



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
POLIMERTECHNIKA TANSZÉK**

KOMPATIBILIZÁLÓSZEREK ÚJFAJTA MINŐSÍTÉSE CENTRIFUGÁLIS ERŐTÉRBE

TDK dolgozat

Készítette:

Budinszki Balázs

JZBSZ3

Konzulens:

Dr. Ronkay Ferenc

egyetemi docens

Dobrovszky Károly

doktorandusz

2014

Tartalomjegyzék

JELÖLÉS ÉS RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	4
1. BEVEZETÉS	6
2. IRODALOMKUTATÁS.....	7
2.1. Polimer felhasználásnak előnyei.....	7
2.2. A polimer keverékek általános jellemzése.....	7
2.2.1. Elegyíthetőség	8
2.2.2. Összeférhetőség.....	9
2.2.3. Kompatibilizálószer hatása.....	10
2.3. Kétfázisú polimer keverékek morfológiája.....	11
2.4. PS/HDPE keverékek morfológiai és mechanikai tulajdonságai	13
2.5. Polimer blendek szétválasztási lehetősége.....	20
2.5.1. Kézi válogatás	21
2.5.2. Optikai eljárással történő szétválasztás	21
2.5.3. Sűrűségkülönbség szerinti szétválasztás	22
2.5.4. Centrifugális nehézközeges szétválasztás	25
2.5.5. Flotációs szétválasztás.....	26
2.5.6. Tribo-elektrosztatikus szétválasztás	27
2.5.7. Magneto-hidrosztatikus elven történő polimer szeparálás	28
2.6. Irodalomkutatás kritikai elemzése, célkitűzés	29
3. KUTATÁSI RÉSZ	31
3.1. A kutatás során felhasznált anyagok.....	31
3.2. A vizsgálatokhoz felhasznált berendezések.....	32
3.3. Az ömledékcentrifuga működési elve.....	35
3.4. Mérési eljárások.....	38
3.4.1. Szakítóvizsgálat.....	38
3.4.2. Hornyolatlan ütvizsgálat.....	38
4. KUTATÁSI EREDMÉNYEK	39
4.1. Reológiai vizsgálatok.....	39
4.1.1. MFI mérés eredményei.....	39
4.1.2. Viskozitás vizsgálat	40
4.2. A PS/HDPE keverékek morfológiai vizsgálata	41

4.3. Mechanikai vizsgálatok	43
4.3.1. Szakítóvizsgálat.....	43
4.3.2. Hornyolatlan ütővizsgálat.....	45
4.3.3. Összefoglalás.....	46
4.4. A kompatibilizálószer minősítése	47
4.4.1. SEBS-g-MA tartalmú keverékek szétválasztása	47
4.4.2. HDPE-g-MA és PP-g-MA tartalmú keverékek szétválasztása	53
4.4.3. Szétválasztási eredmények összefoglalása	54
5. FEJLESZTÉSI JAVASLATOK.....	57
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	58
7. SUMMARY	60
IRODALOMJEGYZÉK.....	62
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	66
MELLÉKLET	67

JELÖLÉS ÉS RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

A TDK dolgozatban felhasznált jelölések

T	[°C]	Hőmérséklet
T _g	[°C]	Üvegesedési átalakulási hőmérséklet
t	[s]	Idő
m	[g]	Tömeg
E _{húzó}	[MPa]	Húzó rugalmassági modulus
E _{átl}	[J]	Ütési energia átlag
F _c	[N]	Coriolis-erő
F _{cf}	[N]	Centrifugális erő
a	[mm]	Próbatest vastagsága
b	[mm]	Próbatest szélessége
σ _M	[MPa]	Húzószilárdság
σ _{ütő}	[MPa]	Ütőszilárdság
ε	[mm]	Nyúlás
V	[m ³]	Térfogat
n	[1/min]	Fordulatszám
v	[m/s]	Szemcse sebességvektor
w	[m/s]	Közegáram sebességvektor
T _g	[°C]	Üvegesedési átalakulási hőmérséklet
MFI	[g/10min]	flowási mutatószám
MVR	[cm ³ /10min]	flowási mutatószám, térfogatra
ΔG	[J]	Gibbs-féle szabadenergia változás
ΔH	[J]	Keverési entalpiaváltozás
ΔS	[J/K]	Keverési entrópiaváltozás

A TDK dolgozatban alkalmazott rövidítések

ABS	akrilnitril-butadién-sztirol kopolimer
CaCO ₃	kalcium-karbonát
HDPE	nagy sűrűségű polietilén
HIPS	ütésálló polisztirol
LDPE	kis sűrűségű polietilén
PA	poliamid
PC	polikarbonát
PE	polietilén
PET	polietilén-tereftalát
PMMA	poli(metilmetakrilát)
POM	polioximetilén
PP	polipropilén
PS	polisztirol
PVC	polivinil-klorid
SEBS	sztirol-etilén-butadién-sztirol kopolimer
SEBS-g-MA	maleinsavval ojtott sztirol-etilén-butadién-sztirol
HDPE-g-MA	maleinsavval ojtott nagysűrűségű polietilén
PP-g-MA	maleinsav anhidriddel ojtott polipropilén
PS-g-PC	polisztirollal ojtott polikarbonát
PS-g-PMMA	polisztirollal ojtott polimetilmetakrilát
SEM	pásztázó elektronmikroszkóp
SF ₆	kén-hexafluorid
TEM	transzmissziós elektronmikroszkóp
ZnCl	cink-klorid
IMDS	inverz mágneses sűrűségseparátor (inverse magnetic density separation)

1. Bevezetés

A műanyagok térhódítása az 1950-es években kezdődött, amely az elmúlt 60 évben töretlenül folytatódott. A polimerek felhasználásának növekedésével párhuzamosan a képződő műanyag hulladék mennyisége is egyre jelentősebb, ezért nagyon fontos a műanyag hulladékok minél nagyobb arányban történő újrahasznosítása, lehetőleg a minőség fenntartása (recycling), esetleg javítása (upcycling) mellett [1-2]. Az újrahasznosítás a műanyagipar fontos és gyorsan fejlődő iparágává vált az elmúlt években. A gyors fejlődés részben a politikai szabályzásoknak köszönhető, ugyanis az Európai Unió a tagországok részére irányelveiben arányszámokat írt elő, amelyeket a meghatározott határidőig teljesíteni kell. Újrahasznosítás esetén mindig szem előtt kell tartani a környezeti és gazdasági szempontokat [3-4].

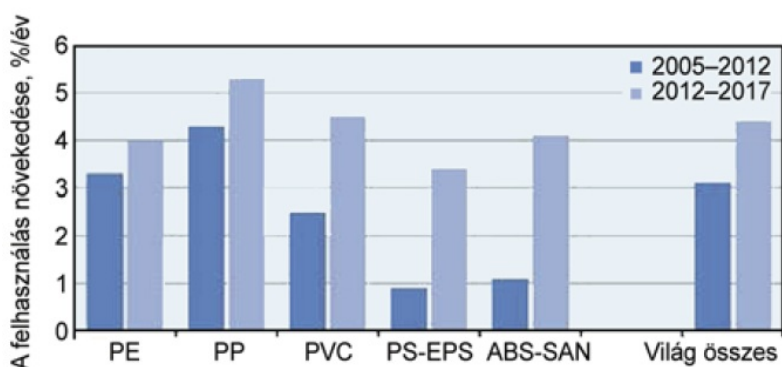
Az újrahasznosítás egyik lehetséges módja a polimer blendek, ötvözetek előállítása vegyes műanyag hulladékból. Azonban a polimerek legtöbb esetben inkompatibilisek, termodinamikai értelemben nem összeférhetőek egymással. Az ilyen nem elegyedő polimerekből előállított keverékek a kialakuló heterogén szerkezet miatt nem rendelkeznek megfelelő mechanikai és fizikai tulajdonságokkal. A polimer keverékek alkotóinak kapcsolódásának javítására az egyik elterjedt megoldás a kompatibilizálók alkalmazása, amelyek mindkét fázissal képesek kapcsolódásokat kialakítani, így javítva a keverékek összeférhetőségét. Sokféle kompatibilizálószer létezik, így egy-egy anyagpár esetén - attól függően, hogy mely tulajdonság javítása a cél: a merevség, vagy éppen a szívósság - akár több adalékanyag is megfelelő lehet. Fontos ellenőrizni, hogy a kiválasztott kompatibilizálószer alkalmas-e a kapcsolódások kialakítására, javítja-e a fázisok közötti homogenitást, ugyanis a nem megfelelő adalékanyag akár a keverékek tulajdonságait is ronthatja.

A kompatibilizálók megfelelőségének vizsgálata komoly erőforrásokat igényel, a keverékek előállítása után a mechanikai vizsgálatokhoz és a töretfelületek pásztázó elektronmikroszkópos felvételeinek elkészítéséhez szabványos próbatestek szükségesek. Továbbá a mérései eredmények kiértékelése, értelmezése komoly szaktudást igényel. Tehát a kompatibilizálók megfelelőségének vizsgálata idő, energia és pénz igényes. A TDK dolgozat célja olyan alternatív módszer fejlesztése, amellyel gyors és egyértelmű válasz adható a kompatibilizálószer megfelelőségére a kiválasztott keverékek esetén.

2. Irodalomkutatás

2.1. A polimerek felhasználásának előnyei

A polimerek felhasználása az 1950-es évekre jellemző 1 millió tonna/év volt, amely 2014-re 200 millió tonna/év-re nőtt (1. ábra). Az ICIS Consulting tanulmányának jóslata szerint a növekedés a 2012-2017 közötti időszakban akár 4,4%/év is lehet, ami azt jelenti, hogy 2017-re 47 millió tonnával nőni fog a felhasználás a 2012-es szinthez képest [5].



1. ábra: A legfontosabb hőre lágyuló műanyagok felhasználásának növekedése [5]

A polimerek számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek más szerkezeti anyagokkal szemben. Ezek közül egyik legfontosabb a kis sűrűség, amelynek köszönhetően csökkenthető a termék tömege. Mára a tömegcsökkentés kulcskérdéssé vált a járműiparban, ugyanis a járművek fogyasztáscsökkentésének ez az egyik lehetséges módja. A polimerek műszaki célú alkalmazását a kiváló fajlagos mechanikai jellemzők teszik lehetővé. Az orvostechikában a polimerekből az élő szervezet részeihez hasonló szilárdságú, rugalmasságú és kopásálló protézisek készíthetők. Ugyancsak kedvező tulajdonság, hogy feldolgozása alacsonyabb hőmérsékleten történik, ezáltal egyszerűsödik a gyártás kisebb energiabefektetéssel mellett. További előnyös tulajdonságai a polimereknek a jó vegyszerállóság, a rezgés- és zajcsillapító képesség és hőre lágyuló anyagok esetében az újrafeldolgozhatóság. Ezeknek a kedvező jellemzőknek köszönhető, hogy a csomagolástechnikában, építőiparban, járműiparban, elektronikai iparban és további iparágakban is nélkülözhetetlen alapanyaggá vált [6].

2.2. A polimer keverékek általános jellemzése

A polimer keverékek kettő vagy több különböző fázisból álló rendszerek, amelyekben a komponensek a rendszer egyes tulajdonságait ronthatják, míg másokat pozitívan befolyásolhatnak. Általában a blendek jellemzői a kiinduló alapanyagok tulajdonságai közé

esnek, ezért a gyakorlatban olyan anyagpárok kombinációjával állítanak elő keverékeket, amelyek előnyös tulajdonságokat eredményeznek a keverékekben. Ezeket a kialakuló előnyös jellemzőket leginkább az összetétel, a határfelületi kölcsönhatások, a szerkezet és a keveréket alkotó polimerek tulajdonságai befolyásolják. A polimer keverékek előállításának, felhasználásának és gyakorlati jelentőségének gyors növekedése annak köszönhető, hogy szinte korlátlan lehetőség van a tulajdonságaik optimalizálására. Leginkább a műszaki polimerekből készült blendek jelentősek, azonban komoly fejlesztések folynak a tömegműanyagokból előállított keverékek területén is. Az ilyen irányú kutatások egyik célja olyan polimer blendek fejlesztése, amelyek megoldást jelenthetnek a vegyes műanyag hulladékok hasznosítására is [7-9].

2.2.1. Elegyíthetőség

A polimer keverékek esetén nagyon fontos szempont a polimer fázisok elegyíthetősége, elsősorban ettől függ a blendek morfológiai szerkezete és az alkotók közötti kölcsönhatás. Ha keverékek komponensei elegyednek egymással, abban az esetben lehűlés után homogén szerkezet alakul ki. A kialakult homogén rendszer egyetlen fázist alkot, az alkotók egymással kompatibilisek, összeférhetőek és molekuláris szinten elegyednek, továbbá a rendszert egyetlen átalakulási hőmérséklet (T_g) jellemzi (1. táblázat) [9].

	PS	SAN	ABS	PA	PC	PMMA	PVC	PP	LDPE	HDPE	PET
PS	1										
SAN	6	1									
ABS	6	1	1								
PA	5	6	6	1							
PC	6	2	2	6	1						
PMMA	4	1	1	6	1	1					
PVC	6	2	3	6	5	1	1				
PP	6	6	6	6	6	6	6	1			
LDPE	6	6	6	6	6	6	6	6	1		
HDPE	6	6	6	6	6	6	6	6	1	1	
PET	5	6	5	5	1	6	6	6	6	6	1

1. táblázat: Kétalkotós blendek összeférhetősége: 1 – jól keveredő, összeférhető; 6 - összeférhetetlen [1]

Az esetek döntő többségében két különböző műanyagból előállított keverékek termodinamikai értelemben nem összeférhetőek, inkompatibilisek egymással. Ha a polimer blend alkotói nem elegyednek egymással, abban az esetben inkompatibilis heterogén szerkezet alakul ki. Heterogén rendszer esetén, ömledékállapotban való intenzív keverés ellenére a fázisok szétválása történik a lehűlés során. Ilyenkor az alkotók üvegesedési hőmérséklete külön-külön jelenik meg, amely termodinamikai okokkal magyarázható. Ahhoz,

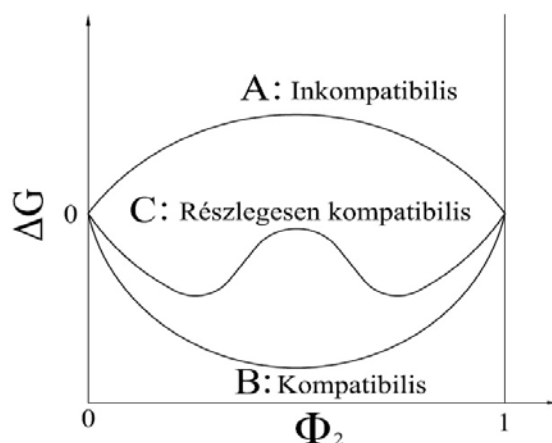
hogy a polimer keverékek összetevői egymással termodinamikai szempontból összeférhetőek, elegyíthetőek legyenek, két feltételnek kell egy időben teljesülnie [1,10]:

1. A polimer rendszernek alacsonyabb energia állapotba kell kerülnie a keveréssel, vagyis a Gibbs-féle szabadenergia változásnak (1) negatívnak kell lennie.
2. A szabadenergia változás (1) második deriváltjának pozitívnak kell lennie.

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (1)$$

ahol ΔG a Gibbs-féle szabadenergia változás, ΔH a keverési entalpiaváltozás és ΔS a keverési entrópia változás.

A két kritérium szemléltetésére szolgál a 2. ábra, amely a szabadenergia változást mutatja a keverék második alkotójának növekvő arányának függvényében.



2. ábra: Gibbs-féle szabadenergia változás lehetséges útjai kétalkotós keverékeknel [1]

Az „A” görbe jellemzi a nem elegyedő polimer blendeket. A „B” görbe esetén homogén szerkezet alakul ki, ennek következtében teljesen új tulajdonságokkal rendelkező rendszert kapunk, azonban a teljes keveredés előfordulása ritka. A „C” görbével jellemezhető az a keverék, amely az összetevők 50-50%-os arányánál heterogén szerkezet alakul ki, vagyis inkompatibilisen viselkedik, míg 70-30%-os- illetve 30-70%-os arány esetén, pedig homogén szerkezet alakul ki, tehát elegyedés figyelhető meg [1,11].

2.2.2 Összeférhetőség

Az összeférhetőség nem termodinamikai, hanem gyakorlati, technológiai fogalom, és minden polimer keverékre jól alkalmazható. Azok a blendek jól összeférhetőek, amelyek az adott alkalmazási területnek megfelelő tulajdonságokkal rendelkeznek [9]. Például heterogén szerkezet kialakulásával az ütésállóság könnyebben javítható, mint a termodinamikailag

összeférhető blendekkel. Erre jó példa a TDK dolgozatban vizsgált polisztirol (PS). A PS önmagában rideg, könnyen törik és kicsi ütésállósága, ha viszont butadiént kevernek hozzá, amelynek többszöröse az ütésállósága, akkor a keverékük, a nagy ütőszilárdságú PS ütésállósága is többszöröse lesz. A polimer keverék alkotóinak összeférhetősége kémiai adalékanyagokkal, kompatibilizálószerekkel javítható [7].

2.2.3. Kompatibilizálószer hatása

Azokat a kémiai, tulajdonságmódosító adalékanyagokat, amelyek a polimer blend fázisai közötti gyenge határfelületi adhézió növelésére és a határfelületi feszültség csökkentésre szolgálnak, kompatibilizálószereknek nevezzük. A kompatibilizálószer mindkét fázissal képes kapcsolódásokat kialakítani az oldalcsoportjai segítségével, így biztosítva az összeférhetőséget. Működési mechanizmusuk szerint, két csoportba sorolhatók, az egyik a reaktív kompatibilizálószerek, a másik az additív kompatibilizálószerek. Nem reaktív kompatibilizálás esetén egy harmadik komponens hozzáadása szükséges, amely mindkét fázishoz megfelelően kapcsolódik, ezzel biztosítva az adhézió növelését. Ebbe a csoportba sorolhatók a blokk és ojtott polimerek, mint például a polisztirollal ojtott polimetilmetakrilát (PS-g-PMMA), vagy a polisztirollal ojtott polikarbonát (PS-g-PC). Reaktív kompatibilizáció esetén a feldolgozógépben (extruder, fröccsöntő gép) végbemenő reakciónak köszönhetően alakul ki az összeférhető keverék. Az ilyen kompatibilizálószerek csoportjába sorolható az etilén-glikol-dimetakrilát, a kutatás során felhasznált maleinsav anhidriddel ojtott polipropilén (PP-g-MA), maleinsav anhidriddel ojtott nagysűrűségű polietilén (HDPE-g-MA) és a maleinsav anhidriddel ojtott sztirol-etilén-butadién-sztirol kopolimer (SEBS-g-MA) is [12]. Reaktív kompatibilizációval állítható elő az ABS, amely egy kiváló, szívós és műszaki célokra gyakran alkalmazott kopolimer. A termodinamikailag összeférhetetlen polimer keverékeket, amelyek kompatibilizálószer segítségével célszerűen módosítottak, polimer ötvözeteknek nevezzük.

A kompatibilizálószerek, a keverékek fizikai és mechanikai tulajdonságai mellett, a kialakuló morfológiai szerkezetet is jelentősen befolyásolják, vagyis a kompatibilizálás alapvető célja egy stabil, homogénebb szerkezet kialakítása és a tulajdonságok optimalizálása. Ugyanis a kompatibilizálószerek csökkentik a határfelületi feszültséget, biztosítják finomabb diszperzió kialakulását, és növelik a határfelületek vastagságát, javítva a határfelületi adhéziót. A nagyobb adhézió eredményeként a fázisok jobban együtt tudnak dolgozni, javul a feszültségátvitel, ezáltal javulhatnak a mechanikai tulajdonságok is a keverékben [13-14]. A

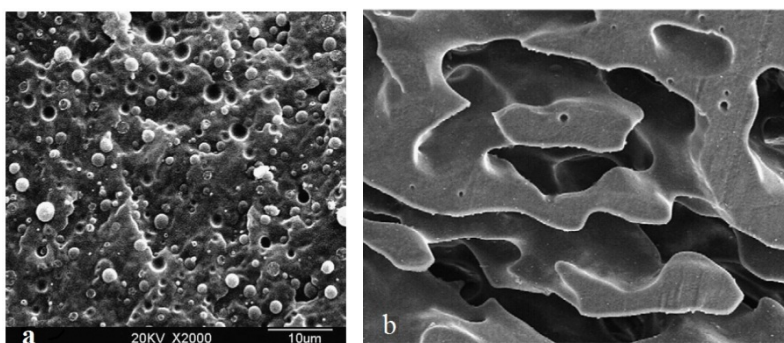
kompatibilizálószerrek tulajdonságmódosító hatásai néha 1 tf%-os tartalomnál is észrevehetőek a jó hatékonyságuknak köszönhetően. Ipari gyakorlatban jellemzően 3-4 tf%-ot kevernek a blendékbe [14].

A kompatibilizálás előnyös tulajdonságmódosító hatási révén, megoldást jelenthet a műanyag hulladékok újrahasznosítására oly módon, hogy a reciklálással gyakran együtt járó minőségromlás (downcycling) helyett, minőségnövekedés (upcycling) valósul meg úgy, hogy a hulladékból előállított polimer ötvözet jobb mechanikai tulajdonságokkal, homogénebb szerkezettel rendelkezik.

2.3. Kétfázisú polimer keverékek morfológiája

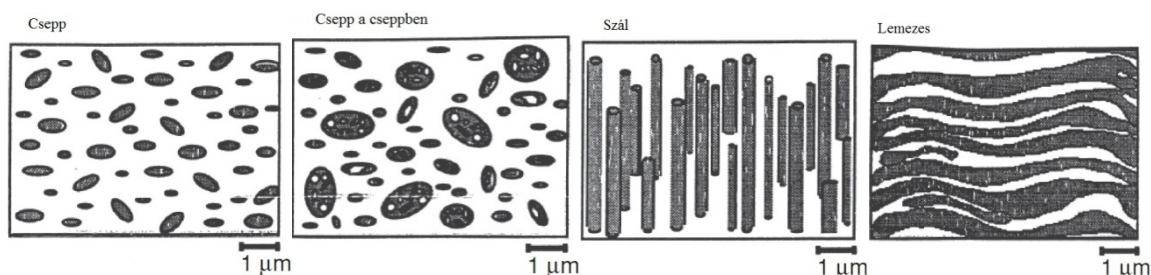
A polimer keverékek fejlesztésével lehetőség nyílik új polimerek előállításra, amelyek jól beállítható, célzott tulajdonságokkal rendelkeznek. Ez a formája az anyagfejlesztésnek gyorsabb és költséghatékonyabb, mint új szintetikus polimerek kutatása és előállítása [15]. Az inhomogén rendszerek fizikai és mechanikai tulajdonságait nagymértékben a morfológia határozza meg, amely leggyakrabban eldurvult szerkezetű, és gyenge határfelületi adhézióval jellemezhető, ami a keverék morfológiája szempontjából nem előnyös, mivel a nagy határfelületi feszültségek rontják a keverék mechanikai tulajdonságait [16].

Kétfázisú heterogén rendszerben a kialakuló morfológiai szerkezet lehet mátrixban elosztatott diszpergált, illetve kettős-folytonos struktúrájú (3. ábra), amelyben a két önálló fázis egy komplex, egymásba hatoló struktúrát alkot [17-18]. A morfológiai szerkezet vizsgálatát döntően pásztázó elektronmikroszkóppal végzik, de használnak még transzmissziós elektronmikroszkópot és atomerő-mikroszkópot is speciális esetekben.



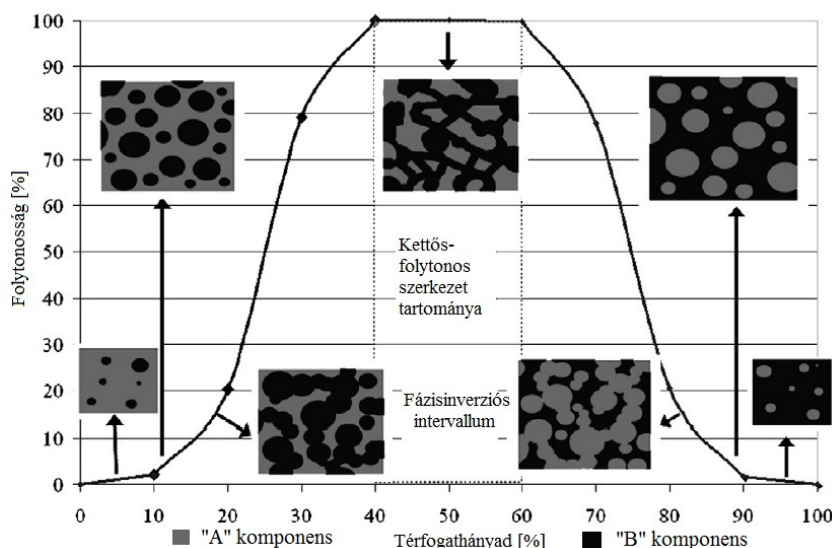
3. ábra: A morfológiai szerkezet két típusa: (a) mátrix/diszpergált struktúra [19], (b) kettős-folytonos struktúra [18]

A 3.(a) ábrán látható eloszlatott fázis alakja csepp alakú, ezenkívül még lehet szál, lemezes és úgynevezett csepp a cseppben formájú is, amelyeket a 4. ábra mutatja be.



4. ábra: A diszpergált fázis lehetséges formái [17]

A kétfázisú polimer keverékekben kialakuló morfológiai szerkezet több paramétertől is függ, mint például az összetételtől, az alkotók viszkozitás-arányától, a feldolgozási paraméterektől, a határfelületi feszültségtől és a fázisok közötti adhéziótól [16, 20]. Ha az összetétel a megfigyelt befolyásoló tényező, akkor a komponensek arányának változásával folyamatosan változik a keverék struktúrája is (5. ábra) [18]. Azonban sok esetben a fázisok viszkozitás-aránya is legalább ilyen fontos, mert ha az egyik alkotó nagy viszkozitású, a másik pedig kicsi, akkor a jobb folyóképeségű komponens hamarabb veszi fel a mátrixstruktúrát, míg a kisebb MFI értékkel rendelkező komponens elnyújtott csepp vagy rúd formájú diszpergált rész marad [16].

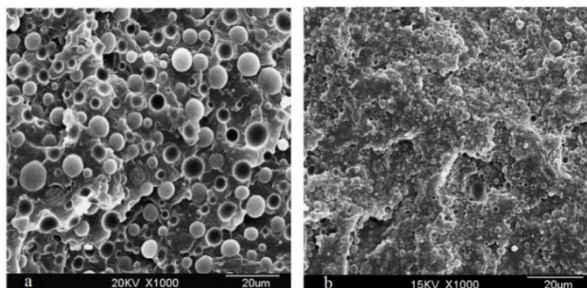


5. ábra: Kétfázisú keverékek struktúrájának változása az alkotók arányától függően [18]

Az 5. ábrán jól látható, hogy az „A” vagy a „B” komponens alacsony koncentrációja esetén, diszpergált/mátrix szerkezet jön létre a szélső tartományokban. Az „A” diszpergált fázis koncentrációjának növelésével, a cseppek mérete növekedik és formájuk deformálódik aszerint, hogy a feldolgozás során mekkora nyírási igénybevételnek volt kitéve a keverék, és

milyen reológiai tulajdonságokkal rendelkeznek az alkotók [16]. Az elosztatott fázis arányának további növekedésével a deformált cseppek egyesülnek, és elérnek egy koncentrációs határt, amelynél a diszpergált/mátrix struktúra átalakul, és folytonos szerkezet kezd kialakulni mind a két fázis esetében. A kialakult kettős-folytonos struktúra egy tartomány, amelyet fázisinverziós tartománynak neveznek. Tovább növelve az „A” fázis részarányát a keverékben, a „B” fázis folytonossága elkezd felbomlani, majd ismét diszpergált „B” fázis alakul ki az „A” mátrixban [18]. Kettős folytonos szerkezet esetén az alkotók együttesen határozzák meg a mechanikai tulajdonságokat, addig diszpergált esetben a mátrix befolyásolja döntő mértékben a blend mechanikai tulajdonságait, kivéve a szívósságot, amelyet a diszpergált részek [21].

A 6. ábra két SEM felvétele jól mutatja, hogy a kompatibilizálószerrek jelentősen módosítják a morfológiai szerkezetet. Megfigyelhető, hogy az elosztatott fázisok mérete csökken a kompatibilizálószer hozzáadásával, amely megakadályozza a keverék szemcsedurvulását. Emellett növeli a határfelületi adhéziót és csökkenti a feszültséget a diszpergált fázisok méretének csökkentésével. Vagyis a kompatibilizálás pozitív hatási révén a 6.(b) ábrán látható keverék homogénebb struktúrájú, mint a kompatibilizálatlan 6.(a) ábrán látható keverék [22].



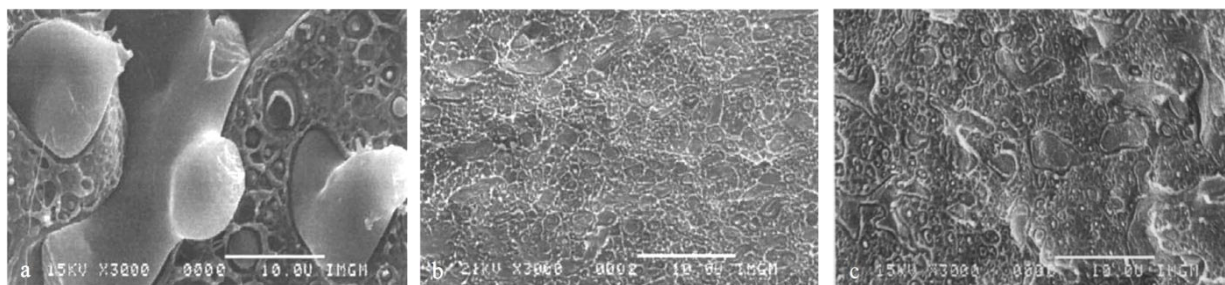
6. ábra: (a) 70/30% arányú PP/PS keverék, (b) 70/30% PP/PS arányú kompatibilizált keverék [19]

2.4. PS/HDPE keverékek morfológiai és mechanikai tulajdonságai

Ebben a fejezetben korábbi kutatások eredményeit ismertetem, amelyekben a kompatibilizálószerrek, elsősorban a saját kutatásom során is felhasznált SEBS-g-MA, illetve a hozzá hasonló tulajdonságú, nem ojtott SEBS morfológiai és mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgálták PS/HDPE keverékekben.

Cuesta és társai [23] kutatásának célja a nem-elegyedő HDPE/PS keverék morfológiai, illetve mechanikai tulajdonságainak javítása volt. Elsősorban a merevség és az ütésállóság növelését tűzték ki célul, ennek érdekében adalékanyagként kalcium-karbonátot (CaCO_3)

kevertek a HDPE/PS blendhez, amely ugyan a merevséget növelte, de az ütésállóságot csökkentette, ezért a keverék ridegségének csökkentése érdekében reaktív kompatibilizálószereket adtak a blendékhez. Két kompatibilizálószer hatását vizsgálták, az egyik a sztírol-etilén-butadién-sztírol (SEBS) volt, a másik a maleinsav anhidriddel ojtott sztírol-etilén-butadién-sztírol (SEBS-g-MA) volt. Azt tapasztalták, hogy eltérő kémiai szerkezet alakult az ojtott és a nem ojtott kompatibilizálószer tartalmazó rendszerek esetében, ugyanis a SEBS kizárólag a HDPE/PS keverékeknél volt megfelelő, míg a SEBS-g-MA a HDPE/PS keverékek mellett a CaCO_3 töltőanyagot tartalmazó rendszerek esetén is hatásosnak bizonyult. Az elektronmikroszkópos felvételek alapján azt tapasztalták, hogy a PS diszpergált fázisként volt jelen a HDPE mátrixban, és a köztük lévő gyenge adhézió miatt a fázisok közötti határfelületen haladt végig a törés. SEBS, illetve SEBS-g-MA hozzáadásával a PS diszpergált fázisok mérete jelentősen lecsökkent, ezáltal egy homogénebb szerkezet jött létre, ahol a törés a PS fázisokon keresztül halad, amely azt jelzi, hogy a kompatibilizálószerek elősegítik a fázisok közötti kapcsolódást.



7. ábra: Kriogén töretfelületek SEM felvételei (a) 75/25 tf% arányú HDPE/PS keverék kompatibilizálószer nélkül, (b) 4 tf% SEBS-sel, (c) 4 tf% SEBS-g-MA-val [23]

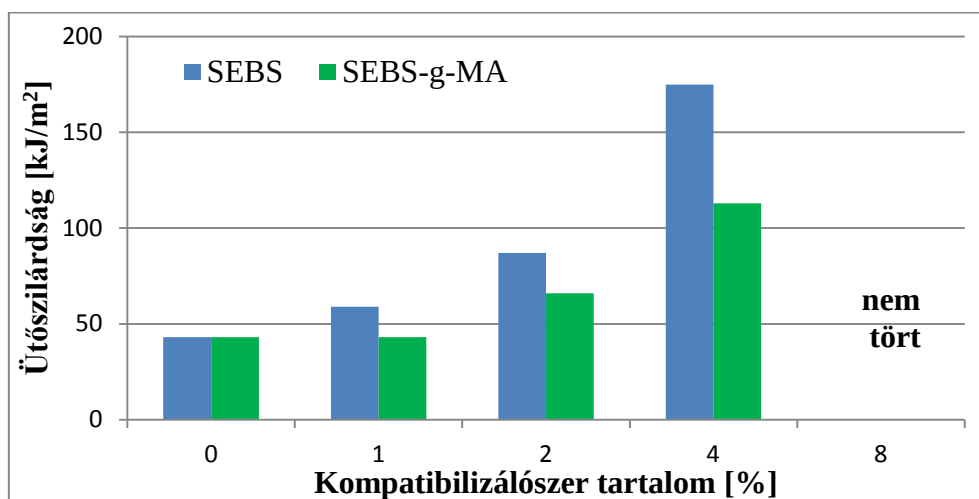
A mechanikai vizsgálatok közül a szakító- illetve ütővizsgálatot végezték el a próbatesteken [23], összevetve a referenciaként szolgáló tiszta HDPE-vel. A szakítóvizsgálatok eredményei alapján megfigyelték, hogy a HDPE/PS keverék húzószilárdsága magasabb, mint a tiszta HDPE-nél, amelyet a PS megjelenésével magyaráztak, jobb szilárdsági tulajdonságai miatt. A HDPE húzószilárdsága folyamatosan csökkent a kompatibilizálószer tartalom növekedésével, azonban a HDPE/PS keverékek esetén más tendenciát figyeltek meg, ugyanis a kompatibilizálószer tartalom növekedésével a húzószilárdság értéke enyhén növekedett a kompatibilizálatlan keverékhez képest. Ennek okát az adalékanyagok adhézió-javító és összekapcsolást segítő hatásának tulajdonították. Azonban nagyobb mennyiségben (8 tf%) a SEBS és a SEBS-g-MA is a húzószilárdság csökkenését okozta. A keverékek rugalmassági modulusa csökkenő tendenciát mutatott a növekvő

kompatibilizálószer tartalom mellett. A 2. táblázat tartalmazza a kutatás során PS/HDPE keverékeken elvégzett mechanikai vizsgálatok eredményeit.

A vizsgált keverékek összetételei [tf%]		Húzószilárdság	Rugalmassági modulus	Ütőszilárdság
		[MPa]	[MPa]	[kJ/m ²]
HDPE/PS	75/25	31,9	1324	43
HDPE/PS/SEBS	75/25/1	32,5	nincs adat	59
HDPE/PS/SEBS	75/25/2	32	1286	87
HDPE/PS/SEBS	75/25/4	30,9	1279	175
HDPE/PS/SEBS	75/25/8	28,1	1063	nem tört
HDPE/PS/SEBS-g-MA	75/25/1	33,2	nincs adat	43
HDPE/PS/SEBS-g-MA	75/25/2	32,7	1264	66
HDPE/PS/SEBS-g-MA	75/25/4	32,5	1155	113
HDPE/PS/SEBS-g-MA	75/25/8	30,3	1163	nem tört

2. táblázat: HDPE/PS keverékek mechanikai vizsgálatának eredményei [23]

A kutatás során [23] elvégzett ütővizsgálat eredményeit a 8. ábra szemlélteti, amelyen jól látható, hogy a kompatibilizálószer tartalom növekedésével a különböző összetételek ütőszilárdsága jelentősen növekedett, ugyanis a PS elosztatott fázis méretének csökkenésével, homogénebb szerkezet kialakulásával megszűntek a feszültség gyűjtő helyek. A kompatibilizálószer lassították, valamint megakadályozták a kialakuló repedések továbbterjedését a diszpergált PS fázisok körül, ezáltal rendkívül szívóssá váltak a keverékek, különösen a SEBS használata esetén.

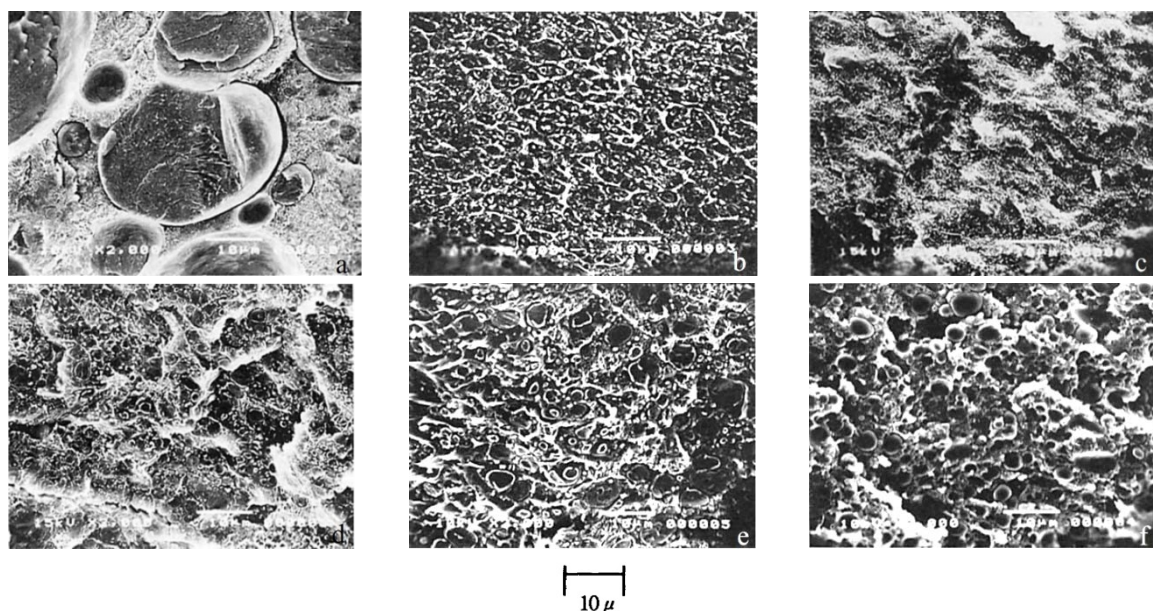


8. ábra: A különböző összetételű 75/25 tf% HDPE/PS keverékek ütővizsgálatának eredményei [23]

A két kompatibilizálószer mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását összehasonlítva megállapítható, hogy a SEBS-g-MA alkalmazása esetén magasabb húzószilárdság érhető el, viszont a rugalmassági modulust tekintve a SEBS-et tartalmazó

keverékek bírnak magasabb értékekkel, azonban a nagyobb mértékű csökkenése miatt 8 tf%-nál az ojtott kompatibilizálószeret tartalmazó blend modulusa nagyobb [23].

Park és társai [24] a különböző kompatibilizálószer hatékonyosságát tanulmányozták háromféle polimer keveréken a vegyes műanyag hulladékok hasznosítása érdekében. Ennek megfelelően a vizsgált keverékeket a hulladékban legnagyobb mennyiségben előforduló polimerek alkották: HDPE/PP, LDPE/PP, HDPE/PS. A HDPE/PS keverék nem-elegyedő fázisaihoz a jobb kapcsolódás érdekében SEBS, valamint SEBS-g-MA kompatibilizálószer keverték, amelyek koncentrációját 0-20 m% között változtatták, miközben a keverékek komponenseinek aránya minden esetben 50/50 m% maradt. A HDPE/PS blendek töretfelületén jól látható, hogy kompatibilizálatlan esetben a komponensek összeférhetetlensége miatt jelentős fázis szétválás alakult ki, és az eloszlott közel gömb alakú PS fázisok 8-30 μm -es átmérővel rendelkeznek (9.(a) ábra). A 9. (b-f) ábrákon megfigyelhető, hogy a SEBS, illetve a SEBS-g-MA tartalom növelésével a PS diszpergált cseppek mérete csökkent, a két adalék közül azonban, különösen nagy adalékanyag tartalomnál, a SEBS esetén tapasztaltak nagyobb méretcsökkenést a PS fázisban (9.(c) és (f) ábra). Vagyis a morfológiai vizsgálat alapján, megállapítható, hogy a SEBS hatékonyabb kompatibilizálószer, mint a maleinsav anhidriddel ojtott változata. A vizsgálat eredménye a kutatóknak nem okozott meglepetést, ugyanis a HDPE és a PS sem rendelkezik olyan funkciós csoportokkal, amelyek a maleinsav anhidriddel reakcióba léphetnének.



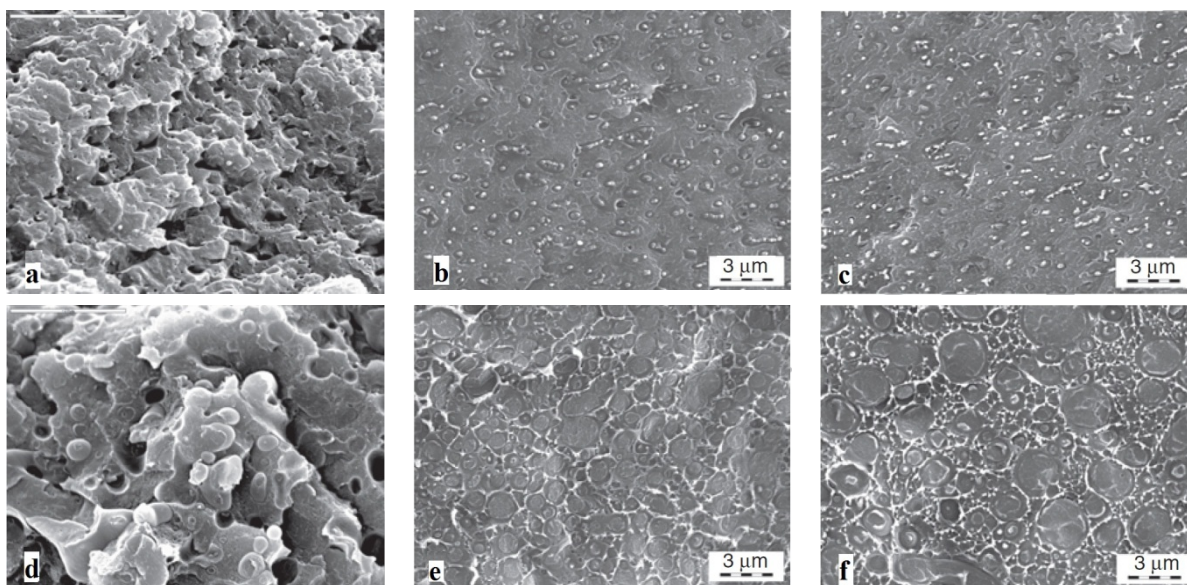
9. ábra: 50/50 m% arányú HDPE/PS keveréke SEM felvételei: (a) kompatibilizálatlan, (b) HDPE/PS/SEBS (42,5/42,5/ 15), (c) HDPE/PS/SEBS (40/40/20), (d) HDPE/PS/SEBS-g-MA (45/45/10), (e) HDPE/PS/SEBS-g-MA (42.5/42.5/15), (f) HDPE/PS/SEBS-g-MA (40/40/20) [24]

A szakítóvizsgálat eredményei a 3. táblázatban találhatók. Jól látható, hogy a kompatibilizálószer alkalmazásával a húzószilárdság, valamint a húzó rugalmassági modulus értékei csökkenő tendenciát mutat a kompatibilizálatlan keverékhez képest, miközben a koncentrációjuk növekedésével a szakadási nyúlás értéke nőtt. Összehasonlítva a két adalékanyagot megállapítható, hogy a SEBS felhasználásával szívósabb, de kisebb szilárdságú keverékek állíthatók elő, míg a SEBS-g-MA alkalmazásával kicsit nagyobb merevségű és szilárdságú, viszont kevésbé szívós blend állítható elő. Azonban 20 tf%-nál nem igaz ez a megállapítás, ugyanis a SEBS-sel kompatibilizált keverék amellett, hogy szívósabb viselkedést mutat, jobb szilárdsági értékekkel rendelkezik. Tehát ilyen nagy kompatibilizálószer tartalom esetén a SEBS egyértelműen kedvezőbb mechanikai tulajdonságokat eredményez.

		Húzószilárdság [MPa]	Húzó rugalmassági modulus [GPa]	Szakadási nyúlás [%]
SEBS [m%]	0	34,5	1,064	4,6
	5	30,2	0,975	15,6
	10	22,1	0,919	45,6
	15	20,4	0,828	69,2
	20	20,7	0,808	158,1
SEBS-g-MA [m%]	0	34,5	1,064	4,6
	5	32,2	0,987	6,87
	10	26,9	0,905	14,6
	15	21,7	0,832	41,2
	20	18,1	0,779	112,4

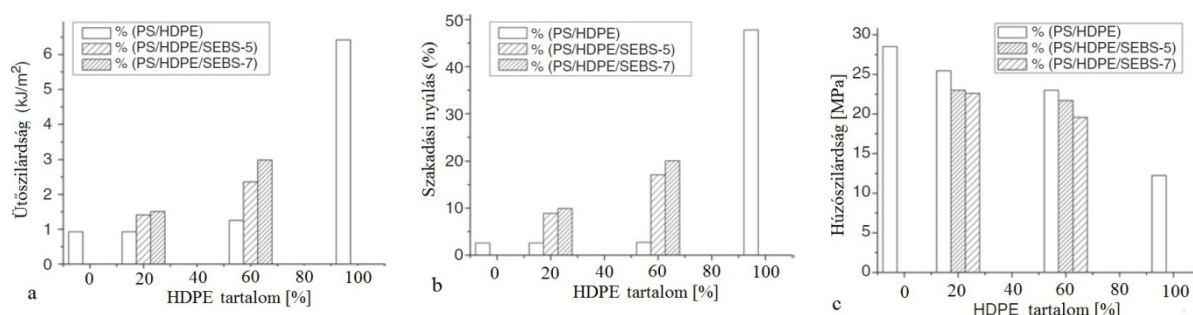
3. táblázat: A keverékek szakítóvizsgálatának eredményei [24]

Rek és társai [25] a SEBS kompatibilizálószer PS/HDPE keverékek morfológiai, illetve mechanikai tulajdonságaira gyakorolt hatását vizsgálták. Kompatibilizálatlan esetben durva morfológiai szerkezet alakul ki, és gyenge a fázisok közötti adhézió (10.(a) és (d) ábra). Azonban SEBS hozzáadásával finomabb, homogénebb struktúra alakult ki, ugyanis csökkent a diszpergált fázisok mérete, és eltűntek az üregek, lyukak a töretfelületről (10.(b) és (e) ábra). Növekvő SEBS tartalomnál a kompatibilizáló hatás még szembetűnőbbé vált, mivel rendkívül finom szerkezet alakult ki, amelyben a fázisok közötti különbség alig kimutatható (10.(c) és (f) ábra). Ez az eredmény összhangban van a korábbi kutatások eredményeivel [23, 24].



10. ábra: 80/20 m% arányú PS/HDPE blendek SEM felvételei: (a) kompatibilizálatlan, (b) 5 m% SEBS-sel, (c) 7 m% SEBS tartalommal; 40/60 m% arányú PS/HDPE keverék: (d) kompatibilizálatlan, (e) 5 m% SEBS tartalommal, (f) 7 m% SEBS-sel [25]

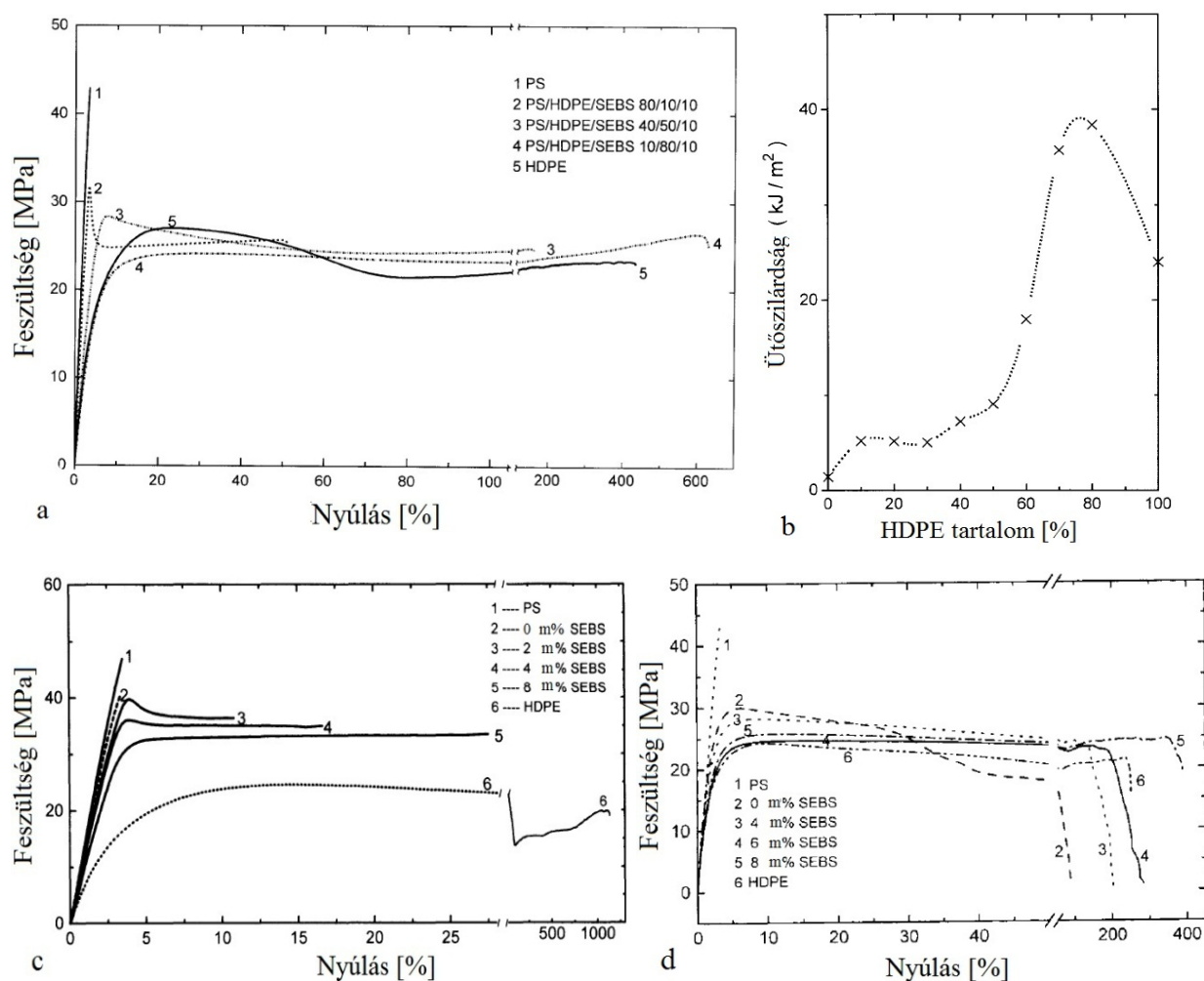
A mechanikai vizsgálatok eredményei alapján megállapítható (11. ábra), hogy a rideg PS és a szívós HDPE társításával létrehozott keverék a két polimer összeférhetetlensége miatt kedvezőtlen mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, amelyek SEBS hozzáadásával javíthatók. Ugyanis a fázisok közötti kapcsolódás javításával az ütőszilárdság és a szakadási nyúlás értékei növekedtek, miközben a húzószilárdság csak kis mértékben csökkent. Összehasonlítva a 80/20 m%, illetve 40/60 m% arányú PS/HDPE keverékeket, megállapítható, hogy a HDPE tartalom növekedésével a szakadási nyúlás nem nőtt, és az ütőszilárdság is csak alig észrevehetően emelkedett. Azonban a SEBS kompatibilizálószer hatékonyabban működött a nagyobb HDPE tartalmú keveréknél.



11. ábra: (a) ütőszilárdság a HDPE tartalom függvényében, (b) szakadási nyúlás a HDPE tartalom függvényében, (c) húzószilárdság a HDPE arányának függvényében [25]

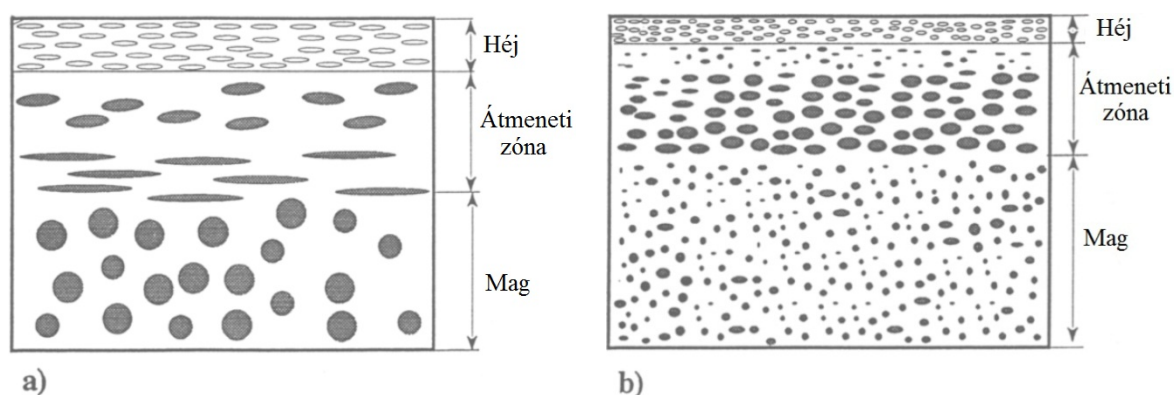
Xu és társa több kutatásban [26-28] foglalkozott a SEBS HDPE/PS keverékekre gyakorolt hatásával. Vizsgálták a különböző arányú blendek termikus, morfológiai és mechanikai tulajdonságait állandó SEBS tartalom mellett [26], valamint változó SEBS tartalom esetén. Utóbbi vizsgálatok eredményei alapján bebizonyosodott, hogy a SEBS

tartalom növekedésével az ütészilárdság javult, a szakadási nyúlás értékei növekedtek, a húzószilárdság kis mértékben, míg a rugalmassági modulus nagyobb mértékben csökkent (12.(c) és (d) ábra) [27, 28]. Állandó SEBS tartalom esetén a HDPE tartalom változásának függvényében tanulmányozták a keverékeket. Azt tapasztalták, hogy a HDPE tartalom növekedésével az ütészilárdság, illetve a szakadási nyúlás jelentősen növekedett, míg a húzószilárdság, és a rugalmassági modulus csökkent (12.(a) ábra). Ez a két a komponens mechanikai tulajdonságaival magyarázható, ugyanis a HDPE szívós, de kis rugalmassági modulussal rendelkezik, míg a PS rideg és nagyobb modulussal bír, ezért a HDPE tartalom növekedésével a keverékszabálynak megfelelően a blend tulajdonságait a HDPE befolyásolja nagyobb mértékben. 80/20 m% arányú HDPE/PS keveréknél az ütészilárdság és a szakadási nyúlás értéke magasabb volt a tiszta HDPE értékéhez képest, amely különbség a PS jelenlétével, és a SEBS komponensek közötti kiváló kapcsoló hatásával, valamint a komponensek közötti szinergikus hatással magyarázható (12.(b) ábra).



12. ábra: a 10 m% SEBS tartalmú HDPE/PS blendek (a) szakítódigramja, (b) ütészilárdsága a HDPE tartalom függvényében [26], (c) 80/20 m% arányú PS/HDPE keverék szakítódigramja [27], (d) 80/20 m% arányú HDPE/PS blend szakítódigramja [28]

Favis és társai [29] a fröccsöntéssel kialakuló mag-héj szerkezetet tanulmányozták kompatibilizált és kompatibilizálatlan HDPE/PA6 keverékek esetén. Megfigyelték a kutatás során, hogy a kompatibilizálatlan keverékeknél az elosztatott fázis erősen orientált és nagyon finom a héjban, míg a magban gömb alakú és nagyobb méretű (13.(a) ábra). A mag és héj közötti úgynevezett átmeneti zónában a héjhoz hasonlóan orientált az elosztatott fázis, azonban a formája kevésbé nyújtott. A kompatibilizált blendék esetén stabilabb struktúrát és a diszpergált részek kisebb nyúlását tapasztalták (13.(b) ábra). Számomra ez az eredmény azért érdekes, mert a kutatásom során vizsgálni fogom, hogy a HDPE/PS fröccsöntött próbatesten kialakul-e a mag-héj szerkezet, és ha igen, akkor hogyan befolyásolja a SEBS-g-MA tartalom változása.



13. ábra: Fröccsöntéssel kialakuló mag-héj szerkezet: (a) kompatibilizálatlan esetben, (b) kompatibilizált keverék esetén [29]

2.5. Polimer blendék szétválasztási lehetősége

A különböző gyártási technológiákkal előállított polimer termékek közel fele egy éven belül megjelenik a hulladékáramban [30]. Ez az arány teszi fontossá az évről-évre egyre nagyobb mennyiségben keletkező műanyag hulladékok minél nagyobb arányú és hatékony reciklálását. A települési szilárd műanyag hulladékokban leggyakrabban előforduló műanyagok (PE, PP, PVC, PS, PET) nem összeférhetőek, így együttes reciklálásuk minőségromlást eredményez. Ahhoz, hogy a minőség-növelt újrahasznosítás lehetséges legyen, a polimereket frakciók szerint szét kell választani, biztosítva a jó minőségű és megfelelő tulajdonságokkal rendelkező termékek előállításához szükséges fajtatiszta és egynemű reciklátumot. Azonban a jelenlegi szétválasztási technológiák általában egy lépésben erre nem képesek. Komoly gondot okoz az adalék- illetve erősítőanyagot tartalmazó vagy habosított polimerek szeparálása, mert ebben az esetben a polimerek sűrűsége is jelentősen megváltozhat. A minőség-növelt újrahasznosításnak másik lehetséges módja, hogy a hulladékáramban lévő

műanyagok kompatibilizálásával polimer keverékeket állítanak elő, amelyeket aztán alapanyagként használnak fel különböző termékek előállításához [30].

A gyártás és feldolgozás során keletkező hulladék estén – amely lehet selejt, hibás termék, vágási hulladék, angusz - nincs szükség szeparálásra, mert ebben az esetben a hulladék homogén, általában nem szennyezett, és regranulálása után egyszerűen hozzákeverhető az új alapanyaghoz. Napjainkban a műanyagfeldolgozó üzemek nagy részénél a gyártási hulladék újrahasznosítása a technológia fontos részét képezi [31].

Az alábbiakban az újrahasznosítás fontos műveletének, a szétválasztásnak a módszereiről lesz szó. A szétválasztási eljárások alapja, hogy a szemcsék fizikai tulajdonság különbségéből adódóan, különböző fluidumokban (közegekben), és különböző erőterekben (gravitációs, mágneses, centrifugális, elektromos) eltérően mozognak. Ily módon csoportosíthatóak a használt közeg szerint száraz- illetve nedves eljárásokra.

2.5.1. Kézi válogatás

A kézi válogatást az optikai szétválasztással együtt elsősorban előválogatási műveleteknél alkalmazzák [30]. A kézi válogatás során a hulladékáram egy szállítószalagra kerül, amely továbbítja azt a válogató személyzetnek, akik szemrevételezés alapján szortírozzák különböző anyagcsoportokra. Az eljárás csak a 40 mm-nél nagyobb méretű anyagok eltávolítása esetén hatékony. Jó megoldást nyújt a szelektíven gyűjtött hulladékok előválogatására, emellett alkalmas a veszélyes hulladékok és az egyéb fémes szennyezőanyagok eltávolítására. Hátránya, hogy az automatizált válogatási rendszerekhez képest lassabb, és nagy a munkaerő igénye, amely a költségeket jelentősen megnöveli, és hatásfoka az emberi hibák következtében 90%-nál alacsonyabb [32].

2.5.2. Optikai eljárással történő szétválasztás

Az optikai válogatás az anyagok különböző fényelnyelő- és visszaverő képességének elvén működik, így a vizsgált anyag egyértelműen beazonosítható, ugyanis a különböző anyagcsoportok más-más hullámhossz tartományokat vernek vissza, és nyelnek el. Ez az eljárás is alkalmas a fém- és veszélyes anyagok szelektálására, továbbá alkalmas színek alapján történő szétválasztásra. A módszer teljesen automatizált és hasonlóan a kézi válogatáshoz, ebben az esetben is szállítószalag szállítja a hulladékáramot. Az eljárás hátrányi közé sorolható, hogy a hulladékok felületén lévő szennyeződések rontják spektrumot, továbbá a bizonyos anyagok nem választhatók szét ezzel a módszerrel. A legnagyobb hátránya is a

működési elvéből adódik: a fekete színű termékek nem vagy nehezen detektálhatók és választhatóak le, ugyanis a fekete szín minden hullámhosszú fényt elnyel. A hatásfoka kb. 95%-os [32-34].



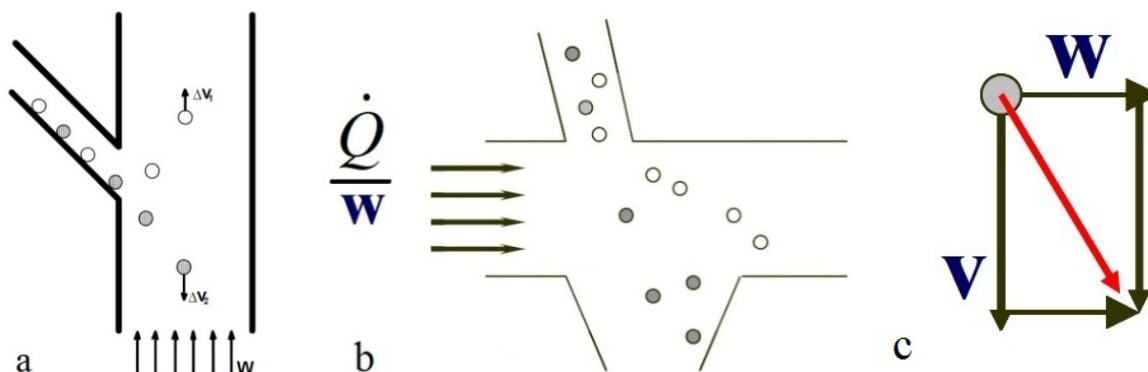
14. ábra: Optikai módszerrel történő szeparálás [34]

2.5.3. Sűrűségkülönbség szerinti szétválasztás

A sűrűségkülönbség elvén történő szétválasztásnak két típusa van az alkalmazott közeg szerint: száraz, illetve nedves közegű szétválasztás. Száraz közegű szétválasztás száraz áramkészülékben, légszérrel, légülepítőgéppel és aerocsatornában lehetséges. Ezek a berendezések léteznek nedves közegű változatban is, amelyeknek felépítése és működési mechanizmusa változatlan, különbség csak az alkalmazott közegben van. A nedves áramkészülékek: nedves áramkészülék, szer, ülepítőgép és nedves csatorna, ezekenkívül használnak még nehézközeges és magnetohidrosztatikus készülékeket [35].

A közegáramban történő szétválasztás elsősorban a hulladékszemcsék eltérő a süllyedési végsebességeitől függ. Száraz közegű elválasztás esetén a berendezés által biztosított légáram iránya szemcsék süllyedési végsebességéhez képest lehet ellenáramú, illetve keresztáramú [35]. Ellenáramoltatású berendezések alkalmazásakor a szemcsék mozgását a süllyedési sebességvektor (v) és a közegáram sebességvektorának (w) eredője határozza meg. Abban az esetben, ha $|v| > |w|$, vagyis a süllyedési sebesség vektor nagyobb, mint a légáram sebességvektora, akkor a szemcse lesüllyed és leülepedik. Ha a légáram sebességvektora nagyobb a süllyedési sebességvektornál $|v| < |w|$, akkor a szemcsék a közegárammal azonos irányba mozdulnak el, mert a közeg magával ragadja a szemcséket. Ha pedig $|v| = |w|$, akkor a szemcsék lebegnek (15.(a) ábra). Keresztáramú berendezések esetén változik a működési elv (15.(b) ábra), ugyanis a közegáram sebességvektor és a süllyedési sebességvektor merőleges egymásra, ezért a két vektor eredője határozza meg a szemcsék mozgását (15.(c) ábra). Keresztáramú készülékeket gyakran alkalmaznak roncsautók, és

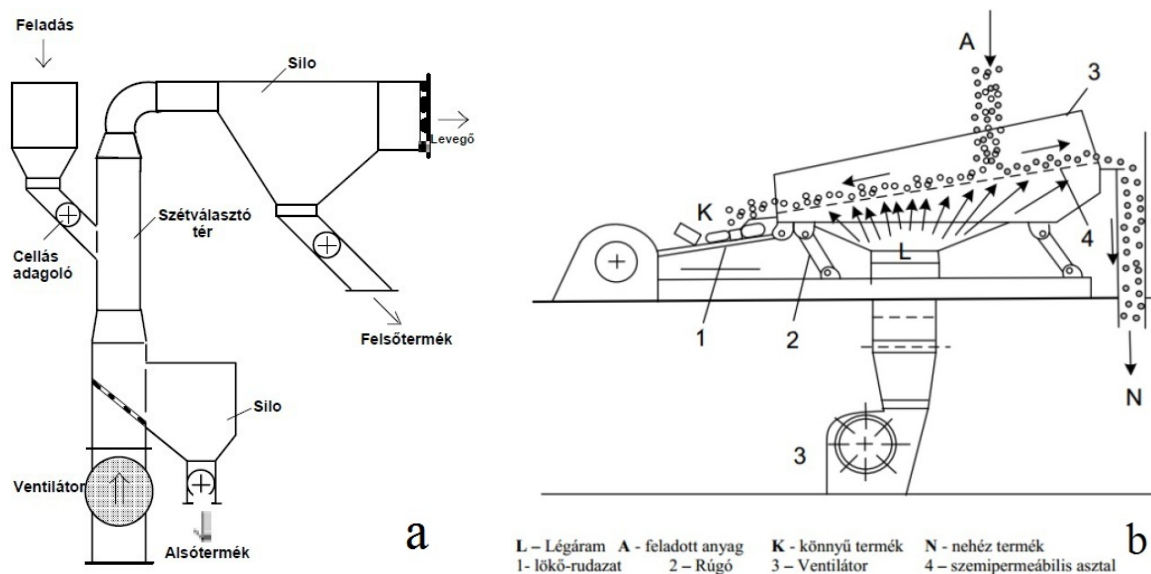
építési hulladékok szelektálásához a könnyű frakció leválasztására. Megvalósítható vele három- esetleg többkomponensű válogatás is [35].



15. ábra: (a) Ellenlégáramú szétválasztás működési elve [g], (a) keresztlégárammal történő szétválasztás működési elve, (b) a sebességvektorok eredője [35]

A légárammal történő szétválasztási eljárások estén fontos, hogy a szétválasztandó szemcsék mérete közel azonos legyen. Ugyanis egykomponensű szemcséknél a nagyobb méretűek gyorsabban, míg a kisebb méretűek lassabban mozognak, azonban többkomponensű, különböző méretű rendszereknél a jelenség összetettebbé válik. Egy nagyméretű, de kis sűrűségű szemcse azonos vagy kisebb sebességgel is mozoghat, mint egy jelentősen kisebb méretű, de nagy sűrűségű szemcse [34].

A 16.(a) ábrán egy kéttermékes ellenlégáramú szeparáló berendezés látható. A hulladék adagolása (feladása) után, a szétválasztó térbe kerül, ahol a ventilátor által létrehozott légáram szétválasztja a szemcséket. A nehezebb frakció lesüllyed, és egy silóba kerül, majd egy adagolón keresztül távozik a gépből. A könnyű frakció a légárammal együtt felfelé megy a felső silóig, és egy csövön keresztül elhagyja a berendezést. A légszér (16.(b) ábra) működési mechanizmusa hasonló az ellenlégáramú gépéhez, ugyanis légáramot szintén egy ventilátor biztosítja, amely lebegtetíti a kisebb sűrűségű szemcséket, így azok a lejtő irányában távozni tudnak a szétválasztóról. Miközben a nagyobb sűrűségű szemcsék az asztalra ülepednek, és az asztal vibrálásának köszönhetően a lejtőn felfelé haladva hagyják el a berendezést. A légszéreket széles körben alkalmazzák, használják például elektronikai hulladékok elválasztására, és faforgácsból fémek kinyerésére [35].



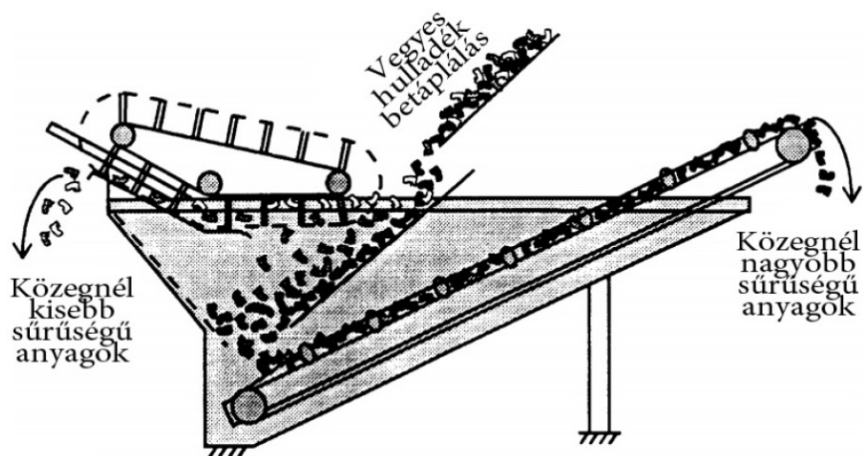
16. ábra: (a) Ellenlégáramú szétválasztó berendezés [35], (b) kéttermékes légszér működési elve [34]

A légülepítő gép alkalmazási területe közel azonos a légszérével, kiválóan alkalmas szilárd települési hulladékból műanyagok és fémek szelektálására. A gép működésének lényege, hogy a szitájára adagolt szemcséket periodikusan fel-fellazítja, és visszaülepíti, ezáltal a szemcsék sűrűség szerint rendeződnek. A nagyobb sűrűségű szemek leülepednek a készülék aljára, míg a kisebbek felúsznak a tetejére. A fellazításhoz vagy a szita, vagy a közeg pulzáló mozgása szükséges [35].

Super és társai sűrűségkülönbség elvén történő kísérleteket végeztek el, szén-dioxidot (CO_2) és kén-tetrafluoridot (SF_6) felhasználásával. A kritikusnál nagyobb nyomás, de a kritikusnál alacsonyabb hőmérséklet révén a gázok közel szuperkritikus állapotba kerültek, így jól szabályozhatóvá vált a gázok sűrűsége tág határok között ($0,77\text{-}1,7 \text{ g/cm}^3$). Ezt kihasználva a közel azonos sűrűségű PVC/PET keverék szétválaszthatóságát vizsgálta. A kísérletekkel igazolta, hogy ilyen kis sűrűségkülönbség esetén is csak 3-5% idegen anyag jelenléte volt jellemző. Az eljárás alkalmas poliolefinok szétválasztására is, azonban az iparban nem elterjedt [37].

A nehézközeges berendezés felépítése egyszerű, egy tartályból és a kihordó szerkezetből áll. A különböző műanyag típusok egymástól való elválasztására CaCl_2 vagy ZnCl_2 -ből képzett oldatot alkalmaznak, a poliolefinok kinyerésére a tiszta víz is tökéletesen megfelel. A működési elve ennek a berendezésnek is azon alapul, hogy a szétválasztandó anyagoknak eltérő a sűrűségük egy meghatározott közeghez képest, vagyis a közegnél nagyobb sűrűségű anyagok lesüllyednek a tartály aljára, ahonnan a kihordó szerkezet szállítja el, míg a kisebb sűrűségű anyagok felúsznak az oldat felszínére, és a tartály túlfolyóján a

szuszpenzióval együtt távoznak. A technológia tipikus gépe a láncos vonzó kihordó berendezés, melynek felépítése és működése a 17. ábrán látható [32].



17. ábra: Nehézközeges szeparáló berendezés láncos kihordással [36]

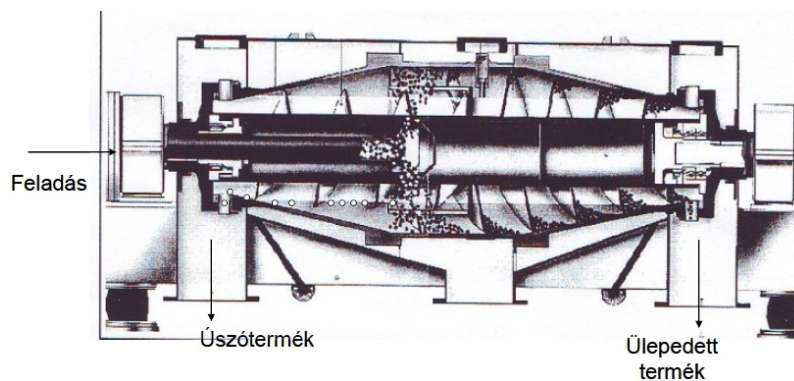
A sűrűségkülönbség szerinti szétválasztás előnyei közé sorolható, hogy jól automatizálható, megbízható, nagy mennyiségű hulladék szeparálására alkalmas, ezáltal olcsó eljárás általában. Ugyanakkor azonos sűrűségű anyagok nem választhatók szét ezzel az eljárással, amely elsősorban a polimerek szétválasztása esetén okoz gondot. Olyannyira, hogy vizes szétválasztással csak a poliolefinok, és az elválasztó közegnél nagyobb sűrűségű polimerek (PET, PVC, PS) választhatók szét. A PP/PE, PVC/PET, ABS/PS polimer keverékek a sűrűségkülönbség elvén nem szeparálhatóak, viszont más eljárásokkal, például a flotációs szétválasztással megoldható. Nedves közeg alkalmazása esetén további hátrány, hogy a szilárd hulladék tárolása nedves állapotban bonyolultabb, ráadásul a keletkező szennyvíz elhelyezéséről gondoskodni kell, amely az eljárás költségeit nagymértékben növelheti. Ezenkívül a visszanyert nedves frakciókat szárítani kell, a jó minőségű feldolgozás érdekében. Továbbá több komponens esetén több lépés szükséges a tiszta frakciók eléréséhez, mert egyszerre csak egy szétválasztási határ alkalmazható. A hátrányai miatt a nedves szétválasztás háttérbeszorulóban van, csak indokolt esetben jó megoldás, viszont ekkor nagyon jó hatásfokú szétválasztás érhető el [36].

2.5.4. Centrifugális nehézközeges szétválasztás

A finomabb hulladékszemcsék hatékonyabb szétválasztása érdekében, a szemcsékre ható erő növelésére van szükség, amely centrifugálás esetén a centrifugális erőter hatásának köszönhető. Ennek az eljárásnak tipikus berendezései a centrifugák, örvénycsövek, ciklonok. Az eljárás hatásfoka nagymértékben függ a szétválasztandó anyagok sűrűségkülönbségétől.

Azonban gondot okoz, hogy a különböző anyagú szemcsék a közegben képesek összetapadni, amely rontja az eljárás hatásfokát [32].

Nehézközeges centrifugával a polimereket hatásosan és nagy tisztasággal lehet elválasztani egymástól (18. ábra). Elsősorban szelektív gyűjtésből származó műanyag hulladékok feldolgozására használják. Az örvénycsövekhez és a ciklonokhoz képest jelentősen jobb hatásfokkal rendelkezik, amely a nagyobb centrifugális erővel (a nehézségi erő több százszorosa is lehet), és a hosszabb tartózkodási idővel magyarázható. Működése során a tartály nagy kerületi sebességgel együtt forog a közeggel és a feladott műanyag hulladékokkal. A szétválasztandó hulladékszemcséket a centrifuga tengelyén juttatják be a közeggel együtt. A közegnél kisebb sűrűségű anyagot a tengelyen található kisebb csiga szállítja el, miközben a nagyobb sűrűségűek a centrifuga falán ülepednek le, ahonnan kihordásuk egy nagyobb átmérőjű csigával valósul meg [32].



18. ábra: Nehézközeges centrifuga működési elve [32]

2.5.5. Flotációs szétválasztás

A flotáció, azaz felúsztatás a közel azonos sűrűségű műanyag hulladékok tipikus szétválasztási eljárása (például: PET/PVC vagy ABS/PS). Az eljárás azon alapul, hogy az alapesetben hidrofób anyagok közül az egyik felszíne hidrofil tulajdonságúvá változik a hozzáadott kémiai adalékanyagok hatására, ezáltal szétválaszthatóvá válnak. Így az emulzió átalakított levegő, vagy gáz magával ragadja a hidrofób darabokat és felúsznak a felszínre, ahonnan a habbal együtt egyszerűen eltávolíthatók, míg a hidrofil szemcsék az oldatban maradnak. A folyadék fázis általában víz. ABS és PS szétválasztásához semleges közeg szükséges, amelyben az ABS oldalcsoportjai hidrogénkötések kialakítására képesek a kémiai adalékanyaggal, ezáltal hidrofillé válik és lesüllyed, míg a PS hidrofób marad és lebeg [36, 37].

Takoungsakdakun és társai a flotációs eljárás hatékonyságát vizsgálta PET/POM/PVC keverékek esetében. Első lépésben a POM-ot választották el a többi frakciótól, mégpedig egy semleges kalcium-szulfát oldat alkalmazásával. Azt tapasztalták, hogy nedvesítő anyag hatására a POM kapcsolódási szöge kisebb, mint a PET és PVC fázisoké, ami azt eredményezte, hogy a POM hidrophil a másik két komponenshez képest, így az oldatban maradt, míg a PET és PVC felúszott a szeparáló közeg felszínre. Az eljárás paramétereinek megváltoztatásával a PET és PVC is szétválaszthatóvá vált, ugyanis ekkor a PET hidrophillé vált, míg a PVC hidrofób maradt [38].

2.5.6. Tribo-elektrosztatikus szétválasztás

Triboelektromos feltöltődésnek nevezik azt a jelenséget, amikor két, különböző felületi jellemzőkkel rendelkező anyag egymással érintkezik, és felszínükön töltések gyülemlenek fel, ezáltal megindul a töltésáramlás a nagyobb elektronaffinitású polimer irányába. Vagyis a töltött részről a töltéssel nem rendelkező rész felé áramolnak, ameddig ki nem egyenlítődik a két anyag Fermi-szintje. A töltések áramlása megvalósulhat elektron átvitelrel, ion transzferrel, illetve anyagáramlással. Mindegyik műanyag típus eltérő töltöttségi állapotba kerül a szemcséik súrlódása során, lesznek erősen negatív töltésűek (PVC, PET, PTFE), és erősen pozitív töltésűek is (PA, POM, PMMA) (19. ábra) [33, 35].



19. ábra: Polimerek feltöltődési sorrendje [36]

A szemcsék ütközésének következtében eltérő töltöttségi állapotba kerülnek, így szétválaszthatóvá válnak. A tribo-elektrosztatikus szétválasztás során a különböző töltésű anyagokat elektrosztatikus térbe vezetik, és polaritásuk szerint szétválogatják. A negatívan töltött szemcsék a pozitív elektródához, míg a pozitívan töltött szemcsék a negatív elektródához vonzódnak, így az esési irányuk módosul, és külön edényekbe gyűjthetők (20. ábra) [35, 36, 39]. A tribo-elektrosztatikus szétválasztás, hasonlóan a többi mechanikai szeparálási eljáráshoz azért kedvező, mert nem degradálódik az elválasztott anyag a folyamat

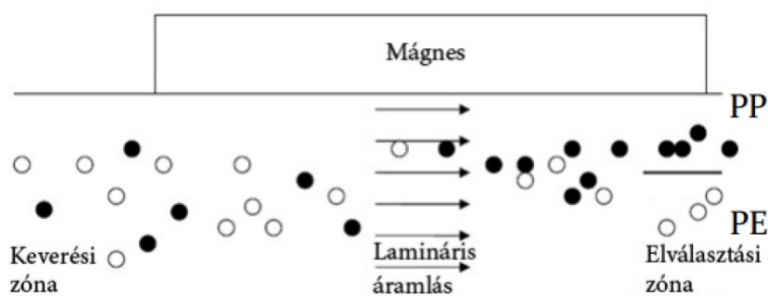
során. Gazdaságos, nagyon jó hatásfokú, és a szemcseméretre viszonylag érzéketlen módszer. Azonban problémát okoz az összetapadt szemcsék szétválasztása [36].



20. ábra: Tribo-elektrosztatikus szétválasztás elvi sémája [36]

2.5.7. Magneto-hidrosztatikus elven történő polimer szeparálás

Magneto-hidrosztatikus elven működik az úgynevezett inverz mágneses sűrűségseparátor (IMDS) eljárás [31]. A flotációs szeparáláshoz hasonlóan egy szabályozható sűrűségű közeggel történik a szétválasztás. A közeg szabályozhatósága abból adódik, hogy a közegként használt mágneses folyadékra (nanométer méretű ferrit részecskéket tartalmaz) gradiens mágneses mezőben ható erő a gravitációs- illetve a mágneses erőter hatásaiból származó erők eredője. Vagyis a közeg „súlya” változtatható, így egy mesterséges és látszólagos közeg hozható létre. Ez a módszer a kiváló szabályozhatóságából adódóan megoldást nyújt a közel azonos, ám a víznél kisebb sűrűségű poliolefinok szétválasztására (21. ábra). Azonban jó hatásfokkal csak kétkomponensű hulladékáram szétválasztása esetén alkalmazható [31].



21. ábra: IMDS berendezés működési elve [36]

Egy másik mágneses elven működő módszer a magnetohidrosztatikus szeparálás. A magnetohidrosztatikus jelenség (MHS) akkor jöhet létre, amikor egy paramágneses anyag a saját mágneses szuszceptibilitásánál kisebb közegbe kerül, ugyanis ilyenkor a mágnes taszítja az anyagot. Ebből a taszításból eredő erő a folyadékban függőleges irányban felfelé mozdítja el a szemcséket. Mivel a mágneses tér inhomogén, és a taszításból származó mágneses erőt a

nehézségi erő egyenlíti ki, ezért különböző magasságokban helyezkednek el az eltérő sűrűségű szemcsék, amelyek mivel rétegekbe rendeződtek, könnyen eltávolíthatók onnan. Közegként fémsók oldatát (vas-, nikkel- klorid), vagy nanoméretű magnetit részecskéket tartalmazó szuszpenziót alkalmaznak. Az MHS berendezések nagy előnye a szabályozhatóságában és az egyszerűségében rejlik. A jövőben fontos szerepe lehet az autóipar hulladékok szétválasztásában [32, 40].

2.6. Irodalomkutatás kritikai elemzése, célkitűzés

Megállapítható, hogy kevés olyan kutatás áll rendelkezésre, amelyben a SEBS-g-MA hatását vizsgálták HDPE/PS keverékekben. A kutatásokban a SEBS-g-MA morfológiai szerkezetre és mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgálták, és a nem ojtott SEBS hatékonyságával hasonlítják össze [23, 24]. Az összehasonlításból kiderült, hogy hatásuk megegyezik, különbség csak a hatékonyságukból adódik [25, 26, 27, 28]. Bizonyos kutatások mérési eredményei hiányosak, ezért a kapott eredményekből nem vonható le egyértelmű következtetés a kompatibilizálószer hatását illetően [23, 24]. A vizsgálatokat legfeljebb négy-öt eltérő kompatibilizálószer tartalmú keverék esetében, és általában nagy lépésközönként végezték el, amely meglátásom szerint nem megfelelő, épp ezért a kutatásomban a SEBS-g-MA hatásának átfogó bemutatására kis lépésközönként növelt, kilenc különböző SEBS-g-MA tartalmú keveréket vizsgálok meg, ezáltal pontosan bemutatható lesz a keverékek fröccsöntés utáni morfológiai szerkezetének változása.

A szétválasztáshoz kapcsolódó irodalomkutatás során azt tapasztaltam, hogy a darált műanyag hulladékok szétválasztására többféle eljárás is létezik, amelyekkel eredményesen és jó hatásfokkal szétválaszthatóak frakciókra a vegyes műanyag hulladékok [31, 37, 38, 39]. Azonban nem találok olyan publikációval, amely megoldást kínált volna az előzetesen ömledékállapotban előállított blendék szétválasztására, valamint olyan kutatást sem találtam, ahol a SEBS-g-MA-val vagy SEBS-sel kompatibilizált HDPE/PS keverék szétválasztásával foglalkoztak volna.

A kutatásom célja két egymással összeférhetetlen polimer, a PS és a HDPE keverékének vizsgálata különböző maleinsav anhidriddel ojtott sztirol-etilén-butadién-sztirol kopolimer (SEBS-g-MA) kompatibilizálószer tartalom estén, és megkísérelni a kompatibilizált keverékeket ismételt szétválasztani tiszta frakciókra. A kísérlet során vizsgálni fogom az ikercsigás extruderrel előállított keverékből fröccsöntött anyagok

morfológiai szerkezetét és mechanikai tulajdonságait. Mechanikai tulajdonságok vizsgálatára szakító- illetve ütővizsgálatokat végzem el a különböző SEBS-g-MA tartalmú fröccsöntött próbatesteken. Továbbá vizsgálom a PS/HDPE keverék szétválaszthatóságát 4 tf% maleinsav anhidriddel ojtott nagysűrűségű polietilén (HDPE-g-MA) esetén és maleinsav anhidriddel ojtott polipropilén (PP-g-MA) esetén. A keverékek szétválasztáshoz egy sűrűségkülönbség elvén működő ömledékszétválasztó centrifugát használok.

A mérési eredmények ismeretében összefüggéseket keresek a kialakult morfológia és a mechanikai vizsgálatok eredményei közt, hogy a keverék szerkezete és a növekvő kompatibilizálószer tartalom hogyan befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat, valamint a SEBS-g-MA tartalom mennyire befolyásolja a kialakult struktúrát. Megpróbálom megállapítani a SEBS-g-MA optimális mennyiségét, ahol a PS/HDPE keverék a legjobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik.

A TDK dolgozat célja ezzel párhuzamosan egy olyan alternatív módszer kidolgozása, amellyel gyors és egyértelmű válasz adható a kompatibilizálószer megfelelőségére a kiválasztott keverékek esetén. Jelen kutatásban három különböző kompatibilizálószer kapcsolóhatását vizsgálom az ömledékállapotú PS/HDPE keverékek centrifugális erőterben történő szétválasztása során. A korábbi kutatások eredményei rámutattak, hogy a SEBS-g-MA hatékony kompatibilizálószer PS/HDPE keverékek esetén, ezért kis lépésközlőként növelve az adalékanyag mennyiségét vizsgálni fogom, hogyan befolyásolja a szétválaszthatóságot. Ha kompatibilizálószer meggátolja a szétválasztást, akkor az a vizsgált keverékhez megfelelő. A szétválasztási eredményeket összehasonlítom az elektronmikroszkópos-, reológiai- és mechanikai vizsgálatok eredményeivel, és vizsgálom a különböző kiértékelési módszerek hatékonyságát. Ha az eredmények között jelentős összefüggést találok, akkor az ömledékcentrifugával elvégzett szétválasztási eljárás alkalmas lehet a kompatibilizálószer minősítésére. A kutatásomnak e része hiánypótlónak számít, mert korábban nem végeztek ehhez hasonló vizsgálatokat, ezért a TDK dolgozatom eredményei a berendezés és a technológia fejlesztéséhez hozzájárulhatnak, valamint a további kutatások irányát is meghatározhatja.

3. Kutatási rész

3.1. A kutatás során felhasznált anyagok

A PS/HDPE hőre lágyuló polimer keverékek előállításához az Unipetrol által előállított LITEN MB 87 típusú nagy sűrűségű polietilént használtam, amelynek sűrűsége $0,955 \text{ g/cm}^3$ és mért MVR értéke $85,18 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$. A keverékek másik fő komponense az Edistir N 1840 típusú PS, amelynek sűrűsége $1,05 \text{ g/cm}^3$ és mért MVR értéke $51,92 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$. Az MVR értékek alapján megállapítható, hogy a HDPE és a PS is kiváló folyóképességgel rendelkezik. A PS/HDPE keverékhez változó mennyiségben maleinsav anhidriddel ojtott FG1901X típusú ($0,91 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű) sztirol-etilén-butadién-sztirol kopolimert (SEBS-g-MA) adtam, amelyet a Kraton Polymers gyárt. A SEBS-g-MA tartalom függvényében 9 különböző összetételű keveréket állítottam elő, amelyekben a PS és HDPE mindig azonos térfogat arányban volt jelen (4. táblázat). A SEBS-g-MA mellett további két reaktív kompatibilizálószer esetén vizsgáltam a PS/HDPE keverékek szétválaszthatóságát. Az egyik az Arkema által előállított Orevac CA100 típusú ($0,905 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű) maleinsav anhidriddel ojtott polipropilén (PP-g-MA), míg a másik a DuPont Fusabond E100 típusú ($0,954 \text{ g/cm}^3$ sűrűségű) maleinsav anhidriddel ojtott nagy sűrűségű polietilén (HDPE-g-MA), amelyeket a keverékek 4 tf%-ban tartalmaztak (5. táblázat).

	HDPE [tf%]	PS [tf%]	SEBS-g-MA [tf%]
1.	50	50	0
2.	49,9375	49,9375	0,125
3.	49,875	49,875	0,25
4.	49,75	49,75	0,5
5.	49,5	49,5	1
6.	49	49	2
7.	48	48	4
8.	47	47	6
9.	45	45	10

4. táblázat: Az extruderrel előállított PS/HDPE/SEBS-g-MA keverékek összetételei

A felhasznált anyagok gyártói adatlapjai a mellékletben megtalálhatók (M-I-től M-V-ig). Ezeken kívül, még a keverékek komponenseinek a pontos tömegét tartalmazó táblázat is látható a mellékletben (M-VI., illetve M-VII. ábra).

	HDPE [tf%]	PS [tf%]	HDPE-g-MA [tf%]	PP-g-MA [tf%]
10.	48	48	4	0
11.	48	48	0	4

5. táblázat: Az extruderrel előállított PS/HDPE/HDPE-g-MA és PS/HDPE/PP-g-MA keverékek a szétválasztási vizsgálatokhoz

3.2. A vizsgálatokhoz felhasznált berendezések

A keverékek előállítását Labtech gyártmányú extruder gyártósoron hajtottam végre, melynek főbb részei: Labtech scientific LTE 26-44 típusú moduláris ikercsigás extruder, Labtech automata vízszint-szabályozású hűtőkád, Labtech LZ-120/VS típusú granuláló berendezés (22. ábra). Az extruder csigáinak L/D aránya 40, az átmérőjük 26 mm.



22. ábra: Labtech extrudálósor: (a) extruder, (b) hűtőkád, (c) granuláló készülék

A beállított hőmérsékleti paraméterek az 6. táblázatban találhatóak. Az extruder csigájának fordulatszámát 75 1/min értékre, az adagoló csiga fordulatszámát pedig 40 1/min-re állítottam be. A gyártás indítása után szerszámból kilépő ömledék a vizes hűtőkádban granulálási hőmérsékletre hűlt, ahonnan a granuláló berendezésbe került. A granulálási méretet 3 mm-re, az előtolás értékét 120 m/min-re állítottam be. Megfigyelhető volt a gyártás során, hogy a SEBS-g-MA tartalom növekedésével javult a feldolgozhatóság.

Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11
(Garat)										(Szerszám)
230°C	230°	235°	235°C	240°	240°	245°	245°	250°C	250°	255°C

6. táblázat: Az egyes zónák hőmérsékletei az extruderhenger mentén

A laborban található Arburg Allrounder Advance 370S 700-290 típusú fröccsöntő géppel (23. ábra) a kész granulátumokból a mechanikai vizsgálatokhoz szükséges szabványos próbatestek készültek. A granulátumok fröccsöntés előtt 60°C-on 2 órán keresztül száradtak a levegőcirkulációs szárítószekrényben (24. ábra) a feldolgozás során, a granulátumok felületén megtapadt nedvesség eltávolítása érdekében. A beállított gyártási paramétereket az 7. táblázat tartalmazza. A gépen emelkedő hőmérséklet profilt állítottam be, amely 210 °C, 240 °C, 245 °C, 250 °C növekvő zónahőmérsékleteket jelent, a fűvóka hőmérséklete pedig 255 °C volt.



23. ábra: Arburg Allrounder Advance 370S 700-290 típusú fröccsöntő gép



24. ábra: Heraeus UT6 levegőcirkulációs szárítószekrény

Arburg Allrounder Advance 370S 700-290		
Záróerő	[kN]	700
Fröccsöntési sebesség	[cm ³ /s]	30
Átkapcsolási pont	[cm ³]	10-10,5
Utónyomás	[bar]	250
Torlónyomás	[bar]	50
Ciklusidő	[s]	50
Maradékűtési idő	[s]	20
Dekompresszió	[cm ³]	5
Szerszám hőmérséklet	[°C]	40

7. táblázat: A fröccsöntés gyártási paramétere

A keverékek morfológiai szerkezetének vizsgálatát pásztó elektronmikroszkópon (SEM) végeztem el, 15 kV gyorsítófeszültségű üzemben, amely a 25. ábrán látható. A vizsgált mintákat kriogén töréssel készítettem el. A töretfelületeket arany-palládium bevonattal láttam el, hogy megfelelő elektromos tulajdonságokkal rendelkezzenek (26. ábra). A művelet 45 másodpercig tartott, miközben a készülék argon gázzal öblítette a mintákat. A fröccsöntésre jellemző mag-héj szerkezet miatt a minták külső héj részét, a belső mag területét, és a kettő közötti átmeneti területet is külön-külön megvizsgáltam minden összetétel esetében.



25. ábra: JEOL JSM 6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóp



26. ábra: Aranyozó berendezés

A fröccsöntött szabványos méretű próbatestek szakítóvizsgálatát a Zwick Z020 típusú univerzális szakítógépen hajtottam végre (27.(a) ábra). A mérések során befogók közötti távolság 100 mm volt, a szakítási sebesség, pedig 20 mm/min. Összetételenként három próbatesten végeztem el a méréseket, a minták nagyon kicsi szórása miatt.

Az ütésvizsgálatokat Ceast Resil Impactor Junior típusú számítógép vezérlésű ütőmű (27.(b) ábra) segítségével az ISO 179 szabvány szerint végeztem el. A hornyolatlan 80x10x4 mm méretű szabványos próbatesteket a 62 mm alátámasztási távolságú mintatartóra kellett helyezni. A mérés során 15 J-os kalapácsot használtam, amelynek ütési sebessége 3,4 m/s, a bejárési útja pedig 150°. Minden összetétel estén 6 mintát vizsgáltam.



(a)



(b)

27. ábra: (a) Zwick Z020 típusú univerzális szakítógép, (b) Ceast Resil Impactor Junior típusú számítógép vezérlésű ütőmű DAS 8000 adatgyűjtővel

A dolgozatban vizsgáltam a keverékek reológiai tulajdonságait két különböző eljárással. Mértém a CEA 7027.000 típusú számítógép-vezérlésű kapilláris plasztométerrel a blendek és az alapanyagok folyókéességét (28.(a) ábra). A mérés során az extrudátum mérésére CAS MWP-1500 típusú mérleget használtam (28.(b) ábra). A kutatás során minden esetben ezt a mérleget használtam tömegmérésre. A különböző összetételek viszkozitását 255°C-on TA AR2000 típusú rotációs reométerrel határoztam meg a 0-100 1/s nyírósebesség tartományban lineárisan növelt nyírósebesség mellett (28.(c) ábra).



(a)



(b)



(c)

28. ábra: (a) CEA 7027.000 típusú számítógép-vezérlésű kapilláris plasztométer, (b) CAS MWP-1500 típusú mérleg, (c) TA AR2000 típusú rotációs reométer

A PS/HDPE/SEBS-g-MA keverékek morfológiai- és mechanikai vizsgálatai mellett a TDK dolgozat másik fő témája a keverékek szétválasztása. A keverékeket granulátum formájában helyeztem az ömledékcentrifuga tartályaiba, összetételenként 45 grammot. A blendeket 60 percen keresztül 320°C-on tartottam hőn egy Nabertherm típusú kemencében (29. ábra), amelyben a hőtartási idő leteltével a szétválasztó berendezést 20 percig forgattam elektromos meghajtással 2900 1/min fordulatszámon a keverékek szétválasztásának érdekében. Az 60 perc letelte után a hőmérséklet változtatása nélkül 20 percen keresztül elektromos hajtással 2900 1/min fordulatszámon forgattam a berendezést a megömlött keverék szétválasztásának érdekében. Az alakrögzítés a forgatás fenntartása mellett, szobahőmérsékleten történt. Az ömledékcentrifugáról a melléklet M-VIII. ábráján egy nagyméretű fénykép látható.

A szétválasztás eredményességét optikai mikroszkóppal ellenőriztem (30. ábra). A vizsgálatok előtt a minták felületét Struers típusú polírozógéppel 320-as, 1000-es, 2000-es és 4000-es finomságú csiszolópapírokon políroztam.



29. ábra: Nabertherm típusú kemence



30. ábra: Olympus BX51 optikai mikroszkóp

3.3. Az ömledékcentrifuga működési elve

A centrifugálás egy olyan mechanikai folyamat, amely egy keverék komponenseit a centrifugális erőter segítségével szétválasztja a részecskék mérete és/vagy sűrűsége alapján. Napjainkban a tudomány és ipar számos területén alkalmaznak centrifugákat, mint például energiaipar, gyógyszeripar, élelmiszeripar, textilipar, ásványfeldolgozó-ipar és orvostechika [41]. Három fő felhasználási területe [42]:

- Folyadékokban diszpergált szilárd anyagok eltávolítása (kinyerés)
- Nedves állapotú szilárd anyag mellől a folyadék eltávolítása (víztelenítés)
- Nem elegyedő folyadékok szétválasztása (emulzióbontás)

Centrifugális erőteret egy tengely körül forgó rendszerrel lehet előállítani, amelyben a részecskékre centrifugális- (3.1), Coriolis (3.2)- és Euler-erő hat. Mivel a centrifugális erőter nagysága több százszor, esetleg több ezerszer nagyobb a gravitációs erőtérhez képest, ezért az utóbbi elhanyagolható [36].

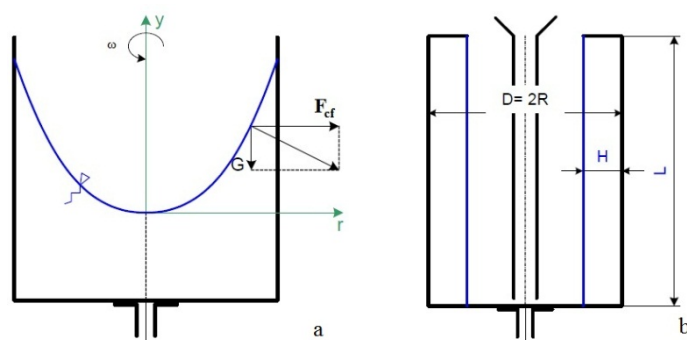
$$F_{cf} = m \cdot r \cdot \omega^2 = \rho_a \cdot V_a \cdot r(2\pi \cdot n_c \cdot 60)^2 \quad (3.1)$$

ahol F_{cf} a centrifugális erő, ρ_a a részecske sűrűsége, V_a a részecske térfogata, n_c a centrifuga percenként fordulatszáma.

$$F_c = 2m \cdot v \cdot \omega = 2\rho_a \cdot V_a \cdot v \cdot \omega \quad (3.2)$$

ahol v a részecske kerületi sebessége.

Függőleges tengely körüli állandó szögsebességű forgás esetén centrifugális erőterben a folyadék felszíne egy forgási paraboloiddá alakul (31.(a) ábra), ahol a potenciális energia mennyisége mindenhol azonos. A függőleges tengelyű centrifugák magas fordulatszáma esetén, az eredő térerő vektor vízszintes összetevője többszöröse a függőleges komponensének. Vagyis a fordulatszám növekedésével a paraboloid felület elfajul, ha csak néhányszor nagyobb a vízszintes komponens. A fordulatszám további növekedésével a folyadék felszíne koaxiális hengerpalásttá változik (31.(b) ábra) [42].

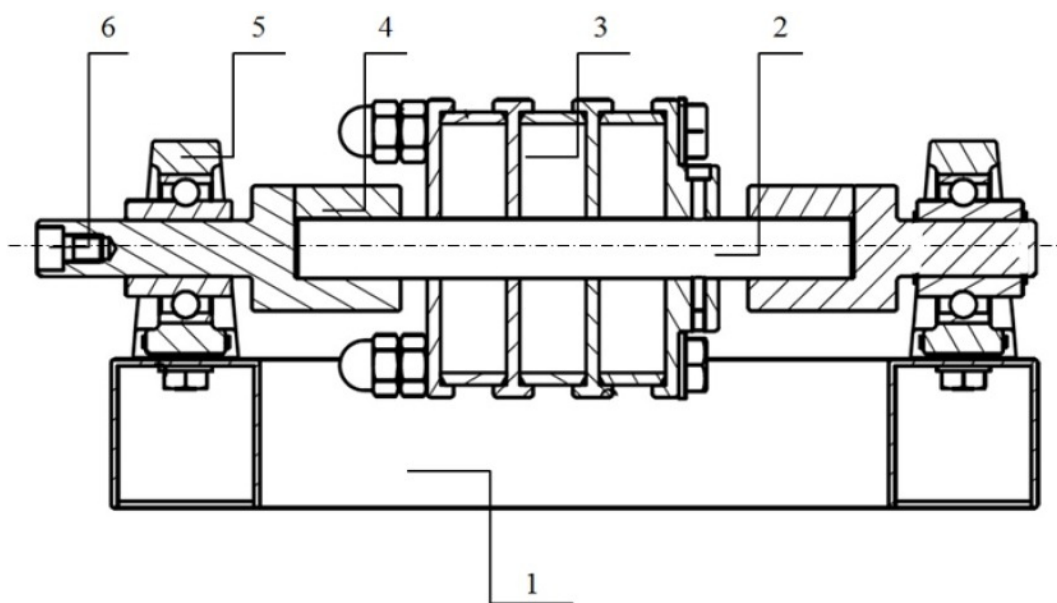


31. ábra: (a) forgás paraboloid folyadék felszín, (b) koaxiális henger [42]

A centrifugákat leggyakrabban 3 szempont szerint csoportosítják, mégpedig a működés, kivitel és a centrifugálandó közeg halmazállapota alapján. Működésük alapján lehetnek folyamatos- vagy szakaszos üzeműek az adagolástól és az elvezetéstől függően. A kivitel szempontjából lehetnek perforáltak, vagy nem perforáltak. Ha centrifugálandó anyagok fázisai szerint történik a csoportosítás, akkor megkülönböztetünk gáz-gáz, folyadék-szilárd, folyadék-folyadék szerinti szétválasztást. Ezenkívül csoportosíthatók még a tengely helyzete alapján is, vízszintes illetve függőleges tengelyű centrifugákra [42].

A kutatás során felhasznált tanszéki fejlesztésű ömledékcentrifuga szakaszos üzemű, perforálatlan dobbal rendelkező, és alkalmas folyadék-folyadék, illetve szilárd-folyadék halmazállapotú anyagok szétválasztására. A vízszintes tengelyű berendezés működése közben fellépő erők közül az Euler-erő elhanyagolható, mivel állandó fordulatszámon üzemel, így nincs szöggyorsulás. Vagyis a vizsgált, részben, vagy már teljesen ömledékállapotba került anyagok szétválasztása a centrifugális erő és a Coriolis-erő hatására valósul meg. A berendezés az olvadási hőmérséklet szerinti- valamint a sűrűségkülönbség alapján történő szétválasztás elvén működik, ugyanis a tartályba betöltött keveréket ömledékállapotba kell hozni, majd ezután centrifugális erőterben a blend komponenseinek sűrűségkülönbsége miatt szétválasztható a keverék. A szétválasztás eredményességét az anyagok közötti sűrűségkülönbség, a hőmérséklet, az ömledékcspepek mérete és a centrifuga fordulatszáma befolyásolja [43].

A PS/HDPE/SEBS-g-MA, PS/HDPE/PP-g-MA és PS/HDPE/HDPE-g-MA keverékek szétválasztásához használt ömledékcentrifuga (32. ábra). A polimer keverékek szétválasztása mellett a berendezés alkalmas lehet kompatibilizáció hatásának vizsgálatára is, minősítve a kompatibilizálószer hatékonyságát a vizsgált keverékben. [43].

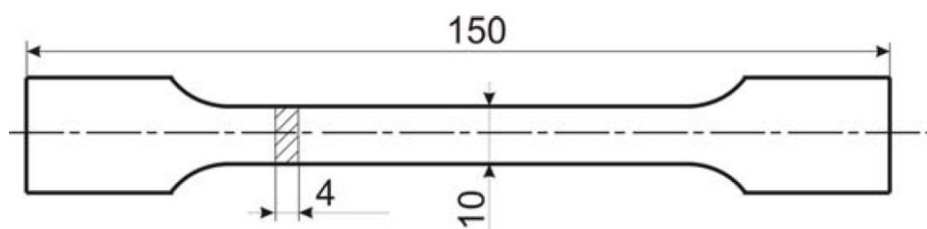


32. ábra: Szétválasztó ömledékcentrifuga főbb részei: (1) hegesztett állvány, (2) tengely, (3) három szétválasztóhenger, (4) tengelykapcsoló, (5) hőálló csapágy és csapágyház, (6) kapcsolódás elektromos meghajtáshoz [34]

3.4. Mérési eljárások

3.4.1. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatokat az MSZ EN ISO 527:1999-es szabvány szerint végeztem el. A vizsgálat során a szabványos méretű egyik végéről fröccsöntött próbatestet a két végénél befogva, állandó paraméterek (20 mm/perc szakítási sebesség, 100 mm befogók közötti távolság) és egytengelyű húzó igénybevétel mellett szakítottam el szakítógép segítségével. Mindeközben a számítógép által rögzítve lettek a mért erő, és hosszváltozás (elmozdulás) adatok. Hőre lágyuló anyagok estében a 33. ábra szemlélteti a szabványos geometriájú próbatestet.



33. ábra: Hőre lágyuló polimerek szabványos próbateste szakításhoz és hajlításhoz [44]

A szakítóvizsgálat eredményeként kapott erő-nyúlás (F - Δl) értékeket átparamétereztem feszültség - relatív nyúlás értékekké. Továbbá meghatároztam a húzószilárdság, és húzó rugalmassági modulus értékeit, amelyekhez felhasználtam a kezdeti keresztmetszetek méreteit. A mechanikai mennyiségek meghatározásához szükséges összefüggések (3.3), (3.4):

$$\sigma_M = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad (3.3)$$

ahol σ_M a húzószilárdság, F_{max} a maximális erő, a és b pedig a kezdeti keresztmetszeti értékek.

$$E_{húz} = \frac{\Delta \sigma_M}{\Delta \varepsilon} \quad (3.4)$$

ahol $E_{húz}$ a húzó rugalmassági modulus, σ_M a húzószilárdság változás, illetve $\Delta \varepsilon$ a 0,05 % és 0,25 % relatív nyúlás értékekből meghatározott nyúlásváltozás.

3.4.2. Hornyolatlan ütővizsgálat

Az ütővizsgálatokat az ISO 179 szabvány szerint, a fröccsöntött, piskóta alakú próbatestek két végének levágásával elkészített, 80x10x4 mm méretekkkel rendelkező

szabványos próbatesteken végeztem el. A vizsgálat eredményeiből következtethettem az adott összetételű próbatestek dinamikus igénybevétellel szembeni ellenállására, ugyanis a mérés során az elnyelt energia nagyságát mértem. A mérés során minden minta keresztmetszetét tolómérővel mértem, valamint az egyes mérések előtt az üres járási energia mérését is elvégeztem, az eredmények pontos kiértékeléshez. Az ütőszilárdság értékeit a (3.9) összefüggéssel számoltam.

$$\sigma_{\text{ütő}} = \frac{E_{\text{átl}}}{a \cdot b} \quad (3.9)$$

ahol $E_{\text{átl}}$ a mért ütüenergia eredmények számtani átlaga az üresjárási energia levonásával, az a illetve a b keresztmetszeti méretek.

4. Kutatási eredmények

4.1. Reológiai vizsgálatok

4.1.1. MFI mérés eredményei

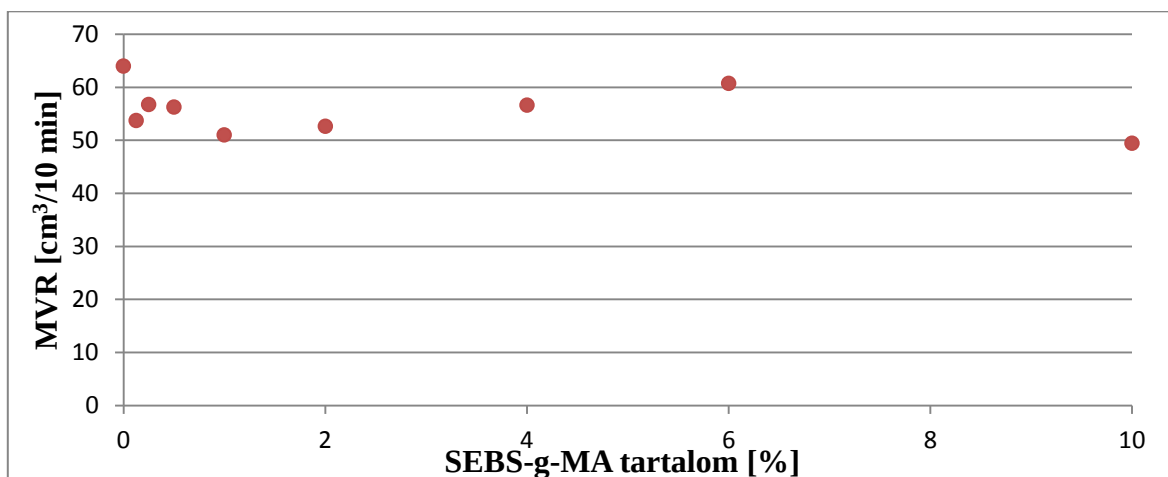
A mérés során a különböző összetételű keverékek folyóképességének mérése mellett mértem az alapanyagokét is, amelyek referenciaként szolgáltak (8. táblázat). Minden esetben 260°C-on, 2,16 kg-os terheléssel végeztem el a méréseket, amelyek során azt tapasztaltam, hogy a legnagyobb MVR értéke a PP-g-MA adalékanyag volt.

Alapanyagok	HDPE	PS	SEBS-g-MA	PP-g-MA	HDPE-g-MA
MVR [cm ³ /10 min]	85,2	51,9	33,1	190	72,8

8. táblázat: Az alapanyagok mért MVR értékei, 260°C-on és 2,16 kg terhelés esetén

A keverékek mért MVR eredményeiből megfigyelhető, hogy a SEBS-g-MA megjelenésével és mennyiségének növekedésével az MVR érték csökken a kompatibilizálatlan összetételhez képest. Ez nem magyarázható a kompatibilizálószer fizikai jelenlétével, ugyanis magas MVR értékkel rendelkezik, ezért valószínűleg az adalékanyag kompatibilizáló hatásának következménye a folyóképesség csökkenése. Azonban a SEBS-g-MA tartalom további növekedésével javul az összetételek a folyóképessége, amely azzal magyarázható, hogy egyszerre két hatás érvényesül: egyrészt a SEBS-g-MA kötések hoz létre a fázisokkal, amelyek a hosszabb molekulaláncok miatt növelnék a keverék viszkozitását, másrészt viszont a SEBS-g-MA nagy folyóképessége is egyre dominánsabb a keverékben (34. ábra). A kompatibilizálószer változtatja a keverékek morfológiáját is, ezért

feltételezhetően ez is befolyásolja a folyókéesség változását. Valószínűleg ez magyarázata, hogy 10 tf% SEBS-g-MA csökkentette az MVR értéket, vélhetően azért, mert itt alakul ki a leghomogénebb szerkezet a keverékben. Az eredményekből megfigyelhető az is, hogy a HDPE/PS keverék MVR értéke az alapanyagok értékeinek közel átlaga, a keveredési szabálynak megfelelően. A melléklet M-IX. ábrája tartalmazza a mért MVR és kiszámított MFI értékeket.

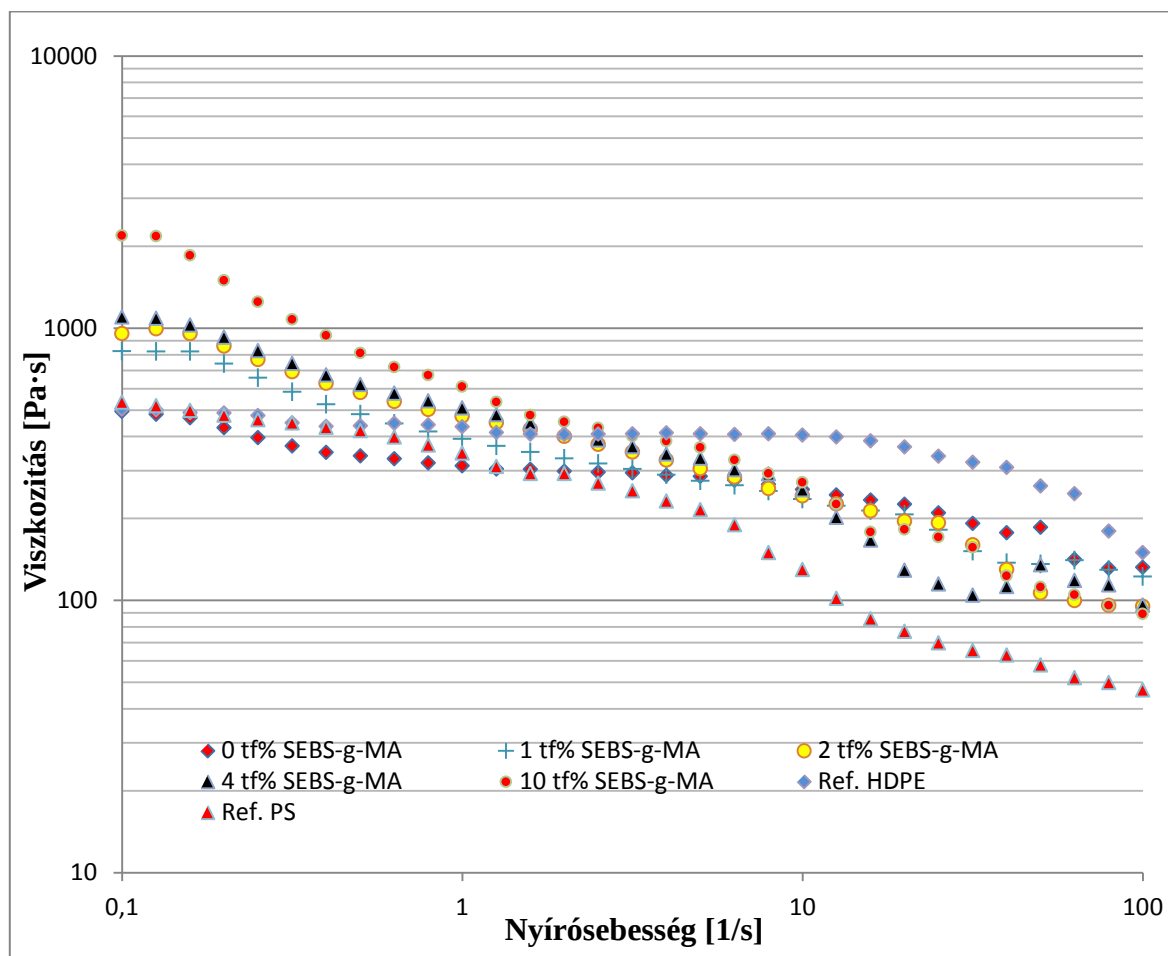


34. ábra: A HDPE/PS keverékek MVR értékei

4.1.2. Viskozitás vizsgálat eredményei

A 35. ábra szemlélteti a HDPE/PS keverékek, a PS és a HDPE viszkozitás-nyírófeszültség diagramját. A vizsgálat eredményeként kapott viszkozitás görbék közül a trendbe illeszkedő és az átláthatóságot zavaró görbéket nem ábrázoltam. A diagramon látható, hogy a kompatibilizálatlan PS/HDPE keverék rendelkezik a legkisebb viszkozitással. A SEBS-g-MA hozzáadásával és mennyiségének növelésével a viszkozitás párhuzamosan növekedett. Kis nyírósebességi tartományban a kompatibilizált keverékek egyre nagyobb viszkozitással jellemezhetők, amely a SEBS-g-MA kompatibilizáló hatására utal. A diagramon jól látható, hogy a 0,1 1/s nyírósebességnél a kompatibilizálatlan összetétel viszkozitása közel 540 Pas. A kompatibilizálás eredményként 2 tf% SEBS-g-MA tartalomnál a viszkozitás 957 Pas, míg 10 tf%-nál majdnem a kompatibilizálatlan blend viszkozitásának négyszerese, 2192 Pas a mért viszkozitás. Ez azzal magyarázható, hogy a kompatibilizálószer kapcsolódásokat alakít ki a keveréket alkotó PS és HDPE molekuláláncaival, és a kapcsolódások hatására nő a viszkozitás is. Nagyobb nyírósebességek esetén a mért viszkozítási eredmények nem mutatnak jelentős eltérést. Ez arra utal, hogy a kompatibilizáló

hatás csak kis nyírósebességek mellett mutatható ki, nagy nyírások mellett hatása már nem érvényesül.

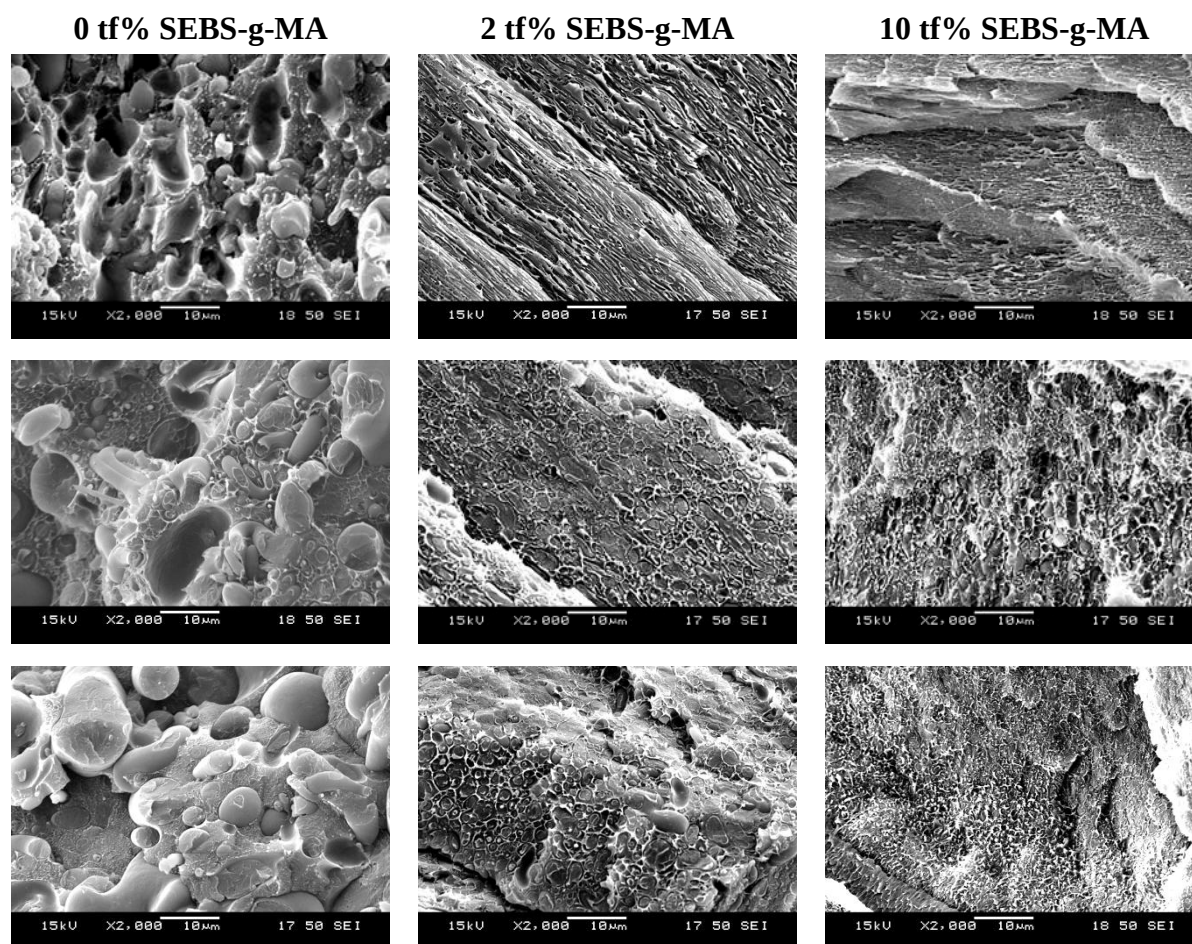


35. ábra: A HDPE/PS keverékek viszkozitás-nyírósebesség diagramja

4.2. A PS/HDPE keverékek morfológiai vizsgálata

A morfológiai vizsgálat során mindegyik összetétel SEM felvételét elkészítettem a kriogén töretfelületek héj, illetve mag részén, valamint a kettő közötti átmeneti zónában annak érdekében, hogy megfigyelhető legyen a kompatibilizálószer hatása egy összetételen belül, illetve a különböző arányú keveréknél. 36. ábrán látható, hogy a HDPE/PS kompatibilizálatlan keverék a mátrixban elosztatott diszpergált szerkezettel rendelkezik, amelyben a diszpergált részek mérete viszonylag szabályos és nagyméretű (4-10 μm). Ez leginkább a mag részén készült felvételen látható, ahol az elosztatott fázisok formája gömb alakú. Megfigyelhető a diszpergált részek nyúlása már az átmeneti zónában is, de a legjobban a héj területén érzékelhető, ugyanakkor a teljes keresztmetszetre jellemző, hogy a törés a HDPE és a PS fázisok határfelületén halad végig, ami a fázisok között gyenge adhézióra utal.

A SEBS-g-MA tartalom növekedésével 2 tf%-nál az elosztatott fázisok mérete csökken, ezáltal finomabbá válik a morfológia. Ebben az esetben a törés nem a határfelületen, hanem az elosztatott fázison keresztülhalad, ami a SEBS-g-MA kapcsolódást javító hatásának tulajdonítható. A mag részhez képest az átmeneti zónában kis mértékben megnyúltak a diszpergált részek, míg a héj területén a jelentős nyúlás következtében lemezes szerkezet alakult ki. A SEBS-g-MA arányának további növekedésével az elosztatott fázis mérete tovább csökken, vagyis homogénebbé vált a szerkezet. A fröccsöntésre jellemző mag-héj szerkezet még 10 tf% SEBS-g-MA tartalom esetén is megmarad, azonban a héj területén kialakuló lemezes szerkezet finomabbá vált. A kapott morfológiai eredmények megegyeznek az irodalomban található adatokkal [23-25]. A különböző összetételek SEM felvételei megtalálhatóak a melléklet M-X – M-XII. ábráin.

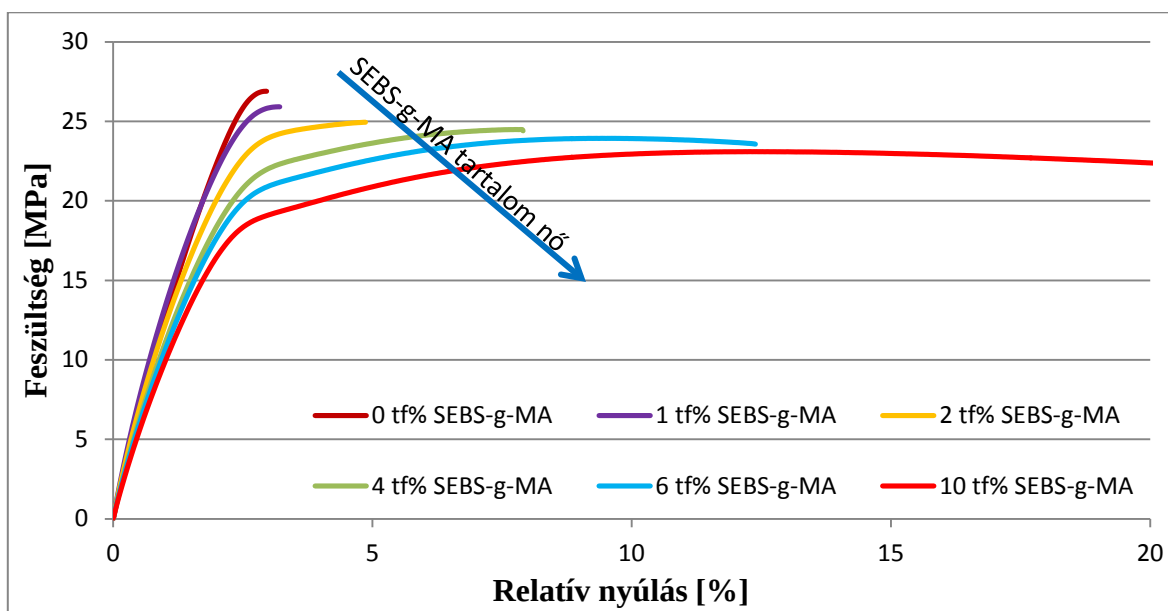


36. ábra: HDPE/PS keverékek SEM felvételei a töretfelület: héj részén (felsősor), átmeneti zónájában (középsősor), mag területén (alsósor)

4.3. Mechanikai vizsgálatok

4.3.1. Szakítóvizsgálat

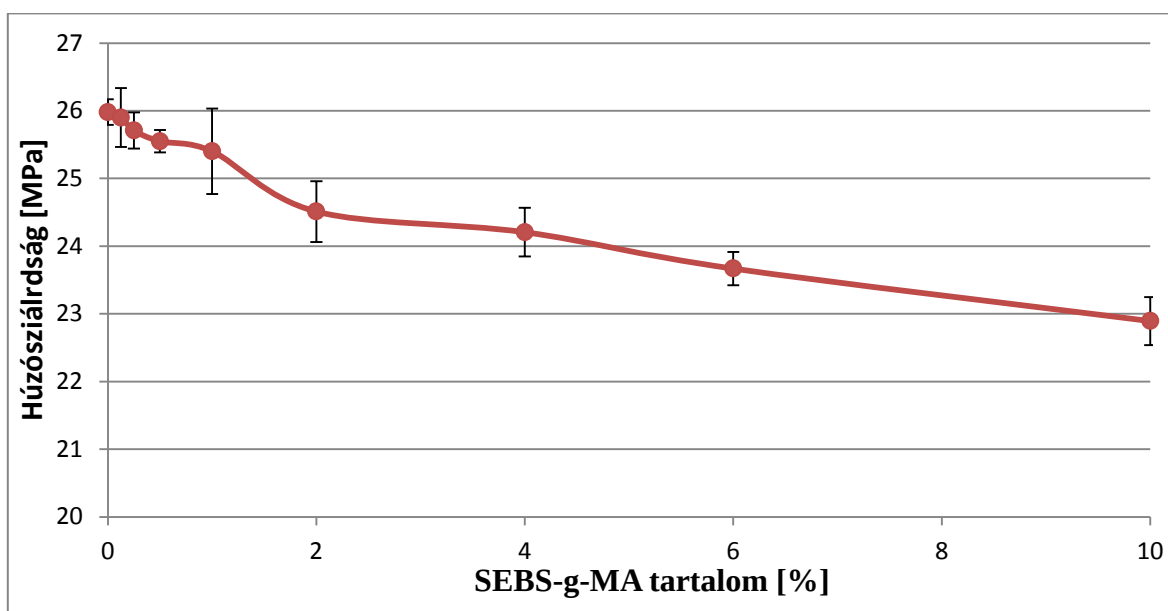
A 37. ábra szemlélteti a HDPE/PS keverékek feszültség-relatív nyúlás diagramját. A vizsgálat eredményeként kapott szakítógörbék között egy összetételen belül csak minimális eltérés mutatkozott, ezért az átlátható ábrázolás érdekében összetételenként 1-1 jellemző görbét helyeztem a diagramra. A kompatibilizálatlan és a kis adalékanyag tartalmú keverékek görbéi alapján jól látható, hogy hasonlóan viselkedtek 1 tf% SEBS-g-MA tartalomig. Ebben a tartományban a keverékeket rideg viselkedés, magas maximális erő, valamint kicsi szakadási nyúlás értékek jellemzik. 2 tf%-nál a szakítógörbe karakterisztikájában az előzőekhez képest változás figyelhető meg, ugyanis kis mértékben csökken a maximális erő, és növekszik a szakadási nyúlás értéke. Jelentős változás 4 tf% SEBS-g-MA tartalomnál látható, ahol a maximális erő csökkenése mellett, a szakadási nyúlás értéke megduplázódott az előző összetétel értékeihez képest. SEBS-g-MA arányának további növekedésével HDPE/PS keverék szívóssága tovább javult, ugyanis 10 tf%-nál a szakadási nyúlás értéke meghaladta a 20%-ot. Tehát a szakítógörbék karakterisztikája alapján összegzősként megállapítható, hogy a SEBS-g-MA tartalom növekedésével a HDPE/PS blendek szívósabb viselkedést mutattak.



37. ábra: HDPE/PS keverékek feszültség-relatív nyúlás diagramja

A szakítóvizsgálat eredményeiből a mechanikai jellemzők közül a húzó rugalmassági modulust, illetve húzószilárdságot a határoztam meg, és ábrázoltam diagramon. A 38. ábrán látható, hogy a PS/HDPE kompatibilizálatlan összetétel rendelkezik a legnagyobb

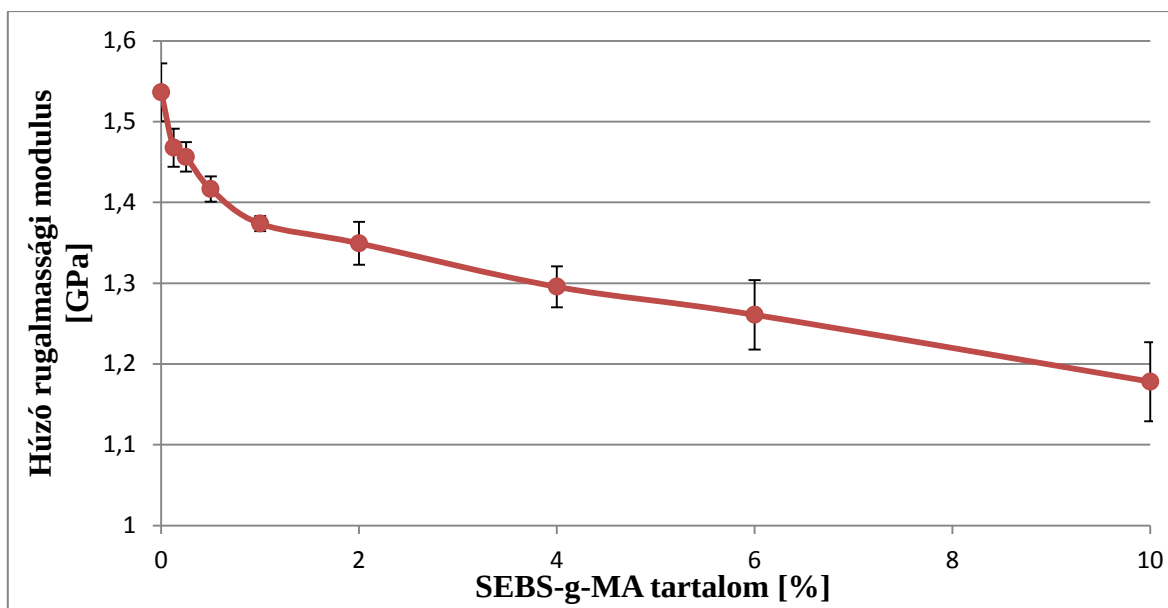
húzószilárdság értékkel, amelyhez képest 1 tf% SEBS-g-MA tartalomig alig 3%-os csökkenést tapasztaltam az eredmények kiértékelésekor. Azonban 1 tf% felett már jelentős csökkenés figyelhető meg a húzószilárdsági értékekben, amely a SEBS-g-MA tartalom növekedésével tovább folytatódik. Ebből adódóan 10 tf% SEBS-g-MA tartalomnál mértem a legkisebb húzószilárdságot, ami 22,89 MPa volt. Ez nem meglepő, hiszen az adalékanyag tartalom növekedésével a blendék szívósabb viselkedést mutattak a szakítóvizsgálat során. Összevetve a kompatibilizálatlan keverék 25,98 MPa-os értékét a 10 tf% SEBS-g-MA-t tartalmazó összetétel 22,89 MPa-os értékével megállapítható, hogy a kompatibilizálás hatására közel 12%-os csökkenés történt, ami jelentősnek mondható. Összegezve megállapítható, hogy a húzószilárdsági eredmények összhangban vannak az irodalomban található eredményekkel [23, 24].



38. ábra: HDPE/PS keverékek húzószilárdsága a SEBS-g-MA tartalom függvényében

A szakítóvizsgálat eredményeiből meghatározott húzó rugalmassági modulus értékei a 39. ábrán lévő diagramon láthatók. Az eredmények kiértékelésekor azt tapasztaltam, hogy a legnagyobb húzó rugalmassági modulusa a kompatibilizálatlan blendnek van. A kompatibilizálószer hozzáadásával és mennyiségének növelésével csökkent a húzó rugalmassági modulus a kompatibilizálatlan keverékhez képest. A csökkenés jelentős, hiszen a kompatibilizálatlan összetétel 1,54 GPa modulus értékéhez képest a 10 tf% SEBS-g-MA tartalmú blend 1,18 GPa értékkel rendelkezik, vagyis az adalékanyag 23%-os csökkenést eredményezett. A csökkenő tendencia feltételezhetően annak köszönhető, hogy a morfológia a kompatibilizálószer tartalom növekedésével finomabbá és homogénebbé válik. A húzó

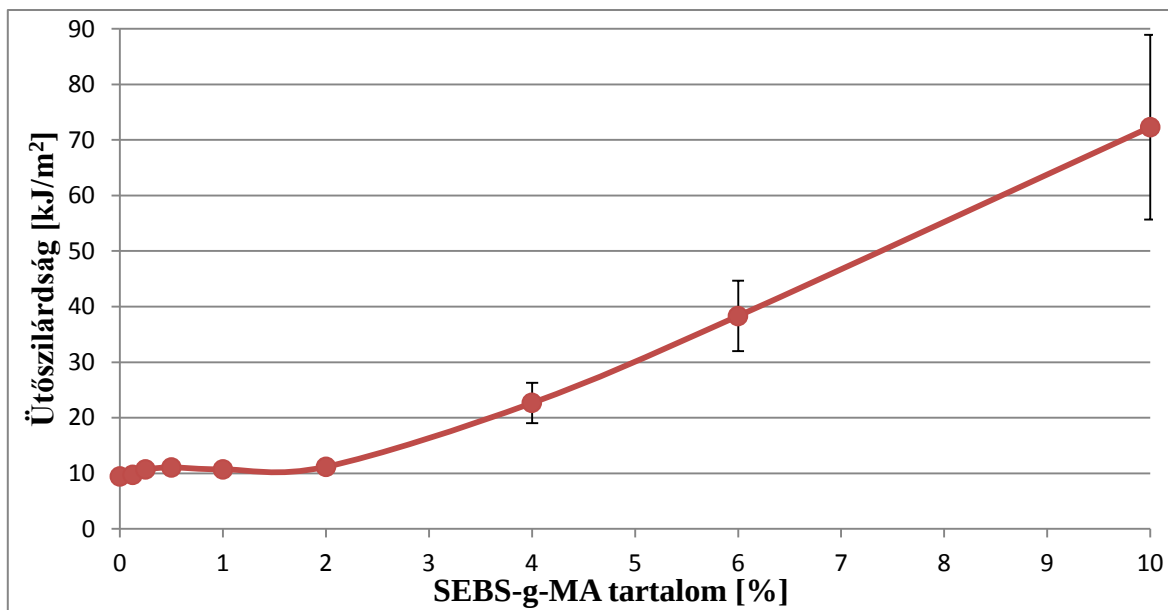
rugalmassági modulus változásának tendenciája és mértéke a kompatibilizálószer tartalom függvényében megegyezik az irodalomkutatásban ismertetett eredményekkel [23, 24].



39. ábra: HDPE/PS keverékek húzó rugalmassági modulusa a SEBS-g-MA tartalom függvényében

4.3.2. Hornyolatlan ütővizsgálat

Az Charpy-féle hornyolatlan ütővizsgálat eredményeinek szemléltetésére a 40. ábra szolgál, amelyen jól látható, hogy az ütőszilárdság a kompatibilizálatlan keverék értékehez képest növekedett a SEBS-g-MA tartalom növekedésével. Azonban a növekedés mértéke 2 tf% kompatibilizálószer tartalomig nem számottevő, viszont 4 tf% SEBS-g-MA tartalomnál a HDPE/PS keverék ütőszilárdsága már a duplájára növekedett, 11,17 kJ/m²-ről 22,66 kJ/m²-re. Az ütőszilárdság ugrásszerű növekedése valószínűleg a morfológia megváltozásával magyarázható. Ugyanis a SEM felvételeken az látható, hogy a 2 tf%-os keverékhez képest 4 tf%-nál homogénebb, finomabb morfológia alakult ki, különösen a héj területén, tehát valószínűsíthető, hogy ennek homogénebb struktúrájának köszönhető az ütőszilárdság emelkedése, valamint a SEBS-g-MA már önmagában is javítja a keverékek ütőszilárdságát, hiszen még a HDPE-nél is jóval szívósabb a butadién részek miatt. A SEBS-g-MA tartalom további növekedésével az ütőszilárdság értéke többszöröződött. 10 tf%-nál 9,42 kJ/m²-ről 72,3 kJ/m²-re nőtt, tehát majdnem nyolcszoros az ütőszilárdság értéke a kompatibilizálatlan keverékhez képest. Az ütővizsgálati eredmények a korábbi kutatások eredményeivel összhangban vannak, ugyanis a SEBS-g-MA tartalom növekedésével hasonló mértékű és tendenciájú növekedést tapasztaltak [23].



40. ábra: A HDPE/PS keverékek ütőszilárdságának változása a SEBS-g-MA tartalom függvényében

A mérések elvégzése során megfigyeltem, hogy a próbatestek törésekor bekövetkező hanghatás kezdetben, kis kompatibilizálószer tartalomnál élesebb volt, míg a SEBS-g-MA arányának növekedésével tompábbá vált.

4.3.3. Összefoglalás

Az alábbiakban a mechanikai vizsgálatok eredményei alapján megpróbálom megállapítani SEBS-g-MA tartalom optimális mennyiségét, amelynél egyes tulajdonságok javultak, miközben más mechanikai jellemzők alig vagy jelentősen csökkentek. Mivel a kompatibilizálás hatására a keverékek szilárdsága és merevsége nem javult, ezért a nagymértékben javuló ütőszilárdság függvényében vizsgáltam az eredményeket.

HPDE/PS/SEBS-g-MA keverékeknél a 40. ábrán látható, hogy az ütőszilárdság változásában ugrásszerű növekedés csak a 4 tf% SEBS-g-MA tartalomtól figyelhető meg. 4 tf% adalék tartalomnál az ütőszilárdság 240%-kal növekedett meg a kezdeti kompatibilizálatlan keverékhez képest, miközben a húzószilárdság nem változott, és a húzó rugalmassági modulus közel 16%-kal csökkent. A kompatibilizálószer tartalom növekedésével 6- illetve 10 tf%-os aránynál a szakítóvizsgálatok eredményeiből meghatározott mechanikai jellemzők a kompatibilizálatlan összetételhez képest általában jelentősen csökkentek, ezért megítélésem szerint a 2- vagy 4 tf%-os SEBS-g-MA tartalom lenne ideális, mivel ekkora mennyiségek hozzáadásával javult az ütőszilárdság és a nyúlás, miközben a húzószilárdság és a húzó rugalmassági modulus kompatibilizálatlan esethez képest általában kismértékben csökkentek. 1- illetve 2 tf% SEBS-g-MA tartalom esetén az

ütőszilárdság csak 13%-kal, illetve közel 18%-kal növekedett. A húzószilárdság 1-2% SEBS-g-MA hatására még nem változott számottevően. Tehát abban az esetben, ha egy nagyobb merevségű és szilárdságú, ugyanakkor ütésálló keverékre lenne szükségem, akkor 1 tf% vagy 2 tf% SEBS-g-MA-t adnék a keverékhez, ha viszont a dinamikus hatásokkal szembeni ellenállás lenne a fontos, akkor 4 tf% SEBS-g-MA-t kevernék a blendbe. Nagy dinamikus igénybevételek esetén megfontolnám, hogy 6, illetve 10 tf% kompatibilizálószer hozzáadását, azonban ezekben az esetekben jelentősen csökkenne a szilárdság és a merevség. Meglátásom szerint a legjobb kompromisszumos választás a HDPE/PS keverék 2-4 tf% SEBS-g-MA tartalommal lenne, ugyanis az ütésilárdság növekedése mellett a kompatibilizálatlan összetételhez képest nem változott a húzószilárdság, valamint a húzó rugalmassági modulus csak kis mértékben csökkent.

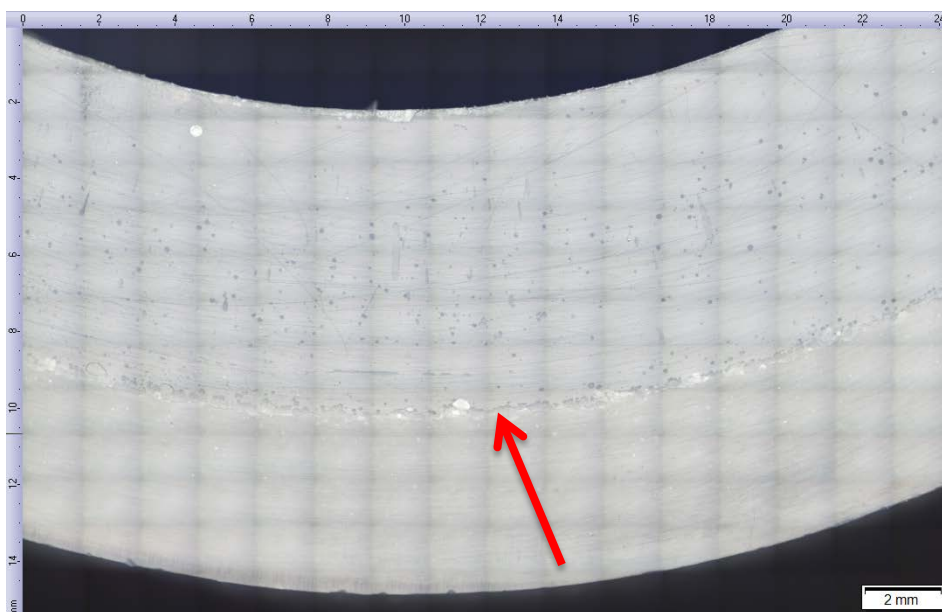
4.4. A kompatibilizálószer minősítése

Az ömledékcentrifugával elvégzett szétválasztható vizsgálatok eredményeinek kiértékelése során vizsgáltam a különböző kompatibilizálószer tartalmú extrúzióval előállított PS/HDPE keverékek szétválaszthatóságát, különös tekintettel az általam javasolt 2-4 tf% SEBS-g-MA-t tartalmazó keverék esetében, ugyanis megítélésem szerint ez a két összetétel rendelkezik összességében a legjobb mechanikai tulajdonságokkal. A kiértékelés során a szétválaszthatóság alapján megállapítható, hogy a kompatibilizálószer által összekapcsolt fázisok közötti kapcsolódás megmarad-e magas hőmérsékleten. Azaz abban az esetben, amikor szétválasztás sikeresnek bizonyult, elmondható, hogy a kompatibilizálószer hatása magas hőmérsékleten nem érvényesült az adott mennyiségben, vagyis a keverékek szétválaszthatósági vizsgálatával együtt elvégezhető a kompatibilizálószer minősítése.

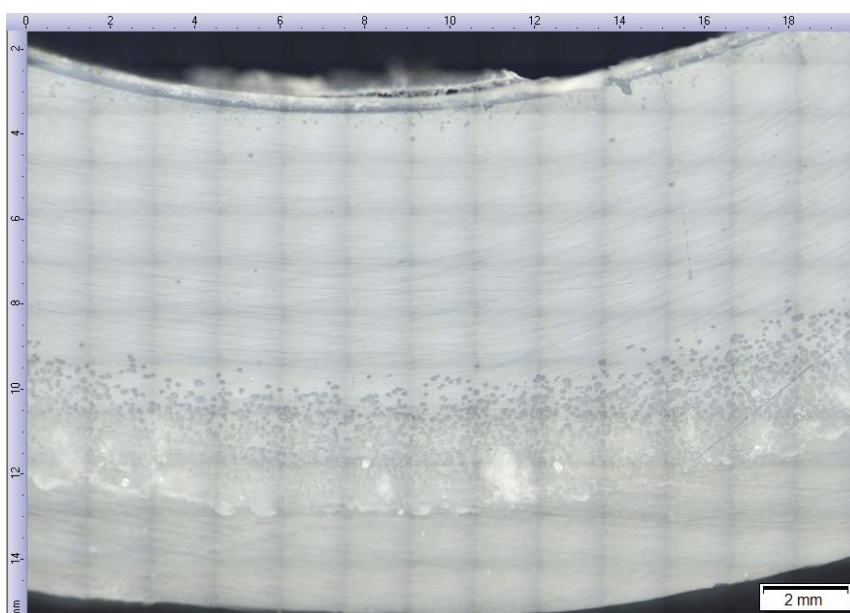
4.4.1. SEBS-g-MA tartalmú keverékek szétválasztása

A szétválasztás eredményeként kapott korong alakú minták kiértékelése során azt tapasztaltam, hogy kompatibilizálatlan esetben és alacsony adalékanyag tartalom esetén a szétválasztás sikeres volt. A PS és a HDPE sűrűség különbségéből adódóan a PS fázis a korong külső, míg a HDPE a belső részén található. A kompatibilizálatlan keveréknél éles szétválást tapasztaltam a homogén fázisok határán, ugyanis az átmeneti zóna vastagsága a fázisok méretéhez képest jelentősen kisebb (41. ábra). A mikroszkópos felvételeken mértem a fázisok és a korong vastagságát, amelyek alapján megállapítható, hogy a kompatibilizálás hatására a keverékek átmeneti zónája a növekszik az adalékanyag növekedésével együtt,

mivel érvényesül a SEBS-g-MA erős kapcsoló hatása. Jól látható a 42. ábrán, hogy a kompatibilizálatlan keverék fázisainak arányához képest már 0,125 tf% SEBS-g-MA jelenlétével az átmeneti zóna jelentősen megnőtt, ugyanis $282 \pm 22 \mu\text{m}$ -ról $2746 \pm 150 \mu\text{m}$ -re nőtt a vastagsága. Érdekes, hogy a PS fázis vastagsága nagyobb mértékben csökkent, mint a HDPE fázisé, ami valószínűleg abból adódik, hogy a SEBS-g-MA a PS-hoz könnyebben kapcsolódik. Ezt jól mutatja az a tény is, hogy a PS fázis és az átmeneti zóna vastagsága közel azonos 0,125 tf%-nál ($5350 \mu\text{m}$), a kompatibilizálatlan keverék PS és átmenti zónájának vastagságával, ami $4835 \mu\text{m}$ volt.

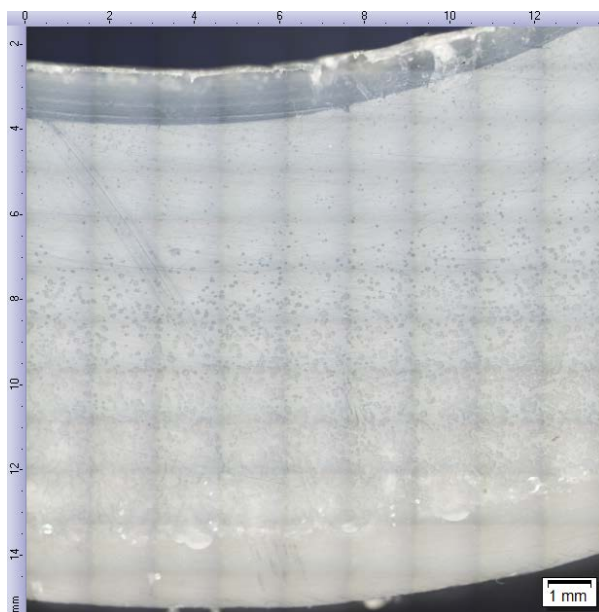


41. ábra: Kompatibilizálatlan HDPE/PS keverékek szétválasztása

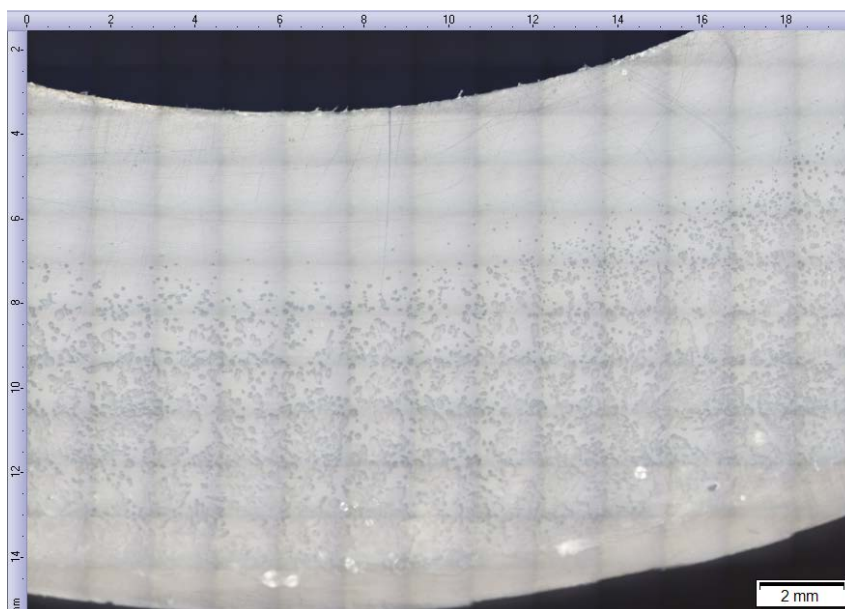


42. ábra: HDPE/PS+0,125 tf% SEBS-g-MA keverékek szétválasztása

Az 43. ábrán megfigyelhető, hogy 0,25 tf% SEBS-g-MA tartalomnál már az átmeneti zóna vastagsága a legnagyobb $6096 \pm 196 \mu\text{m}$, miközben a PS és HDPE fázisok vastagsága tovább csökkent, előbbi $1711 \pm 100 \mu\text{m}$ -re, míg az utóbbi $4794 \pm 137 \mu\text{m}$ -re. 0,5 tf%-nál a külső íven már csak egy vékony $971 \pm 94 \mu\text{m}$ -es PS réteg látható (44. ábra), és szembetűnő, hogy az átmeneti zóna ismét a PS fázis irányába növekedett, míg a HDPE fázis mérete mondhatni változatlan maradt ($4200 \pm 250 \mu\text{m}$).

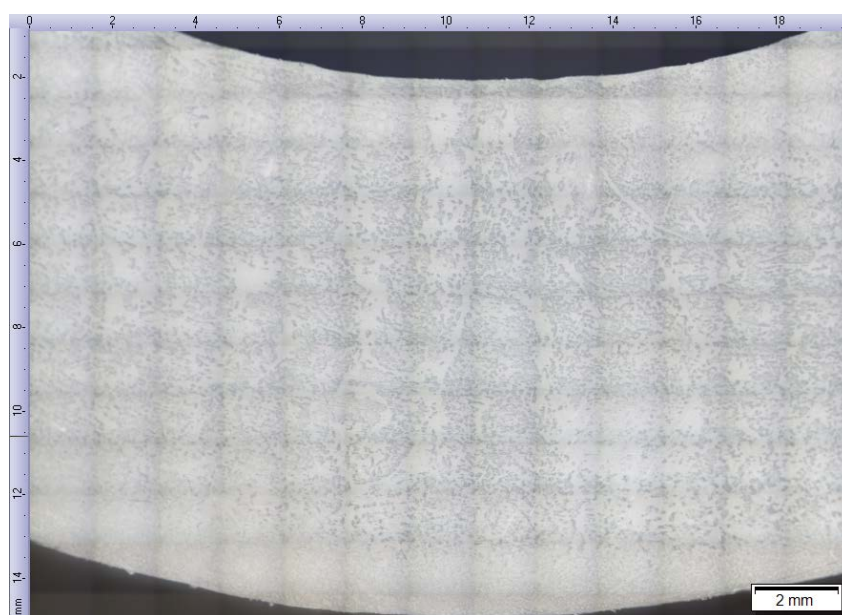


43. ábra: HDPE/PS+0,25 tf% SEBS-g-MA keverékek szétválasztása

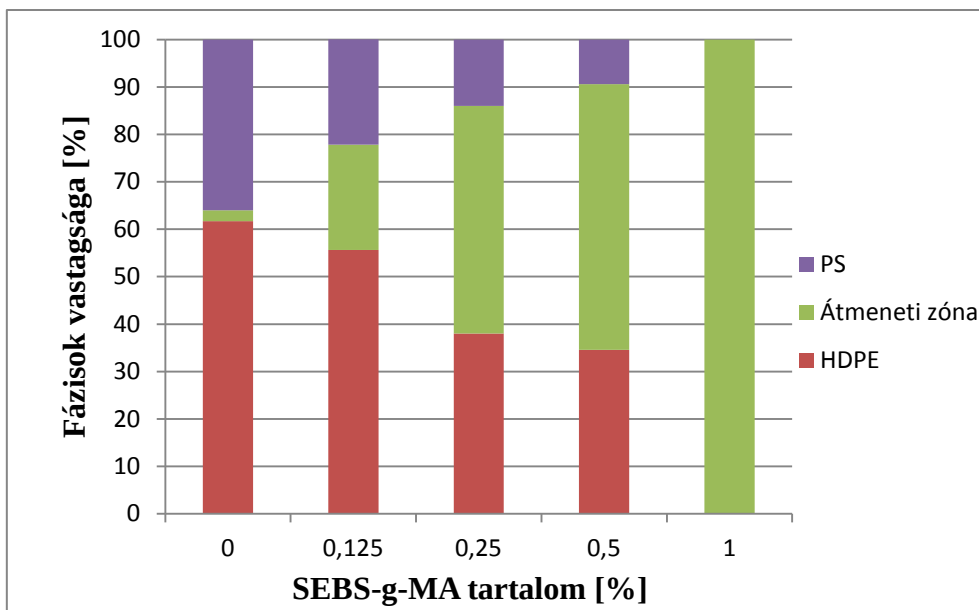


44. ábra: HDPE/PS+0,5 tf% SEBS-g-MA keverékek szétválasztása

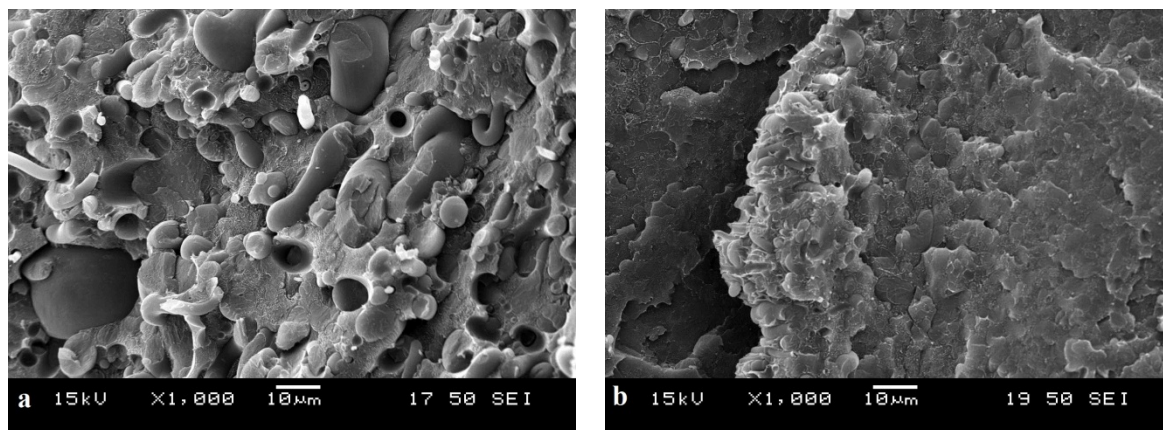
A felvételek készítésekor 1 tf% SEBS-g-MA-t tartalmazó keveréknél azt vettem észre, hogy teljesen eltűntek a tiszta PS és HDPE fázisok, és egy viszonylag finom heterogén szerkezet alakult ki (45. ábra), amely az adalék tartalom további növekedésével szinte homogénné válik. Ezt kiválóan szemlélteti az 48. ábrán látható 2 tf% adalék tartalomnál készült felvétel, amelyet összevetve az 45. ábrával, érzékelhetővé válik a homogenizálódás. Vagyis kijelenthető, hogy a HDPE/PS keverékek esetében már 1 tf%-nál, valamint e feletti SEBS-g-MA tartalom esetén a kompatibilizálószer hatékonynak bizonyult, mert megfelelő kapcsolódást biztosított az inkompatibilis fázisok között, amely a morfológiai felvételeken is nyomon követhető. Jól látható a SEM felvételeken (47. ábra), hogy a SEBS-g-MA hatására 1 tf%-nál javult a határfelületi adhézió, csökkent a diszpergált fázisok mérete a kompatibilizálatlan összetételhez képest, tehát javította a fázisok közötti kapcsolódást a próbatestek előállításakor is. Az 46. ábrán összefoglaló jelleggel látható az átmeneti zóna vastagságának növekedése a SEBS-g-MA tartalom függvényében.



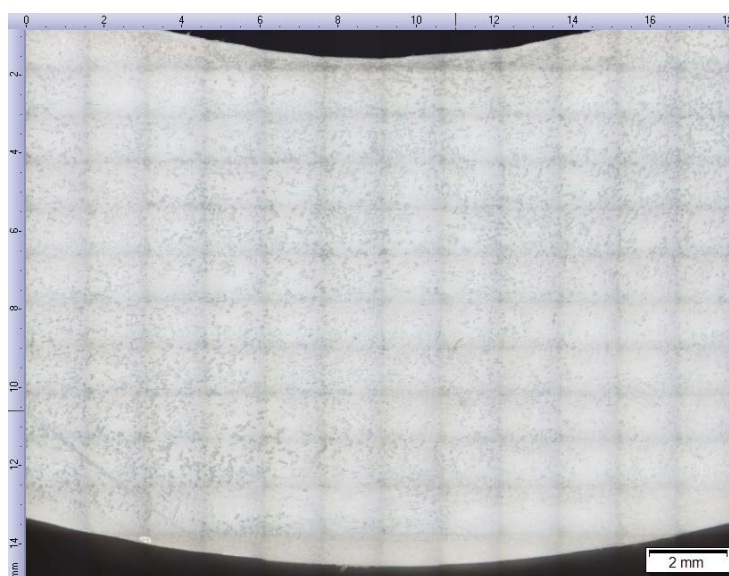
45. ábra: HDPE/PS+1 tf% SEBS-g-MA keverékek szétválasztása



46. ábra: HDPE/PS keverékek PS, HDPE fázisainak és átmeneti zónájának vastagsága

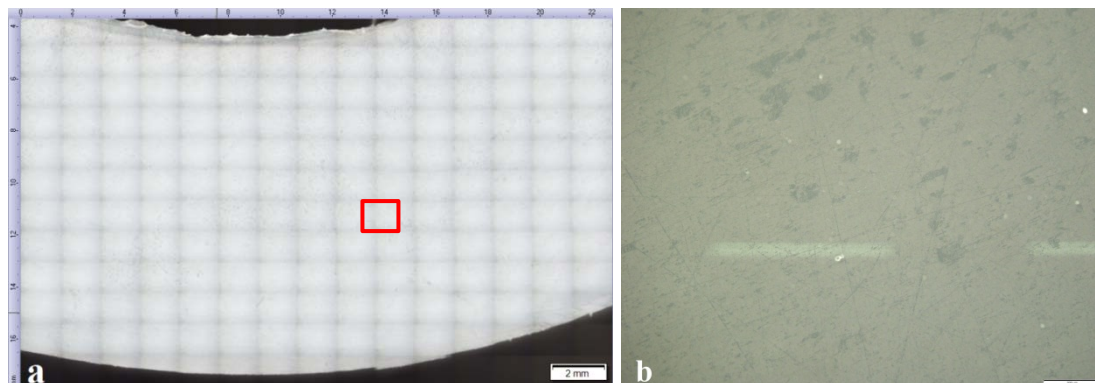


47. ábra: HDPE-UNI/PS keverékek SEM felvételei: (a) kompatibilizálatlan esetben, (b) 1 tf% SEBS-g-MA tartalom-nál

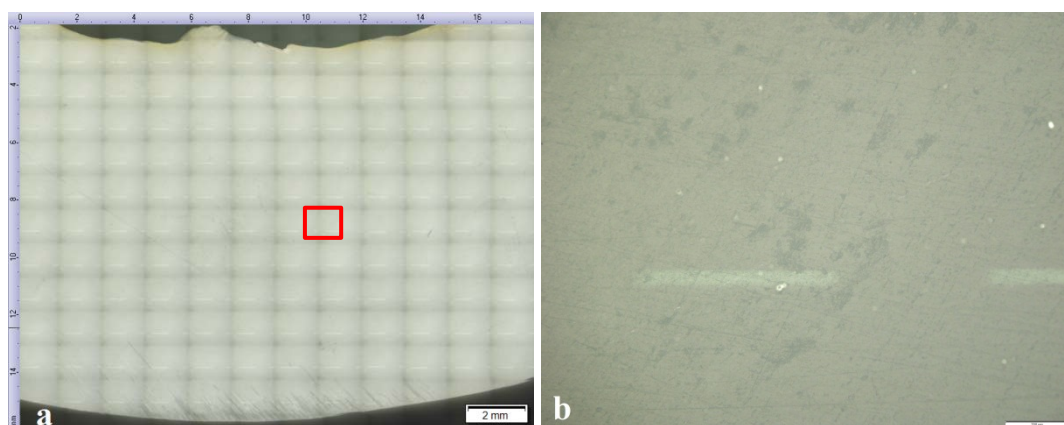


48. ábra: HDPE/PS+2 tf% SEBS-g-MA keverékek szétválasztása

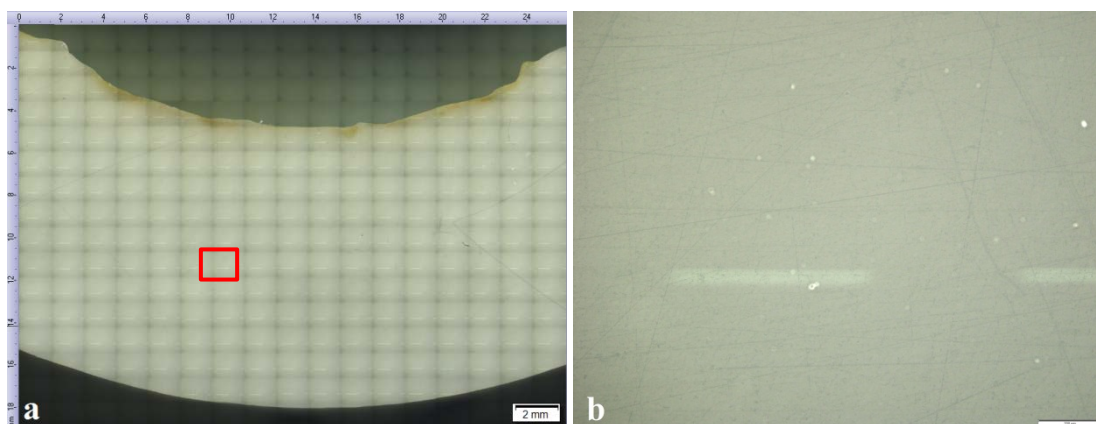
A 4, 6 illetve 10 tf%-os SEBS-g-MA tartalomnál készült kis nagyítású felvételeken nem vehető észre különbség (49.(a) 50.(a) és 51.(a) ábrák), azonban egy kis részletét felnagyítva jól nyomon követhető a kompatibilizálás hatása a heterogén szerkezet finomabbá válásával (49.(b) 50.(b) és 51.(b) ábrák).



49. ábra: (a) HDPE/PS+4 tf% SEBS-g-MA keverékek szétválasztása, (b) az „(a)” ábrán négyzettel jelölt képrészlet nagyított felvétele



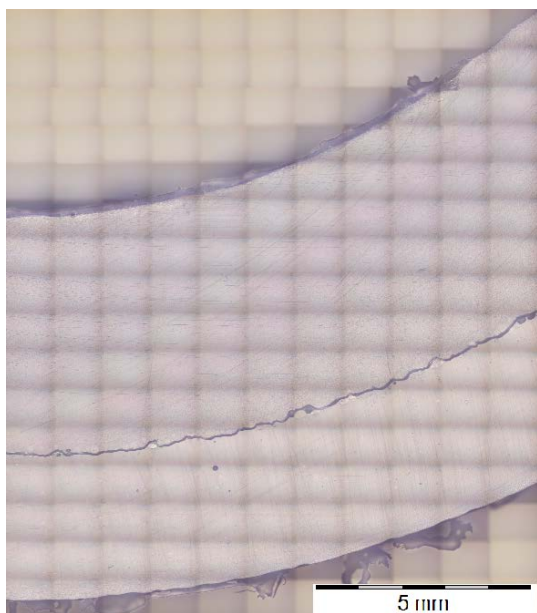
50. ábra: (a) HDPE/PS+6 tf% SEBS-g-MA keverékek szétválasztása, (b) az „(a)” ábrán négyzettel jelölt képrészlet nagyított felvétele



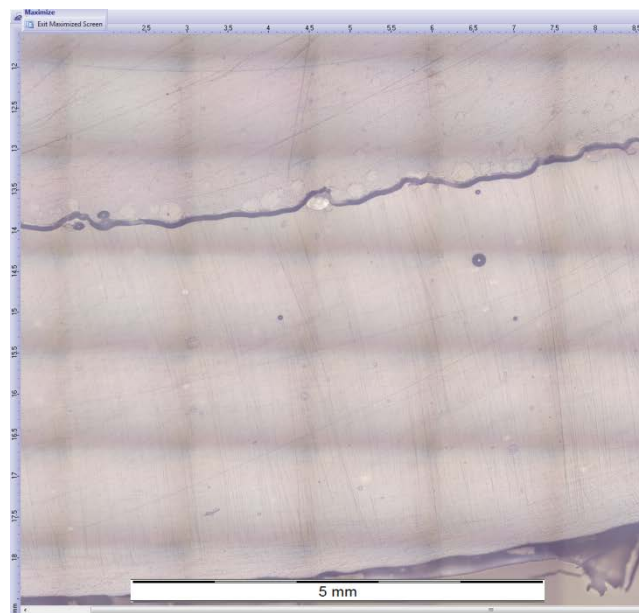
51. ábra: (a) HDPE/PS+10 tf% SEBS-g-MA keverékek szétválasztása, (b) az „(a)” ábrán négyzettel jelölt képrészlet nagyított felvétele

4.4.2. HDPE-g-MA és PP-g-MA tartalmú keverékek szétválasztása

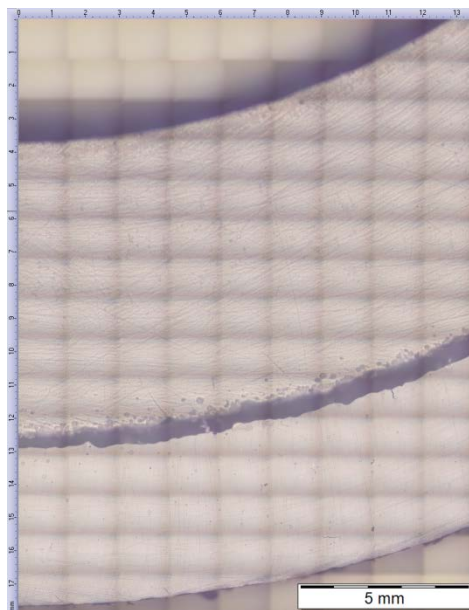
A HDPE-g-MA és PP-g-MA adalékanyagok kompatibilizáló hatását - a SEBS-g-MA-hoz hasonlóan - az 50/50 tf%-os PS/HDPE keverék esetén vizsgáltam. Az előállítás során mindkét kompatibilizálószerből 4 tf%-ot kevertem a blendbe. A keverékek korongjairól készült mikroszkópos felvételek alapján megállapítható, sőt még szabad szemmel is jól látható, hogy a szétválasztás sikeres volt. Mind a HDPE-g-MA (52. ábra), mind a PP-g-MA tartalmú keveréknél (54. ábra) éles szétválást tapasztaltam a homogén fázisok határán. Jól látható, hogy a tiszta PS és HDPE fázisok között rés keletkezett, amely a PP-g-MA-t tartalmazó összetételnél $428 \pm 55 \mu\text{m}$ volt, míg a HDPE-g-MA esetén csupán $66 \pm 9 \mu\text{m}$ volt. Mindkét adaléknál megfigyelhető átmeneti zóna, amely a két homogén fázis közötti rés szélén található. A PS/HDPE/HDPE-g-MA keveréknél a felvételek alapján valószínűsíthető, hogy a kompatibilizálószer a rés mindkét szélén megtalálható (53. ábra). Ezzel szemben a PP-g-MA-t tartalmazó összetételnél az adalékanyag csupán a HDPE fázis külső részén látható a képeken (55. ábra). Az átmeneti zóna vastagsága rendkívül kicsi, ugyanis HDPE-g-MA-nál $250 \pm 37 \mu\text{m}$, míg PP-g-MA esetén $435 \pm 77 \mu\text{m}$ volt. Ezek az értékek a kompatibilizálatlan PS/HDPE keverék átmeneti zónájának vastagságával esnek egy nagyságrendbe, amely $282 \pm 22 \mu\text{m}$ volt. Összegezve elmondható, hogy a PS/HDPE keverékek esetén sem a HDPE-g-MA, sem a PP-g-MA kompatibilizálószer nem alkalmas a fázisok közötti kapcsolódás javítására, mivel 4 tf% adalék tartalom mellett is sikerült a szétválasztás, sőt az átmeneti zóna vastagsága közel azonos a kompatibilizálatlan PS/HDPE blendével.



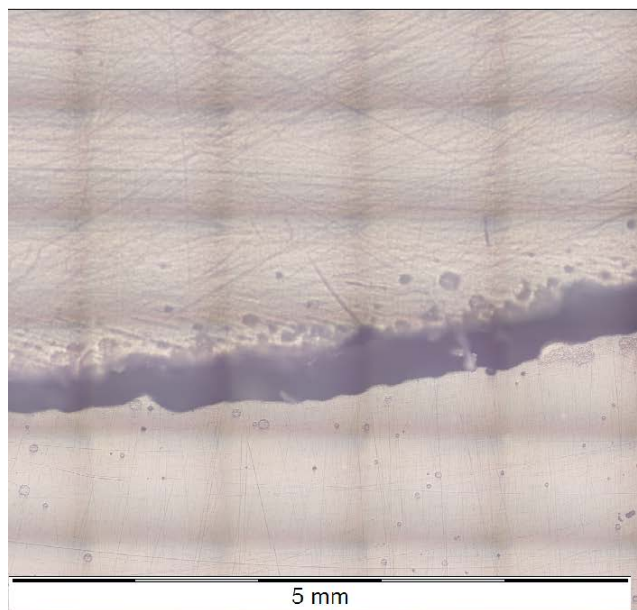
52. ábra: HDPE/PS+4 tf% HDPE-g-MA keverékek szétválasztása



53. ábra: HDPE-g-MA az átmeneti zónában



**54. ábra: HDPE/PS+4 tf% PP-g-MA
keverékek szétválasztása**



55. ábra: PP-g-MA a HDPE fázisban

4.4.3. Szétválasztási eredmények összefoglalása

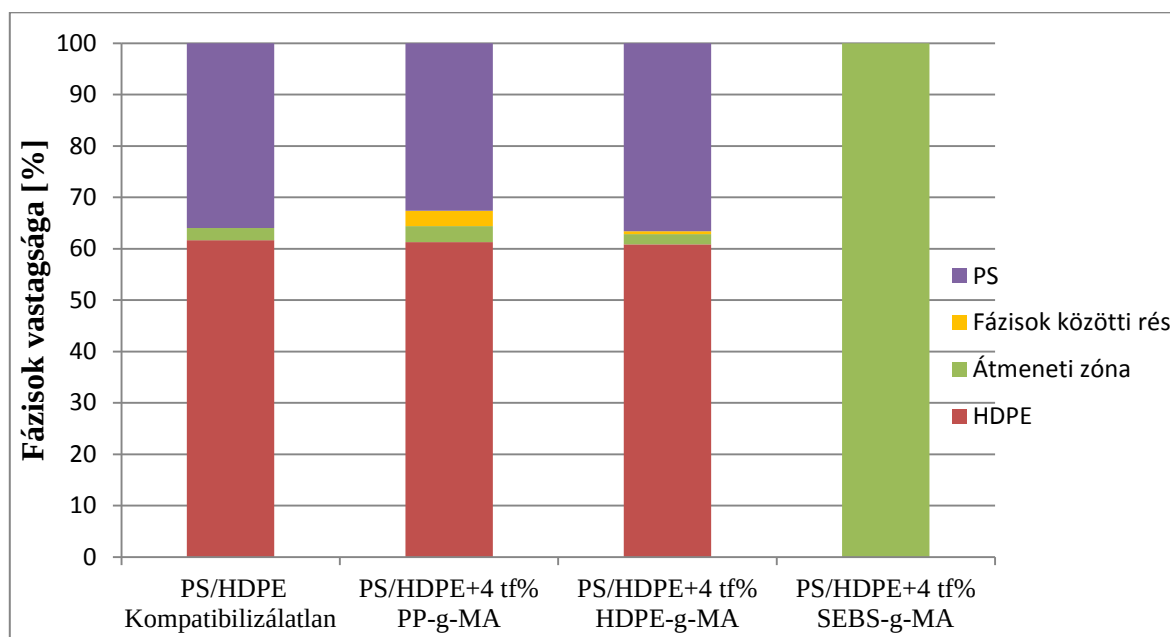
A vizsgálati eredmények ismeretében elmondható, hogy a szétválasztás sikeresnek bizonyult a PS/HDPE keveréknél, mivel a mikroszkópos felvételeken homogén fázisok között éles elválás tapasztalható. PS/HDPE/SEBS-g-MA keverékeknél is sikeres volt a szétválasztás abban az esetben, ha a kompatibilizálószer tartalom nem érte el az 1 tf%-ot. Ugyanis 1 tf%-os SEBS-g-MA tartalomnál a homogén HDPE és PS fázisok eltűnnek és heterogén szerkezet alakult ki, amely a kompatibilizálószer mennyiség további növekedésével homogén szerkezetté vált a SEBS-g-MA kiváló kapcsoló hatása révén, a szétválasztás sikertelen volt. Vagyis a SEBS-g-MA a PS/HDPE keveréknél hatékony kompatibilizálószernek bizonyult 1 tf% adalékanyag tartalom felett.

A reológiai-, morfológiai- és mechanikai vizsgálatok eredményei is igazolják, hogy a SEBS-g-MA a PS/HDPE keverékek kompatibilizálására alkalmas. A morfológiai vizsgálat elektronmikroszkópos felvételein látható, hogy a kompatibilizálószer hatásra a határfelületi adhézió javul, az elosztatott fázisok mérete csökken, ezáltal finomabb struktúra alakul ki, már 1 tf% SEBS-g-MA esetén is. 2 tf% SEBS-g-MA tartalom felett a törés már nem a PS és HDPE fázisok közötti határfelületen halad végig, hanem az elosztatott fázison keresztül köszönhetően a SEBS-g-MA kapcsolódást segítő hatásának. 1 tf%-nál nemcsak a keverék a morfológiájában figyelhető meg jelentős változás a kompatibilizálatlan összetételhez képest, hanem a reológiai tulajdonságaiban is, ugyanis az MFI értéke csökkent, miközben a rotációs

reométerrel meghatározott viszkozitása nőtt. A szakítóvizsgálatok eredményeiből is az látható, hogy a SEBS-g-MA kompatibilizáló hatása már 1 tf%-tól érzékelhető, majd e felett 2 tf%-nál már szívósabbá vált a keverék. Azaz a kapott eredmények összhangban vannak a szétválasztással kapott eredményekkel, amelyek alapján szintén megfigyelhető, hogy a kompatibilizálószer hatása 1-2 tf%-tól megátolta a szétválasztást. A szétválasztási eredményekhez hasonlóan a morfológiai felvételeken is érzékelhető a kompatibilizáló hatás az adalékanyag tartalom növekedésével. Mivel a keverékek morfológiai szerkezete nagymértékben befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat, így annak változása a mechanikai jellemzőket is módosítja. 4 tf% SEBS-g-MA hatására a HDPE/PS keverék esetén a finom morfológiának köszönhetően ugrásszerűen megnőtt a blend ütőszilárdsága a kisebb kompatibilizálószer tartalmú keverékekhez képest. Ennél a keveréknél a szétválasztás után homogén szerkezetet tapasztaltam. Tehát a szétválasztási eredmények, és a reológiai-, morfológiai- és mechanikai vizsgálatok eredményei között párhuzam vonható a kompatibilizálószer kapcsolódást javító hatását illetően, ezért az ömledékcentrifugával végzett szétválasztó eljárás helyettesítheti ezeket a komoly erőforrásokat és sok időt igénylő vizsgálatokat. Vagyis az eljárás alkalmas a kompatibilizálószer minősítésére. Ha a szétválasztás sikeres, akkor a blend alkotóit nem tudta megfelelően összekapcsolni, vagy nagyobb mennyiségben kell a keverékhez adagolni. Ha nem sikerül szétválasztani a keveréket alkotóira, akkor a kompatibilizálószer megfelelő. Véleményem szerint ezzel a módszerrel meghatározható egy keverék optimális kompatibilizálószer tartalma is, azonban ennek bizonyításához további vizsgálatokra van szükség.

A HDPE-g-MA-val és PP-g-MA-val kompatibilizált PS/HDPE keverékek szétválasztása sikeres volt, ezért - az előző bekezdésben ismertetett gondolatmenet alapján - sem a HDPE-g-MA, sem a PP-g-MA nem alkalmas a PS/HDPE keverékek kompatibilizálására. A 56. ábra szemlélteti, hogy az egyes fázisok, zónák aránya mindkét adalék esetén gyakorlatilag a kompatibilizálatlan összetétel arányaival egyezik meg, annak ellenére, hogy a SEBS-g-MA-val azonos térfogatszázalékban adagoltam őket a keverékhez. Vagyis 56. ábra alapján a PP-g-MA és a HDPE-g-MA nem alkalmas a PS/HDPE keverékek kompatibilizálására, mivel a kompatibilizálatlan összetételhez képest nem történt változás. Azaz a módszer segítségével eldönthető egy kompatibilizálószer megfelelősége egy választott keverékhez. Jelen esetben a HDPE/PS keverékhez 4 tf%-ban a SEBS-g-MA megfelelőnek bizonyult, míg a HDPE-g-MA és a PP-g-MA nem. Az ábra alapján az is megállapítható, hogy az átmeneti zóna vastagságának ellenőrzésével lehet eldönteni az adalék megfelelőségét. Ha

megfelelő, akkor megjelenik egy nagyobb vastagságú átmeneti zóna a kompatibilizálószer kapcsoló hatása révén, sőt a tiszta fázisok is eltűnhetnek. Ha nem megfelelő, akkor lényegében nincs átmeneti zóna.



56. ábra: PS/HDPE keverékek PS, HDPE fázisainak és átmeneti zónájának aránya

A TDK dolgozatomban bemutatott eredmények megítélésem szerint nagy jelentőséggel bírnak, és bizakodásra adnak okot, mivel sikerült szétválasztani egy előzetesen homogenizált polimer keveréket, ezáltal az előzetesen ömledékállapotban összekevert műanyag hulladékok szétválasztására megoldást kínálhat, valamint a kompatibilizálószer minősítésére is alkalmas ez a szétválasztó eljárás. Tehát a berendezés és a technológia fejlesztésében nagy lehetőségek rejlenek.

5. Fejlesztési javaslatok

A TDK dolgozat keretein belül a különböző kompatibilizálószer tartalmú PS/HDPE polimer keverékek morfológiai és mechanikai vizsgálata, valamint szétválasztásuk eredményesnek bizonyult. Azonban maradtak kérdések, amelyeket érdemes lenne jobban megvizsgálni. Az egyik javaslatom a kialakult morfológiai szerkezet Raman-mikroszkópos vizsgálata, ugyanis a SEM felvételek alapján nem határozható meg, hogy melyik komponens alkotja mátrixot, és melyik a diszpergált részt a blendek átmeneti zónájában, valamint héj részén, azonban a vizsgálat során a PS fázis kioldásával meghatározható lenne.

A szétválaszthatóság esetén több vizsgálatot is érdemes lenne még elvégezni annak érdekében, hogy a kompatibilizálószer tartalmú PS/HDPE blendek szétválasztásáról komplex képet lehessen alkotni. A HDPE/PS keverékek esetén 1 tf% SEBS-g-MA tartalom alatt érdemes lenne kisebb lépésközönként vizsgálni a kompatibilizálószer szétválaszthatóságra gyakorolt hatását, ugyanis ebben a tartományban jól követhető a SEBS-g-MA hatásmechanizmusa, kiválóan megfigyelhető, hogy az adalékanyag tartalom növekedésével hogyan növekszik az átmeneti zóna vastagsága. Érdemes lenne további kompatibilizálószeresek esetén megvizsgálni a szétválaszthatóságot, és az eredmény alapján megállapítani a megfelelőségét vagy a nem megfelelőségét. A centrifugális erőterben történő ömledékállapotú eljárás eredményességét több technológiai paraméter is befolyásolja, így ezek hatását lehetne vizsgálni, hogy hogyan befolyásolja a kompatibilizálószeresek minősítését. Ezek a paraméterek: a viszkozitás, a keveréket alkotó komponensek viszkozitás-különbsége, pörgetési idő, pörgetés fordulatszáma, hőntartási idő, kemence hőmérséklet. Mivel jelen kutatásban két nagy folyóképességű polimer alkotta a keveréket, ezért érdemes lenne kisebb folyóképességű komponensek esetén vizsgálni a szétválaszthatóságot és minősíthetőséget. Meglátásom szerint a korong alakú mintákon érdemes lenne sűrűségmérést elvégezni, hogy a szétválasztott frakciók tisztaságának változását nyomon lehessen követni.

A berendezés meghajtásának automatizálásával és egy megfelelő kemence kialakítással a továbbfejlesztett berendezés laboreszközként is használható lehetne, amellyel a kiválasztott keverékekhez gyorsan és könnyen lehetne megfelelő kompatibilizálószeret választani. Főiskolákon, egyetemeken, anyagvizsgáló laborokban alkalmazhatnák kutatási célra.

6. Összefoglalás

A kutatás során a kompatibilizálószer polimer keverékre gyakorolt hatását vizsgáltam, a vegyes műanyag hulladékban nagy mennyiségben előforduló HDPE és PS polimerekből álló keverékek esetében. A különböző kompatibilizálószer tartalmú 50/50 tf% összetételű HDPE/PS keverékek morfológiai szerkezetének, mechanikai tulajdonságainak, valamint szétválaszthatóságának vizsgálatát végeztem el, annak érdekében, hogy minél jobb rálátást kapjak az előállított blendék tulajdonságaira. A tulajdonságok széleskörű megismerése azért fontos, mert műanyag hulladékok kompatibilizálás útján történő minőség-növelt újrahasznosításával, termékek alapanyagként szolgálhat a vizsgált PS/HDPE keverék, ezáltal csökkenthető lehetne a műanyag hulladékok mennyisége.

A TDK dolgozat során az iker csigás extruderrel előállított keverékek kompatibilizálására SEBS-g-MA-t használtam fel, amelyet 9 különböző tf%-ban adagoltam a PS/HDPE blendéhez. Valamint további két kompatibilizálószerrel a HDPE-g-MA-t és PP-g-MA-t alkalmaztam, annak érdekében, hogy megfigyelhető legyen a kompatibilizálószer szétválaszthatóságra gyakorolt hatása. A keverékek valamint az alapanyagok folyóképességét MFI mérés során, míg a viszkozitásukat rotációs reométerrel vizsgáltam. A mechanikai vizsgálatok közül az ütő- illetve a szakítóvizsgálatokat végeztem el.

A morfológiai vizsgálatot az összes összetételnél elvégeztem, amely során azt tapasztaltam, hogy kialakult a fröccsöntésre jellemző mag-héj szerkezet, amelyben mind a mag, mind a héj területén mátrixban elosztatott morfológia jött létre. A kompatibilizálatlan esetben a HDPE/PS keverék durva struktúrával, nagyméretű elosztatott fázisokkal, gyenge határfelületi adhézióval rendelkezett. A SEBS-g-MA tartalom növekedésével megfigyelhető volt, hogy csökkent a diszpergált fázisok mérete, javult a határfelületi adhézió, ezáltal homogénebbé vált a szerkezet.

A szakítóvizsgálat eredményeinek kiértékelése során a mechanikai jellemzők közül a húzószilárdság, valamint a húzó rugalmassági modulus értékeit határoztam meg. A húzószilárdság értékekben a kompatibilizálatlan blendéhez képest enyhe növekedést tapasztaltam 0,5 tf%-ig, amely feltételezhetően az adalék kapcsolódást segítő tulajdonságának köszönhető, viszont 1 tf%-tól csökkenés mutatkozott a húzószilárdságban. A legmagasabb húzó rugalmassági modulus értékekkel a kompatibilizálatlan keverék rendelkezett. A SEBS-g-MA tartalom növekedésével a modulus értékei csökkenő tendenciát mutattak.

A hornyolatlan ütővizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a SEBS-g-MA tartalom növekedésével a különböző összetételek ütőszilárdsága jelentősen növekedett, amely az adhézió javulásával, a homogénebb morfológiai szerkezet kialakulásával, ezáltal a feszültség gyűjtőhelyek megszűnésével magyarázható. 10 tf% adalékanyag tartalomnál az ütőszilárdság értéke majdnem 8-szor nagyobb a kompatibilizálatlan HDPE/PS keverék ütőszilárdságához képest. A reológiai-, mechanikai- és morfológiai vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a SEBS-g-MA hatására a keverékek szívósabb viselkedést mutatnak, magasabb ütőszilárdsággal, finomabb morfológiával és nagyobb viszkozitással rendelkeznek.

A HDPE/PS blendek szétválasztásához a tanszéki fejlesztésű ömledékcentrifugát használtam. A szeparálást 320°C-on végeztem 60 perc hőtartási, és 20 perc pörgetési idővel. A minták kiértékelése során azt tapasztaltam, hogy sikeresnek bizonyult a szétválasztás a kompatibilizálószer nélküli, illetve az alacsony SEBS-g-MA tartalmú HDPE/PS keverékekben. Azonban 1 tf%-nál már eltűntek a tiszta PS és HDPE fázisok, és heterogén szerkezet alakult ki, amely SEBS-g-MA tartalom növekedésével homogénebbé vált. Ez mutatja, hogy a SEBS-g-MA egy jó kompatibilizálószer a PS/HDPE keverékek kompatibilizálásra, illetve meggátolja a keverékek szétválaszthatóságát az inkompatibilis fázisokat összekapcsoló hatása révén. A HDPE-g-MA és PP-g-MA tartalmú PS/ HDPE keverékek szétválasztása sikeres volt annak ellenére, hogy 4 tf%-ban adagoltam őket a keverékhez. Ekkora mennyiségben a SEBS-g-MA esetén a szétválasztás nem sikerült, és a tiszta fázisok eltűntek, sőt már-már homogén szerkezet alakult ki.

Szétválasztásnál már 1 tf% SEBS-g-MA elegendő mennyiség volt ahhoz, hogy az inkompatibilis fázisok közötti kapcsolóhatása révén meggátolja a szétválasztást. A reológiai-, szakító- és morfológiai vizsgálatoknál is azt az eredményt kaptam, hogy a SEBS-g-MA 1 tf%-os jelenlétével a PS/HDPE keverékben érvényesül a kompatibilizáló hatás. Tehát a szétválasztó eljárás eredményei és a hagyományos anyagvizsgáló módszerek eredményei között párhuzam vonható, ezért a szétválasztó eljárás alkalmas a kompatibilizálószer minősítésére, és az anyagvizsgáló mérések kiváltására. Az új módszer lényege, hogy ugyanaz az eredményt gyorsabban és egyszerűbben elérhető, így a jövőben az eljárás segítségével eldönthetjük az adott kompatibilizálószer megfelelőségét. Ezek alapján a SEBS-g-MA PS/HDPE keverékek esetén megfelelőnek bizonyult, miközben a HDPE-g-MA és PP-g-MA nem megfelelő, mivel nem tudták összekapcsolni a PS és HDPE fázisokat.

7. Summary

In this research the adequacy of three different kinds of compatibilizers were investigated in 50/50 vol% PS/HDPE blends. The results and the efficiency of the new testing method are compared with the results of the traditional test, like scanning electron microscopy, rheology measurements and tensile tests. These results should be important at recycling also, because of the achieve upgrading recycling with adding compatibilizers to the polymer blends, thereby the amount of the produced waste can be decreased.

9 different SEBS-g-MA contained PS/HDPE blends were produced by twin-screw extruder to investigate their effects on the separation. The results were verified by 2 other types of compatibilizers (HDPE-g-MA and PP-g-MA).

The morphologies after injection moulding show a shell/core structure in PS/HDPE blends. Both sides a dispersed morphology can be visible. Blend without SEBS-g-MA shows a coarse dispersed morphology with a large diameter of the droplets. Between the two phases only a weak adhesion can be seen. Increasing the amount of the SEBS-g-MA the size of the disperse phase was decreasing, while the adhesion between the phases improved, thus a more homogeneous morphology formed in PS/HDPE blends.

The results of the tensile test show that increasing the amount of SEBS-g-MA in the PS/HDPE blends causes the decrease in tensile strength. The higher tensile strength was measured between 0-2 vol% of SEBS-g-MA. A similar trend can be seen in Young's modulus of the blend. Increasing the amount of the compatibilizer the Young' modulus is decreased, thus the highest modulus value was measured at PS/HDPE blend without SEBS-g-MA. The results of Charpy impact test showed an opposite effect. Increasing the amount of the compatibilizer caused a high improvement of the toughness, because the phases of the blend formed a more homogenous morphology, hence the interfacial tension was decreased. The impact strength of the 10 vol% SEBS-g-MA containing PS/HDPE was almost 8 times higher than blends without compatibilizer.

The separation of the polymers was occurred by centrifugal force in a melted state at 320°C. The heating was 60 minutes for every sample, after 20 min spinning was applied (keeping the same temperature). It was found, that the separation was successful up to 0.5 vol% of SEBS-g-MA. However, at 1 vol% of the compatibilizer the pure layers of the phases were missing, the phases were not separated from each other. It can be stated, that the SEBS-g-MA prevents the separation of blends, which means this additive is a good choice to bond

the two immiscible phases together during compounding. Two other compatibilizers: HDPE-g-MA and PP-g-MA were also added to the PS/HDPE blend in 4 vol% ratio, but the separation was not prevented by these additives. Despite the presence in greater amount of the other 2 compatibilizers in the blends, after the separation the pure PS and pure HDPE layers were appeared. In contrast, 4 vol% of SEBS-g-MA was caused a very fine, homogeneous structure between the phases in PS/HDPE blend. These results mean, that SEBS-g-MA is a good compatibilizer for PS/HDPE blends above 1 vol% amount, while HDPE-g-MA and PP-g-MA are inadequate to make chemical interaction between the PS and HDPE phases in the blends.

It can be stated, that during the separation 1 vol% of SEBS-g-MA was enough to inhibit the separation of PS and HDPE. The results of the rheology, morphology and tensile test are approximately show the same, which means that parallels can be drawn between the improved new alternative method and the existing evaluation procedures (cryogenic fracture surface examination, rheology, tensile test). Based on these results this new process for investigate the adequacy of the additive is suitable.

Irodalomjegyzék:

- [1] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó (2007).
- [2] Iván B.: Polimerek, mint a jövő másodlagos alapanyagai. Magyar Kémiai Folyóirat **112**, 157-160 (2006).
- [3] Macskásiné Éltető É.: A műanyag reciklálás műszaki és gazdasági helyzete (Merre tart a világ műanyagipara a K 2013 idején). Műanyag és Gumi **51**, 15-18 (2014).
- [4] Lukács P., Ronkay F.: A gépjármű recycling aktuális feladatai a szerves hulladékok hasznosítása vonatkozásában. Műanyag és Gumi **46**, 70-73 (2009).
- [5] Lehoczki L.: Helyzetkép a műanyag alapanyagok piacáról. Műanyag és Gumi **51**, 7-10 (2014).
- [6] Tábi T.: Polimer alapanyagok alkalmazásának előnyei-hátrányai, Polimerek alkalmazástechnikája, előadás, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2013)
- [7] Pukánszky B., Móczó J.: Műanyagok. Typotex Kiadó, Budapest (2011).
- [8] Dobrovsky K.: Új típusú polimer blendek fejlesztése vegyes műanyag hulladék hasznosítására. I. szakmai beszámoló, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2012).
- [9] Jánoki G., Ronkay F.: Nem elegyedő polimer keverékek szerkezete és mechanikai tulajdonságai. Anyagvizsgálók Lapja **20**, 16-21, (2010).
- [10] Utracki L. A.: Polymer Blends Handbook. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (1999).
- [11] Sharma K. R.: Polymer thermodynamics blends, copolymers and reversible polymerization. CRC Press, Boca Raton (2011).
- [12] Tábi T.: Polimerek adalékanyagai, Polimerek alkalmazástechnikája, előadás, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2013)
- [13] Olabisi O.: Handbook of Thermoplastics. Marcel Dekker Inc., USA, (1997).

- [14] Ju M. Y., Chang F. C.: Compatibilization of PET/PS blends through SMA and PMPI dual compatibilizers, *Polymer* **41**, 1719-1730, (2000).
- [15] Chirawithayaboon A., Kiatkamjornwong S.: Compatibilization of HIPS/HDPE blends by SEBS block copolymer. *Journal of Applied Polymer Science* **91**, 742-755 (2004).
- [16] Mekhilef N., Verhoogt H.: Phase inversion and dual-phase continuity in polymer blends: theoretical predictions and experimental result. *Polymer* **37**, 4069-4077, (1996).
- [17] Boudenne A., Ibos L., Candau Y.: *Handbook of multiphase polymer systems*. John Wiley and Sons Ltd., (2011).
- [18] Ravati S., Favis B. D.: Morphological states for a ternary polymer blend demonstrating complete wetting. *Polymer* **51**, 4547-4561, (2010).
- [19] Wang D., Li Y., Xie X. M., Guo B. H.: Compatibilization and morphology development of immiscible ternary polymer blends. *Polymer* **52**, 191-200, (2011).
- [20] Veenstra H., Verkooijen P.C.J., van Lent B. J. J., van Dam J., Posthuma de Boer A., Nijhof P. A. H. J.: On the mechanical properties of co-continuous polymer blends: experimental and modelling. *Polymer* **41**, 1817-1826, (2000).
- [21] Dobrovsky K.: Kétfázisú polimer keverékek kompatibilizálása. VIII. szakmai beszámoló, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2013).
- [22] Willemse R. C., Posthuma de Boer A., van Dam J., Gotsis A.D.: Co-continuous morphologies in polymer blends: the influence of the interfacial tension. *Polymer* **40**, 827-834, (1999).
- [23] Sahnoun F., Lopez Cuesta J. M., Crespy A.: Improvement of the mechanical properties of an HDPE/PS blend by compatibilization and incorporation of CaCO₃. *Polymer Engineering and Science* **43**, 647-660, (2003)
- [24] Ha C. S., Park H. D., Kim Y., Kwon S. K., Cho J. W.: Compatibilizer in polymer blends for the recycling of plastics waste I: Preliminary studies on 50/50 wt% virgin polyblends. *Polymers for Advanced Technologies* **7**, 483-492, (1995).

- [25] Rek V., Vranjes N., Slouf M., Fortelny I., Jelcic Z.: Morphology and properties of SEBS block copolymer compatibilized PS/HDPE blends. *Journal of Elastomers and plastics*, (2007).
- [26] Xu S. A., Tjong S. C.: Impact and tensile properties of SEBS copolymer compatibilized PS/HDPE blends. *Journal of Applied Polymer Science* **68**, 1099-1108, (1998).
- [27] Xu S. A., Tjong S. C.: Polystyrene/High density polyethylene blends compatibilized by a tri-block copolymer I. properties and morphology. *Polymer Journal* **30**, 552-558, (1998).
- [28] Xu S. A., Tjong S. C.: Effect of compatibilizer content on the tensile properties and fracture toughness of high density polyethylene/polystyrene blends. *Polymer Journal* **32**, 208-214, (2000).
- [29] Fellahi S., Favis B. D., Fisa B.: Morphological stability in injection-moulded high-density polyethylene/polyamide-6 blends. *Polymer* **37**, 2615-2626, (1996).
- [30] Dobrovszky K., Ronkay F.: Polimerek újfajta szétválasztási lehetősége. *Mechanoplast konferencia előadás, Miskolc*, (2013).
- [31] Pál K.: Új ötletek a műanyag hulladék hasznosítására, *Műanyagipari Szemle* **4** (2009).
- [32] Csőke B: A hulladékfeldolgozás szeparátorai, Második rész: Nedves szeparátorok és válogató berendezések, *Miskolci Egyetem*.
- [33] Dobrovszky K.: Új típusú polimer blendek fejlesztése vegyes műanyag hulladék hasznosítására. IV. szakmai beszámoló, *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék* (2013).
- [34] Szabó D.: Kompatibilizálószer hatása polimer keverékek szétválasztása esetén, *Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar* (2013)
- [35] Csőke B: A hulladékfeldolgozás szeparátorai, Első rész: Száraz szeparátorok, *Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet*.
- [36] Dobrovszky K.: Műanyag hulladékok szétválasztási lehetősége, *Műanyag hulladék menedzsment, előadás, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék* (2013).

- [37] Super M. S., Enick R. M., Beckman E. J.: Density-based separation of thermoplastics found in the post-consumer waste stream. *Resources, Conservation and Recycling* **9**, 75-88 (1993)
- [38] Takoungsakdakun T., Pongstabodee S.: Separation of mixed post-consumer PET-POM-PVC plastic waste using selective flotation. *Separation and Purification Technology* **54**, 248-252 (2007)
- [39] Guiqing W., Jia L., Zhenming X.: Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling. *Waste Management* **33**, 585-597 (2013)
- [40] Rozsnyay D.: Vegyes műanyag hulladék újszerű szétválogatási módszerének fejlesztése, Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar (2012)
- [41] Wilson I.D.: *Encyclopedia of Separation Science*. Academic Press, London, Egyesült Királyság, 17-343, 2000.
- [42] Szepesi G., Venczel G., Völgyesi L.: Centrifugálás alapjai (2004.10.17)
- [43] Dobrovsky K.: Új típusú polimer blendék fejlesztése vegyes műanyag hulladék hasznosítására. VI. szakmai beszámoló, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2013).
- [44] www.pt.bme.hu (2014.04.25.). Polimerek szakítóvizsgálata, mérési leírás.
- [45] www.pt.bme.hu (2014.04.30.). Polimerek hajlító vizsgálata, mérési leírás.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Dobrovsky Károly konzulensemnek, aki a kutatásom során folyamatos segítséget nyújtott számomra.

Köszönettel tartozom Ronkay Ferenc konzulensemnek, aki szakmai tanácsokkal és javaslatokkal segített a kutatásom során.

Szeretnék köszönetet mondani a Polimertechnika Tanszéknek és munkatársainak, hogy a kutatásomhoz szükséges berendezéseket a rendelkezésemre bocsájtották.

Szeretnék köszönetet mondani Szerves Kémia és Technológia Tanszéknek és munkatársainak, hogy a kutatásomhoz szükséges berendezést a rendelkezésemre bocsájtották.

Szeretnék köszönetet mondani Tóth László tanszéki mérnöknek, aki segített a fröccsöntött próbatestek gyártásában.

Melléklet

Felhasznált anyagok

LITEN MB 87			
Jellemzés			
Tipikus tulajdonságok és alkalmazási felhasználási területek			
Tulajdonságok	Egység	Tipikus érték	Mérési szabvány
FOLYÁSIINDEX (190/2,16)	g/10 min	23.00	ISO 1133
FOLYÁSIINDEX (190/5)	g/10 min	-	ISO 1133
FOLYÁSIINDEX (190/21,6)	g/10 min	-	ISO 1133
SŰRŰSÉG	kg/m ³	955	ISO 1183
HÚZÓSZILÁRDSÁG FOLYÁSHATÁRNÁL	MPa	22	ISO 527
HÚZÓSZILÁRDSÁG FOLYÁSHATÁRNÁL	%	9.5	ISO 527
RUGALMASSÁGI MODULUS	MPa	950	ISO 178
HORNYOLT ÜTŐSZILÁRDSÁG CHARPY 23°C	kJ/m ²	3.5	ISO 179
HORNYOLT ÜTŐSZILÁRDSÁG CHARPY -30°C	kJ/m ²	-	ISO 179
VICAT LÁGYULÁSPONT	°C	122	ISO 306
SHORE-KEMÉNYSÉG D	-	56	ISO 868
ESCR F50; 50°C; 100% DETERGENS	h	-	ASTM D1693
KOROMTARTALOM	%	-	ISO 6469
Megjegyzés: A táblában feltüntetett adatok tipikus adatokat képviselnek. Ezek az adatok tájékoztató jellegűek és nem képezik az adatok határértékeit.			

M-I. ábra: A munkában felhasznált nagy sűrűségű polietilén adatlapja



Edistir®
Polystyrene

N 1840

TECHNICAL DATA SHEET

Product description

General purpose polystyrene combining easy flow and medium heat.

Edistir N 1840 is suggested in extrusion for glossy capping of HIPS sheets and for blending with HIPS or clear SBS for stiffer thermoformable sheets.

This grade exhibits excellent processability in injection moulding and it is recommended for complex and thin-wall parts and fast moulding cycles.

Designation: Thermoplastics ISO 1622-PS,G,085-12

Applications

Thermoformed disposable packaging and glossy sheets for industrial and fridge applications.

Injection moulded beverage cups, point of sales, containers for foods and cosmetics, toys, housewares, medical articles (Petri dishes).

Typical processing data

- | | |
|---------------------|-----------------------------------|
| Extrusion: | • melt temperature 210-240°C |
| Injection moulding: | • predrying normally not required |
| | • melt temperature 200-250°C |
| | • mould temperature 10-50°C |

General information

Edistir N 1840 is certified UL94 HB "all colors" at 1.5 mm (UL file E83071).

This grade in its natural version complies by composition with the requirements set by the main Regulations for plastic materials intended for food contact (including the EEC Directive 90/128 and subsequent amendments).

Properties	Test conditions	Test methods	Units	Values
General				
Density		ISO 1183	g/cm³	1.05
Bulk density		ISO 60	g/cm³	0.65
Water absorption	24 h - 23°C	ISO 62	%	<0.1
Rheological				
Melt flow rate	200°C - 5 kg	ISO 1133	g/10 min	10
Mechanical				
Tensile stress at yield	5 mm/min	ISO 527	MPa	-
Tensile stress at break	5 mm/min	ISO 527	MPa	39
Tensile strain at break	5 mm/min	ISO 527	%	1.8
Tensile modulus	1 mm/min	ISO 527	MPa	3250
Flexural strength	2 mm/min	ISO 178	MPa	69
Izod impact strength, notched	+23°C - thickness 3.2 mm	ISO 180/4A	J/m	-
	+23°C - thickness 4 mm	ISO 180/1A	kJ/m²	1.7
	-30°C - thickness 4 mm	ISO 180/1A	kJ/m²	1.5
Rockwell hardness	L/M scale	ISO 2039/2	-	M80
Thermal				
Vicat softening temperature	10 N - 50°C/h	ISO 306/A	°C	92
	50 N - 50°C/h	ISO 306/B	°C	88
Deflection temperature under load (annealed)	1.8 MPa - 120°C/h	ASTM D 648	°C	84
Coefficient of linear thermal expansion		ASTM D 696	10 ⁻⁵ /°C	7
Thermal conductivity		ISO 8302	W/(K·m)	0.17
Moulding shrinkage		internal method	%	0.3 - 0.6
Flammability				
Flame behaviour	thickness 1.5 mm	UL 94	class	HB
Glow wire test (GWT)	thickness 1.6 mm	IEC 60695-2-1	°C	650
Electrical				
Surface resistivity		IEC 60093	ohm	>1.5·10E+15
Volume resistivity		IEC 60093	ohm·cm	>7·10E+15
Comparative tracking index (CTI)	solution A	IEC 60112	-	375
Dielectric strength		IEC 60243	kV/mm	70
Dielectric constant (relative permittivity)	50 Hz	IEC 60250	-	2.5
Dissipation factor	50 Hz	IEC 60250	-	2·10E-4

Issue 06/02

All indicated data refer to natural grades.

The data, information and suggestions are provided for guidance purposes only.

The Company accepts no responsibility for the results obtained therefrom, as neither for their utilization in infringement of possible patent rights.

However the Company will provide the guaranteed values for each product on demand.

kk

Polimeri Europa S.p.A.
Divisione Elastomeri e Stirenici
Piazza Boldrini, 1
I-20097 San Donato Milanese - Milano
e-mail: stir.pst@polimerieuropa.com
www.polimerieuropa.com

M-II. ábra: A kutatás során felhasznált polisztirol adatlapja



KD127
North America
Issued Apr. 2001

KRATON™ FG1901X Polymer

Data Document

Description

KRATON™ FG1901X is a clear linear triblock copolymer based on styrene and ethylene/butylene, with a polystyrene content of 30%. It is supplied from North America in the physical form identified below. The product code is N731N and the Material Safety Data Sheet number is 2898.

- FG1901X-05 supplied as a dusted pellet.

KRATON FG1901X is used as a modifier of bitumen and polymers. It is also suitable as an ingredient in formulating compounds for footwear applications and may be used in formulating adhesives, sealants and coatings.

Sales Specifications

Property	Test Method	Units	Sales Specification Range
Maleic Anhydride, Bound	BAM1026	%w	1.4 - 2.0
Melt Flow, 230°C/5000 g	BAM 903	gm/10 min.	14 - 28
Water	BAM 1024	ppmw	≤ 500

Typical properties (These are typical values and may not routinely be measured on finished product.)

Property	Units	Typical Value
Tensile Strength	psi	5,000
Elongation	%	500
Hardness*	Shore A	71
Specific Gravity	gm/cc	0.91
Solution Viscosity, 25%w in toluene	cps	5,000
Melt Index, 230° C, 5 Kg	gms/10 min.	22
Styrene/Rubber Ratio	%	30/70

Packaging

KRATON Polymers are available in a number of different pack types. For information specific to this grade please contact your local KRATON Polymers representative.

KRATON, its logo and associated images are trademarks.

DuPont™ Fusabond® E100

Fusabond® resins Product Data Sheet

Description

Product Description

DuPont™ Fusabond® E100 is an anhydride modified high density polyethylene, mainly intended for use as a component in a blend with other polymers including polyolefins and polyamides. It is not intended for extrusion in its pure form in typical extrusions or coextrusions. Available in pellet form for use in conventional extrusion and coextrusion equipment designed to process polyethylene (PE) resins.

Restrictions

Material Status

- Commercial: Active

Availability

- Globally

Typical Characteristics

Uses

- Polymer Modifier

Typical Properties

Physical

Nominal Values

Test Method(s)

Density ()

0.954 g/cm³

ASTM D792

ISO 1183

Melt Flow Rate (190°C/2.16kg)

2 g/10 min

ASTM D1238

ISO 1133

Thermal

Nominal Values

Test Method(s)

Melting Point (DSC)

134°C (273°F)

ASTM D3418

ISO 3146

Freezing Point (DSC)

115°C (239°F)

ASTM D3418

Vicat Softening Point ()

127°C (261°F)

ASTM D1525

ISO 306

Processing Information

General

Maximum Processing Temperature 300°C (572°F)

FDA Status Information

Fusabond® E100 comply with the Code of Federal Regulations, Title 21, Paragraph 175.105, covering the use of adhesive interlayers in composite packages for food use. This regulation describes adhesives that may be safely used as components of articles intended for use in packaging, transporting or holding food. This regulation requires that either (1) the adhesive is separated from the food by a functional barrier, or (2) the quantity of adhesive which contacts fatty or aqueous foods does not exceed the trace amounts at the seams or edges.

M-IV. ábra: A kutatás során felhasznált HDPE-g-MA adatlapja

OREVAC® CA 100

DESCRIPTION

Orevac® CA100 resin is a maleic anhydride modified polypropylene. The grafting operation of the polypropylene backbone is achieved using a new technology that allows high grafting efficiency and low polymer scission.

APPLICATIONS

- Coupling agent for propylene resins and glass fibers, natural fibers (wood, paper) or mineral fillers.
- Compatibilizer between polypropylene and polyamide and polyamide copolymers;

GENERAL CHARACTERISTICS

Properties	Value	Unit	Test Method
Melt Flow Index (190°C, 320 g)	10	g/10 mm	ASTM D 1238 ISO 1133
Melt Flow Index (230°C, 2.16Kg)	150 - 200	g/10 mm	ASTM D 1238 ISO 1133
Maleic Anhydride Content	High	%	FTIR
Melting temperature	167 / 333	°C / °F	DSC
Vicat Temperature	147 / 297	°C / °F	ASTM D 1525-82 ISO 306
Tensile Strength at break	22 / 3200	Mpa / psi	ASTM D 638 ISO R527
Flexural Modulus	880 / 130000	Mpa / psi	ASTM D 638 ISO R527
Elongation at break	12	%	ASTM D 638 ISO R527

MAIN PROPERTIES

- Excellent processability
- High maleic anhydride content
- Compatibility with propylene resins and polyamides

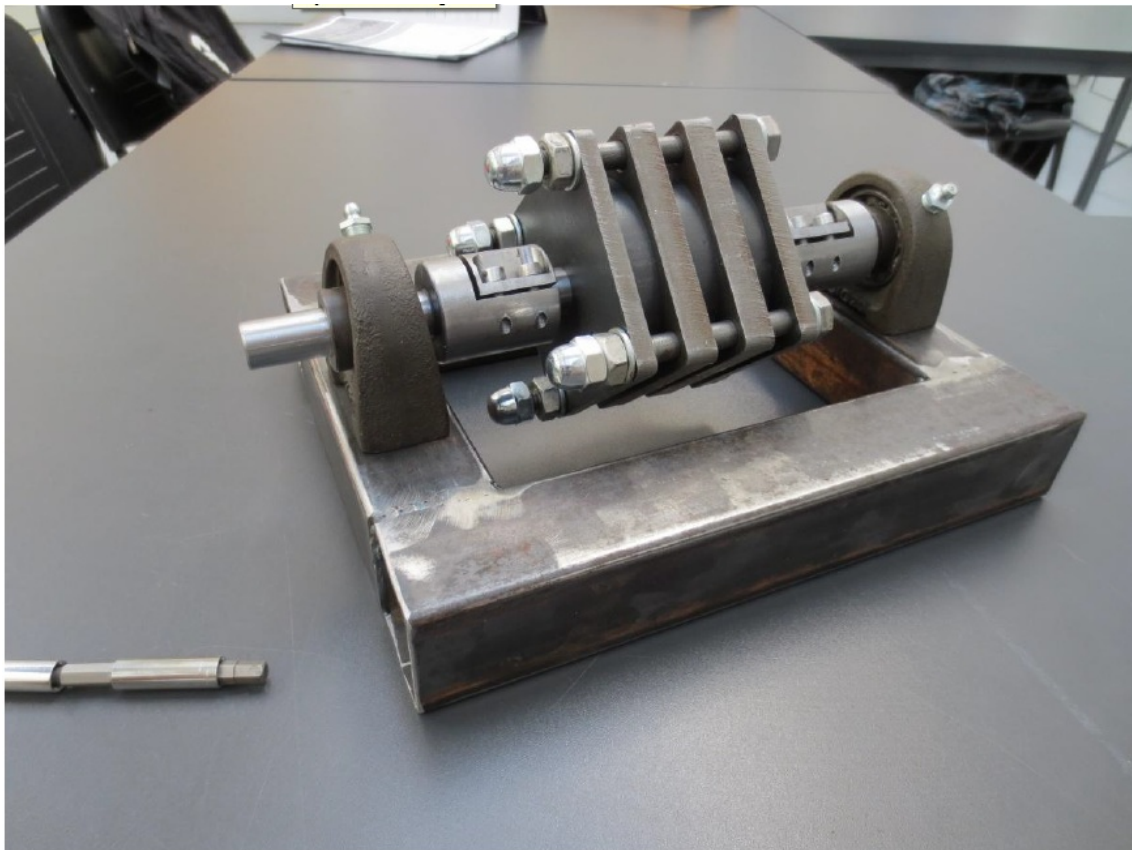
M-V. ábra: A kutatás során felhasznált PP-g-MA adatlapja

	HDPE [g]	PS [g]	SEBS-g-MA [g]	Össztömeg
1	571,571	628,429	0	1200
2	570,922	627,716	1,362	1200
3	570,274	627,002	2,724	1200
4	568,976	625,575	5,449	1200
5	566,378	622,719	10,903	1200
6	561,175	616,999	21,826	1200
7	550,741	605,527	43,732	1200
8	540,268	594,012	65,720	1200
9	519,205	570,853	109,942	1200

M-VI. ábra: HDPE/PS/SEBS-g-MA keverékek estén felhasznált komponensek tömege

	HDPE [g]	PS [g]	PP-g-MA [g]	HDPE-g-MA [g]	Össztömeg
10	275,426	302,824	21,75	0	600
11	274,886	302,231	0	22,883	600

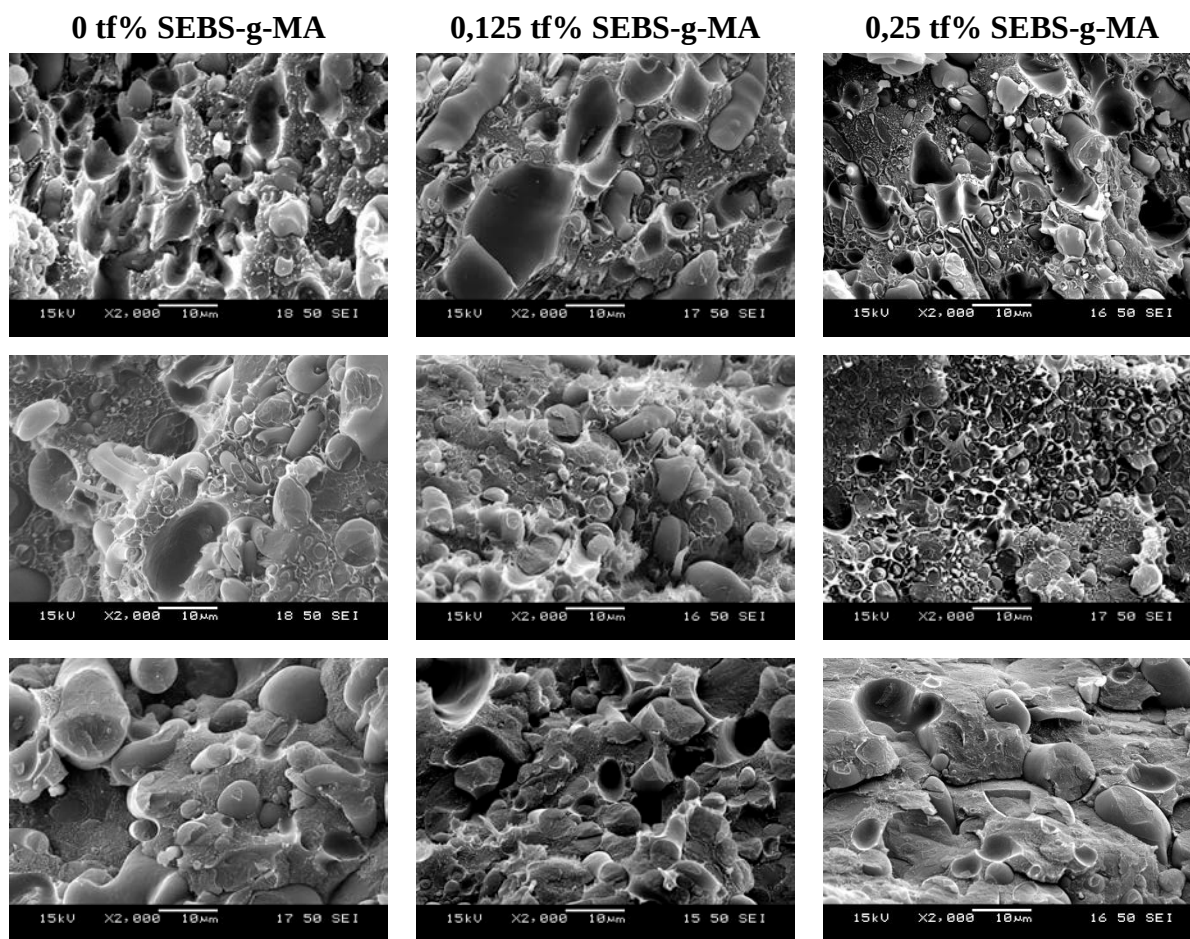
M-VII. ábra: HDPE/PS/HDPE-g-MA és HDPE/PS/PP-g-MA keverékek estén felhasznált komponensek tömege



M-VIII. ábra: Tanszéki fejlesztésű, második generációs ömledékcentrifuga

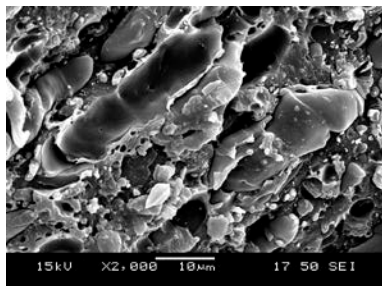
	MFI [g/10 min]	MVR [cm ³ /10 min]
SEBS-g-MA [tf%]	HDPE/PS	HDPE/PS
0	52,71	64,03
0,125	43,16	53,75
0,25	46,03	56,77
0,5	44,95	56,25
1	42,48	51,03
2	44,42	52,63
4	45,94	56,66
6	54,69	60,74
10	40,10	49,46

M-IX. ábra: A HDPE/PS/SEBS-g-MA keverékek mért MVR és kiszámított MFI értéke

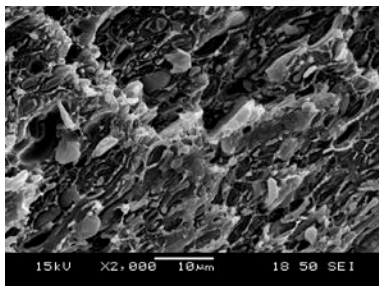


M-X. ábra: HDPE/PS keverékek SEM felvételei a töretfelület: héj részén (felsősor), átmeneti zónájában (középsősor), mag területén (alsósor)

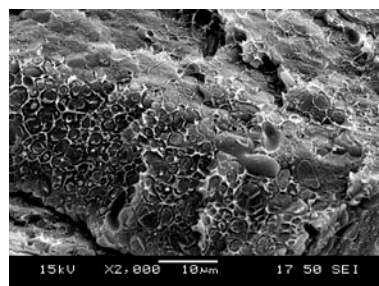
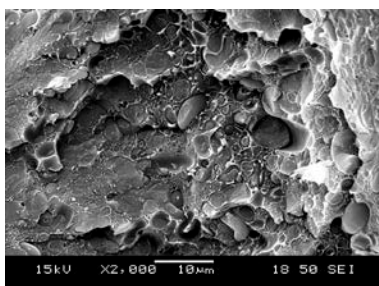
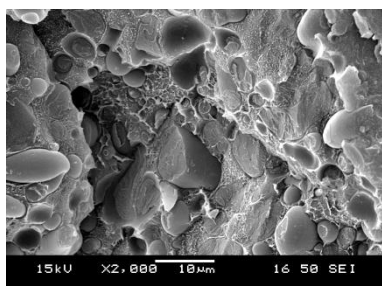
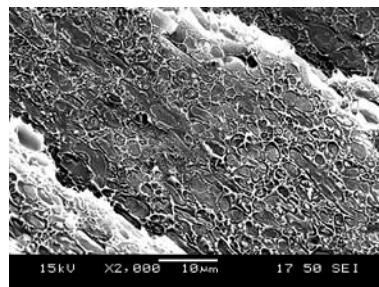
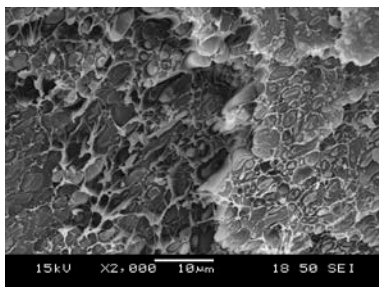
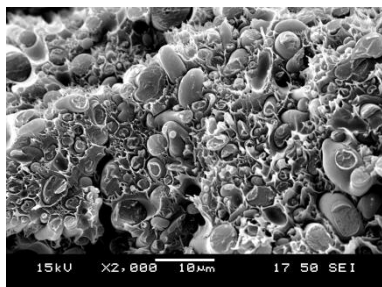
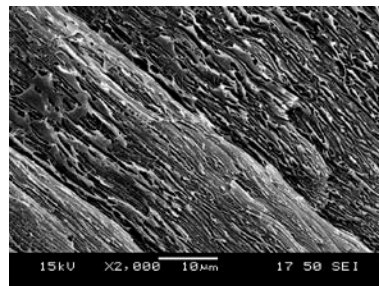
0,5 tf% SEBS-g-MA



1 tf% SEBS-g-MA

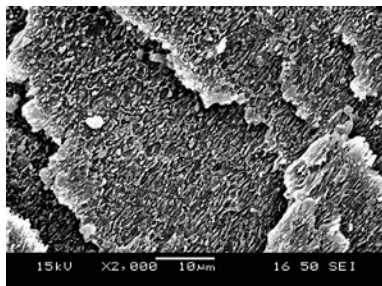


2 tf% SEBS-g-MA

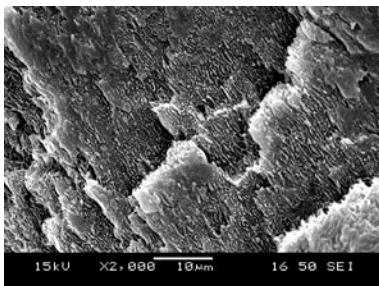


M-XI. ábra: HDPE/PS keverékek SEM felvételei a töretfelület: héj részén (felső sor), átmeneti zónájában (középső sor), mag területén (alsó sor)

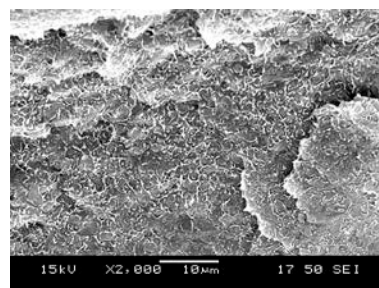
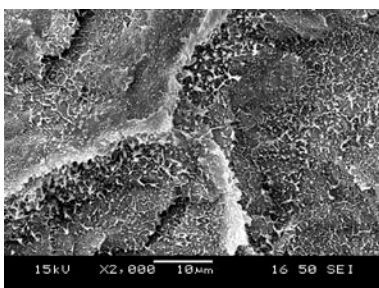
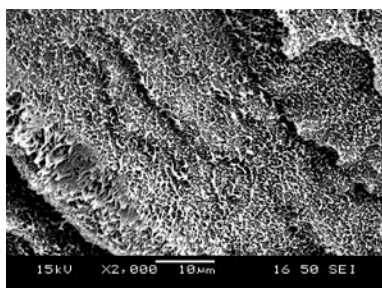
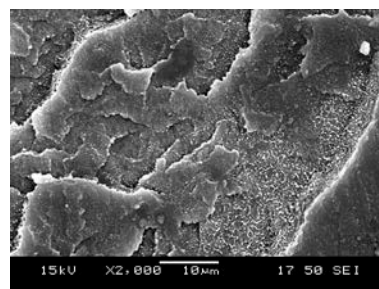
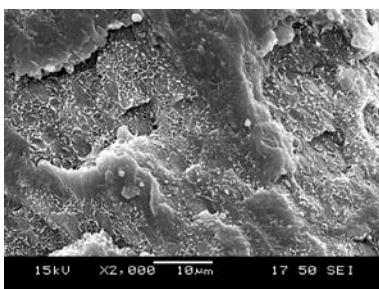
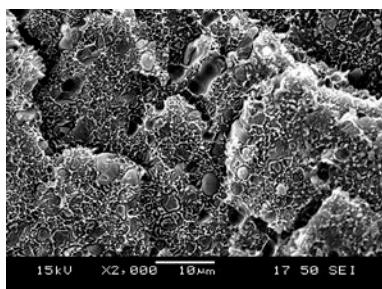
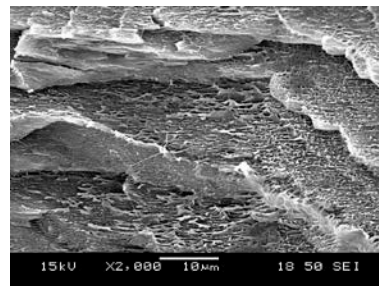
4 tf% SEBS-g-MA



6 tf% SEBS-g-MA



10 tf% SEBS-g-MA



M-XII. ábra: HDPE/PS keverékek SEM felvételei a töretfelület: héj részén (felsősor), átmeneti zónájában (középsősor), mag területén (alsósor)