve egy szabadalom is előkészítés alatt áll. Szép számmal készültek BSc és MSc dolgozatok is a munka keretében, ami önmagában is a projekt egyik legfontosabb eredményének tekinthető.

3. Célok

Természetes szállal erősített kompozitokat használata manapság már kiforrott technológia, ahol a gazdasági növekedés mértéke is jelentős. Annak ellenére, hogy a termékeknek a felhasználási területe nagyon széles, még mindig kiterjedt kutatások folynak, hogy ezen kompozitok gyengeségeit kiküszöböljük, tulajdonságaikat javítsuk, és tovább csökkentsük az árakat. Az ár és a teljesítőképesség optimalizálása azonban csak akkor lehetséges, ha a tulajdonságokat meghatározó tényezők ismertek. A jelenleg is létező termékek és technológiák fejlesztése mellett a kutatók és az ipar is folyamatosan új fejlesztéseken dolgoznak.

Az utóbbi években a szakma érdeklődése új területekre irányult, és annak ellenére, hogy még mindig sok kutatás foglalkozik tömegműanyag alapú fa-műanyag kompozitokkal, a megújuló nyersanyagforrásból származó bioanyagok kerültek a figyelem középpontjába.

Ezek az új anyagok magukba foglalják a természetes polimereket és származékaikat, mint pl. keményítő, cellulóz, cellulóz-acetát, Politejsav (PLA), természetes szálak és a farost. Ennek eredményeként az értekezés fő célja, hogy kiterjesszük ismereteinket a természetes szál erősítésű biokompozitok tulajdonságait meghatározó tényezőket illetően, megállapítsuk a szerkezet-tulajdonság összefüggéseket, tanulmányozzuk és módosítsuk a határfelületi kölcsönhatásokat és mennyiségileg jellemezzük azokat, illetve felfedjük a

természetes szálakkal kapcsolatos speciális kérdéseket. Céljaink elérése érdekében, felhasználjuk a heterogén rendszerekkel kapcsolatos eddigi ismereteinket és kiterjesztjük őket az új anyagokra és problémákra. A munka végső célja az volt, hogy iránymutatásokat dolgozzunk ki, amelyek segítséget nyújtanak a teljes egészében bio-nyersanyagokra épülő, elsősorban a PLA/faliszt rendszerek fejlesztésében.

4. Anyagok és technikák

Hatféle lignocellulóz szállal készítettünk PLA alapú kompozitokat széles összetételi tartományban. A lignocellulóz szálak méretét lézer fényszórásos módszerrel határoztuk, míg az alaki tényező meghatározása pásztázó elektron mikroszkópos (SEM) felvételek alapján, egyedi szemcsék főbb méretének meghatározásával történt. A szálak jelölésére használt rövidítések mutatják azok eredetét (fa, W; mikrokristályos cellulóz, MCC; kukoricacsutka, CC) és alaki tényezőjük tízszeresét. Két reaktív kapcsolóanyagot N,N-(1,3-fenilén dimaleimid) (BMI) és 1,1-(metilén-di-4,1-fenilén)bismaleimid (DBMI) használtunk a határfelületi kölcsönhatások javítására PLA/faliszt kompozitok. Néhány kísérletben egy fenolgyantát is alkalmaztunk a szálak impregnálására.

Mind a mátrix polimert, mind a szálakat szárítottuk a kompozitok készítése előtt. A száltartalmat széles határok között változtattuk, és néhány esetben kapcsolóanyagot is alkalmaztunk. A komponenseket egy belső keverőben homogenizáltuk, majd a homogenizált anyagból préseléssel állítottunk elő lapokat. Minden mintát szabályozott hőmérsékletű és páratartalmú szobában tartottunk két héttel a további tesztelés előtt.

A mechanikai tulajdonságok meghatározása szakítóvizsgálattal történt a préselt lapokból kivágott próbatesteken. Mikromechanikai deformációs folyamatokat akusztikus emisszió (AE) módszerrel követtük, míg a szemcseszer-

kezet és a kompozitok szerkezetének vizsgálatát pásztázó elektron mikroszkópiával végeztük. A tönkremeneteli folyamatokat modell kompozitok polarizációs optikai mikroszkópos (POM) vizsgálatával követtük nyomon. Az impregnált faliszt nedvességfelvételét tömegméréssel jellemeztük.

5. Eredmények

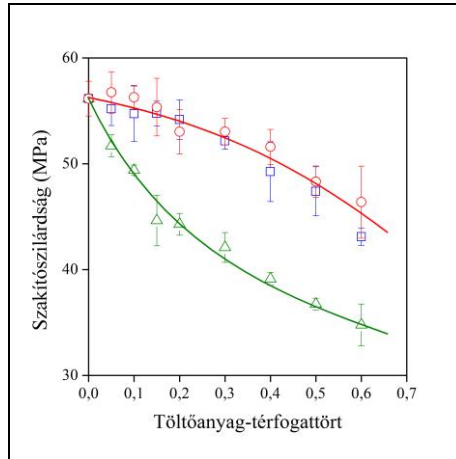
A munka első szakaszában hat, kereskedelmi forgalomban kapható, eltérő kémiai összetétellel és szemcsemérettel rendelkező természetes töltőanyag adagolásának hatását vizsgáltuk PLA alapú kompozitok mechanikai tulajdonságaira és tönkremeneteli folyamataira. Mivel nagyon kevés megbízható információ található az irodalomban a PLA/faliszt kompozitokban kialakuló határfelületi kölcsönhatásokról, különös figyelmet fordítottunk a komponensek közötti adhézió erősségének becslésére. A legtöbb a témában fellelhető publikáció^{18,19} azt állítja, hogy a PLA és a faliszt között gyenge kölcsönhatás alakul ki, de gyakran ellentmondásos eredményeket közölnek. Sajnálatos módon ezekben a kompozitokban nincs lehetőség a kölcsönhatás erősségének közvetlen meghatározására, így három indirekt módszert is használtunk a határfelületi adhézió mennyiségi leírására. A mechanikai és akusztikus emissziós mérések, továbbá a SEM vizsgálatok mind azt jelezték, hogy az irodalomban olvasható állításokkal ellentétben a PLA és a természetes szálak között kialakuló határfelületi adhézió meglehetősen erős. Az erős kölcsönhatás következtében az erősítés mértéke csak kismértékben függ az erősítő anyag szemcseszerkezeti jellemzőitől. Mind az akusztikus emissziós mérések, mind a mikroszkópia azt mutatta, hogy a domináló mikromechanikai deformációs folyamat a szálak tördelődése, és ennek megfelelően szoros összefüggést mutattunk ki a szálak törésé-

¹⁸ Bax, B.; Müssig, J.: *Compos. Sci. Technol.* **68**, 1601-1607 (2008)

¹⁹ Huda, M. S.; Drzal, L. T.; Misra, M.; Mohanty, A. K.: *J. Appl. Polym. Sci.* **102**, 4856-4869 (2006)

nek megindulásához tartozó kezdeti feszültség, az erősítés mértéke és a kompozitok végső szilárdsága között.

A munka első szakaszában született eredmények rámutattak továbbá, hogy a szálak tördelődése mellett néhány egyéb deformációs folyamat, mint például a határfelületek elválása is bekövetkezik a PLA/faliszt kompozitok deformációja során. Ebből adódóan, a kompozitok tulajdonságai tovább javíthatók a kölcsönhatások erősségének növelésével. Céljaink elérésére az egyik

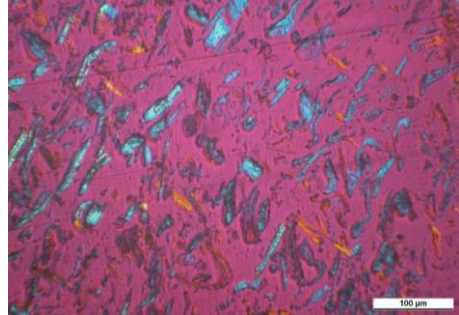


1. ábra A faliszt tartalom és a kapcsolás hatása a PLA/faliszt kompozitok szakítószilárdságára; Szimbólumok: \square BMI, \circ DBMI, \triangle kezeletlen.

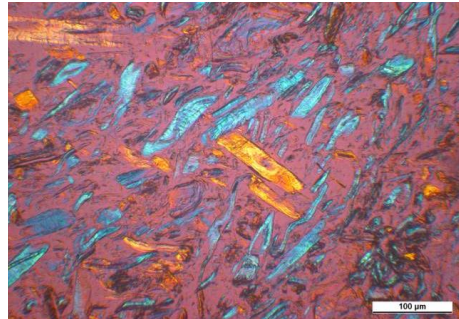
leghatékonyabb módszer a fázisok közötti kapcsolás, amely kovalens kötést hoz létre a komponensek között, következésképpen kísérletsorozatot dolgoztunk ki, amiben két reaktív kapcsolóanyagot, BMI és DBMI használtunk a PLA és a faliszt közötti határfelületi adhézió javítására. Mindkét kapcsolóanyag hatékonynak bizonyult, azaz növelte a kompozitok szakítószilárdságát, ahogy az az 1. ábrán is látható. A szilárdság mellett a merevség és a deformálhatóság is javult, további bizonyítékként szolgálva a kapcsolás hatékonyságára. A molekula nagyobb flexibilitásának köszönhetően, a DBMI hatékonyabb kapcsolóanyagoknak bizonyult a vizsgált kompozitokban, mint a BMI. Meg kell jegyezni azonban, hogy a kapcsolós hatása a tulajdonságokra csekély, mivel csak néhány nagyobb szemcse esetében lép fel külső erőhatásra a határfelületek elválása. Úgy tűnik a kisebb szemcsék elég erősen kötődnek a mátrixhoz, bizonyítva korábbi következtetéseinket, miszerint a határfelületi adhézió kapcsolás

nélkül is elég erős a PLA/faliszttal kompozitokban. Ennek megfelelően a kapcsolás hatásának függenie kell a szemcsemérettől, azaz a kapcsolás hatása erőteljesebben érvényesül nagyobb szemcsék esetén.

A fa-polimer kompozitok szerkezetét érintő kérdésekkel nagyon ritkán foglalkoznak csak az irodalomban. A legfőbb ok, hogy a faliszttal szemcsék elég nagyok, felületi energiájuk pedig alacsony, így az aggregáció megjelenésére nem számíthatunk ezekben a kompozitokban. A szemcsék alacsony²⁰ alakú tényezője miatt pedig az orientáció hatása szinte lényegtelennek tűnő szintre csökken. Másrészt viszont, korábbi vizsgálataink azt mutatták, hogy az ipari gyakorlatban használt magas faliszttal tartalom mellett, a szemcsék pusztán



a)



b)

2. ábra A W126 kompozitról készített POM felvételek; a) 20, b) 40 tf% faliszttal. Hálós szerkezet kialakulása nagy faliszttal tartalom mellett.

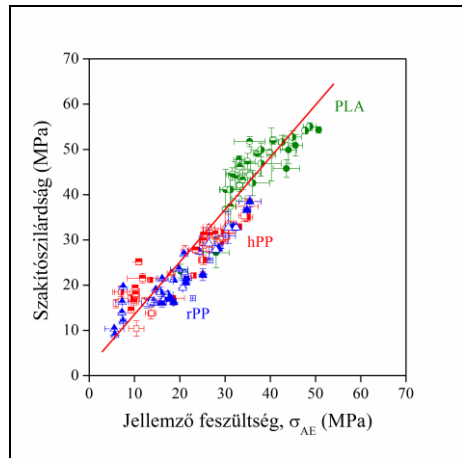
geometriai okok következtében, de összeérnek. Az összeérés kialakulásának valószínűsége és mértéke pedig függ a szemcseszerkezeti jellemzőktől. Az első munkaszakasz eredményei azt mutatták, hogy a legnagyobb alakú tényezővel rendelkező szálak (W126) rendellenes viselkedést mutatnak, egy bizonyos száltartalom felett adva a PLA mátrixhoz; A modulus, de különösképpen a szilárdság drasztikusan csökken. Ennek következtében ennek a száltípusnak

²⁰ de Meijer, M.; Haemers, S.; Cobben, W.; Militz, H.: *Langmuir* **16**, 9352-9359 (2000)
a viselkedését sokkal részletesebben vizsgáltuk. Mikromechanikai vizsgálatok segítségével megállapítottuk, hogy a deformációs és tönkremeneteli folyamatok megváltoznak ennél a kritikus összetételnél, nagy valószínűséggel egy szálakból álló hálós szerkezet eredményeként (2. ábra), amit későbbiekben mikroszkópos vizsgálatokkal ki is mutattunk. A szálakat összetartó gyenge erők következtében ez a hálós szerkezet kis szilárdsággal rendelkezik, aminek következtében a kompozitok szerkezete nagyon érzékennyé válik a feldolgozási körülményekre csökkent reprodukálhatóságot és megbízhatóságot eredményezve. Eredményeink rámutattak a feldolgozási körülmények megválasztásának fontosságára nagy alakú tényezővel rendelkező természetes szálakat tartalmazó kompozitok készítése során.

Az őrölt kukoricacsutka szintén egy az ipari gyakorlatban használt lignocellulóz szál. Darálás után a szitálással választják szét a frakciókat, amelyek közül a nehézfrakciót hasznosítják töltőanyagként. A különböző frakciók tulajdonságai jelentősen különböznek egymástól, és a szétválasztás soha sem tökéletes. Vizsgálataink során arra kerestük a választ, hogy a frakciókat alkotó szemcsék tulajdonságai és a tökéletlen elválasztás hogyan befolyásolja a PLA/kukoricacsutka kompozitok deformációs és tönkremeneteli jellemzőit. A komponensek eltérő szilárdságát közvetlen mérésekkel és a különböző frakciók felhasználásával készült kompozitok akusztikus aktivitásának mérésével igazoltuk. Két egymást követő mikromechanikai deformációs folyamatot detektáltunk a nehéz frakció tartalmazó kompozitokban, amelyeket a puha és kemény szemcsék egymást követő töréseként azonosítottunk. A két egymást követő folyamat megjelenése bizonyította, hogy a frakciók elválasztása nem tökéletes az alkalmazott ipari technológiában. A puha szemcsék törése viszont nem vezet törvényszerűen a kompozitok tönkremeneteléhez, mivel azt a vagy a kemény szemcsék tördelődése vagy a mátrix törése okozza. A nagyom nagy szemcsék

esetében a határfelületek elválása könnyedén bekövetkezik, ami kis feszültségeknél bekövetkező tönkremenetelhez vezet. A puha szemcsék törése kellően nagy nyíróerők hatására, más a kompaundálás során bekövetkezik. A szemcseaprózódás eredményeként pedig a határfelületi adhézió mértékétől is függő erősítő hatás praktikusnak mondható minden kompozitban függetlenül az alkalmazott töltőanyag kiindulási jellemzőitől.

Vizsgálataink során nagymennyiségű információt gyűjtöttünk össze polimer-falaszt kompozitokról. Nagy meglepetésünkre gyakorlatilag azonos szilárdságokat kaptunk a különböző polimerek felhasználásával készített kompozitokra, a mátrixok meglehetősen különböző tulajdonságainak ellenére. Ennek hatására elhatároztuk, hogy nagyszámú különböző mátrix és töltőanyag felhasználásával készített hőre lágyuló poli-

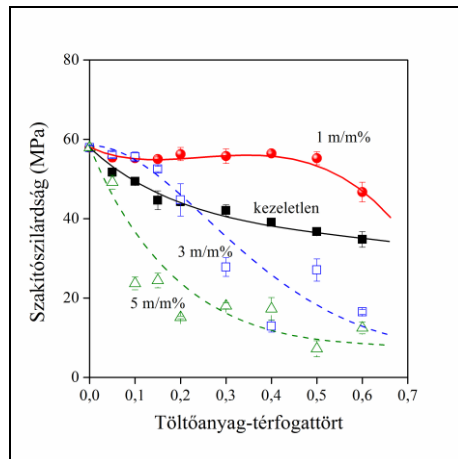


3. ábra Szoros összefüggés a domináló deformációs folyamatok megindulásához szükséges feszültség és a kompozitok szilárdsága között. Szimbólumok: PLA: ●○●○●○, rPP: ▲▲▲▲▲, hPP: ■■■■■■, CC23: ●▲■, W35: ●▲■, W54: ●▲■, W68: ○▲□, W125: ●▲■

mer/falaszt kompozit jellemzőit hasonlítjuk össze. Eredményeink igazolták, hogy a kompozitok teljesítőképességét a szálak által megindított mikromechanikai deformációs folyamatok határozzák meg. A határfelületek elválása általában a szilárdság csökkenéséhez vezet, de a szilárdság csökkenése nem minden esetben hozható kapcsolatba a gyenge adhézióval és a határfelületek elválásával. A falaszt tartalom változtatására bekövetkező tulajdonság változás egyaránt függ a komponensek tulajdonságaitól és a határfelületi kölcsön-

hatásoktól. A komponensek erős adhéziója gyakran eredményezi a szálak törődését polimer/lignocellulóz szál kompozitokban. Méretüktől és alakjuktól függően a szálak tengelyirányban vagy arra merőlegesen is eltörhetnek. Erős adhézió esetén, az adott polimer/falisz kombinációra jellemző maximális szilárdság a szálak belső szilárdságától függ, ami nagyobb a tengelyirányra merőleges száltörés esetén. A szálak belső szilárdsága függ a szemcsemérettől is, nagyobb részecskék kisebb feszültségnél mennek tönkre, mivel a lehetséges hibahelyek száma sokkal nagyobb bennük. Ahogy azt a 3. ábra is mutatja nagyon szoros összefüggés állapítható meg a domináló deformációs folyamatok megindulásához szükséges feszültség és a kompozitok szilárdsága között, bizonyítva, hogy ezek a folyamatok vezetnek a kompozitok tönkremeneteléhez és határozzák meg azok teljesítőképességét.

Ez a felismerés vezette a következő kísérletsorozat megtervezéséhez, ahol célunk a szálak belső szilárdságának javítása volt, fenol-formaldehid gyantával történő impregnálásal. A kémiaiailag módosított lignocellulóz szemcsék erősítőanyagként történő alkalmazása PLA/fa kompozitokban sikeres megközelítésnek bizonyult. Az 1 m/m% -os gyantaoldattal történő kezelés jelentősen javította a kompozitok



4. ábra PLA/falisz kompozitok szilárdságának függése a falisz tartalomtól, és az impregnálásra használt gyantaoldat koncentrációjától. Szimbólumok: ■ kezeletlen, ● 1, □ 3, △ 5 m/m% gyantaoldat.

szilárdságát (lásd 4. ábra) és csökkentette azok nedvesség-felvételét. A kompozitok szilárdsága javult a falisz belső szilárdságának növekedésével, de

a határfelületi kölcsönhatások is módosulhattak a kezelés eredményeként. Nagyobb koncentrációjú gyantaoldattal történő kezelés hatására a kompozitok szilárdsága előbb kismértékben, majd drasztikusan csökkent egy nagyon kis értékre. Az akusztikus emissziós vizsgálatok felfedték, hogy nagy gyantakoncentráció mellett deformációs mechanizmus változás következett be. A gyanta egy nagyon vékony rétegben vonta be a faliszt szemcséket ebben az esetben, ennek a vékony rétegnek a törése könnyen bekövetkezett, ami a kompozitok gyors tönkremeneteléséhez vezetett nagyon kis terhelés hatására. Annak ellenére, hogy az eljárás sikeresnek bizonyult, és a kezelések előnyösen befolyásolják a kompozitok jellemzőit, további kísérletek szükségesek a gyanta tulajdonságainak, mennyiségének és a kezelés technológiájának optimalizálására a maximális hatás elérésének érdekében

6. Új tudományos eredmények

1. A kölcsönhatások részletes vizsgálatával és modellkísérletekkel kimutattuk, hogy az irodalomban olvasható állításokkal ellentétben a kölcsönhatás nem gyenge, hanem nagyon is erős a PLA/faliszt kompozitokban. Az erős adhézió eredményeként a domináló mikromechanikai deformációs folyamat a szálak tördelődése ezekben az anyagokban, habár kismértékben a határfelületek elválása is fellép. Az erős adhézió következtében az erősítő hatás mértéke sokkal gyengébben függ az alkalmazott faliszt szemcseszerkezeti jellemzőitől, mint a korábban tanulmányozott PP/faliszt kompozitokban.
2. Sikeres kapcsolási reakciókat hajtottunk végre két kapcsolóanyag, a BMI és a DBMI segítségével, faliszt és PLA között. Meg kell jegyezni azonban, hogy a kapcsolós hatása a tulajdonságokra csekély, mivel csak néhány nagyobb szemcse esetében lép fel külső erőhatásra a határfelületek elválása,

bizonyítva korábbi következtetéseinket, miszerint a határfelületi adhézió kapcsolás nélkül is elég erős a PLA/faliszt kompozitokban.

3. Bizonyítottuk, hogy a nagy alaki tényezővel rendelkező, hosszú szálak, egy gyenge erővel összetartott laza hálós szerkezetet hozhatnak létre a kompozitokban. A hálós szerkezet szilárdsága alacsony, ebből adódóan ennek kialakulása a szilárdság és merevség csökkenéséhez vezet. A szerkezet és a tulajdonságok pedig nagyon érzékennyé válnak a feldolgozási körülményekre.
4. PLA/kukoricacsutka kompozitok részletes tanulmányozásával kimutattuk, hogy a nagy és/vagy alacsony szilárdságú szemcsék tördelődnek a kompozitok feldolgozása során. Szemcseméretük és szemcseméret eloszlásuk megváltozása pedig, az eredeti szemcseméret alapján előre jelezhető től teljesen eltérő tulajdonságokkal rendelkező kompozitokat eredményez.
5. Nagyszámú PLA/lignocellulóz kompozit deformációs és tönkremeneteli folyamatának aprólékos vizsgálatával bizonyítottuk, hogy ezekben az anyagokban számos mikromechanikai deformációs folyamat játszódik le egymással párhuzamosan és/vagy egymást követően. Nem minden folyamat vezet a kompozit azonnali tönkremeneteléhez, de a domináló folyamat rendszerint meghatározza annak tulajdonságait.
6. A PLA/faliszt kompozitokban az erős határfelületi adhézió következtében a szálak belső szilárdsága korlátozza az elérhető maximális kompozit szilárdságot. Részletes vizsgálataink eredményei alapján megállapítottuk, hogy az szilárdság felső határa független az alkalmazott mátrixtól, és csak a szemcseszerkezeti jellemzőktől, valamint a szemcse törésének irányától függ. Kis szemcseméret és a szál irányára merőleges törés nagy szilárdságú kompozitokat eredményez.

7. Bizonyítottuk, hogy a megfelelő fenolgyantával történő impregnálással a szálak (belső) sajátságosága növelhető. Túlságosan nagy gyanta mennyiség, viszont a tulajdonságok romlásához vezet, ezért a maximális hatás elérésének eléréséhez az impregnálási folyamat optimalizálása szükséges.

7. Publikációk

7.1 A dolgozat alapját képező közlemények

1. Faludi, G.; Dora, G.; Imre, B.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: PLA/Lignocellulosic fiber composites: Particle characteristics, interfacial adhesion and failure mechanism, *J. Appl. Polym. Sci.* **131**(4), 1-41 (2014), IF: 1.64, C: 25 (DOI: 10.1002/app.39902)
2. Faludi, G.; Dora, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Improving interfacial adhesion in PLA/wood biocomposites, *Compos. Sci. Technol.* **89**, 77-82 (2013), IF: 3.57, C: 27 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.09.009>)
3. Faludi, G.; Hári, J.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Fiber association and network formation in PLA/lignocellulosic fiber composites, *Compos. Sci. Technol.* **77**, 67-73 (2013), IF: 3.57, C: 14 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.01.006>)
4. Faludi, G.; Dora, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Biocomposite from polylactic acid and lignocellulosic fibers: Structure-property correlations, *Carbohydr. Polym.* **92** (2), 1767-1775 (2013), IF: 4.07, C: 26 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.11.006>)
5. Faludi, G.; Link, Z.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Factors determining the performance of thermoplastic polymer/wood composites; the limiting role of fiber fracture, *Mater. Des.* **61**, 203-210 (2014), IF: 3.50, C: 6 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.052>)
6. Csizmadia, R.; Faludi, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: PLA/wood biocomposites: improving composite strength by chemical treatment of the fibers, *Compos. Part A* **53**, 46-53 (2013), IF: 3.07, C: 30 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.06.003>)

7.2 A dolgozathoz kapcsolódó egyéb közlemények

1. Csikós, Á.; Faludi, G.; Domján, A.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Modification of interfacial adhesion with a functionalized polymer in PLA/wood composites, *Eur. Polym. J.* **68**, 592-600 (2015), IF: 3,485, C: 50 (<https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.03.032>)
2. Várdai, R.; Lummerstorfer, T.; Pretschuh, C.; Jerabek, M.; Gahleitner, M.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Reinforcement of PP with polymer fibers: Effect of matrix characteristics, fiber type and interfacial adhesion, *Polym.* **190**, (2020), IF: 4.231 (<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.122203>)
3. Várdai, R.; Lummerstorfer, T.; Pretschuh, C.; Jerabek, M.; Gahleitner, M.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Comparative study of fiber reinforced PP composites: Effect of fiber type, coupling and failure mechanisms, *Compos. Part A* **133**, (2020), IF: 6.444 (<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105895>)
4. Várdai, R.; Ferdinánd, M.; Lummerstorfer, T.; Pretschuh, C.; Jerabek, M.; Gahleitner, M.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Effect of various organic fibers on the stiffness, strength and impact resistance of polypropylene; A Comparison, *Polym. Int.*, Accepted Article published online on 25 August, (2020), IF: 2.574

7.3 Egyéb közlemények

1. Faludi, G.; Horváth, I.; Séta, L.: Hulladék PET felhasználásával PET palack előállítás, *Műanyag és Gumiipari Évkönyv* (2007)
2. Menyhárd, A.; Faludi, G.; Varga, J.: β -crystallization tendency and structure of polypropylene grafted by maleic anhydride and its blends with isotactic polypropylene. *J. Therm. Anal. Calorim.* **93**, 937-945 (2008), IF: 1.530, C: 27 (<https://doi.org/10.1007/s10973-007-8569-7>)
3. Gábor, Á.; Faludi, G.; Imre, B.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Mikromechanikai deformációs folyamatok politejsav alapú biokompozitokban, *Műanyag és Gumi* **46**, 445-448 (2009)
4. Dora, G.; Faludi, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Természetes eredetű töltőanyagok jellemzőinek hatása politejsav alapú kompozitok tulajdonságaira, *Műanyag és Gumi* **48**, 1-8 (2011)
5. Dora, G.; Faludi, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Factors Determining the Properties of PLA/wood Composites: Particle characteristics, interactions, reinforcement, *Chem. Listy* **105**, 15 (2011)

6. Csíkos, Á.; Nagy, Sz.; Tóth, R.; Faludi, G.; Zubonyai, F.; Pukánszky, B.: Biológiaiilag lebontható kompozit alapanyagok és termékek természetes nyersanyagforrásból, *Műanyag és Gumi* **49**, 388-392 (2012)
1. Menyhárd, A.; Dora, G.; Horváth, Zs.; Faludi, G.; Varga, J.: Kinetics of competitive crystallization of β - and α -modifications in β -nucleated iPP studied by isothermal stepwise crystallization technique, *J. Therm. Anal. Calorim.* **108**, 613-620 (2012) (<https://doi.org/10.1007/s10973-011-1900-3>)
7. Kárpáti, Z.; Kun, D.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Természetes töltőanyagok határfelületi kölcsönhatások vizsgálata politejsav alapú polimer kompozitokban XXXVII: Kémiai Előadói Napok, Magyar Kémikusok Egyesülete (MKE) **5**, 94-98 (2014)
8. Hegyesi, N.; Hodosi, E.; Polyák, P.; Faludi, G.; Balogh-Weiser, D.; Pukánszky, B.: Controlled degradation of poly- ϵ -caprolactone for resorbable scaffolds, *Colloids Surfaces: Biointerfaces* B186, Art. No.: 110678 (2020) (<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2019.110678>)

7.4 Konferencia előadások

1. Faludi, G.; Menyhárd, A.; Varga, J.: Maleinsavval ojtott polipropilén β -nukleált változatának olvadási és kristályosodási jellegzetességei, MTA Termoanalitikai Munkabizottság ülése, February 20, 2007, Budapest, Hungary
2. Faludi, G.; Menyhárd, A.; Varga, J.: Polipropilén keverékek és β -nukleált változatainak előállítására és vizsgálata, OTDK, April 2-4, 2007, Szeged, Hungary
3. Faludi, G.; Menyhárd, A.; Varga, J.: Polipropilén keverékek és β -nukleált változatainak előállítására és vizsgálata, X. Doktori Kémiai Iskola, May 7-9, 2007, Mátraháza, Hungary
4. Menyhárd, A.; Varga, J.; Faludi, G.: The effect of compatibilizers on the crystallization, melting and polymorphic composition of β -nucleated isotactic polypropylene and polyamide 6 blends, Eurofillers Polymerblends, August 26-30, 2007, Zalakaros, Hungary
5. Menyhárd, A.; Varga, J.; Faludi, G.: Supermolecular structure and β -nucleation tendency of polypropylene grafted by maleic anhydride, The 9th Polish Seminar to the Memory of St. Bretsznajder with Foreign Participants, September 26-28, 2007, Plock, Poland

6. Dora, G.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Mikromechanikai deformációs folyamatok PLA alapú biokompozitokban, MTA Tudomány Napja Konferencia sorozat Doktoranduszok Fóruma, November 4, 2010, Debrecen, Hungary
7. Faludi, G.; Dora, G.; Sudár, A.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Modification of interfacial interactions in wood flour filled PLA composite, ECCM14 14th European Conference on Composite Materials, June 7-10, 2010, Budapest, Hungary
8. Sudár, A.; Renner, K.; Burgstaller, C.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Recycled PP/wood composites – adhesion and micromechanical deformations, ECCM14 14th European Conference on Composite Materials, June 7-10, 2010, Budapest, Hungary
9. Sudár, A.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Újrafeldolgozott polipropilén/fa kompozitok szerkezete és tulajdonságai, Oláh György Doktori Iskola Doktoráns Konferencia, February 4, 2010, Budapest, Hungary
10. Menyhárd, A.; Varga, J.; Faludi, G.: Supermolecular structure and β -nucleation tendency of polypropylene grafted by maleic anhydride, Oláh György Doktori Iskola Doktoráns Konferencia, February 4, 2010, Budapest, Hungary
11. Renner, K.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Interfacial interactions in natural fiber reinforced PLA composites, International Conference on Interfaces & Interphases in Multicomponent Materials (IIMM), September 1-3, 2010, Sheffield, United Kingdom
12. Imre, B.; Faludi, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Micromechanical deformation processes in PLA based biocomposites, 6th International Conference on Modification, Degradation and Stabilization of Polymers, September 5-9, 2010, Athens, Greece
13. Dora, G.; Faludi, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Effect of the structure of the lignocellulosic fiber on the deformation and failure mechanism of PLA composites, Eurofillers Polymerblends, August 21-25, 2011, Dresden, Germany
14. Dora, G.; Faludi, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Factors determining the properties of PLA/wood composites: particle characteristics, interactions, reinforcement, 4th International Conference Polymeric Materials in Automotive PMA 2011, April 12-14, 2011, Bratislava, Slovakia

15. Faludi, G.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Interactions and deformation processes in PLA/wood composites, 2nd Workshop Green Chemistry and Nanotechnologies in Polymer Chemistry, April, 2011, Riga, Latvia
16. Renner, K.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Wood flour reinforced PLA composites: structure, micromechanical deformations, properties, Workshop, December 1, 2011, Alessandria, Italy
17. Menyhárd, A.; Dora, G.; Faludi, G.; Horváth, Zs.; Varga, J.: Kinetics of competitive crystallization of β - and α -modifications in β -nucleated iPP studied by differential scanning calorimetry, MEDICTA 2011, July 24-27, 2011, Porto, Portugal
18. Faludi, G.; Csizmadia, R.; Renner, K.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Development of methods for chemical modification of wood, BiPoCo2012, May 27-31, 2012, Siófok, Hungary
19. Imre, B.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Present status and future of sustainable plastics in Hungary, Future of Bioplastics, 3rd International Plastic Conference, October 1-2, 2013, Warsaw, Poland
20. Renner, K.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Poly(lactic acid)/lignocellulosic composites: functionalization and modification, BiPoCo2014, August 24-28, 2014, Visegrád, Hungary
21. Kárpáti, Z.; Kun, D.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Interfacial interactions in poly(lactic acid)/lignocellulosic composites, Bimate Conference, April 15-17, 2015, Slovenj Gradec, Slovenia
22. Renner, K.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Natural reinforcement: opportunity or necessity, DVSPM, May 11-13, 2015, Gmunden, Austria
23. Renner, K.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Factors determining the properties of wood composites, BYPOS 2016, March 14-18, 2016, High Tatras, Slovakia
24. Faludi G.; Kállay-Menyhárd A.; Hegyesi N.; Renner K.; Móczó J.; Pukánszky B.: Improving interfacial adhesion in PLA/wood biocomposites, BiPoCo2016, August 28-September 1, 2016, Szeged, Hungary
25. Renner, K.; Kovács, Á.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Modification of poly(lactic acid) with natural and synthetic fibers, BiPoCo2016, August 28-September 1, 2016, Szeged, Hungary
26. Faludi, G.; Polyák, P.; Kirschweng, B.; Pukánszky, B.: Hydrolytic degradation of poly(3-hydroxybutyrate) films: mechanism and kinetic description of the reaction, 33rd PDDG Conference, September 1-5, 2017, Taormina, Italy

27. Renner, K.; Kovács, Á.; Várdai, R.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Deformation processes and impact resistance in poly(lactic acid) based composites, BioPol 2017, September 11-13, 2017, Mons, Belgium
28. Pregi, E.; Horváth, E.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Development of hybrid PP composites containing lignin and flax, BiPoCo2018, September 2-6, 2018, Balatonfüred, Hungary
29. Kovács, Á., Várdai, R.; Faludi, G.; Renner, K.: Deformation processes and impact resistance in poly(lactic acid) based composites, BiPoCo2018, September 2-6, 2018, Balatonfüred, Hungary
30. Kovács, Á.; Várdai, R.; Faludi, G.; Pukánszky, B.; Renner, K.: Poly(lactic acid) Based Composites: Interfacial Interactions and Impact Resistance IC-AMME Conference, September 26-28, 2018, Kuta, Bali, Indonesia
31. Pregi, E.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Development of hybrid PP composites containing lignin and flax, 8th BYPoS, March 25-28, 2018, Oščadnica, Slovakia
32. Várdai, R.; Cui, L.; Bartos, A.; Magyar, N.; Faludi, G.; Móczó, J.; Pukánszky, B.: Physical ageing of poly(lactic acid) based composites, 33rd PDDG Conference, September 1-5, 2019, San Giljan, Malta
33. Pregi, E.; Kovács, N.; Faludi, G.; Pukánszky, B.: Structure and properties of multicomponent films based on lignin, GCNPM Conference, October 9-11, 2019, Riga, Latvia