

Polietilén mechanikai tulajdonságainak javítása keverékképzéssel

Dobrovsky Károly*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék, Műanyag és Gumiipari Laboratórium

A kutatás során tömegműanyagokból előállított, többfázisú polimer keverék morfológiai és mechanikai tulajdonságait vizsgáltuk kompatibilizálószer hozzáadásával, annak érdekében, hogy az egymással nem-elegyedő műanyagok összeférhetőségét javítva nagyobb szívóssággal jellemezhető alapanyagot hozzunk létre. A keverékképzés során a nagy sűrűségű polietilénhez (HDPE) hozzáadott polisztirol (PS), illetve poli(etilén-tereftalát) (PET) jelentősen növelte a minta merevségét és kedvezően hatott a húzószilárdságra is. Az eredmények alapján kijelenthetjük, hogy a maleinsav-anhidriddel ojtott blokk-kopolimer jelentősen növeli az előállított keverék szakadási nyúlását és ütőszilárdságát, így a kompatibilizálószerrel és keverékképzéssel a HDPE alapanyagnál jobb mechanikai tulajdonságok érhetők el.

1. BEVEZETÉS

A polimerek alkalmazása egyre jelentősebb a mindennapokban. Szinte nincs olyan terület, ahol ne fordulnának elő a műanyagok, legyen szó akár közlekedési eszközökről, munkahelyi- vagy otthoni környezetről, illetve mindennapos használati tárgyairól. A polimereken belül meg kell különböztetni a polimer keverékeket, vagy más néven blendeket, amelyek felhasználása évről-évre emelkedő tendenciát mutat, egyes becslések alapján a teljes műanyag felhasználás közel harmadát adják. *Utracki* [1] definíciója alapján, azokat az anyagokat lehet polimer keverékeknek nevezni, amelyek kettő vagy több eltérő makromolekuláris komponenset tartalmaznak és az egyes alkotók aránya legalább 2 tömeg%, a teljes összetételre vonatkoztatva. A több polimer társításával létrehozott keverékek előnye, hogy a meglévő feldolgozó berendezésekkel újszerű, szintetikus anyagok költséghatékonyan gyárthatók, a különböző anyagcsaládok kiemelkedő tulajdonságai pedig egyesíthetők. Ezen felül, a komponensek arányának megfelelő megválasztásával, a létrehozott új alapanyag tulajdonsága széles határok között változtatható [2].

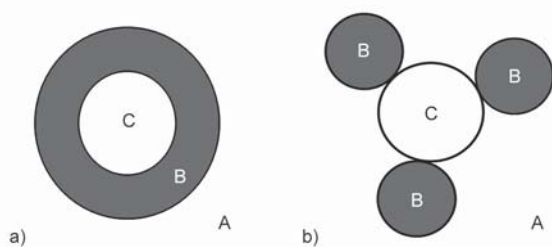
A keverékképzés során létrejöhöz elegyedő és nem-elegyedő keverék. Az előbbieknél az alkotók molekuláris szinten összeférhetők, termodinamikailag elegyednek. Ilyenkor az elegyedésnél a Gibbs-féle szabadenergia-változás negatív, a lehűlés során a komponensek egy fázist alkotnak, és homogén szerkezet jön létre közös üvegesedési átmeneti hőmérséklettel. A leggyakrabban alkalmazott polimerek azonban termodinamikai értelemben nem összeférhetők egymással. A komponensek összeférhetetlenségének legfőbb oka az eltérő molekuláris szerkezet, a nagy határfelületi feszültség és a gyenge adhézió. Az ilyen nem-elegyedő polimerekből előállított keverékekben különböző mikroszerkezetek jönnek létre, mint például diszpergált szemcseeloszlás vagy egymásba hatoló folytonos, hálós

szerkezet [1, 3]. Különböző kémiai adalékanyagokkal, például kompatibilizálószer felhasználásával javítható a nem-elegyedő komponensek közötti kapcsolódás, így technológiai értelemben már összeférhető, az ipar számára jól hasznosítható keverék hozható létre, stabil gyártás mellett [4, 5]. Az ilyen nem-elegyedő polimer blendek morfológiájának kialakulásában fontos szerepet játszik az alkotók összetétele, viszkozitása, a létrejövő fázisok mérete, illetve a közöttük lévő kölcsönhatások és a feldolgozási paraméterek. A gyártás során a feldolgozás körülményeinek megváltozása okozhatja a cseppek szétválását vagy egyesülését. Amennyiben nagyobb nyírások ébrednek, az ömledékállapotban lévő polimer cseppek átlagos mérete csökken az aprózódásuk következtében. Az egyensúlyi állapot felé haladva a méretcsökkenés egyre inkább gátolja a további aprózódást, ezzel párhuzamosan pedig az ütközések hatására beindul a cseppek egyesülési folyamata. Stacioner áramlási viszonyok mellett az átlagos részecskeméret állandó, a cseppek szétválásának és egyesülésének együttes előfordulása, dinamikus egyensúlya miatt [6]. Az így létrejött szerkezet határozza meg végül a polimer mechanikai és fizikai tulajdonságait, mint például az anyag ütésállóságát, merevségét, éghetőségét, de akár a gázáteresztő képességét is.

Amennyiben a polimer keverék három vagy több fázisból áll, a blend mechanikai tulajdonságai még inkább függenek a kialakuló morfológiától. A háromfázisú polimer keverékeknel a létrejött szerkezet egy összetettebb folyamat eredménye, a fázisok közötti kapcsolódásokat pedig a teljes-, illetve a részleges nedvesítés elméletével lehet leírni. Szélső esetben, teljes nedvesítés esetén egy A/B/C rendszerben a „B” fázis mindig olyan helyzetben van, hogy teljesen elválasztja egymástól az „A” és a „C” fázist, és kialakul a mátrixban beágyazott, vagy más néven betokozott diszpergált szerkezet, amelyben az egyik fázis alkotja a mag, a másik fázis pedig a héjstruktúrát

*PhD, dobrovsky.karoly@mail.bme.hu

(1a. ábra). Ilyenkor az „A” és a „B” fázis, illetve a „B” és a „C” fázis is nedvesíti egymást. A másik szélsőséges esetben, részleges nedvesítés esetén a legstabilabb termodinamikai állapotban mind a három fázis érintkezik egymással (1b. ábra) [7]. A nedvesíthetőség, így a kialakuló morfológia Harkins szétterülési elméletével becsülhető [8], amely a fázisok közötti határfelületi feszültséggel kapcsolatos. Amennyiben páronként vizsgálva a polimereket az egyik szétterülési tényező pozitív, akkor a keverék nedvesíthető lesz, és döntően az 1a. ábra szerinti állapot alakul ki; amennyiben mindhárom tényező értéke negatív, akkor részleges nedvesítés esete áll fenn, és mindegyik komponensnek lesz egy közös határfelülete egymással.



1. ábra. Háromfázisú keverékben kialakuló morfológiák: (a) teljes, (b) részleges nedvesíthetőség esetén

Reignier és Favis [9] egy polietilén mátrixú, háromfázisú keveréknél mutattak ki komplex, beágyazott szerkezetet a diszpergált fázisok között. Megállapították, hogy a kialakult szerkezet módosítható, sőt akár fel is bontható az alkotó összetételarányának és a keverékhez adott kompatibilizálószer változtatásával. Guo és társai [10] 70/20/10 m% összetételű nagy sűrűségű polietilén (HDPE)/polipropilén (PP)/polisztirol (PS) keveréknél mutattak ki hasonló beágyazódást a PS (héjszerkezet) és PP (magrész) fázisok között. Azonban, ha a keverékhez 2 m% sztírol-etilén blokk-kopolimert adtak, a két kisebb tömegarányú komponens önálló fázist alkotott, egyenletesen eloszlva a HDPE mátrixban. Omonov és társai [11] háromfázisú 70/15/15 m% összetétel-arányú poliamid 6 (PA6)/PP/PS keverék vizsgáltak, kompatibilizálószerrel egyidejű alkalmazásával. A felhasznált adalékanyagok csökkentették a diszpergált fázisok átlagos méretét, illetve a PS helyett, hogy körbevette volna a diszpergált PP cseppeket, a PP és a PA6 mátrix határfelületén dúsult fel, amelyet azzal magyaráztak, hogy a keverékhez adott kompatibilizálószer csökkentette a határfelületi feszültséget a mátrix és a PP/PS részek között, ezáltal a két kisebb részarányú komponens önálló fázisként jelent meg a keverékben.

Az egyre nagyobb mennyiségben piacra kerülő műanyagokkal párhuzamosan, egyre komolyabb kihívásokat okoz a növekvő műanyag-hulladék, amely a lakosságnak készült műanyag termékek rövid életciklusának következménye [12]. A többfázisú keverékek fejlesztése megoldást jelenthet a tömegműanyagok hasznosítására is. A visszanyert vegyes összetételű műanyag-hulladék

olcsó nyersanyagforrásnak tekinthető, amennyiben stabil gyártás mellett reprodukálható termékek készíthetők komplex válogatási eljárások alkalmazása nélkül. Amennyiben a kapott reciklát alapanyag alkalmas egy primer műanyag kiváltására [13], azzal a vállalat képes megfelelni a növekvő társadalmi elvárásoknak és a szigorodó környezetvédelmi jogszabályoknak is [14], miközben a költségek csökkenthetők. A fenntartható fejlődést is figyelembe véve a hulladék hasznosítása szintén kívánatos, ráadásul az eljárással a hagyományos „bölcsőtől a sírig” szemlélet helyett (ahol a hulladékká vált terméket hulladéklerakókban deponálják vagy elégetik) teret nyerhet a „bölcsőtől a bölcsőig” koncepció a hulladék termelésbe való visszaforgatásával [15].

Jelen kutatás során azt vizsgáltuk, hogy a leggyakrabban alkalmazott tömegműanyagokból előállított háromfázisú keverékekben milyen morfológia alakul ki a komponensek összetétel-arányától és a keverékhez adott kompatibilizálószer jelenlététől függően. Elemeztük a kialakuló szerkezet befolyását a keverék mechanikai jellemzőire, különösképpen az ütőszilárdságra, a komponensek kiindulási tulajdonságaihoz vonatkoztatva.

2. KÍSÉRLETI RÉSZ

2.1. FELHASZNÁLT ANYAGOK

A kutatás során olyan műanyagokat vizsgáltunk (HDPE, PS, PET), amelyek a lakossági műanyag-hulladékban leggyakrabban előfordulnak. A minták előállításához a MOL PETROLKÉMIA ZRT. által biztosított *Tipelin BA 550-13* típusú nagy sűrűségű polietilént, a POLIMERI EUROPA által gyártott *Edistir N1840* típusú polisztirolt, illetve a NEOGROUP által forgalmazott *NEOPET 80* márkanevű PET-et használtuk 70/15/15 térfogatszázalék [tf%] összetétel-arányban. Az összeférhetőség javítása érdekében a keverékekhez a KRATON által gyártott *FG1901X* típusú, maleinsav-anhidriddel ojtott sztírol-etilén-butadién-sztírol kopolimert (SEBS-g-MA) adtuk. A felhasznált alapanyagok legfőbb tulajdonságai megtalálhatók az 1. táblázatban.

2.2. VIZSGÁLATI BERENDEZÉSEK

A PET alapanyag előzetes szárítása 160 °C-on 6 órán át történt levegőcirkulációs szárítószekrényben. A műanyagok ömledékállapotú homogenizálása LABTECH *LTE 26-44* ikercsigás extruderrel valósult meg, emelkedő (250–275 °C) hőmérsékletprofil

1. táblázat.

A felhasznált primer műanyagok tulajdonságai

| Anyag | ρ [g/cm ³] | MFI [g/10 min] (255 °C/2,16 kg) | σ_M [MPa] | E [GPa] | ϵ_{\max} [%] | $a_{c,U}$ [kJ/m ²] | T_m [°C] |
|-------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------------|---------------|
| HDPE | 0,955 | 0,33±0,03 (255 °C/2,16 kg) | 25,7±2,6 | 0,92±0,06 | 162±81 | nem tört | 132,6 |
| PS | 1,05 | 17,92±0,73 (255 °C/2,16 kg) | 36,7±2,9 | 1,94±0,16 | 2,20±0,19 | 11,0±0,6 | – |
| PET | 1,34 | 38,4±5,7 (275 °C/2,16 kg) | 56,5±3,8 | 2,06±0,14 | 79,4±38,2 | 144±8,1 | 248,1 |

ρ – sűrűség; MFI – folyási mutatószám tömegre vonatkoztatva; σ_M – húzószilárdság; E – húzó rugalmassági modulusz; ϵ_{\max} – minta szakadási nyúlása; $a_{c,U}$ – hornyolatlan minta Charpy-féle ütőszilárdsága; T_m – kristályolvadási hőmérséklet

alkalmazva 150/perc fordulatszámon, „kiéheztetés” adagolással. Az alkalmazott gyártási paraméterek mellett az anyag 60 s ideig volt az extruderben. A gyártott 3 mm átmérőjű szál hűtőkádban átvezetve megszilárdult, a folyamat végén egyenletes méretű granulátumok készültek. A mechanikai vizsgálatokhoz a szabványos próbatesteket ARBURG *Allrounder Advance 370S 700-290* típusú fröccsöntő gépen gyártottuk le kétfézes hidegsatornás szerszámmal. A minták előállításakor a fúvóka hőmérséklete 275 °C, a teljes adagolási térfogat 46 cm³ volt, amelyből 10–11 cm³ az utónyomás alatt fellépő térfogati zsugorodást kompenzálta. Adott mintától függően 350–450 bar utónyomást alkalmaztunk 20 másodpercig. A fröccssebesség minden esetben 20 cm³/s volt.

A keverékek morfológiáját JEOL *JSM 6380LA* típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgáltuk. A SEM felvételek készítéséhez a mintákat előzetesen folyékony nitrogénben hűtöttük, majd kriogén töretfelületet hoztunk létre, amelyre vezetőképes aranyréteget porlasztottunk. A 10×4 mm keresztmetszetű, szabványos ISO 527-1:2012 próbatestek szakítóvizsgálatát ZWICK *Z020* típusú univerzális szakítógéppel, az ütve szakító vizsgálatát CEAST *RESIL Impactor Junior* típusú, számítógép vezérlésű ütőművel, az ISO 179-1:2010 szabványban foglaltaknak megfelelően végeztük el. A 15 J ütőkalapács 3,4 m/s sebességgel ütötte meg a 10×4 mm keresztmetszetű mintát, amelyre az ütve szakító szorítófeltétet előzetesen rögzítettük.

3. KUTATÁSI EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

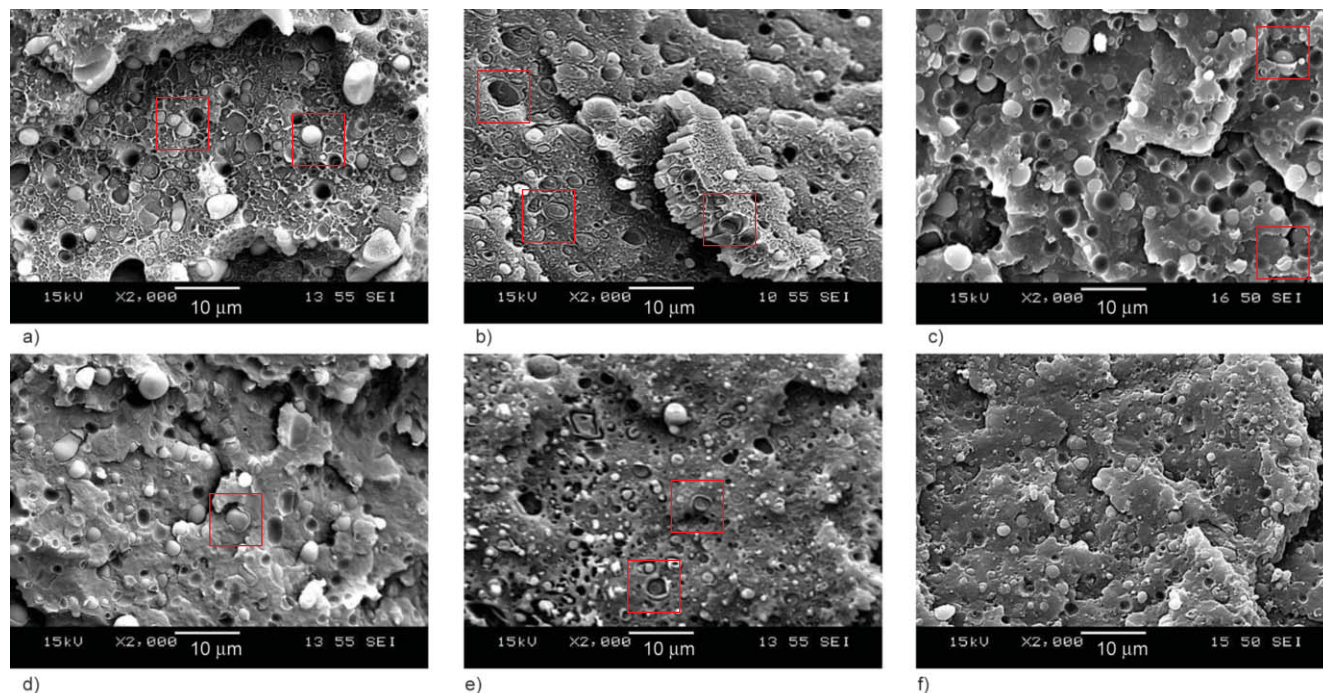
A vizsgálatok során a 70/15/15 tf% állandó összetétel-arányú HDPE/PS/PET keverék morfológiájának és mechanikai tulajdonságainak változását elemeztük a SEBS-g-MA tartalom függvényében, amelyet 0–10 tf% arányban adtunk hozzá a

keverékhez. Azt az adalékanyag mennyiséget kerestük, amelynél a keverék szakadási nyúlása és ütőszilárdsága már jelentősen javítható a húzószilárdság és a rugalmassági modulusz csökkenésének minimalizálása mellett.

3.1. MORFOLOGIA

A vizsgált keverék magszerkezetének változása a SEBS-g-MA tartalom függvényében nyomon követhető a 2. ábrán. A kompatibilizálószer hozzáadásával a fázisok közötti kapcsolódások javultak, a kezdeti nagyméretű diszpergált fázisok átlagos átmérője csökkent és homogénebb szerkezet alakult ki a keverékben. Az adalékanyag mennyiségének változtatása során 2–4 tf% mennyiség között volt megfigyelhető markánsabb változás, 4 tf% kompatibilizálószer hozzáadásával jobb eloszlású, egységesebb szerkezet jött létre a próbatest teljes keresztmetszetére vonatkoztatva. Ha a keverék nem tartalmazott adalékanyagot, akkor egy diszpergált fázis átlagos mérete az átmérőre vonatkoztatva 5,4±1,2 μm-re adódott. A kapott nagy szórás a változatos méretű diszpergált részekkel magyarázható. 4 tf% SEBS-g-MA tartalomnál a diszpergált fázisok mérete több mint a felére csökkent az eredeti mérethez képest (2,3±0,4 μm). Mindezek alapján kijelenthető, hogy a HDPE/PS/PET keverékhez adott kompatibilizálószer kisebb méretű és kisebb szórású diszpergált fázisokat eredményez.

A keverékben ezen kívül megfigyelhető a teljes nedvesítés esete, a HDPE mátrixban a PS és a PET beágyazott mag/héj szerkezetet mutat. Azonban a SEBS-g-MA tartalom növelésével a diszpergált rész mérete és a héjrész vastagsága csökkent, amely azt feltételezi, hogy az adalékanyag növelésével önálló fázisként is megjelenik a PS, illetve a PET a HDPE mátrixban. A feltételezést alátámaszthatja az a tény is, hogy 10%



2. ábra. 70/15/15 tf% HDPE/PS/PET primer keverék morfológiája a következő SEBS-g-MA tartalmak mellett: (a) 0%, (b) 0,5%, (c) 1%, (d) 2%, (e) 4%, (f) 10%, a piros négyzetek a PS/PET diszpergált fázis beágyazott strukturáját jelölik

SEBS-g-MA hozzáadása után a töretfelületen egyértelműen már nem volt kimutatható ez a típusú beágyazódás.

3.2. A SZAKÍTÓVIZSGÁLAT EREDMÉNYE

A szakítóvizsgálatok során kapott eredményeket reprezentatívan bemutató görbék a 3. ábrán láthatók eltérő adalékanyag tartalom mellett. A HDPE alkotóhoz adott PS és PET komponensekkel létrehozott keverék húzószilárdsága a HDPE-hez képest 15%-kal 30,2 MPa-ra, a húzó rugalmassági modulusza pedig közel 50%-kal 1,32 GPa értékre nőtt. A kapott modulusz érték jó egyezést mutat a várható értékkel, mint amit a térfogathányadok figyelembevételével lehet számítani ($E_{elm,70/15/15}$: 1,25 GPa) a komponensek húzó rugalmassági modulusz értékeiből, tehát a rugalmassági modulusz szempontjából a HDPE-hez adott másik két műanyag valóban az összetétel-aránynak megfelelően növeli ezt a paramétert. A keverék maximális nyúlása azonban jelentősen elmaradt a HDPE mintához képest. Az adalékanyagot 1 tf% arányban hozzáadva a keverékhez javult a fázisok közötti kapcsolódás, amely abban mutatkozott meg, hogy a szakadási nyúlás értéke több mint duplájára növekedett (24,4%), miközben a szilárdság és a modulusz nem változott jelentősen a keverék kiindulási értékeihez képest. Az adalékanyag mennyiségének további növelésével a keverék szilárdsága és rugalmassági modulusza enyhén csökkent, miközben a szakadási nyúlás jelentősen nőtt. 4 tf% SEBS-g-MA tartalom felett a minták már nem szakadtak el 100% deformáció alatt (2. táblázat). Az eredmények azt mutatják, hogy a keverékben a legnagyobb térfogatarányban megtalálható HDPE tulajdonságai kedvezően módosíthatók keverékképzéssel, illetve a kompatibilizálószer felhasználásával: 1 tf% adalékanyag hozzáadásával nagyobb szilárdság és merevség érhető el, kielégítő maximális nyúlás mellett. Amennyiben nagy deformációk elviselése

2. táblázat.

70/15/15 tf% HDPE/PS/PET keverék húzószilárdsága (σ_M), húzó rugalmassági modulusza (E) és szakadási nyúlása (ϵ_{max}) a kompatibilizálószer tartalom függvényében

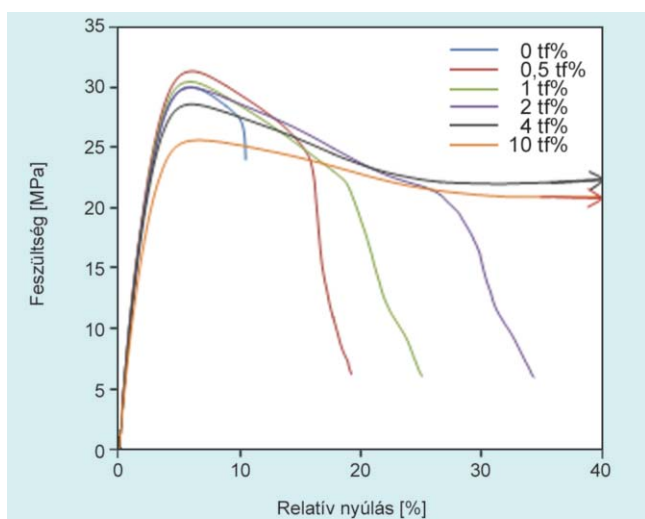
| Jellemző | SEBS-g-MA mennyisége a keverékben [%] | | | | | |
|----------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 0 | 0,5 | 1 | 2 | 4 | 10 |
| σ_M [MPa] | 30,2±0,2 | 31,1±0,2 | 30,6±0,3 | 29,9±0,1 | 28,3±0,3 | 25,3±0,3 |
| E [GPa] | 1,32±0,01 | 1,36±0,01 | 1,35±0,01 | 1,32±0,01 | 1,26±0,01 | 1,12±0,01 |
| ϵ_{max} [%] | 10,8±0,6 | 19,8±1,1 | 24,4±3,2 | 31,9±4,5 | >100 | >100 |

szükséges, úgy 4 tf% SEBS-g-MA esetén a keverék szakadási nyúlása összemérhető a csak HDPE-t tartalmazó mintákkal, miközben a háromfázisú keverék nagyobb rugalmassági moduluszsal rendelkezett. 10 tf% kompatibilizálószer hozzáadásával azonban a keverék tulajdonságai közel a HDPE tulajdonságaira módosultak, ugyanis a felhasznált kompatibilizálószer gumyszerű viselkedése magával vonja a keverék szilárdságának és moduluszának csökkenését, a szakadási nyúlás növekedésével párhuzamosan.

3.3. ÜTVE SZAKÍTÓ VIZSGÁLAT EREDMÉNYE

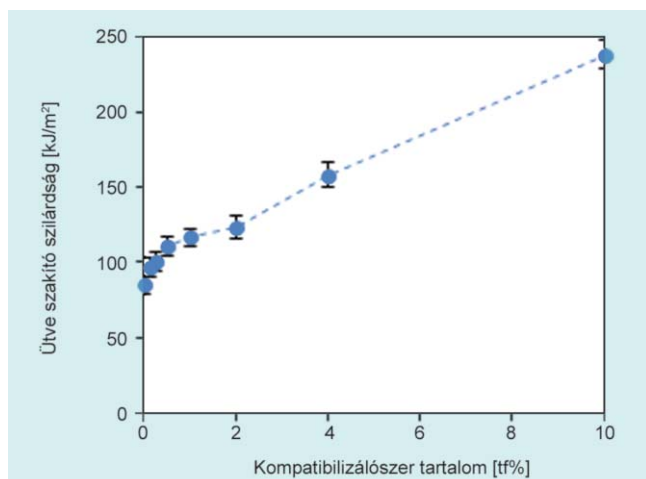
A fröccsöntött próbatestből kimunkált minták a dinamikus ütővizsgálatok során nem törtek el ütve hajlító elrendezés esetén a 15 J-os kalapáccsal, ezért a mintákat ütve szakító módban vizsgáltuk. Tekintettel arra, hogy a keverék térfogatának 70%-át a nagy szívóssággal jellemezhető HDPE adta, így a kompatibilizálószer nem tartalmazó minták is relatív nagy ütőszilárdsággal jellemezhetők (85,6 kJ/m²), azonban 1 tf% SEBS-g-MA hozzáadásával a keverék ütőszilárdsága további 40%-kal, 4 tf% adalékanyag esetén pedig 85%-kal volt növelhető. Megfigyelhető, hogy 0,5 tf% kompatibilizálószer tartalomig a minták ütőszilárdsága meredeken növekedett, amely feltételezhetően a fázisok közötti jobb kapcsolódások eredménye, a javuló adhézió eredményeként egy inicializálódott repedés terjedése a fázisok határfelületén egyre inkább gátoltta válik. 0,5–2 tf% SEBS-g-MA mennyiség között a keverékek ütőszilárdsága csak kissé javult, amelyet a megváltozó morfológia okozhat, ugyanis a diszpergált fázisok mérete ebben a tartományban kezdett jelentősen csökkenni. 2 tf% SEBS-g-MA tartalom felett a keverék ütőszilárdsága ismételtelen jelentősebb növekedést mutatott, amely alapján feltételezhető, hogy a gumyszerű, szívós adalékanyag már önálló fázisként is megjelent a HDPE mátrixban, jelentősen növelve a keverék dinamikus hatásokkal szembeni ellenálló képességét (4. ábra).

Az eredmények alapján azt a következtetést lehet levonni, hogy a keverékhez adott kompatibilizálószer megfelelő, sztirol blokkja lehetőséget ad a PS fázissal való kapcsolódásra, az etilén-butadién része a HDPE-vel, a kopolimerre ojtott maleinsav-anhidrid pedig kölcsönhatásra képes a PET láncvégein lévő hidroxil csoporttal. A homogénebb morfológia és a kapcsolódások hatására pedig az egymással nem-elegyedő komponensekből képzett keverék ütőszilárdsága is jelentősen



3. ábra. 70/15/15 tf% HDPE/PS/PET keverék szakítógörbéi az SEBS-g-MA kompatibilizálószer függvényében

javítható. Az adalékanyagot nem tartalmazó esetben is megfelelő ütőszilárdságot mérünk, amelyet a kezdeti morfológia magyarázhat. A keverékben lévő 15 tf% PS rész ugyanis feltehetően nem alkot önálló fázist a HDPE mátrixban, hanem betokozott részként van benne jelen a PET fázissal együtt. Így a PS rideg tulajdonsága nem rontja le a keverék dinamikus hatásokkal szembeni ellenálló képességét, azonban a keverék merevségét a térfogatarányának megfelelően képes növelni.



4. ábra. 70/15/15 tf% HDPE/PS/PET keverék ütve szakító szilárdságának növekedése a SEBS-g-MA tartalom függvényében

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során háromfázisú, 70/15/15 tf% összetétel-arányú HDPE/PS/PET polimer keverék tulajdonságait vizsgáltuk változó kompatibilizálószer tartalom mellett. A morfológia tanulmányozása során megfigyeltük a háromfázisú keverékekre jellemző beágyazott diszpergált szerkezetet a PS és a PET fázisai között a HDPE mátrixban. A kompatibilizálószer hozzáadásával a keverékben lévő diszpergált rész mérete jelentősen, több mint a felére csökkent már 4 tf% SEBS-g-MA hozzáadásával, egyúttal megfigyelhető volt a betokozott szerkezet magrészének elvékonyodása is. A keverékképzéssel, habár térfogatarány szerint a legmeghatározóbb komponens a HDPE volt, a mechanikai tulajdonságok jelentősen javíthatók további komponensek alkalmazásával. Térfogatarányuknak megfelelő mértékben növelték a keverék rugalmassági modulusát a PS és a PET komponensek, egyúttal a keverék húzószilárdsága is 15%-kal javult. Mivel a felhasznált műanyagok egymással nem-elegyedő keveréket alkotnak, így a fázisok között gyenge adhézió volt felfedezhető, amely megmutatkozott a szakítás során vizsgált minták korai tönkremenetelében. A keverék szakadási nyúlását és ütőszilárdságát a kompatibilizálószer hozzáadásával jelentősen növelni lehetett már kis adalékanyag hozzáadásával is, 4 tf% tartalomtól pedig a keverék nem szakadt el 100%-os relatív megnyúlás alatt.

Végeredményképpen, a polimerek társításával létrehozott keverék összességében kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat

mutat, mint a csak HDPE-t tartalmazó minták. A keverékek szívóssága 4 tf% SEBS-g-MA tartalom felett összemérhető a HDPE mintáéval. A keverék rugalmassági modulusza jelentősen, húzószilárdsága pedig kismértékben javult a HDPE értékeihez képest. Ezáltal egy hasonlóan szívós tulajdonságot mutató, azonban nagyobb merevségű szerkezeti anyagot lehetett létrehozni.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Utracki, L. A.; Wilkie C. A.: Polymer blends handbook, Springer, Dordrecht (2014).
- [2] Jose, S.; Thomas, S.; Parameswaranpillai, J.; Aprem, A. S.; Karger-Kocsis, J.: Dynamic mechanical properties of immiscible polymer systems with and without compatibilizer, *Polymer Testing*, 44, 168–176 (2015).
- [3] Czvikoviszky, T.; Nagy, P.; Gaál, J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [4] Dobrovsky, K.; Ronkay, F.: Effects of SEBS-g-MA on rheology, morphology and mechanical properties of PET/HDPE blends, *International Polymer Processing*, 30, 91–99 (2015).
- [5] Dobrovsky, K.; Ronkay, F.: Investigation of compatibilization effects of SEBS-g-MA on polystyrene/polyethylene blend with a novel separation method in a melted state, *Polymer Bulletin*, 73, 2719–2739 (2016).
- [6] Filippone, G.; Netti, P.A.; Acerno D.: Microstructural evolutions of LDPE/PA6 blends by rheological and rheo-optical analyses: Influence of flow and compatibilizer on break-up and coalescence processes, *Polymer*, 48, 564–573 (2007).
- [7] Ravati, S.; Favis, B. D.: Morphological states for a ternary polymer blend demonstrating complete wetting, *Polymer*, 51, 4547–4561 (2010).
- [8] Hobbs, S. Y.; Dekkers, M. E. J.; Watkins V. H.: Effect of interfacial forces on polymer blend morphologies, *Polymer*, 29, 1598–1602 (1988).
- [9] Reignier, J.; Favis, B. D.: Article control of the subinclusion microstructure in HDPE/PS/PMMA ternary blends, *Macromolecules*, 33, 6998–7008 (2000).
- [10] Guo, H. F.; Packirisamy, S.; Gvozdic, N. V.; Meier, D. J.: Prediction and manipulation of the phase morphologies of multi-phase polymer blends: 1. Ternary systems, *Polymer*, 38, 785–794 (1997).
- [11] Omonov, T. S.; Harrats, C.; Groeninck, G.: Co-continuous and encapsulated three phase morphologies in uncompatibilized and reactively compatibilized polyamide6/polypropylene/polystyrene ternary blends using two reactive precursors, *Polymer*, 46, 12322–12336 (2005).
- [12] Perugini, F.; Mastellone, M. L.; Arena, U.: A life cycle assessment of mechanical and feedstock recycling options for management of plastics packaging wastes, *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 24, 137–154 (2005).
- [13] Dobrovsky, K.; Ronkay, F.: Minőség-növelt hulladékhasznosítás kétkomponensű fröccsöntés alkalmazásával, *Műanyag és Gumi*, 49, 48–51 (2012).
- [14] 2012. évi CLXXXV. törvény a hulladékról
- [15] Razavi, S.; Shojaei, A.; Bagheri, R.: Binary and ternary blends of high-density polyethylene with poly(ethylene terephthalate) and polystyrene based on recycled materials, *Polymers for Advanced Technologies*, 22, 690–702 (2011).