

# Cink-oxid nanorészecskékkel adalékolt PLA/PBS keverékek termogravimetriai és dinamikus mechanikai tulajdonságainak vizsgálata

## Analysis of Thermogravimetric and Dynamic Mechanical Properties of PLA/PBS Blends Doped With Zinc Oxide Nanoparticles

Virág Ábris Dávid,<sup>1</sup> Molnár Kolos<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, Magyarország, [viraga@pt.bme.hu](mailto:viraga@pt.bme.hu)

<sup>2</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, Magyarország

<sup>3</sup> MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, Magyarország, [molnar@pt.bme.hu](mailto:molnar@pt.bme.hu)

### Abstract

In the present work, PLA-PBS blends of 80/20 weight ratio were doped with zinc oxide (2.5; 5; 7.5 and 10 phr) and the flow, thermogravimetric and thermomechanical behaviour of the resulting blends were investigated. Using capillary plastometry, thermogravimetry (TGA) and dynamic mechanical analysis (DMA), it was found that the increase in zinc oxide content resulted in an increase in the flow indices (MFI, MVR), as well as in the storage and loss modulus values, and a decrease in the thermal stability and glass transition temperature.

**Keywords:** PLA, blends, zinc-Oxide, thermogravimetry.

### Összefoglalás

Jelen munkában 80/20 tömegarányú PLA-PBS keverékeket adalékoltunk cink-oxidoddal (2,5; 5; 7,5 és 10 phr arányban), majd az így létrehozott keverékek folyási, termogravimetriai és termomechanikai viselkedését vizsgáltuk. Kapillárisképlékenység-mérés, termogravimetria (TGA) és dinamikus mechanikai analízis (DMA) segítségével megállapítottuk, hogy a cink-oxid-tartalom növelésének hatására a folyási mutatószámok (MFI, MVR), továbbá a tárolási és veszteségi modulusz értékei növekedtek, a termikus stabilitás és az üvegesedési átmeneti hőmérséklet csökkent.

**Kulcsszavak:** PLA, keverék, cink-oxid, termogravimetria.

## 1. Bevezetés

A politejsav (PLA) ma az egyik legtöbbet kutatott, biológiai úton lebontható polimer. Népszerűségét jól mutatja, hogy a Web of Science adatbázisa [1] szerint 2021-ben 7301, 2020-ban pedig 6867 olyan új kutatási cikk jelent meg, amely címében tartalmazta a PLA vagy a polylactic acid kifejezést.

A kutatások jelentős része a PLA csomagolóanyagként történő felhasználásával foglalkozik, hiszen az előállított polimerek kb. 40%-át csoma-

golóanyagként használják fel, amelyek funkciójukból adódóan általában egyszer használatosak és nagyon rövid élettartamúak [2]. A politejsavról általánosan elmondható, hogy tulajdonságai összehasonlíthatóak a jelenleg nagy tömegben alkalmazott polimerekével, azonban nagyon rideg anyag, továbbá rossz a gázzárási tulajdonsága, ezért önmagában (lágyítók, illetve egyéb adalékok nélkül) kevésbé alkalmas élelmiszeripari csomagolóanyag előállítására [3]. A ridegségre megoldást jelenthet a PLA különböző szívós anyagokkal törté-

nő keverése, célszerűen szintén biológiai úton lebontható polimerekkel [pl.: polibutilén-szukcinát (PBS), polibutilén-adipát-tereftalát (PBAT)].

A gázzáró képesség javítása érdekében célszerű különböző, ún. nanoadalékok alkalmazása, például a cink-oxidé (ZnO). A cink-oxid multifunkcionális, környezetbarát nanoadalék (ezek részecskemérete a nanoskála mérettartományába esik), amely az amerikai Élelmiszer- és Gyógyszerügyi Hivatal besorolása szerint biztonságos adalék, azaz alkalmazható akár élelmiszeripari csomagolásokban is [4]. Ezenfelül számos kutatás alátámasztotta, hogy a cink-oxid javítja az anyag gázzáró képességét [5], továbbá antibakteriális [6], sőt bizonyos mértékben antivirális [7, 8] tulajdonságokat is hordoz.

Jelen kutatásban azt vizsgáltuk, hogy a tiszta PLA termogravimetriai és termomechanikai tulajdonságait milyen mértékben módosítja a PBS-sel történő keverékképzés, illetve a keverékhez történő cink-oxid-adagolás.

## 2. Anyagok és módszerek

### 2.1. Vizsgálati minták előállítása

A vizsgálatok szükséges próbatestek előállításához a Natureworks LLC által gyártott Ingeo Biopolymer 2500HP típusú politejsavat (PLA), a NaturePlast által gyártott PBE 003 polibutilén-szukcinátot (PBS), illetve Zinkweiss Harzsiegel ME-004 típusú zink-oxid (ZnO) anyagot használtuk.

A kompaundokat a Labtech Engineering Co., Ltd. (Thaiföld) LTE 26-44 típusú ikercsigás extruder segítségével állítottuk elő. Az extruder 10 zónájának hőmérsékletei a következőképp alakultak: 190-190-190-190-190-200-200-210-210. A csigaforgás sebessége 25 1/min, míg az adagolás sebessége 5 1/min volt. A kéttized gramm pontossággal kimért cink-oxidot (2,5; 5; 7,5 és 10 phr-ben) mechanikusan összekevertük 80% PLA-t, illetve 20% PBS-t tartalmazó szárazkeverékkel. Majd ezt a keveréket adagoltuk be az extruderbe, a ZnO-nanorészecskék minél egyenletesebb eloszlása érdekében. Az extruderből történő kilépést követően az extrudátumot végigvezettük egy szállítószalagon, miközben a szállítószalag fölé szerelt hűtőventilátorok segítségével lehűtöttük, végül Labtech Engineering (Thaiföld) LZ-120/VS típusú berendezéssel granuláltuk. Így tehát az 1. táblázatban látható vizsgálati mintákat állítottuk elő. Fontos megjegyezni, hogy a táblázatban szereplő phr (parts per hundred rubber) jelen esetben a 100 tömegegység polimerhez adott cink-oxid mennyisége, tömegegységben kifejezve.

1. táblázat. Az előállított vizsgálati minták és ZnO-tartalmuk

Mintanév	PLA %	PBS %	ZnO	
			phr	%
PLA	100	100	0	0
PBS	0	0	0	0
PLA/PBS/0	80	20	0	0
PLA/PBS /2,5	78,0	19,5	2,5	2,4
PLA/PBS/5	76,2	19,0	5	4,8
PLA/PBS/7,5	74,4	18,6	7,5	7
PLA/PBS/10	72,7	18,2	10	9,1

Az energiadisziperzív spektrometriához, illetve a dinamikus mechanikai vizsgálatokhoz szükségünk volt préselt lapokra; ezeket Dr. Collin GmbH (Németország) Teach-Line Platen Press 200E típusú, hidraulikus présgéppel készítettük el. A préseléshez 160×160×1 mm-es préskeretet használunk. A préselési hőmérséklet 210 °C volt. A préselési folyamat a következő lépésekből állt: 0 MPa-on 3 perc előmelegítés, majd 0,98, 1,96 és 2,94 MPa-on 1-1 perc préselés (a lépések között kilevegőztetés céljából szerszámnyitás, majd -zárás), végül 3,92 MPa-on 3 perc préselés, majd hűtés (a feltüntetett nyomásértékek a préselt lap felületére vonatkoztatott értékek).

### 2.2. Vizsgálati módszerek

A tömegegységre (MFI: Melt Flow Index) és a térfogategységre (MVR: Melt Volume Rate) vonatkoztatott folyási mutatószámot Instron CEAST 7027.000 típusú géppel vizsgáltuk, anyagtípusonként 5 mérést végeztünk. A méréseket 210 °C-on (a kompaundálás vég hőmérsékletén), 2,16 kg terhelőszúllyal végeztük az MSZ EN ISO 1133 szabványnak [9] megfelelően.

Az energiadisziperzív spektrometria (EDS) során JEOL JSM 6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) segítségével, vékony aranyréteggel bevont, mélyhűtésben létrehozott töretfelületeket vizsgáltunk.

A termikus stabilitást és a termikus bomlási folyamatok alakulását termogravimetriai analízis (TGA) segítségével elemeztük (az MSZ EN ISO 11358-1 szabvány [10] alapján). A vizsgálatokat a TA Instruments Q500 típusú berendezéssel, 5–10 mg-os mintákon, 50 és 600 °C közötti hőmérséklet-tartományban, 10 °C/min fűtési sebességgel végeztük.

A dinamikus mechanikai vizsgálatok során a TA Instruments Q800 típusú géppel végeztünk hő-

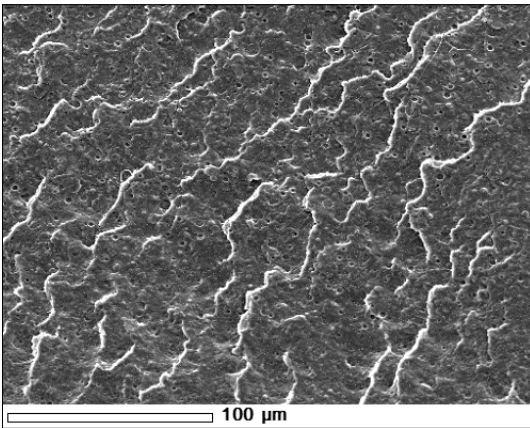
mérséklet-sőpréseket, szobahőmérséklet és 150 °C között, 2 °C/min fűtési sebességgel. Minden mérés esetén olyan amplitúdót választottunk, amely a lineárisan viszkoelasztikus viselkedés tartományán belül volt. A vizsgálatokhoz a két oldalon befogott tartó elrendezést használtuk, a 10×60 mm-es mintákat a préselt lapokból vágtuk ki. A hőmérséklet-sőpréseket mind a tiszta polimereken, mind a kompaundokon elvégeztük, azonban a 7,5 és 10 phr cink-oxidot tartalmazó keverékek olyan ridegen viselkedtek, hogy már a befogás során eltörték.

### 3. Eredmények

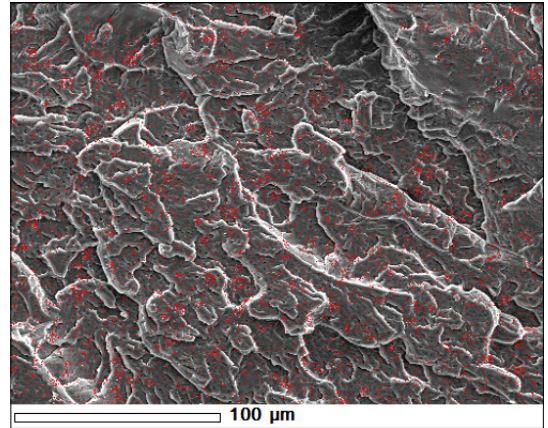
#### 3.1. Energiadisziperzív spektrometria

EDS-sel vizsgáltuk a keverékekben lévő cink-oxid mennyiségét és eloszlását is, a tiszta PLA/PBS keverék és a 2,5;5;7,5 és 10 phr cink-oxidot tar-

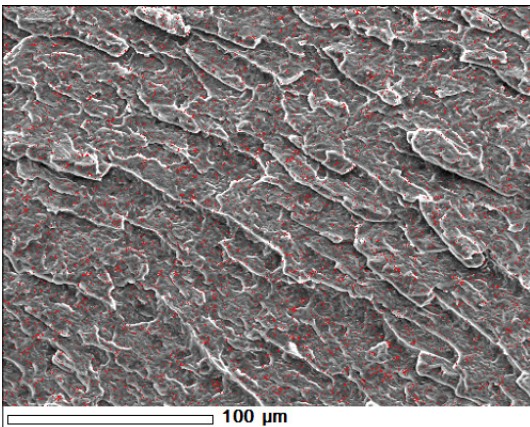
talmazó keverékek pásztázó elektronmikroszkópos (SEM-) felvételei rendre az **1–5. ábrán** láthatók. Az ábrákon látható piros pontok jelölik a cinktartalmú részecskéket. A PLA/PBS keverék nem tartalmaz cink-oxidot, a 2,5 phr-es keverék esetén már láthatóak a cink-oxid-részecskék, amelyek egyenletesen eloszlának a keverékben. Az 5 és 7,5 phr-es keverék esetén láthatóan nő a cink-oxid mennyisége, azonban ezek eloszlása már nem olyan egyenletes: a polimer mátrixban cink-oxid aggregátumok figyelhetők meg. Végül a 10 phr-es keverék esetében már nagyobb méretű aggregátumokban jelenik meg a cink-oxid. A cink-oxid-tartalom növekedésével a részecskék egyenletes eloszlása látványosan romlik. A keletkezett aggregátumok miatt a polimer mátrix nem lesz folytonos; ezek potenciális hibahelyeket hoznak létre.



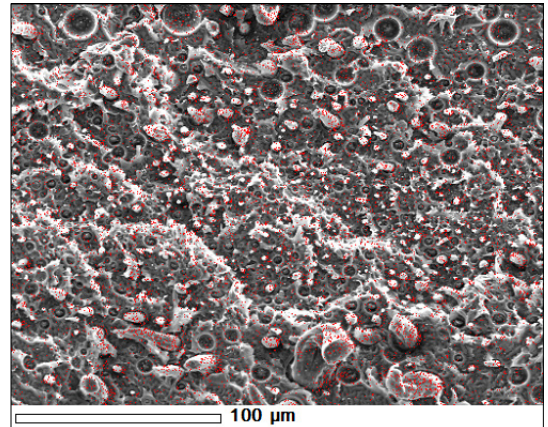
**1. ábra.** PLA/PBS keverék SEM-felvétele



**3. ábra.** 5 phr ZnO-t tartalmazó PLA/PBS keverék SEM-felvétele (a piros szín a Zn elemet jelöli)



**2. ábra.** 2,5 phr ZnO-t tartalmazó PLA/PBS keverék SEM-felvétele (a piros szín a Zn elemet jelöli)



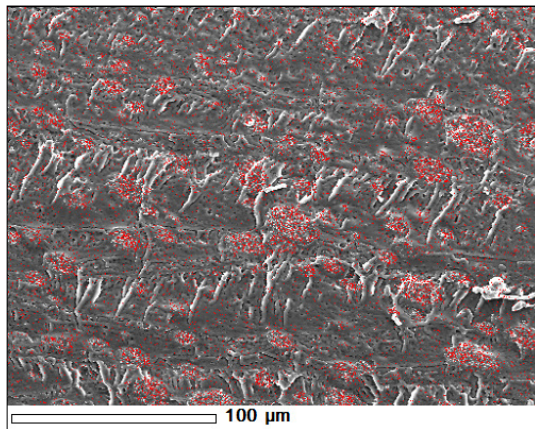
**4. ábra.** 7,5 phr ZnO-t tartalmazó PLA/PBS keverék SEM-felvétele (a piros szín a Zn elemet jelöli)

Az **1-5. ábrák** alapján az is látható, hogy a gondos alapanyag-előállításnak köszönhetően 2,5 és 5 phr ZnO-tartalom esetén kifejezetten jól sikerült az elosztatás, azonban 5 phr felett, a nagy felület/térfogat arányú, aggregálódott ZnO-részecskéket még így sem sikerült megfelelően elosztatni.

A **2. táblázat** a cink- (Zn-), valamint cink-oxid- (ZnO-) tartalmat mutatja a különböző keverékek esetén. A mérés során csak a Zn mennyisége határozható meg közvetlenül, a ZnO-tartalom meghatározásának érdekében a cink mennyiségéhez még hozzá kell adni az ekvimoláris mennyiségű oxigént is. A cink atomtömege 65,38 g, az oxigéné 16 g. Ebben az esetben minden 65,38 g cinkre jut 16 g oxigén, így a 65,38 g cink valójában 81,38 g cink-oxidnak felel meg. Azaz 1 tömegszázalék cink 1,24 tömegszázalék cink-oxidnak felel meg. Ezt a korrekciót elvégezve a **2. táblázat** alapján látható, hogy a beadagolt mennyiséggel közel azonos értékeket kaptunk. A 2,5, valamint az 5 phr cink-oxid esetén a számított eredmények majdnem megegyeznek a beadagolt mennyiséggel. A nagyobb ZnO-tartalmak esetén azonban a részecskék eloszlása nem egyenletes, aggregátumok maradnak a keverékben, ezzel magyarázható a hozzákevert és a mért adatok közötti eltérés. Látható, hogy minél nagyobb a cink-oxid mennyisége, annál nagyobb ez az eltérés.

### 3.2. A folyási mutatószámok meghatározása

Az MFI-mérések eredményeit a **3. táblázat** tartalmazza. A PLA mért értékeinek átlaga megegyezik az adatlapon [11] feltüntetett 8 g/600 s-mal. A PBS kisebb értékeket produkált az adatlapján [12] lévőhöz képest, azonban az ott található 5 g/600 s-os MFI meghatározása 190 °C-on történt. A PLA/PBS keverék átlagos MFI-értékében kis növekedés látható, azonban cink-oxid hozzáadásával mind az MFI, mind a MVR értékében ugrásszerű növekedés figyelhető meg. Ez az ugrásszerű növekedés jelentős mértékű degradációra utal. A folyási tulajdonságokban jelentkező növekedés a cink-oxid-tartalom növelésével olyan jelentős mértékű volt, hogy az 5 phr-es keverék mérésénél csökkenteni kellett a mérés során alkalmazott várakozási és a tartási időt. Bár a 2,5 phr-es ZnO-tartalmú keverék még mérhető volt, az ilyen mértékű MFI-növekedés a feldolgozás során már problémákat okozhat. A 7,5 és 10 phr-es keverék mérése pedig már a paraméterek megváltoztatásával sem volt lehetséges.



**5. ábra.** 10 phr ZnO-t tartalmazó PLA/PBS keverék SEM-felvétele (a piros szín a Zn elemet jelöli)

**2. táblázat.** A keverék és a kompaundok Zn- és ZnO-tartalma tömegrészarányban (%)

Mintanév	Zn	ZnO	Hozzákevert ZnO
PLA/PBS/0	0,02±0,14	0,02±0,02	0
PLA/PBS/2,5	1,82±0,10	2,26±0,12	2,44
PLA/PBS/5	3,87±0,13	4,80±0,16	4,76
PLA/PBS/7,5	5,16±0,10	6,40±0,12	6,98
PLA/PBS/10	5,64±0,13	7,00±0,16	9,09

**3. táblázat.** Tömeg- és térfogategységre vonatkoztatott folyási mutatószámok

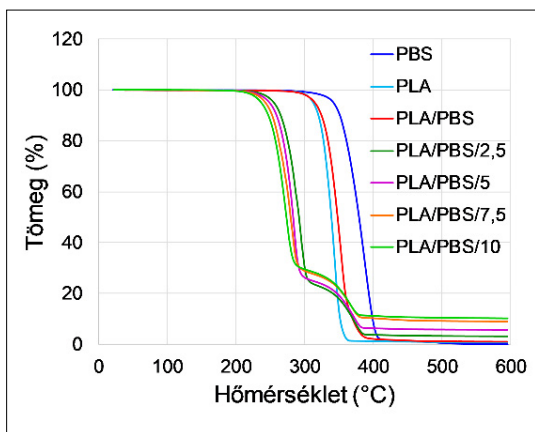
Mintanév	MFI (g/600 s)	MVR (cm <sup>3</sup> /600s)
PLA	8,06±0,13	7,31±0,10
PBS	3,42±0,95	3,26±0,91
PLA/PBS	8,55±0,12	7,81±0,16
PLA/PBS/2,5	58,85±4,33	73,91±14,13
PLA/PBS/5	60,38±2,85	70,74±13,82

### 3.3. Termogravimetriai analízis (TGA)

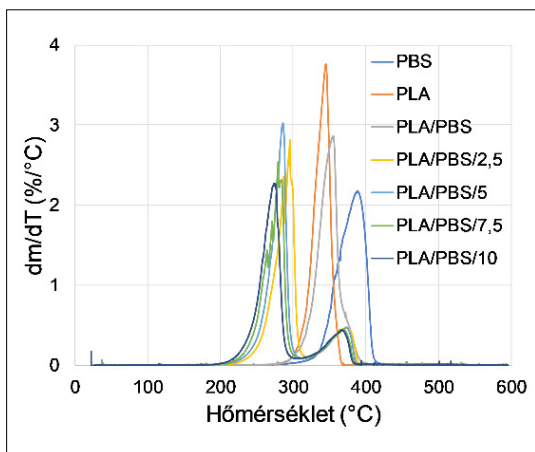
A TGA segítségével vizsgáltuk a minták termikus stabilitását, a vizsgálat eredményeit a **6. és 7. ábra**, továbbá a **4. táblázat** mutatja. A PLA, a PBS és a keverék esetében a bomlási folyamat egy lépcsőben, míg a zink-oxiddal adalékolt kompaundok esetén két lépcsőben zajlott le. A lépcsők magasságából a PLA-, ill. PBS-tartalomra lehet következtetni. A tiszta PBS termikus bomlása nagyobb hőmérsékleten (344 °C) indult meg, mint a PLA bomlása (309 °C). Ezek alapján a PBS ellenállóbbnak bizonyul a termikus degradációval szemben, mint a PLA. A PLA/PBS keverék termikus sta-

## 4. táblázat. A termogravimetriai analízis számszerűsített eredményei

	PBS	PLA	PLA/PBS	PLA/ PBS/2,5	PLA/PBS/5	PLA/ PBS/7,5	PLA/ PBS/10
Lépcsők száma	1	1	1	2	2	2	2
1. lépcső eleje, A1 (°C)	344	309	310	256	251	241	236
1. lépcső vége, B1 (°C)	402	352	365	301	291	288	286
2. lépcső eleje, A2 (°C)	–	–	–	347	345	344	339
2. lépcső vége, B2 (°C)	–	–	–	384	381	378	376
1. lépcső magassága, %	100	99,2	98,9	77,5	75,5	72,6	71,5
2. lépcső magassága, %	–	–	–	19,3	18,8	18,4	18,2
Maradék, %	0,03	0,82	1,06	3,19	5,71	9,00	10,28
Korrigált maradék, %	–	–	0	2,13	4,65	7,94	9,22
1. csúcs a DTG-görbén (°C)	387	343	352	294	284	280	273
2. csúcs a DTG-görbén (°C)	–	–	–	374	373	369	367



6. ábra. A vizsgált anyagok termogravimetriai görbéi



7. ábra. A vizsgált anyagok differenciális termogravimetriai görbéi

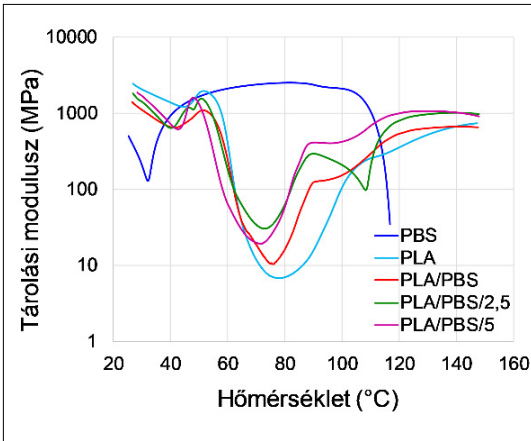
bilitása pedig nagyobb volt, mint a tiszta PLA-é, ami azt jelenti, hogy a PBS hatással van a hőstabilitásra; ezt igazolták Jompano és társai is [13]. A ZnO-tartalmú kompaundok termikus bomlása a cink-oxid-tartalom növekedésével egyre kisebb hőmérsékleten indult meg. A termikus stabilitásban jelentkező, nagymértékű csökkenés azt mutatja, hogy a ZnO jelentős degradáló hatással van a PLA-ra nagy hőmérsékleten.

A korrigált maradék (a korrigált itt a PLA/PBS keveréknél maradó tömeggel korrigáltat jelent) értékek pedig a minta ZnO-tartalmát mutatják százalékos tömegtartásban. Látható, hogy ezek az értékek jó közelítéssel egybeesnek az EDS-sel meghatározott, illetve a bekevert értékekkel (2. táblázat).

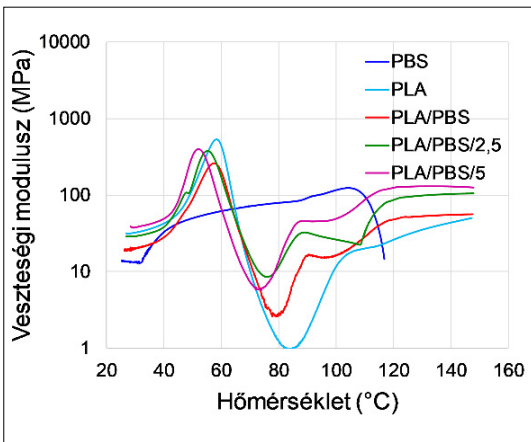
Ugyanakkor az is megállapítható, hogy a növekvő cink-oxid-tartalom a PBS-fázis termikus stabilitását csupán kismértékben csökkentette.

## 3.4. Dinamikus mechanikai analízis (DMA)

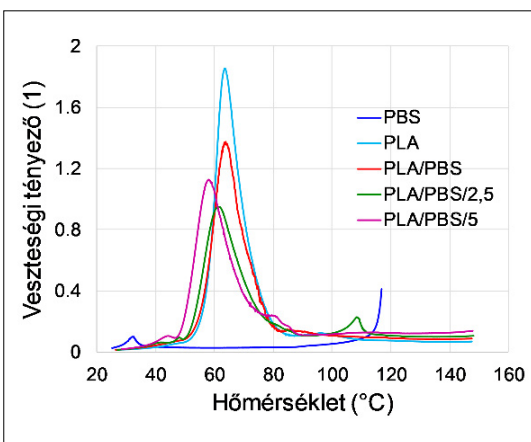
A DMA eredményeit a 8–10. ábrák mutatják. A PBS-görbén 30 °C körül egy furcsa anomália tapasztalható, ugyanakkor látható, hogy 105 °C körül a tárolási és veszteségi modulus értékeiben drasztikus csökkenés tapasztalható, ami a PBS kristályolvadási hőmérsékletét jelöli. A keverék, illetve a kompaundok esetén látható, hogy 60 °C körül a tárolási modulusz drasztikusan lecsökken (hiszen itt található a PLA üvegesedési átmeneti hőmérséklete), majd utána 80 °C környékén a tárolási modulusz újra növekedni kezd. Ez a növekedés a PLA hidegkristályosodásával magyarázható. Látható az is, hogy 110 °C körül a görbék



8. ábra. A vizsgált anyagok tárolási modulusz görbéi



9. ábra. A vizsgált anyagok veszteségi modulusz görbéi



10. ábra. A vizsgált anyagok veszteségi tényező görbéi

egy visszaesés tapasztalható; ennek lehetséges oka, hogy a PBS-szemcsék ezen a hőmérsékleten megolvadnak és ömledék állapotba kerülnek, ugyanakkor ezt követően a tárolási modulusz értékek tovább növekednek egészen addig, amíg a hidegkristályosodás végbemegy. A görbékéből az is megállapítható, hogy a tiszta PLA-hoz képest a tárolási és veszteségi modulusz értékei a keverés hatására növekedtek, továbbá a cink-oxid-tartalom mennyiségének növelése következtében ezek az értékek tovább növekedtek. Az MSZ EN ISO 6721-1 [14] szabvány által, a veszteségi tényező maximuma alapján meghatározott üvegesedési átmeneti hőmérsékletek ( $T_g$ ) értékét az 5. táblázat tartalmazza. A táblázat alapján megállapítható, hogy a tiszta PLA-hoz képest a keverék üvegesedési átmeneti hőmérséklete nem változott, azonban a cink-oxid-tartalom növelésével a keverék üvegesedési átmeneti hőmérséklete kismértékben csökkent.

5. táblázat. A PLA és a keverékek üvegesedési átmeneti hőmérséklete

Mintanév	$T_g$ (°C)
PLA	63,4
PLA/PBS	63,9
PLA/PBS/2,5	61,2
PLA/PBS/5	58,1

#### 4. Következtetések

Jelen munkában 80-20 tömegarányú PLA-PBS keverékeket adalékoltunk cink-oxidoddal (2,5; 5; 7,5 és 10 phr arányban), majd az így létrehozott keverékek folyási, termogravimetriai és termomechanikai viselkedését vizsgáltuk. Energiaszperzív spektrometriával megállapítottuk, hogy az általunk beadagolt cink-oxid mennyisége és az anyagban ténylegesen jelen lévő Zn-értékek között 5 phr tartalomig nincs jelentős eltérés, azonban 5 phr felett a cink-oxid-tartalom növelésével egyre növekedett ez az eltérés, a ZnO-aggregátumok miatt. A vizsgált keverék MFI- és MVR-értékei a cink-oxid-tartalom növekedésével jelentősen nőttek. Ebből arra lehet következtetni, hogy a cink-oxid hatására az anyagban jelentős mértékű degradáció következett be. Ezt alátámasztották a TGA-eredmények is, melyek alapján a cink-oxid-tartalom növelésével csökkent a keverék termikus stabilitása, 2,5 phr esetén 54 °C-kal, 10 phr esetén pedig 74 °C-kal. A dinamikus mechanikai vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a tárolási és veszteségi modulusz értékek keverékelés hatására növekedtek a tisz-

ta PLA-hoz képest, továbbá a cink-oxid-tartalom mennyiségének növelése következtében ezek az értékek még tovább növekedtek. Összességében tehát megállapítható, hogy a 80-20 tömegarányú PLA/PBS keverékhez adagolt cink-oxid mennyiségének növekedésével a folyóképesség drasztikusan növekszik, a termikus bomlási hőmérséklet jelentősen csökken, a tárolási és veszteségi modulusz értékek növekednek, az üvegesedési átmeneti hőmérséklet pedig kismértékben csökken.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-3 és ÚNKP-21-5. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs alaphól finanszírozott szakmai támogatásával, valamint az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült. A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH OTKA FK138501) pályázata támogatta.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] <https://www.webofscience.com/wos/woscc/advanced-search> (letöltve: 2022. február 28.)
- [2] PlasticsEurope, Plastics: the Facts 2021, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/> (letöltve: 2022. február 28.)
- [3] Sonchaeng U., Iniguez-Franco F., Auras R., Selke S., Rubino M., Lim L.: *Poly(lactic acid) mass transfer properties*. Progress in Polymer Science, 86/11. (2018) 85–121. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.06.008>
- [4] Matai I., Sachdev A., Dubey P., Uday Kumar S., Bhushan B., Gopinath P.: Antibacterial activity and mechanism of Ag–ZnO nanocomposite on *S. aureus* and GFP-expressing antibiotic resistant *E. coli*. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 115/3. (2014) 359–367. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2013.12.005>
- [5] Reddy K. M., Feris K., Bell J., Wingett D. G., Hanley C., Punnoose A.: Selective toxicity of zinc oxide nanoparticles to prokaryotic and eukaryotic systems. Applied Physics Letters, 90/5. (2007) 213902–213903. <https://doi.org/10.1063/1.2742324>
- [6] Sharma R., Jafari S. M., Sharma S.: *Antimicrobial bio-nanocomposites and their potential applications in food packaging*. Food Control, 112/6. (2020) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107086>
- [7] Merkl P., Long S., McInerney G. M., Sotiriou G. A.: *Antiviral Activity of Silver, Copper Oxide and Zinc Oxide Nanoparticle Coatings against SARS-CoV-2*. Nanomaterials, 11/5. (2021) 1–9. <https://doi.org/10.3390/nano11051312>
- [8] Mizielinska M., Nawrotek P., Stachurska X., Ordon M.: *Packaging Covered with Antiviral and Antibacterial Coatings Based on ZnO Nanoparticles Supplemented with Geraniol and Carvacrol*. International Journal of Molecular Sciences, 22/4. (2021) 1–14. <https://doi.org/10.3390/ijms22041717>
- [9] ISO 1133: Plastics – Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics, 2011.
- [10] ISO 11358: Plastics – Thermogravimetry (TG) of polymers, 2014.
- [11] Ingeo™ Biopolymer 2500HP Technical Data Sheet, [https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet\\_2500HP\\_extrusion\\_pdf.pdf?la=en](https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_2500HP_extrusion_pdf.pdf?la=en) (letöltve: 2022. március 01.)
- [12] Natureplast PBE-003 Technical Data Sheet, (letöltve: 2022. március 01.) <http://natureplast.eu/wp-content/uploads/2019/03/190319-Material-Portfolio-ENG.pdf>
- [13] Jompang L., Thumsorn S., On J. W., Surin P., Apawet C., Chaichalermwong T., Kaabhuathong N., O-Charoen N., Srisawat N.: *Poly(lactic acid) and poly(butylene succinate) blends fibers prepared by melt spinning technique*. Energy Procedia, 34/3. (2013) 493–499. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.777>
- [14] ISO 6721: Plastics – Determination of dynamic mechanical properties, 2019.