

Ipari körülmények között előállított többkomponensű bliszter fóliák vizsgálata

Examination of multi-component blister films produced under industrial conditions

DREMÁK Csenge¹, Dr. BOCZ Katalin², Dr. GERE Dániel¹

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék,

²Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar, Szerves Kémia és Technológia Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Abstract

Multi-component plastic packaging waste is increasingly appearing in waste streams, so exploring its recycling potential is a priority. One possible area of application is blister packaging which is used in many areas of our daily lives, as their use ensures both adequate product protection and user-friendly design. The aim of the research is to perform a comprehensive investigation of the mechanical, thermal, and optical properties of multi-component PET/PE blister films produced under industrial conditions.

Keywords: packaging waste, blister packaging, recycling, poly(ethylene terephthalate), polyethylene

Kivonat

A többkomponensű műanyag csomagolási hulladékok egyre nagyobb mértékben jelennek meg a hulladékáramban, amelyeknek újrahasznosítási lehetőségeinek feltárása kiemelt fontosságú. Az egyik lehetséges alkalmazási területet a bliszter csomagolások jelenthetik, amelyek mindennapjaink számos részén felhasználásra kerülnek, mivel alkalmazásukkal egyszerre biztosítható megfelelő termékvédelem és felhasználóbarát kialakítás. A kutatás célja ipari körülmények között előállított többkomponensű PET/PE bliszter fóliák mechanikai, termikus és optikai jellemzőinek széleskörű vizsgálata.

Kulcsszavak: csomagolási hulladék, bliszter csomagolás, újrahasznosítás, poli(etilén-tereftalát), polietilén

1. BEVEZETÉS

2024-ben a globális műanyagtermelés több mint 30%-át poli(etilén-tereftalát) (PET) és polietilén (PE) előállítása tette ki [1]. Európában 2022-ben 54 millió tonna műanyagot állítottak elő, amelynek 40%-a csomagolóanyagiparban került felhasználásra [2].

A hajlékony csomagolóanyagipar egyre nagyobb teret nyer. Európában a hajlékony csomagolóanyagok közel 50%-ban lakossági felhasználású. Az évente előállított mintegy 4,1 millió tonna hajlékony csomagolóanyagból kb. 1 millió tonna többkomponensű, többek között PET/PE társított rendszer [3]. Életútjuk végén ezeknek a lakossági csomagolóanyagoknak mindössze 10%-a kerül anyagában újrahasznosításra [4].

Számos szerző foglalkozott PET/PE rendszerek tulajdonságainak, illetve újrahasznosíthatóságának vizsgálatával. Navarro és társai [5] munkájukban arra keresték a választ, hogy PET palackok újrahasznosítása során mekkora bekerült PE-tartalom esetén biztosíthatóak még megfelelő tulajdonságok. A vizsgálatok során 5%, 10% és 15% PE-tartalmú fröccsöntött PET/PE keverékek reológiai, termikus, morfológiai és mechanikai tulajdonságait elemezték. Azt tapasztalták, hogy 5%-os PE-tartalom alkalmazásával az originális (eredeti) PET-hez hasonló mechanikai tulajdonságok érhetőek el,afelett azonban nagymértékű tulajdonságrólás következett be. A PET és PE fázisok elkülönülését SEM (pásztázó elektronmikroszkópia) felvételeken is megfigyelték. Maksimov és társai [6] 10%, 30%, 50%, 70% és 90% nagysűrűségű polietilén (HDPE) tartalmú PET/HDPE keverékek mechanikai tulajdonságait vizsgálták. A HDPE-tartalom növelésével a folyási feszültség értékekben lineáris csökkenést, míg szakítószilárdság értékekben nemlineáris csökkenést figyeltek meg, amely 90%-os PE-tartalom esetén újra nőtt. A folyási nyúlás esetében a PE-tartalom növelésével folyamatos kismértékű növekedést, míg szakadás nyúlás esetén 50%-os PE-tartalomig csökkenést, majd 90% PE-tartalomnál jelentős növekedést tapasztaltak. Delva és társai [7] originális PET/PE és gyártásközi PET/PE

élelmiszertálcából reciklált keverékek mechanikai és morfológiai tulajdonságait elemezték maleinsav anhidriddel ojtott stírol-etilén-butadién-stírol (SEBS-g-MA) és etilén-propilén gumi (EPDM) adalékanyagok alkalmazásával. Az összetételek SEM felvételeinek vizsgálata során arra a következtetésre jutottak, hogy az adalékanyagok kompatibilizáló hatása nem kimutatható, azonban az EPDM hatékonyabban javította az ütőszilárdságot a SEBS-g-MA-hoz képest.

A bliszterek olyan speciális csomagolások, amelyek egy formázott műanyagbetétből és egy ahhoz hővel vagy rádiófrekvenciával zárt tálcából (pl. alumínium, műanyag, papír) állnak [8]. A többkomponensű hulladék azért lehet alkalmas akár bliszterek gyártására, mert a blisztercsomagolások változatos alkalmazási igényeihez különböző összetételű és jellemzőjű anyagok jól illeszthetők.

A szakirodalomban a fröccsöntött és préselt keverékek vizsgálatára helyezik a hangsúlyt, fólia keverékek vizsgálatával kevésbé foglalkoznak. Így a kutatás célja jelentős részarányban (70%) reciklált alapanyagból gyártott PET/PE fólia keverékek mechanikai, termikus és optikai tulajdonságainak vizsgálata.

2. FELHASZNÁLT ALAPANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

2.1. Felhasznált alapanyagok

Az előzetes laboratóriumi kísérletek alapján választottuk ki az összetételeket az ipari gyártási próbához. Az előállított fóliák Neopet 80 típusú originális PET (oPET), Pro-Form Kft. által előállított 1. osztályú PET daralék (rPET) és MOL Tipolen FB 243-51 típusú originális kis sűrűségű polietilén (LDPE) felhasználásával készültek. Az előállított fóliák (Pro-Form Kft.) összetételeit a 1. táblázat tartalmazza.

Előállított fóliák összetételei

1. táblázat

Jelölés	(-)	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.
oPET	(m/m%)	100	-	30	29	28	30
rPET 1.o.	(m/m%)	-	100	70	68	66	69
LDPE	(m/m%)	-	-	-	3	6	1

2.2. Minták előkészítése

2.2.1. Fóliák gyártása

Az 1. táblázatban található síkfólia összetételek Gwell GWP95 típusú ikercsigás extruderrel kerültek gyártásra. A síkfóliák névleges vastagsága és szélessége rendre 0,5 mm és 800 mm volt. A feldolgozás 245-265 °C hőmérsékletprofil, 285-285 °C szűrő hőmérséklet, 260-260-260-260 °C; ajak: 270 °C szerszám hőmérséklet, alsó: 27 °C; középső: 27 °C; felső: 27 °C kalanderhenger hőmérséklet, 81 l/perc extruder csiga forgási sebesség, 15 l/perc ömledékszivattyú forgási sebesség, 15,8-15,8-15,8 m/perc kalanderhenger forgási sebesség alkalmazásával kerültek feldolgozásra.

2.2.2. Próbatetek kimunkálása

A mechanikai (szakító és ejtdárdás) vizsgálatokhoz a próbateteket stancolással vágtuk ki stancszerszám és golyósprés alkalmazásával. A próbatetek minden esetben a fóliák közepéről az extrúziós iránnyal párhuzamosan, valamint merőlegesen kerültek kimunkálásra.

A szakító próbatetek az MSZ EN ISO 527-3:2019 szabvány 4-es típusú, az ejtdárdás próbatetek 100 mm × 100 mm méretű, négyzet alakú, amíg az optikai vizsgálathoz használt próbatetek 50 mm × 50 mm négyzet alakú geometriával rendelkeztek.

2.3. Vizsgálati módszerek

2.3.1. Fóliavastagság vizsgálata

A fóliavastagság vizsgálatához Mitutoyo MDC-25SX típusú külső mikrométert alkalmaztunk 0-25 mm mérési tartománnyal és 0,001 mm felbontással.

2.3.2. Szakítóvizsgálat

A méréseket Zwick Z005 típusú univerzális szakítógéppel végeztük, ékpályás befogó, 200 mm/perc szakítási sebesség, 100 mm befogási hossz segítségével, 23 °C-on, 50%-os páratartalom mellett.

2.3.3. Ejtődárdás vizsgálat

A vizsgálatokat Instron Ceast Fractovis 9350 típusú ejtődárdás berendezésen végeztük el 20 mm-es átmérőjű és 2,036 kg tömegű, félgömb végű dárda, 1001,7 mm ejtési magasság, 4,43 m/s becsapódási sebesség, 20 J becsapódási energia segítségével 23 °C-on és 50%-os páratartalom mellett.

2.3.4. Differenciális pásztázó kalorimetria

A méréseket TA Instruments Q2000 típusú berendezéssel végeztük. A mérések fűt-hűt-fűt ciklusokból álltak. A vizsgálati hőmérséklettartomány 23-300 °C, a fűtési, illetve hűtési sebesség 10 °C/perc volt. A mérési atmoszféra és a védőgáz is nitrogén volt 50 ml/perc áramlási térfogatárammal. A minták tömege 3-6 mg volt. A mérések kiértékelését TA Instruments Universal Analysis szoftverrel végeztük.

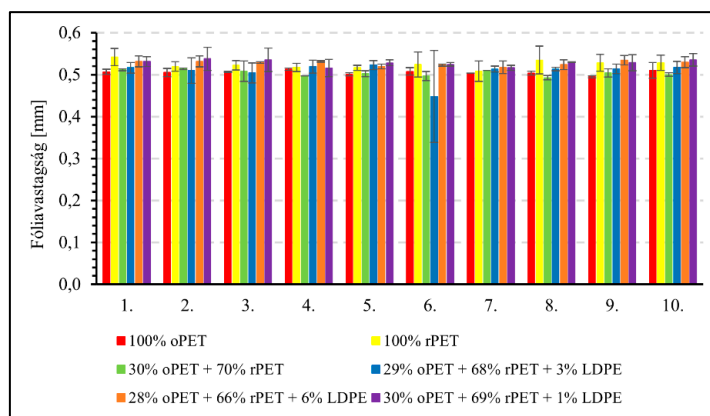
2.3.5. Optikai tulajdonságok vizsgálata

A különböző összetételű fóliák optikai tulajdonságait, – transzmittancia (teljes fényáteresztő képesség) és homályosság – BYK-Gardner haze-gard plus típusú mérőgéppel, az ASTM D1003 szabvány alapján hajtottuk végre.

3. KIÉRTÉKELÉS

3.1. Fóliavastagság vizsgálata

Először a gyártott fóliák vastagságeloszlását (1. ábra) vizsgáltuk a fólia szélessége mentén kb. 90 mm távolságként 10 különböző helyen.

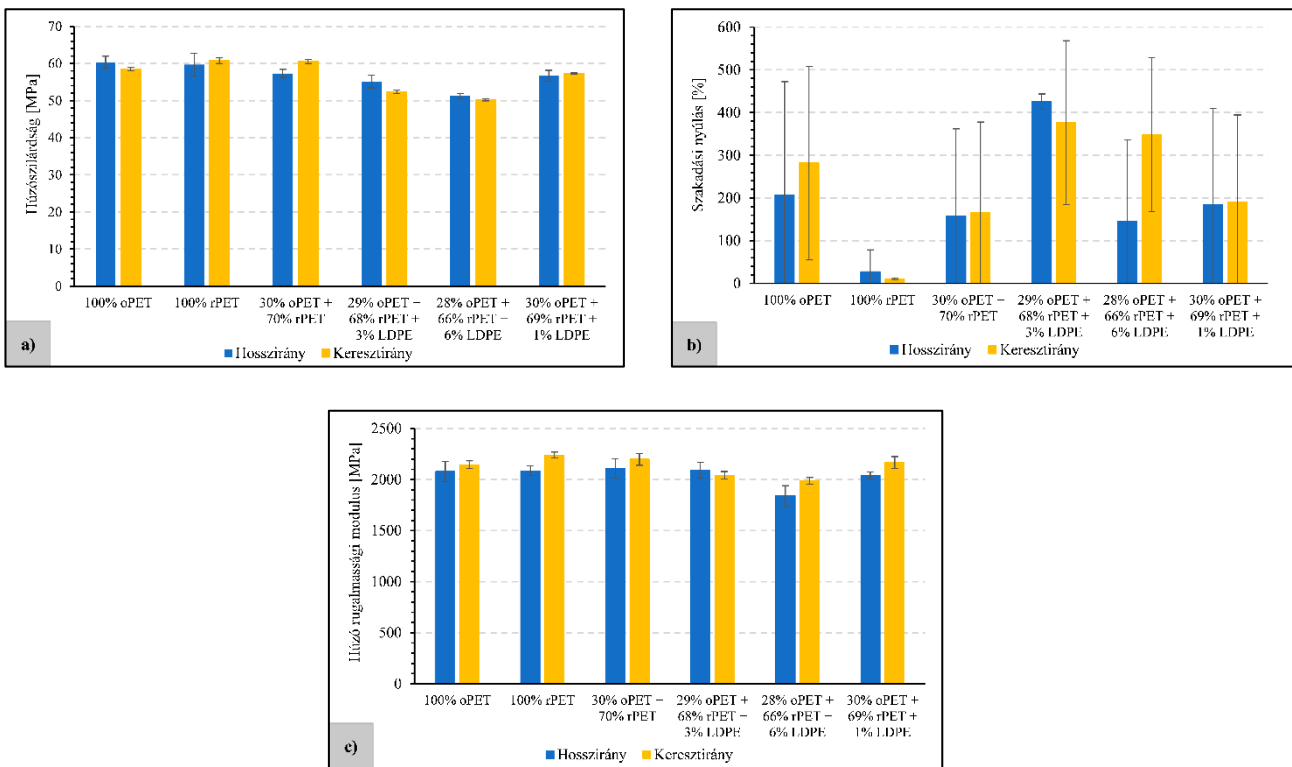


1. ábra. A különböző összetételű fóliák vastagsága a fólia szélessége mentén 10 helyen

Az ábrán megfigyelhető, hogy a fóliavastagság mindegyik összetétel esetén egyenletes volt a fólia szélessége mentén.

3.2. Szakítóvizsgálat

A húzószilárdság (2.a ábra) esetében oPET, rPET és a 30/70 m/m% arányú keverék esetén nem adódott jelentős eltérés sem hossz, sem keresztirányban. LDPE hozzáadásával csökkenés mutatkozott mind hossz-és keresztirányban. A legnagyobb mértékű csökkenés 6% LDPE tartalom esetén tapasztalható. Megfigyelhető, hogy egyes esetekben hosszirányban nagyobb értékre adódott a húzószilárdság a keresztirányhoz képest. Ez arra vezethető vissza, hogy a gyártás során az elhúzás irányában orientálódó molekulák miatt a hosszirányú nyúlási képesség csökken, azonban a szilárdság nő.



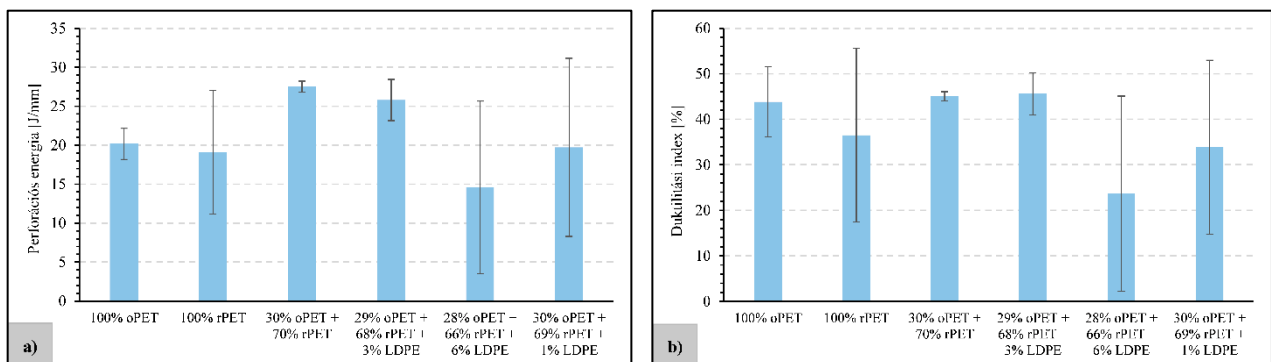
2. ábra. A különböző összetételű fóliák a) Húzószilárdság b) Szakadási nyúlás c) Húzó rugalmassági modulus értékei hossz-és keresztirányban.

A szakadási nyúlás (2.b ábra) rPET alkalmazásával jelentősen csökkent az oPET-hez képest, azonban LDPE hozzáadásával nőttek a reciklált alanyanyagból gyártott fóliák nyúlás értékei. A szakadási nyúlás eredményekben jelentős szórások figyelhetők meg, mivel a próbatestek egy része több 100%-os nyúlás után szakadt el, amíg másik része pedig 10-40%-nál.

A húzó rugalmassági modulus (2.c ábra) tekintetében az oPET és rPET között nem tapasztalható jelentős különbség. LDPE hozzáadásával némileg csökken a merevség; legnagyobb mértékben a 6% LDPE tartalom esetén figyelhető meg, azonban ez is csak 5% körüli mértékben.

3.3. Ejtődárdás vizsgálat

A perforációs energia tekintetében (3.a ábra) az oPET és rPET fólia minták között nem tapasztalható szignifikáns eltérés, bár megjegyzendő, hogy az rPET esetén sokkal nagyobb szórást tapasztaltunk.



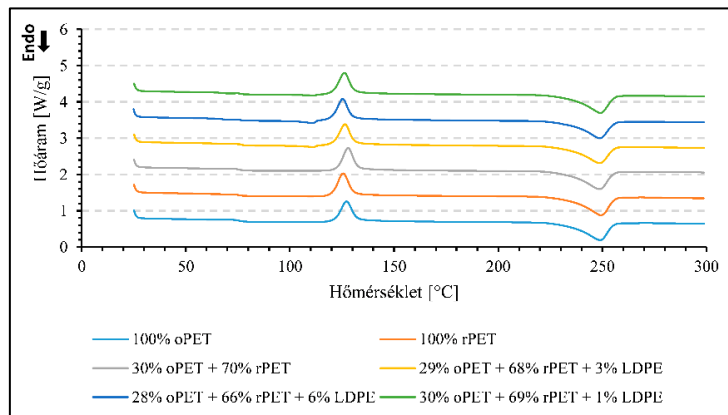
3. ábra. A különböző összetételű fóliák a) Perforációs energia és b) Duktilitási index értékei

A 30/70 m/m%-os keverék esetén 40%-os növekedés adódott a perforációs energia értékében. LDPE hozzáadásával egyértelműen - azonban nagyobb mértékben csak 6% LDPE tartalom esetén - csökkent a perforációs energia értéke, azonban az eredmények nagy szórásokkal terheltek. A duktilitási index tekintetében (3.b. ábra) hasonló tendencia figyelhető meg, mint a perforációs energia esetében. Az ejtődárdás vizsgálatok

eredményei alapján arra következtettünk, hogy kompatibilizálás hiányában a rosszul elegyedő polimerek keverékéből készült fóliák dinamikus mechanikai terheléssel szembeni ellenállása 6% feletti LDPE tartalom felett kezd el számottevően csökkenni.

3.4. Differenciális pásztázó kalorimetria

A 4. ábrán a különböző összetételű fóliák első felfűtési DSC görbéi láthatók.

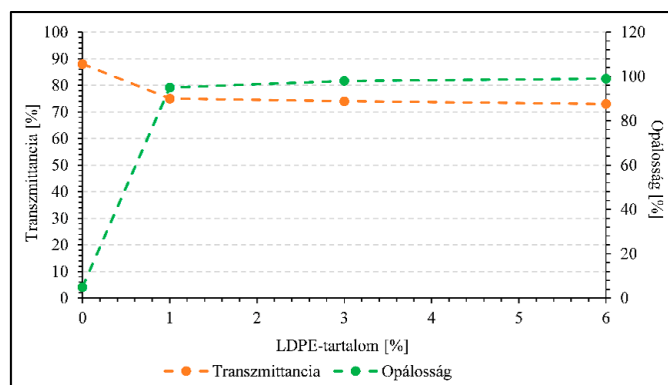


4. ábra. A különböző összetételű fóliák első felfűtési görbéi

Az ábrán megfigyelhető a PET két kitüntetett hőmérséklettartománya, a hidegkristályosodási csúcs 130 °C környékén, továbbá a kristályolvadási hőmérséklettartomány 250 °C körül minden vizsgált összetétel esetén. Az LDPE alacsony részaránya miatt nem tapasztalható hozzá köthető kristályolvadási hőmérséklettartomány.

3.5. Optikai tulajdonságok vizsgálata

A 30/70 arányú oPET/rPET alapú fóliák transzparencia és opálosság értékei az LDPE tartalom függvényében az 5. ábrán figyelhetők meg.



5. ábra. A különböző összetételű fóliák opálossága [%] és transzmittanciája [%] az LDPE-tartalom [%] függvényében

Látható, hogy a transzparencia az LDPE hozzáadásával körülbelül 10%-os csökkenést mutatott, majd ezt követően közel állandó maradt az értéke. Az opálosság azonban már 1% LDPE hozzáadásával is jelentősen nőtt.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az originális és reciklált PET 30/70 arányú keverékéből készült, növekvő mennyiségű (1–6%) LDPE-t tartalmazó PET/PE fóliák mechanikai, termikus és optikai tulajdonságait vizsgáltuk. Eredményeink alapján megállapítható, hogy még 6% LDPE-tartalom mellett is kiegyensúlyozott mechanikai jellemzők érhetők el. A

szakítószilárdság és a húzó rugalmassági modulus mindössze mintegy 15%-kal csökkent a 100% originalis PET fóliához viszonyítva, miközben a szakadási nyúlás, a perforációs energia és a termikus viselkedés gyakorlatilag változatlan maradt.

Az LDPE jelenléte ugyanakkor már alacsony (1%) koncentrációban is számottevően növelte a fólia opálosságát. Ennek ellenére az átlátszóság még 6% LDPE-tartalom esetén is meghaladta a 70%-ot.

Kompatibilizálószer alkalmazásával az LDPE diszperz fázisának mérete csökkenthető és a fázishatáron kialakuló adhézió javítható, ami a fényszórás mérséklésén keresztül kedvezőbb optikai tulajdonságokat eredményezhet.

Eredményeink alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy az alacsony (10% alatti) LDPE-tartalmú, reciklált PET/PE fóliákból készült blisztercsomagolások számos alkalmazási területen alkalmasak lehetnek az originalis PET-ből gyártott bliszterek kiváltására, különösen olyan felhasználási környezetben, ahol a teljes víztisztaság nem alapkövetelmény.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (BO/00894/23/6), valamint a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) PD 146135 pályázatának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Plastics Europe: Plastics-the fast Facts 2025. Plastics Europe, Brüsszel, 2025.
- [2] Plastics Europe: Plastics-the fast Facts 2023. Plastics Europe, Brüsszel, 2023.
- [3] Flexible Packaging in Europe, <https://ceflex.eu/flexible-packaging-in-europe/>, (2026. 02. 25.).
- [4] van Rossem C. *State of Recycling Technologies for Flexible Plastic Recycling in Europe*. EPRD Ltd., Kielce, Lengyelország, 2023.
- [5] Navarro R., Ferrándiz S., López J., Seguí V. J. *The influence of polyethylene in the mechanical recycling of polyethylene terephthalate*. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 2008, 195(1-3), 110-116.
- [6] Maksimov R. D., Merii Meri R., Kalnin M., Zicans, J. *Mechanical properties of polyethylene and poly (ethylene terephthalate) blends*. Mechanics of composite materials. Springer, 2003, 39(3), 189-196.
- [7] Delva L., Deceur C., Van Damme N., Ragaert K. *Compatibilization of PET-PE blends for the recycling of multilayer packaging foils*. AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2019, 2055(1), 030005.
- [8] Skin, blister és celofánozó gépek, <https://amcokft.hu/skinblisterrendszerrek>, (2026. 02. 25.).