



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

SZABÓ DIÁNA KATALIN

TDK DOLGOZAT

TERMÉSZETES ÉS MESTERSÉGES POLIMEREK
ÖMLEDÉKÁLLAPOTBAN TÖRTÉNŐ SZÉTVÁLASZTHATÓSÁGA

Témavezető:

Dr. Ronkay Ferenc

egyetemi docens

Konzulens:

Dobrovszky Károly

doktorandusz

BUDAPEST, 2014

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dobrovszky Károly konzulensemnek, aki a dolgozat megírásához időt nem kímélve odafigyelésével, tanácsaival és eszközökkel járult hozzá.

Hálával tartozom Dr. Ronkay Ferenc témavezetőmnek a TDK során adott hasznos ötleteiért és jó tanácsaiért.

Külön köszönöm Szüleimnek, Testvéreimnek, hogy minden körülmények között mellettem álltak és segítették munkámat szeretetükkel, türelmükkel.

TARTALOMJEGYZÉK

Köszönetnyilvánítás	iii
Jelölések jegyzéke	vii
1. Bevezetés.....	1
2. Irodalomkutatás	2
2.1. Polimer keverékek	2
2.1.1. Polimer keverékek előállítása	3
2.1.2. A polimer keverékek tulajdonságai.....	5
2.2. Természetes polimerek	9
2.2.1. Biopolimerek jellemzői	9
2.2.2. PLA	10
2.3. Polimerek szétválasztási lehetőségei	12
2.3.1. Spektroszkópiai eljárással történő szeparálás.....	12
2.3.2. Sűrűségkülönbség szerinti szétválasztás	12
2.3.3. Flotációs szétválasztás.....	16
2.3.4. Mágneses alapon történő műanyag szétválasztás	17
2.3.5. Tribo-elektrosztatikus szétválasztás.....	18
2.3.6. Olvadási hőmérséklet szerinti szétválasztás	19
2.4. Irodalomkutatás kritikai elemzése, célkitűzés	20
3. Kísérleti rész.....	22
3.1. Felhasznált anyagok és mérési berendezések	22
3.1.1. A kísérlet során felhasznált anyagok	22
3.1.2. Az ömledékcentrifuga működési elve	23
3.1.3. Alkalmazott berendezések	25
3.2. Mérések kiértékelése.....	27
3.2.1. PS/HDPE keverékek	28
3.2.2. PET/HDPE keverékek.....	33

3.2.3.	<i>Habosított PET/HDPE keverék.....</i>	<i>37</i>
3.2.4.	<i>Biodegradábilis és szintetikus polimerek szétválaszthatósága</i>	<i>40</i>
4.	ÖSSZEFOGLALÁS	41
4.1.	Eredmények értékelése.....	41
4.2.	További javaslatok	41
5.	Summary.....	42
5.1.	Evaluation of results.....	42
5.2.	Additional suggestion.....	42
6.	Felhasznált források.....	43
7.	Mellékletek	47

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
F	Coriolis erő	N
ΔG	Gibbs-féle szabadenergia változás	J
ΔH	keverési entalpiaváltozás	J
m	tömeg	kg
r	sugár	m
ΔS	keverési entrópiaváltozás	J
T	hőmérséklet	°C
T_{cf}	kritikus folyási hőmérsékleti	°C
T_m	kristályolvadási hőmérséklet	°C
T_g	üvegesedési átmenet hőmérséklet	°C
v	kerületi sebesség	m/s
V	térfogat	m ³
w	légáram sebessége	m/s

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
η	dinamikai viszkozitás	Pas
Φ	komponens aránya	-
ω	szögsebesség	1/s

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
ABS	akrilnitril-butadién-sztirol (acrylonitrile butadiene styrene)
CaCl ₂	kalcium-klorid (Calcium chloride)
CO ₂	szén-dioxid (carbon-dioxide)

HDPE	nagy sűrűségű polietilén (high density polyethylene)
IMDS	inverz mágneses sűrűség alapú szeparátor (Inverse Magnetic Density Separator)
IPN	egymásba hatoló kettős-folytonos szerkezet (Interpenetrating Network)
LDPE	kis sűrűségű polietilén (high density polyethylene)
PA	poliamid (Polyamide)
PC	polikarbonát (Polycarbonate)
PET	polietilén-tereftalát (Polyethylene terephthalate)
PLA	politejsav (Poly(lactic-acid))
PMMA	poli(metil-metakrilát) (polymethyl methacrylate)
POM	Polioximetilén (Polyoxymethylene)
PP	polipropilén (Polypropylene)
PS	polisztirol (Polystyrene)
PTFE	politetrafluoretilén (Polytetrafluoroethylene)
PVC	polivinil-klorid (Polyvinyl Chloride)
SAN	sztírolakrilonitril (Styrene acrylonitrile)
SEM	pásztázó elektronmikroszkóp (Scanning Electron Microscope)
SF ₆	kén-hexafluorid (Sulfur Hexafluoride)
ZnCl ₂	cink-klorid (Zinc chloride)

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a különböző nyersanyagok egyre nagyobb volumenű ipari feldolgozása, valamint az újrahasznosítás területén az egyre növekvő társadalmi elvárások és hatósági szabályozások miatt fontos a fém, az üveg, a papír és a műanyag egymástól történő szétválasztása. Azonban a műanyagok egymástól történő szétválasztása is kulcskérdés azok újrahasznosítása során, mivel a különböző műanyagok együttes feldolgozása rossz mechanikai tulajdonságokat eredményez a termékgyártáskor [1].

Az iparban elterjedt műanyag szétválasztási módszerek esetében gondot okoznak a reciklási folyamat során az olyan típusú termékek, amelyek több műanyagfajta keverékéből állnak (blend), ugyanis ezek a köztes sűrűségű, vagy különleges morfológiai szerkezetű anyagok szennyezőként jelennek meg a már leválasztott, tisztított frakciókban [2]. Ha a műanyag hulladék jelentős mennyiségű blendet tartalmaz, a szétválasztás eredménye nem lesz megfelelő tisztaságú, ezért a kutatás során a felhasznált műanyagok és a belőlük készített blendek minél nagyobb tisztaságú szétválaszthatóságát vizsgáltam, különböző szétválasztási hőmérsékleteken.

Az autó-, építő- és a csomagolóiparból nagy mennyiségű habosított hulladék keletkezik, ezek hasznosítása szintén bonyolult a jelenleg alkalmazott ipari szétválasztó berendezésekkel, hiszen a sűrűségük nagyban eltér az alapanyagok sűrűségétől. Emiatt vizsgáltam a hulladékaramban megtalálható habosított anyagok újrahasznosíthatóságát centrifugális erőterben, ömledékállapotban.

A természetes alapú biopolimer termékek is egyre nagyobb mennyiségben jelennek meg a piacon. Ez a környezet szempontjából azonban csak akkor lehet hasznos, ha a biopolimereket teljesen elkülönítve gyűjtik a többi, újrahasznosítandó szintetikus műanyagtól, és komposztálva, speciális környezetben bomlanak le [3]. Ellenkező esetben (a hasonló sűrűségük miatt) ezek is szennyezőként jelennek meg a szétválasztás során a válogatott műanyagfázisokban, amely megnehezíti a szintetikus műanyagok újrahasznosítását, ugyanis a biopolimerek könnyebben degradálódnak a feldolgozás során. Ezért meg kell akadályozni, hogy ez a kétféle hulladéktípus egymással keveredjen. Ennek érdekében a kutatás során kísérletet tettem a biopolimerek és a mesterséges műanyagok szétválasztására is.

2. IRODALOMKUTATÁS

Ebben a fejezetben ismertetem a műanyag keverékek előállítási módjait, csoportosítását, továbbá bemutatom a műanyag hulladékok alapanyagokra való szétválasztásának módjait, azok fizikai, vagy kémiai hátterét, a jelenleg alkalmazott szétválasztó berendezések működési elvét, illetve a témában eddig elért kutatási eredményeket.

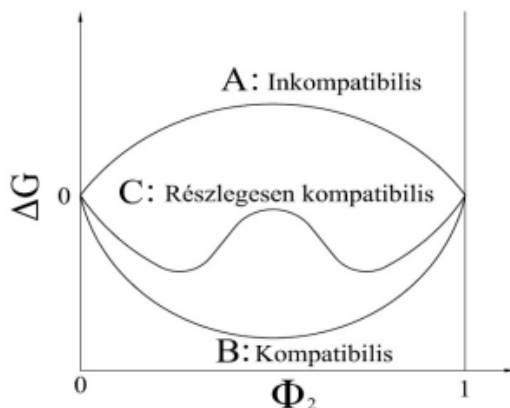
2.1. Polimer keverékek

Egy gyártási folyamat tervezésekor nagyon fontos az alapanyag pontos tulajdonságainak ismerete, így az alkalmazás során fellépő igénybevételek kielégítéséhez szükséges az anyagtervezés, amely például polimer keverékekkel érhető el, ekkor ugyanis az alkotók jó mechanikai és fizikai tulajdonságai összeadódhatnak.

A polimer keverékek olyan két vagy több fázisból álló rendszerek, amelyekben az alkotók kedvező tulajdonságai egyesíthetők. Amennyiben az alkotók elegyednek egymással, homogén szerkezet alakul ki, vagyis az alkotók egymással összeférhetőek (kompatibilisek), ezáltal a kialakult rendszert egyetlen átalakulási hőmérséklet (T_g) jellemzi. Ilyen anyagpár tipikusan a PC/ABS, melyek kompatibilitása kiváló. Ezt a keveréket főként műszaki cikkek burkolatánál használják. Egy kétkomponensű polimer rendszert akkor nevezhetjük összeférhetőnek, ha a Gibbs-féle szabadenergia változás (1) negatív és ha ennek második deriváltja pozitív.

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

ahol ΔG a Gibbs-féle szabadenergia változás, ΔH a keverési entalpiaváltozás és ΔS a keverési entrópia változás. Az egyenlet lehetséges kimenetelei az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra Gibbs féle szabadenergia változás esetei polimer keverékekre [4]

Két polimer keveréke tehát akkor homogén, ha a rendszer szilárd állapotban is egyetlen fázist alkot, ez általában. Ez nagyon kevés anyagpárra jellemző – a molekulaláncok eltérő funkciós csoportjai miatt-, az 1. táblázat 11 hőre lágyuló polimer esetében mutatja az elegyedést. Heterogén esetben a két anyag T_g átalakulási hőmérséklete külön-külön is befolyásoló tényező. A fázisszétválás a morfológia vizsgálatakor jól megfigyelhető mikroszkóp alatt, ráadásul befolyásolhatja az optikai tulajdonságokat is [4].

	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 Hőre lágyuló polimer keverékeinek összeférhetősége [4]

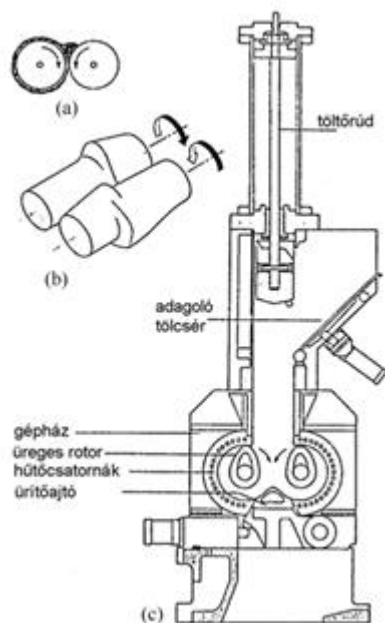
1: jól keveredő, 6: inkompatibilis

2.1.1. Polimer keverékek előállítása

A polimer alapanyaghoz por, illetve granulátum formájában lehet hozzájutni. Ezekhez a megfelelő anyagi tulajdonságok (pl megfelelő szín elérése, vagy a könnyebb feldolgozás elősegítése) érdekében különböző adalékanyagokat lehet társítani. Ennek módja a keverékképzés, amelynek két fő alaptípusa van, az egyik a száraz (por) keverékes (dry blend), a másik az ömledék keverés, ez utóbbi magasabb hőmérsékleten történik [5]. A szobahőmérsékleten kevert száraz porkeveréket (kompaund) általában egyből a fröccsöntőgépbe, vagy az extrúderbe adagolható. Az ömledékállapotban összekevert blendet vagy lehűtés nélkül, még ömledékállapotban táplálják be közvetlenül a feldolgozó gépsorba, vagy az elkészült keverékből granulátum készül és később kerül feldolgozásra.

A keverékek létrehozása során fontos szempont még, hogy a keverékképzés disztributív, vagy diszperzív. A diszperzív keverékképzés esetén jó kohéziós kapcsolatról, azaz összetartó komponensek jelenlétéről van szó, melyek intenzív keverése méretcsökkenéssel jár. A disztributív keverés során pedig csupán egyenletesen eloszlato, a komponensek méretcsökkentésével nem járó, extenzív folyamat következik be.

A blendék készítésekor az anyagot plasztifikálni kell a komponensek egyenletes eloszlása érdekében. Ez a folyamat megvalósítható szakaszos, illetve folytonos működésű üzemben is. A szakaszos üzemi keverésre a gyakorlatban hengerszék használható, ami két közeli, azonban még nem érintkező, egymással szemben forgó, kissé eltérő fordulatszámú fűtött hengerből áll. Mivel nem azonos a kerületi sebesség, egy állandó puffer keletkezik, ami segíti az egyenletes elkeveredést, ráadásul biztosítja az egyenletes anyagvastagság létrejöttét is. A hengerszékhez hasonló az úgynevezett Banbury típusú (2. ábra) belső keverő, aminek fő gépeleme szintén egymással szembeforgó, temperálható, azonban büttyösre formált hengerpár, amely egy ugyancsak temperálható, fekvő 8-as alakú házban forog. A két egymással szemben forgó henger nagy nyírást biztosít az anyagban, ennek köszönhető a keveredés. Ez az eljárás meglehetősen idő- és energiaigényes [4].



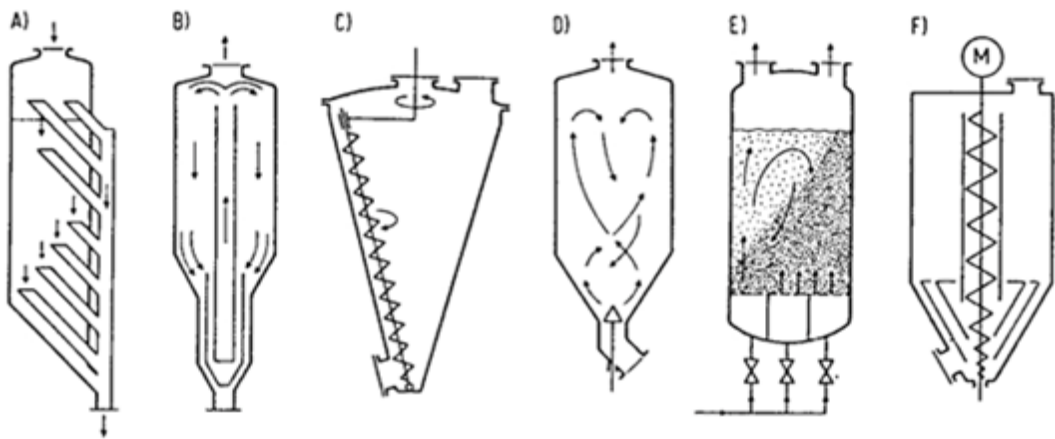
2. ábra Banbury típusú belső keverő viszkózus polimer diszperzív keveréséhez [4]

a) hengerszék b) Banbury henger c) belső keverő

A fentiekkel ellentétben folyamatos üzemi ömledékállapotban keverékképzésre alkalmas berendezés az extruder. Elterjedt ipari megoldás a blendék készítésére, azonban számolni kell az anyag esetleges degradációjával, hiszen ebben az esetben is, ahogy az előzőeknél, nagy nyíróerő ébred, ami a későbbi feldolgozás során befolyásolhatja a blend minőségét. Az extruder lehet egy vagy kétcsigás, az utóbbi esetében a csigák foroghatnak azonos és ellentétes irányban. A legnagyobb nyíróerő akkor ébred, ha a két csiga egymással szembe forog. Ha az elkeveredés még ebben az

esetben sem elégséges, az extruder kiegészíthető speciális keverőelemekkel. Az egyik lehetőség a statikus keverő alkalmazása, ami az extruderhenger végébe kerül beépítésre, és zeg-zugos kialakítása készíti hirtelen irányváltásra az ömledéket. Már 7-8 irányváltással is kiemelkedő homogenizálás érhető el, azonban az extruder végén a nyomásesés jelentős. A másik lehetőség, ha a csiga homogenizáló zónáján alakítanak ki keverőelemeket (pl. ananász keverő), és ez készíti az ömledéket irányváltásra. Ennek a kialakítása nehézkes, és töltő- illetve erősítőanyagokat tartalmazó keverékekhez nem ajánlott [6].

A száraz keverékek keverőgépei (3. ábra) az előzőektől eltérnek, a keveréshez vagy gravitációt, vagy keverőhatású gépelemeket, például csigát használnak. Ide tartozik örvénykeverő is, mely por és folyadék halmazállapotú anyag keverésére egyaránt alkalmas. Ezek a berendezések magas fordulatszámon üzemelő keverőlapátokkal rendelkeznek, amik az anyagot nagy sebességű örvénymozgásra kényszerítik, ezáltal a keverék csaknem folyadék jellegű állapotban lebeg. Az eltolás elvű keverők ezzel szemben alacsony fordulatszámon üzemelnek. A függőleges keverősílokban a keverés pneumatikus vagy mechanikai úton is megvalósítható [7].



3. ábra Száraz porkeverékek és granulátum-tároló keverősílok [7]

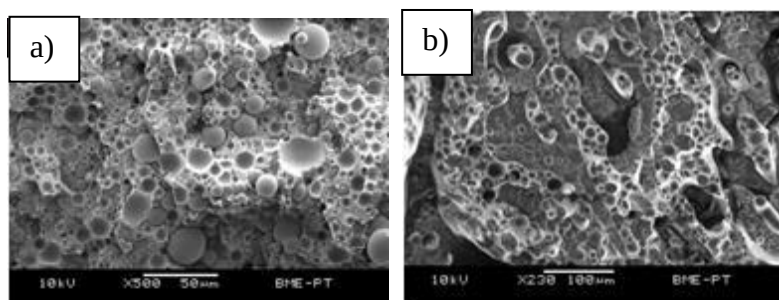
- A) gravitációs siló „orgonasíp” keverőrendszer, B) granulátumkeverő pneumatikus átkeveréssel, C) vándorcsigás keverővel ellátott kúpos siló (porhoz), D) sűrített levegővel működő keverő (porkeverékekhez), E) örvénylő porkeverés, F) függőleges keverőcsigás siló]

2.1.2. A polimer keverékek tulajdonságai

A polimer keverékek előállítása során új polimerek állíthatók elő, amik jól beállítható, célzott tulajdonságokkal rendelkeznek. Ez lényegesen olcsóbb és gyorsabb eljárás, mint az új szintetikus polimerek előállítása. Mivel az esetek nagy részében a polimer keverékek

alkotói inkompatibilisek egymással, többfázisú heterogén rendszer alakul ki. Az inhomogén rendszerek fizikai és mechanikai tulajdonsága nagymértékben függ a kialakult morfológiai szerkezettől, ami gyakran durva szerkezetű, és gyenge határfelületi adhézióval jellemezhető, ami a keverék szerkezeti szempontjából nem előnyös, mivel a kis felületi adhézió miatt romlanak a keverék mechanikai tulajdonságai [8].

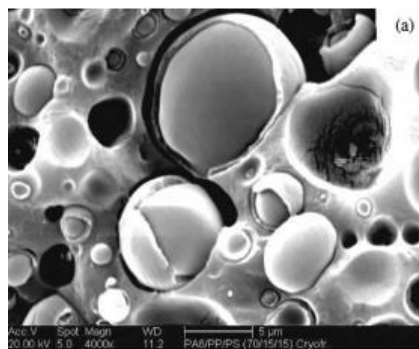
Kétfázisú heterogén polimer keverékek esetén a kialakuló morfológiai szerkezet lehet folytonos, illetve diszpergált szerkezet. A 4. ábrán látható egy ilyen anyagpár kialakult morfológiájának a SEM felvétele. A 4/a ábrán egy 20/80 V% PET/HDPE keverék látható, megfigyelhető, hogy a nagyobb részarányú (HDPE) alkotja a folyamatos fázist, amelyben a kisebb részarányú PET fázis diszpergált gömbök formájában helyezkedik el. Azonban ugyanezekből az alkotókból készült 60/40 V% arányú polimer keverék esetén (4/b. ábra), jól látható a különleges, úgynevezett IPN (Interpenetrating Network), amely egymásba hatoló kettős-folytonos szerkezetet jelent [9]. Az IPN szerkezetnél a keveréket alkotó két fázis szálakból álló egymáshoz hálószerűen kapcsolódó szerkezetet alkot, ellentétben a többi összetételnél megfigyelhető diszpergált szerkezettel, ahol a befoglaló mátrixban a kisebb arányú résztvevő fázis gömb, vagy rúdszerű formában van jelen. Az egyes alkotók térfogat százalékos arányát vizsgálva a különböző blendék esetén 40-50%-os PET tartalomig nem látható jelentős eltérés a keveréket alkotó anyagok húzószilárdságában, viszont ekkor a fázisinverzióknak köszönhetően ugrásszerűen megnő a húzószilárdság. Ilyesfajta fázisinverziót nem csak a PET képes létrehozni, hanem egyéb anyagok, többek között az általam felhasznált másik anyag, a PS is [10].



4. ábra PET/ PE keveréke a) 20/80 V% b) 60/40 V% [9]

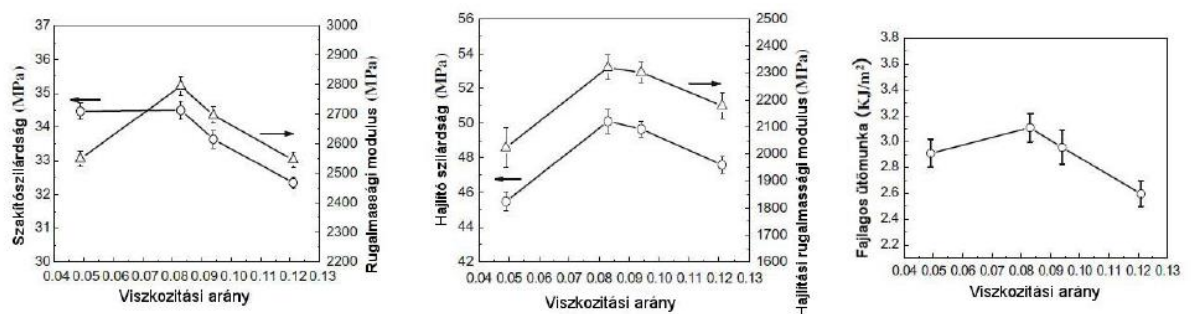
Azonban ha háromfázisú keverékekről van szó, akkor a kialakult morfológiai szerkezet rendkívül összetett lehet. A kialakult szerkezet alkothat hármas folytonos szerkezetet, vagy lehet kettős folytonos úgy, hogy a harmadik fázis valamelyik komponensben diszpergált, esetleg kettős folytonos úgy, hogy a harmadik fázis mindkét

komponensben megtalálható diszpergáltan, vagy előfordulhat még esetleg a két komponens határán. Lehet a rendszer diszpergált, ekkor az egyik anyag alkotja a mátrixot, a másik kettő pedig benne diszpergáltan helyezkedik el. Ez utóbbi történhet úgy, hogy a folytonos szerkezetben külön-külön diszpergálódnak, vagy az egyik betokozza a másikat. Az 5. ábrán látható egy háromfázisú keverék esetén létrejövő betokozódás. A határfelületi adhézió, és ezáltal a létrejövő feszültségértékek miatt a diszpergált részben a külső fázist alkotó alapanyag mindig arra törekszik, hogy a másik két anyagot elválassza egymástól, ez csak úgy valósítható meg, ha a mátrixban a másik diszpergált fázist körülveszi.



5. ábra 70PA6/15PP/15PS blend elektronmikroszkópos felvétele [11]

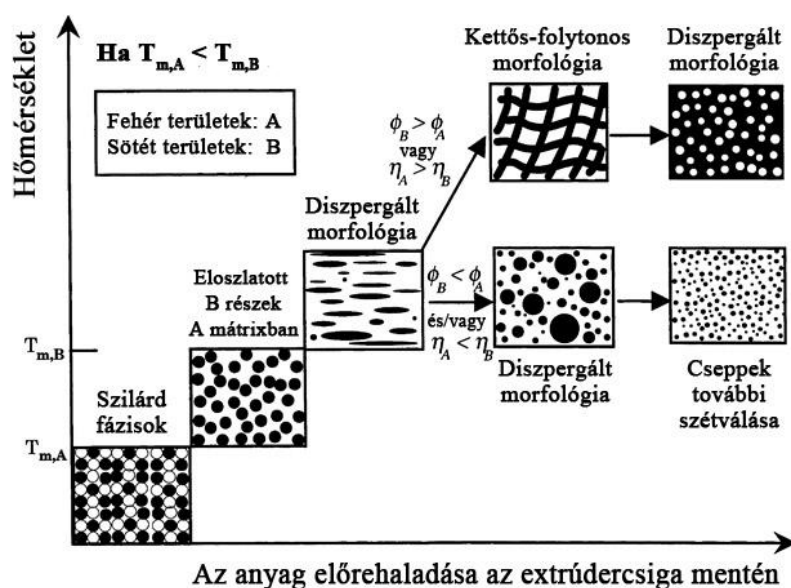
A polimer keverékek mechanikai tulajdonságaira a morfológiai szerkezeten túl a viszkozitás is hatással van (6. ábra). A nagyobb szakítószilárdság elérése érdekében a feldolgozás során kisebb viszkozításra van szükség. A műszaki polimerek rendszerint olyan feldolgozástechnikát igényelnek, amelyben az alapanyagot még granulátum állapotban gondosan szárítani kell a feldolgozás előtt, ha valamelyik komponens higroszkopikus tulajdonságokat mutat, ugyanis a nedvesség a feldolgozás során ronthatja a termék minőségét, hosszú távon pedig a berendezés is károsodhat [12].



6. ábra: PET/iPP keverék mechanikai tulajdonságai a viszkozitási arány függvényében [13]

Ha a keverékképzés folyamán az egyik alkotó nagy viszkozitású, a másik pedig kicsi, akkor a jobb folyóképességű komponens hamarabb veszi fel a mátrixstruktúrát, míg a kisebb viszkozitású komponens elnyújtott csepp vagy rúd formájú diszpergált fázis marad. Az ezek döntő többségében a kétfázisú polimer blendek morfológiai szerkezete nem egyensúlyi, így a feldolgozás során megváltozhat a keverék struktúrája. A 7. ábrán látható egy extrúdercsiga mentén kialakuló morfológiai szerkezet az alkotók hőmérsékletének függvényében [8].

Lee kutatásai során arra jutott, hogy az extruderen történő kompaundálás során érdemes figyelembe venni, hogy a részben kristályos polimerek olvadási hőmérséklete (T_m) és a kritikus folyási hőmérséklet (T_{cf}) amorf polimereknél eltérő. A T_{cf} hőmérsékleti pont értéke nagyjából 55°C -kal magasabb, mint az üvegesedési hőmérséklet (T_g), ahol az amorf polimer már ömledéknek tekinthető $T \geq T_{cf}$. Így értékelte, hogy a kialakuló blend morfológiája nagymértékben függ az alkotók közötti T_{cf} és T_m hőmérsékletek különbségeitől és viszkozitásuktól, pontosabban ha T_{cf} felett van a keverék hőmérséklete, akkor egy jobban fejlett morfológiát alakítottak ki a keverékek [14].



7. ábra Az extrúdercsiga mentén kialakuló morfológiai szerkezet eltérő hőmérsékleteken [14]

A kompatibilizálószerrek jelentősen módosítják a kialakult morfológiai szerkezetet. A megfelelően kompatibilizált keverékek esetében a fázisok mérete csökkenthető a kompatibilizálószer hozzáadásával, ami jobb határfelületi adhéziót biztosít a fázisok között és a keverékben homogénebb morfológia alakulhat ki [15, 16].

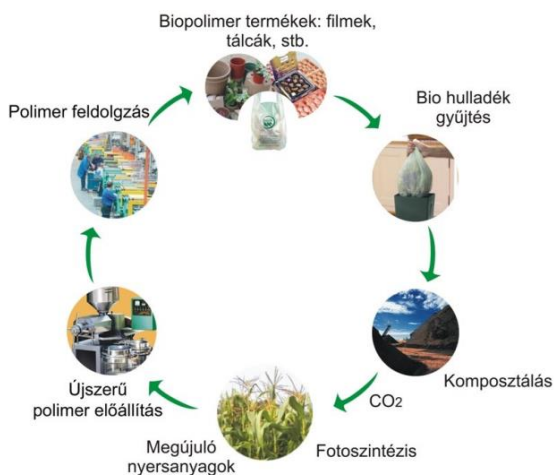
2.2. Természetes polimerek

A fenntartható fejlődés szem előtt tartása nem csupán a szelektív hulladékgyűjtéssel és a károsanyag-kibocsátás csökkentésével tehető meg, hanem a mindennapi használati eszközök anyagának, gyártástechnológiájának és felhasználásának is illeszkednie kell ebbe a gondolkodásmódba. Az iparban alkalmazott technológiák folyamatos fejlődése és a kutatások mára lehetővé tették, hogy a mindennapjaink részét képező műanyag tárgyak alapanyaga kőolaj helyett valamilyen megújuló erőforrás legyen úgy, hogy a mechanikai tulajdonságaik ne maradjanak el az eddig alkalmazott fosszilis energiaforrásból előállított polimerektől.

A kőolajkészletek folyamatos csökkenése (és emiatt az árának növekedése), az emberiség fokozódó vágya a környezettudatosság területén, vagyis a lebontható műanyagok iránti igény is megkövetelte olyan műanyagok előállítását, amelyek alapanyaga megújuló erőforrásból származik, és emellett mennyisége kielégítő és állandó minősége fenntartható. A biopolimerek alapanyagának túlnyomó része mezőgazdasági eredetű (burgonya, kukorica, cukornád), amelyek bár korlátozottan, de elméletileg végtelen ideig elérhetők (az élelmiszeripar fenyegetése nélkül). [17]

2.2.1. Biopolimerek jellemzői

Biopolimereknek nevezzük azokat a polimereket, amelyeknek monomerjei valamilyen élő szervezetből származnak, előállításuk kevésbé terheli a környezetet, valamint megfelelő körülmények között képesek lebomlani, vagyis szerves alkotóira bomolva visszakerülni a természeti körforgásba úgy, hogy a környezetet nem terhelik a bomlás során keletkezett káros, mérgező anyagokkal. A biopolimerek általános életciklusa a 8. ábrán látható [18].



8. ábra Biopolimerek várhatóéletciklusa [18]

A biopolimereket felépítésük szerint a következőképpen csoportosíthatjuk:

- növényi vagy állati eredetű fehérje bázisúak
- poliszacharid bázisúak
- lignin alapúak
- fermentációval előállított biopolimerek (ilyen a PLA is) [19].

A lebontható polimereknek az előállításán túl számos előnye is bizonyítja jelentőségüket és elterjedésük fontosságát, például az, hogy a mai környezettudatos gondolkodásmód szerves részét képezi, hogy a termék „élete” végén (megfelelő környezetet biztosítva) csupán vízre, szén-dioxidra és humuszra, vagyis biomasszára bomlik. Életciklusuk szén-dioxid semleges, mivel az elbomlásukkor vagy elégetésükkor felszabaduló szén-dioxid mennyisége megegyezik annak a levegőnek a széndioxid mennyiségével, amely a biomassza felépítéséhez szükséges. Feldolgozásuk nem igényel más, bonyolultabb technológiát, mint a fosszilis alapú társaiké, ráadásul mechanikai tulajdonságaikban és árukban is a fosszilis alapú műanyagokkal versenyeznek. Orvostechikai alkalmazásra kiválóak, felszívódó implantátumok készülhetnek belőlük, műszaki célra pedig erősítőanyaggal alkotott kompozitjaik is kiválóan alkalmazhatóak [18, 20].

2.2.2. PLA

A politejsav (PLA, angolul: *polylactic-acid*) napjainkban a leginkább teret nyerő biodegradábilis, vagyis lebontható polimer. Legfőbb előnye a többi természetes alapú polimerrel együtt, hogy fosszilis energiaforrás helyett megújuló energiaforrásból származik, így a fenntartható fejlődést szem előtt tartva biztosítja a 'hagyományos' műanyagok tulajdonságait (mechanikai, optikai, stb.), mégis környezetbarát termékek gyárthatóak belőle.

A politejsav monomerje a tejsav, amely a természetben is megtalálható: emlősnél az izommunka következtében keletkező vegyület, ami az izomlázat is okozza. Ezen kívül tejben és tejtermékekben is a cukor tejsavvá alakul, továbbá az uborka, káposzta savanyítása is a tejsav képződésén alapul. A politejsavat laktidból gyűrűfelnylásos polimerizációval vagy tejsav monomerből (D,L- vagy L-) polikondenzációval lehet előállítani [21-23]. A politejsav ipari mennyiségű tömeggyártása annak következtében valósulhatott meg, hogy a korábbi igen drága eljárást (amellyel D,L-tejsavat, majd poli-D,L-tejsavat polikondenzációval lehetett előállítani), felváltotta a

takarmánynövényekből új technológiával kialakított L-tejsav gyártás, amiből a poli-L-tejsav hozható létre. A kétféle politejsav rövidítése PDLLA, illetve PLLA, attól függően, hogy a tejsav mely izomerjeiből származik [21,22].

A biopolimerek közül nem véletlenül terjedt el leginkább a PLA, hiszen tulajdonságaiban a poliészterrel (főleg PET) és a polisztirollal versenyzik. Remekül használható élelmiszerek csomagolására, mivel nem ereszti át az aromákat és ízanyagokat, átlátszó, olajnak és zsírnak egyaránt ellenáll és jó vízgőzáteresztő is. Feldolgozás szempontjából nem kell külön berendezés, hagyományos műanyag termékek gyártására használt gépekkel feldolgozható [24].

A politejsavnak és kompozitjainak továbbá igen sokrétűek az alkalmazási lehetőségei (9. ábra). Kiváló minőségű ruházati cikkek, kárpitok, paplanok, huzatok, egészségügyi termékek készülnek belőlük, amelyek jó nedvességáteresztők, kényelemben, szigetelésben és légáteresztésben is felülmúlják a PET szöveteket, gyorsan száradnak, nem igényelnek vasalást, valamint bőrrel érintkezve sem okoz irritációt [25].



9. ábra Politejsavból és kompozitjaiból készült termékek [25]

A politejsav mivel lebontható, ezért újrahasznosítása nehézkes, ha bekerül a többi, szintetikus műanyag közé, akkor azoknak az újrafeldolgozása során degradálódhat. Ezért a PLA újrahasznosítása merőben más, az újragyártáshoz előbb monomerekre kell bontani és újra polimerizálni, vagy komposztba helyezni ahol jó minőségű humusz képződik belőle. Fontos tehát a természetes műanyagok elkülönített gyűjtése és kezelése [26].

Sánchez és társa vizsgálta a PLA depolimerizációját. Katalizátornak zink-acetátot használtak, amellyel sikerült elérniük, hogy a PET/PLA vegyes hulladékból a PLA monomerjeire bomlott, folyadék állapotú lett, míg a PET nem reagált a közeggel, ezért szilárd halmazállapotú maradt, így le lehetett szűrni [27].

2.3. Polimerek szétválasztási lehetőségei

Az alábbiakban a műanyagok egymástól való szétválasztásáról írok. Az újrahasznosítás szempontjából ez nagyon fontos művelet, ugyanis nagy tisztaságú fázisokra van szükség, hogy a továbbiakban célzott, jól beállítható tulajdonságú, és jó minőségű terméket lehessen gyártani a reciklátumból.

2.3.1. Spektroszkópai eljárással történő szeparálás

Ez a módszer a sugárzás elnyelő és visszaverő képességen alapszik. A különböző anyagtipusok ez alapján a tulajdonságuk alapján egyértelműen beazonosíthatók. A különböző anyagcsaládok más-más hullámhossz tartományokat nyelnek el, illetve vernek vissza, ez alapján meghatározható az adott anyag, és annak pontos összetétele is, illetve a módszerrel leválaszthatóak a műanyagoktól eltérő más anyagcsaládok (pl. különböző fémek). Előnye, hogy különböző hullámhossz tartományokon (infravörös, látható fény, röntgensugárzás) elvégezhető (10. ábra), ráadásul teljesen automatizált folyamat, ezáltal gyorsabb és reprodukálható vizsgálatot eredményez, azonban a fekete színű termékek beazonosítása legtöbb esetben problémát okoz (ez főleg az autóiipari termékekre jellemző). Az anyagok felületén lévő különböző szennyeződések tovább ronthatják a detektált spektrumokat, amelyek tovább ronthatják a szétválasztás eredményét, illetve bizonyos műanyagokat nem lehet ezzel a módszerrel szétválasztani. A szétválogatás hatásfoka kb 95%-os [28, 29].



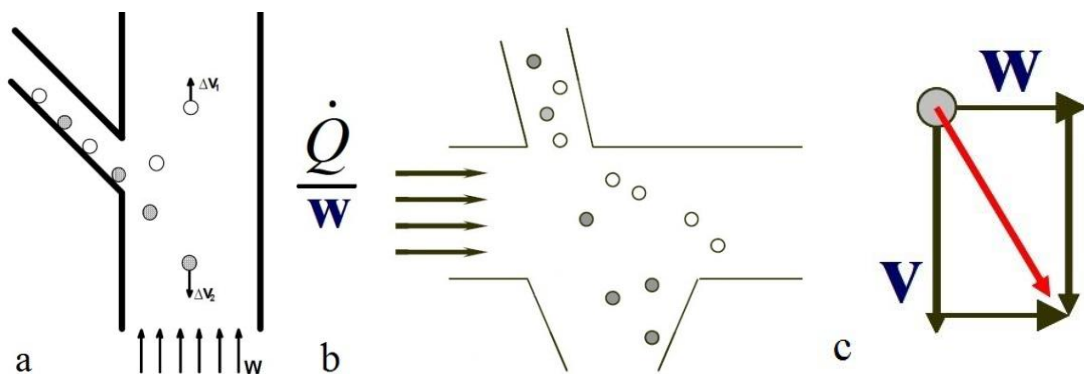
10. ábra Spektroszkópiával történő válogatás [29]

2.3.2. Sűrűségkülönbség szerinti szétválasztás

Az alkalmazott közeg szerint a sűrűségkülönbség elvén történő szétválasztásnak két típusa van: a száraz, illetve a nedves közegű szétválasztás. Előbbi szétválasztás történhet száraz áramkészülékekben, vagyis légszérrel, légülepítőgéppel és aerocsatornában. A

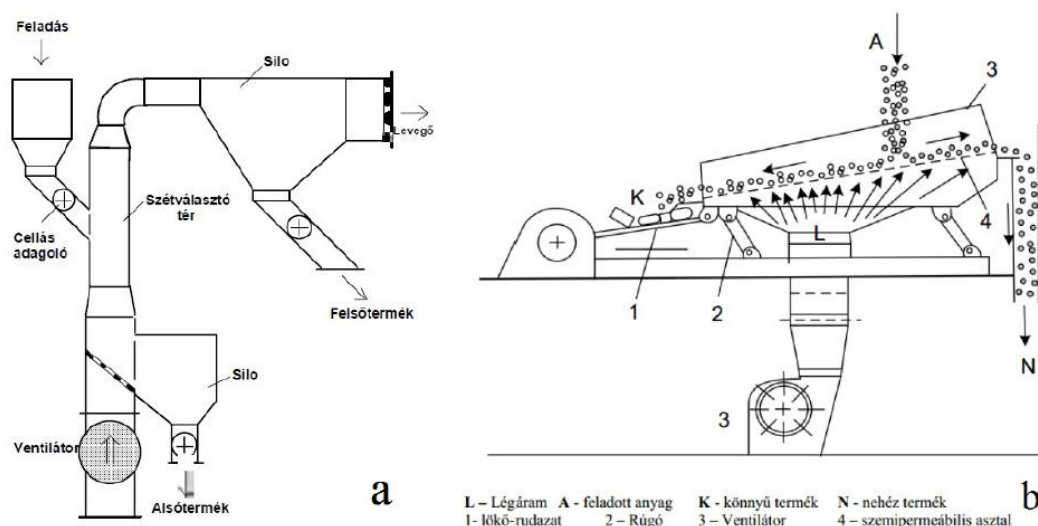
nedves közegű berendezések felépítése ezekkel megegyező elvű, csupán az alkalmazott közeg a különbség az üzemeltetés során. Tehát nedves áramkészülék lehet: nedves áramkészülék, nedves szűr, ülepitőgép és nedves csatorna, ezeken kívül használnak még nehézközeget és magnetohidrosztatikus készülékeket is, amelyek szintén a sűrűségkülönbség elve alapján működnek [12].

A közegáramban történő szétválasztás elsősorban a műanyag szemcsék eltérő süllyedési sebességeitől függ. Száraz közegű elválasztás esetén a berendezés által biztosított légáram iránya a szemcsék süllyedési végsebességéhez viszonyítva lehet ellen- és keresztáramú [12]. Ellenáramoltatású berendezések esetén a szemcsék mozgását a süllyedési sebességvektor (v) és a közegáram sebességvektorának (w) eredője határozza meg. Amennyiben $|v| > |w|$, tehát a süllyedési sebességvektor nagyobb, mint a légáram sebességvektora, akkor a szemcse leülepedik. Viszont ha a légáram sebességvektora nagyobb a süllyedési sebességvektornál, azaz $|v| < |w|$, akkor a közeg magával ragadja a szemcséket. Ha pedig $|v| = |w|$, akkor a szemcsék lebegnek (11.(a) ábra). Keresztáramú berendezések esetén annyiban változik a működési elv (11.(b) ábra), hogy a közegáram sebességvektor és a süllyedési sebességvektor eredője határozza meg a szemcsék mozgását (11.(c) ábra). Keresztáramú készülékeket gyakran alkalmaznak autó- és építőipari hulladékok szelektálásához a könnyű frakció leválasztására. Megvalósítható vele három- vagy annál többkomponensű válogatás is [12]. A száraz berendezésekkel történő szétválasztási eljárások esetén fontos, hogy a szétválasztandó szemcsék mérete közel azonos legyen. Ugyanis azonos komponensű szemcséknél a nagyobb méretűek gyorsabban, míg a kisebb méretűek lassabban mozognak, ezért a 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 [30].



11. ábra a) Ellenlégáramú szétválasztás működési elve, b) a keresztlégárammal történő szétválasztás működési elve, c) a sebességvektorok eredője [12]

A 12/a ábrán egy kéttermékes ellenlégáramú szeparáló berendezés látható. Az anyagáram feladása után a szétválasztandó műanyagok a szétválasztó térbe kerülnek, ahol a ventilátor nagy légáram segítségével szétválasztja a szemcséket. A nehezebb frakció lesüllyed, és egy silóba kerül, majd egy adagolón keresztül távozik a gépből, ezzel szemben a könnyű frakció a légárammal együtt felfelé megy a felső silóig, és egy csövön keresztül elhagyja a berendezést. A légszér (12./b ábra) működési mechanizmusa hasonló az ellenlégáramú gépéhez, ugyanis légáramot ebben az esetben is egy ventilátor biztosítja, amely lebegteti a kisebb sűrűségű szemcséket, így azok a lejtő irányában lefelé távozni tudnak a szérasztalról. Eközben a nagyobb sűrűségű szemcséket a légáram nem tudja felemelni, így az asztalra ülepednek, és az asztal vibrálásának köszönhetően a lejtőn felfelé haladva hagyják el a berendezést. A légszéreket széles körben alkalmazzák, használják a műanyagokon kívül (pl. a PET palack és a HDPE kupakjának darálékból történő szétválasztására) elektronikai hulladékok elválasztására, és faforgácsból fémek kinyerésére [12,30].



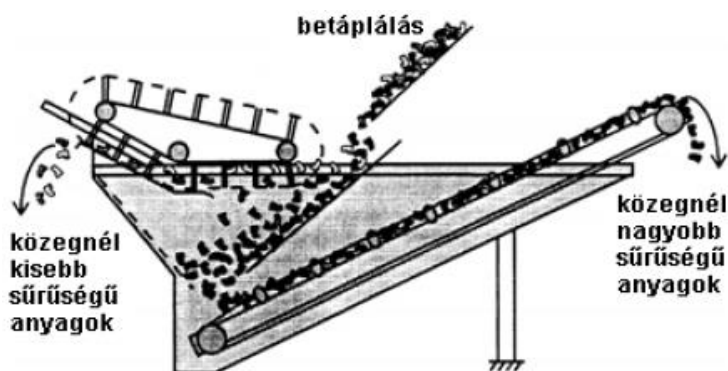
12. ábra a) Ellenlégáramú szétválasztó berendezés, b) kéttermékes légszér működési elve [12,30]

A légülepítő gép alkalmazási területe közel azonos a légszérével, mivel kiválóan alkalmas szilárd települési hulladékból műanyagok és fémek szelektálására. A gép működési elve, hogy a szitára adagolt szemcséket periodikusan fel-fellazítja, és visszaülepíti, ezáltal a szemcsék sűrűség szerint rendeződnek. A nagyobb sűrűségű szemek lesüllyednek a készülék aljára, míg a kis sűrűségűek felúsznak a tetejére. A fellazításhoz vagy a szita, vagy a közeg pulzáló mozgása szükséges [12].

Super és társai kísérletet tettek sűrűségkülönbség szerinti szétválasztásra, szén-dioxid (CO_2) és kén-tetrafluorid (SF_6) felhasználásával. A kritikusnál nagyobb nyomás,

azonban még a kritikusnál alacsonyabb hőmérséklet révén a gázok közel szuperkritikus állapotba kerültek, így viszonylag tág határok között is jól szabályozhatóvá vált a gázok sűrűsége ($0,77\text{-}1,7\text{ g/cm}^3$). A nagy nyomáson a gáz halmazállapotot vált és cseppfolyós állapotban van jelen, akárcsak egy nedves közeg és ezáltal a nála kisebb sűrűségű anyag felúszik, míg a nagyobb lesüllyed. A túlnyomás megszűntével visszaalakul gáz halmazállapotba, eközben a folyadékállapotban beillesztett rosta felfogja a lebegő részeket. Ráadásul a darálék felülete sem marad nedves, mert az is gáz fázissá alakul. Ezt az eljárást kihasználva a közel azonos sűrűségű PVC/PET keverék szétválaszthatóságát vizsgálták. A kísérletekkel sikerült igazolni, hogy ilyen kis sűrűségkülönbség esetén is csak 3-5% szennyezőanyag jelenléte volt csak jellemző. Az eljárás alkalmas poliolefinok szétválasztására is, azonban az iparban nem elterjedt [31].

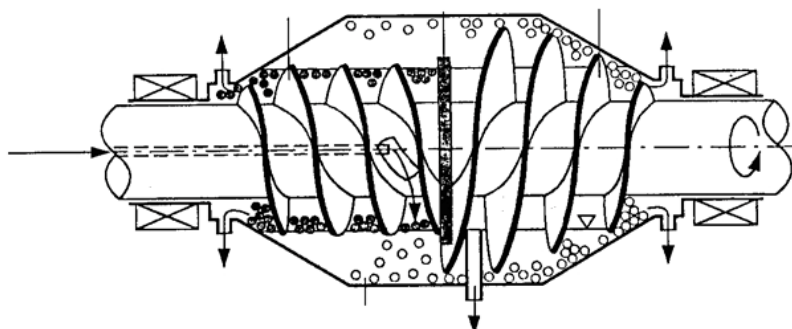
A nehézközeges berendezés is csupán egy tartályból és a kihordó szerkezetből épül fel. Főként a fémtartalmú hulladékok és műanyagok szeparálásakor használatos. A műanyagok egymástól való elkülönítéséhez CaCl_2 vagy ZnCl_2 -ot tartalmazó oldatot használnak, azonban a poliolefinok kinyeréséhez a tiszta víz is alkalmas közeg. A berendezés működési elve csak úgy, mint a fent említetteké, azon alapul, hogy a szétválasztandó anyagoknak eltérő a sűrűségük, ezért a közeg sűrűségének változtatásával lehet szabályozni a kihozataalt, a közegnél nagyobb sűrűségű anyagok lesüllyednek a tartály aljára, ahonnan a kihordó szerkezet szállítja el, míg a kisebb sűrűségű anyagok felúsznak a közeg felszínére, és a tartály túlfolyóján a közeggel együtt távoznak. Az eljárással nagy tisztaságú szétválasztás is elérhető, viszont a hatásfoka nagyban függ a szétválasztandó anyagok sűrűségkülönbségétől. A technológia elvi működése a 13. ábrán látható [32,33].



13. ábra Nehézközeges szétválasztás elvi felépítése és működése [32]

Abban az esetben, hogyha a darálék szemcséknek a mérete kisebb, akkor sűrűségkülönbség szerinti szétválasztás esetén fontos a szemcsékre ható erő növelése,

amely centrifugális erőterben lehetséges. Ez tipikusan centrifugákkal, örvénycsőekkel, ciklonokkal kivitelezhető. Ebben az esetben is az eljárás hatásfoka nagymértékben függ a szétválasztandó anyagok sűrűségkülönbségétől. A folyamatot viszont megnehezíti a különböző anyagú szemcsék összetapadása, ami rontja az eljárás hatásfokát [32]. Nehézközeges centrifugával a polimereket nagy tisztasággal lehet elválasztani egymástól. Ezzel a technológiával főként szelektív gyűjtésből származó műanyag hulladékokat szeparálnak. A centrifugákat az örvénycsővekhez és a ciklonokhoz viszonyítva jobb hatásfokkal lehet jellemezni, amely a nagyságrendileg nagyobb centrifugális erőnek, és a hosszabb tartózkodási időnek tulajdonítható. Működés közben a tartály nagy kerületi sebességgel forog és vele együtt a közeg is mozog a feladott műanyag hulladékokkal. A szétválasztandó hulladékszemcséket a centrifuga tengelyén juttatják be a közeggel együtt. A közeghez képest kisebb sűrűségű anyagot a tengelyen található kisebb átmérőjű csiga szállítja el, miközben a nagyobb sűrűségűek leülepednek a centrifuga falán, ahonnan a kihordásuk a nagyobb átmérőjű csiga segítségével oldható meg (14. ábra) [32,34].



14. ábra Nehézközeges centrifuga felépítése és működési elve

beadagolás: bal felől, bevezetés: bal felén közepén, lefölozés: a közegnél kisebb sűrűségű anyag
elválasztás baloldalon, a nehezebb jobboldalon [4]

Egyes polimereknek sűrűségi tartománya azonban átfedi egymást (pl. PET/PVC, ABS/PS, LDPE/PP), ezért ezeknél az anyagpároknál más elven működő eljárást kell alkalmazni, például flotációt vagy elektromos úton történő szétválasztást. Nagy sűrűségkülönbségek esetén azonban a művelet gazdaságos.

2.3.3. Flotációs szétválasztás

A flotáció, vagyis felúsztatás a közel azonos sűrűségű műanyag hulladékok szétválasztásához alkalmas eljárás (például: PET/PVC vagy ABS/PS). Az eljárás elve,

hogy az alapesetben hidrofób anyagok közül az egyik felszínét hidrofíl tulajdonságúvá változtatják hozzáadott kémiai adalékanyagokkal, ezért az adott közegben szétválaszthatóvá válnak. A szétválasztás során az emulzió átáramoltatott levegő, vagy gáz magával ragadja a hidrofób szemcséket és azok felúsznak a felszínre, ahonnan a habbal együtt egyszerűen lefölozhető, míg a hidrofíl darabok az oldatban maradnak. A folyadék fázis általában víz. ABS és PS szétválasztása során víz alkalmazható, mivel az ABS oldalcsoportjai hidrogénkötések kialakítására képesek a kémiai adalékanyaggal, ezért hidrofíllé válik és a közeg aljára süllyed, eközben a PS hidrofób marad és lebeg [30,31,35].

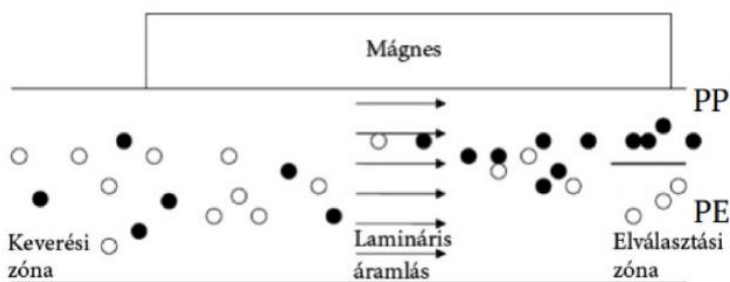
Takounsakdakun vizsgálta a flotációs eljárás hatékonyságát PET/POM/PVC keveréken. Először a POM-ot választották el a többi frakciótól, mégpedig egy semleges pH értékű kalcium-szulfát oldat alkalmazásával. Azt tapasztalták, hogy nedvesítő anyag hatására a POM kapcsolódási peremszöge kisebb, mint a PET és PVC fázisoké, ami azt eredményezte, hogy a POM hidrofíl a másik két komponenshez képest, így az oldatban maradt, míg a PET és PVC felúszott a szeparáló közeg felszínre. A közeg pH értékének megváltoztatásával a PET és PVC is szétválaszthatóvá vált, ugyanis ekkor a PET hidrofíllé vált, míg a PVC hidrofób maradt [36].

2.3.4. Mágneses alapon történő műanyag szétválasztás

Akárcsak a flotációs szétválasztásnál, itt is egy szabályozható sűrűségű közeg segítségével történik a szeparáció. Ezt a berendezést *Inverse Magnetic Density Separator* (IMDS)-nek nevezik (15. ábra), vagyis inverz mágneses sűrűség alapú szétválasztó berendezés. A mágneses szétválasztás előnye, hogy mágneses folyadék használható szétválasztó közegként. Ezeknek a folyadékoknak a sűrűsége nagyságrendileg hasonló a vízéhez, azonban gradiens mágneses mezőben a térfogatra ható erő a gravitációs és a mágneses erők eredője, vagyis együttes hatásuk, így megfelelő elrendezéssel befolyásolható az anyag súlya, ezáltal egy mesterséges, látszólagos sűrűség hozható létre [37].

Bakker és társai [38] ezt az eljárást poliolefinok szétválasztása esetén vizsgálták, ugyanis a lakossági szilárd hulladék nagy részét képezik a PP és PE műanyagokból készült termékek. Egy átlagos gépkocsi maradvány 70/30%-ban tartalmaz polipropilént és polietilént, azonban ezeknek legalább 97%-os tisztaságúnak kell lenniük a jó minőségű újrafelhasználhatóság érdekében. A kísérlet során a mágneses folyadékként víz alapú, nanométeres ferrit szemcséket tartalmazó szuszpenziót alkalmaztak. Ez az

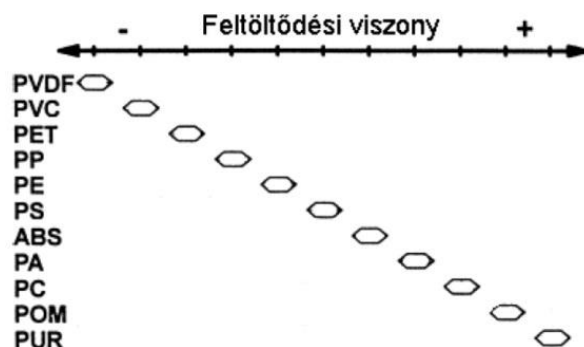
eleg nem jelent megterhelést a környezet számára ellentétben a hasonló eljárásoknál alkalmazott alkoholokkal és egyéb vegyszerekkel. Ráadásul az eljárás során igen jó minőségű, 98%-os tisztaságú PP-t nyertek vissza a többi eljáráshoz képest gazdaságosan. A szétválasztott közeg tisztasága növelhető, ha az elválasztási zónába egy köztes réteget helyezünk, így az ebbe bekerülő vegyes részt a későbbiekben újra át lehet áramoltatni, ezáltal a két szélső réteg tisztasága megnövekszik, amely a mágnes távolságától függően tetszőlegesen állítható.



15. ábra Az IMDS berendezés elvi működése [37]

2.3.5. Tribo-elektrosztatikus szétválasztás

A triboelektromos az a jelenség, amikor két különböző felületi jellemzőkkel rendelkező anyag egymással érintkezik, felszínükön töltések gyülemlenek fel, amelyek megindulnak a nagyobb elektronaffinitású polimer irányába. Vagyis a töltött részről a töltéssel nem rendelkező rész felé töltések áramolnak, amíg a műanyagok töltési állapota ki nem egyenlítődik. A töltések áramlása megvalósulhat elektron átvitelrel, ion transzferrel, illetve anyagáramlással. Az eltérő műanyag típusok eltérő töltöttségi állapotba kerülnek a szemcséik sűrűlódása során, így létrejöhet erősen negatív töltésű (PVC, PET, PTFE), és erősen pozitív töltésű is (PA, POM, PMMA) (16. ábra) [12, 39].



16. ábra Polimerek feltöltődési sorrendje [30]

A műanyagyszemcsék ütköztetés során eltérő töltöttségi állapotba kerülnek, ezáltal a különböző műanyagok szétválaszthatóvá válnak, ugyanis erősen negatív töltések is

kialakulhatnak, illetve erősen pozitívan töltöttségűek is. A tribo-elektrosztatikus szétválasztással a különböző töltésű anyagokat elektrosztatikus térbe vezetik, ahol polaritásuk szerint szétválogathatóak. A negatív töltésű darabok a pozitív elektródához, míg a pozitív töltésű részecskék a negatív elektródához vonzódnak, így a gépből kivezetve az esési irányuk módosul, ezáltal a különböző műanyagfajták külön edényekbe gyűjthetők (17. ábra) [30,39]. A tribo-elektrosztatikus válogatás, hasonlóan a többi mechanikai szétválasztási technológiához kedvező, mert az elválasztott anyag a folyamat során nem degradálódik. Gazdaságos, nagyon jó hatásfokú, és a szemcseméretre viszonylag érzéketlen eljárás. Problémát okoz azonban itt is az összetapadt szemcsék szétválasztása [30].



17. ábra Tribo-elektrosztatikus szétválasztás elvi sémája [30]

Zhenming nevéhez több eredményes kutatás kötődik a triboelasztikus szétválasztással kapcsolatban. A kutatások során először a HDPE/PP, valamint PP/PS keverékeket szétválaszthatóságát vizsgálták az eljárással, ahol azt tapasztalták, hogy forgó cső alkalmazása esetén a részecskék töltődése nem volt kielégítő, ezért bordázott csövet alkalmaztak a későbbiekben, viszont ekkor a szemcsék a cső falára és a bordákra tapadtak fel. Ezek után próbálkoztak vibrációs készülékekkel is, amelyeknél ismét az alacsony dörzsölődési frekvencia jelensége fordult elő [40].

2.3.6. Olvadási hőmérséklet szerinti szétválasztás

Megfelelő alternatíva lehet még a szétválasztásra a polimerek eltérő olvadási hőmérséklete alapján történő szétválasztás is. Orbán [41] említést tesz a polimerkeverékek egy olyan típusú szétválasztására, ahol a műanyagokat egy dobban forgatták meg. Kihasználva a két anyag eltérő olvadáspontját, olyan hőmérsékletet

állítottak be, hogy csak az egyik fázis került ömledékállapotba, míg a másik fázis szilárd maradt. Ez alapján a két műanyag szétválasztása kielégítő, azonban gondot okozott az ömledék fázis eltávolítása, így az iparban ezt az eljárást még nem alkalmazzák. Megoldást jelenthet azonban a problémára, ha a palást lyukacsos, ezáltal az ömledék kifolyik [42].

A tanszéken található szétválasztó berendezés is az olvadási hőmérséklet szerinti szétválasztás elvén működik centrifugális erőterben, így jelen dolgozat alapjául is ez a szétválasztási elvet alkalmaztam. A saját méréseim alkalmával a berendezésben olyan hőmérséklet értékeket állítottam be, hogy az összes komponens ömledékállapotban legyen, majd ezt követően a centrifugális erőterben a sűrűségkülönbségük alapján szeparálódtak.

2.4. Irodalomkutatás kritikai elemzése, célkitűzés

Az irodalomkutatás során nem találtam információt olyan szétválasztási eljárásról, amikor előzetesen ömledékállapotú keverésnek vetik alá az anyagot, tehát egy szemcsében megtalálható mind a két komponens, ezáltal a kialakuló sűrűség a két komponens közötti értéket veszi fel, így a sűrűség alapú szétválasztáskor nem kerülhet bele egyik frakcióba sem, hanem egy harmadik anyagban lesz, mint szennyező. Erre még nincs megfelelő szétválasztási módszer, ezért a kísérlet során ennek lehetőségét szeretném megvizsgálni.

Továbbá tapasztalataim szerint manapság az iparban legfeljebb egy vizes közeges szétválasztást alkalmaznak, azonban ennek nagy hátránya, hogy a szétválasztott frakció nedves, ezért szárítani kell, ami idő- és pénzvesztést okoz. Ezért a szétválasztási technológiák kapcsán olyan irányt kell venni, amely nem nedves közegben történik. Azonban, például az áramlásos szétválás során nem érhető el ugyanolyan jó minőségű szétválasztás, mint az előző esetben. A dolgozatomban pontosan ezekre a problémákra próbáltam komplex megoldást találni, az ömledékcentrifuga további fejlesztésével, megfelelő paraméterek beállításával nagy tisztaságú fázisokat lehessen szeparálni lehetőség szerint gazdaságosan. A mérések során ezért vizsgáltam, hogy az egyes keverékek megfelelő szétválasztásához milyen hőmérséklet és hozzá mennyi forgatási idő szükséges.

Továbbá a szétválasztási eljárásokkal kapcsolatban nem találtam arra vonatkozó információt sem, ahol a szintetikus polimerektől megpróbálták elválasztani a

természetes polimereket. Pedig a jelenlegi tendenciák szerint, ahogy növekszik a természetes polimerek előállítása, ez fontos lenne, ugyanis a lebontható polimereket külön kell kezelni, csak speciális környezetben bonthatóak le, szintetikus polimerrel keveredve viszont annak szennyezőjeként jelenik meg rontva a mechanikai tulajdonságait. Ezért a kísérlet során megvizsgáltam a természetes polimerek és szintetikus polimerek szeparálhatóságát is.

Lee és társai szerint [14] az extruderen képzett keverékek esetén a T_{cf} hőmérséklet segítette elő a jobb keveredést a fázisok között ezáltal stabilabb, reprodukálhatóbb lett a morfológia. Ezért vizsgáltam azt is, hogy a blendek szétválasztásánál mennyire játszik szerepet ez a körülbelül $+50^{\circ}\text{C}$.

3. KÍSÉRLETI RÉSZ

3.1. Felhasznált anyagok és mérési berendezések

3.1.1. *A kísérlet során felhasznált anyagok*

Az elegyedő keverékek homogén morfológiai szerkezetet alkotnak. Azonban a dolgozat során kifejezetten a nem elegyedő polimer keverékek szétválasztásával foglalkoztam, hiszen nem a szétválaszthatóság morfológiától függését, hanem a technológiai paraméterek megfelelő beállítását vizsgáltam.

A kutatás során felhasznált anyagok: NeoGroup által fejlesztett NeoPET 80 (M1-es melléklet) típusú PET sűrűsége $1,34 \text{ g/cm}^3$, a második szétválasztandó alapanyagfajta az Edistir N 1840 típusú PS (M2-es melléklet), melynek sűrűsége $1,05 \text{ g/cm}^3$, a felhasznált HPDE típusa pedig az Unipetrol által gyártott Liten MB 87 (M3-as melléklet), aminek a sűrűsége $0,955 \text{ g/cm}^3$.

A szétválasztás paramétereinek vizsgálatához 50/50 V% PS/HDPE és 50/50 V% PET/HDPE keverékeket készítettem referenciaként granulátulból (a továbbiakban primernek hívom), valamint az a termék életciklusát szemléltetve extruderrel bekevert blendet. A PET/HDPE keverékek esetében habosított PET-et is vizsgáltam, amely (sűrűsége $0,93\text{-}0,95 \text{ g/cm}^3$), hogy következtetéseket vonhassak le abból, hogy a megváltozott sűrűség változtatja-e a szétválás kimenetelét. A habosított PET alapanyag egy a Polimertechnika Tanszékén készített diplomamunka keretében felhasznált PET, reciklált ásványvizes palack darálékból származik.

A dolgozat elkészítéséhez megvizsgáltam a természetes polimerek szintetikus polimerektől való szétválaszthatóságát is. Ehhez a kísérlethez felhasznált HDPE alapanyagaként a szelektív hulladékgyűjtésből visszanyert kupakok darálékát használtam, természetes polimernek pedig az Ingeo 3052D típusú PLA-t (M4-es melléklet) alkalmaztam. A PLA tulajdonságaiban nagyon hasonlít a PET-hez, sűrűsége $1,24 \text{ g/cm}^3$.

3.1.2. Az ömledékcentrifuga működési elve

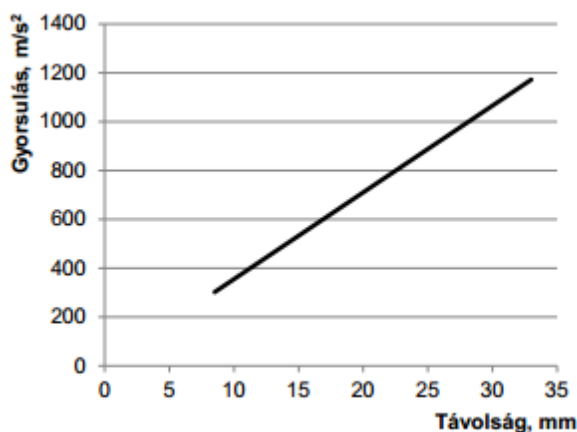
A kísérleteimhez egy polimer ömledékcentrifugát használtam, ahol a műanyagok szétválasztása ömledékállapotban történik, a berendezés által létrehozott centrifugális erőterben. A centrifugák három fő felhasználási területe:

- nem elegyedő folyadékok szétválasztása (emulzióbontás)
- folyadékokban elosztatott szilárd anyag elávolítása (kinyerés)
- nedves szilárd anyag mellől a felesleges folyadék eltávolítás (víztelenítés).

Működése a betáplálástól és az elvezetéstől függően lehet folyamatos, vagy szakaszos ütemű. A centrifugák fő egysége egy saját tengelye körül forgó dob, amely palástja lehet teli, vagy perforált. A centrifuga lehet függőleges, illetve vízszintes tengelyű. A mozgása során fellépő centrifugális erőter nagyságát tekintve több százszor vagy több ezerszer nagyobb a nehézségi erőterhez képest, ezért utóbbit elhanyagolhatjuk. Elmondható tehát, hogy a vizsgálandó, részben, vagy már teljesen ömledékállapotba került minta szétválasztása két látszólagos erő, a centrifugális erő (3.1) és a Coriolis-erő együttes hatásának következménye.

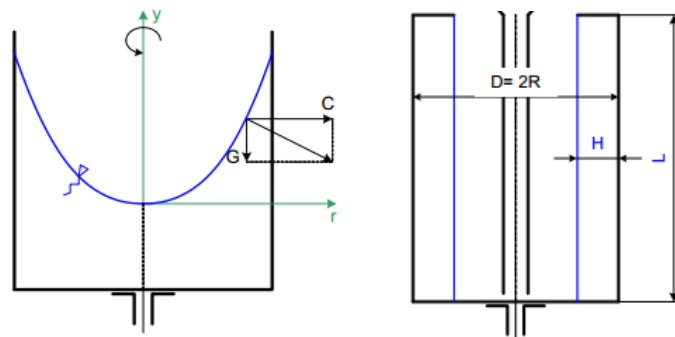
$$F = mr\omega^2 = m\frac{v^2}{r}, \quad (3.2)$$

A 18. ábrán látható, hogy egy percenként 1800 fordulatszámú centrifuga esetén mekkora az anyagra ható centrifugális gyorsulás nagysága a távolság függvényében. A fázisok szétválasztásának hatékonysága tehát függ az alkalmazott fordulatszámtól, illetve az ömledékcspepek méretétől, és az alkalmazott hőmérsékleti paramétertől is, amely hatással van az anyagok komplex viszkozitására és fajtérfogatára is.



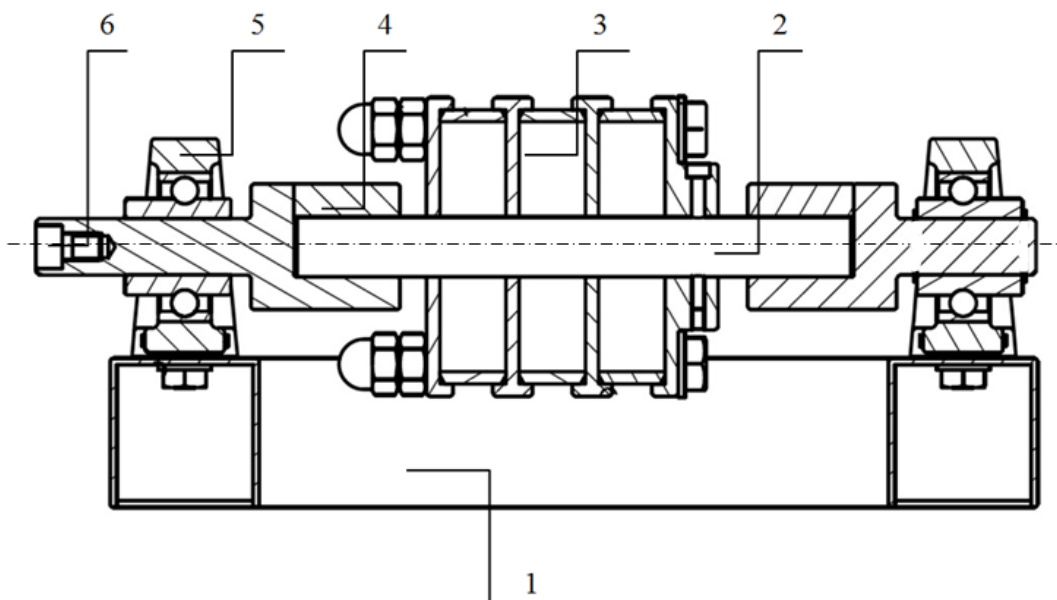
18. ábra 1800 1/perc fordulatszám esetén a cseppekre ható centrifugális gyorsulás nagysága a szétválasztó tartályban, a tengely középpontjától mért távolság függvényében [43]

Centrifugális erőterben függőleges tengely körül egyenletes szögsebességű forgás esetén a folyadék felszíne forgási paraboloidon helyezkedik el. Ez a felszín nívófelület akárcsak, ahogy a nehézségi erőterben nyugalomban levő víz vízszintes felülete is nívófelület, vagyis a felület minden pontján a potenciális energia azonos nagyságú. A nyugvó folyadék felszínéhez viszonyítva a paraboloid középpontjának lesüllyedése és a kerületi pontok felemelkedése egyenlő egymással. A gyakorlatban a függőleges tengelyű centrifugák fordulatszáma akkora, hogy a térrő vízszintes összetevője sokszorosa a függőleges összetevőnek. A paraboloid alakú folyadékszint már néhányszoros vízszintes térrő esetén is kis nyílású kúp palástjával közelíthető. Még nagyobb szögsebesség esetén a szintfelület függőleges koaxiális hengerpalásttá (19. ábra) fajul el.



19. ábra balra: forgási paraboloid, jobbra: koaxiális henger [44]

A laboratóriumi szétválasztó ömledékcentrifuga vízszintes tengelyelrendezésű, tanszéki saját fejlesztés, elvi felépítése a 20. ábrán látható.



20. ábra Szétválasztó ömledékcentrifuga elvi vázlata: (1) hegesztett állvány, (2) tengely, (3) három szétválasztóhenger, (4) tengelykapcsoló, (5) hőálló csapágy, házban, (6) kapcsolódás elektromos meghajtáshoz

3.1.3. Alkalmazott berendezések

A keverékeket Labtech gyártmányú extruder gyártósoron állítottam elő, amely áll egy Labtech scientific LTE 26-44 típusú moduláris ikercsigás extruderből (21. ábra), kísérő berendezései pedig: Labtech automata vízszint-szabályozású hűtőkád, Labtech LZ-120/VS típusú granuláló berendezés. Az extruder csigáinak L/D aránya 40, az átmérőjük 26 mm.



21. ábra Labtech scientific LTE 26-44 típusú moduláris ikercsigás extruder

A beállított hőmérsékleti paraméterek az 5. 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.

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

Z11 (szerszám)	Z10	Z9	Z8	Z7	Z6	Z5	Z4	Z3	Z2	Z1 (garat)
275°C	275°C	270°C	270°C	265°C	265°C	260°C	260°C	255°C	250°C	250°C

2. táblázat Az extruder beállított gyártási paraméterei
felső sor: PS/HDPE; alsó sor: PET/HDPE keverék esetén

Mivel az előkészített keverékek nagy része tartalmazott PET-et, ezért az extruderbe helyezés előtt szárítani kellett, mivel a PET felveszi a levegő víztartalmát, és ez 275°C-on kigőzölögve a nedvesség lágyító hatása, illetve a PET hidrolitikus degradációja miatt

a negatív irányba mozdította volna el a keverék tulajdonságait. A PET granulátumot a keverékképzés előtt 160°C-on szárítottam 6 órán keresztül a szárítószekrényben (22. ábra). A pontos mennyiségek kiméréséhez a laboratóriumban található mérleget használtam, ami 5 század gramm pontossággal képes meghatározni a tömeget.



22. ábra Heraeus UT6 levegőcirkulációs szárítószekrény

A kísérlet további részeként a blendekeket, és a primer keverékeket az ömledékcentrifugába (23. ábra) helyeztem, mindegyik keverékből 50 grammot. A berendezés előkészítését Loctite 770 NC formaleválasztóval végeztem, hogy könnyebb legyen a már szétválasztott minták kiemelése. A berendezést 60 percig a kemencében tartottam, hogy megfelelően átmelegedjen, majd ezután hornyolt tengelyvégre csatlakoztattam az elektromos hajtást, és adott ideig hőntartás mellett pörgettem. Az elektromos hajtás a mérések során egy Hitachi fűró volt (24. ábra) amelynek állítható a fordulatszáma, üresjárási állapotban 2900 1/perc. A tengely és a fűró közti alakkal záró kapcsolatot egy egyenes szárú imbuszkulccsal biztosítottam.



23. ábra Tanszéki szétválasztó berendezés



24. ábra Hitachi FDV VB2 típusú ütvefűró

A keverékeket a különböző hőmérsékleten eltérő pörgetési idővel vizsgáltam. A kemencéből (25. ábra) kivéve folyamatos pörgetés mellett levegőn hűtöttem, a már szobahőmérsékletű szerkezetet szétszereltem és a mintákat eltávolítottam.



25. ábra Nabertherm típusú kemence

Az optikai mikroszkópos vizsgálathoz (26. ábra) először a mintákat polírozni kellett. A Struers típusú polírozógéppel (27. ábra) 320-as, 1000-es, 2400-as finomságú csiszolópapíron végeztem. A durva polírozás miatt a mikroszkópi felvételek enyhén karcosak, azonban a szétválás minőségének vizsgálhatóságát ez nem befolyásolja.



26. ábra Struers automata polírozógép



27. ábra Olympus BX51M mikroszkóp

3.2. Mérések kiértékelése

A mérések során alapvetően a szétválasztási hőmérséklet és a hozzá tartozó pörgetési idő meghatározása volt a cél. Ehhez a következő paraméterek szerint végeztem kísérleteket: 340°C-ról 20°C-onként egészen 240°C-ig csökkentettem a hőmérsékletet, a

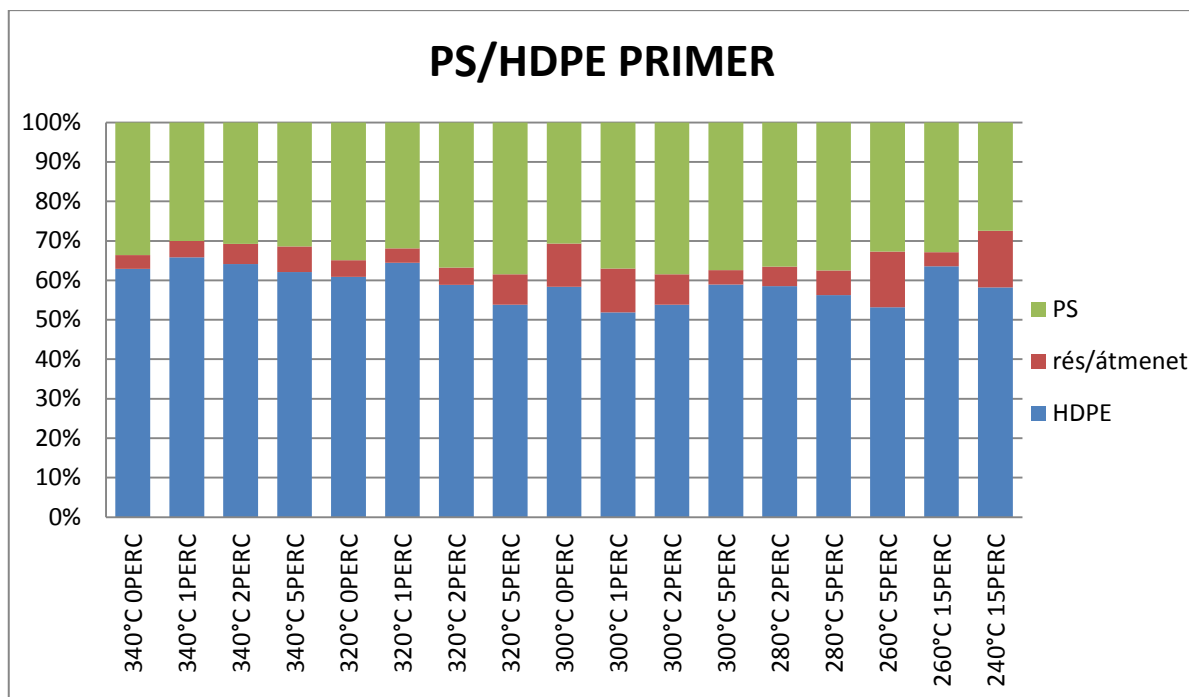
pörgetési idők pedig az egyes hőmérsékleti pontokon rendre 0, 1, 2, 5 és 15 perc volt. Természetesen ahol már látható volt egyértelműen a szétválás, azon a hőmérsékleti ponton nem folytattam a mérést (például ha 340°C-on szétvált a rendszer 0, 1 és 2 perc alatt, akkor nem készítettem el a 15 perces korongot).

Az így elkészült korongokat felpolíroztam, majd optikai mikroszkópos képeket készítettem róluk, és a hozzá tartozó szoftver segítségével meghatároztam az egyes fázisok vastagságát. Az egyes fázisok vastagságértékeit a korong hűsvastagságához viszonyítottam, és meghatároztam az adott hőmérsékleti értékeken azt a kritikus pörgetési időt, amelynél a szétválasztás már sikeres. Az alábbiakban az egyes keverékekhez tartozó minimális pörgetési idő-, ahol már sikeres a szétválasztás- a hőmérséklet függvényében mutatom be.

3.2.1. *PS/HDPE keverékek*

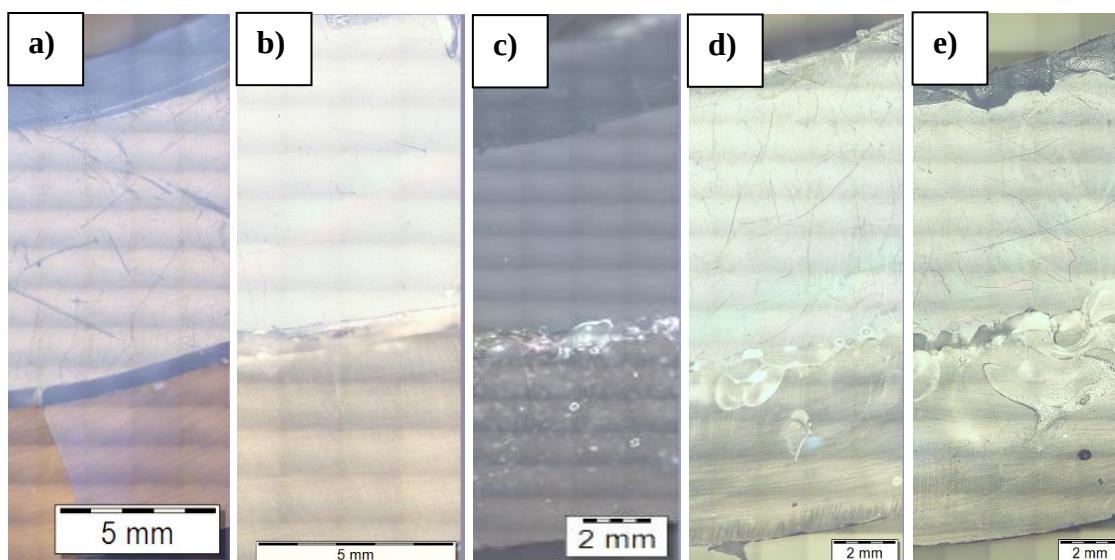
Ahogy a felhasznált anyagoknál is említettem, referenciaként készítettem granulátumból is száraz keverékeket, hogy megállapíthassam a blendék szétválasztása mennyire tér el a friss anyagok szétválasztásától. Először tehát a száraz „primer” keverékek szétválasztási hőmérséklet-idő tartományát mutatom be.

A 28. ábrán látható a szétválasztás összesített eredménye a 50/50 V% PS/HDPE keverékek esetében, az alkalmazott hőmérséklet, a forgatási idővel. Ezáltal nyomon követhető, hogyan változik a szétválasztás sikeressége a paraméterek változtatásával. Az egyes fázisok vastagságát a korong vastagságához viszonyítottam, így összevethető a szétválás eredményessége az átmeneti zóna alapján. Primer korongok esetén előfordult, hogy az átmeneti zóna számottevő annak ellenére, hogy a szétválás kifejezetten jónak mondható. Ez annak tudható be, hogy a két anyag zsugorodása eltérő, ezért kizugorodtak egymásból és a két fázis között egy rés jelent meg (ezek tipikusan a felsőbb hőmérsékleti tartományokból valók, tehát az összes 340°C-os, a 320°C-os 0, 1 és 2 perces korong). Ezért az optimális paraméterek meghatározásához nem csupán a 28. ábrán látható diagramot használtam fel, hanem összevettem a korongok képeivel (M5-ös melléklet) és együttesen döntöttem a szétválás minőségéről.



28. ábra A PS/HDPE primer keverékek szétválasztásának eredménye: az egyes fázisok a korong vastagságához viszonyítva

A primer PS/HDPE korongokról elmondható, hogy az összes esetben szétvált a két fázis, azonban az alacsonyabb hőmérsékleteken a PS fázis nem teljesen összefüggő, maradt benne HDPE és légbuborékok is jelentek meg benne. A 29. ábrán látható a legjobbtól a legkevésbé jó minőségű korongig a kritikus hőmérséklet-idő párok mikroszkópi képe. A 29/a ábrán egyenletes, összefüggő fázisok vannak vékony átmeneti zónával, amelyek valójában nem is átmenetek a két fázis között, hanem az eltérő zsugorodás miatt egy rés keletkezett, ahol teljesen elvált egymástól a két anyag. Az a), b), c) és d) képeken 100°-osnak mondható a szétválás, mivel a két korong kiesik egymásból, a hőmérséklet csökkenésével azonban még mindig tiszták a fázisok, azonban nem esik szét a korong, egészen a 29/e ábráig, ahol már jól láthatóak a PS fázisban a légbuborékok, valamint a HDPE részek is.



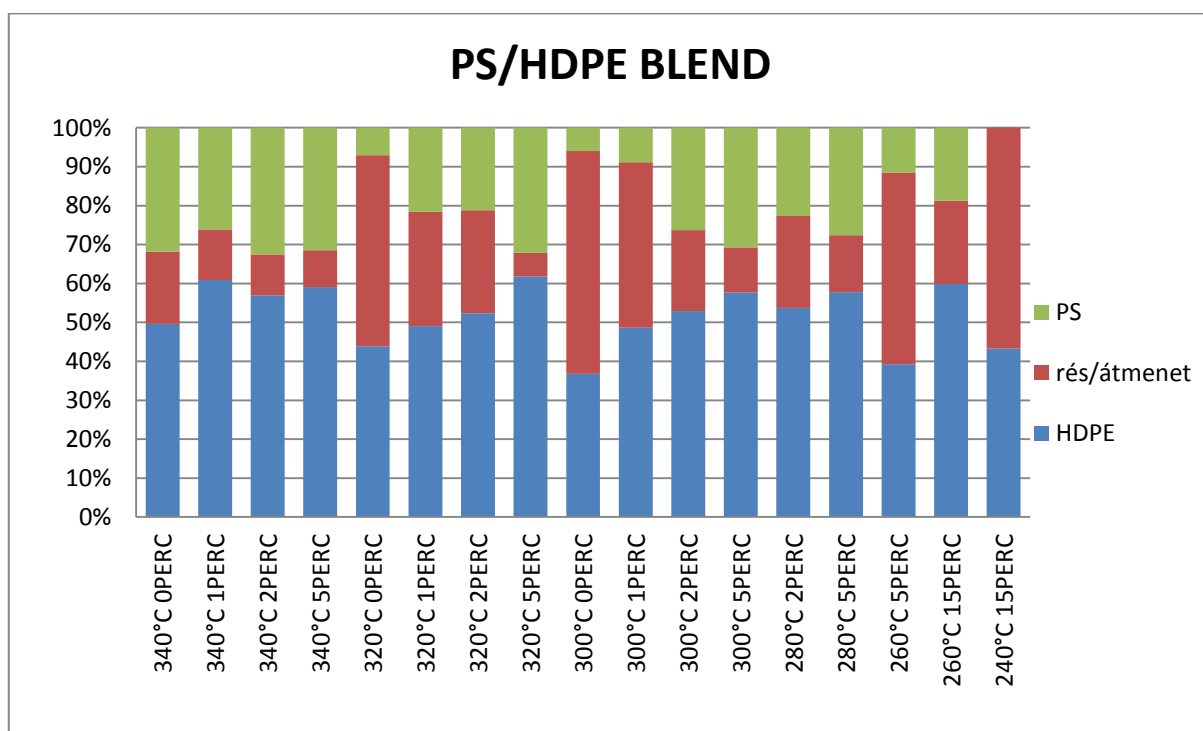
29. ábra: PS/HDPE primer keverékek már megfelelő szétválása a) 320°C-on 0 percig, b) 300°C-on 1 percig, c) 280°C-on 2 percig, d) 260°C-on 5 percig, e) 240°C-on 15 percig pörgetve

A 30. ábrán összesítettem a véleményem szerint megfelelő szétválasztási minőséget biztosító pörgetési időt a különböző hőmérsékleti pontokon. A vastag vonallal jelölt résztől, vagyis az optimális paraméterektől nem éri meg nagyon eltérni, hiszen akkor egyrészt a folyamat nem lesz gazdaságos, másrészt viszont a túl nagy hőmérséklet, vagy a túl hosszú hőntartás miatt felléphet az anyagok degradációja. Éppen ezért javaslatom szerint a 340°C az túl sok, elegendő a 320°C is, ráadásul megfontolandó, hogy érdemes-e a hőfokkal 280°C-ra lemenni, hiszen az a 2 perccel több pörgetési idő olcsóbb, és az anyag számára kevésbé megterhelő, mint az alkalmazott 20°C-kal (vagy 40°C-kal) magasabb hőmérséklet egy órán keresztül.

	0 perc	1 perc	2 perc	5 perc	15 perc
340°C					
320°C					
300°C					
280°C					
260°C					
240°C					

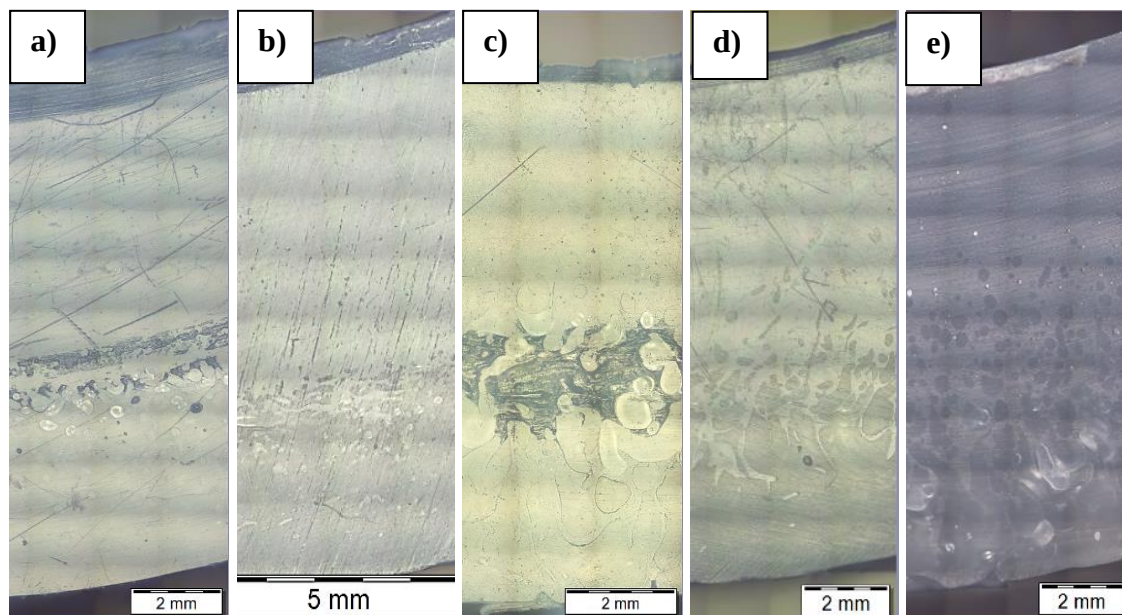
30. ábra A primer PS/HDPE keverékek megfelelő szétválásához szükséges hőmérséklet-pörgetési idő :
piros - nem megfelelő; zöld - megfelelő

Az előzetesen, ömledékállapotban előállított PS/HDPE blendék esetén is elvégeztem ugyanezeket a méréseket, elmondható, hogy a korongok mentén előfordulnak sokkal nagyobb átmeneti zónák (31. ábra). Elmondható, hogy gyakorlatilag minden esetben létrejött egy homogénnek mondható HDPE rész, azonban a PS a legtöbb esetben nem mondható teljesen tisztának. A legszembetűnőbb változás a 320°C 0 perc, 300°C 0 és 1 perc, valamint a 260°C 5 perces korongoknál van, ezeknél ugyanis a primer korongokhoz képest ugrásszerűen megnőtt az átmeneti zóna mérete. A pörgetési időnek is nagy hatása van, vegyük például 320°C-on a 0 perces korongot, 42% tiszta HDPE, 8% tiszta PS és 50% átmenet, ehhez képest a 320 °C 1 perces korong esetében 49% tiszta HDPE, 21% tiszta PS és már csak 30% az átmenet. Tehát már az 1 perc pörgetési időtől is sokat javult a szétválasztás, a 320°C-os 5 perces korongnál pedig már 62% tiszta HDPE, 33% tiszta PS és 5% az átmenet, vagyis egészen tisztának mondható a két szétválasztott fázis. Itt jegyezném meg, hogy azért nincs 50% tiszta PS és 50% tiszta HDPE fázis, mert a belső korong a HDPE ahol kisebb az átmérő, kívül pedig a PS, azaz a PS zóna vastagsága kisebb, mint a HDPE-é.



31. ábra A PS/HDPE blendék szétválasztásának eredménye: az egyes fázisok a korong vastagságához viszonyítva

Az alábbi képen (32. ábra) látható a különböző hőmérsékleteken a már elégségesen szétvált korongok mikroszkópi képei. Látható, hogy a szétválás a legjobb esetben sem éri el a primer keverékek szétválasztásának minőségét. A fázisok között az átmenet vastagabb, több légzárvány, valamint a PS fázisban több maradék HDPE jelenik meg a rendszerben.



32. ábra PS/HDPE blendek már megfelelő szétválása a) 340°C-on 0 Percig, b) 320°C-on 1 percig, c) 300°C-on 2 percig, d) 280°C-on 5percig, e) 260°C-on 15 percig pörgetve

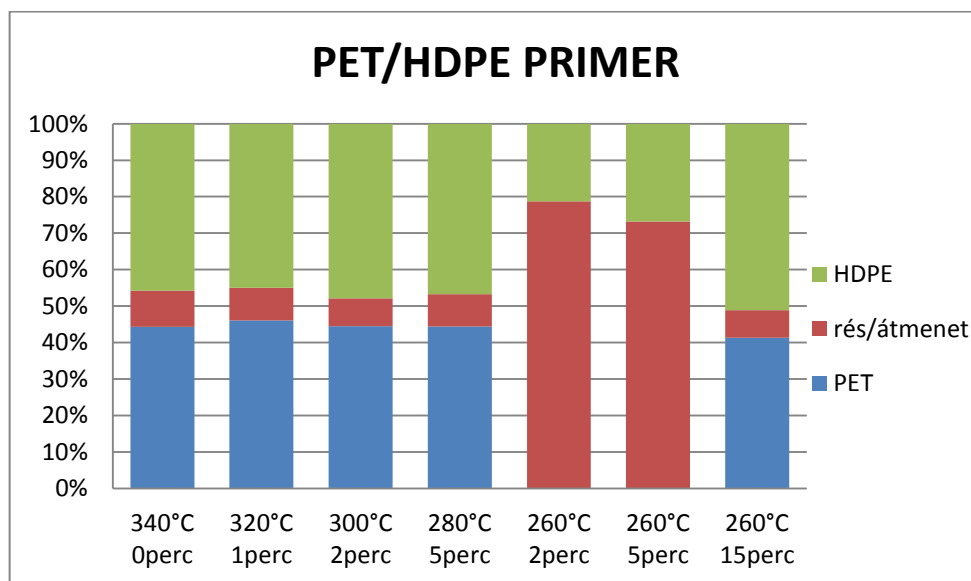
Az oszlopdiagramokat a korongok képeivel összevetve ebben az esetben is megállapítottam a megfelelő pörgetési idő- hőmérséklet szükségletet (33. ábra). Elmondható, hogy a primer keverékekhez képest a blendek megfelelő szétválaszthatósági tartománya magasabb szétválasztási hőmérséklet, illetve a hosszabb forgatási idő felé tolódott el, tehát több időre, vagy magasabb hőmérsékletre van szüksége a megfelelő szétválás eléréséhez. Például 280°C-on a primer esetben elegendő a 2 perc, blendeknél azonban 5 perc pörgetési idő szükséges a megfelelő szétváláshoz. Ha viszont a fix pörgetési időt nézzük, tehát vegyük például az 5 perces pörgetést, akkor látható, hogy a primer esetben elég hozzá 260°C, azonban a blendek esetében 280°C szükséges. Ez a jelenség annak köszönhető, hogy a primer esetben a granulátumok mm-es nagyságúak, és ezek ömlenek meg, míg a blendek esetén az ömledékben a fázisok mikrométeres nagyságrendűek, tehát a jobb eloszlás miatt , valamint a feldolgozás során fellépő nagy nyíróerők hatására maga az ömledék homogénebb, ezért nehezebb szétválasztani is.

	0 perc	1 perc	2 perc	5 perc	15 perc
340°C					
320°C					
300°C					
280°C					
260°C					
240°C					

33. ábra A PS/HDPE blendek megfelelő szétválásához szükséges hőmérséklet-pörgetési idő :
piros- nem megfelelő; zöld- megfelelő

3.2.2. PET/HDPE keverékek

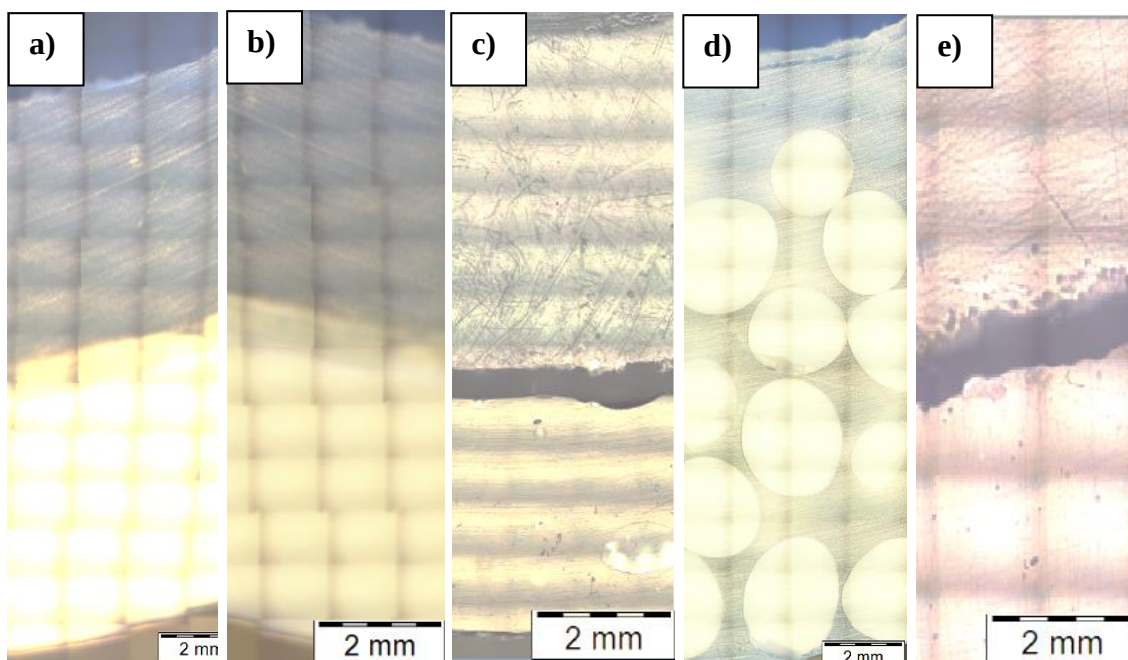
A PET/HDPE keverékek esetén felhasználva a PS/HDPE keverék során szerzett ismereteket, már sokkal céltudatosabban készítettem a korongokat, kifejezetten a kritikus hőmérséklet - pörgetési időpontokon vizsgáltam a keverékeket. Az elkészült próbatestek vastagság menti eloszlását a 34. ábra szemlélteti.



34. ábra A PET/HDPE primer keverékek szétválasztásának eredménye: az egyes fázisok a korong vastagságához viszonyítva

A 35. ábrán látható a PET/HDPE primer keverékek szétválasztásának eredménye. A 35. a) b) c) és e) ábra a kritikus hőmérsékleten és időn lett szétválasztva, elmondható, hogy a szétválasztás között nem nagyon van különbség, alig buborékosodott valamelyik fázis. Érdekes jelenség azonban, hogy a 260°C-os hőmérsékleten a PETnek az egy óra

hőntartás alatt már ömledék állapotba kellene kerülnie az adatlapján olvasható 248°C -os T_m miatt, azonban sem a 2, sem az 5 perces pörgetésnél nem jelent meg külön a PET fázis. A 35/d ábrán látható, hogy a PET granulátum formában maradt mivel a hűtadás nem jó a fém és polimer között, ezért a polimer hőmérséklete később éri el a kívánt hőfokot, mint a kemencében a levegő hőmérséklete. A 15 perces pörgetési idő azonban már elegendő volt ahhoz, hogy ömledékállapotba kerüljön, és a két fázis szétváljon. Ennek a belső súrlódást tulajdonítom, valamint azt, hogy a hosszabb pörgetés alatt a PET granulátumok tovább érintkeztek a fém centrifuga dobjával, ezáltal jobb termikus kapcsolat alakult ki (35/e ábra).



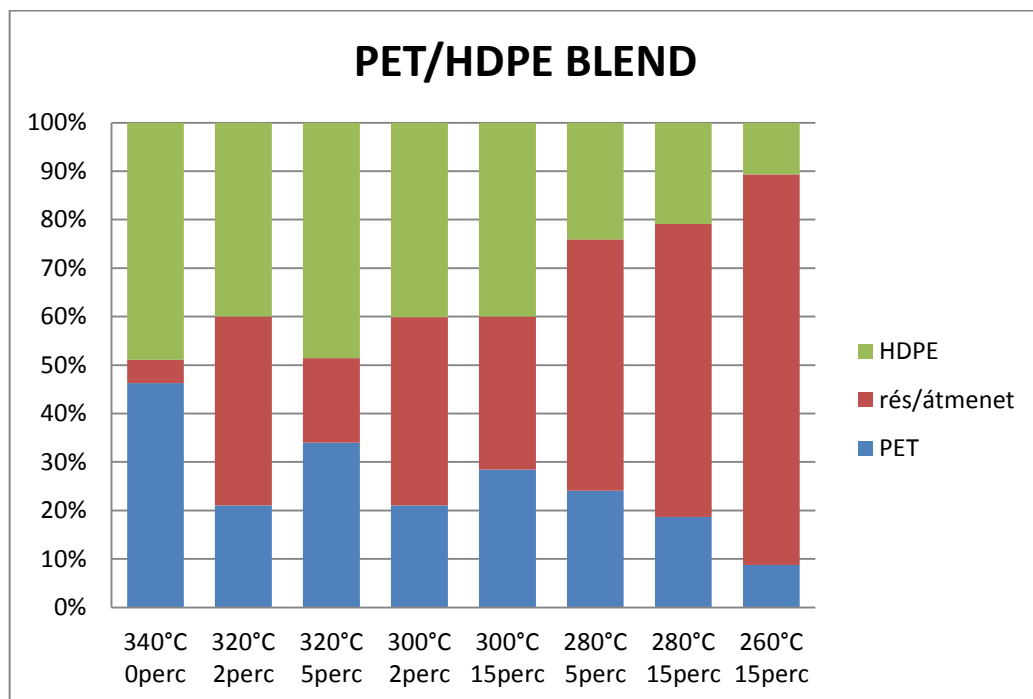
35. ábra PE/HDPE primer keverékek szétválása a) 340°C -on 0 Percig, b) 300°C -on 2 percig, c) 280°C -on 5 percig, d) 260°C -on 5percig, e) 260°C -on 15 percig pörgetve

A képek és a diagram alapján elkészítettem erre a keverékre vonatkozóan is az ajánlott szétválasztási paramétereket (36. ábra). Megállapítható, hogy a PET/HDPE primer keverék ajánlott szétválasztási paraméterei megegyeznek a PS/HDPE blendék ajánlott értékeivel, ez azzal magyarázható, hogy a PET olvadási hőmérséklete nagyobb, mint a PS-é.

	0 perc	1 perc	2 perc	5 perc	15 perc
340°C					
320°C					
300°C					
280°C					
260°C					
240°C					

36. ábra A PET/HDPE primer keverékek szétválásához szükséges hőmérséklet-pörgetési idő : piros- nem megfelelő; zöld- megfelelő

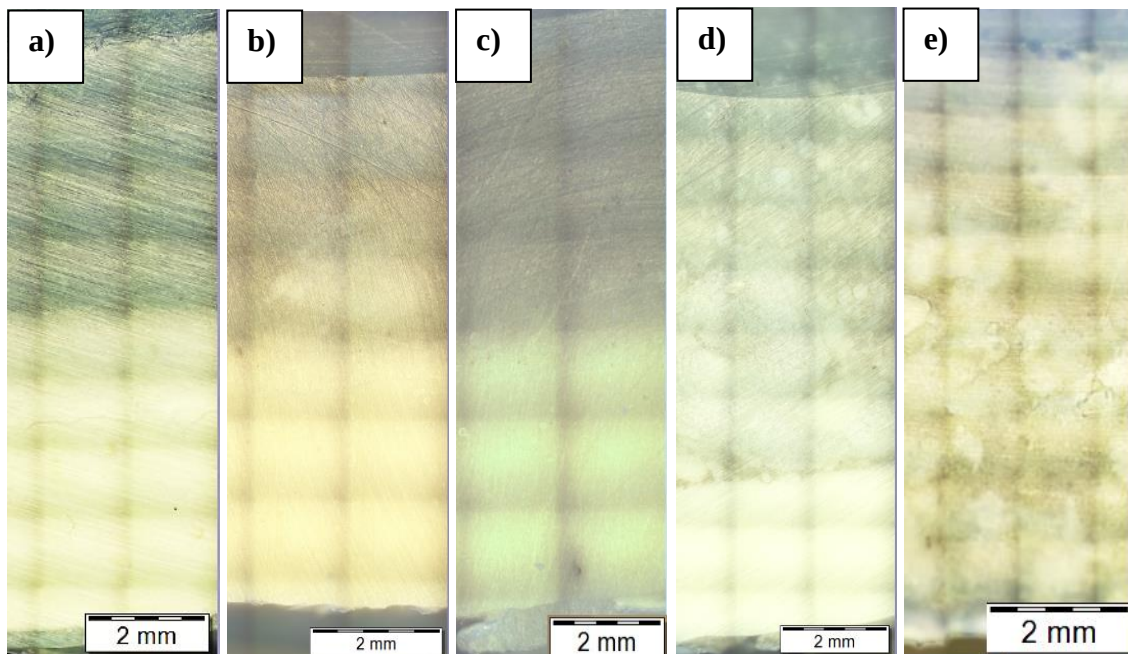
A PET/HDPE blendek szétválasztásakor viszont még magasabb hőmérséklet vagy több pörgetési idő szükséges. A korongok vastagság menti elemzése a 37. ábrán látható. A PET granulátum magasabban hőmérsékleten olvad meg, mint a PS. Éppen ezért nagyobb hőmérséklet kell a PET-et tartalmazó blendeknél, mint a PS-t tartalmazó keverékeknél.



37. ábra A PET/HDPE blendek szétválasztásának eredménye: az egyes fázisok a korong vastagságához viszonyítva

A 38. ábrán azoknak a korongoknak a mikroszkópi képe látható, amelyek alapján meghatároztam a kritikus szétválasztási hőmérséklet-idő párokat. A 38/a ábrán

egyértelműen látható, hogy a 340°C-on már 0 perc pörgetési idő mellett is szétváltak a fázisok. A 38/b ábrán 320°C fokon 5 percig pörgetve még szétvált a keverék, azonban 2 perc alatt már nem (38/d ábra). Ugyanez a jelenség játszódott le 280°C-on az 5 és 15 perces pörgetéssel (38/c és 38/e ábra). Mivel 280°C-on 15 perc alatt sem vált szét.



38. ábra PET/HDPE blendek szétválása a) 340°C-on 0 percig, b) 320°C-on 5 percig, c) 300°C-on 15 percig, d) 320°C-on 2 percig, e) 280°C-on 15 percig pörgetve

A szétválasztási ablakot 39. ábrán látható módon határoztam meg. A primer PET/HDPE keverékekhez képest ismételtlen a hőmérséklet növelése, vagy a pörgetési idő növekedése szükséges figyelhető meg az elégséges szétválasztáshoz. Ezek alapján tehát kijelenthetem, hogy az ömledékállapotban kevert esetekben mindig nagyobb hőmérséklet, vagy hosszabb pörgetési idő szükséges az azonos összetételű, azonban száraz keveréssel képzett társaikhoz képest.

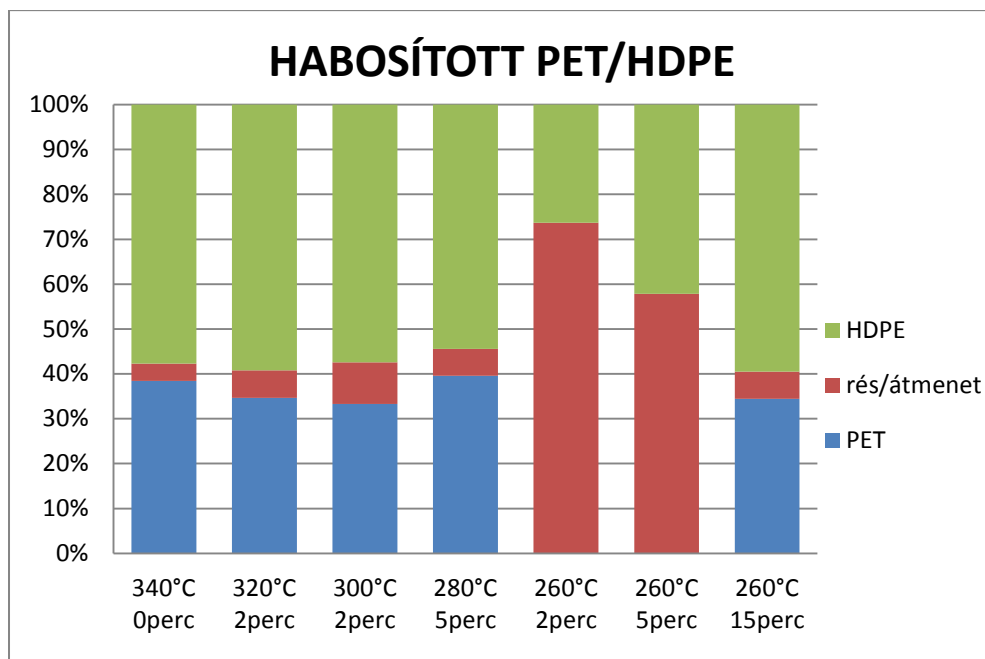
	0 perc	1 perc	2 perc	5 perc	15 perc
340°C					
320°C					
300°C					
280°C					
260°C					
240°C					

39. ábra A PET/HDPE blendek szétválásához szükséges hőmérséklet-pörgetési idő : piros- nem megfelelő; zöld- megfelelő

Ahogy az irodalomkutatásban is említettem Lee és társai kutatásai [14] során 55 fokkal kellett több a homogén stabil morfológia kialakulásához. Észrevételeim szerint a megfelelő szétválasztáshoz is +50°C kell, mivel a PS már 255°C-on feldolgozható volt, ehhez képest a szétválasztások csak 300-320°C voltak sikeresek blendék esetén. A PET-et 275 fokon állítottam elő, és tapasztalataim szerint ebben az esetben is ennél a kb. +50°C-kal magasabb hőmérséklet (320-340°C) kellett a blendék esetén a sikeres szétválasztáshoz.

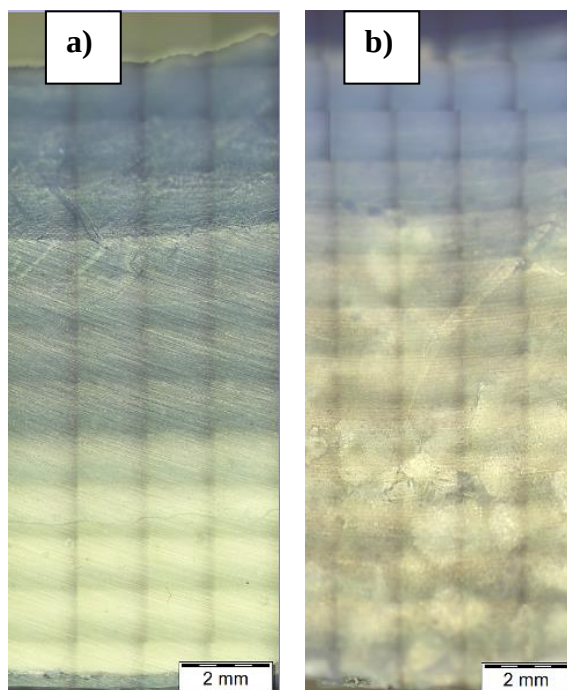
3.2.3. Habosított PET/HDPE keverék

Mivel az eljárás során az ömledékek olvadáspontja mellett fontos tényező az anyagok sűrűségkülönbsége is, ezért kísérletet tettem közel azonos sűrűségű anyagok szétválasztására is. Ehhez habosított PET-et használtam, amelynek sűrűsége a víznél kisebb (körülbelül 0,93-0,95 g/cm³), tehát a HDPE-hez közeli. A habosított PET újrahasznosított PET palackból készült,. A korongok vastagság szerinti eloszlását a 40. ábra mutatja.



40. ábra A habosított PET/HDPE keverék szétválasztásának eredménye: az egyes fázisok a korong vastagságához viszonyítva

A 41. ábrán látható két habosított PET/HDPE keverék korongjának mikroszkópi képe. Megfigyelhető, hogy 280°C-on 5 perc pörgetés mellett meglehetősen jól szeparálódik, míg 260°C-on ugyanennyi idő mellett nem vált szét a rendszer. Mivel ennél a keveréknél a mikroszkópi képek sajnos nem tükrözik eléggé jól a szétválást, ezért a kritikus szétválási hőmérséklet-idő meghatározásához csak szemrevételezéssel vizsgáltam a korongokat (M5-ös melléklet).



41. ábra Habosított PET/HDPE keverékek szétválása a) 280°C-on 5 percig,
b) 260°C-on 5 percig pörgetve

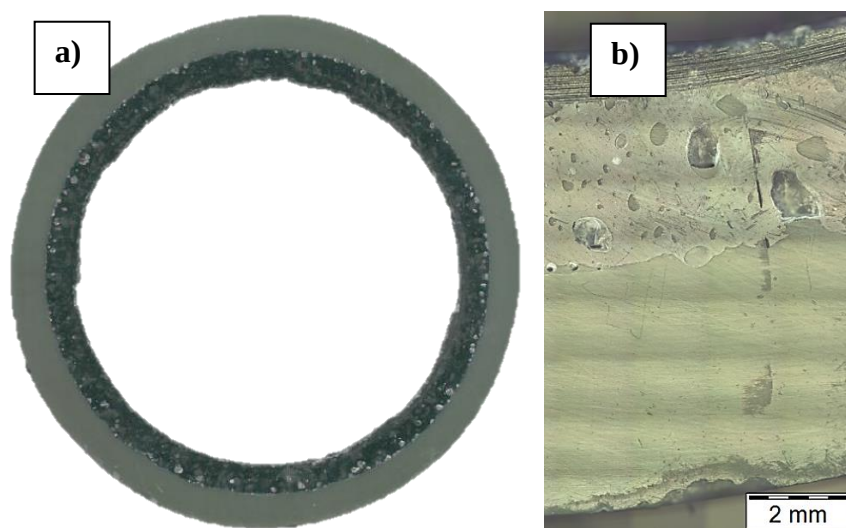
Az általam meghatározott optimális szétválasztási paraméterek a habosított PET/HDPE keverékek esetében a 42. ábrán láthatóak. A primer keverékekkel megegyezők a kritikus szétválasztási hőmérséklet-idő párok, ennek oka, hogy az anyagokat itt is csak szárazon kevertem össze, az ömledékcseppek mm-es nagyságrendűek voltak. Összességében tehát a habosított PET-et ugyanúgy el lehetett választani a HDPE-től, mint a primer anyagokat. Tehát PET/HDPE keverék esetén nincs hatással a PET habosítása a szétválasztás eredményére.

	0 perc	1 perc	2 perc	5 perc	15 perc
340°C					
320°C					
300°C					
280°C					
260°C					
240°C					

42. ábra A habosított PET/HDPE keverékek szétválásához szükséges hőmérséklet-pörgetési idő : piros-
nem megfelelő; zöld- megfelelő

3.2.4. Biodegradábilis és szintetikus polimerek szétválaszthatósága

A dolgozat során megvizsgáltam a természetes műanyagok szintetikus műanyagoktól való szétválaszthatóságát. Ez a kísérlet egy OTKA pályázat keretében zajlott a BME Szerves Kémia és Technológiai Tanszékével együttműködve. A méréshez 70/30 V% PLA/HDPE keveréket állítottam elő. Azért ezt a két anyagot választottam, mert mindkettőből csomagolóanyag készül a legnagyobb részben, és ezzel lehet a legjobban szemléltetni a lakossági hulladékgyűjtés során visszagyűjtött műanyag zacskókat. A két műanyagot külön kellene kezelni, mert a PLA lebontható, és ha esetlegesen a HDPE-vel keveredik és annak szennyezőanyaga lesz, akkor az újrafeldolgozás során a nagy hőhatás miatt degradálódhat rontva a termék minőségét. A PLA anyagokat teljesen külön kell újrahasznosítani vagy lebontani. Az elkészült korong képe a 43/a ábrán látható. Jól megfigyelhető a szétválás éles határvonala, tehát a biodegradábilis polimer és a szintetikus műanyag egymástól jól elkülönült.



43. ábra PLA/HDPE 70/30 V% keverék 300°C-on 5percig pörgetve: a) teljes korong képe, b) optikai mikroszkópi kép 10x nagyítással

A különvált PLA fázis nagy tisztaságú, azonban a 45. ábrán látható mikroszkópi kép alapján a korong vastagságából arra következtetnek, hogy a HDPE fázisban maradt még egy kis PLA, ami 320°C-on pörgetve már szétvált volna. Összességében elmondható hogy szétválasztható ezzel a módszerrel a két anyag. Véleményem szerint mivel a két anyagot 190-220°C tartományban dolgozzák fel, így különös tekintettel kell lenni az alkalmazott szétválasztási hőmérsékletre, ugyanis a túl magas hőmérséklet a szeparálás során a két anyag degradációját okozza. Ha még is szükséges a magas hőmérséklet, akkor oxigén atmoszféra helyett szükséges lehet N atmoszféra.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat során az ömledékcentrifuga optimális hőmérséklet – pörgetési idő tartományát vizsgáltam PS/HDPE blend és primer keverékek esetén, valamint PET/HDPE blend, primer keverék és habosított PET-ből készült keverék esetén. Megvizsgáltam a természetes polimerek szintetikus polimerektől való szétválasztását is, ehhez PLA/HDPE keveréket használtam.

4.1. Eredmények értékelése

A száraz keveréssel előállított kompaundok szétválasztásához alacsonyabb hőmérséklet, vagy rövidebb forgatási idő elegendő, mint az előzetesen ömledékállapotban homogenizált blendeknél. PS/HDPE kompaundok esetén az optimális hőntartási idő 280°C, amelyet 2 perc forgatás követ, ezzel szemben a PS/HDPE blendeket 300°C-on kellett hőntartani, vagy 280°C-on több ideig forgatni. PET/HDPE magasabb hőmérséklet volt szükséges a sikeres szétválasztáshoz (kompaund: 300°C majd 2 perc forgatás, blend: 320°C és 5 perc), mivel a PET magasabb hőmérsékleten került viszkozusan folyós állapotba. A PET habosítása nem befolyásolta a kompaundok szétválasztását.

A T_{cf} kritikus folyási hőmérséklet nem csak a keverékek gyártásánál [14], hanem szeparálási folyamatra is jelentőssel hatással van. A T_{cf} hőmérsékleti pont értéke eltér a részben kristályos polimerek olvadási hőmérsékletétől (T_m). Amorf polimerek esetén a T_{cf} hőmérsékleti pont értéke nagyjából 55°C-kal magasabb, mint az üvegesedési hőmérséklet (T_g). A méréseim során arra jutottam, hogy az olvadási hőmérsékletekhez képest szintén kb. 55°C-kal magasabb hőmérséklet kell ahhoz, hogy a blend fázisai megfelelően szétváljanak egymástól, ami feltehetőleg azért van, mert akkor kerülnek megfelelően viszkozus állapotba.

A mérések során továbbá arra jutottam, hogy a PLA/HDPE blendek is szétválaszthatóak, tehát érdemes lenne ezzel a technológiával szeparálni a két fázist. A PLA/HDPE keverék esetén is érvényesült, hogy a kritikus folyási hőmérsékleti ponton érdemes szétválasztani a keveréket.

4.2. További javaslatok

A berendezéssel kapcsolatban arra a következtetésre jutottam, hogy gazdaságosabb lenne a szétválasztás, ha a berendezés nem egy kemencében lenne, hanem önálló palástfűtéssel rendelkezne. Ebben az esetben is meg kéne külön vizsgálni az optimális üzemelési paramétereket, ráadásul akkor a forgatás is automatizálható lenne. Továbbá érdemes lenne további méréseket végezni a természetes polimert tartalmazó keverékekről, megvizsgálni egyéb természetes műanyagokat tartalmazó keverékeket, például a PET/PLA szétválaszthatóságát is.

5. SUMMARY

During the experiments the effect of temperature and rotation time on the separation was examined of PS/HDPE and PET/HDPE compounds and blends. The separation occurred by the density difference of plastics in a melted state by centrifugal force. I also investigated the separation of expanded PET from HDPE, furthermore synthetic polymers from natural polymers, where PLA/HDPE blend was used.

5.1. Evaluation of results

The results show that the dry blended compounds need lower temperature during the heating time, or shorter rotating time, than blends contained the same plastics in same ratio. The optimum of the separation in PS/HDPE compound was the following: 280 °C heating followed by 2 minutes rotating. In contrast PS/HDPE blends required higher temperature (300 °C) or longer rotating time. PET/HDPE compounds needed higher temperature than PS/HDPE compound to achieve good separation results, which can be justified by the higher melting temperature of PET. The foamed PET did not effect of the compounds separability.

It can be stated, that the critical flow temperature (T_{cf}) should be counted not only during the production, but also in the process of separation [14]. T_{cf} heat point is different from the melting temperature (T_m) of partially crystalline polymers. In case of amorphous polymers the T_{cf} point is approximately 55 °C higher than the glass transition temperature (T_g). During the measurements, I calculated that about 55 °C higher temperature is required than melt the polymers, and properly separate the blend phases from each other. This effect is probably because of the proper viscous state at this point.

During the measurements I came to the conclusion that the separation of PLA/HDPE blends from each other is suitable, which means this technology should be used for the separation natural polymers from synthetic polymers. Moreover it was proved that the critical temperature melt point has an influence also to the separation of PLA / HDPE blend.

5.2. Additional suggestion

I came to the conclusion that the separation would be more economical, if the equipment would not be heated in a furnace, but would have own superficies heating. In this case, the optimum operating parameters of the separation should be also observed, in addition the rotation could be automated. Furthermore, it would be worth additional measurements carried out on mixtures containing natural polymer, examining the separation of other natural polymers such as PET/PLA.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Wilson I.D.: Encyclopedia of Separation Science. Academic Press, London, Egyesült Királyság, 17-343, (2000)
2. Ronkay F., Dobrovsky K.: Alternative polymer separation technology by centrifugal force in a melted state, Waste Management 34, 2104-2112 (2014)
3. Torrijos M., Sousbie P., Rouez M.: Treatment of the biodegradable fraction of used disposable diapers by co-digestion with waste activated sludge. Waste Management 34, 669-675 (2014)
4. Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest (2000)
5. Olabisi O. Robeson L. Shaw M. T. Polymer-Polymer Miscibility, Academic Press, New York (1979)
6. Kovács J. G.: Polimer alkatrészek tervezése című kurzus előadásai, BME, Gépészmérnöki mesterszak Polimertechnika specializáció (2014)
7. Bárány T.: Polimerek feldolgozása című kurzus előadásai, Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki alapszak (2013)
8. Mekhilef N., Verhoogt H.: Phase inversion and dual-phase continuity in polymer blends: theoretical predictions and experimental result. Polymer 37, 4069-4077 (1996).
9. Jánoki G., Ronkay F.: Nem elegyedő polimer keverékek szerkezete és mechanikai tulajdonságai, Anyagvizsgálók Lapja 20, 16-21 (2010)
10. Steinmann S., Gronski W., Friedrich C.: Influence of selective filling on rheological properties and phase inversion of two-phase polymer blends, Polymer 43, 4467-4477 (2002)
11. Omonov T.S., Harrats C., Groeninckx G.: Co-continuous and encapsulated three phase morphologies in uncompatibilized and reactively compatibilized polyamide6/polypropylene/polystyrene ternary blends using two reactive precursors, Polymer 46, 12322-12336 (2005)
12. Csőke B.: A hulladékfeldolgozás szeparátorai, Első rész: száraz szeparátorok, Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet , <http://hulladekonline.hu/files/74> (2014.10.10)
13. Yi X., Xu L., Wang Y.-L., Zhong G.-J., Ji X., Li Z.-M.: Morphology and properties of isotactic polypropylene/poly(ethyleneterephthalate) in situ microfibrillar reinforced blends: Influence of viscosity ratio. European Polymer Journal 46, 719-730 (2010)

14. J. K. Lee, Chang D. H.: Evolution of polymer blend morphology during compounding in a twin-screw extruder, *Polymer* 41, 1799–1815 (2001)
15. 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).
16. Dobrovsky K.: Kétfázisú polimer keverékek kompatibilizálása. VIII. szakmai beszámoló, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2013)
17. Pál K.-né: Komolyan kell venni a biopolimereket. *Műanyagipari Szemle*, 71 (2011)
18. Tábi T.: Polimerek alkalmazástechnikája című kurzus előadásai, BME, Gépészmérnök alapképzés (2014)
19. Gáspár M.: Biopolimerek és lignocellulózok műanyagipari alkalmazásának lehetőségei előadás, BME, Vegyész és Biomérnöki kar (2005)
http://vegyeszkar2005.ch.bme.hu/Biomernoki/Zoldkemia/Bioenergia_biopolimerek.pdf (2014.10.12.)
20. Pál K.-né: Elég lesz-e a biomassza a bioműanyagokhoz? *Műanyagipari Szemle*, 80-82 (2012)
21. Borsa J.: Új szál: a politejsav, *Magyar Textiltechnika* LXIII. évf., 192-204, 2010/5
22. Bodnár I.: Potenciálisan biodegradábilis, politejsav bázisú polimerek szintézise és vizsgálata, PhD értekezés, Debreceni Egyetem (2002)
23. Hulladékgazdálkodás IV:
http://www.eng.unideb.hu/userdir/bodnari/hulladek/hull-kmm-sc-1/hulladegkazd_4-ea-2013_muanyag%20es%20gumi_km_l.pdf (2014.10.12.)
24. Pál K.-né: A bioműanyagok jelene és jövője, *Műanyagipari Szemle*, 2007/2
25. www.loopla.org (2014.10.11.)
26. Soroudi A., Jakubowicz I.: Recycling of bioplastics, their blends and biocomposites: A review, *European Polymer Journal* 49, 2839-2858 (2013)
27. Sánchez A. C., Collison R. S.: The selective recycling of mixed plastic waste of polylactic acid and polyethylene terephthalate by control of process conditions, *European Polymer Journal* 47, 1970-1976 (2011)
28. <http://www.forwiss.uni-passau.de/en/projectsingle/5/main.html> (2014.09.30.)

29. Rozsnyay D.: Vegyes műanyag hulladék újszerű szétválogatási módszerének fejlesztése, Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar (2012)
30. Ronkay F.: Műanyag hulladék menedzsment című kurzus előadásai, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnök Mesterszak (2014)
31. 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)
32. Csőke B.: A hulladékfeldolgozás szeparátorai, Második rész: Nedves szeparátorok és válogató berendezések, Miskolci Egyetem
33. M. T. Carvalho: Recovery of PET from packaging plastics mixtures by wet shaking table, *Waste Management* 27, 1747-1754 (2007)
34. Bertram, P. - Unkelbach, K.-H.: High duty plastics recycling with the aid of sorting centrifuges. *Proceedings of the XX International Mineral Processing Congress, Aachen, Germany. Vol. 5, 21-26, (1997)*
35. Burat. F., Güney A., Kangal O. M.: Selective separation of virgin and post-consumer polymers (PET and PVC) by flotation method, *Waste Management* 29, 1807-1813 (2009)
36. 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)
37. Pál K.: Új ötletek a műanyag hulladék hasznosítására, *Műanyagipari Szemle* 4 (2009)
38. Bakker E. J., Rem P. C., Fraunholcz N.: Upgrading mixed polyolefin waste with magnetic density separation, *Waste Management* 29, 1712-1717 (2009)
39. Dobrovsky K.: Új típusú polimer blendék fejlesztése vegyes műanyag hulladék hasznosítására. IV. szakmai beszámoló, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2013)
40. Guiqing W., Jia L., Zhenming X.: Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling. *Waste Management* 33, 585-597 (2013)
41. Orbán S.: Új ötletek a műanyag hulladék hasznosítására, *Műanyagipari Szemle* 04 (2009)
42. Hidi S.: Polimer keverékek szétválasztása és morfológiai vizsgálata újrahasznosítás céljából, Szakdolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar (2013)
43. Dobrovsky K., Ronkay F.: Polimerek újfajta szétválasztási lehetősége, *Mechanoplast 2013 Tudományos Konferencia előadás (2013. április 20.)*

44. Szepesi G., Venczel G., Völgyesi L.: Centrifugálás alapjai (2004.10.17)

7. MELLÉKLETEK

M1 – Neopet 80 típusú PET granulátum adatlapja



UAB „NEO GROUP“
Industrijos st. 2, Rimikai LT-95346, Dovilai
eldership, Klaipeda district, Lithuania
Phone: +370 46 466710
Fax: +370 46 466711
E-mail: info@neogroup.eu
www.neogroup.eu

PRODUCT TECHNICAL DATA SHEET

Rev.01.2013/11/06

neopet[®] 80

General information

Product Description

NEOPET 80 is a food grade PET copolyester designed for general purposes, and suitable for a wide variety of beverage and juice containers, mineral water and carbonated soft drink bottles, milk, edible oil, and soy sauce containers. This product is also recommended for thermoformable sheets, cosmetics and household packaging. It is an excellent transparent product with very high mechanical and barrier properties and a low level of acetaldehyde.

Application / Uses

- ◆ Still and carbonized beverages and water bottles
- ◆ Edible oil, juice, sport drinks, soy sauce and beer bottles
- ◆ PET film
- ◆ Containers for Cosmetics and Households

Product Properties

Property	Value	Test method
Intrinsic Viscosity (IV)*	0.80 ± 0.02 dl/g	WN-B010-7040 D (Capillary visc.)
Melting Temperature (T _m)	248 ± 4 °C	WN-B010-7089 D (DSC)
Acetaldehyde content (AA)	< 1 ppm	WN-B010-9013 D (GC)
Color b	< 1	WN-B010-7136 D (HUNTER Lab)
Dust content	< 50 ppm	WN-B010-9031 D
Water content	< 0.2 %	WN-B010-7159 D
Pellets weight	1.7 ± 0.1 g/100 pellets	WN-B010-9038 D
Pellets shape	Spherical granules	-

*Ph/DCB 2 : 3 (w/w), 25°C

Notes

NEOPET 80 resin is considered safe for food packaging applications.

Warranty

Neo Group warrants that its products will comply with specifications and related regulatory compliance detailed in its publications.

Edistir®
Polystyrene

N 1840

Properties	Test conditions	Test methods	Units	Values
General				
Density		ISO 1183	g/cm ³	1.05
Bulk density		ISO 60	g/cm ³	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/m ²	1.7
	-30°C - thickness 4 mm	ISO 180/1A	kJ/m ²	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 ⁻⁶ /°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, nor for the Company will provide the guaranteed values for each product on demand.

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

M3 – "HDPE-UNI" adatlapja, LITEN MB 87

LITEN MB 87

Jellemzés

Tipikus tulajdonságok és alkalmazási felhasználási területek

Tulajdonságok	Egység	Tipikus érték	Mérési szabvány
FOLYÁSINDEX (190/2,16)	g/10 min	23.00	ISO 1133
FOLYÁSINDEX (190/5)	g/10 min	-	ISO 1133
FOLYÁSINDEX (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.



Ingeo™ Biopolymer 3052D Technical Data Sheet

Injection Molding Process Guide

Ingeo biopolymer 3052D, a NatureWorks LLC product, is designed for injection molding applications where the requirements are clarity with heat deflection temperatures lower than 120°F (49°C). See table at right for typical properties.

Applications

The variety of products made with Ingeo 3052D continues to grow rapidly. Applications include cutlery, cups, plates and saucers, and outdoor novelties, and this is just the beginning.

Processing Information

3052D resin can be processed on conventional injection molding equipment. The material is stable in the molten state, provided that proper drying procedures are followed. Mold flow is highly dependent on melt temperature. It is recommended to balance screw speed, back pressure, and process temperature to control melt temperature. Injection speed should be medium to fast.

Process Details ⁽¹⁾

Startup and Shutdown

Ingeo biopolymer 3052D is not compatible with a wide variety of resins and special purging sequence should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum and wipe out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce 3052D biopolymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once 3052D has completely purged the system, reduce barrel temperatures to desired set points.

Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾		
Physical Properties	Ingeo Resin	ASTM Method
Specific Gravity	1.24	D792
MFR, g/10 min (210°C, 2.16kg)	14	D1238
Relative Viscosity	3.3	
Crystalline Melt Temperature (°C)	145-160	D3418
Glass Transition Temperature (°C)	55-60	D3418
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	9,000 (62)	D638
Tensile Elongation, %	3.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (16.0)	D256
Flexural Strength (MPa)	15,700 (108)	D790
Flexural Modulus (MPa)	515,000 (3600)	D790
Heat Distortion Temperature (°C)	55	E2092

(1) Typical properties; not to be construed as specifications.

5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

*Detailed Purging recommendations available at natureworksllc.com

Drying

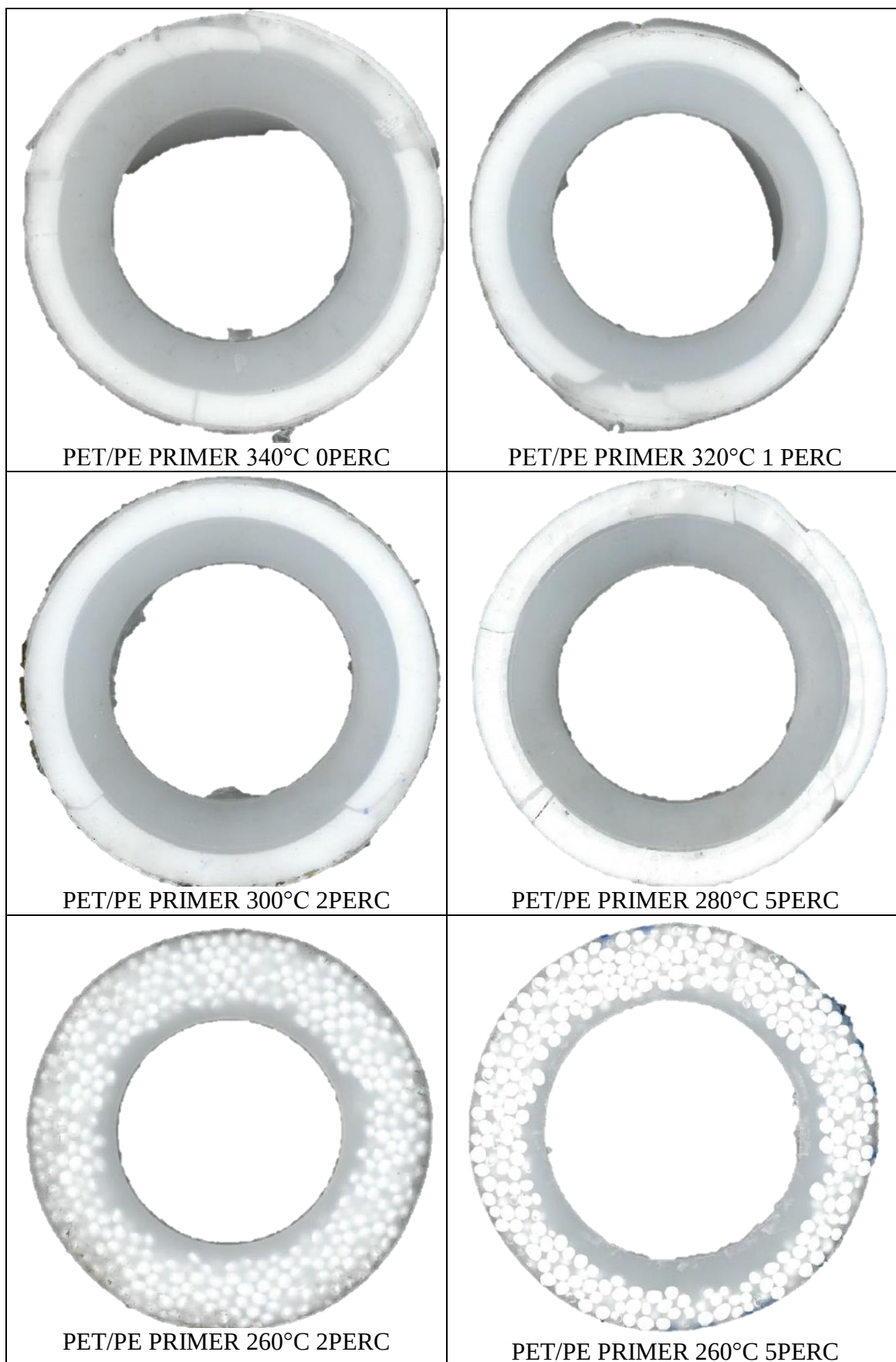
In-line drying is recommended for Ingeo resins. A moisture content of less than 0.025% (250 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Polymer is supplied in foil-lined boxes or bags dried to <400 ppm when packaged. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly dry and reseal any unused material. The drying curves for both amorphous and crystalline resins are shown to the right. It is important to consider accurate initial moisture, when calculating necessary drying time.

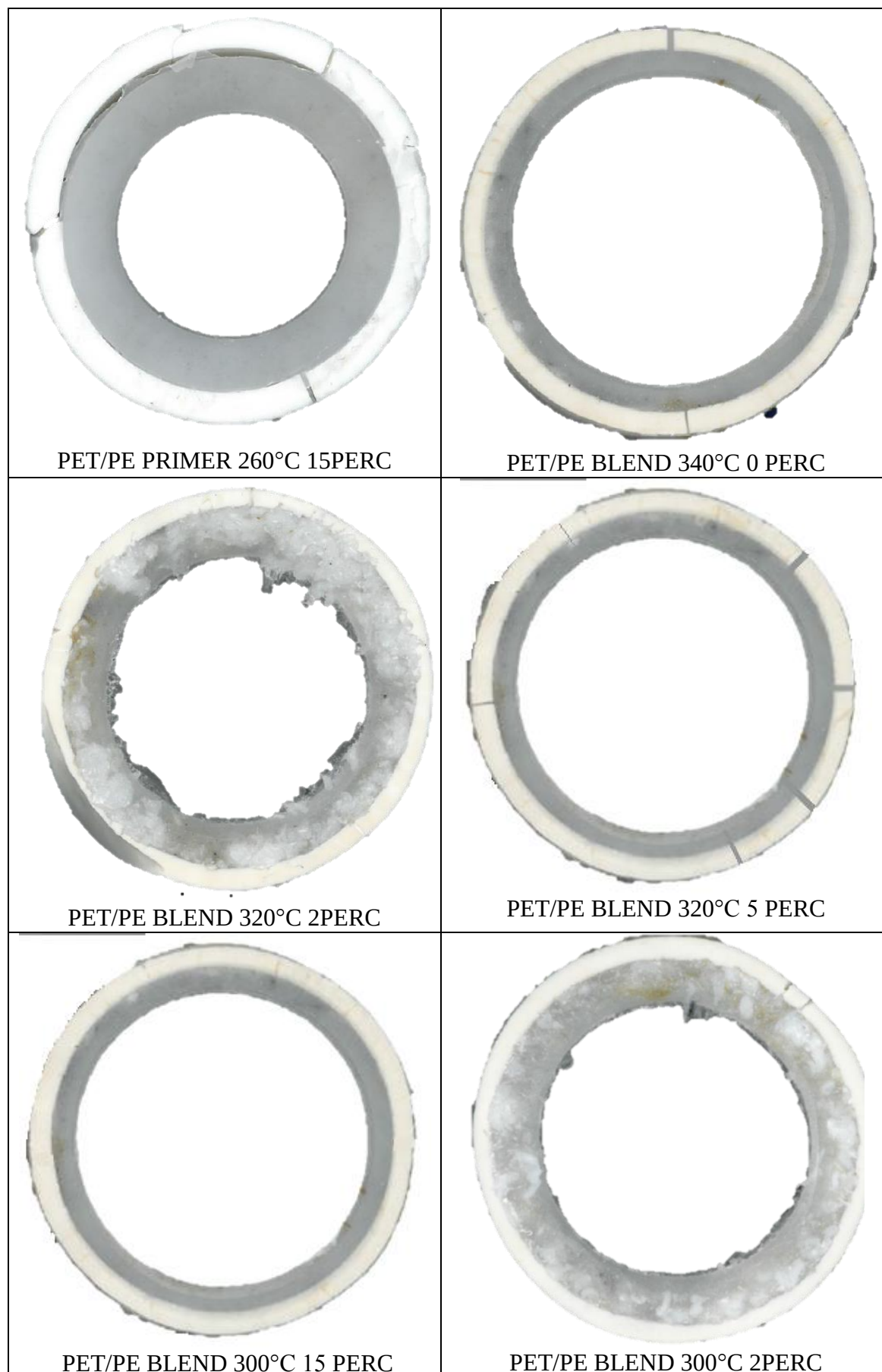
Note: Amorphous polymer must be dried below 120°F (50°C).

Processing Temperature Profile ⁽¹⁾		
Melt Temperature	390°F	200°C
Feed Throat	70°F	20°C
Feed Temperature	330°F	165°C
Compression Section	380°F	195°C
Metering Section	400°F	205°C
Nozzle	400°F	205°C
Mold	75°F	25°C
Screw Speed	100-175 rpm	
Back Pressure	50-100 psi	3.5-6.9 bar
Mold Shrinkage	.004 in/in. +/- .001	

(1) These are starting points and may need to be optimized. For thin walled molding temperatures up to 450°F may be required.

M5 – Az elkészült korongok







PET/PE BLEND 280°C 5PERC



PET/PE BLEND 280°C 15PERC



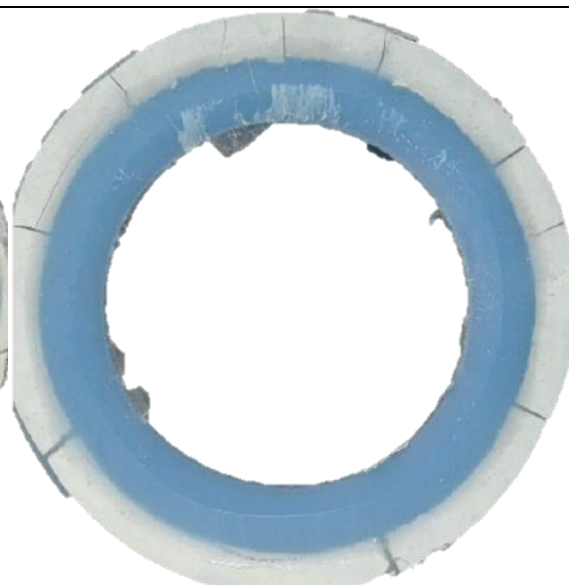
PET/PE BLEND 260°C 5 PERC



PET/PE BLEND 260°C 15 PERC



PET/PE HAB 340°C 0PERC



PET/PE HAB 320°C 2PERC

