



SZÉCHENYI ISTVÁN EGYETEM
AUDI HUNGARIA JÁRMŰMÉRNÖKI KAR

TDK Dolgozat

**Különböző növényi melléktermékek
alkalmazása két, illetve három összetevős
polimer kompozitok fejlesztéséhez**

**Jakab Sándor Kálmán
DFTETO**

**Gépészmérnöki MSc szak
Anyag és gyártástechnológiák specializáció**

**Témavezető:
Dr. Lendvai László**

Anyagtudományi és Technológiai Tanszék

Győr, 2022

Kivonat

Az emberiség mostanra felismerte, hogy a műanyagtermékek féktelen gyártása előbb-utóbb jelentős hulladékfelhalmozódást vonz maga után, amely már most megmutatkozik a hatalmas szemételepeken és az illegális hulladéklerakó helyek egyre növekvő területén. Egy termék előállításánál a tervezőknek és a gyártóknak manapság már nem csak a gyártás és alapanyag problémáját kell megoldaniuk, hanem a hasznos élettartam utáni időkre is gondolniuk kell; mely alkatrészeket lehet újrahasznosítani, illetve ki lehet-e építeni a cégen belül olyan üzemeket, amelyekkel ez megvalósítható, és vajon a termék az élettartama során mekkora mennyiségű szennyezőanyagot juttat a környezetbe? Jelenleg léteznek erre megoldások, ilyen például a szelektív hulladékgyűjtő helyek és újrahasznosító telepek létesítése, vagy a természetes alapanyagú és lebomló műanyagok alkalmazása. A fenti technológiák egyik legnagyobb hátránya azonban azok költségessége. Szelektív hulladékgyűjtő helyek esetében a szigetekre eljutni és onnan a műanyag hulladékot elszállítani rengeteg időt, pénzt és energiát igényel, valamint az újrahasznosító telepeken további szelektálásra van szükség, amit gyakran gépekkel is bonyolult megoldani. Biológiai úton lebontható polimerek esetén a legnagyobb gond, hogy az előállításuk gyakran költségesebb a hagyományos műanyagoknál, gondolva itt elsősorban a politejsavra, mint a legelterjedtebb természetes alapanyagú és biológiai úton lebontható polimerre.

Jelen dolgozatomban célja a politejsav társítása mezőgazdasági melléktermékekkel (lenmag-őrleménnyel, illetve repceszalmával), ezáltal a gyártáshoz szükséges alapanyagköltség csökkentése, valamint a biológiai lebonthatóság javítása és egyes mechanikai tulajdonságok növelése érdekében. A dolgozatban a különböző összetételű kompozitok előállítását követően az azokon elvégzett mechanikai és fizikai és termikus vizsgálatok eredményeit dokumentáltam, emellett bemutattam a rajtuk elvégzett lebomlási kísérletek során szerzett tapasztalataimat.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Szakirodalmi áttekintés	4
2.1. Biopolimerek.....	4
2.2. A politejsav.....	5
2.3. Biokompozitok.....	7
2.3.1. Természetes szálakkal társított PLA alapú kompozitok.....	8
2.3.2. Lennel társított kompozitok	10
2.3.3. Repceszalmával társított kompozitok	11
2.4. Optimumkereső algoritmusok	12
2.5. Célkitűzések megfogalmazása	14
3. Alapanyagok, mérési módszerek.....	15
3.1. Alapanyag.....	15
3.2. Szakító- és hajlítóvizsgálatok.....	17
3.3. Ütve hajlító vizsgálatok.....	17
3.4. Keménységmérés	17
3.5. Nedvességfelvétel.....	17
3.6. Lebomlás vizsgálat.....	18
3.7. Differenciál pásztázó kalorimetria (DSC).....	19
3.8. Optimumkeresés.....	20
3.9. Egyszempontos varianciaanalízissel egybekötött Tukey próba	23
4. Eredmények kiértékelése.....	24
4.1. A szakítóvizsgálatok eredményei	24
4.2. A hajlító vizsgálatok eredményei	26
4.3. Az ütve hajlító vizsgálat eredményei	28
4.4. A keménységmérés eredményei	29
4.5. Nedvességfelvétel.....	30
4.6. A komposztálhatósági vizsgálatok eredményei.....	32
4.7. A DSC mérések eredményei	34
4.8. Optimumkeresés.....	36
5. Összefoglalás, jövőbeli célok	42
6. Irodalomjegyzék.....	44

1. Bevezetés

Az elmúlt évezredekben az emberiség számos kihívással nézett szembe, amelyekre mindig talált megoldást. Jelenleg ilyennek tekinthető az egyre csökkenő nyersanyagkészletek és a növekvő alapanyagárak fenyegetése. Az anyagfejlesztés és feldolgozás területén erre megoldás lehet például keverékek, kompozitok készítése olyan módon, hogy a munkadarab kialakítására nemcsak az eredetileg kívánt alapanyagot használják, hanem azt kombinálják más anyaggal a geometria, struktúra megőrzése és a kívánt szilárdság megtartása mellett. Megoldást jelenthet emellett akár az üreges vázszerkezetek készítése, amelyek képesek a kívánt igénybevételeknek ellenállni, néha jobban, mint az eredeti tömör darab. Emellett mostanában feltörekvő gyártási eljárás a 3D nyomtatás, amely lehetővé teszi olyan (üreges) termékek létrehozását, melyek alkalmazása jelentősen csökkentheti nem csak az anyagköltséget, de gyakran az előállításához szükséges időkeretet is.

Az elmúlt években a nyersanyaghiány problémája egyre súlyosabb kereteket öltött és az emberiség felismerte, hogy egyre inkább a takarékoskodásra kell törekedni. Az IMF jelentése alapján az ipari és mezőgazdasági nyersanyagok ára az elmúlt két évben közel 50%-kal növekedett, megközelítve a 2008-as világválság közeli értékeket. Ez az árnövekedés a gyártótól kezdve a beszállítókon és azok dolgozóin át a vevőig mindenkit egyaránt érint. Éppen ezért a vállalatok alternatívákat keresnek ennek a problémának a kiküszöbölésére, leggyakrabban a termék fejlesztésével, vagy alternatív nyersanyagok használatával, például a korábban említett keverékek, kompozitok alkalmazásával [1].

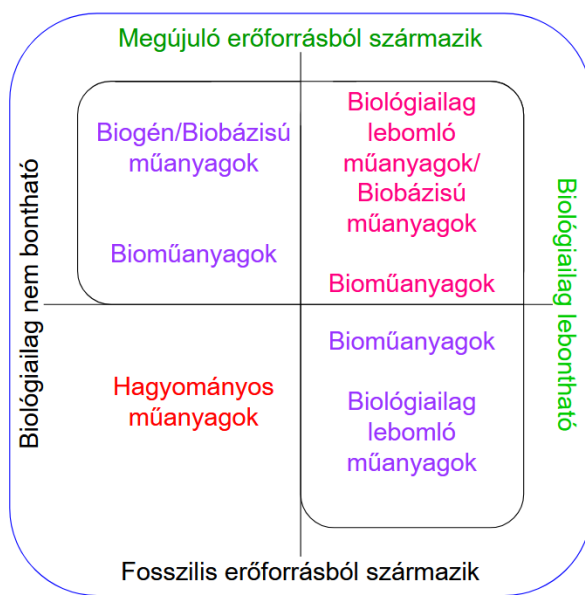
Az ezzel kapcsolatos törekvések a műanyagiparban is felfedezhetők, ahol nem csak a nyersanyagárak növekedésével, de a környezetszennyezéssel és a hulladékfeldolgozással is foglalkozniuk kell a szakértőknek. A jelenlegi kutatások ezeket az igényeket próbálják kielégíteni az újszerű, biológiai úton lebontható polimerekkel. Ezek olyan műanyagok, amelyek megfelelő körülmények között képesek viszonylag rövid időn belül lebomlani, ezzel elkerülve a nagyobb szeméthegyek kialakulását. Sajnos ezek a műanyagok sem tökéletesek, hiszen néhányuk fosszilis alapanyagokból készül, és hosszútávú hatásaikról vajmi keveset tudunk [2].

Ezen dolgozatnak a célja az egyik legismertebb és legelterjedtebb természetes erőforrásokból készülő lebomló biopolimer, a politejsav (PLA) társításának bemutatása lenmag-örleménnyel és repceszalmával, illetve annak vizsgálata, hogy létrehozott a kompozitok összetevőinek százalékarányos változtatása milyen hatással van a PLA mechanika tulajdonságára, vízfelvevőképességére és lebonthatóságára.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. Biopolimerek

A biopolimerek csoportjába számos polimer tartozik, és fontos megemlíteni, hogy ezek különböző kategóriákon belül helyezkednek el, amelyeket sokan összetévesztenek egymással. A biopolimerek között különbséget teszünk forrásuk és lebonthatóságuk alapján. Ez alapján a különböző kategóriákat az 1. ábra mutatja be. Amint látható, attól, hogy valamit biopolimernek nevezünk, nem feltétlenül jelenti azt, hogy az természetes alapanyagokból készül, vagy épp képes biológiai úton lebomlani. A fenntarthatóság és a környezettudatosság érdekében törekednünk kell olyan polimer anyagok előállítására, amelyekre mindkét állítás igaz. Ebbe a kategóriába sorolható pl. a PLA, a polihidroxialkanoát (PHA) és a különböző keményítő eredetű polimerek. Mindemellett ezeknél a műanyagoknál is szem előtt kell tartani a lebonthatóság kérdését, ugyanis nem mindegy, hogy a műanyag külső hatások nélkül bomlik le akár évek alatt, vagy komposztálás során napok alatt [3].



1. ábra Műanyagok kategorizálása forrásuk és lebonthatóságuk szerint, [3] alapján

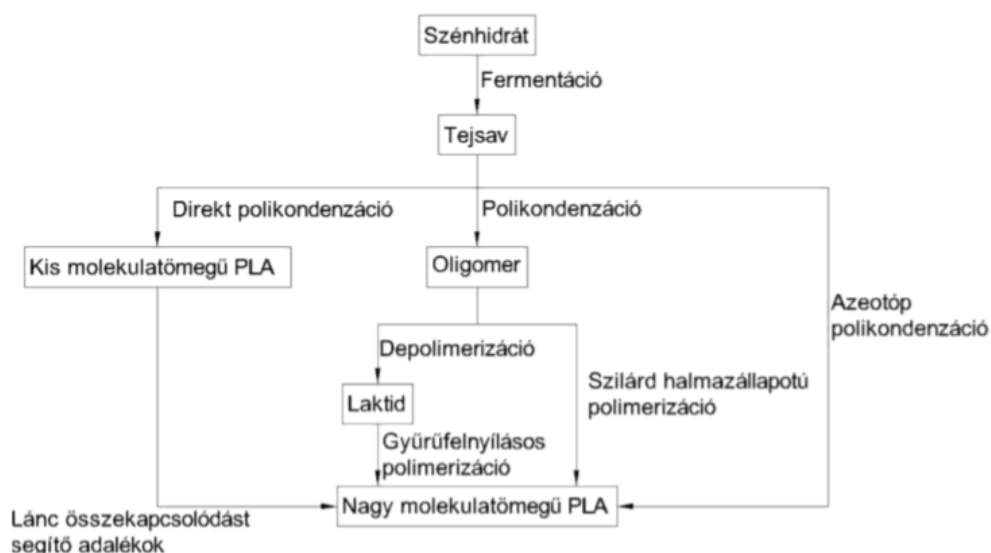
Lebomló polimerek esetén a bomlasztási folyamatot különböző környezetekben lehet elvégezni. Az egyik legegyszerűbb a talajfölddel való elkeverés, házi komposztként való felhasználás, amikor a mikroorganizmusok bontják le vízre és szén-dioxidra. Ennek megvan az a veszélye, hogy a bomlástermékei révén a talaj kémiai egyensúlyát felborítja, és inkább károsítsa, semmint táplálja azt. Éppen ezért ügyelni kell a megfelelő arányú adagolásra. Egy

másik elterjedt módszer az ipari komposztálás. A biológiai úton történő lebontás azért is hasznos, mert nem borítja fel a világ CO₂ egyensúlyát, hiszen csak „visszaadja” a természetnek a kARBONT, közben a műanyag hulladék mennyiségét csökkentve. További előnye, hogy ezt ipari és otthoni körülmények között is el lehet végezni, igaz különböző hatásfokkal. Egyéb módszer lehet még a vízben történő, ún. hidrolitikus lebontás [4].

A biopolimerek erősítő-, illetve töltőanyagokkal való társítása révén hozhatók létre a biokompozitok. Az ilyen anyagoknak az a különlegessége, hogy a biopolimert (természetes) adalékkal társítják, a mátrixba ágyazva azokat, így módosítva a polimer mechanikai és egyéb tulajdonságait, valamint tovább fokozva környezetbarát-jellegét, emellett pedig akár az alapanyag költségét is lecsökkentheti. Ezekről a műanyag alapú összetett anyagokról egy későbbi fejezetben lesz bővebben szó.

2.2. A politejsav

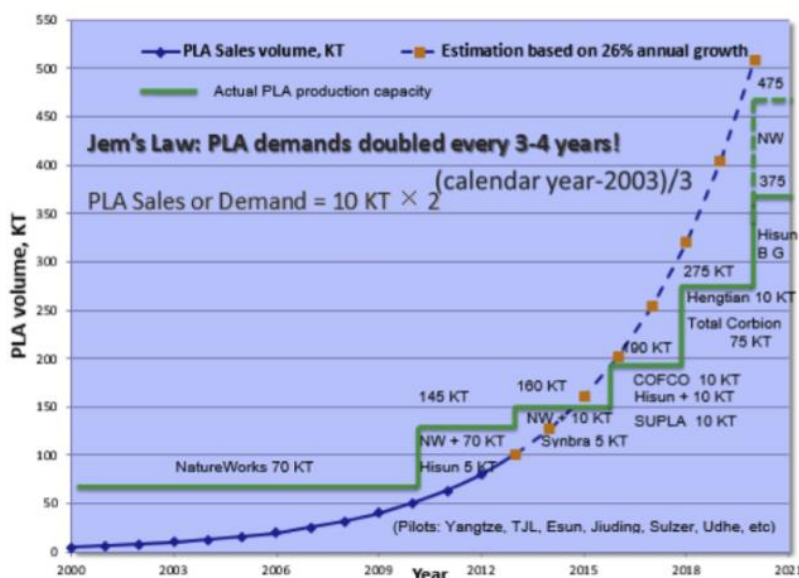
A PLA a biológiai úton lebontható, megújuló erőforrásokból (is) előállítható műanyagok családjába tartozik. Gabonákból, illetve más szénhidrátban gazdag növényekből hozzák létre erjesztés útján. Ezek általában emberi fogyasztásra alkalmas növények. A keményítőben gazdag biomasszát első lépésként szőlőcukorra alakítják, amit erjesztve tejsav keletkezik, amelyet laktiddá, majd politejsavvá alakítanak polimerizációs reakciók útján. Ezt több módszerrel is el lehet érni, amelyeket a 2. ábra mutatja be [5-6].



2. ábra A PLA előállításának lépései [6]

A PLA a részben kristályos hőre lágyuló polimerek csoportjába tartozik. A PLA-n belül meg lehet különböztetni PLLA, PDLA és PDLLA izomereket, amelyek között különbség csak a monomerekben elhelyezkedő atomok helyzetében van, de szerkezetileg ugyanúgy épülnek fel. Általános tulajdonságait tekintve a PLA egy rideg anyag, víz jelenlétének hatására degradációra hajlamos, de abban nem oldódik. Oldódik viszont kloroformban és tetrahidrofuránban. Fizikai tulajdonságai elsősorban a korábban említett izomerektől és azok százalékarányától függ. Csomagolóiparban való használatra alkalmas, de ridegsége és drága előállítása ezt jelentősen korlátozza [6-8].

A PLA tulajdonságait tekintve a hagyományos műanyagokkal vetekszik, alakíthatósága és sokszínű felhasználhatósága miatt több műanyag-gyártó is termeli. 2014 és 2019 között a PLA termelés több mint háromszorosára, ~400 000 tonnára nőtt és a piaci igény annyira megnőtt, hogy az azt gyártó vállalatok esetenként nem képesek ellátni vevőiket elegendő mennyiséggel (3. ábra). Egy piackutatás szerint a PLA piaci részesedése 2021-ben közel 1 milliárd dollárt ért el, évi 12,2%-os növekedést jósolva a következő évekre, így pozitív jövőképet mutat a csomagolóiparra és az ázsiai piacra tekintve. Emellett fontos megemlíteni a 3D nyomtatás területén mutatott térhódítását, amelyet alacsony olvadási hőmérsékletének és csekély vetemedési hajlamának köszönhet. További előnye a fokozottan veszélyes szennyezőanyag képződés nélküli és viszonylag rövid időn belül lejátszódó biológiai lebomlása, amely nemcsak, mint egyszerhasználatos, eldobható csomagolóanyagként való használatát segíti elő, de orvosi implantátumok is készülhetnek belőle [9-11].



3. ábra A PLA gyártási mennyisége és az irányába mutató vásárlási igény kilotonnában mérve [9]

Sajnálatos módon hiába a nagy igény a PLA-ból készült termékekre mind a műanyagipar, mind a környezettudatosabb vásárlóréteg felől, ha maga az alapanyag drágán, olykor a hagyományos műanyagokhoz képest közel háromszoros áron állítható csak elő és ráadásul étkezési célokra szánt alapanyagokból készítik, ami komoly etikai kérdéseket vet fel a növekvő népesség élelmiszerellátásának tekintetében [10].

2.3. Biokompozitok

A műanyag hulladék okozta komoly környezeti károk arra készítetik a gyártókat, hogy termékeiket a lehetőségekhez mérten minél környezetbarátabbá tegyék. Ezt komoly költségek árán tudnák csak elérni, így alternatíva lett az alapanyagok – részleges – kiváltása. A környezettudatosság jegyében született meg az ötlet, hogy érdemes lehet ezeket a műanyagokat természetes növényi szálakkal társítani. Ezen elképzelés útján indultak meg a kutatási és fejlesztési tevékenységek a biokompozitok területén. Biokompozitnak tekintjük azokat a kompozitokat, ahol vagy a mátrix, vagy pedig a hozzáadott adalék megújuló erőforrásból származik. Értelmszerűen a legelőnyösebb az, amikor mindkettő ilyen jellegű. A növényi szálak és szemcsék adalékként történő használatával polimer alapanyagot és ezzel bizonyos esetekben akár pénzt spórolhatunk meg [12-13].

A növények legfontosabb eleme a cellulóz. Ez egy hosszú polimerláncokból álló, a növények vázszerkezetét alkotó anyag, amelyet maga a természet állít elő. Sajnos magukat a növényi szálakat nem tudjuk közvetlenül ömledékállapotú termékgyártásra alkalmazni azok alakíthatóságának korlátai miatt, viszont kompozit erősítőanyagként megfelelően lehet használni őket. Mindemellett a polimerek adalékanyagként történő használata is akadályokba ütközik olyan szempontból, hogy a növényi szálak magas vízfelvevő képességgel rendelkeznek, emiatt könnyen duzzadnak, valamint a poláros-apoláros különbségek miatt gyenge adhéziós kötással kapcsolódnak a műanyaghoz, ami szerkezeti gyengeséghez vezet magas százalékarányú kompozitok esetén [14].

A polimerek növényi szálakkal való társításának egyaránt vannak előnyei és hátrányai. Legnagyobb előnyként a könnyen hozzáférhető, olcsó alapanyag, illetve a biológiai lebonthatóság szerepel. Az olcsó alapanyag elsősorban a faipari és mezőgazdasági melléktermékek alkalmazása esetén igaz. Fontos megjegyezni, hogy az összetevők közti gyenge adhézió miatt a létrehozott kompozit anyag gyakran rideg és mechanikailag gyenge. Azonban megfelelő társítás és elrendezés által ezt egy bizonyos szintig lehet kompenzálni. Biopolimer alapú kompozitok előállítására számos hagyományos feldolgozási módszer alkalmazható, ilyenek például a préselés, extrúzió, vagy akár a fröccsöntés. A növényi

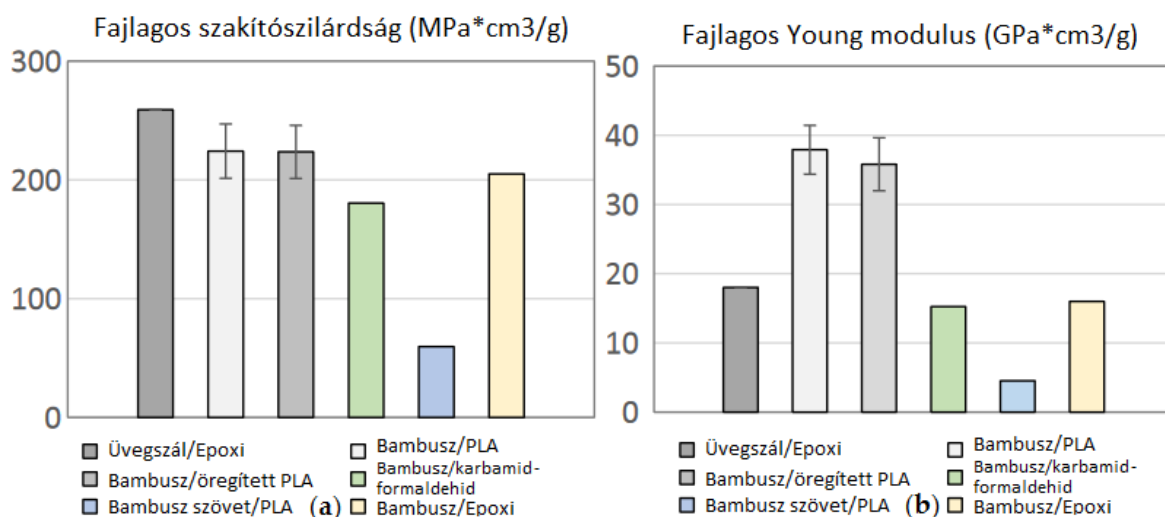
alapanyagot egyes esetekben kezelni is szokták, általában szilán, acetát, vagy lúgok (pl. NaOH) segítségével, hogy ezzel is növeljék a növényi szálak kapcsolatát a polimer mátrixszal [15-17]. Az elmúlt években rengeteg szakirodalmi mű született a különböző természetes szállal társított műanyagok területén. Az alábbiakban ezek közül fogok néhányat bemutatni.

Természetes szállal társított műanyagok esetén fontos megemlíteni a fával társított polimereket, elvük nagyjából azonos más növényi szálakkal, mint polimer adalékanyagok használatával. A kapott társítások mechanikai tulajdonságait jelentősen befolyásolja a feldolgozás módja és a fa alapanyag fajtája egyaránt [18].

A fa-polimer kompozitoknál (WPC – *wood-polymer composites*) a fa alapanyagot két csoportra szokták bontani; puha- illetve keményfára. A keményfa magas cellulóz-, míg a puhafa magas lignin tartalommal rendelkezik. Leggyakrabban szárított fűrészpor/faliszt formában szokták a polimerrel társítani, de mivel a fa a polimerhez nehezen kapcsolódik, ezért sokszor valamilyen segédanyagot, kompatibilizálót adnak hozzájuk a jobb adhézió érdekében. Ilyen WPC kompozitokat alkalmaznak manapság többek közt az építőiparban és az autóiparban is, PLA/faliszt kombinációkat pedig sokszor 3D nyomtatásra szánt filamenteknél, esztétikus darabok készítésére. PLA/fa kompozitoknál egyes esetekben megfigyelhető bizonyos szintű mechanikai tulajdonság javulás, de ez jellemzően csak alacsony fatartalom mellett [19-21].

2.3.1. Természetes szálakkal társított PLA alapú kompozitok

Mint sok más polimert, a PLA-t is előszeretettel társítják különböző növényi szálakkal és szemcsékkel, elsősorban a tulajdonságok változtatása és a költségek csökkentése céljából. A bambusz az egyik kedveltebb növény a PLA növényi adalékanyagaként, amelyet az ázsiai országok alkalmaznak leginkább. A tudományos érdeklődés fő oka, hogy a növény maga nagyrészt kihasználatlan, olcsó, könnyen hozzáférhető, ráadásul számos környezetbarát tulajdonsággal rendelkezik. Elemi szálakként vizsgálva a bambuszrost elérheti akár az 1200 MPa szakítószilárdságot is. Megfelelő szálorientációval és gyártással pedig egyes kutatások alapján [22-24] akár képesek lehetünk olyan munkadarabok gyártására is, amelyek tulajdonságai a hagyományos üvegszál-epoxi kompozitokkal vetekszik (4. ábra).



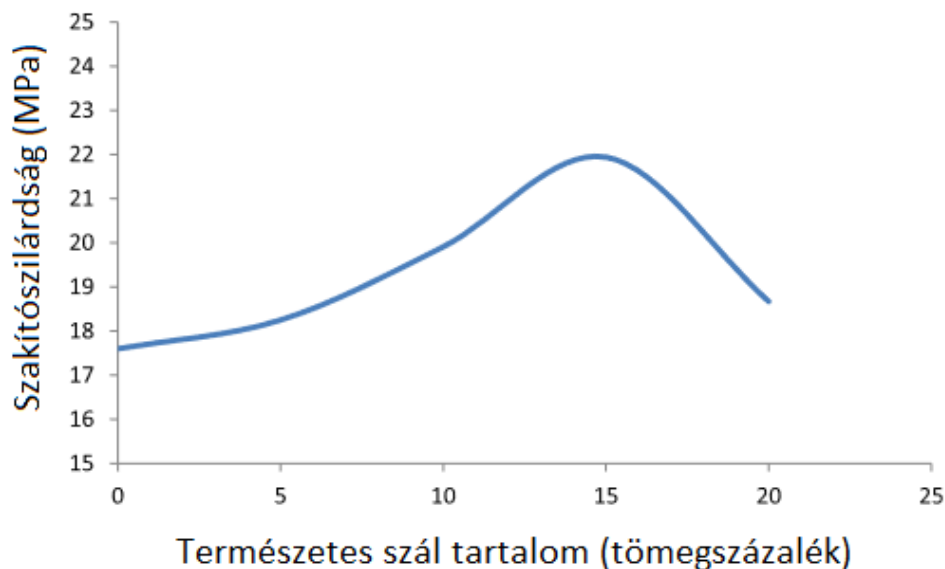
4. ábra A szakítószilárdság (a) és a húzó rugalmassági modulus (b) értékei különböző kompozitok esetén, balról jobbra haladva üvegszál/epoxi, bambusz/PLA, bambusz/öregített PLA, karbamid-formaldehid/bambusz, bambusz szövet/PLA és bambusz/epoxi [23]

A rozsmályva szintén kedvelt növényi szál ilyen célra, mivel a növény tágtúrású, rendkívül gyorsan nő és ráadásul könnyedén bomlik. Legfőbb előnye, hogy hőállóbbá teszi a PLA-t és ezáltal sokkal jobban használhatóvá teszi termikusan dinamikus környezetben. A mechanikai tulajdonságokat csak korlátozottan javítja a töltőanyag mennyiségtől függően (1. táblázat), 30 m% feletti adagolása a szilárdság jelentős romlásához vezet [25-27].

Összetétel	Hajlító rugalmassági modulus (MPa)	Hajlító-szilárdság (MPa)	Húzó rugalmassági modulus (GPa)	Húzó-szilárdság (MPa)
PLA	2,7	29,5	3,1	30,1
PLA+15% rozsmályva	3,4	34,5	3,3	31,1
PLA+30% rozsmályva	4,5	39,2	3,4	32,9
PLA+50% rozsmályva	4,1	27,3	4,3	28,2
PLA+70% rozsmályva	8,5	21,2	4,4	20,6

1. táblázat A rozsmályvával kevert PLA mechanikai tulajdonságai [27]

Egy másik sokat tárgyalt növény a juta, amelyet többek közt Indiában természetnek nagyobb mennyiségben. Magas cellulóz tartalommal rendelkezik és különleges tulajdonságai miatt önmagában is használják lebomló termékek készítésére (zsákok, textíliák). Jutával társított PLA-nál akár 20%-os mechanikai tulajdonság növelést is el lehet érni (5. ábra) a megfelelő mennyiség alkalmazásával [28-29].



5. ábra Szakítószilárdság növekedése jutával társított PLA minták esetében [29]

Jelen dolgozatban a lenmag őrleménnyel és repceszalmával társított PLA-val foglalkozom, ezért ezeket részletesebben a következő fejezetekben tárgyalom. A len, mint az egyik legrégebb óta használt növény több ezer éves múltra tekint vissza. Szálaiból elsősorban textilanyagot készítenek, magas cellulóz tartalma miatt növényi kompozitanyagként is funkcionál, a magjából pedig többnyire olajat nyernek ki. Habár a len termelés a textiliparnak csak 0,4%-át teszi ki, közel 3 millió tonnás éves össztermelése rendkívül jelentős, különösen úgy, hogy magas áron vásárolják fel őket az ázsiai piacok [30].

A repce viszonylag fiatal növény, amelynek leginkább a kanadai alfaja az ismertebb, amelyet elsősorban a magjáért termesztnek, míg magát a növény szárát nem hasznosítják. A lenhez képest alacsonyabb cellulóz, cserébe magasabb lignin tartalommal rendelkezik [31-32].

2.3.2. Lennel társított kompozitok

A lent azért alkalmazzák a PLA erősítőanyagként, mert ez a növény érhető el az egyik legkönnyebben és meglehetősen magas cellulóz tartalommal rendelkezik a többi természetes szálhoz képest. A lennel való társítással növelhető a szakító-, és a hajlítószilárdság, az ütmunka, illetve növeli a PLA üvegesedési hőmérsékletét (T_g), ezzel szélesebb körű használatát teszi lehetővé [33].

A lent számos módon lehet a PLA-ba juttatni. Az egyik legegyszerűbb módszer az ömledék állapotú polimer alapanyagba egyenletesen elkeverni és abból extrúziót követően granulátumot létrehozni, amelyből fröccsöntés útján termékeket lehet készíteni. Egy másik népszerű megoldás a préseléses módszer, amikor két formalap közé helyezük az anyagot (megfelelően

összekeverve), vagy már egy eleve bekevert kompozit anyagot helyezünk a présgépbe [15].

A Maya Jacob John [34] által végzett kísérlet a len növényi szárát alkalmazta PLA adalékként, ezt a kompozitot kiegészítette algináttal, amely javítja a lebomthatóságot és a tűzállóságot is. Ez a speciális összetétel alkalmas volt a kompozit keménységét növelni, amelyet a jobb adhéziós kapcsolat kialakulásával indokolnak.

A PLA/len kompozitoknak sokszor versenyeznie kell a hagyományos, kőolaj alapú műanyagokkal. Az egyik legnagyobb probléma esetükben a vízfelvétel okozta fokozott hidrolitikus degradáció. Duigou és társai [35] extrém körülményeknek vetették alá a kompozitot azzal, hogy két éven keresztül tengervízbe merítették, azzal a céllal, hogy megvizsgálják, hajó alkatrész építésére alkalmazható-e ez a párosítás. A tanulmány megállapította, hogy a kompozit a vízben 12%-os duzzadást mutat. Erre talált megoldást Bulota és Budtova [36], akik kísérleti úton porózus PLA/len kompozitokat fejlesztettek, amelynél kimutatták, hogy az üreges kompozit képes megfelelően ellátni feladatát akár a tömör PLA-hoz viszonyítva is.

A PLA/len párosításnál – ahogy a fentiekből is kitűnik – leginkább a növényi szár alkalmazására vannak példák a szakirodalomban, igen kevesen alkalmazták eddig a lenmagnak az őrleményét. Ángel Agüero és társainak [37] polimer/lenmagőrleményre vonatkozó kísérlete gyengébb mechanikai és termikus tulajdonságokat mutatott. Ez betudható a nem megfelelő adhéziós kapcsolatnak az őrlemény és polimer mátrix között. Ezen kívül alig fellelhető olyan tanulmány, ahol a lenmag őrlemény hasznosíthatóságát vizsgálták ilyen célra.

2.3.3. Repceszalmával társított kompozitok

Bár a polimerek különböző mezőgazdasági növények szalmaival való társításával kapcsolatban számos publikáció látott napvilágot az elmúlt években, a repceszalmával való társításáról meglehetősen kevés tanulmány született. Hasonlóan más szalma jellegű mezőgazdasági melléktermékekhez nem rendelkezik kiemelkedő mechanikai tulajdonságokkal, így a hagyományos erősítőanyagokhoz képest csak mint „zöld” alternatívaként jöhet szóba.

A szakirodalom eltérő eredményeket mutatnak a repceszalma hatásáról a hagyományos polimerek adalékanyagaként. Mechanikai tulajdonságok tekintetében kevésbé van különbség a tiszta polimer és a kompozitok között polipropilén (PP) és kis sűrűségű polietilén esetén. A szakirodalomban ilyen párosításoknál némileg csökkenő szilárdságról számoltak be növekvő merevség mellett. A termikus tulajdonságokat figyelembe véve nagy sűrűségű polietilénnél és a PP-nél is növekedést mutattak ki a kristályos részarányban. Lebomlás tekintetében

megállapították, hogy a növényi szemcsék lebomlanak, ám a biokompozitok polimer komponensére ez nincs hatással a vizsgált anyagoknál [38-42].

2.4. Optimumkereső algoritmusok

Egy új fejlesztési folyamat megvalósítása sokszor rengeteg próbálkozást igényel a számos változó és szempont egyidejű jelenléte miatt. Az egyes feltételeknek való különböző megfeleléségi szintek okán sokszor nehéz megállapítani, melyik megoldás a legjobb. Bizonyos szempontból, a többkomponensű anyagfejlesztési folyamatok is ilyennek tekinthetők, ugyanis egyes tulajdonságok javulása jellemzően más tulajdonságok romlásával jár. Erre a célra fejlesztették ki a több különböző követelményt is figyelembe vevő optimumkereső algoritmusokat, idegen kifejezéssel élve *multi-criteria decision-making* módszereket (MCDM). Ezeknek az algoritmusoknak a lényege, hogy a vizsgálat tárgyainak azonos tulajdonságait összehasonlítja, a tulajdonságokat súly szerint pontozva egy rangsort állít fel. Ezt különböző matematikai módszerekkel lehet elérni, amelyek mindegyike abból indul ki, hogy a tulajdonságokból létrehozott mátrixot normalizálják, ilyen módon kezelhetőbbé teszik az adattömböt, majd különböző elvek alapján összehasonlítják az egyes tulajdonságokhoz tartozó adatokat (átlagtól való eltérés, min-max stb.). Ezt követően pontozás, rangsorolás, vagy egyéb úton sorrendet állítanak fel az összehasonlított vizsgálati tárgyakból [43].

Számos optimumkereső algoritmus létezik, legtöbbjük egyszerűen elvégezhető akár Microsoft Excel, vagy Matlab használatával. A pontosságuk leginkább a normalizáláson múlik – azon, hogy a leegyszerűsített adatok mennyire tükrözik a valósokat –, illetve hogy az egyes tulajdonságoknak mekkora súlyuk van a döntéshozatal szempontjából. Korábbi kutatásokban megállapították, hogy a lehető legjobb és legrosszabb opciót mindegyik módszer szinte pontosan ugyanúgy kiadja, mint bármelyik másik. Ezekre az optimumkereső algoritmusokra számos példa van, és egyre gyakrabban használják a kutatások területén, így a polimer-alapú anyagok fejlesztésénél is [44].

S. Vindoh és társai [45] egy ún. Fuzzy AHP-TOPSIS (*Fuzzy Analytic Hierarchy Process*) hibrid módszer segítségével választották ki a legjobb módszert műanyagok újrahasznosításához. A Fuzzy AHP lényege, hogy rangsorolja az ismert adatok alapján a különböző variációkat, ezt kiegészíti egy Fuzzy elmélethez kötött bizonytalansági háromszöggel, amely által a szubjektív tényezők is figyelembe lesznek véve. Ezt az analitikus vizsgálatot vegyítették egy TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) módszerrel, amelyhez még hozzáadták a korábban említett Fuzzy elméletet. Az eredmény pedig egy olyan MCDM módszer, amely az emberi szubjektivitást kiszűrve képes

objektív módon a lehető legjobb rendszert megjelölni, adott esetben például az újrahasznosítás területén.

Egy másik esetben szintén használták a TOPSIS módszert, polimer kompozitok optimalizálására, de annak eredményét összehasonlították az ún. VIKOR (*VIšekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje*) és PROMETHEE II (*Preference Ranking Organization METHods for Enrichment Evaluations*) rangsoroló MCDM módszerekkel is. Aditi Mahajan és társai [46] a biopolimerekhez legjobb növényi szálat keresték az ilyen témában született cikkek adatai alapján. Entrópia-alapú és CRITIC (*Criteria Importance Through Intercriteria Correlation*) módszerekkel a tulajdonságok súlyát vizsgálták. Ezt követően a TOPSIS, VIKOR és PROMETHEE II módszerek eredményének összevetésével megfelelő rangsort készítettek és ezzel meghatározták az optimális növényi száltársítást biopolimerekhez.

A MULTIMOORA (*Multi-Objective Optimization on the Basis of Ratio Analysis*) szintén egy optimum kereső algoritmus, amely egy ún. cél alapú módszer. A MULTIMOORA a MOORA továbbfejlesztett változata. Az egyszerű MOORA-hoz képest nem csak a referencia pontok és a viszonyrendszer alapján osztályoz, hanem az együtthatókat hatványkitevőként alkalmazza, exponenciális összehasonlítást végezve, ezzel jobban kiemelve a különböző változatok közti különbséget. Ezt a módszert Arian és Askhan Hafezalkotob [47] használta fel a legmegfelelőbb orvosi implantátum anyag kiválasztásához.

Utolsóként a MABAC (*Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison*) módszert szeretném megemlíteni, amelyet Fan Zhang és társai [49] alkalmaztak épületbontási hulladék felhasználási módjainak rangsorolására. A módszer legnagyobb előnye az átlátható rangsorolás és könnyű használata más MCDM módszerekhez képest.

Az előző bekezdésekben felsorolt példák alapján látszik, hogy az optimalizáló algoritmusokat egyre gyakrabban használják a különböző anyagok és folyamatok rangsorolására, hogy objektív módon lehessen kiválasztani a legjobbat a különböző megoldások közül az adott problémákhoz, ezzel is csökkentve a bizonytalansági faktorokat, az emberi szubjektivitást és leginkább időt és energiát megspórolva a lehető legjobb megoldás megtalálására. Éppen ezért fontos, hogy jövőbeni kutatásokban, amikor különböző módszereket kell összehasonlítani, vagy épp – mint jelen dolgozat esetében is – többfajta kompozit közt rangsor készíteni, ezeknek az MCDM módszereknek az alkalmazása előnyös lehet.

2.5. Célkitűzések megfogalmazása

A szakirodalmi áttekintésen keresztül bemutattam, hogy napjainkban jelentős kutatási és fejlesztési munkák folynak a növényi szálakkal társított polimer kompozitok területén. Ezek közül is különösen érdekesek lehetnek azok a típusok, amelyek biopolimer alapúak, ezért kizárólag megújuló erőforrásból származó és biológiai úton lebontható mátrixot és adalékanyagot tartalmaznak. A PLA magas előállítási költsége miatt célszerű továbbá, ha az alapanyag árát csökkenteni lehet, erre ideálisak az olcsón (közel ingyen) beszerezhető, a mezőgazdaságban melléktermékként megjelenő növényi szálak és szemcsék.

Ebből következően növényi adalékokat tartalmazó, két-, illetve háromkomponensű PLA alapú kompozitokat állítok elő lenmag- és repceszalma őrléménnyel, hogy megvizsgálhassam a létrehozott kompozitok mechanikai, termikus, bomlási és nedvességfelvételi tulajdonságait.

Ahogy a 2.4. fejezetben levezettem, a különböző, egymással ellentétes hatások (tulajdonság javulás/romlás) révén az eredmények önmagukban nem feltétlenül tudják megmutatni a fejlesztett kompozitok létjogosultságát, ezért egy optimumkeresési algoritmus segítségével célom azt is megvizsgálni, hogy mely anyagkombinációk és milyen százalékarány esetén lehetnek összességében a legelőnyösebbek.

3. Alapanyagok, mérési módszerek

Ebben a fejezetben a kutatásom alapját képező társított biopolimerek alapanyagait mutatom be, valamint ismertetem hogyan lettek elkészítve, illetve részletesen leírom a próbatesteken végzett mérési módszereket és azok kiértékelési módját.

3.1. Alapanyag

Kutatásom alapjaként az egyik közismert biopolimert, a PLA-t társítottam lenmag-, illetve repceszalma őrléménnyel. Az alkalmazott politejsav típusa Natureworks Ingeo 2003D, amelynek tulajdonságai a 2. táblázatban láthatóak. A felhasznált növényi szálak közül a lenmag őrléményt közvetlenül a termelőtől szereztük be, míg a repceszalmát a Mikó Stroh Borotai-Laska Kft. biztosította néhány mm-es hosszúságú szálakra aprított formában. A növényi melléktermékeket mezőgazdasági darálóval porítottam, majd egy Matest A059 típusú szitarázó segítségével frakcionáltam méret szerint. A kísérletekhez szakirodalmi adatokat figyelembe véve a 125-250 μm tartományba eső szemcséket használtam. A növényi szálakat desztillált vízben áztatva tisztítottam meg a szennyeződésektől, majd 24 órán keresztül szárítottam.

Tulajdonság (mértékegység)	Adat
Sűrűség (g/cm^3)	1,24
Olvadási hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$)	170
Folyóképesség, MFI ($\text{g}/10$ perc)	6
Számszerinti átlagos molekulatömeg (g/mol)	100422
Tömegszerinti átlagos molekulatömeg (g/mol)	183177
Polidiszperzitás index	1,79

2. táblázat A Natureworks Ingeo 2003D típusú politejsav fontosabb tulajdonságai az adatlapja alapján

Gyártást megelőzően minden összetevőt szárításnak vettem alá egy Faithful WGLL 125 BE típusú szárító szekrénnel 4 órán keresztül 80°C -on. Az ömledék-keveréses gyártáshoz első lépésként szárazkeverékeket készítettem 40 grammos adagok formájában, amelyekbe megfelelő százalékarányban (2,5 m%, 5 m%, 10 m% és 20 m%) a PLA-hoz kevertem a növényi őrlémény(ek)e)t. Erre azért volt szükség, mert az extruder gravimetrikus adagolójában a keveredési arány egyébként vélhetően torzult volna. Az előkészített keverékeket a laborban található LabTech Scientific LTE 20-44 extruderbe adagoltam adott beállítások mellett (3. táblázat), amelyből a szerszámon keresztül szál képződött, amelyet vizes hűtőkád

átvezetve, majd egy Labtech LZ120 darálóba juttatva granulátum készült belőle.

Gyártási beállítás (mértékegység)	Beállítás mértéke
Csiga átmérő (mm)	20
L/D arány	44
Hőmérsékleti zónák adagolótól a szerszámgig (°C)	155-185
Csiga fordulatszám (ford/perc)	30

3. táblázat Az extruder főbb beállításai és paraméterei

A kutatómunkámban két-, és háromösszetevős kompozitokat készítettem. Előbbiek a PLA-n kívül lenmag őrleményt tartalmaztak, utóbbiak lenmag és repceszalma őrleményt azonos arányban. A tisztán repceszalmát tartalmazó kompozitok vizsgálatát már egy korábbi TDK dolgozatában Ősze János elvégezte [50]. Az ő eredményeit több helyen feltüntettem informatív jelleggel (ezt mindenhol külön jeleztem). Egyes méréseket (lebomlás, keménységmérés) az ő mintáin is magam végeztem el, hogy a mostani dolgozatban teljes képet kaphassak a vizsgált tulajdonságokról. A minták pontos összetételeit a 4. táblázat tartalmazza.

Minta	PLA [m%]	Lenmag őrlemény [m%]	Repceszalma őrlemény [m%]
PLA	100	0	0
PLA+2,5 len	97,5	2,5	0
PLA+5 len	95	5	0
PLA+10 len	90	10	0
PLA+20 len	80	20	0
PLA+2,5 len és repce	97,5	1,25	1,25
PLA+5 len és repce	95	2,5	2,5
PLA+10 len és repce	90	5	5
PLA+20 len és repce	80	10	10
PLA+2,5 repce*	97,5	0	2,5
PLA+5 repce*	95	0	5
PLA+10 repce*	90	0	10
PLA+20 repce*	80	0	20

4. táblázat Az elkészített minták összetétele.

A *-gal jelölt, halvánnyal szedettek az Ősze János TDK-ja [50] során elkészített minták

A granulátumokat ezután az ömledék-keverést megelőzőhöz hasonló módon kiszárítottam, majd az egyetemi laborban lévő Arburg Allrounder 420C Golden Edition típusú fröccsöntő gépbe adagoltam a feldolgozáshoz, aminek az adatait az 5. táblázatban gyűjtöttem össze. A fröccsöntőgépre szerelt szerszám segítségével az MSZ EN ISO 527-2 szabvány alapján piskóta próbatesteket gyártottam, amelyeken a későbbi vizsgálatokat el tudtam végezni.

Gyártási beállítás (mértékegység)	Beállítás mértéke
Csigaátmérő (mm)	35
Olvadékhőmérséklet (°C)	195
Befröccsöntési sebesség (cm ³ /s)	40
Fröccsnyomás (bar)	1300
Utónyomás (bar)	750-650-250 (össz. 15 mp)
Szerszámhőmérséklet (°C)	30

5. táblázat Fröccsöntőgép főbb beállításai és paraméterei

3.2. Szakító- és hajlítóvizsgálatok

A szakítóvizsgálatokat az ISO 527, a hajlítóvizsgálatokat pedig az ISO 178 szabvány alapján hajtottam végre egy Instron 5582 típusú univerzális vizsgálógéppel. Az alkalmazott erőmérő cella 10 kN terhelhetőségű volt. A szakítás 100 mm-es befogási hossz mellett történt 5 mm/perc sebességgel (1 mm/perc a kezdeti szakaszon, ahol a modulus meghatározása történt). Hárompontos hajlításnál az alátámasztási távolság 64 mm volt, szintén 5 mm/perc keresztfej elmozdulási sebességgel (szintén 1 mm/perccel indulva a kezdeti szakaszon). A számításokhoz a vizsgált szakaszoknál a próbatest szélessége és vastagsága le lett mérve, belőlük szakító- és hajlítószilárdságot, valamint modulus értékeket számoltam.

3.3. Ütve hajlító vizsgálatok

A próbatestek ütőszilárdságának vizsgálatához a Charpy-féle ütve hajlító vizsgálatot alkalmaztam (ISO 179), amelyhez egy Ceast 6545 típusú vizsgáló berendezést használtam, 2 J-os kalapáccsal. A próbatesteken a vizsgálatok bemetszés nélkül, 62 mm-es támaszszélességgel lettek elvégezve. A szükséges, 80 mm hosszú próbatesteket a fröccsöntött darabokból készítettem el a befogó rész eltávolításával, szalagfűrészsel.

3.4. Keménységmérés

A keménységmérést az D típusú tűvel felszerelt Shore keménységmérővel végeztem el a fröccsöntött próbatesteken. A mérőberendezés működtetése állványzat nélkül, kézi erővel történt. Ehhez a SZE – Logisztikai és Szállítmányozási Tanszék – Csomagolás és Környezetállósági vizsgáló laboratóriumának keménységmérőjét használtam.

3.5. Nedvességfelvétel

A nedvességfelvétel meghatározásához a fröccsöntött darabokból készítettem próbatesteket. Szalagfűrész segítségével öt próbatestet vágtam ki. Ezután 24 órán keresztül (a

tömeg állandósulásáig) szárítottam őket, majd lemértem a kivágott darabok tömegét milligramm pontosságra. A próbatesteket végül egy lefedett műanyag dobozban, 20 mm mélyen desztillált vízbe merítettem közel 60 napra, időről időre megmérve a tömeg változását az (1)-es összefüggéssel számolva:

$$WA[\%] = \frac{W_n - W_d}{W_d} \times 100 \quad (1)$$

ahol WA a vízfelvétel mértéke, W_d és W_n pedig a próbatestek vízbe merítés előtti és utáni tömege.

3.6. Lebomlás vizsgálat

A lebomlás vizsgálata az ISO 20200 szabvány alapján történt. A vizsgálatához 20 x 20 mm felületű, 1 mm vastag mintákat készítettem. A minták a fröccsöntött próbatestekből készültek, amelyeknek a középső részéből közel azonos méretű darabokat vágtam le szalagfűrész segítségével. Ezekből kis lemezeket készítettem egy Labtech LP-20B hidraulikus présen, 180 °C hőmérsékleten olyan formalapot használva, amelyen 9 darab azonos lemez készíthető.

A szabvány szerint ezután speciálisan előírt összetételű komposztot tartalmazó reaktorokat készítettem, bennük a próbatesteket elhelyeztem, elástam. A reaktorok 280 x 190 x 140 mm³ térfogatú, polipropilénből készült áttetsző műanyag dobozok, amelyek rövidebb oldalán 5 mm átmérőjű lyukak lettek fúrva oldalirányban középen, 80 mm magasságban a szellőzés céljából. A reaktorokba a szabvány szerint töltött komposzt összetevői a 6. táblázatban láthatók.

Összetevő	Tömeg (g)
Fűrészpor	180
Nyúleledel	135
Komposzt	45
Keményítő	45
Cukor	22.5
Kukoricacsíra étolaj	18
Karbamid	4.5
Desztillált víz	550
Összesen	1000 g

6. táblázat A komposzt összetevői és azok tömege

A reaktorok ezután egy ACS DY110 (T) Compact típusú klímakamrába lettek helyezve. Összességében 28 napon keresztül voltak a reaktorok itt tárolva 58 °C-on, 50%-os páratartalom mellett. Előírás szerint (7. táblázat) a reaktorokban lévő komposztot bizonyos időközönként megkevertem, az elpárolgott desztillált vizet pótoltam.

Komposzt összeállítása óta eltelt idő [nap]	Művelet
0	Komposzt kiindulási tömeg rögzítése
1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14	Víz adagolása a kiindulási tömeg visszaállításához, keverés
8, 10, 16, 18, 21, 23, 25, 28	Víz adagolása a kiindulási tömeg visszaállításához

7. táblázat Szabvány által előírt időbeosztás és utasítások a komposzt kezeléséhez

A komposztról és a benne elhelyezett próbatestekről a 6. ábrán látható fényképes felvétel.



6. ábra Komposztálási vizsgálat kialakítása - reaktor, benne a komposzt, illetve a próbatestek beásásra készen elhelyezve

A cél az volt, hogy a bomlás folyamatának minden aspektusa dokumentálva legyen. Ez öt reaktor elkészítésével valósult meg. Az 1-es reaktornál a vizuális dokumentálás volt a cél, ezért minden egyes keverés és víz hozzáadás során képek készültek a benne lévő próbatestekről. A 2-es reaktornál a próbatestekből hetente mintákat vettem későbbi DSC és FTIR elemzésre. A maradék 3-ból hetente egyszer egy reaktort megbontottam, és a bomló próbatestek tömegét lemérve próbáltam a bomlás mértékét, időben való lefolyását vizsgálni. Jelen TDK dolgozatban csak az 1-es reaktor mintáin elvégzett vizuális dokumentálás eredményeit ismertetem. A többi mérés eredményei jelenleg is kiértékelés alatt állnak.

3.7. Differenciál pásztázó kalorimetria (DSC)

A minták kristályosságának és az átalakulási hőmérsékletei változásának vizsgálatához

differentiál pásztázó kalorimetriás (DSC) mérést végeztem, amelyet egy Netzsch DSC 200 F3 típusú géppel hajtottam végre. A mintákat a fröccsöntött próbatestekből metszettem ki, minden esetben ugyanarról a helyről.

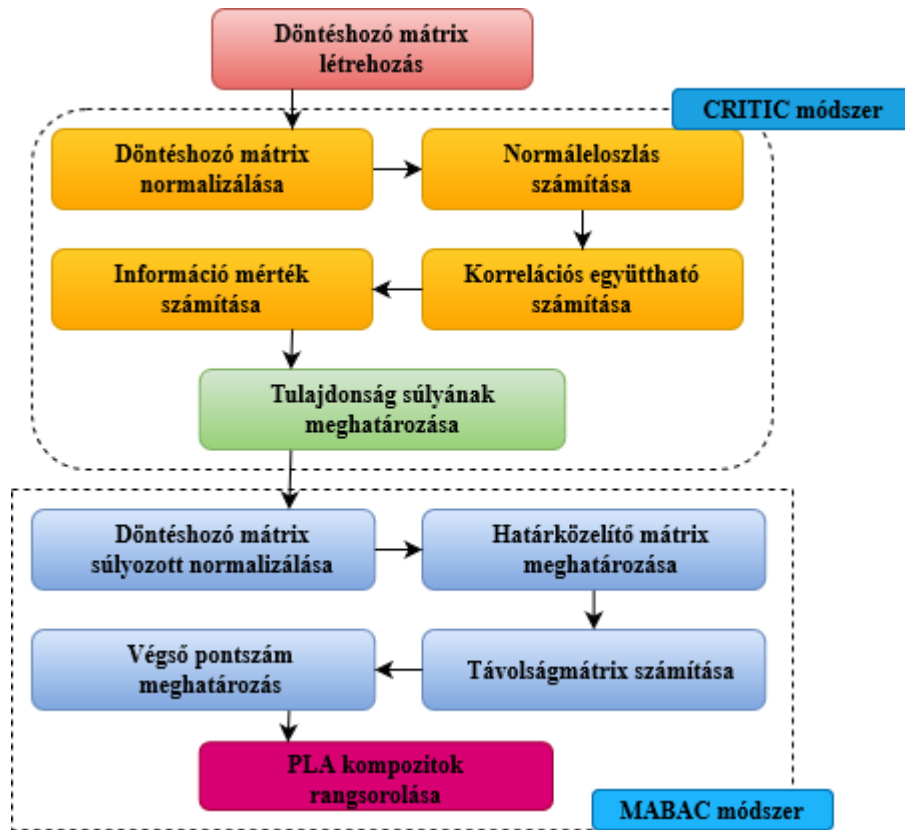
A mérés során a mintákat felmelegítettem 200 °C-ra szobahőmérsékletéről 5 °C/perc hőmérsékletnöveléssel, majd lehűtöttem őket 5 °C/perc sebességgel 30 °C-ig. Ez a termikus előélet törlését szolgálta. Ezután ismét felmelegítettem 200°C-ra azonos sebességgel. A második felfűtés eredményeit vizsgáltam, amelyből megállapíthatók az üvegesedési átmenet (T_c), a hidegkristályosodási hőmérséklet (T_{cc}), az ahhoz tartozó entalpia (ΔH_{cc}), a kristályolvadási hőmérséklet (T_m) és az ahhoz tartozó entalpia (ΔH_m). A töltőanyagtól függően a kristályos részarány (X_c) is változik, amely a 2. összefüggés alapján lett számolva:

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{mPLA}^\infty * \omega_{PLA}} \quad (2)$$

ahol ΔH_{mPLA}^∞ a 100%-osan kristályos PLA ideális olvadási entalpiája, amelyet 93 J/g-ban határoztak meg [48], ω_{PLA} pedig a PLA részaránya a vizsgált kompozitban.

3.8. Optimumkeresés

Az elkészített minták különböző tulajdonságai – ahogy ez az eredményekben később látható lesz – eltérő trendeket mutattak. Emiatt egyértelmű megállapítást tenni azzal kapcsolatban, hogy az egyik jobb-e mint a másik általánosságban nem lehetett. Hogy mégis érdemi konklúziót tudjak levonni az eredményekből, a szakirodalmi áttekintésben is ismertetett optimumkereséshez folyamodtam. Ehhez az úgynevezett CRITIC-MABAC hibrid algoritmust [49] használtam, amelynek folyamatáról átfogó betekintést a 7. ábra ad.



7. ábra A CRITIC-MABAC hibrid módszer lépései [49] alapján

Az optimumkeresést az adatok manuális feldolgozásával, Microsoft Excel szoftverrel végeztem. Ennek folyamatát az alábbiakban lépésenként ismertetem. Első lépésként elkészítettem az adatokból a kiindulási mátrixot a 3. összefüggés alapján.

$$A_{pq} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1j} & \cdots & A_{1q} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2j} & \cdots & A_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ A_{i1} & A_{i2} & \cdots & A_{ij} & \cdots & A_{iq} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{p1} & A_{p2} & \cdots & A_{pj} & \cdots & A_{pq} \end{bmatrix} \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, q \end{matrix} \quad (3)$$

A mátrixban az oszlopok egy-egy variációt jelölnek adott anyagtípusra vonatkoztatva (pl.: 1. oszlop a társítatlan PLA, 2. oszlop a PLA + 2.5 m% len párosítás, 3. oszlop az 5 m%-os stb.) A sorok különböző tulajdonságokat jelölnek (szakítószilárdság, keménység stb.). A képletben az i és j adott sorban és oszlopban lévő tulajdonságot jelöl, míg a p és q a vizsgált tulajdonságok számát és a variációk számát jelzi.

Ezután normalizáltam a mátrixot, hogy az adatok kezelhetőbbek legyenek. Ehhez az adatokat összehasonlítottam a minimális és maximális mért értékekkel a 4-5. összefüggések alapján.

$$\bar{A}_{ij} = \frac{A_{ij} - \min(A_j)}{\max(A_j) - \min(A_j)}, \text{ ha egy adott tulajdonság esetén a magasabb érték a jobb} \quad (4)$$

$$\bar{A}_{ij} = \frac{\max(A_j) - A_{ij}}{\max(A_j) - \min(A_j)}, \text{ ha egy adott tulajdonság esetén az alacsonyabb a jobb} \quad (5)$$

Ezt követően korrelációs együtthatót határoztam meg a különböző tulajdonságok között (6. összefüggés), melyet a Microsoft Excel maga is ismer és a számításához a következő képletet alkalmazza:

$$\sigma_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^p (\bar{A}_{ij} - \Delta_j) * (\bar{A}_{ik} - \Delta_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (\bar{A}_{ij} - \Delta_j)^2 * \sum_{i=1}^p (\bar{A}_{ik} - \Delta_k)^2}} \quad (6)$$

ahol a Δ_j és Δ_k a két összehasonlított tulajdonságok átlaga a különböző kompozit variációk között (pl. a szakítószilárdságok átlaga és a rugalmassági modulusok átlaga minden összehasonlított kompozit variáció közt). Ezeket az átlagokat a 7. összefüggéssel lehet meghatározni.

$$\Delta_j = \frac{1}{p} * \sum_{i=1}^p \bar{A}_{ij}; j = 1, \dots, q, \Delta_k = \frac{1}{p} * \sum_{i=1}^p \bar{A}_{ik}; k = 1, \dots, q \quad (7)$$

Ezt követi az információ mértékének (χ_j) meghatározása a 8. összefüggés szerint:

$$\chi_j = \partial_j * \sum_{k=1}^q (1 - \sigma_{jk}); j = 1, \dots, q \quad (8)$$

ahol ∂_j az adott tulajdonság szórása. Következő lépés az egyes tulajdonságok súlyozása (ϖ_j), azaz annak meghatározása, hogy melyik tulajdonság hangsúlyosabb az optimum keresése során a 9. összefüggés alapján.

$$\varpi_j = \frac{\chi_j}{\sum_{j=1}^q \chi_j}; j = 1, \dots, q \quad (9)$$

Ez a képlet a tulajdonságok súlyát határozza meg egy 0 és 1 közötti tartományon belül. Ezeknek a súlyoknak az összege 1-re adódik össze. Ez azért lesz fontos a továbbiakban, mert így létrehozható az alap adatokat tartalmazó mátrixból a súlyozott normalizált döntéshozó mátrix ($\omega = [\varpi_{ij}]_{p \times q}$), amely úgy készül el, hogy a korábban normalizált mátrix elemeihez hozzáadunk egyet, majd a megegyező tulajdonság súlyával megszorozzuk (10. összefüggés).

$$\omega_{ij} = \varpi_j * (\bar{A}_{ij} + 1), i = 1, \dots, p; j = 1, \dots, q \quad (10)$$

Ezután következik a határközelítő mátrix (B_j) összeállítása a 11. összefüggés alapján.

$$B_j = \left(\prod_{i=1}^p \omega_{ij} \right)^{\frac{1}{p}}, j = 1, \dots, q \quad (11)$$

Végül létrehoztam a távolságmátrixot ($D = [D_{ij}]_{p \times q}$) a 12. összefüggéssel.

$$D_{ij} = \omega_{ij} - B_j, i = 1, \dots, p; j = 1, \dots, q \quad (12)$$

A távolságmátrix az adott kompozitok tulajdonságainak távolságát határozza meg a határmátrixból. Ebből az adatból egy pontozási rendszert tudtam létrehozni (13. összefüggés).

$$\phi_i = \sum_{j=1}^q D_{ij}, i = 1, \dots, p \quad (13)$$

A pontok segítségével rangsort tudtam felállítani a különböző kompozitok közt. A pontozásnál a legmagasabb értékű mintát tekintettem a legjobb variációnak.

3.9. Egyszempontos varianciaanalízissel egybekötött Tukey próba

A különböző kompozitok töltőanyagarányától függően eltérő mechanikai tulajdonságot mutatnak. Ezen eltérések közötti szignifikancia meghatározása érdekében összehasonlító számításokat végeztem egyszempontos varianciaanalízissel (ANOVA) egybekötött Tukey próbával. Ennek lényege, hogy objektív módon figyelembe véve a minták számát és szabadsági fokokat, az eloszlás figyelembe vételével meghatározzuk, hogy a különböző kompozitok között mért adatok szignifikáns eltérést mutatnak-e. Az ANOVA varianciaanalízist automatikusan végeztem el a Microsoft Excel-be beépített modullal, míg a Tukey próbához a számításokat önállóan beírt képletekkel hajtottam végre. Ezek ellenőrzését egy szabadon hozzáférhető forrás [51] segítségével is elvégeztem. Az eredmények közti különbségeket statisztikailag szignifikánsnak tekintettem, ha a p-értékek kisebbre adódtak az 5%-os szignifikancia szintnél.

4. Eredmények kiértékelése

Ebben a fejezetben a korábban felsorolt mérések eredményeit szeretném bemutatni az általam választott kompozitok esetén. Az eredmények kiértékelését követően az összeállított adathalmazból optimumkeresési módszer segítségével kiválasztom a legelőnyösebb kompozit(ka)t.

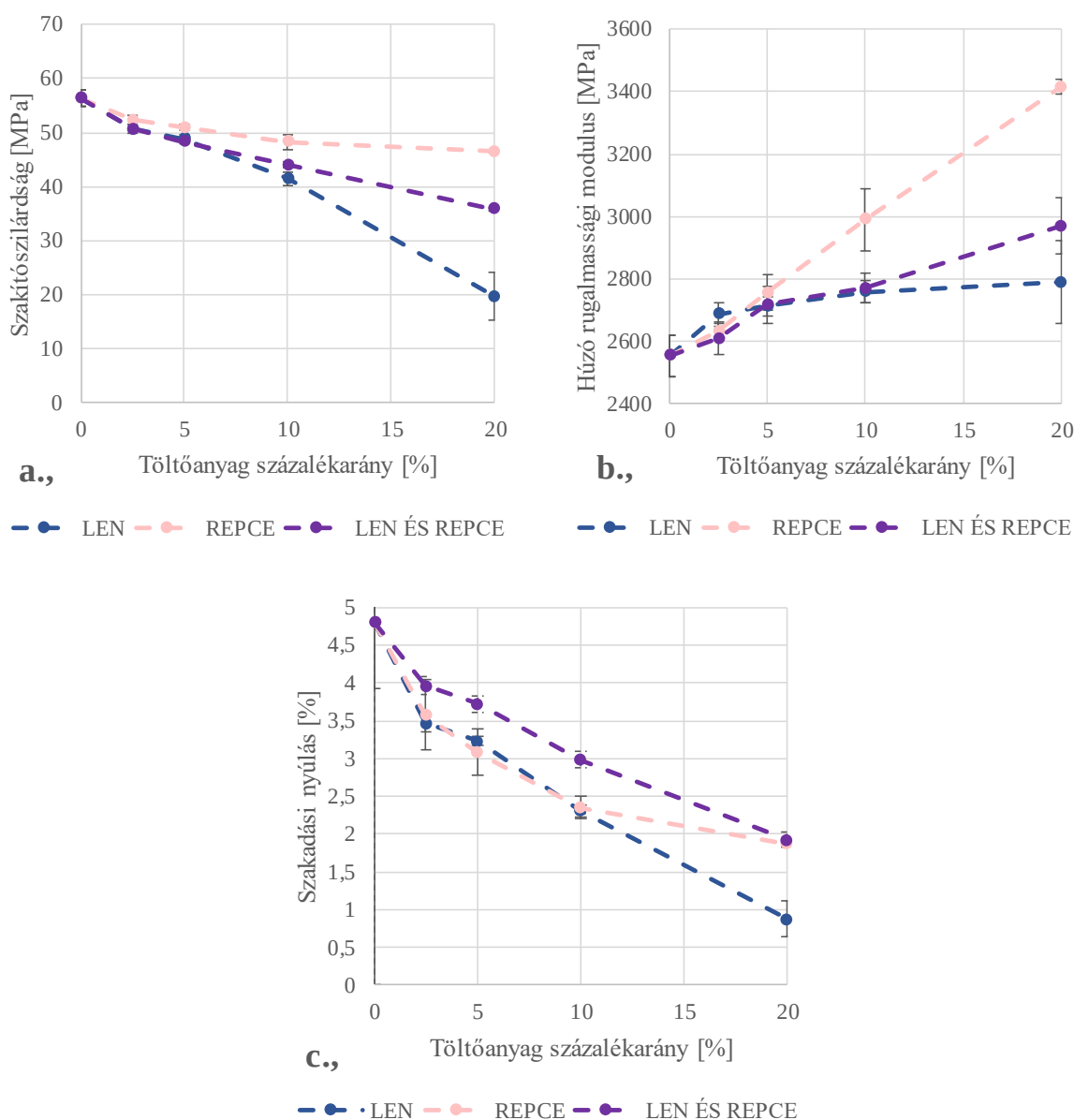
4.1. A szakítóvizsgálatok eredményei

A 8. ábrán láthatóak a szakítóvizsgálatok révén meghatározott anyagtulajdonságok (szakítószilárdság, húzó rugalmassági modulus és szakadási nyúlás) alakulásai a töltőanyag típusa, valamint azok mennyiségének függvényében. A 9. ábra a mintákhoz köthető, jellegzetes szakítógörbét mutatja be. Fontos megjegyezni, hogy ebben a dolgozatban a PLA/len és PLA/len/repcse kompozitok előállításával és minősítésével foglalkoztam, a PLA/repcse kompozitokra vonatkozó mérési eredmények nem sajátok. Azok Ősze János 2022 tavaszi Tudományos Diákkonferenciára készült dolgozatához [50] kötődő mérések, azokat csak azért tüntettem fel – halvány színnel – a diagramokon, hogy a szöveges kiértékeléseim megalapozottabbak lehessenek, és hogy az olvasó teljes képet kaphasson a PLA/lenmag/repceszalma kompozitokról.

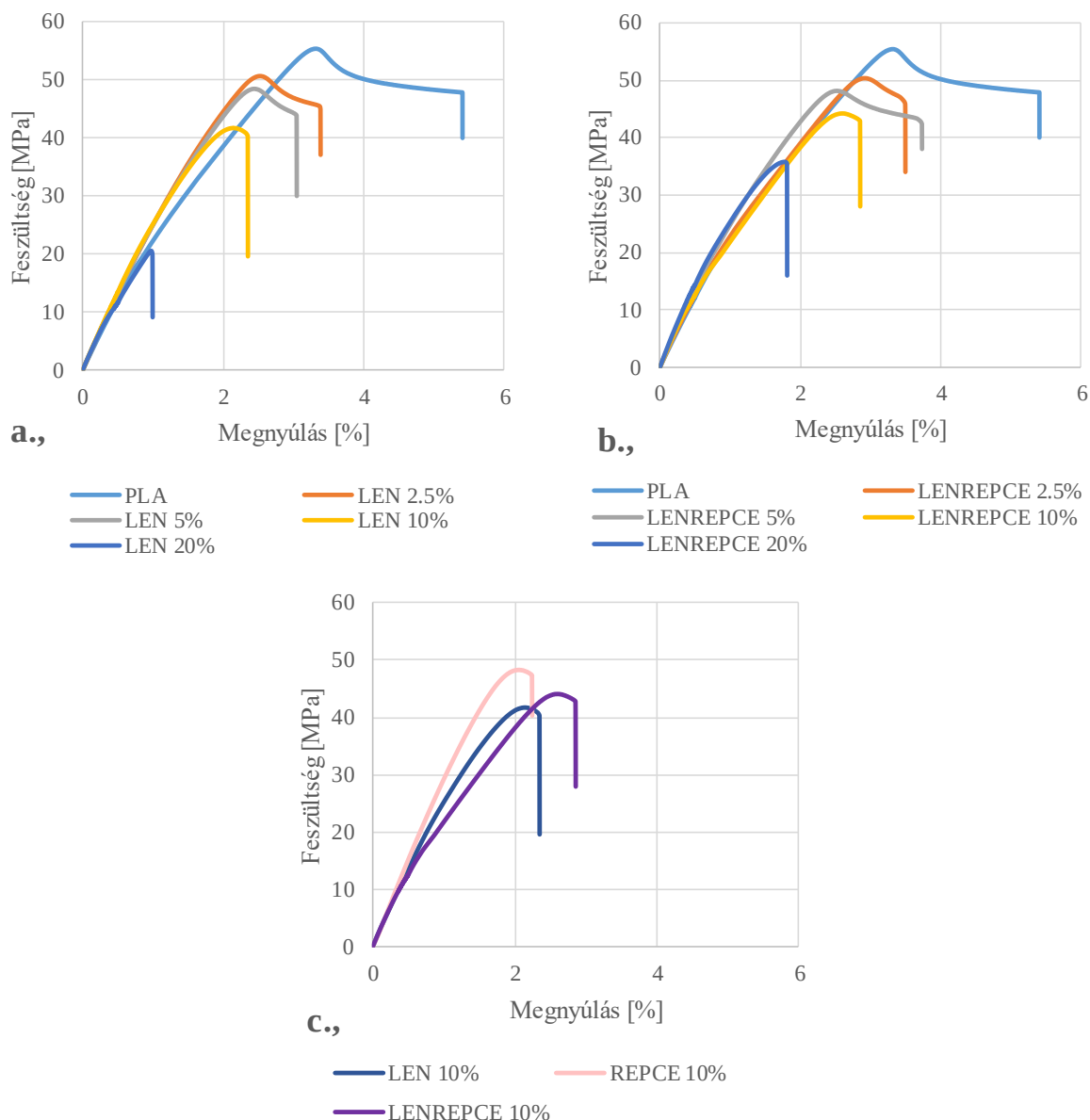
A 8/a ábrán jól látszik, hogy a töltőanyag növekedésével arányosan a szakítószilárdság értékek csökkennek. Ez betudható annak, hogy a növényi szálak vélhetően nagyon gyenge adhéziós kapcsolattal kötődnek a PLA-hoz az összetevők eltérő polárossága végett. A szakirodalomban emiatt többen is alkalmaztak adalékanyagokat a jobb kapcsolódás érdekében, mert ennek hiányában nehezen, vagy épp egyáltalán nem tudunk elérni szilárdságnövekedést. Jól látszik, hogy a töltőanyag növelése (különösen 10 m%-on túl) fokozza a szilárdsági értékek csökkenését, ezért szilárdság szempontjából nem célszerű magas százalékban tölteni a PLA-t ezekkel a növényi szálakkal. Az eredmények alapján a repce tűnik a legjobb töltőanyagnak, míg a len a leggyengébbnek, különösen 20 m% töltőanyagnál, ahol a szilárdság alig harmada az eredeti értéknek. A két töltőanyag kombinálása esetén a szilárdságok köztes értékeket vettek fel. Rugalmassági modulus szempontjából a növényi szálak elég merevek ahhoz, hogy a PLA húzó rugalmassági modulusát növeljék. A repce és a len is azért volt képes növelni a PLA rugalmassági modulusát (8/b ábra), mert a meghatározásához használt kezdeti tartományban a deformáció még minimális ($\varepsilon=0,0025-0,0005$), ezért az összetevők közti adhéziós kapcsolat még kevésbé fontos tényező, mint inkább az anyagok saját tulajdonságai. Hasonlóan a szilárdsághoz, itt is a repcével társított PLA teljesített a legkiemelkedőbben, míg a len bizonyult

a legkevésbé előnyös választásnak, miközben a kettő kombinációja köztes teljesítményt mutatott. A szakadási nyúlás értéke (8/c ábra) minden adalék esetén csökkenő tendenciát mutatott. Érdekes módon, a hibrid módon (lenmag+repceszalma) adalékolt PLA próbatestek a teljes tartományon jobban teljesítettek a kétösszetevős kompozitoknál a szakadási nyúlás tekintetében. Ennek magyarázatában a későbbiekben elvégzendő elektronmikroszkópos vizsgálatok adhatnak majd támpontot.

A szakítóvizsgálat adatain elvégzett egyszempontos varianciaanalízissel egybekötött Tukey próba eredményeit a Mellékletben ismertetem táblázatos formában.



8. ábra A szakítószilárdság (a.), a rugalmassági modulus (b.) és a szakadási nyúlás (c.) alakulása a töltőanyag típusa és mennyisége függvényében. Halvány színnel az Ősze János TDK dolgozatából [50] átvett eredmények



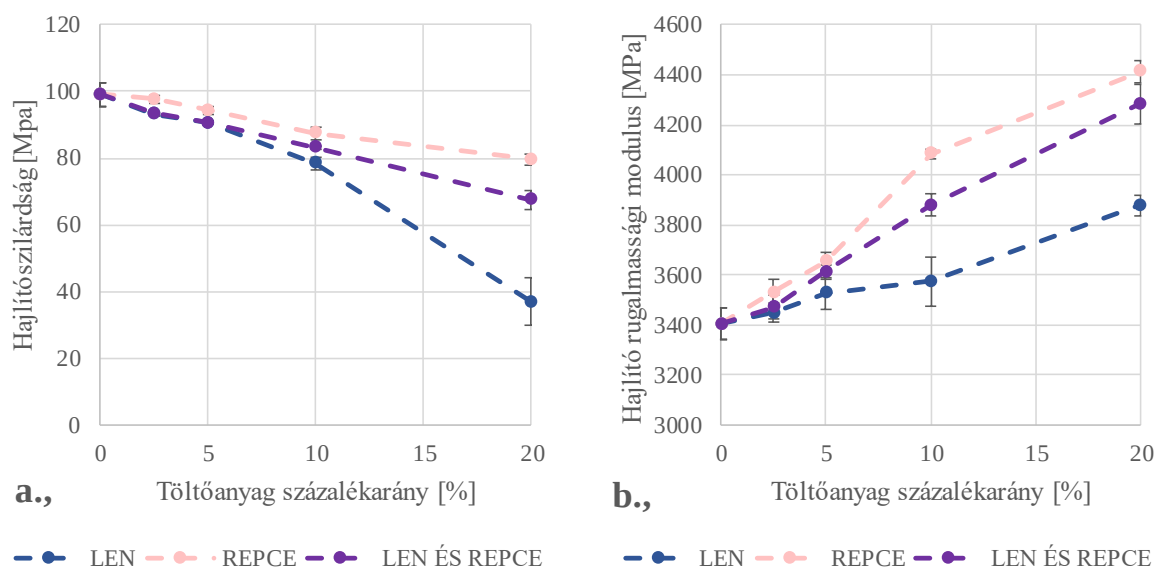
9. ábra Különböző mennyiségű lenmaggal (a.) és repceszalmával (b.) töltött PLA darabok szakítógörbéi, valamint 10 m% len, repce és len/repce (c.) töltésű minták szakítógörbéinek összehasonlítása

4.2. A hajlító vizsgálatok eredményei

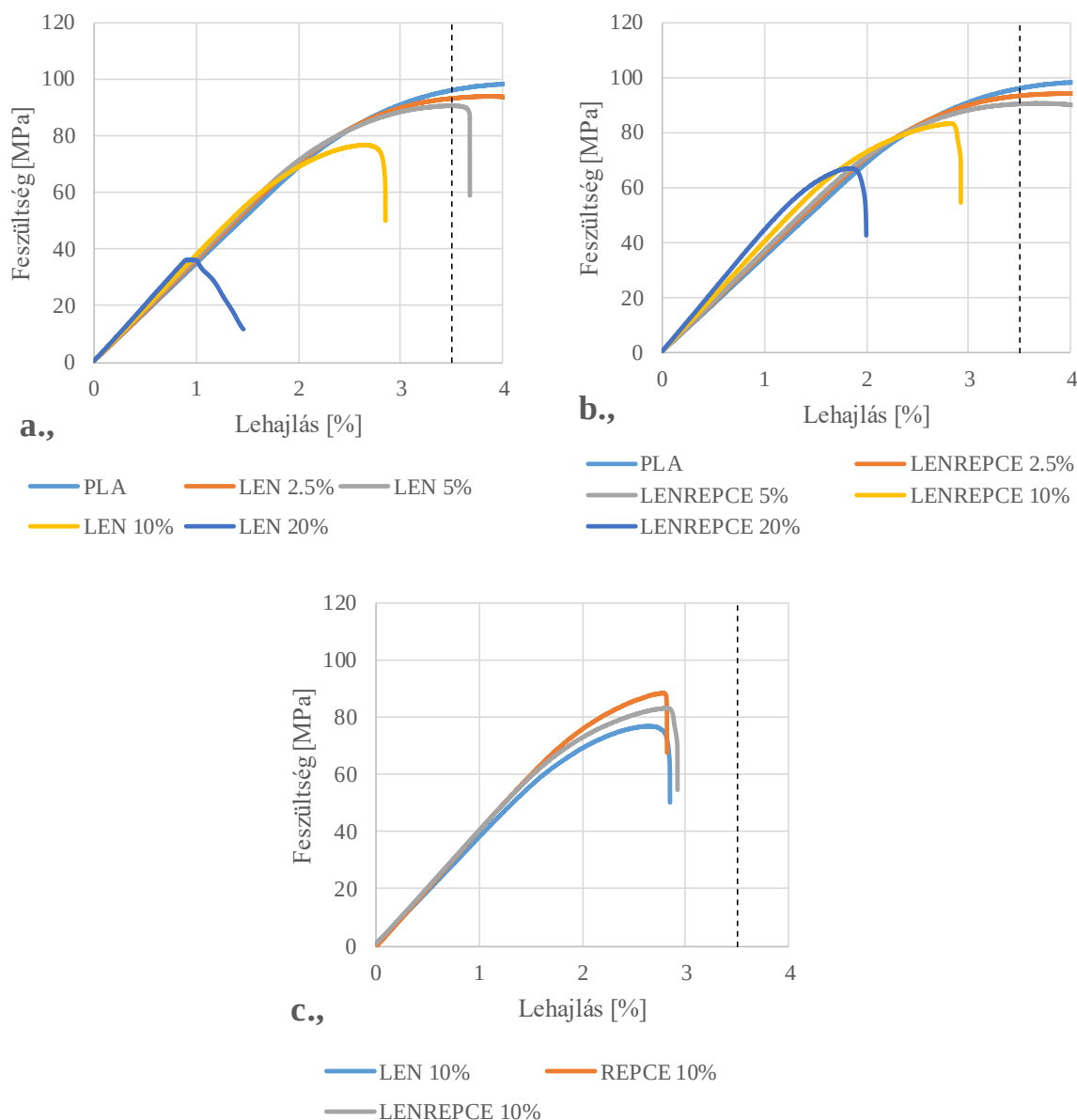
A hajlító vizsgálatok eredményeit (határhajlító szilárdság és hajlító rugalmassági modulus) a 10. ábrán mutatom be, míg a jellemző hajlítógörbék a 11. ábrán láthatóak. Azokban az esetekben, amikor a próbatestek már a határhajlításhoz tartozó lehajlási érték előtt eltörtek, a hajlítószilárdság értékeivel helyettesítettem őket. A 10/a diagramról leolvasható, hogy a szilárdság, hasonlóan a szakítószilárdság értékeihez fokozatosan csökken a növekvő növényi töltőanyag tartalommal párhuzamosan, bár a csökkenés üteme kisebb. Az ilyen típusú terhelésre

tehát jobban reagálnak a kompozitok az egytengelyű húzáshoz képest. A modulusok, hasonlóan a szakítóvizsgálatok során meghatározottakhoz, ezúttal is rendkívül megnövekednek a töltőanyag tartalom növelésével. Az eredmények közt továbbra is kiemelkednek a repcét is tartalmazó minták a lenmag őrleményhez képest.

A hajlító vizsgálat adatain elvégzett egyzempontos varianciaanalízissel egybekötött Tukey próba eredményeit a Mellékletben ismertetem táblázatos formában.



10. ábra A határhajlító feszültség (a.) és a hajlító rugalmassági modulus (b.) alakulása a töltőanyag típusa és mennyisége függvényében. Halvány színnel az Ősze János TDK dolgozatából [50] átvett eredmények

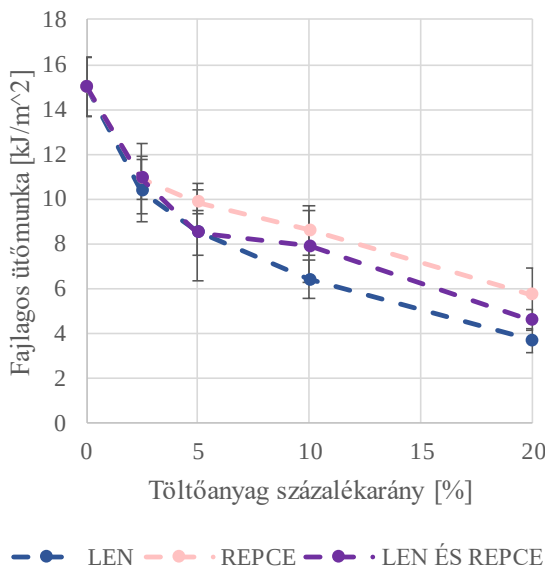


11. ábra Különböző mennyiségű lenmaggal (a.,) és repceszalmával (b.,) töltött PLA darabok szakítógörbéi, valamint 10 m% len, repce és len/repce (c.,) töltésű minták hajlító görbéinek összehasonlítása

4.3. Az ütve hajlító vizsgálat eredményei

A szakító- és hajlítóvizsgálatok eredményéből már lehet látni, hogy a kompozitok csökkent mechanikai szilárdságot mutatnak kvázi-statisz terhelés ellenében. Az ütve hajlító vizsgálatok a dinamikus igénybevételekkel szembeni ellenállást, a szívósságot mutatják meg. A 12. ábrán látható, hogy a darabok dinamikus ütés hatására könnyebben törnek a töltőanyag tartalom növelésével mind len, repce és len/repce összetételek esetén. A tulajdonságok romlása sokkal intenzívebb a kvázi-statisz vizsgálatnál tapasztaltaknál. Ez azt mutatja, hogy a növényi

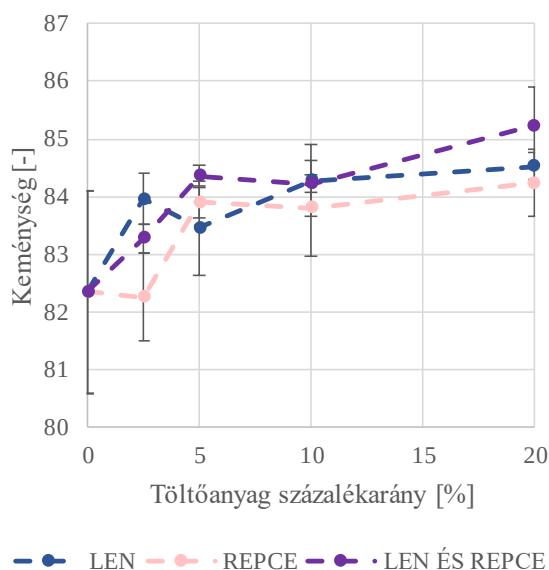
szemcsék ütte hajlítás közben hibahelyként viselkedve a PLA rideg törésének kedveztek. Az ütte hajlító vizsgálat adatain elvégzett egyponstos varianciaanalízissel egybekötött Tukey próba eredményeit a Mellékletben ismertetem táblázatos formában.



12. ábra Fajlagos ütőmunka alakulása a különböző töltőanyagok százalékarányával megfelelően. Halvány színnel az Ősze János munkájából [50] átvett eredmények

4.4. A keménységmérés eredményei

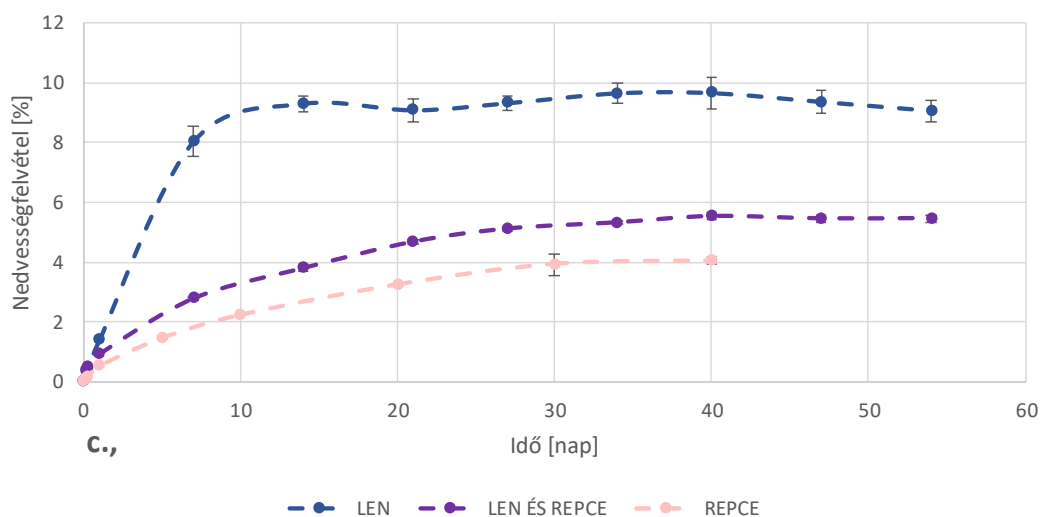
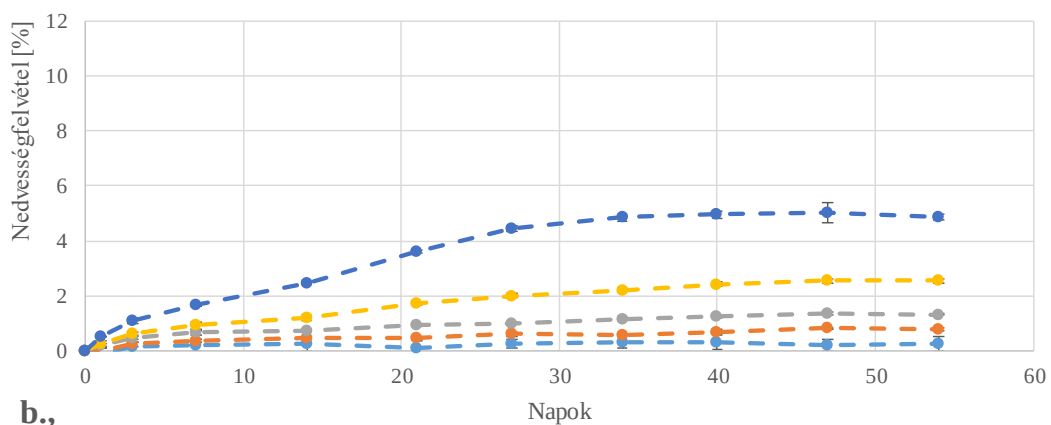
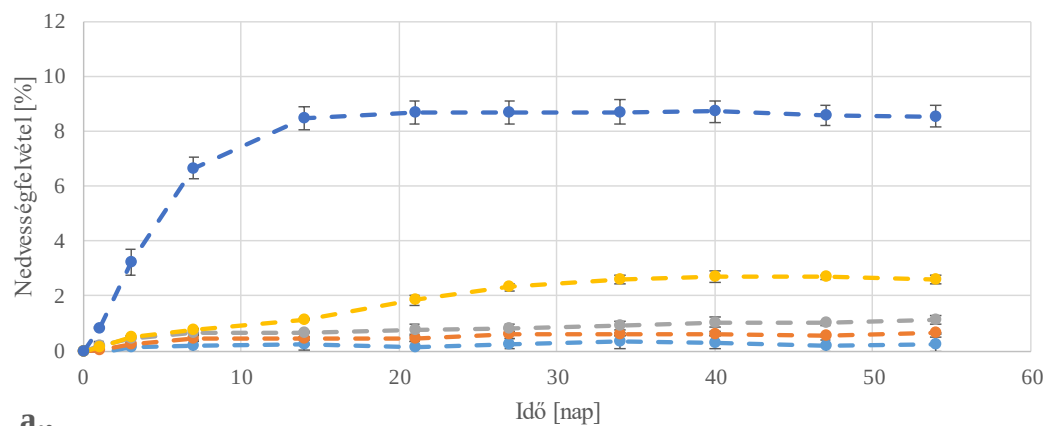
A keménységmérés eredményeit a 13. ábra mutatja. A méréseket ezúttal a repceszalmával töltött kompozitok esetében is magam végeztem, ezzel Ősze János TDK dolgozatát [50] tovább gondolva (abban nem esett erről szó). Látható, hogy mind a repce, mind pedig a lenmag őrlemény és ezek keveréke is javítja a PLA keménységét. Ennek oka, hogy a merev szemcsék akadályozzák a PLA molekulaláncainak elmozdulását a szűrő terhelés közben. Észrevehető, hogy a repce ezúttal nem kerekedett felül a többi anyaghoz képest. Fontos azonban megjegyezni, hogy a keménységmérések eredménye rendkívül nagy szórással rendelkezett, elsősorban a mérési bizonytalanságból (állvány nélküli, kézi mérés), és a mérési felületek eltérő jellegéből (pl. beszívódások) adódóan. A keménységmérés adatain elvégzett egyponstos varianciaanalízissel egybekötött Tukey próba eredményeit a Mellékletben ismertetem táblázatos formában.



13. ábra Keménység alakulása a különböző töltőanyagok százalékarányával megfelelően.

4.5. Nedvességfelvétel

A természetes szálak hidrophil jellegük révén eredendően nagyobb vízfelvéésre hajlamosak, mint a hidrofób PLA, így tudjuk, hogy a töltőanyag növelése a próbatestek tömegének növekedésével jár nedves közegben. A nedvességfelvétellel kapcsolatos méréseim eredményeit a 14. ábrán mutatom be a különböző növényi szálak alkalmazása esetén. A görbék alapján meg lehet állapítani, hogy a minták telítődéséhez mindegyik töltőanyag esetén kb. 30 napra volt szükség. Észre lehet venni továbbá, hogy a tisztán lenmagot tartalmazó kompozitok sokkal nagyobb mértékben vesznek fel nedvességet, a repceszalmát is tartalmazó kompozit társításhoz képest. A 14/c ábrán összehasonlítottam a lenmagot és a lenmag/repce hibrid adalékot tartalmazó PLA mintákat az Ősze János által vizsgált PLA/repce mintákkal is. Ebből jól látszik, hogy a lenmaggal töltött minták vesznek fel a legtöbb nedvességet, a repceszalmát tartalmazó minták a legkevesebbet, míg a hibrid rendszerek köztes értékeket vesznek fel.



14. ábra Len (a.), len és repce (b.) nedvességfelvétele százalékos arányban napokra lebontva, illetve 20 m% len, repce, len és repce (c.) nedvességfelvétele százalékos arányban. Halvány színnel az Ősze János munkájából [50] átvett eredmények

4.6. A komposztálhatósági vizsgálatok eredményei

A bomlási vizsgálatokat az ISO 20200 szabvány szerint végeztem el. A 15. ábra szemlélteti a lebomlás folyamatát majdnem négy héten keresztül. A vizsgálatokat ezúttal is magam végeztem az összes mintán. Látható, hogy az első hetet követően még az összes minta egy darabban volt, de a magas növényi szál tartalmúak már ekkor repedezetté váltak, meggyengült a szerkezetük. A magasabb töltőanyag százalékat tartalmazó próbatesteken ennek megfelelően hamarabb megindult a bomlás, a 20 m% lenmag tartalmú minta töredezett elsőként, a második hetet követően. Ennek megfelelően ez volt az a minta, amely elsőként aprózódni is kezdett, a harmadik hét után már alig lehetett néhány töredéket felfedezni belőle, ellentétben az összes többivel. A PLA volt az egyetlen próbatest, ami még ekkor is egészben volt, ezen az egyetlen megfigyelhető változás az elfehéredés volt. Ez is lehet a degradáció jele, ugyanis a molekulaláncok tördelődése elősegíthette az anyag kristályosodását, ami az átlátszóság megszűnéséhez vezet. Ennek igazolására a későbbiekben DSC méréseket fogok végezni a bomlasztott mintákon is. A negyedik hét végén már az összes minta erősen töredezett. Sajnos ekkor már annyira gyenge volt a szerkezetük, hogy a komposztból származó szennyeződések sem tudtam eltávolítani a felületükről, különben szétmorzsolódtak volna. Emiatt az fényképes felvételeken a komposztal szennyezett darabok sokszor észrevehetetlenek, ezért a 15. ábrán piros nyilakkal mutattam rá az egyes darabkákra. Összességében az a következtetés vonható le, hogy minden adalék elősegítette a PLA lebomlását, de minél nagyobb volt az adalékok közt a lenmag mennyisége, a bomlás annál hatékonyabb volt. Ez összefüggésben állhat az előző fejezetben (4.5) bemutatott ténnyel, ami szerint a len tartalmú minták nedvességfelvétele is nagyobb. A komposztból magába szívott nagyobb nedvesség tartalom vélhetően fokozta a PLA hidrolitikus bomlási folyamatát.

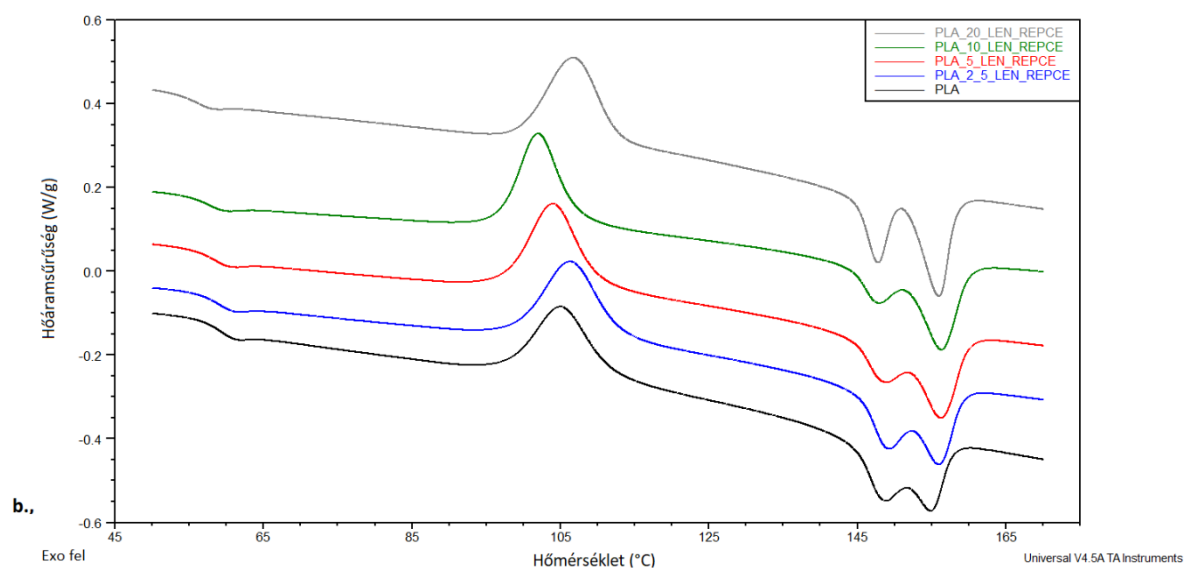
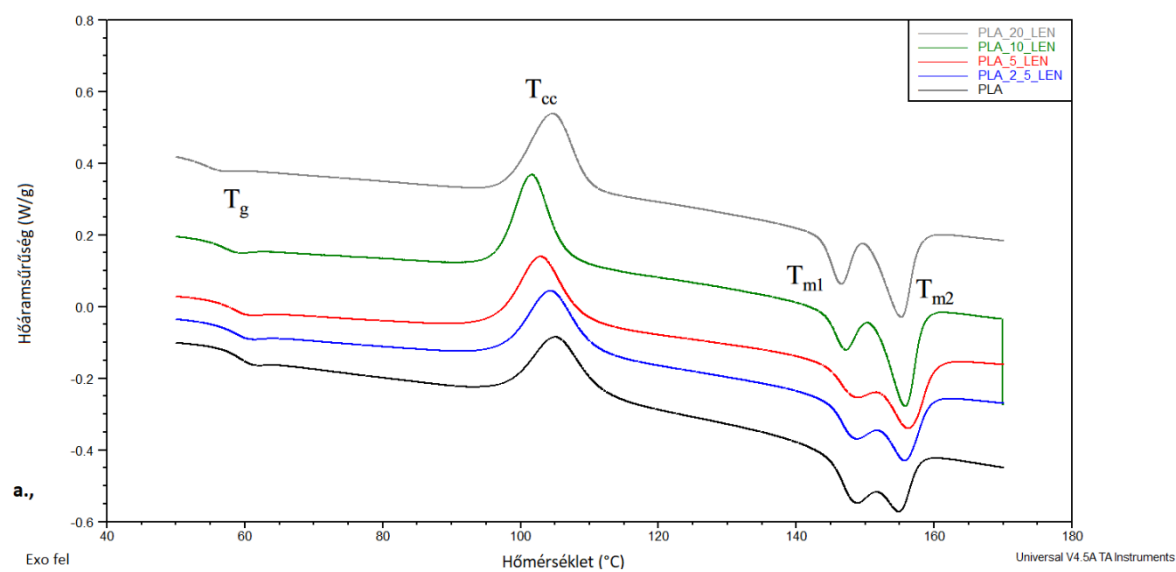
	0. hét	1. hét	2. hét	3. hét	4. hét
PLA					
PLA+10%len					
PLA+20%len					
PLA+10%repcé					
PLA+20%repcé					
PLA+10%len és repce					
PLA+20%len és repce					

15. ábra A bomlás folyamata hétről hétre, fényképes felvételekkel dokumentálva

4.7. A DSC mérések eredményei

A 16. ábrán a különböző kompozitok és a PLA DSC görbéi láthatóak. Jól látszódnak a görbéken a különböző átalakulási folyamatok, mint az üvegesedés az alapvonal eltolódásaként, a hideg kristályosodás és a kristályolvadás pedig mint exoterm és endoterm csúcs(páron)ként. Az átalakulási folyamatok hőmérsékleteit, a hozzájuk tartozó entalpiaváltozásokat és a kristályosság százalékos értékeit a 8. táblázatban gyűjtöttem össze. Látható, hogy a növényi szemcsék csökkentették a PLA üvegesedési hőmérsékletét (T_g), ami a szakirodalom alapján nem indokolt, a (növényi) töltőanyagok jellemzően inkább megnövelik azt. Molnár és társai [52] az enyémhez hasonló eredményeket értek el CaSO_4 töltésű PLA minták esetén, de a jelenséget megmagyarázni ők sem tudták. Egy esetleges magyarázat lehet a hidrofíl szemcsék által felvett nedvesség lágyító hatása a PLA-ra nézve. A hidegkristályosodási hőmérséklet (T_{cc}) a töltőanyag tartalom növelésével alacsonyabb hőmérsékletre tolódott mind a lenmag, mind pedig a lenmag/repceszalma töltöttségű minták esetén. Kivételt képeznek a 20 m% adalékot tartalmazó minták, ahol éppen az ellenkezője történt. Ennek magyarázata az lehet, hogy a növényi szemcséknek a PLA-ban kettős, egymással ellentétes hatása van, és míg alacsonyabb töltőanyag tartalomnál az egyik a domináns, addig 20 m% esetén ez megfordul. Egyrészt gócképzőként segítik a kristályos szegmensek kialakulását, másrészt merev szemcseként akadályozzák a kristályos struktúrába történő rendeződését a molekulaláncoknak. A legmagasabb hőmérséklet tartományban láthatók a PLA kristályolvadásához kapcsolható endoterm csúcsok (T_{m1} , T_{m2}). A kettős csúcs jelenlétére a szakirodalomban több magyarázat is található, különböző kristály típusok/módosulatok jelenlétének tulajdonítják. [53-54]

A csúcsok alatti területekből meghatároztam az átalakulás entalpiáját, majd a 2-es összefüggéssel a minták kristályosságát (X_c) is kiszámoltam (8. táblázat). Az eredményekből látható, hogy a növényi szálak százalékarányával a PLA kristályos részaránya megnőtt, ez különösen igaz a repcét is tartalmazó mintákra. Fontosnak tartom megemlíteni, hogy ez a kristályosság csak a hidegkristályosodás után igaz. Ezalatt a minták szinte teljesen amorfak voltak, mivel a kristályosodás és a kristályolvadás entalpia értékei majdnem azonos értékeket mutattak.



16. ábra Különböző töltőanyag tartalmú lenmag (a.,) valamint lenmag és repceszalma (b.,) kompozitok DSC görbéi a második felfűtés során

Minta	T _g (°C)	T _{cc} (°C)	ΔH _{cc} (J/g)	T _{m1} (°C)	T _{m2} (°C)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
PLA	59,7	105,2	22,5	148,6	154,9	23,2	25,0
PLA+2,5% len	58,3	104,4	24,2	148,7	155,7	24,4	26,9
PLA+5% len	58,3	102,9	24,7	148,7	156,2	25,7	29,1
PLA+10% len	56,9	101,7	25,1	147,1	155,8	25,1	30,0
PLA+20% len	54,6	104,8	25,2	146,5	155,2	25,0	33,6
PLA+2,5% len és repce	59,1	106,4	24,1	149,3	156,0	25,0	27,6
PLA+5% len és repce	58,5	104,1	24,5	148,7	156,2	25,4	28,7
PLA+10% len és repce	57,6	102,1	22,7	147,9	156,3	23,5	28,1
PLA+20% len és repce	56,1	106,9	24,3	147,8	156,0	24,3	32,7

8. táblázat A DSC görbékből összegyűjtött eredmények

4.8. Optimumkeresés

A korábbi fejezetekben bemutatott eredményeket kiegészítve további releváns adatokkal bevittm a Microsoft Excel táblázatban elkészített CRITIC-MABAC optimumkereső algoritmusba. A már ismertetett mérési eredmények mellett a minták alapanyagköltségét vettem figyelembe, valamint a minták lebomlásának állapotát. Az anyagköltséget az alapanyagokra kapott árajánlatok alapján, azok megfelelő arányosításával számoltam ki, ahol PLA 5 €/kg volt, míg a lenmag őrlemény 1 €/kg, a repceszalma pedig 0,25 €/kg. A lebomlás állapotának figyelembevételkor az ISO 20200 szerinti visszamaradt tömeg arányát vettem figyelembe. Az adott kompozitok rangsorolhatók az egyes tulajdonságok szerint, amelyet a 17. ábrán lehet látni. Egy négyzetben belül az első sorban látható a rangsor száma, a második sorban pedig a tulajdonság konkrét értéke. A növekvő rangsor egy adott tulajdonságra vonatkozik preferencia szerint. Például míg szakítószilárdság esetén a legnagyobbat keressük, addig költségben és bomlás után visszamaradó anyagmennyiségben a legalacsonyabbat, emiatt a sorrend megfordul. A költségen és a bomláson kívül a nedvességfelvétel mértéke az, ahol a legkisebb érték az előnyösebb, így ezeket a tulajdonságokat az 5. összefüggés alapján normalizáltam, minden mást a 4. összefüggés szerint. A 17. ábrán a „p” jelzés az adott kompozitra utal, sorrendben: PLA (p-1); PLA+2.5% len (p-2); PLA+5% len (p-3); PLA+10% len (p-4); PLA+20% len (p-5); PLA+2.5% repce (p-6); PLA+5% repce (p-7); PLA+10% repce (p-8); PLA+20% repce (p-9); PLA+2.5% len és repce (p-10); PLA+5% len és repce (p-11); PLA+10% len és repce (p-12); PLA+20% len és repce (p-13). Mindeközben a „q” jelzés az egyes tulajdonságokat jelzi, sorrendben: hajlító rugalmassági modulus [MPa] (q-1); határhajlító feszültség [MPa] (q-2); húzó rugalmassági modulus [MPa] (q-3); Szakítószilárdság [MPa] (q-4); keménység [-] (q-5); fajlagos ütmunka [kJ/m²] (q-6); nedvességfelvétel 40 napot

követően [%] (q-7); komposztálás után visszamaradt anyag [%] (q-8); alapanyag ár [€/kg] (q-9).

p-1	13 3404,325	1 99,091	13 2552,037	1 56,356	12 82,344	1 14,992	1 0,714	9 56,564	13 5	1	LEGJOBB
p-2	12 3447,956	5 93,132	10 2685,676	5 50,639	7 83,95	4 10,367	4 1,038	11 61,365	12 4,9	2	
p-3	10 3527,502	6 90,695	9 2711,164	6 48,875	10 83,45	7 8,528	6 1,502	7 31,365	9 4,8	3	PREFERENCIA
p-4	8 3573,225	11 78,474	6 2758,383	11 41,462	4 84,275	10 6,41	11 3,052	2 0	6 4,6	4	
p-5	5 3877,08	13 36,955	4 2788,765	13 19,63	2 84,525	13 3,691	13 9,324	2 0	3 4,2	5	
p-6	9 3530,173	2 97,723	11 2631,13	2 52,351	13 82,25	3 10,917	2 0,769	13 76,486	10 4,881	6	
p-7	6 3654,564	3 94,343	7 2755,495	3 50,871	8 83,9	5 9,85	3 1,037	12 73,613	7 4,763	7	
p-8	3 4083,653	8 87,471	2 2989,417	7 48,295	9 83,8	6 8,606	7 1,6	2 0	4 4,525	8	
p-9	1 4414,604	10 79,648	1 3416,381	9 46,496	5 84,233	11 5,732	9 2,232	6 18,568	1 4,05	9	
p-10	11 3471,549	4 93,364	12 2606,828	4 50,692	11 83,275	2 10,935	5 1,187	8 32,106	11 4,891	10	
p-11	7 3611,932	7 90,494	8 2716,197	8 48,267	3 84,35	8 8,502	8 1,693	10 57,105	8 4,781	11	
p-12	4 3880,03	9 83,243	5 2769,575	10 44,03	6 84,225	9 7,884	10 2,875	5 14,827	5 4,563	12	LEGROSSZABB
p-13	2 4283,937	12 67,447	3 2968,502	12 35,743	1 85,225	12 4,583	12 5,108	4 14,734	2 4,125	13	
	q-1	q-2	q-3	q-4	q-5	q-6	q-7	q-8	q-9		

17. ábra A kompozitok tulajdonságait összefoglaló táblázat (a mintáknak az adott tulajdonság szempontjából elért helyezése felül, alatta a konkrét értékekkel)

Az adatok kiértékelését a CRITIC módszerrel kezdtem. Elsőként létrehoztam a normalizált mátrixot a 4. és 5. összefüggés szerint. Ezeket a 9. táblázatban gyűjtöttem össze. A normalizált mátrix egy adott tulajdonságra vonatkozó oszlopát összehasonlítottam egy másik tulajdonsággal korrelációs együttható számításával a 6. és 7. összefüggések szerint. Ezt követően

ebből meghatároztam az adott információ mértéket a 8. összefüggéssel egy-egy tulajdonságra vonatkozva, és annak a tulajdonságnak a súlyát (9. összefüggés) a többihez viszonyítva. Az így kapott adatokat a 9. táblázatban foglaltam össze.

Ezzel a CRITIC módszer végére értem és a kiértékelést a MABAC módszerrel folytattam. A normalizált mátrixból és a tulajdonságok súlyából a 10. összefüggés segítségével létrehoztam a súlyozott normalizált mátrixot (10. táblázat). Ezután létrehoztam a határközelítő mátrixot a 11. összefüggéssel és azt egybekötöttem a távolságmátrix számítással, amelyhez a 12. összefüggést használtam fel (12. táblázat). Végül a távolságmátrix eredményeit egy adott kompozitra vonatkoztatva összeadtam a különböző tulajdonságok mentén, ezzel megkapva a végső pontszámot és abból sorrendet készítve. Ilyen módon objektíven megkaptam, hogy melyik kompozit bizonyult a legjobbnak a vizsgált tulajdonságokat figyelembe véve. Ennek eredménye a 13. táblázatban látható.

Az CRITIC-MABAC algoritmus kimutatta, hogy a megadott szempontok alapján az 5 m% repce szalmával töltött kompozit bizonyult a lehető legjobb megoldásnak, ezt követte a 2,5 m% lenmag tartalmú minta, majd pedig a társítatlan PLA. Megjegyezném, hogy a figyelembe vett paraméterek részleges átfedése (pl. modulusok), valamint számos más megvizsgálható tulajdonság hiánya végett a CRITIC-MABAC módszer kimenetét inkább egy általános jellegű iránymutatásként célszerű kezelni, mint pontos rangsorként. Általános következtetésként levonható, hogy az alacsony töltőanyag-tartalmú kompozitok használata előnyös lehet, miközben a magas százalékarányban a természetes szálak nem annyira alkalmazhatóak, mert számos vizsgált tekintetben jelentősen rontották a kompozitot. Nagyjából 5% az a szemcse tartalom, amelyet az eredmények alapján előnyösen adhatunk PLA-hoz. Megállapítható továbbá, hogy a különböző adalékanyag (kombinációk) közül a repceszalmát is tartalmazó rendszerek szerepeltek pozitívabban, miközben rendkívül gyengén szerepelt a lenmag, mint önálló töltőanyag. Utóbbi egyetlen kiemelkedő pozitívuma, hogy a lebomlást jelentősen elősegítette.

Kompozit/Tulajdonság	Hajlító rugalmassági modulus	Határhajlító feszültség	Húzó rugalmassági modulus	Szakító-szilárdság	Keménység	Fajlagos ütőmunka	Nedvességfelvétel	Bomlás	Ár
PLA	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0317	1,0000	1,0000	0,7395	1,0000
PLA+2.5% len	0,0432	0,9041	0,1546	0,8444	0,5714	0,5907	0,9624	0,8023	0,8947
PLA+5% len	0,1219	0,8649	0,1841	0,7963	0,4034	0,4280	0,9085	0,4101	0,7895
PLA+10% len	0,1672	0,6682	0,2387	0,5945	0,6807	0,2406	0,7284	0,0000	0,5789
PLA+20% len	0,4679	0,0000	0,2739	0,0000	0,7647	0,0000	0,0000	0,0000	0,1579
PLA+2.5% repce	0,1246	0,9780	0,0915	0,8910	0,0000	0,6394	0,9937	1,0000	0,8750
PLA+5% repce	0,2477	0,9236	0,2354	0,8506	0,5546	0,5450	0,9625	0,9624	0,7500
PLA+10% repce	0,6724	0,8130	0,5060	0,7805	0,5210	0,4349	0,8971	0,0000	0,5000
PLA+20% repce	1,0000	0,6871	1,0000	0,7315	0,6667	0,1805	0,8238	0,2428	0,0000
PLA+2.5% len és repce	0,0665	0,9078	0,0634	0,8458	0,3445	0,6410	0,9451	0,4198	0,8849
PLA+5% len és repce	0,2055	0,8616	0,1899	0,7798	0,7059	0,4257	0,8863	0,7466	0,7697
PLA+10% len és repce	0,4709	0,7449	0,2517	0,6644	0,6639	0,3710	0,7490	0,1939	0,5395
PLA+20% len és repce	0,8707	0,4907	0,4818	0,4387	1,0000	0,0789	0,4897	0,1926	0,0789

9. táblázat Normalizált mátrix

Információ mérték korreláció alapján		Tulajdonság súlya	
Hajlító rugalmasság-i modulus	10,6991	Hajlító rugalmassági modulus	0,1241
Határhajlító feszültség	8,7489	Határhajlító feszültség	0,1015
Húzó rugalmassági modulus	8,4704	Húzó rugalmassági modulus	0,0983
Szakítószilárdság	8,3406	Szakítószilárdság	0,0968
Keménység	9,1727	Keménység	0,1064
Fajlagos ütőmunka	8,7466	Fajlagos ütőmunka	0,1015
Nedvességfelvétel	9,0569	Nedvességfelvétel	0,1051
Bomlás	12,0793	Bomlás	0,1402
Ár	10,8714	Ár	0,1261

10. táblázat Információ mérték (bal oldalt) és a tulajdonságok súlya (jobb oldalt)

Kompozit/Tulajdonság	Hajlító rugalmassági modulus	Határhajlító feszültség	Húzó rugalmassági modulus	Szakító-szilárdság	Keményység	Fajlagos üttömunka	Nedvesség-felvétel	Bomlás	Ár
PLA	0,1241	0,2030	0,0983	0,1935	0,1098	0,2030	0,2102	0,2438	0,2523
PLA+2.5% len	0,1295	0,1933	0,1135	0,1785	0,1672	0,1614	0,2062	0,2526	0,2390
PLA+5% len	0,1393	0,1893	0,1164	0,1738	0,1494	0,1449	0,2006	0,1976	0,2257
PLA+10% len	0,1449	0,1693	0,1217	0,1543	0,1789	0,1259	0,1816	0,1402	0,1992
PLA+20% len	0,1822	0,1015	0,1252	0,0968	0,1878	0,1015	0,1051	0,1402	0,1461
PLA+2.5% repce	0,1396	0,2008	0,1073	0,1830	0,1064	0,1664	0,2095	0,2803	0,2365
PLA+5% repce	0,1549	0,1953	0,1214	0,1791	0,1655	0,1568	0,2062	0,2750	0,2207
PLA+10% repce	0,2076	0,1840	0,1480	0,1723	0,1619	0,1456	0,1994	0,1402	0,1892
PLA+20% repce	0,2483	0,1713	0,1966	0,1676	0,1774	0,1198	0,1917	0,1742	0,1261
PLA+2.5% len és repce	0,1324	0,1937	0,1045	0,1786	0,1431	0,1665	0,2044	0,1990	0,2378
PLA+5% len és repce	0,1496	0,1890	0,1169	0,1722	0,1816	0,1447	0,1982	0,2448	0,2232
PLA+10% len és repce	0,1826	0,1771	0,1230	0,1611	0,1771	0,1391	0,1838	0,1673	0,1942
PLA+20% len és repce	0,2322	0,1513	0,1456	0,1392	0,2129	0,1095	0,1565	0,1672	0,1361

11. táblázat Súlyozott normalizált döntéshozó mátrix

Kompozit/Tulajdonság	Hajlító rugalmassági modulus	Határhajlító feszültség	Húzó rugalmassági modulus	Szakító-szilárdság	Keményység	Fajlagos üttömunka	Nedvesség-felvétel	Bomlás	Ár
PLA	-0,0384	0,0271	-0,0257	0,0303	-0,0504	0,0603	0,0242	0,0482	0,0549
PLA+2.5% len	-0,0331	0,0173	-0,0105	0,0152	0,0071	0,0188	0,0202	0,0570	0,0416
PLA+5% len	-0,0233	0,0134	-0,0076	0,0106	-0,0108	0,0023	0,0145	0,0020	0,0283
PLA+10% len	-0,0177	-0,0066	-0,0023	-0,0090	0,0187	-0,0168	-0,0044	-0,0554	0,0017
PLA+20% len	0,0197	-0,0744	0,0012	-0,0665	0,0277	-0,0412	-0,0809	-0,0554	-0,0514
PLA+2.5% repce	-0,0230	0,0248	-0,0167	0,0197	-0,0537	0,0237	0,0235	0,0847	0,0391
PLA+5% repce	-0,0077	0,0193	-0,0026	0,0158	0,0053	0,0141	0,0202	0,0795	0,0233
PLA+10% repce	0,0451	0,0081	0,0240	0,0090	0,0017	0,0030	0,0133	-0,0554	-0,0082
PLA+20% repce	0,0857	-0,0047	0,0725	0,0043	0,0172	-0,0229	0,0056	-0,0214	-0,0713
PLA+2.5% len és repce	-0,0302	0,0177	-0,0195	0,0154	-0,0171	0,0239	0,0184	0,0034	0,0403
PLA+5% len és repce	-0,0129	0,0130	-0,0071	0,0090	0,0214	0,0020	0,0122	0,0492	0,0258
PLA+10% len és repce	0,0200	0,0012	-0,0010	-0,0022	0,0169	-0,0035	-0,0022	-0,0283	-0,0032
PLA+20% len és repce	0,0697	-0,0246	0,0216	-0,0240	0,0527	-0,0332	-0,0295	-0,0284	-0,0613

12. táblázat Távolság mátrix

ÉRTÉKELÉS SORRENDJÉN		
HELYEZÉS	PONTSZÁM	NÉV
1	0,1636	PLA+5% repce
2	0,1367	PLA+2.5% len
3	0,1334	PLA
4	0,1225	PLA+2.5% repce
5	0,1158	PLA+5% len és repce
6	0,0553	PLA+2.5% len és repce
7	0,0479	PLA+20% repce
8	0,0323	PLA+5% len
9	0,0316	PLA+10% repce
10	0,0009	PLA+10% len és repce
11	-0,0537	PLA+20% len és repce
12	-0,0885	PLA+10% len
13	-0,3176	PLA+20% len

13. táblázat Különböző kompozitok rangsorolása a CRITIC-MABAC hibrid optimumkereső algoritmus szerint

5. Összefoglalás, jövőbeli célok

Ezen dolgozatban tárgyalt kutatásban a természetes erőforrásból előállított és biológiai úton lebomló politejsavat társítottam természetes növényi szemcsékkel különböző arányokban és összetételekben. A vizsgált növényi adalékok a lenmag és a repceszalma őrlemény voltak. Extrúziós ömledék keveréssel, majd fröccsöntéssel kompozitokat állítottam elő. A célom az volt, hogy megvizsgáljam a létrehozott kompozitok mechanikai, termikus és egyéb tulajdonságait, majd ezek alapján megtaláljam közülük a legelőnyösebb kombinációt. A mechanikai vizsgálatok azt mutatták, hogy mind a lenmag, mind a repce, mind pedig a kettő kombinációja a PLA merevségének és a keménységének növekedését eredményezi, viszont eközben csökken az anyag szilárdsága és ütésállósága. Az eredmények alapján egyértelműen kijelenthető, hogy a repceszalma előnyösebb a vizsgált tulajdonságok szempontjából; a tisztán lenmaggal társított kompozitokhoz képest nagyobb szilárdságot, merevséget, és szívósságot eredményezett, ráadásul a nedvességfelvételre is kevésbé volt hajlamos. Az eredményeket optimumkereső algoritmussal értékeltem, ami kimutatta, hogy kis százalékarányban a repceszalma jó adalékanyagnak bizonyul, a vizsgált tulajdonságok összességét figyelembe véve az ilyen kompozitok a tiszta PLA-nál kiemelkedőbben teljesítettek. Az eredmények alapján javasolt lehet még a lennel együttes használata is kisebb mennyiségben. A tisztán lenmaggal való társítás nem bizonyult sikeresnek, egyedül lebomlás tekintetében mutatott jelentős eredményt, ami a nagyobb mértékű vízfelvételével magyarázható.

Összességében úgy gondolom, hogy mindenképpen érdemes a nem használt mezőgazdasági melléktermékek lehetséges felhasználását kutatni, hiszen olcsó alternatívát jelenthetnek polimerek töltőanyagaként. Alacsony százaléktartalommal használva pedig akár egyes tulajdonságok javulása is elérhető velük, míg más tulajdonságokban csak minimális romlást hoznak. A komposztálási vizsgálat is alátámasztotta, hogy az ilyen kompozitok lebomlása megfelelő körülmények között az alap polimernél gyorsabban végbe tud menni, ami a hulladékgazdálkodás szempontjából rendkívül előnyös. Fontos megemlíteni továbbá, hogy az optimumkereső algoritmusok használatát célszerű lehet szélesebb körben kell használni, hogy a különböző anyagok/kompozitok közötti rangsort az ismert tulajdonságok alapján objektíven lehessen meghatározni.

A jövőben szeretnék elektronmikroszkópos vizsgálatokat végezni, hogy az összetevők közti adhéziós kapcsolatokat alaposabban elemezhessem. Tervezem továbbá a komposztált minták részletesebb elemzését DSC, illetve FTIR vizsgálatok segítségével. Hosszabb távú terveim közt szerepel olyan kutatásokat végezni a már most is alkalmazott, vagy akár más

természetes szállal való kísérletezéssel, ahol valamilyen kompatibilizáló anyagot is alkalmaznék (pl. maleinsavval ojtott politejsavat) a jobb mechanikai tulajdonságok elérése érdekében.

6. Irodalomjegyzék

- [1] IMF, data.imf.org, IMF, 2022.08.20., <https://data.imf.org/?sk=471DDDF8-D8A7-499A-81BA-5B332C01F8B9>
- [2] M. Qin, C. Chen, B. Song, M. Shen, W. Cao, H. Yang, G. Zeng, J. Gong: A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: Another ecological threat to soil environments, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 312, 2021
- [3] T. Tábi: Tények és tévhitek a biopolimerekkel kapcsolatban - II. rész. *POLIMEREK*, Vol. 7, Iss. 11.2021, 337-340
- [4] A. Folino, A. Karageorgiou, P. S. Calabrò, D. Komilis: Biodegradation of Wasted Bioplastics in Natural and Industrial Environments: A Review, *Sustainability*, Vol. 12, 2020, 6030
- [5] L. Lendvai: Biopolimerek, *Polimer Technológiák*, előadásanyag, Széchenyi István Egyetem, Anyagtudományi és Technológiai Tanszék, Győr, 2022.08.20.
- [6] S. Hajba: Politejsav és társított politejsav kristályszerkezetének műszaki tulajdonságokra gyakorolt hatásának elemzése, PhD értekezés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 2018
- [7] B. Ma, H. Zhang, K. Wang, H. Xu, Y. He, X. Wang: Effect of poly(lactic acid) crystallization on its mechanical and heat resistance performances, *Polymer*, Vol. 212, 2021
- [8] S. Farah, D. G. Anderson, R. Lange: Physical and Mechanical Properties of PLA and Their Functions in Widespread Applications — A Comprehensive Review, *Advanced Drug Delivery Reviews*, Vol. 107, 2016, 367–92.
- [9] K. J. Jem, B. Tan: The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid), *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, Vol. 3, Iss. 2, 2020, 60-70
- [10] MarketsandMarkets Inc.: Polylactic Acid Market by Grade (Thermoforming, Extrusion, Injection Molding, Blow Molding), Application (Rigid Thermoform, Film & Sheet, Bottles), End-use Industry (Packaging, Consumer Goods, Agricultural, Textile, Biomedical) and Region (2022 - 2026), 2020, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/polylactic-acid-pla-market-29418964.html>, 2022.08.20.
- [11] M. A. Cuiffo, J. Snyder, A. M. Elliott, N. Romero, S. Kannan, G. P. Halada: Impact of the Fused Deposition (FDM) Printing Process on Polylactic Acid (PLA) Chemistry and Structure, *Applied Sciences*, Vol. 7, Iss. 6, 579, 2017
- [12] S. Muniyasamyab, O. E. Dadac: Recycling of plastics and composites materials and degradation technologies for bioplastics and biocomposites, Rajkishore Nayak, Asis Patnaik: *Waste Management in the Fashion and Textile Industries*, 2021, 311-333

- [13] T. Czvikovszky: Wood–plastic combination. Atomic Energy Review IAEA, Vienna, Vol. 6., Iss. 3, 1968, 99
- [14] V. Chauhan, T. Karki, J. Varis: Review of natural fiber-reinforced engineering plastic composites, their applications in the transportation sector and processing techniques, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2019, 1-41
- [15] U. K. Sanivada, G. Mármol, F. P. Brito, R. Fanguero: PLA Composites Reinforced with Flax and Jute Fibers—A Review of Recent Trends, Processing Parameters and Mechanical Properties, *Polymers*, Vol. 12, 2020, 2373-2392
- [16] R.A. Ilyas, S. M. Sapuan, M. M. Harussani, M. Y. A. Y. Hakimi, M. Z. M. Haziq, M. S. N. Atikah, M. R. M. Asyraf, M. R. Ishak, M. R. Razman, N.M. Nurazzi, M. N. F. Norrrahim, H. Abral, M. Asrofi: Polylactic Acid (PLA) Biocomposite: Processing, Additive Manufacturing and Advanced Applications, *Polymers*, Vol. 13, 2021, 1326-1360
- [17] R. A. Ilyas, M. Y. M. Zuhri, H. A. Aisyah, M. R. M. Asyraf, S. A. Hassan, E. S. Zainudin, S. M. Sapuan, S. Sharma, S. P. Bangar, R. Jumaidin, Y. Nawab, A. A. M. Faudzi, H. Abral, M. Asrofi, E. Syafri, N. H. Sari: Natural Fiber-Reinforced Polylactic Acid, Polylactic Acid Blends and Their Composites for Advanced Applications, *Polymers*, Vol. 14, 2022, 202-241
- [18] M. Ramesh, L. Rajeshkumar, G. Sasikala, D. Balaji, A. Saravanakumar, V. Bhuvaneswari, R. Bhoopathi: A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects, *Polymers (Basel)*. Vol. 14, Iss. 3:2022, 589-624.
- [19] M. U. Khan, M. Abas, S. Noor, B. Salah, W. Saleem, R. Khan: Experimental and Statistical Analysis of Saw Mill Wood Waste Composite Properties for Practical Applications, *Polymers*, Vol. 13, 2021, 4038
- [20] J. A. Travieso-Rodriguez, M. D. Zandi, R. Jerez-Mesa, J. Lluma-Fuentes: Fatigue behavior of PLA-wood composite manufactured by fused filament fabrication, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, Iss. 4, 2020, 8507-8516
- [21] M. Kariz, M. Sernek, M. Obućina, M. K. Kuzman: Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts, *Materials Today Communications*, Vol. 14, 2018, 135-140
- [22] M.R. Nurul Fazita, K. Jayaraman 1, D. Bhattacharyya, M. K. M. Haafiz, C. K. Saurabh, M. H. Hussin, Abdul Khalil H. P. S.: Green Composites Made of Bamboo Fabric and Poly (Lactic) Acid for Packaging Applications—A Review, *Materials*, Vol. 9., Iss. 6, 2016, 435-464
- [23] A. P. Morales, A. Güemes, A. Fernandez-Lopez, V. C. Valero, S. De La Rosa Llano: Bamboo–Polylactic Acid (PLA) Composite Material for Structural Applications, *Materials*, Vol. 10, 2017, 1286-1308
- [24] F. Wang, J. Shao, L. M. Keer, L. Li, J. Zhang: The effect of elementary fibre variability on

bamboo fibre strength, *Materials & Design*, Vol. 75, 2015, 136-142

[25] C. Pang, R. A. Shanks, F. Daver: Characterization of kenaf fiber composites prepared with tributyl citrate plasticized cellulose acetate, *Composites: Part A*, Vol. 70, 2015, 52–58

[26] N. Saba, M.T. Paridah, M. Jawaaid: Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review, *Construction and Building Materials*, Vol. 76, 2015. 87–96

[27] N. Dehbari, N. Moazeni, W. A. Rahman: Effects of Kenaf Core on Properties of Poly(lactic acid) Bio-Composite, *Polym. Compos.*, Vol. 35, 1220-1227

[28] M. Delgado-Aguilar: The role of lignin on the mechanical performance of polylactic acid and jute composites, *International Journal of Biological Macromolecules* Vol. 116, 2018, 299-304

[29] S. R. T. Reddy, A. V. R. Prasad, K. Ramanaiah: Tensile and flexural properties of biodegradable jute fiber reinforced poly lactic acid composite, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 44, Iss. 1., 2021, 917-921

[30] R.M. Kozłowski et al.: Bast fibres: flax, R.M. Kozłowski, M. Mackiewicz-Talarczyk (Eds.), *Handbook of Natural Fibres (Second Edition)*, Woodhead Publishing, 2020, 93-162

[31] O. S. Isikhuemhen, N. A. Mikiashvili, Z. N. Senwo, Elijah I. Ohimain: Biodegradation and Sugar Release from Canola Plant Biomass by Selected White Rot Fungi, *Advances in Biological Chemistry*, Vol. 4, Iss. 6, 395-406

[32] N. A. M. Eskin: Rapeseed Oil/Canola, *Encyclopedia of Food and Health (First Edition)*, Elsevier, Cambridge, 2015.

[33] A. Manral, F. Ahmad, V. Chaudhary: Static and dynamic mechanical properties of PLA bio-composite with hybrid reinforcement of flax and jute, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 25, Iss. 4., 2020, 577-580

[34] M. J. John: Biobased alginate treatments on flax fibre reinforced PLA and PHBV composites, *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, Vol. 5, 2022, 100319

[35] A. Le Duigou, A. Bourmaud, P. Davies, C. Baley: Long term immersion in natural seawater of Flax/PLA biocomposite, *Ocean Engineering*, Vol. 90, 2014, 140–148

[36] M. Bulota, T. Budtova: Highly porous and light-weight flax/PLA composites, *Industrial Crops and Products*, Vol. 74, 2015, 132–138

[37] Á. Agüero, D. Lascano, D. Garcia-Sanoguera, O. Fenollar, S. Torres-Giner: Valorization of Linen Processing By-Products for the Development of Injection-Molded Green Composite Pieces of Polylactide with Improved Performance, *Sustainability*, Vol. 12, 2020, 652

[38] D. Paukszta, J. Zielińska-Makowićak: Crystallisation of polypropylene matrix in composites filled with wooden parts of rapeseed straw, *Journal of Thermal Analysis and*

Calorimetry, Vol. 109, Iss. 2, 2012, 611-618

[39] P. Zou, H. Xiong, S. Tang: Natural weathering of rape straw flour (RSF)/HDPE and nano-SiO₂/RSF/HDPE composites, Carbohydrate Polymers, Vol. 73, 2008, 378–383

[40] M. Kijeńska, E. Kowalska, B. Pałys, J. Ryczkowski: Degradability of composites of low density polyethylene/polypropylene blends filled with rape straw, Polymer Degradation and Stability, Vol. 95, 2010, 536-542

[41] D. Paukszta, M. Szostak, M. Rogacz: Mechanical properties of polypropylene copolymers composites filled with rapeseed straw, Polymery, Vol. 59, Iss. 2, 2014, 165-169

[42] M. Delgado, M. Felix, C. Bengoechea: Development of bioplastic materials: From rapeseed oil industry by products to added-value biodegradable biocomposite materials, Industrial Crops and Products, Vol. 125, 2018, 401-407

[43] B. Zlaugotne, L. Zihare, L. Balode, A. Kalnbalkite, A. Khabdullin, D. Blumberga: Multi-Criteria Decision Analysis Methods Comparison, Environmental and Climate Technologies, Vol. 24, Iss. 1, 2020. 454–471

[44] S. Vinodh, M. Prasanna, N. Hari Prakash: Integrated Fuzzy AHP–TOPSIS for selecting the best plastic recycling method: A case study, Applied Mathematical Modelling, Vol. 38, Iss. 19–20, 2014, pp. 4662-4672

[45] A. Mahajan, V. Binaz, I. Singh, N. Arora: Selection of Natural Fiber for Sustainable Composites Using Hybrid Multi Criteria Decision Making Techniques, Composites Part C: Open Access, Vol. 7, 2022

[46] A. Hafezalkotoba, A. Hafezalkotob: Comprehensive MULTIMOORA method with target-based attributes and integrated significant coefficients for materials selection in biomedical applications, Materials & Design, Vol. 87, 2015, pp. 949-959

[47] F. Zhang, Y. Ju, E. D. R. Santibanez Gonzalez, A. Wang, P. Dong, M. Giannakis: Evaluation of construction and demolition waste utilization schemes under uncertain environment: A fuzzy heterogeneous multi-criteria decision-making approach, Journal of Cleaner Production, Vol. 313, 2021

[48] L. Lendvai, T. Singh, G. Fekete, A. Patnaik, G. Dogossy: Utilization of Waste Marble Dust in Poly(Lactic Acid)-Based Biocomposites: Mechanical, Thermal and Wear Properties, Journal of Polymers and the Environment, Vol. 29, 2021, 2952–2963

[49] T. Singh 1, P. Pattnaik, A. Aherwar, L. Ranakoti, G. Dogossy, L. Lendvai: Optimal Design of Wood/Rice Husk-Waste-Filled PLA Biocomposites Using Integrated CRITIC–MABAC-Based Decision-Making Algorithm, Polymers, Vol. 14, 2022, 260

[50] J. Ősze: Mezőgazdasági melléktermék alkalmazása biológiai úton lebontható

kompozitokban, TDK dolgozat, Széchenyi István Egyetem, Győr, 2022

[51] N. Vasavada, Online Web Statistical Calculator, Navendu Vasavada, 2022.10.31., https://astatsa.com/OneWay_Anova_with_TukeyHSD/

[52] K. Molnár, J. Móczó, M. Murariu, Ph. Dubois, B. Pukánszky: Factors affecting the properties of PLA/CaSO₄ composites: homogeneity and interactions, Express Polymer Letters, Vol. 3, 2009, 49-61

[53] M. Yasuniwa, S. Tsubakihara, Y. Sugimoto, C. Nakafuku: Thermal Analysis of the Double-Melting Behavior of Poly(L -lactic acid), Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, Vol. 42, 2004, 25–32

[54] J. Ambrosio-Martín, M. J. Fabra, A. Lopez-Rubio, J. M. Lagaron: An effect of lactic acid oligomers on the barrier properties of polylactide, Journal of Materials Science, Vol. 49, 2014, 2975–2986

Mellékletek

A szakítóvizsgálatok adatain elvégzett statisztikai próba eredményei

Lenmaggal töltött kompozitok szakító mechanikai tulajdonságai

Minta	Szakítószilárdság	Húzó rugalmassági modulus	Szakadási nyúlás
PLA	a	a	a
PLA+2,5 len	b	b	b
PLA+5 len	b	b	b
PLA+10 len	c	b	b
PLA+20 len	d	b	c

Lenmaggal és repceszalmával töltött kompozitok szakító mechanikai tulajdonságai

Minta	Szakítószilárdság	Húzó rugalmassági modulus	Szakadási nyúlás
PLA	a	a	a
PLA+2,5 len és repce	b	a, b	a, b
PLA+5 len és repce	c	b, c	b
PLA+10 len és repce	d	c	b, c
PLA+20 len és repce	e	d	c

Az adott oszlopban található azonos betűk azt jelzik, hogy a két anyagminta adott tulajdonságában nincs szignifikáns eltérés 5%-os szignifikancia szint esetén a Tukey próba alapján.

A hajlító vizsgálatok adatain elvégzett statisztikai próba eredményei

Lenmaggal töltött kompozitok hajlító mechanikai tulajdonságai

Minta	Határhajlító feszültség	Hajlító rugalmassági modulus
PLA	a	a
PLA+2,5 len	b	a, b
PLA+5 len	b	b, c
PLA+10 len	c	c
PLA+20 len	d	d

Lenmaggal és repceszalmával töltött kompozitok hajlító mechanikai tulajdonságai

Minta	Határhajlító feszültség	Hajlító rugalmassági modulus
PLA	a	a
PLA+2,5 len és repce	b	a
PLA+5 len és repce	b	b
PLA+10 len és repce	c	c
PLA+20 len és repce	d	d

Az adott oszlopban található azonos betűk azt jelzik, hogy a két anyagminta adott tulajdonságában nincs szignifikáns eltérés 5%-os szignifikancia szint esetén a Tukey próba alapján.

Az üteve hajlító vizsgálatok adatain elvégzett statisztikai próba eredményei

Minta	Ütőszilárdság
PLA	a
PLA+2,5 len	b
PLA+5 len	b, c
PLA+10 len	c, d
PLA+20 len	d

Minta	Ütőszilárdság
PLA	a
PLA+2,5 len és repce	b
PLA+5 len és repce	c
PLA+10 len és repce	c
PLA+20 len és repce	d

Az adott oszlopban található azonos betűk azt jelzik, hogy a két anyagminta adott tulajdonságában nincs szignifikáns eltérés 5%-os szignifikancia szint esetén a Tukey próba alapján.

A keménységmérés adatainak elvégzett statisztikai próba eredményei

Minta	Keményység
PLA	a
PLA+2,5 len	b
PLA+5 len	a, b
PLA+10 len	b
PLA+20 len	b

Minta	Keményység
PLA	a
PLA+2,5 len és repce	a, b
PLA+5 len és repce	b, c
PLA+10 len és repce	b, c
PLA+20 len és repce	c

Minta	Keményység
PLA +2,5 repce	a, b
PLA	a
PLA+5 repce	b, c
PLA+10 repce	a, b, c
PLA+20 repce	c

Az adott oszlopban található azonos betűk azt jelzik, hogy a két anyagminta adott tulajdonságában nincs szignifikáns eltérés 5%-os szignifikancia szint esetén a Tukey próba alapján.