

POLIETILÉN CSOMAGOLÁSI HULLADÉKOK ÖSSZETÉTELÉNEK VIZSGÁLATA ÉS MÉRÉSI MÓDSZERTAN KIDOLGOZÁSA

ANALYSIS OF THE COMPOSITION OF POLYETHYLENE PACKAGING WASTE AND DEVELOPMENT OF A MEASUREMENT METHODOLOGY

Muszka Ernő^{0009-0001-7659-1359 1*}, Gerse Péter^{0009-0006-5036-3936 1 2,}

¹ Innovatív Anyagok és Járművek Tanszék, Neumann János Egyetem, Magyarország

² Óbudai Egyetem Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Magyarország
<https://doi.org/10.47833/2026.1.ENG.010>

Kulcsszavak:

csomagolási hulladék
polimer keverékek
polietilén
újrahasznosítás
körforgásos műanyagfeldolgozás

Keywords:

packing waste
polymer blends
polyethylene
recycling
circular plastic processing

Cikktörténet:

Beérkezett 2025. december 7.
Átdolgozva 2026. január 20.
Elfogadva 2026. január 25.

Összefoglalás

A kutatás célja egy mérés alapú módszertan kidolgozása, amellyel ismeretlen összetételű, reciklált polietilén (PE) granulátumokban meghatározhatók a különböző sűrűségű polietilén frakciók arányai. A munkám során referencia keverékek vizsgálatával kerül kialakításra egy olyan mérési értelmezési rendszer, amely alapján visszakövetkeztethető az ismeretlen minták összetétele. Az eljárás hosszú távon beilleszthető lehet ipari automatizált rendszerbe, ezzel támogatva a körforgásos gazdaságot.

Abstract

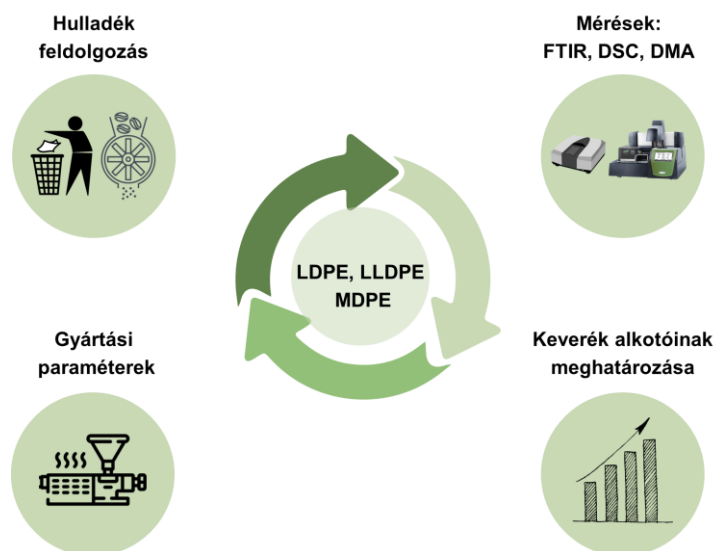
This research is to develop a measurement-based methodology that enables the determination of the relative amounts of polyethylene fractions with different densities in recycled PE granulates of unknown composition. In present study, an interpretation framework based on the characterization of reference blends is established, which allows the composition of unknown samples to be back-calculated. In the long term, the procedure may be integrated into an industrial automated system, thereby supporting the circular economy.

1. Bevezetés

A polietilén napjaink egyik legelterjedtebb polimer alapanyaga, amely nélkülözhetetlen szerepet játszik a modern társadalom számos területén. A folyamatos technológiai fejlődés és a növekvő ipari igények hatására mára szinte minden iparágban alkalmazzák. Sokoldalú felhasználhatósága, kedvező mechanikai tulajdonságai révén a polietilén évtizedek óta meghatározó alapanyag az élelmiszeripari csomagolásban, az egészségügyi eszközök gyártásában, az elektronikában és autóiparban, valamint az építőipari termékek előállításában is. A különböző sűrűségű polietilének variációi lehetővé teszik, hogy a felhasználási területek széles skáláján biztosítsák az adott igényekhez optimalizált megoldásokat [1], [2], [3]. A műanyag

* Kapcsolattartó szerző.
muszka.erno2000@gmail.com

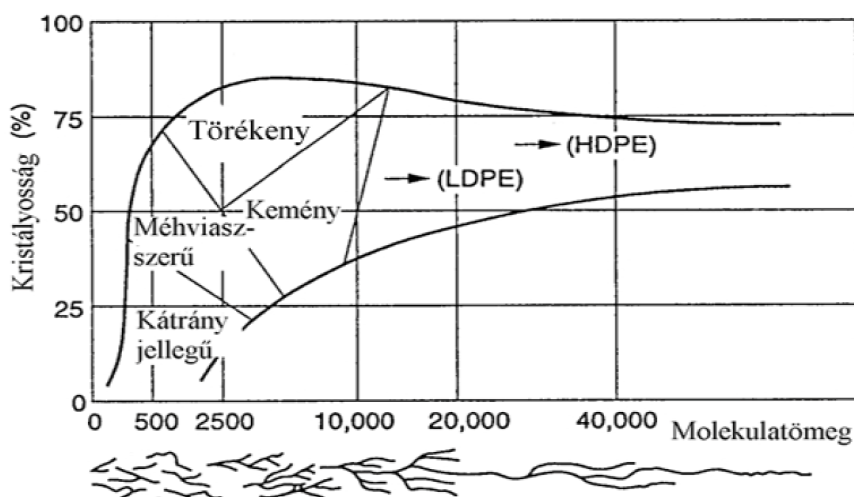
újrahasznosítás jelenti az egyik legfontosabb ipari és környezetvédelmi kihívást, és kiemelten igaz ez a csomagolóipari polietilén hulladékokra, mivel az anyagok sokfélesége megnehezíti az egységes újrafeldolgozást [4]. A körforgásos műanyagfeldolgozás igényeinek kielégítése megköveteli a reciklált alapanyagok pontos karakterizálását, különösen azoknál a keverékeknél, amelyek ismeretlen arányban tartalmaznak eltérő sűrűségű PE komponenseket [5]. A PE típusok kémiai felépítése nagyon hasonló, így a keverékek nem adnak éles elhatárolást. Ezt tovább nehezíti az újrahasznosításból eredő előélet, mint például a hő és nyírássterhelésből adódó degradáció, az adalékok és szennyezők jelenléte, valamint a minták heterogenitása, amelyek mind képesek befolyásolni a jellemzőket [6]. Az 1. ábrán a kutatás lépései látható, amivel demonstrálom az ipari hasznosulását a projektnek.



1. ábra: A kutatás célját bemutató piktogram

2. A polietilén szerkezete és jellemzői

A polietilén tulajdonságai típusonként eltérőek, főként a molekulaszerkezettől és a sűrűségtől függően. Az ipar egyik alapvető nyersanyagaként a polietilént széles körben használják, főként fóliák, flakonok, csövek, vezetékek és kábelbevonatok gyártására. A poliolefin gyanták, beleértve a különböző sűrűségű polimereket, mint például az alacsony sűrűségű polietilén (LDPE), a nagy sűrűségű polietilén (HDPE), a közepes sűrűségű polietilén (MDPE), a lineáris alacsony sűrűségű polietilén (LLDPE), a polipropilén (PP), a random és blokk kopolimerek a műanyagok ipari felhasználásában legelterjedtebb csoportja [7],[8]. A 2. ábrán az etilén polimerek családjai láthatóak a kristályossági fok és a móltömeg függvényében.



2. ábra: Az etilén polimerek a kristályosság és a móltömeg függvényében (az elágazottság jelölésével) [7]

3. Módszer

Az Ineos LDPE 22D730 (MFR $190^{\circ}\text{C}/2.16\text{ kg} = 0,3\text{g} / 10\text{ min}$), EQUATE LLPE EFDA-7047 (MFR $190^{\circ}\text{C}/2.16\text{ kg} = 1\text{g} / 10\text{ min}$), valamint a MOL TIPELIN MDPE FS 340-03 (MFR $190^{\circ}\text{C}/2.16\text{ kg} = 0,17\text{g} / 10\text{ min}$) polimerjeit használtam keverékek előállítására. Az általam alkalmazott polietilént kedvező ára, beszerezhetősége és könnyű feldolgozhatósága miatt, sok gyártó használja fóliák alapanyagaként, így ezek az anyagok nagy mennyiségben előfordulnak a hulladékáramban egyaránt. A munkánk során referencia keverékek kerültek összeállításra, majd a mérésekből meghatározott adatsorok összehasonlító alapként szolgálnak.

A kutatásomhoz a blendeket egy Labtech 26–44 típusú, 26 mm-es laboratóriumi ikercsigás extruderen állítottuk elő. A berendezést 20 min^{-1} csiga fordulaton, $180\text{--}210^{\circ}\text{C}$ közötti, lépcsőzetes zónahőmérséklet profillal üzemeltettem. Az alacsony fordulatszámot a komponensek egyenletes elkeveréséhez és a lehető legalacsonyabb termikus igénybevétel érdekében választottam.

Első lépésben natúr referenciaanyagokat dolgoztam fel, LDPE/MDPE összetételekben tömegszázalék szerint 10/90, 30/70, 50/50, 70/30, 90/10. Ezt követően LDPE/LLDPE párosításban is ugyanezt a keverékarányt készítettem el.

A granulátumokon termoanalitikai vizsgálatokat végeztem. A DSC (Differential Scanning Calorimetry) méréseket granulátum mintából kiindulva végeztem TA Q200 mérőműszerrel, először préseltem, majd $\sim 5\text{ mg}$ tömegű mintát vágtam, alumínium mintatartóba helyeztem, és $5, 10$, illetve $20^{\circ}\text{C}/\text{perc}$ fűtési és hűtési sebességekkel mértem. Minden minta esetében ugyanazt az eljárást alkalmaztam 30°C -ról 280°C -ra fűtöttük fel a kemencét, nitrogén atmoszférában. Az első fűtési során megfigyelhető az anyag termikus előélete (belső feszültségek). Fűtéseket követően azzal megegyező hőmérsékletű és sebességű hűtési folyamat követett. Végül következett 3. ciklus, ahol $20^{\circ}\text{C}/\text{perc}$ fűtéssel és hűtéssel az így kapott értékek az anyagra jellemző termikus tulajdonságokat tükrözik. Az ábrák TA Instruments Universal Analysis 2000 szoftverrel készültek.

FTIR-spektroszkópia méréseket végeztem a keverékek granulátum mintáin, melynek célja az ismeretlen eredetű polimer családjának meghatározása volt infravörös spektrum alapján. JASCO FT/IR-4600 mérőműszerrel végeztem az $500\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ tartományban, 2 cm^{-1} felbontással, mintánként 64 mérést átlagolva a zajsökkentés érdekében.

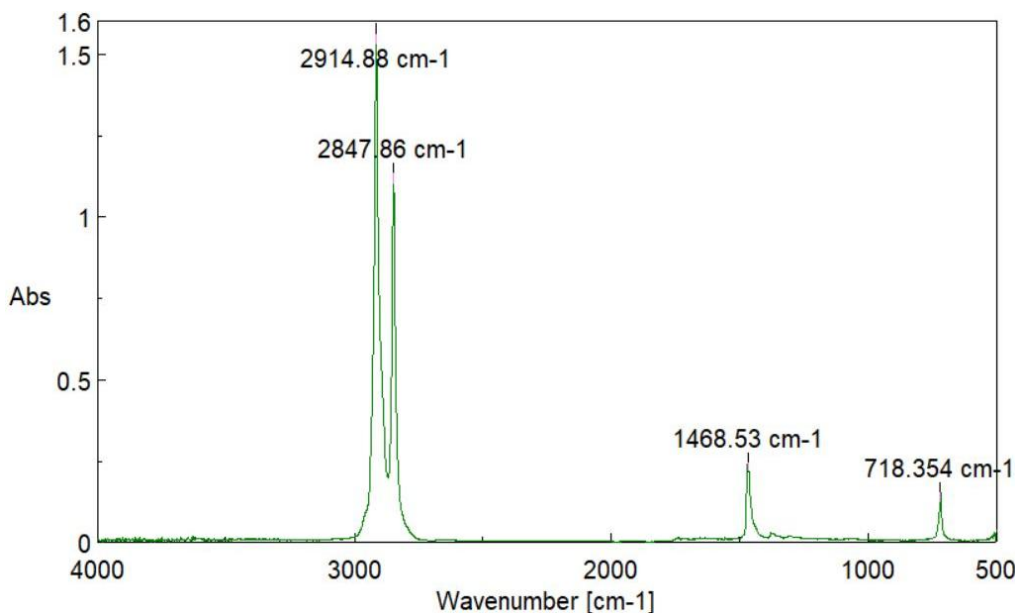
4. Eredmények

4.1. Infravörös spektroszkópia vizsgálat (FTIR)

Az elnyelési sávok maximumának pozíciója és intenzitása egy olyan halmazt képez, mely az adott anyag kötésrendszerére jellemző és lehetővé teszi az azonosítást. A fenti esetben a 2800--

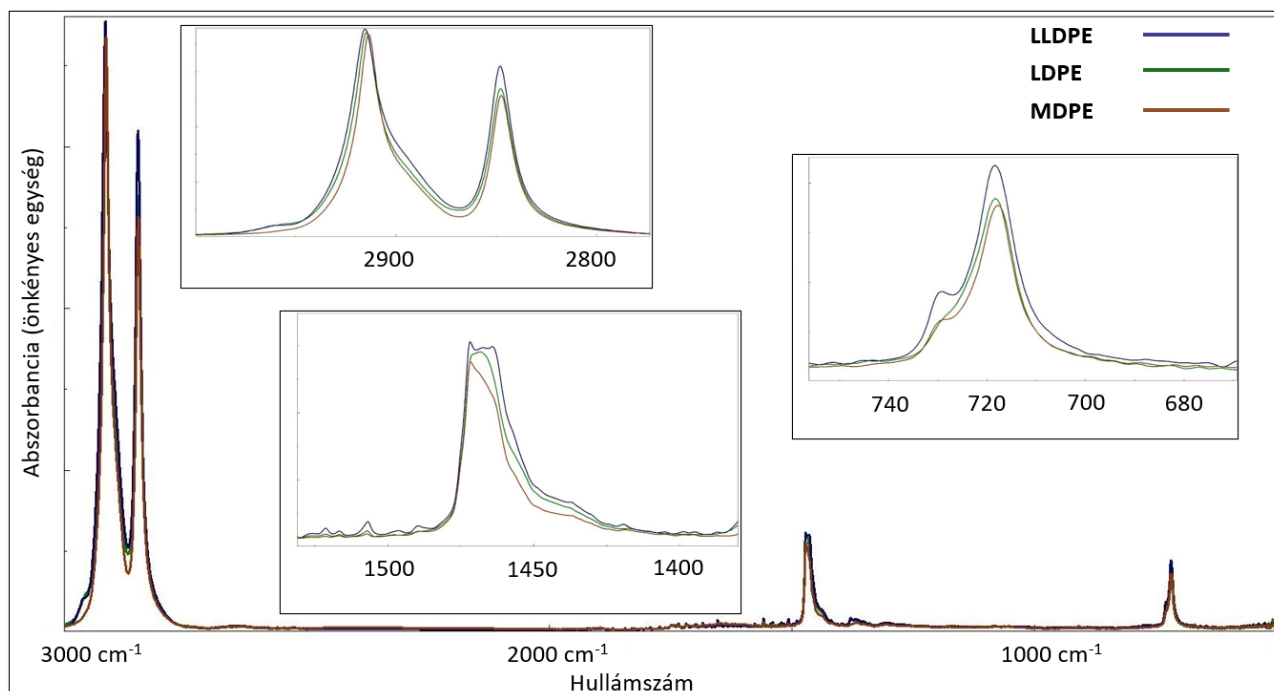
3000 cm^{-1} tartományban láthatók a C-H kötések szimmetrikus és aszimmetrikus nyújtórezgései, a másik két rezgés (1468 és 718 cm^{-1} -nél) pedig a láncba kapcsolódó CH_2 -egységekre jellemző hajlítórezgések (3. ábra). Polimerek esetén az is megfigyelhető, hogy a kristályos fázis szerkezetének megváltozása esetén bizonyos csúcsok eltolódnak az eredetileg tapasztalt helyüktől [9].

Az általunk vizsgált polietilének esetén jelentős különbségekre nem számítottam, hiszen összetételüket tekintve közel azonosak. A megfigyeléseimet így csak a kristályos állapotból következő sáveltolódásokkal kapcsolatban tudjuk leírni.



3. ábra Bázisként használt LDPE infravörös színeképe

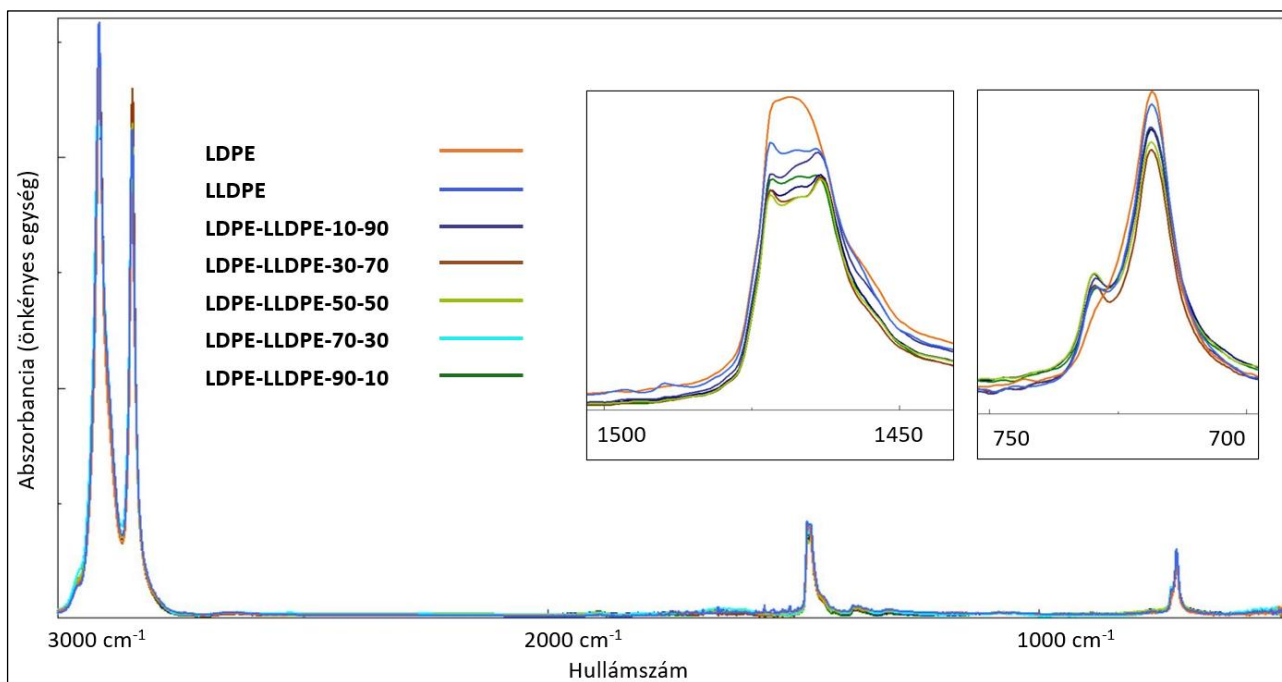
A vizsgált három alap polimer összehasonlító spektruma az alábbi ábrán (4. ábra) látható, felnagyítva azokat a területeket, ahol különbségek észlelhetők.



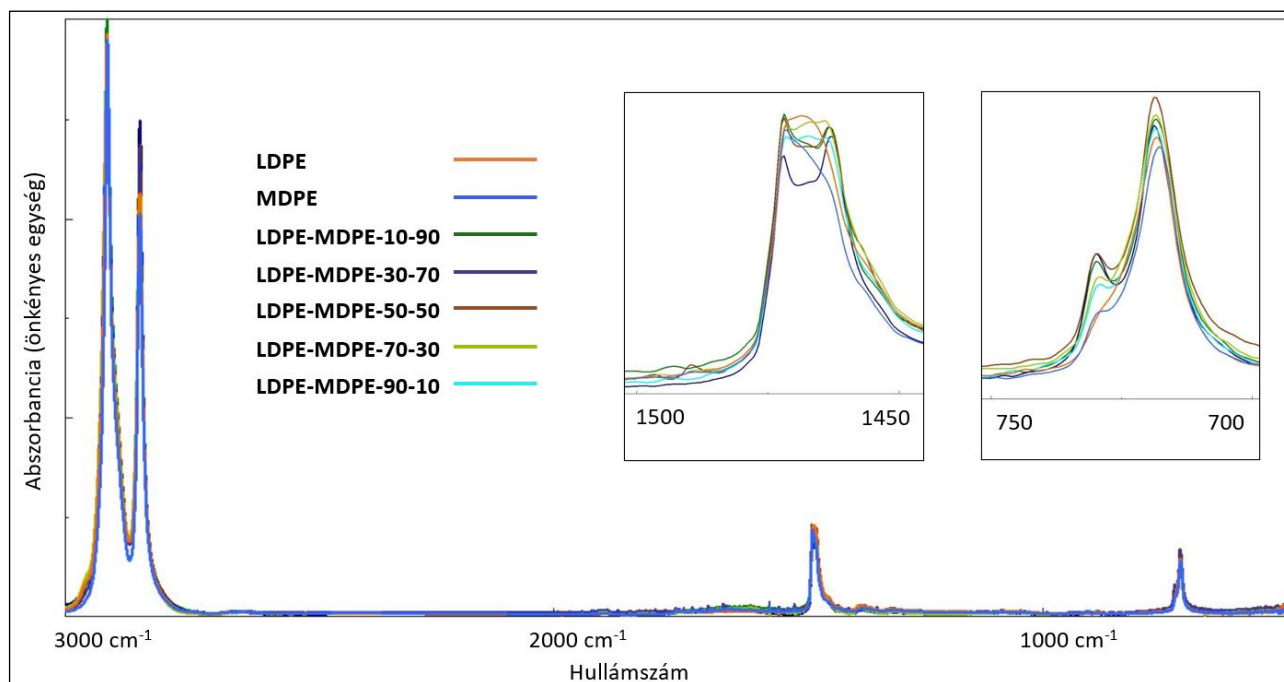
4. ábra Az alapanyagok összehasonlító spektruma

A fenti ábrán megfigyelhetők különbségek a három polimer között azok kristályos állapotától függően. Blendek esetén ezek az eltérések elvileg együtt jelennek meg, az adott sávok intenzitása függ az eredeti intenzitástól, valamint a sávhoz tartozó polimer tömeg szerinti hányadától is. Viszont ez csak akkor igaz, ha a sávok függetlenek egymástól.

A lenti ábrán látható az LDPE-LLDPE (5. ábra) és LDPE-MDPE (6. ábra) keverékek összehasonlító spektruma. Az ábrán megfigyelhető, hogy a spektrumok közül karakterében a 70-30-as és a 90-10-es keverékek hasonlítanak egymásra, valamint a 10-30- és az 50-50-es keverékek szinte egymáson futnak. Mindezek alapján arra lehet következtetni, hogy az infravörös spektrumban a jellemző elnyelések alapján nem lehet megkülönböztetni a blendeket egymástól, hiszen az elnyelések mértéke függ attól, hogy milyen kristályos hányaddal rendelkezik az adott keverék.[10]



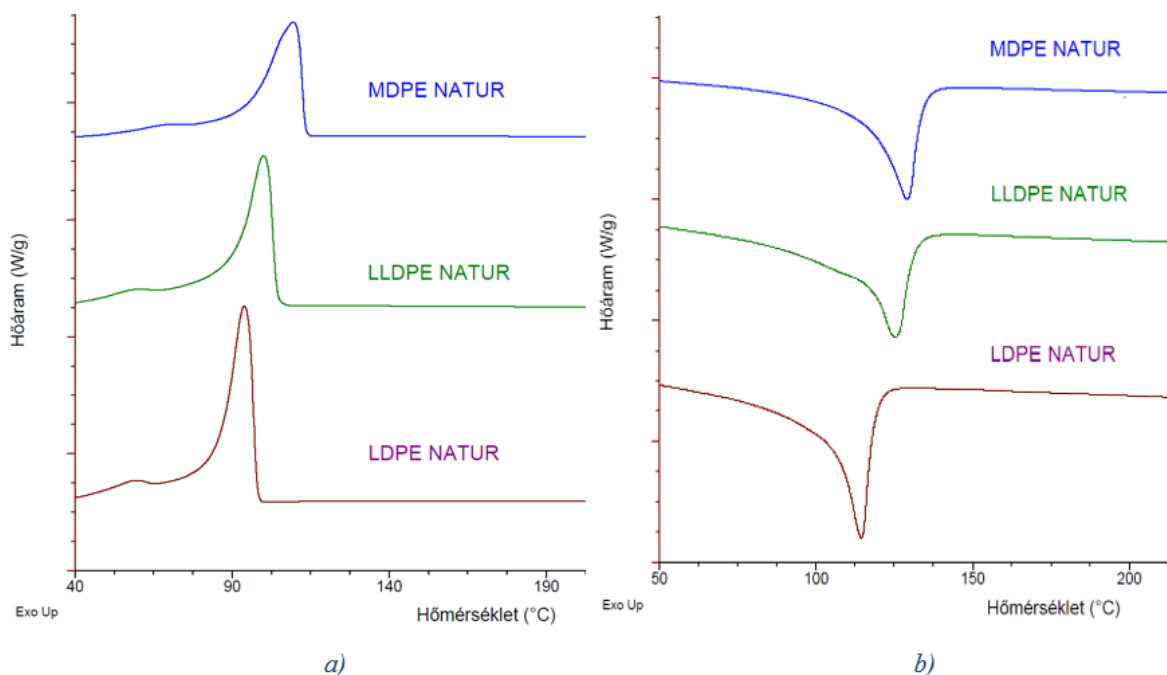
5. ábra Az LDPE-LLDPE blendek összehasonlító spektruma



6. ábra Az LDPE-MDPE blendék összehasonlító spektruma

4.2. Pásztázó differenciál kalorimetria vizsgálat (DSC)

A blendéken végzett DSC vizsgálatok előtt mindenképpen szükség van a natúr alapanyagokon is elvégezni a vizsgálatokat, hogy megkapjuk a tiszta komponensek kristályolvadási és kristályosodási, valamint entalpia értékeit, valamint ezek határértéket adnak az adott keverékek esetében, ami jó összehasonlítási alapot nyújt. A 7. ábrán látható a natúr alapanyagokra jellemző nevezetes csúcsok (kristályosodás és kristályolvadás).



7 ábra: NATUR LDPE, LLDPE és MDPE kristályolvadása (peak melting temperature, T_{pm}) (a), kristályosodása (peak crystallization temperature, T_{pc}) (b)

1. táblázat: Natúr LDPE, LLDPE, MDPE alapanyagok termikus tulajdonságai

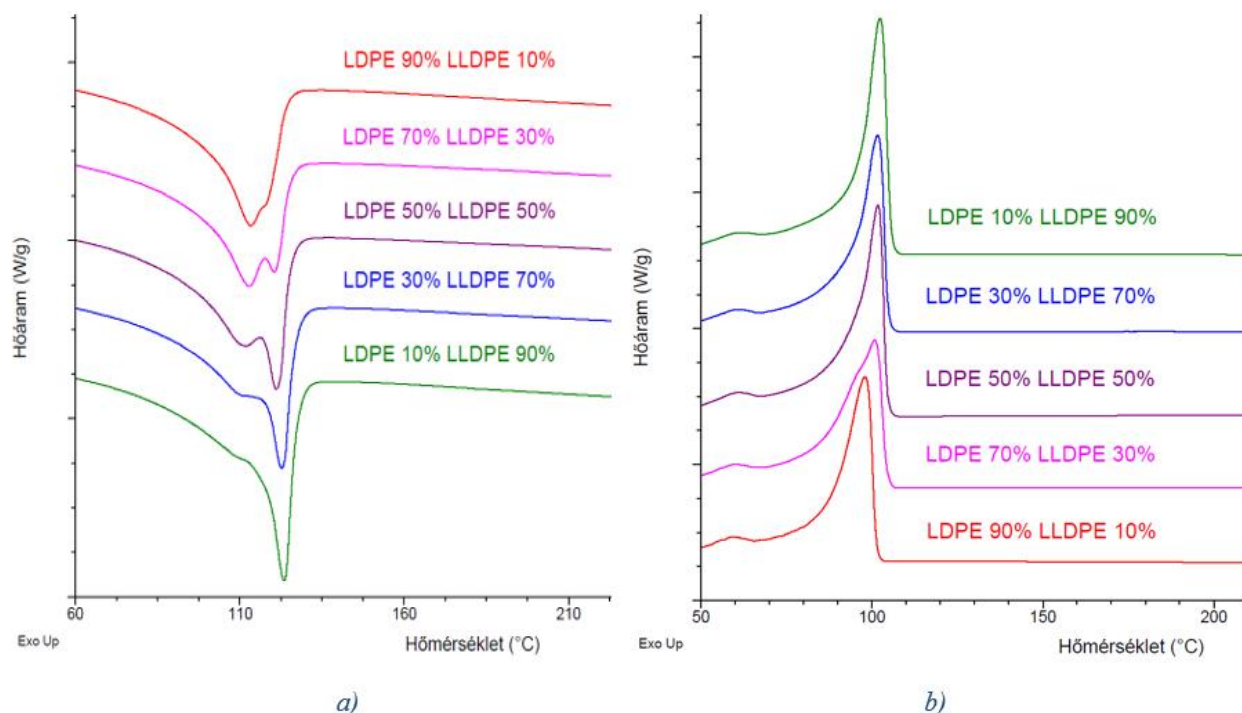
	Második felfűtés		Hűtés	
	T_{pm} (°C)	ΔH_m (J/g)	T_{pc} (°C)	ΔH_c (J/g)
NATUR LDPE	114,4	126,2	93,9	96,4
NATUR LLDPE	125,3	121,3	99,9	93,6
NATUR MDPE	128,7	178,6	109,7	164,7

A DSC mérésekből megállapított eredményeket az 1. táblázat tartalmazza, ahol T_{pm} a kristályolvadás csúcshőmérséklete (peak melting temperature), ΔH_m a kristályolvadási entalpiaváltozás, T_{pc} a kristályosodási csúcshőmérséklet (peak crystallization temperature) és ΔH_c a kristályosodási entalpiaváltozás.

Az egy összetevős görbékben látszik, hogy az alapanyagok olvadási és kristályosodási karakterisztikája részben eltér egymástól.

4.2.1. LDPE-LLDPE blend

8. ábrán láthatóak az LDPE-LLDPE keverékek nevezetes csúcsai melyekből levont következtetéseket a továbbiakban taglalom.



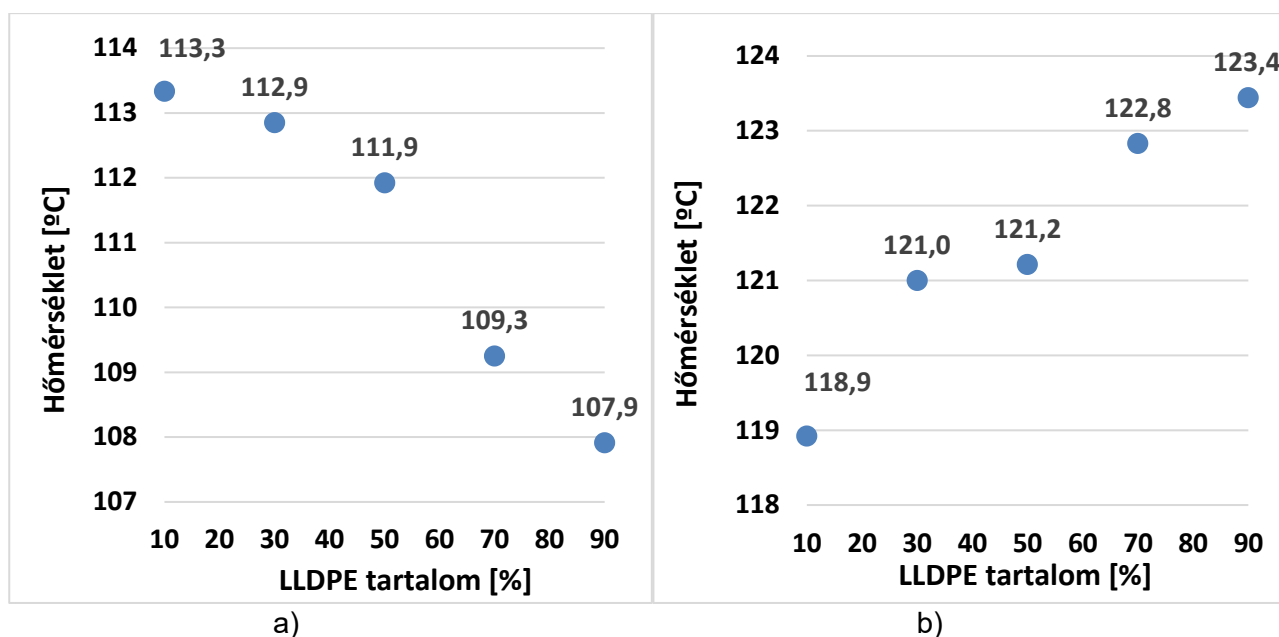
8. ábra: LDPE-LLDPE blendek kristályolvadása (a), kristályosodása (b)

A 2. táblázat LDPE-LLDPE termikus tulajdonságait tartalmazza. Első kristályolvadás csúcshőmérséklet (T_{pm1}), második kristályolvadás csúcshőmérséklet (T_{pm2}), kristályolvadási entalpia (ΔH_m), kristályosodási csúcshőmérséklet (T_{pc}), kristályosodási entalpia (ΔH_c).

2. táblázat: LDPE-LLDPE termikus tulajdonságai

	Második felfűtés			Hűtés	
	T_{pm1} (°C)	T_{pm2} (°C)	ΔH_m (J/g)	T_{pc} (°C)	ΔH_c (J/g)
NATUR LDPE	114,4		126,2	93,9	96,4
NATUR LLDPE	125,3		121,3	99,9	93,6
LDPE 10% LLDPE 90%	107,9	123,4	133,5	102,4	110,8
LDPE 30% LLDPE 70%	109,3	122,8	124,8	101,8	99,1
LDPE 50% LLDPE 50%	111,9	121,2	129,6	101,8	104
LDPE 70% LLDPE 30%	112,9	121,0	117,6	100,8	92,7
LDPE 90% LLDPE 10%	113,3	118,9	118,0	98,1	90,7

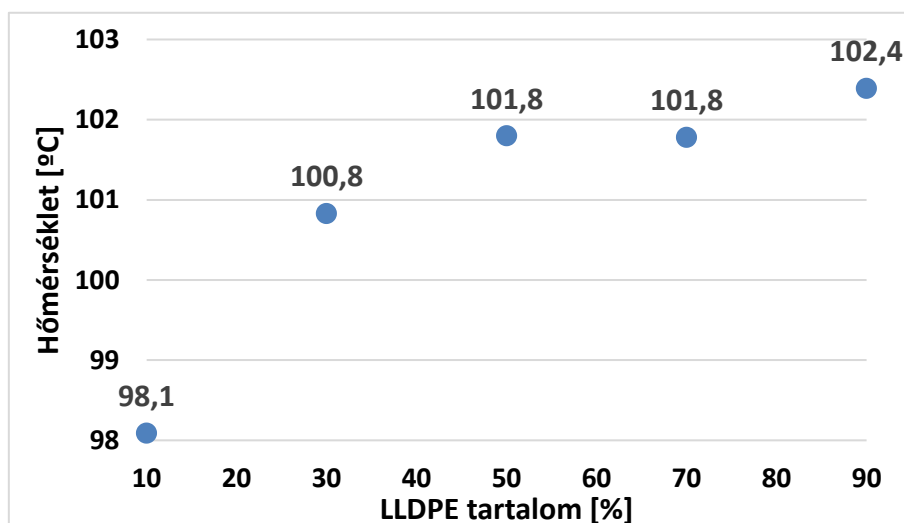
A blendekre jellemző kristályolvadási csúcshőmérséklet értékeiből készített diagramok a következő 2. ábrán látható. (9 ábra)



9. ábra: első kristályolvadás csúcshőmérséklete LLDPE szerinti függése (LDPE-hez tartozó csúcs) (a), második kristályolvadás csúcshőmérséklete LLDPE szerinti függése (LLDPE-hez tartozó csúcs) (b).

Az LDPE–LLDPE keverék első olvadási csúcshőmérséklete a növekvő LLDPE tartalommal egyértelműen csökkenő trendet mutat. Ennek oka, hogy az alkalmazott LLDPE rövidebb és egyenletesebb elágazásai gyengébb kristályosodást eredményeznek, így alacsonyabb hőmérsékleten olvadnak meg, míg az LDPE hosszú láncú elágazásai miatt magasabb hőmérsékleten indul meg az olvadás. Ugyanakkor két elkülönülő olvadási csúcs figyelhető meg, egy alacsonyabb hőmérsékletű csúcs az LDPE-ben gazdagabb kristályfázisnak és egy magasabb, az LLDPE dominálta fázisnak köszönhetően. Arra tudunk következtetni, hogy a keverék első és második olvadási hőmérséklete a két komponens arányának majdnem súlyozott átlagaként alakul. Megállapítható viszont az a tény, hogy az LLDPE jelenléte az LDPE-től eltérő magasabb olvadáshőmérsékletű kristályfázist eredményez a már alacsony összetételi arány mellett is.

A következő ábrán megfigyelhető a másik jellegzetes csúcs, mely a kristályolvadás csúcshőmérsékletét mutatja (10. ábra).



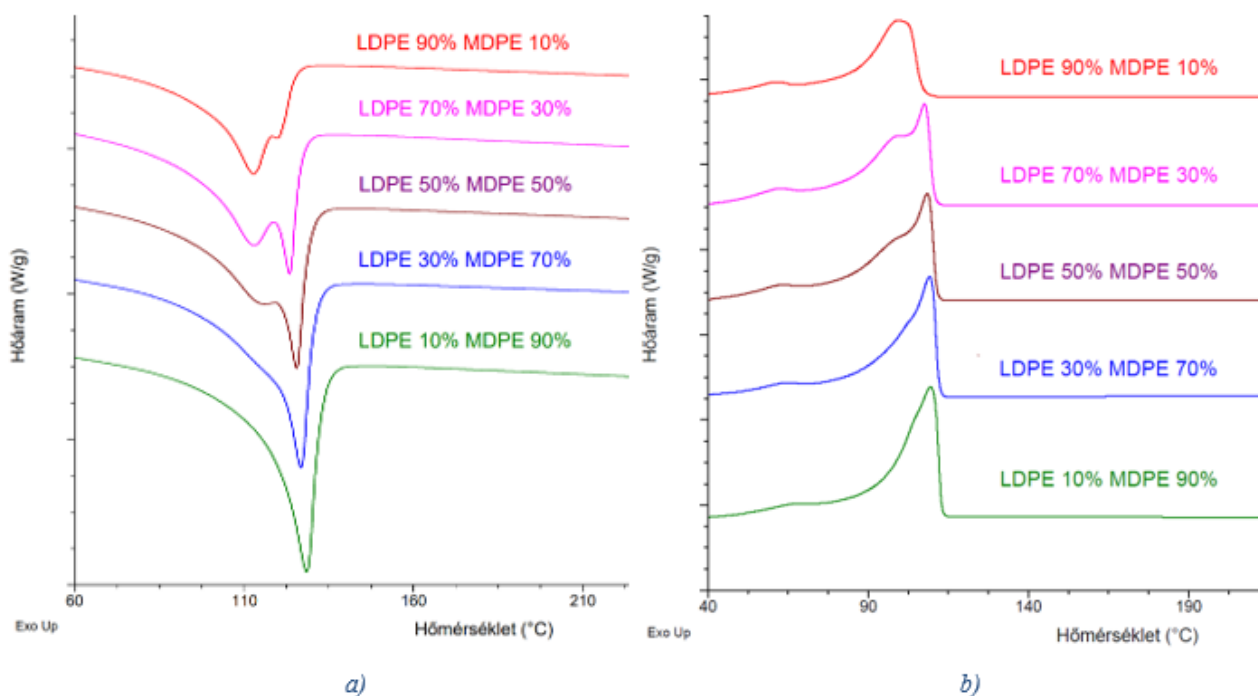
10. ábra kristályosodás csúcshőmérséklet (TC) LLDPE szerinti függése

A blend kristályosodási csúcshőmérséklete (az a hőmérséklet, ahol hűtés közben a maximális kristályképződés zajlik) az LLDPE tartalom növelésével emelkedik. Ez arra utal, hogy az átlagos kristályméret kialakulása magasabb hőmérsékleten megkezdődik.

Az alkalmazott LDPE-LLDPE referenciakeverékeken tapasztalt kristályolvadás és kristályosodás karaktere szoros kapcsolatot mutat az LLDPE térfogataránnyal, valamint közel súlyozott átlagaként alakul minden keverék esetében.

4.2.2. LDPE-MDPE

Az idáig taglalt mérésorozatot LDPE-MDPE blendeken is elvégeztem. Céлом feltárni a kis és közepes sűrűségű etilének egymásra gyakorolt hatását-ellenhatását. 11. ábrán látható az LDPE-MDPE blendekre jellemző nevezetes csúcsok (kristályosodás és kristályolvadás).



11. ábra: LDPE-MDPE blendek kristályolvadása (a), kristályosodása (b)

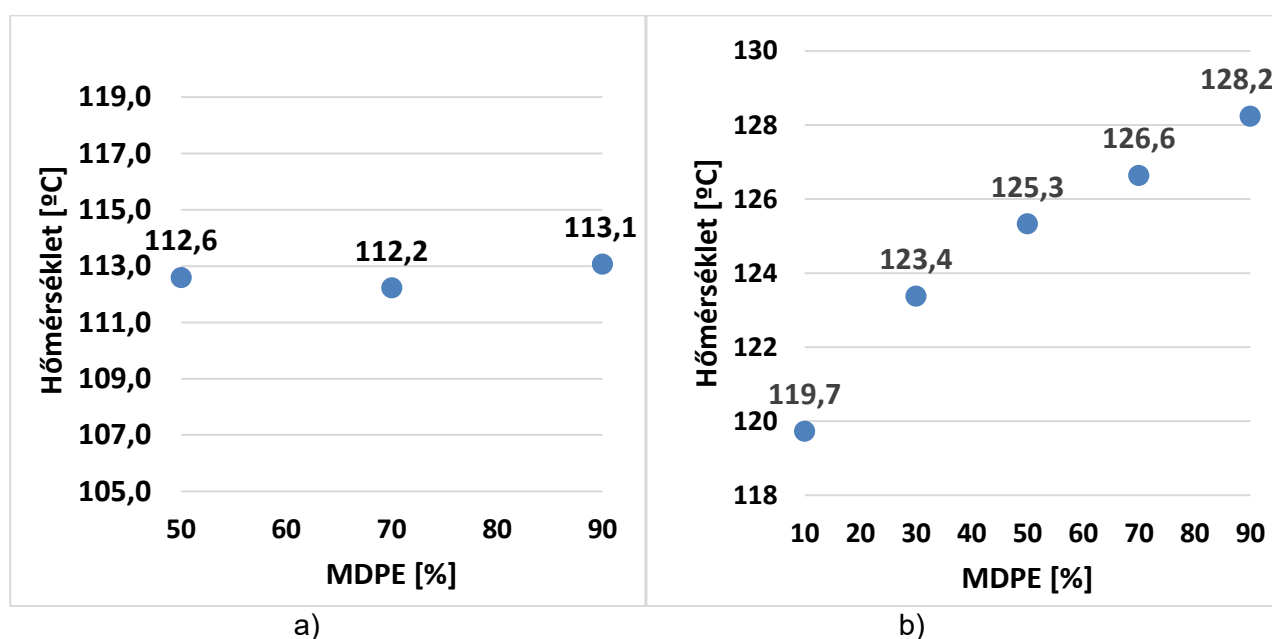
3. táblázat LDPE-MDPE termikus tulajdonságai. LDPE-hez tartozó kristályolvadás csúcshőmérséklet (T_{pm1}), MDPE-hez tartozó kristályolvadás csúcshőmérséklet (T_{pm2}), kristályolvadási entalpia-változás (ΔH_m), kristályosodási csúcshőmérséklet (T_{pc}), kristályosodási entalpia-változás (ΔH_c).

	Második felfűtés			Hűtés	
	T_{pm1} (°C)	T_{pm2} (°C)	ΔH_m (J/g)	T_{pc} (°C)	ΔH_c (J/g)
NATUR LDPE	114,4		126,2	93,9	96,5
NATUR MDPE		128,7	178,6	109,7	164,7
LDPE 10% MDPE 90%		128,2	162,1	109,5	145,0
LDPE 30% MDPE 70%		126,6	154,1	109,2	130,1
LDPE 50% MDPE 50%	112,6	125,3	150,2	108,4	126,3
LDPE 70% MDPE 30%	112,2	123,4	148,6	107,6	127,4
LDPE 90% MDPE 10%	113,1	119,7	113,4	99,5	91,3

Az első olvadási hőmérséklet a kisebb hőmérsékleten jelentkező olvadási csúcs, amely az LDPE-ben gazdag fázis olvadásához köthető. Egészen 70% MDPE arányig T_{m1} megmarad az LDPE-re jellemző tartományban, de az MDPE domináns jellege végig megfigyelhető az ábrán. Ennek oka, hogy az MDPE egyes hosszabb láncszakaszai beépülhetnek az LDPE kristályos

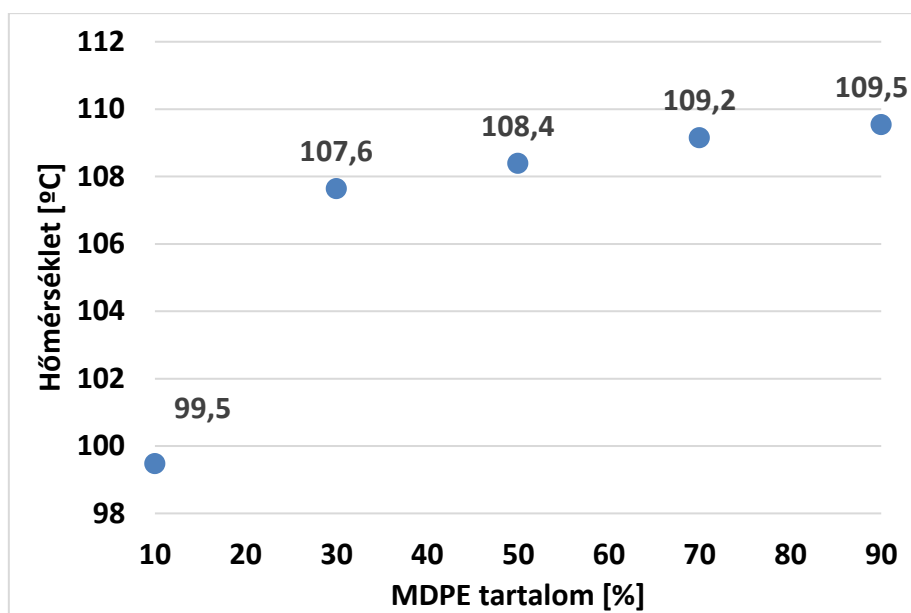
fázisába, növelve a kristályok stabilitását, hosszát és vastagságát. Nagyobb MDPE-hányad esetén amikor az MDPE válik befoglaló fázissá a T_{pm1} csúcs intenzitása csökken, mert az LDPE ekkor már csak diszpergált fázisként van jelen és kisebb arányban kristályosodik. Ilyenkor az LDPE a MDPE mátrixban apró, izolált szegmensekben kristályosodik. E kristályok olvadáspontja némileg alacsonyabb lehet a tiszta LDPE-hez képest. Elmondható, hogy az MDPE növekvő aránya az első olvadási csúcs csökkenését okozza. Az alacsonyabb olvadáspontú LDPE tartalmú fázis háttérbe szorul, míg a magasabb olvadáspontú MDPE-fázis dominánsá válik. Ez a viselkedés arra utal, hogy az LDPE és MDPE korlátozott mértékben képes egyszerre kristályosodni. Alacsony és magas MDPE aránynál részleges együtt kristályosodás, egybeolvadó csúcsok is megfigyelhetők, de nagyobb aránynál a két különböző szerkezetű polimer többnyire fázisszeparáltan, saját kristályfázisában olvad. A T_{pm1} változásainak szerkezetbeli magyarázata tehát azon alapul, hogy az LDPE molekulák elágazásai és az MDPE szegmensei milyen mértékben képeznek közös csoportokat. Minél több az MDPE, annál inkább eltolódik a kristályosodás a magasabb olvadáspont felé.

A 12. ábrán látható LDPE-MDPE blendek 1. és 2. kristályolvadási hőmérsékletei.



12. ábra: 1. kristályolvadás hőmérséklet MDPE szerinti függése (LDPE-hez tartozó csúcs) (a), 2. kristályolvadás hőmérséklet MDPE szerinti függése (MDPE-hez tartozó csúcs) (b).

A hűtési görbén mért kristályosodási hőmérséklet TC azt a hőmérsékletet jelöli, ahol a polimer keverék elkezd kristályosodni, ez a fő exoterm csúcs maximuma (13. ábra). Ez a paraméter erősen függ a polimerek szerkezetétől és az alkotók arányától. Az MDPE arány növekedése a blend TC értékét emeli. Natúr LDPE-nél mért kristályosodási csúcs 93,9 °C, míg tiszta MDPE-nél 109,7 °C a blendek TC-je pedig a két komponens arányától függően e két tartomány között változik. Megfigyelhető két kristályosodási exoterm csúcs is. Szerkezetileg a TC értékek azt jelzik, mely fázis kristályosodik először. Polimer blendünk esetében megfigyelhető, hogy az MDPE komponens kristályosodása feljebb tolja az LDPE kristályosodási hőmérsékletét. Ugyanakkor az erősen elágazó LDPE jelenléte kissé csökkenti az MDPE kristályosodási hőmérsékletét. Összességében a keverék TC értékének alakulása a két polimer kölcsönhatását tükrözi a kristályosodás során, és fontos információkat nyújt a blend szerkezetéről.



13. ábra kristályosodás hőmérséklet (TC) MDPE szerinti függése

5. Összegzés

A bemutatott mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a különböző sűrűségű polietilének (LDPE, LLDPE, MDPE) egymásra gyakorolt hatása jól értelmezhető termoanalitikai módszerrel, és alkalmas egy olyan mérésalapú kiértékelési rendszer alapjául, amely később ismeretlen összetételű reciklált granulátumok karakterizálására alkalmazható. A referencia keverékek jól szemléltetik, hogy az egyes PE-típusok nemcsak külön-külön, hanem elegyrendszerben is jellegzetes termikus tulajdonságokkal írhatók le. Ez a megközelítés közvetlenül illeszkedik a körforgásos műanyagfeldolgozás szemléletéhez, ahol a reciklált alapanyag stabil, reprodukálható minősége kulcsfeltétel.

Az FTIR vizsgálatok nem mutattak ki egyértelmű különbségeket a komponensek között, így ez a módszer nem bizonyult relevánsnak a keverékek arányainak meghatározásához.

A DSC mérései alapján az LDPE–LLDPE keverékek első oladási csúcshőmérséklete az LLDPE-tartalom növekedésével csökkent, míg a második oladási csúcshőmérséklet arányosan nőtt. Az oladási entalpia változása nem mutatott egyértelmű tendenciát. A kristályosodási csúcshőmérséklet és entalpia az LLDPE-tartalom növekedésével emelkedett, de a 50-50%-os keverék esetében kiugró értéket figyeltem meg.

Az LDPE-MDPE keverékek esetében az első oladási csúcshőmérsékletet az MDPE dominálta, az LDPE-csúcs csak 50%-os LDPE-tartalomig volt kimutatható. A második oladási csúcshőmérséklet, valamint az oladási és kristályosodási entalpia egyaránt nőtt az MDPE-tartalom növekedésével, míg a kristályosodási entalpia 30-70% MDPE-tartalom között stagnált.

Összességében a DSC módszer alkalmasnak bizonyult a különböző PE-típusok arányának és kölcsönhatásának jellemzésére, így ezek kombinálásával megbízhatóan becsülhető az ismeretlen PE granulátumok összetétele.

6. Következtetések

A vizsgálatok egyértelműen rávilágítottak arra, hogy az FTIR spektroszkópia önmagában nem alkalmas a polietilén blendék komponensarányának kvantitatív meghatározására. Bár a mért spektrumokban az LDPE, LLDPE és MDPE esetében kimutathatók kisebb eltérések. Ezek az eltérések elsősorban a kristályos fázishoz köthető sáveltolódások és intenzitásváltozások formájában van jelen. A különbségek nem adnak egyértelmű, összefüggést a tömegarányokkal. A keverékek spektrumai azt mutatták, hogy több aránykombináció is nagyon hasonló görbéket eredményez, illetve egyes keverékpárok (pl. 30–70 és 50–50 tömegarány) gyakorlatilag egymásra illeszkednek. Ennek oka, hogy az FTIR elsősorban a kémiai kötésrendszerre érzékeny, míg az itt

vizsgált PE-típusok kémiai felépítése rendkívül hasonló, a spektrumot pedig nagymértékben befolyásolja a kristályosság mértéke is. A következtetés tehát az, hogy az FTIR a polimer család azonosítására és a szennyező, idegen polimer komponensek kimutatására egy jól bevált ellenőrzési rendszer, de a PE–PE blendek összetételének becslésére nem elég hatékony.

Ezzel szemben a DSC vizsgálatok sokkal érzékenyebbnek bizonyultak az egyes komponensek arányára, és jól használható összefüggéseket szolgáltatnak. Az LDPE–LLDPE rendszeren mérhető volt, hogy az első olvadási csúcshőmérséklet (T_{pm1} , LDPE-ben gazdag fázis) az LLDPE-tartalom növekedésével fokozatosan csökken, míg a második olvadási csúcshőmérséklet (T_{pm2} , LLDPE-domináns fázis) emelkedő tendenciát mutat. A kristályosodási csúcshőmérséklet (T_{pc}) szintén emelkedik az LLDPE növekvő arányával, jelezve, hogy a lineárisabb, rövid elágazású LLDPE szerkezet kedvezőbb kristályképződést tesz lehetővé. A 50–50%-os keveréknél tapasztalt viselkedés arra utal, hogy ezen az összetételnél sajátos morfológiai állapot, részleges együtt kristályosodás vagy fázisszerkezeti átrendeződés léphet fel. Ez a jelenség ugyan nehezíti az egyszerű interpolációt, viszont értékes információt hordoz a keverék szerkezetéről, és felhívja a figyelmet arra, hogy a kalibráció során bizonyos kompozíciós tartományokban nem linearitás a változás.

Az LDPE–MDPE keverékek eredményei kiegészítik az előbbi képet. Ebben a rendszerben a magasabb sűrűségű, kristályosabb MDPE erőteljesen dominálja a termikus viselkedést. A második olvadási csúcshőmérséklet (T_{pm2}) az MDPE-tartalom növelésével fokozatosan nő, míg az LDPE-hez köthető T_{pm1} csúcs alacsony MDPE-tartományban még elkülöníthető, magasabb MDPE-arányoknál viszont háttérbe szorul, vagy részben összeolvad a fő csúccsal. A kristályosodási hőmérséklet (T_{pc}) szintén az MDPE arányának megfelelő tartományban emelkedik, ami azt mutatja, hogy a kristályosodás a nagyobb sűrűségű komponenshez igazodik. Az entalpiaértékek alakulásából (ΔH_m , ΔH_c) arra következtetünk, hogy a keverék kristályos részaránya az MDPE növekvő részvételével nő, ugyanakkor bizonyos tartományokban (pl. 30–70% MDPE) megfigyelhető a tendencia laposodása, ami korlátozott együtt kristályosodásra utal. Ezek az eredmények alátámasztják, hogy az LDPE–MDPE rendszerben a sűrűségi különbség erősebb strukturális kontrasztot hoz létre, mint az LDPE–LLDPE párosításnál.

A két elegyrendszer összehasonlítása alapján kijelenthető, hogy a DSC-vel meghatározott csúcshőmérsékletek és az entalpiák alkalmasak egy olyan referenciatablázat és regressziós modell felépítésére, amelyre később ismeretlen eredetű, reciklált PE granulátumok kiértékelése alapozható. A termikus paraméterek komponensarány szerinti változása ugyan nem minden esetben tökéletesen lineáris, de jól definiált, trendeket mutat. Fontos, hogy a módszertan a harmadik felfűtési ciklusra épül, így a termikus előélet hatása kiküszöbölhető, ami különösen releváns, ha a jövőben valódi ipari hulladékáramokból származó PE-t vizsgálunk.

A munka egyúttal kijelöli a továbblépés irányait is. A jelen vizsgálat natúr, adalékmentes alapanyagokra és laboratóriumi körülmények között előállított referencia keverékekre fókuszált, így a kidolgozott módszer alkalmazása valódi csomagolási hulladékokra elkerülhetetlenül kiegészítő lépéseket igényel majd. A jövőben szükséges a degradációból, oxidációból, stabilizátorokból és szennyező polimer fázisokból adódó hatások feltérképezése, illetve olyan kombinált kiértékelési stratégia kialakítása, amely a DSC eredményeket sűrűség, reológiai vagy esetleg további spektroszkópiai mérésekkel együttesen kezeli.

Köszönetnyilvánítás

A projekt Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2025-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik hozzájárultak TDK dolgozatom elkészítéséhez. Külön köszönöm Dr. Bata Attila, Dr. Ronkay Ferenc, Gerse Péter, Palásti Ferenc, és Hansághy Pál-nak, akik folyamatos útmutatással, szakmai tanácsokkal és támogatással nagyban segítették munkám megvalósítását, illetve köszönöm a MOL és Almási Balázs közreműködését, hogy hozzájárultak a munkámhoz szükséges megfelelő anyagok biztosításával. Köszönöm az

Innovatív Járművek És Anyagok Tanszék-nek, hogy lehetőséget biztosított a kutatásaim elvégzésére és a szükséges anyagi, illetve technikai háttér biztosítására.



Irodalomjegyzék

- [1] Y. Wang *et al.*, "A Review of Degradation and Life Prediction of Polyethylene," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 5, 2023, doi: 10.3390/app13053045.
- [2] A. M. Pourrahimi, C. Pitois, and A. Abbasi, "XLPE high voltage insulation; A link between DC conductivity and microstructure," *Polym. Test.*, vol. 131, p. 108330, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108330>.
- [3] A.-S. Haslinger, T. T. Nhu, E. Cadena, G. Thomassen, J. Dewulf, and S. Huysveld, "Life cycle assessment and life cycle costing of emerging circular flexible plastic food and non-food packaging," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 226, p. 108674, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108674>.
- [4] L. K. Ncube, A. U. Ude, E. N. Ogunmuyiwa, R. Zulkifli, and I. N. Beas, "Environmental Impact of Food Packaging Materials: A Review of Contemporary Development from Conventional Plastics to Polylactic Acid Based Materials," *Materials*, vol. 13, no. 21, 2020, doi: 10.3390/ma13214994.
- [5] V. S. Cecon, P. F. Da Silva, K. L. Vorst, and G. W. Curtzwiler, "The effect of post-consumer recycled polyethylene (PCRPE) on the properties of polyethylene blends of different densities," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 190, p. 109627, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109627>.
- [6] A. Scoppio, D. Cavallo, A. J. Müller, and D. Tranchida, "Temperature modulated DSC for composition analysis of recycled polyolefin blends," *Polym. Test.*, vol. 113, p. 107656, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107656>.
- [7] Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, and Gaál János, "A polimertechnika alapjai," 2007, Accessed: Oct. 14, 2025. [Online]. Available: http://glink.hu/hallgatoi_segedletek/files/bde4423321fe07d2333eeb116272c9a2.pdf
- [8] MOL, "A poliolefinek bemutatása Polietilén és polipropilén." Accessed: Oct. 13, 2025. [Online]. Available: https://mol.hu/images/content/A_MOL_rol/a_tvk-rol/egyetemi_kapcsolatok/debrecei_egyetem/Oktatasi_anyagok/Leirasok/A_poliolefinek_bemutatasa_v2016.pdf
- [9] J. V. Gulmine, P. R. Janissek, H. M. Heise, and L. Akcelrud, "Polyethylene characterization by FTIR," *Polym. Test.*, vol. 21, no. 5, pp. 557–563, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(01\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00124-6).
- [10] R. Caban and A. Gnatowski, "Analysis of the Impact of Waste Fly Ash on Changes in the Structure and Thermal Properties of the Produced Recycled Materials Based on Polyethylene," *Materials*, vol. 17, no. 14, 2024, doi: 10.3390/ma17143453.