

# OTKA K 61424 Zárójelentés

## *Cellulóz alapú anyagokkal erősített/töltött biodegradábilis polimer kompozitok kifejlesztése és tulajdonságainak elemzése*

### **1. Előszó**

2005-ben beadott OTKA pályázatunkban – csatlakozva a nemzetközi kutatási trendekhez, az Európai Unió elvárásához és az ipari igényekhez – célul tűztük részben, vagy teljesen lebomló polimer kompozitok fejlesztését, tulajdonságainak elemzését. Ehhez felhasználtunk erősítő/töltő anyagként mezőgazdasági melléktermékeket (pl. kukoricamaghéj), ipari rostonövényeket (pl. kender), faipari hulladékokat (pl. fűrészipari farost), valamint mátrixanyagként szintetikus- (pl. polipropilén), természetes alapú szintetikus- (pl. politejsav) és természetes anyagokat (pl. keményítő). Pályázatunk megvalósítása közben már láttuk, hogy az újonnan kifejlesztett kompozitok mechanikai tulajdonságai egyenlőre még elmaradnak a hagyományos üveg- és szén-szál erősítésű kompozitokhoz, ezért vizsgálatainkba bevontunk különböző töltő- és adalékanyagokat, valamint részben kiterjesztettük a természetes alapú bazaltszálra is. Ugyancsak bővítettük a kísérletekbe bevont mátrix anyagok körét is a szintén biodegradábilis polikaprolaktonnal, mivel az orvostechikai célú felhasználás is jelentősen megnőtt az igény az elmúlt években.

Az elért eredmények bemutatásra kerültek mind hazai, mind nemzetközi konferenciákon, továbbá publikáltuk konferencia-kiadványokban és folyóiratokban. Talán a kutatás legjelentősebb eredménye az oktatásban hasznosult azáltal, hogy a témában számos TDK dolgozat, diplomatervezés és 3 PhD dolgozat is született.

### **2. Bevezetés**

A polimer anyagok nagyobb műszaki igénybevételű, szerkezeti anyagként való alkalmazása megköveteli mechanikai tulajdonságaik javítását, amely elsősorban szálerősítéssel érhető el. A nagy szilárdságú szálakkal és a nagy szívósságú mátrixanyagokkal, valamint a köztük megvalósuló megfelelő kapcsolattal létrehozott polimer kompozitok egyesítik és túlmutatnak alkotóelemeik kedvező tulajdonságain, ami lehetővé teszi a mérnöki alkalmazhatóságot. Az egyre szigorodó környezetvédelmi előírások mindinkább megkövetelik az életciklus lejárt utáni újrahasznosíthatóságot, ezért gondoskodni kell a kompozit anyagok több életcikluson átívelő visszaforgathatóságáról. Az ilyen irányú törekvések középpontjában a természetes szálakkal erősített polimer kompozitok kifejlesztése áll. A természetes szálak alkalmazásának ökológiai jelentőségük melletti előnyei közé tartozik, hogy a hagyományos erősítőanyagokhoz képest jóval kisebb a sűrűségük. Ilyen szálakat, rostokat tartalmazó növényeket évről évre folyamatosan, olcsón lehet termelni, tehát megújuló és gazdaságos alapanyagforrást jelentenek, a belőlük kinyert rostok

pedig lebomlanak. Ha a természetes szálakat biodegradábilis mátrixszal társítjuk, akkor teljesen lebomló anyagot kapunk. A biodegradábilis mátrixok mechanikai jellemzői azonban ma még elmaradnak a kőolaj alapon, mesterségesen előállított polimerektől, ezért szintetikus mátrixokat is használnak. Az ilyen anyagokat biológiailag részben lebomlónak hívjuk. Számptalan előnyös tulajdonságuk miatt a természetes szálak felhasználása az elmúlt években dinamikus növekedést mutatott. A legnagyobb felvevőpiac az autóipar, leggyakoribb gyártási technológiák a melegprézelés és a fröccsöntés. A pályázat célja a cellulóz alapú szálak felhasználásával létrehozott polimer mátrixú kompozitok fejlesztése, tulajdonságainak elemzése, prototípus termékek gyártása.

### **3. A pályázat megvalósítása során elért főbb eredmények**

Pályázatunkban áttekintettük a cellulóz alapú szálakat, és feltártuk a szerkezetükből adódó sajátosságokat. Elemeztük a természetes szálakkal történő erősítés előnyeit, lehetőségeit, korlátait. Áttekintettük azokat a kompozit modelleket, amelyek alkalmasak lehetnek a növényi szállakkal erősített polimer kompozitok mechanikai jellemzőinek leírására. Összegeztük a szakirodalomban megfogalmazott problémákat, és rámutattunk az irodalom ellentmondásaira.

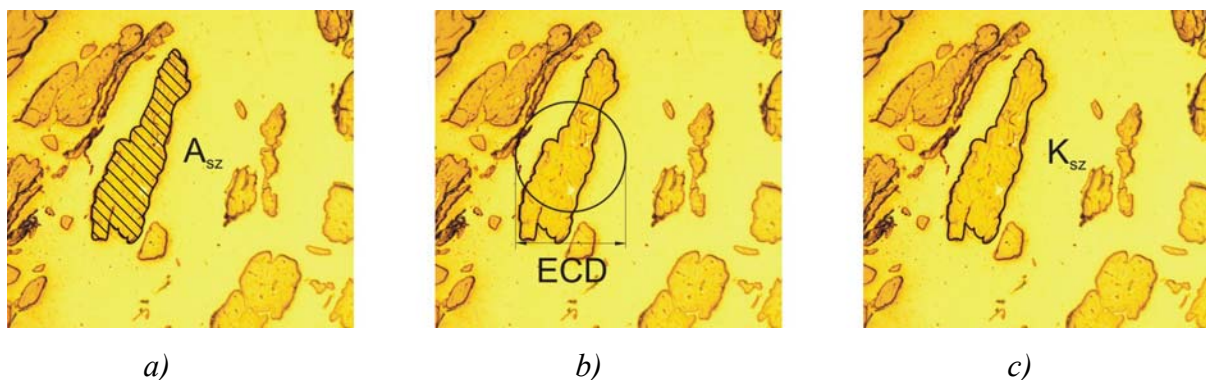
Az alábbiakban röviden beszámolunk a pályázat fő irányvonalának eredményeiről, a kenderszál- és a farost erősítésű polimer kompozitok fejlesztéséről, a cellulózszalak és a mátrix határfelületi nyírószilárdságának továbbfejlesztett, a szakirodalomban újdonságként kezelt mérési módszeréről, valamint a cellulóz szálakkal töltött politejsav fejlesztése során elért eredményeinkről.

#### ***3.1. A magyar kenderszál alkalmazhatósága polimer kompozitok erősítőanyagaként***

Különböző típusú cellulóz alapú szálakat vizsgáltunk kompozitok erősítőanyagaként való felhasználhatóság szempontjából. Összehasonlítottuk a kompozitipar által legnagyobb mennyiségben felhasznált természetes szálakat – a lenszálakat –, az egyik legolcsóbb természetes szálakat – a szizálakat – és különféle feldolgozottsági szintű kenderszálakat. Megállapítottuk, hogy a magyar kenderszálak kitűnően alkalmasak a kompozitok erősítőanyagaként való felhasználásra. Különböző típusú kenderszálak közül kiválasztottuk az áztatott, nyújtott szalagot, amely kitűnő tulajdonságai és jó feldolgozhatósága miatt alkalmas komolyabb teherbírású kompozitokban való felhasználásra, valamint a többszörösen kártolt kócot, amely olcsósága, finomsága miatt nagyszerű erősítőanyag hőre lágyuló kompozitokban.

A szálak egyenetlensége és szabálytalansága miatt a szintetikus szálaknál jól használható szálvizsgáló módszerek nem alkalmazhatóak a cellulóz alapú szálak esetében. A szálaknak a keresztmetszete nem kör alakú, ezért problémát jelent a szálak szakítóvizsgálatakor a megfelelő szakadó keresztmetszet meghatározása, amellyel a szakítóerő ismeretében számítható a szakítószilárdság. Kidolgoztunk egy olyan, optikai mikroszkópos megfigyeléseken alapuló

szálkeresztmetszet vizsgálati módszert, amellyel statisztikailag pontosítani lehet a szálak kontúrszélesség mérésen alapuló keresztmetszeti terület és kerület számítását. A szálak kerületére zárt görbét (spline-t) illesztettünk, aminek több jellemzőjét vizsgáltuk (1. ábra). Ezek közül az egyik legfontosabb a zárt síkidom területe ( $A_{sz}$ ), hiszen a területtől és a szakítóerőtől függ a szál szakítószilárdsága. Vizsgáltuk továbbá az egyenértékű kör átmérőjét (ECD), amely azon kör átmérője, amelynek súlypontja egybeesik a síkidom súlypontjával, és területe megegyezik annak területével. A síkidomok számított kerületének ( $K_{sz}$ ) a csepplehúzó vizsgálatok pontosításakor volt jelentősége.



1. ábra Szál keresztmetszetére illesztett zárt görbe által meghatározott síkidom területe (a), egyenértékű kör átmérője (b) és a síkidom kerülete (c)

A megrajzolt síkidomok alapján elemeztük a szálkeresztmetszetek arányait, vizsgáltuk a vetített méretek és a kontúrszélesség mérések egyezését, és összehasonlítottuk a síkidomok kerületét és területét a kontúrszélességből kört feltételezve számított kerületekkel és területekkel. Az eredmények alapján egy új korrekciós módszert dolgoztunk ki.

Különböző befogási hosszaknál mértük a szálak szakítószilárdságát és rugalmassági modulusát, mert a természetes szálak szerkezetükből adódóan sokkal érzékenyebbek ezen mérési beállításra, mint a mesterséges szálak. Három különböző gyártási eljárással kompozitokat készítettünk. Az azonos irányba rendezett, hőre keményedő mátrixú (telítetlen poliésztergyanta) kompozitok kimagaslóan jó mechanikai tulajdonságokkal rendelkeztek. A természetes szálakat polipropilén szállal kártolva, majd ezt a hibrid szálbundát tűnemezelve és préselve némiképp orientált, hosszú szál erősítésű kompozitokat kaptunk, amelyek mechanikai jellemzőikben jelentősen felülmúlták az erősítetlen polipropilént. Végül fröccsöntéssel rövidszál as kompozitokat gyártottunk, amelyek szilárdsági jellemzőikben nem, ám merevségükben lényegesen felülmúlták az erősítetlen polipropilént, és egyéb előnyös jellemzőik is voltak, például a lényegesen alacsonyabb zsugorodás. A poláris poliésztergyanta mátrixhoz a szintén poláris kenderszál jól tapadt, ám az apoláris polipropilén (PP) nem nedvesítette a szálakat. Ezért a polipropilén mátrixoknál maleinsavanhidriddel ojtott polipropilént kevertünk a mátrixba a határfelületi adhézió javítása

érdekében. A kapcsolóanyaggal módosított mátrix jobb nedvesítő hatása a jelentősen jobb kvázisztatikus mechanikai jellemzőkben is megmutatkozott.

A kompozitok rugalmassági moduluszát (és az egyirányban erősített kompozitnál a szakítószilárdságot is) különféle mechanikai modellek alapján kiszámítottuk, és az eredményeket összehasonlítottuk a mért értékekkel. Azt tapasztaltuk, hogy ha kiküszöböljük a természetes szálak jellegzetességei miatt felmerülő problémákat (keresztmetszet szabálytalansága, elemi szálakból álló szerkezet), akkor kis és közepes száltartalmak esetén jól számítható a modulusz.

A kutatás eredményei alapján bebizonyosodott, hogy a magyar kenderszál megfelelően feldolgozva kitűnően alkalmas polimerek erősítőanyagaként való felhasználásra. A természetes szálerősítésű kompozitok iránt tanúsított jelentős és folyamatosan növvő piaci kereslet alapján valószínűsíthető, hogy a magyar kenderszál kompozitipari felhasználása jelentősen nőni fog a következő években, ezért kísérletet tettünk prototípus termék gyártására (kamion ülés-háttámla). Az alkatrész alapanyaga eredetileg 20 tömegszázalék (m%) üvegszálat tartalmazó PP lemez, amit egy alagútkemencében melegítenek fel. A melegítés után a képlékennyé vált anyag kikerül a kemencéből, és áthelyezik egy présgépbe. A présszerszámot folyadékfűtéssel 60°C-os hőmérsékleten tartják. A lemez kihülése után a szerszámot nyitják, a kész terméket kiemelik, majd kézzel sorjazzák. A kenderszálás termékhez 40 m% kendert és 60 m% PP szálat tartalmazó kártolt, tűnemezelt paplant használtunk. A kemence eredeti beállításain az előgyártmány laza szerkezete miatt módosítani kellett (alacsonyabb hőmérséklet, rövidebb idő), és a présnyomást is magasabbra kellett állítani. A megfelelő paraméterek megkeresésével sikerült kitűnő minőségű terméket gyártani (2. ábra).



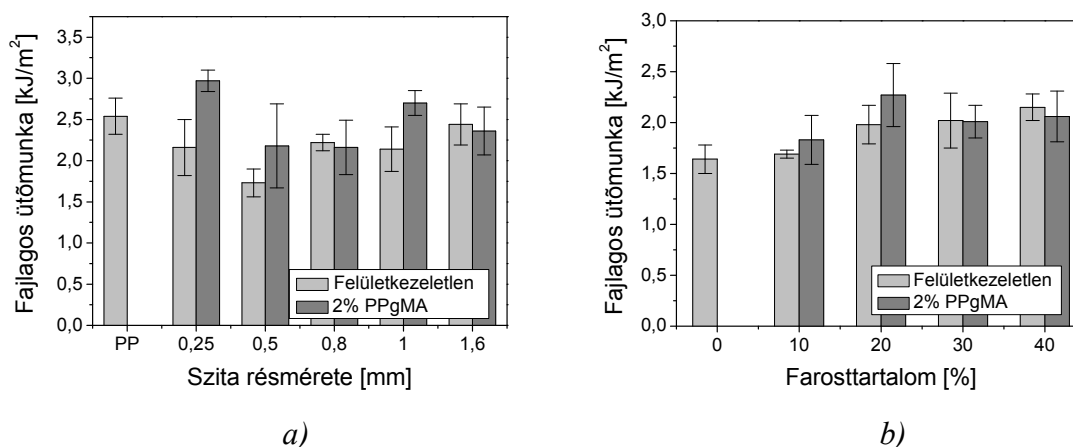
2. ábra Kender szállal erősített prototípus-termék, és az eredeti üvegszálás háttámla

### 3.2. Farost erősítésű kompozitok fejlesztése

Pályázatunkban farost-erősítésű polipropilén kompozitok fejlesztését és átfogó vizsgálatát is elvégeztük. Az egyes komponensek keverése extrúzióval, míg a próbatestek gyártása fröccsöntéssel történt. Vizsgálatainkat négy különböző jellemző farostmérettel előállított, felületkezeletlen, felületkezelt, továbbá farostot, talkumot, csúsztatóadalékot, montmorillonitot és bazaltszálat különböző mennyiségekben tartalmazó kompozitokon végeztük el. A kompozitok tulajdonságait kvázistatikus (szakító, hajlító) és dinamikus (Charpy) mechanikai, továbbá ömledékfolyási (MFI), mikroszkópos (optikai és pásztázó elektron (SEM)) és akusztikus emissziós vizsgálatokkal elemeztük.

Kimutattuk, hogy a húzószilárdság a jellemző farosthosszúság növekedésével kismértékben növekszik. A különböző adalék-, töltő- és erősítőanyagok közül a felületkezelő adalék hatására egyes esetekben több mint 25% szilárdságnövekedés következett be a kezeletlenekhez képest, amely a megerősített rost-mátrix határfelületi adhézió következménye, a többi anyag többé-kevésbé nem változtatta, ill. csökkentette a szilárdságot. A legnagyobb szilárdságcsökkenés a montmorillonit hatására következett be. A húzó rugalmassági modulusz értéke a farost hozzáadásának hatására a mátrixanyaghoz képest közel 90%-os növekedést mutatott, a többi anyag hozzáadásának hatására a húzómerevség értéke a töltöttséggel arányosan fokozatosan növekedett, a csúsztatóadalék esetében nem mutatott változást. Kimutattuk továbbá, hogy a hajlítószilárdság értéke a farost és a felületkezelő adalék hozzáadásának hatására az erősebb határfelületi adhézió miatt növekedett, a különböző egyéb anyagok viszont csökkentették a hajlítószilárdság értékét.

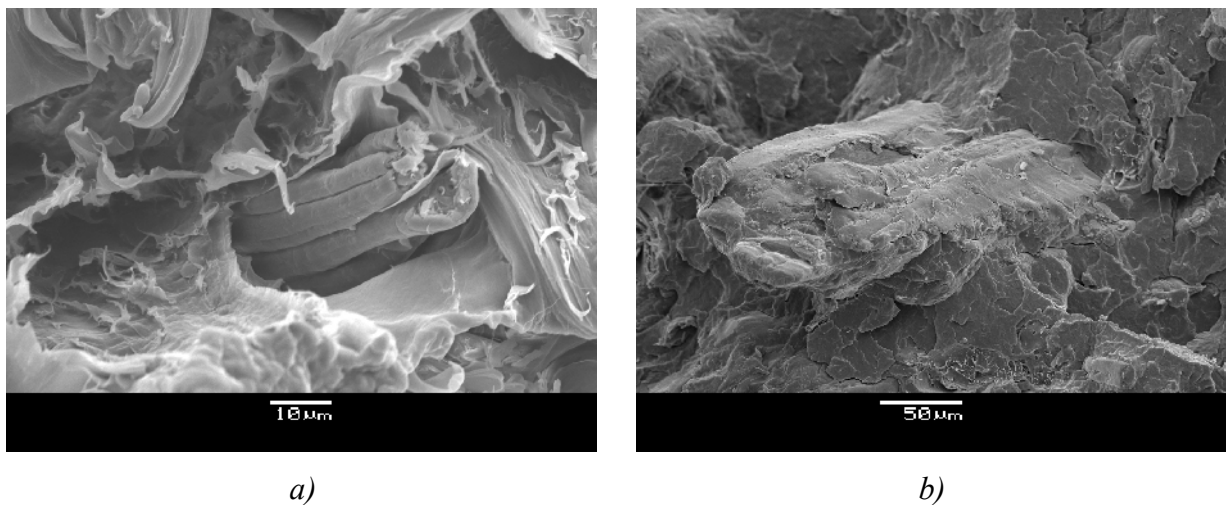
Az ütvehajlító vizsgálatok során megállapítottuk, hogy bár a fajlagos ütőmunka értékei nem növekedtek a növekvő rostmérettel és a különböző adalékanyagok hozzáadásának hatására, viszont a montmorillonit kivételével az értékek közel azonos szinten maradtak, amely minden esetben meghaladta a polipropilén fajlagos ütőmunka értékét. Ezek alapján kijelenthető, hogy az ilyen adalékanyagok kedvező hatással lehetnek a farosttartalmú kompozitok ütészállóságára (3. ábra).



3. ábra Farosterősítésű kompozitok fajlagos ütőmunka értéke a szálméret (a) és a farosttartalom függvényében

A farost-tartalmú kompozitok ömledékfolyási tulajdonságait elemezve megállapítottuk, hogy a farost hozzáadásával jelentősen, egyes esetekben több mint 35%-kal csökken az anyagok MFI értéke a polipropilénhez képest. A kompozitokban lévő rostok mérete nem befolyásolta az MFI értékét, viszont a farost mellett talkumot és bazaltszálat tartalmazó kompozitok ömledékfolyási mutatószáma jelentősen csökkent. A csúsztatóadalék és a montmorillonit javította a farost-tartalmú kompozitok MFI értékét.

A határfelületi adhézió minősítését és a jellemző kompozit-deformációk feltárását pásztázó elektronmikroszkóp segítségével végeztük el. A 3.a ábra egy felületkezelő adalékot nem, míg a 3.b ábra egy PPgMA adalékot tartalmazó szakítópróbatest töretfelületét szemlélteti.



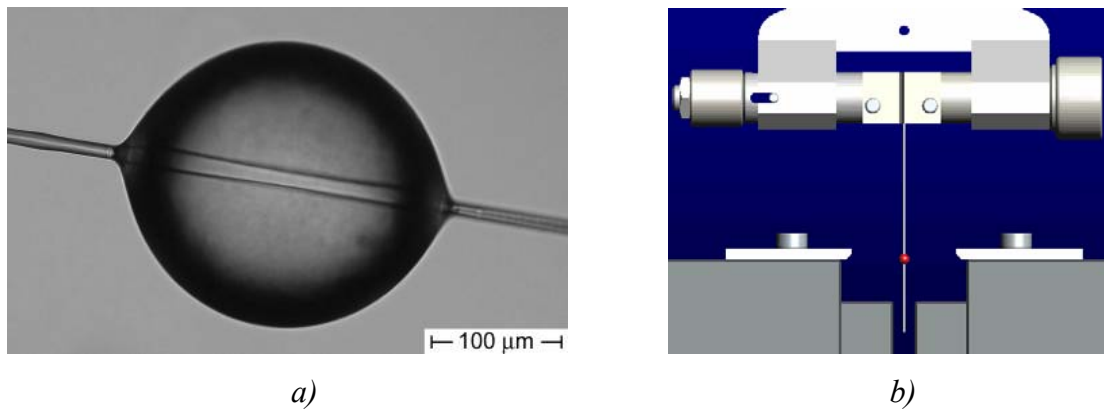
4. ábra Kezeletlen (a) és felületkezelte (b) farosterősítésű PP kompozitok töretfelülete

A 4.a ábrán jól látható a szál és mátrixanyag között kialakult üreg, amely a nem megfelelő határfelületi adhézioról tanúskodik, amely kedvezőtlen hatás a farost és a poliolefinnek ellentétes polaritása miatt lép fel. Felületkezelő adalék hozzáadásával (4b. ábra) jelentősen javítható ez a tapadás, így a szál/mátrix képes együttműködni, ami a mechanikai tulajdonságok javulásában is megmutatkozik.

Végezetül a gyakorlati alkalmazás szempontjából legfontosabb mechanikai és MFI vizsgálatok eredményei alapján az egyes kompozitokat egy erre a célra kidolgozott, komplex kiértékeléssel hasonlítottuk össze. A módszer által azonos súllyal figyelembe vett jellemzők alapján a 40 tömeg% farostot és 15 tömeg% bazaltszálat tartalmazó kompozit rendelkezett a legjobb tulajdonságokkal, melyek alkalmasak műszaki termékek gyártására is.

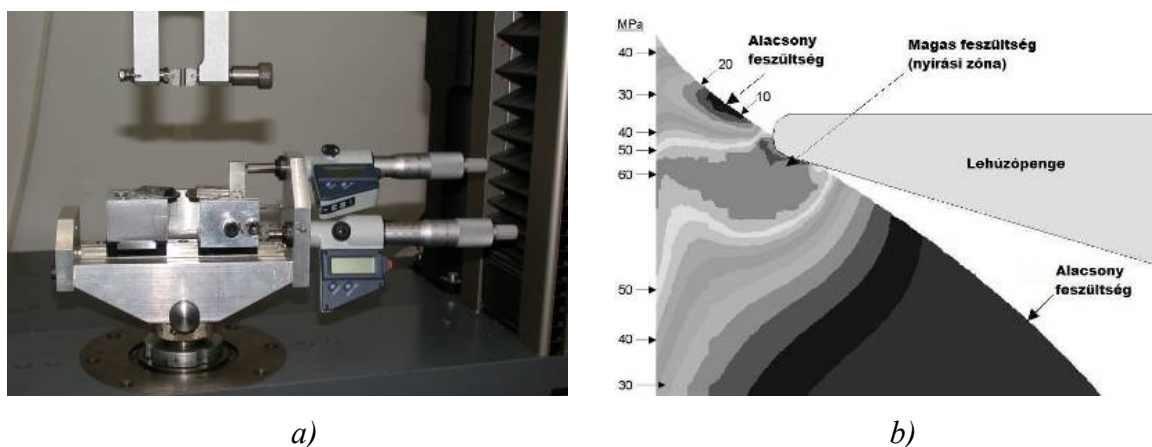
### 3.3. A cellulóz szálak és mátrix határfelületi nyírószilárdság mérésének továbbfejlesztése

A kompozitok egyik kritikus pontja a szál-mátrix határfelület. Ha nincs kellő kapcsolat közöttük, akkor nem tudjuk kihasználni a kompozitok előnyös tulajdonságait (különösen igaz ez a cellulóz alapú szálak és a polimer mátrix között). A probléma az, hogy sokszor csak a kompozit termék elkészítése után, a terhelésszabványban derül ki, hogy gyenge a szerkezet, amely a rossz határfelületre vezethető vissza. Pályázatunkban mi is sokat foglalkoztunk a határfelület erősségének javításával mind mátrix, mind szál oldalról, de a nagyobb probléma az, hogy a határfelület erőssége hogyan minősíthető anélkül, hogy a teljes gyártási folyamatot meg kelljen valósítani. Az egyik ismert közvetlen mérési módszer a csepplehúzás, amelynek során egy elemi erősítőszálra mátrix cseppet viszünk fel (5.a ábra), és azt pengéssel lehúzva (5.b ábra), az ismert geometriai méretek alapján számítható a határfelületi nyírószilárdság.



5. ábra Csepplehúzás próbatestje (a) és folyamata (b)

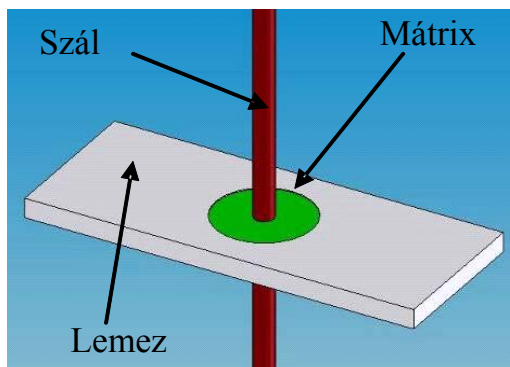
A csepplehúzó eljárásához kifejlesztettünk és legyártottunk egy egyedi mérőkészüléket (6.a ábra), azonban a mérések bebizonyították, hogy a módszer bizonytalan, az eredmények szórása igen nagy, amely abból adódik, hogy nehéz biztosítani a szabályos cseppalakot, a lehúzópenge sokszor elvágja a cseppet és a lehúzópenge környezetében a feszültségeloszlás igen összetett (6.b ábra).



6. ábra Csepplehúzó készülék (a) és a csepplehúzáskor kialakuló feszültségmező (b)

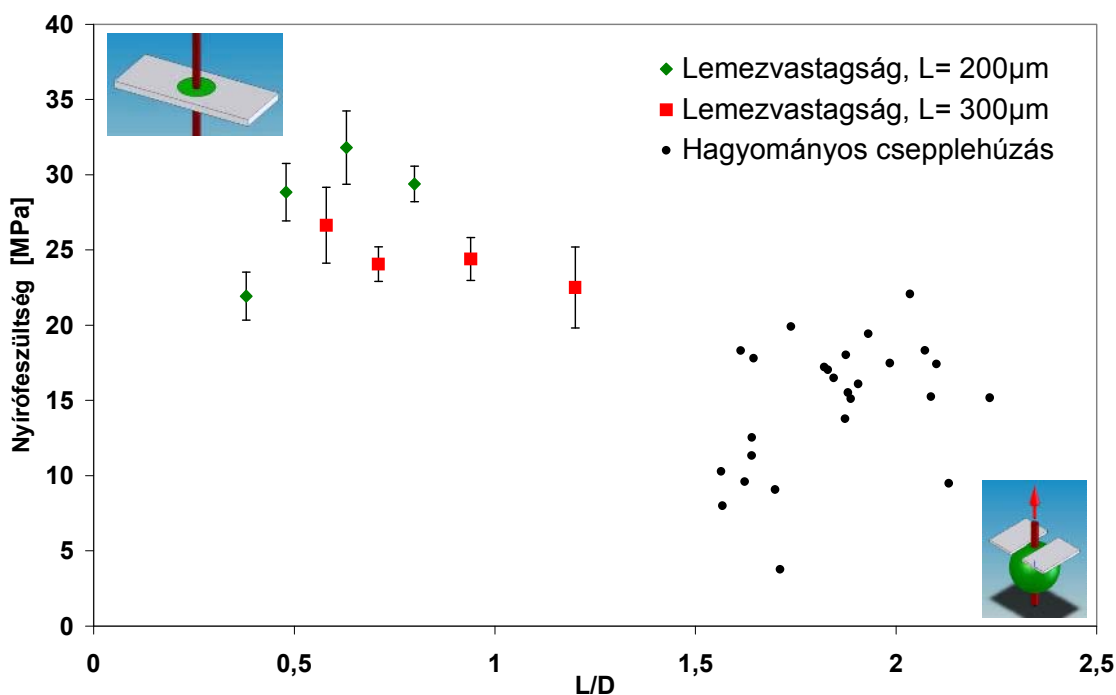


Ezért a módszert továbbfejlesztettük (7. ábra), és egy speciális lemezben elhelyezve a mátrix anyagot elértük, hogy a szál mindig ugyanolyan hosszon van befogva a mátrixba, valamint az erőbevezetés a fémlemezen történik és nem a képlékeny mátrixcseppben. Ezzel az eljárással már kis szórású értékeket lehet mérni, amelyek a valóságnak jobban megfeleltek.



7. ábra Új típusú befogás a határfelületi nyírőszilárdság méréséhez

A csepplehúzó vizsgálatokat modellanyagokon elvégezve a hagyományos és a továbbfejlesztett módon megállapítottuk, hogy a mérési eredmények reprodukálhatóbbak, megbízhatóbbak és a valóságos határfelületi nyírőszilárdság értékekhez jobban közelítenek (8. ábra).



8. ábra Határfelületi nyírőszilárdság mérése modellanyagokon a hagyományos és a továbbfejlesztett lemezes eljárás esetén



### 3.4. Cellulóz töltésű kompozitok fröccsöntése, lebomlásának vizsgálata

Pályázatunk során törekedtünk az eredmények későbbi gyakorlati alkalmazhatóságára, ezért a legtermelékenyebb alakadási technológiával, a fröccsöntéssel különböző természetes szálakkal és töltőanyagokkal társított politejsav (PLA) kompozitokat gyártottunk. Azonban a természetes anyagok fröccsöntése számos problémát vet fel (pl. nedvességtartalom, megfelelő viszkozitás, speciális technológiai paraméterek). Komoly nehézséget jelentett a fröccsöntés során, hogy a beömlőcsonk rendszeresen elszakadt a szerszámnyitáskor és kézzel kellett eltávolítani az álló szerszámfélből, így hosszú utónyomási időt (20 s) alkalmaztunk, hogy ne csak a termék, de a beömlőcsonk zsugorodását is kompenzáljuk, különös tekintettel az ott bekövetkező lunkerképződésre. A hosszú utónyomási idő mellett hosszú maradék hűtési időt is kellett alkalmaztunk (30 s), hogy a termék kellő merevséggel rendelkezzen a szerszámából való problémamentes eltávolításhoz. A PLA 60°C körüli üvegesedési hőmérséklettel rendelkezik, így deformációmentes terméket különösen kis szerszámhőmérséklet (20°C) mellett tudtunk csak gyártani, 50°C-nál magasabb szerszámhőmérséklet deformált terméket eredményezett. Végül az ömledék homogenitásának érdekében legalább 30 bar torlónyomást alkalmaztunk a 15 m/min kerületi sebességű plasztifikáláskor. Ezeket a megfontolásokat betartva reprodukálható minőségű, deformációmentes, cellulózzal társított PLA termékeket tudtunk fröccsönteni.

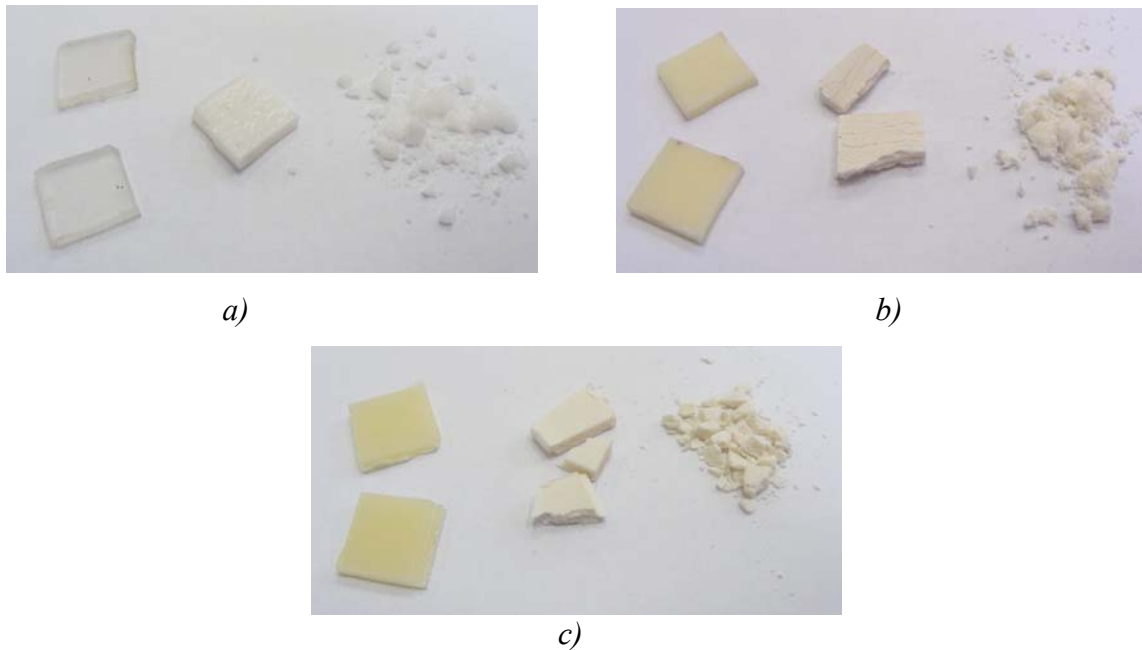
A fenti technológia beállításokkal különböző természetes szál-erősítésű/töltésű PLA mátrixú kompozitokat gyártottunk, melyek mechanikai tulajdonságait (1. táblázat) és zsugorodási hajlamát vizsgáltuk.

Hosszirányban kimunkált	PLA/ 15m% cellulóz	PLA/ 3m% szizál	PLA/ 40m% kender	PLA/ 40m% tőzeg
Húzó rugalmassági modulusz [MPa]	3730 ± 150 (111%)	3410 ± 40 (102%)	4770 ± 420 (142%)	4270 ± 140 (127%)
Húzószilárdság [MPa]	55,0 ± 4,0 (87%)	54,2 ± 1,1 (85%)	55,4 ± 2,3 (87%)	32,6 ± 3,8 (51%)
Hajlító rugalmassági modulusz [MPa]	4070 ± 650 (104%)	3500 ± 420 (89%)	5450 ± 610 (139%)	5920 ± 160 (151%)
Hajlítószilárdság [MPa]	95,9 ± 1,7 (79%)	108,8 ± 1,4 (89%)	57,1 ± 5,0 (47%)	69,0 ± 1,8 (57%)

1. táblázat PLA alapú kompozitok szakító- és hajlítóvizsgálatának eredményei. A zárójelben látható számok a társítatlan PLA azonos mechanikai jellemzőihez (annak átlagértékéhez) képesti százalékos arányt mutatják

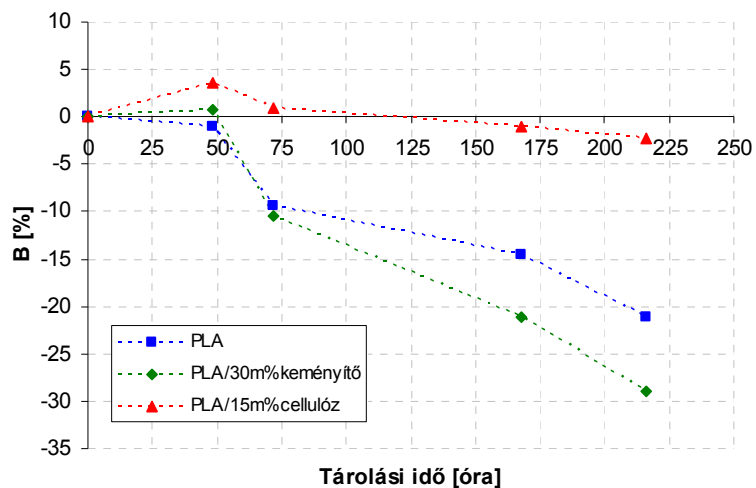
Megállapítható, hogy valamennyi természetes erősítő- és töltőanyag növelte a modulusz értékeket, ugyanakkor csökkentette a szilárdságokat, aminek elsődleges oka a nem megfelelő nedvesítés. Az eredmények alapján a PLA/15m% cellulóz és a PLA/3m% szizál kompozitok lehetnek alkalmasnak lebomló polimer termékek alapanyagaként.

Pályázatunk utolsó évében lebomlás-vizsgálatokat is végeztünk laboratóriumi körülmények között annak igazolására, hogy a gyártott kompozitok valóban biogegradálható tulajdonságúak-e. Az anyagok enzimátikus lebontásának vizsgálatát keményítőtartó enzim segítségével végeztük el. A lebomlási folyamat során mértük a próbatestek tömegének csökkenését és vizsgáltuk a degradálódott próbatestek felületét, töretfelületét. 144 óra elteltével a 80°C-os keményítőtartó enzim hatására az összes próbatest felrepedt és többségük elaprózódott (9. ábra).



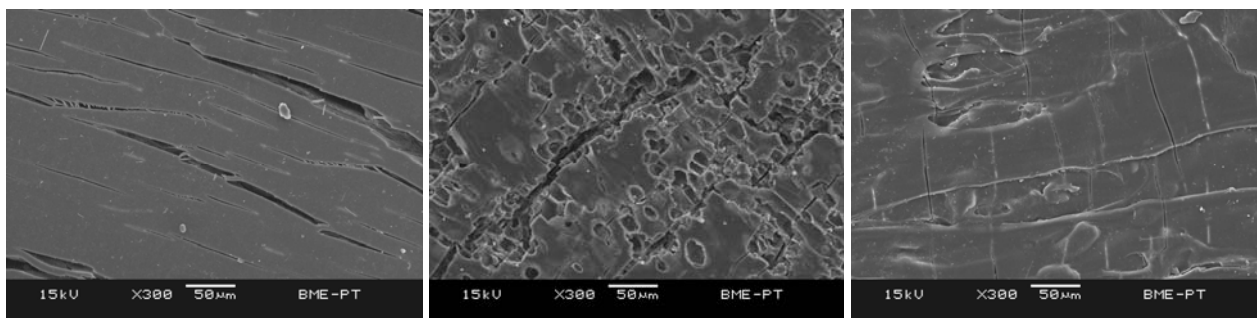
9. ábra Enzimes bontás során 144 óra után elaprózódott PLA (a), PLA/30m% keményítő (b) és PLA/15m% cellulóz próbatestek (c)

Annak ellenére, hogy a próbatestek elaprózódtak, a tényleges, tömegcsökkenéssel járó lebomlás csak kis mértékben indult meg. Az enzimátikus bontást tovább folytatva, 216 óra degradációt követően a PLA és PLA/keményítő próbatestek esetében 21%, illetve 29%-os tömegcsökkenést mértünk (10. ábra).

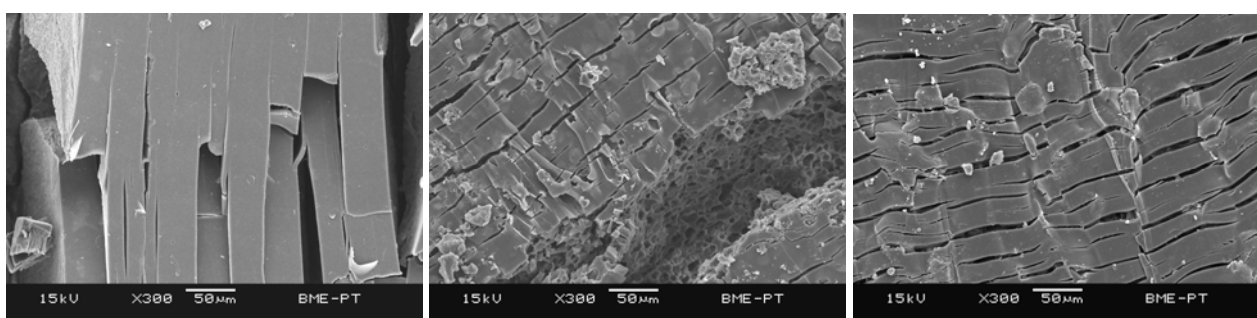


10. ábra Tömegváltozás 80°C-os enzimes bontás során

Amíg a keményítő hatásra a tiszta PLA-hoz képest felgyorsult a lebomlás, a cellulóz töltéssel ellenkező hatást mértünk; a cellulóz ellenállóbbá tette a politejsavat a lebontással szemben. A kísérletet 60°C-on megismételve azt tapasztaltuk, hogy körülbelül 200 óráig csupán a próbatetek duzzadása következett be. Megvizsgáltuk külön a 60°C-os és külön a 80°C-os egy hétig tartó enzimatis bontás roncsoló hatását elektronmikroszkópi felvételek segítségével. A próbatetek felszínéről készített felvételek jól alátámasztják a tömegmérés során kapott eredményeket, miszerint a keményítő elősegítette, a cellulóz pedig hátráltatta a próbatetek elaprózódását (11. és 12. ábra).



*11. ábra PLA (a), PLA/30m% keményítő (b) és PLA/15m% cellulóz (c) felszíne 60°C-os enzimatis bontás után*



*12. ábra PLA (a), PLA/30m% keményítő (b) és PLA/15m% cellulóz (c) felszíne 80°C-os enzimatis bontás után*

A repedezettség (szétválás) mértéke alapján megállapítható, hogy a degradációs folyamatok a hőmérséklet növelésével gyorsabban végbemennek.

#### 4. Összefoglalás

Pályázatunkban részben, ill. teljesen lebomló új polimer és polimer kompozit anyagokat, valamint gyártástechnológiákat fejlesztettünk ki általános-, ipari- és orvostechikai alkalmazásokhoz. Munkánk során elemeztük a cellulóz és más természetes alapú szálak, valamint mátrixok tulajdonságait, új számítási modellt alkottunk a viselkedésük pontosabb leírására. Az alkalmazott mátrixok, szálak és adalékanyagok számos kombinációjával új receptúrákat fejlesztettünk ki javított

reológiai- és mechanikai tulajdonságú rendszerek létrehozása érdekében. A kompozitokat felépítő egyes alkotók közötti kapcsolat ellenőrzésére új eszközt fejlesztettünk a szál/mátrix határfelületi adhézió, a nyírószilárdság megbízhatóbb mérésére. A kifejlesztett kompozitok biodegradábilis tulajdonságait lebomlásvizsgálatokkal ellenőriztük. Az új típusú anyagokból gyártandó termékek előállításához gyártástechnológiát fejlesztettünk és meghatároztuk a gyártási paraméterek optimális intervallumát. Félüzemi és üzemi kísérletekkel prototípus termékeket gyártottunk az anyagok és technológiák ipari alkalmazhatóságának alátámasztására.

Az újonnan kifejlesztett részben, ill. teljesen lebomló polimer kompozitok és gyártási technológiák ipari alkalmazása lehetőséget biztosít egyes területeken a hagyományos szintetikus polimerek és polimer mátrixú kompozitok kiváltására, a környezeti terhelés csökkentésére.

További megoldásra váró feladat többek között egyéb szálkezelési lehetőségek vizsgálata, valamint egyirányú, megfelelő száltartalmú előgyártmányok (prepregok) készítése, amelyek nagy teljesítményű termékek gyártását tennék lehetővé. Természetesen a lebomló és a felszívódó polimerek és kompozitok nagyarányú elterjedése még évtizedekig is eltarthat, addig is megoldásra váró feladat az újrahasznosítás. Ez komoly probléma egyrészt a csomagolóanyagok területén, másrészt az ipari alkalmazásoknál, pl. háztartási gépek, vagy autóroncok esetében. Ebben a témában több nagy volumenű, Európát átívelő pályázatban veszünk részt, amelyben cél az anyagában való újrahasznosítás, vagy az ún. upcycling, amikor pl. erősítéssel még jobb anyagot hozunk létre, mint az eredeti originális anyag.

### **A pályázat támogatásával született publikációk, PhD értekezések**

A pályázat támogatásával 11 konferencia-kiadvány, 21 folyóiratcikk, 2 könyvfejezet és 3 PhD értekezés született. Részletesen lásd a közleményjegyzékben!

### **Köszönetnyilvánítás**

Ezúton köszönöm magam és munkatársaim nevében az OTKA támogatását, mely lehetővé tette a részben, ill. teljesen lebomló polimerek és kompozitjaik területén az ismereteink elmélyítését, amelynek eredményeképpen új modelleket alkottunk, új anyagokat és technológiákat ismertünk meg és fejlesztettünk ki, prototípustermékeket gyártottunk le.

Budapest, 2010. február 26.



Dr. Czigány Tibor  
témavezető