



**Kauno technologijos universitetas**  
Aplinkos inžinerijos institutas  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Bioskaidžių ir konvencinių plėvelių, turinčių barjerines  
savybes, vertinimas lanksčių pakuočių gamybai**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Ugnė Viktorija Paulikaitė**

Projekto autorė

**prof. dr. Visvaldas Varžinskas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Aplinkos inžinerijos institutas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Bioskaidžių ir konvencinių plėvelių, turinčių barjerines savybes, vertinimas lanksčių pakuočių gamybai**

Baigiamasis magistro projektas

Darnus valdymas ir gamyba (6213EX001)

---

**Ugnė Viktorija Paulikaitė**

Projekto autorė

**prof. dr. Visvaldas Varžinskas**

Vadovas

**doc. dr. Inga Gurauskienė**

Recenzentė

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Aplinkos inžinerijos institutas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Ugnė Viktorija Paulikaitė

## **Bioskaidžių ir konvencinių plėvelių, turinčių barjerines savybes, vertinimas lanksčių pakuočių gamybai**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Ugnė Viktorija Paulikaitė

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**Kauno technologijos universitetas**  
Aplinkos inžinerijos institutas  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

## **Baigiamojo magistro projekto užduotis**

Projekto tema Bioskaidžių ir konvencinių plėvelių, turinčių barjerines savybes, vertinimas lanksčių pakuočių gamybai

---

Reikalavimai ir sąlygos  
(tikslinti pavadinimą  
pagal poreikį)

- Tyrimai turi būti atliekami pagal standartizuotas metodikas, užtikrinant bandymų atkuriamumą ir rezultatų palyginamumą.
- Turi būti parinktos ir aprašytos bioskaidžios plėvelės pakuočių (turinčios barjerines savybes), remiantis gamintojų pateiktomis specifikacijomis, o eksperimentai turi apimti mechaninius bandymus, siūlių formavimą ir sandarumo vertinimą.
- Aplinkosauginio poveikio analizė turi būti atliekama pagal ISO 14040 ir ISO 14044 principus, naudojant patikimus duomenų šaltinius ir aiškiai apibrėžtą funkcinį vienetą.

Vadovas / Vadovė

prof. dr. Visvaldas Varžinskas

---

(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

(data)

Paulikaitė, Ugnė Viktorija. Bioskaidžių ir konvencinių plėvelių, turinčių barjerines savybes, vertinimas lanksčių pakuočių gamybai. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas prof. dr. Visvaldas Varžinskas; Kauno technologijos universitetas, Aplinkos inžinerijos institutas; Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aplinkos inžinerija (E03) – pagrindinė, Gamybos inžinerija (E10), Verslas (L01), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: bioskaidžios plėvelės; tradicinės plėvelės; barjerinės savybės; mechaninės savybės; siūlių stiprumas; sandarumas; lanksčios pakuotės; tempimo bandymai.

Kaunas, 2026. 70 p.

## Santrauka

Plastikinių pakuočių vartojimas pasaulyje nuolat auga, o lanksčios pakuotės sudaro reikšmingą plastiko atliekų dalį. Dėl didėjančio aplinkosauginio poveikio ir griežtėjančių Europos Sąjungos reikalavimų nuo 2030 metų, numatančių perėjimą prie perdirbamų, pakartotinai naudojamų arba biologiškai skaidžių pakuočių, didėja poreikis ieškoti alternatyvų tradicinėms poliolefinų pagrindo plėvelėms. Vis dėlto bioskaidžių medžiagų taikymą vis dar riboja nepakankamai iširtos jų eksploatacinės savybės bei neaiškus konkurencingumas lyginant su konvenciniais ir perdirbtais plastikais.

Tyrimo objektas – konvencinės, perdirbtos ir bioskaidžios polimerinės plėvelės, naudojamos arba galinčios būti naudojamos lanksčių maisto pakuočių gamyboje. Darbo tikslas – įvertinti bioskaidžių plėvelių tinkamumą pakeisti konvencinių poliolefinų pagrindu gaminamas lanksčias plastikines pakuotes, analizuojant jų fizikines-mechanines bei barjerines savybes, siūlių formavimą ir aplinkosauginį poveikį. Tikslui pasiekti buvo išanalizuota mokslinė literatūra ir teisinis reglamentavimas, atlikti plėvelių fizikinių ir mechaninių savybių tyrimai, įvertintas siūlių stiprumas ir pakuočių sandarumas, taip pat atlikta gyvavimo ciklo analizė (LCA).

Tyrimo taikyti eksperimentiniai ir analitiniai metodai. Mechaninės plėvelių savybės nustatytos pagal EN ISO 527-3 ir ASTM D882 standartus, siūlių stiprumas vertintas pagal ASTM F88/F88M metodiką, o pakuočių sandarumas – pagal ASTM F2338 vakuomo slėgio mažėjimo metodą. LCA atlikta „OpenLCA“ programine įranga pagal ISO 14040 ir ISO 14044 standartus, taikant „ReCiPe Midpoint (H)“ poveikio vertinimo metodiką. Aplinkosauginis vertinimas atliktas trims skirtingoms plėvelių grupėms – konvenciniam polietilenui (LDPE), perdirbtam polietilenui (rLDPE) ir polilaktidui (PLA). Kiekvienai medžiagai modeliuoti alternatyvūs gyvavimo pabaigos scenarijai (deginimas, šalinimas sąvartyne, mechaninis perdirbimas arba pramoninis kompostavimas), o gauti rezultatai analizuoti tiek lyginant skirtingus tos pačios medžiagos scenarijus, tiek tarpusavyje vertinant analogiškus skirtingų medžiagų atliekų tvarkymo būdus.

Atlikti tyrimai parodė reikšmingus skirtumus tarp tirtų plėvelių grupių. Geriausiomis fizikinėmis-mechaninėmis savybėmis pasižymėjo konvenciniai poliolefinai. Didžiausias tempimo jėga nustatyta LDPE-120 plėvelei, o didžiausias pailgėjimas iki lūžio – rLDPE-90 plėvelei. Bioskaidžios plėvelės pasižymėjo mažesniu mechaniniu atsparumu, mažesniu pailgėjimu iki lūžio ir siauresniu sandarinimo procesu. Siūlių stiprumo tyrimai parodė, kad stipriausias siūles sudarė LDPE pagrindo plėvelės, o bioskaidžių plėvelių siūlės buvo mechaniškai silpniausios. Pakuočių sandarumo bandymai atskleidė,

kad konvencinės plėvelės dažniausiai užtikrino stabilų hermetiškumą, tuo tarpu daliai bioskaidžių pakuočių nustatyti reikšmingi nesandarumai.

Gyvavimo ciklo analizės rezultatai parodė, kad didžiausią aplinkosauginę naudą užtikrina uždaro ciklo atliekų tvarkymo sprendimai. Geriausi rezultatai klimato kaitos kategorijoje nustatyti PLA pramoninio kompostavimo scenarijuje, o mechaninis LDPE ir rLDPE perdirbimas taip pat sukūrė reikšmingą aplinkosauginį kreditą. Tuo tarpu deginimo ir šalinimo sąvartyne scenarijai pasižymėjo didžiausiu neigiamu poveikiu aplinkai. Nustatyta, kad PLA aplinkosauginiu požiūriu yra perspektyvi alternatyva tradiciniams plastikams, tačiau jo taikymą šiuo metu riboja nepakankamos mechaninės savybės ir mažesnis siūlių bei pakuočių sandarumo patikimumas.

Techniniu požiūriu geriausiomis savybėmis pasižymėjo konvencinės LDPE, LLDPE ir PP plėvelės, o aplinkosauginiu požiūriu didžiausią potencialą demonstravo PLA ir perdirbtas LDPE. Lanksčių pakuočių tvarumui didinti tikslinga plėtoti vienarūšių poliolefininių pakuočių ir perdirbtų žaliavų naudojimą, o bioskaidžių medžiagų atveju – toliau gerinti jų mechanines bei sandarinimo savybes ir užtikrinti efektyvų kompostavimo infrastruktūros veikimą.

Paulikaitė, Ugnė Viktorija. Assessment of Biodegradable and Conventional Barrier Films for Flexible Packaging Applications. Master's Final Degree Project / supervisor prof. dr. Visvaldas Varžinskas; Institute of Environmental Engineering; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Environmental Engineering (E03) – main study field, Business (L01), Engineering Sciences, Production and Manufacturing Engineering (E10).

Keywords: biodegradable films; conventional films; barrier properties; mechanical properties; seal strength; package integrity; flexible packaging; tensile testing.

Kaunas, 2026. Number of pages 70.

### **Summary**

Plastic packaging consumption worldwide is continuously increasing, and flexible packaging accounts for a significant share of plastic waste. Due to the growing environmental impact and increasingly strict European Union requirements from 2030, which foresee a transition toward recyclable, reusable, or biodegradable packaging, there is a rising need to seek alternatives to traditional polyolefin-based films. However, the application of biodegradable materials is still limited by insufficiently studied performance properties and unclear competitiveness compared to conventional and recycled plastics.

The object of the study is conventional, recycled, and biodegradable polymer films used or potentially usable in flexible food packaging production. The aim of the work is to evaluate the suitability of biodegradable films to replace conventional polyolefin-based flexible plastic packaging by analyzing their physical-mechanical and barrier properties, seal formation, and environmental impact. To achieve this goal, scientific literature and regulatory frameworks were analyzed, experimental testing of physical and mechanical properties of films was conducted, seal strength and packaging integrity were evaluated, and a life cycle assessment (LCA) was performed.

Experimental and analytical methods were applied in the study. The mechanical properties of the films were determined according to EN ISO 527-3 and ASTM D882 standards, seal strength was evaluated according to ASTM F88/F88M methodology, and packaging integrity was tested using the ASTM F2338 vacuum decay method. LCA was carried out using the “OpenLCA” software in accordance with ISO 14040 and ISO 14044 standards, applying the ReCiPe Midpoint (H) impact assessment method. The environmental assessment was conducted for three different film groups: conventional polyethylene (LDPE), recycled polyethylene (rLDPE), and polylactide (PLA). For each material, alternative end-of-life scenarios were modeled (incineration, landfill disposal, mechanical recycling, or industrial composting), and the results were analyzed both by comparing different scenarios for the same material and by evaluating comparable waste management options across different materials.

The conducted research revealed significant differences between the studied film groups. Conventional polyolefins exhibited the best physical-mechanical properties. The highest tensile strength was recorded for LDPE-120 film, while the highest elongation at break was observed for rLDPE-90 film. Biodegradable films demonstrated lower mechanical resistance, lower elongation at break, and a narrower sealing process window. Seal strength tests showed that the strongest seals

were formed by LDPE-based films, whereas biodegradable films produced mechanically the weakest seals. Packaging integrity tests revealed that conventional films generally ensured stable hermeticity, while a portion of biodegradable packages exhibited significant leakage.

Life cycle assessment results showed that closed-loop waste management solutions provide the greatest environmental benefits. The best results in the climate change category were observed in the PLA industrial composting scenario, while mechanical recycling of LDPE and rLDPE also generated significant environmental credits. In contrast, incineration and landfill disposal scenarios had the highest negative environmental impacts. It was found that PLA is an environmentally promising alternative from a sustainability perspective; however, its application is currently limited by insufficient mechanical properties and lower reliability of seals and packaging integrity.

From a technical perspective, conventional LDPE, LLDPE, and PP films demonstrated the best performance, while from an environmental perspective PLA and recycled LDPE showed the greatest potential. To improve the sustainability of flexible packaging, it is recommended to further develop mono-material polyolefin packaging and the use of recycled feedstocks. In the case of biodegradable materials, it is necessary to further improve their mechanical and sealing properties and ensure efficient operation of composting infrastructure.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>11</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>12</b>
<b>Santrumpų sąrašas .....</b>	<b>13</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>15</b>
<b>1. Plastiko, pakuočių ir tvarumo teorinis kontekstas.....</b>	<b>16</b>
1.1. Plastikų rūšys, savybės ir klasifikacija .....	16
1.1.1. Plastiko samprata, savybės ir funkcijos.....	16
1.1.2. Polimerų samprata ir klasifikacija .....	18
1.2. Bioplastikai.....	18
1.2.1. Bioplastikų samprata ir jų klasifikavimas .....	18
1.2.2. Biologinis skaidumas ir kompostavimas .....	19
1.2.3. Bioplastikų gamyba, rinka ir taikymo sritys.....	20
1.3. Lanksčios pakuotės ir jų struktūra .....	22
1.3.1. Pakuotės samprata .....	22
1.3.2. Lanksčios pakuotės ir jų struktūra .....	22
1.3.3. Lanksčių pakuočių ekologinė žala.....	22
1.4. Plėvelių fizikinių–mechaninių ir barjerinių savybių tyrimai.....	23
1.5. Barjerinės ir fizikinės-mechaninės savybės.....	24
1.5.1. Dujų pralaidumas.....	25
1.5.2. Barjeriniai sluoksniai.....	26
1.5.3. Medžiagų savybių palyginimo matrica .....	27
1.6. Gyvavimo ciklo vertinimas .....	30
1.6.1. Iškastinių ir biopagrindo polimerų gyvavimo ciklo vertinimas .....	30
1.6.2. Lanksčių pakuočių LCA.....	31
1.6.3. Daugiasluoksnių plėvelių LCA .....	31
1.7. Atliekų tvarkymas .....	32
1.7.1. Atliekų hierarchija ir plastiko atliekų susidarymas .....	32
1.7.2. Vartojimo įtaka atliekų susidarymui ir poveikiui aplinkai .....	33
1.7.3. Bioplastikinių atliekų tvarkymas ir biologinis skaidumas.....	33
1.7.4. Lanksčių pakuočių atliekų tvarkymas .....	34
<b>2. Plėvelių ir siūlių tyrimo metodika.....</b>	<b>36</b>
2.1. Tyrimas ir jo etapai.....	36
2.2. Plėvelės fizikinių–mechaninių savybių tyrimai .....	37
2.2.1. Bandinių paruošimas .....	37
2.2.2. Tempimo bandymas .....	38
2.3. Siūlių stiprumo bandymai.....	39
2.3.1. Siūlių formavimas .....	39
2.3.2. Siūlių stiprumo bandymas .....	39
2.3.3. Pakuotės sandarumo tyrimai.....	40
2.4. LCA .....	41
2.4.1. Darbo eiga .....	41
<b>3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir analizė .....</b>	<b>42</b>
3.1. Plėvelių mechaninių savybių rezultatai .....	43
3.2. Siūlių stiprumo rezultatai .....	46

3.3. Pakuotės sandarumo rezultatai .....	50
3.4. Gyvavimo ciklo analizė .....	52
3.5. LCA rezultatų interpretacija .....	54
3.5.1. LDPE scenarijų rezultatai .....	54
3.5.2. reLDPE scenarijų rezultatai .....	55
3.5.3. PLA scenarijų rezultatai .....	57
3.5.4. Sąvartyno scenarijaus palyginimas tarp medžiagų .....	58
3.5.5. Deginimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų .....	60
3.5.6. Perdirbimo bei kompostavimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų .....	61
<b>Išvados .....</b>	<b>63</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>65</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>71</b>
1 priedas. Plėvelės įtempio-deformacijos kreivė .....	71
2 priedas. Siūlės jėgos-poslinkių kreivė .....	72

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Plastikinių medžiagų pavadinimai, charakteristikos ir tipinis panaudojimas [3].....	17
<b>2 lentelė.</b> Plastiko klasifikacija pagal žaliavų kilmę [1].....	17
<b>3 lentelė.</b> Sutrumpintos sąvokos, susijusios su bioplastikais [7].....	19
<b>4 lentelė.</b> Įprastų funkcinių sluoksnių apžvalga [38], 1 dalis.....	26
<b>5 lentelė.</b> Įprastų funkcinių sluoksnių apžvalga [38], 2 dalis.....	27
<b>6 lentelė.</b> Lanksčių pakuočių plėvelių savybių palyginimo matrica .....	28
<b>7 lentelė.</b> Tyrimui naudojamų plastikinių plėvelių ir pakuočių charakteristikos .....	42
<b>8 lentelė.</b> Tempimo bandymų rezultatų santrauka, 1 dalis.....	45
<b>9 lentelė.</b> Tempimo bandymų rezultatų santrauka, 2 dalis.....	46
<b>10 lentelė.</b> Siūlės tempimo bandymų rezultatų santrauka .....	48
<b>11 lentelė.</b> Pakuotės sandarumo testo rezultatai.....	51
<b>12 lentelė.</b> LDPE, rLDPE ir PLA pakuočių galutinio gyvavimo ciklo srautų suvestinė .....	53
<b>13 lentelė.</b> LDPE scenarijų rezultatai.....	54
<b>14 lentelė.</b> reLDPE scenarijų rezultatai, 1 dalis .....	55
<b>15 lentelė.</b> reLDPE scenarijų rezultatai, 2 dalis .....	56
<b>16 lentelė.</b> PLA scenarijų rezultatai .....	57
<b>17 lentelė.</b> Sąvartyno scenarijaus palyginimas tarp medžiagų, 1 dalis .....	58
<b>18 lentelė.</b> Sąvartyno scenarijaus palyginimas tarp medžiagų, 2 dalis .....	59
<b>19 lentelė.</b> Deginimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų .....	60
<b>21 lentelė.</b> Perdirbimo bei kompostavimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų, 1 dalis.....	61
<b>22 lentelė.</b> Perdirbimo bei kompostavimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų, 2 dalis.....	62

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Spalvomis koduojami plastiko perdirbimo numeriai - raudona – nesaugu; geltona – santykinai saugu; žalia – saugu naudoti [3] .....	16
<b>2 pav.</b> Plastikinių medžiagų, įskaitant biologiškai skaidžius ir biologinės kilmės polimerus, apžvalga ir jų ryšys [5] .....	18
<b>3 pav.</b> Biopolimerų klasifikavimas pagal biologinį skaidumą ir gyvavimo ciklo pabaigos scenarijus [8] .....	20
<b>4 pav.</b> Pasauliniai bioplastikų gamybos pajėgumai [9] .....	21
<b>5 pav.</b> Pasauliniai bioplastikų gamybos pajėgumai pagal plastikų rūšis [9] .....	21
<b>6 pav.</b> Pasauliniai bioplastikų gamybos pajėgumai 2025 m. ir 2030 m. pagal rinkos segmentus [9]	21
<b>7 pav.</b> Scheminė dujų prasiskverbimo per polimerinę pakavimo plėvelę iliustracija [35] .....	25
<b>8 pav.</b> Atliekų hierarchija [59] .....	32
<b>9 pav.</b> Pakavimo atliekos ES, pagal pakavimo medžiagas, 84 mln. tonų 2021 m. [60] .....	32
<b>10 pav.</b> Kiek plastiko yra perdirbama (2022 m.) [61] .....	33
<b>11 pav.</b> Daugiasluoksnių plėvelių atliekų perdirbimo metodų santrauka [38, 65] .....	34
<b>12 pav.</b> Metodologinė schema .....	37
<b>13 pav.</b> Rekomenduojami bandinio matmenys [66] .....	38
<b>14 pav.</b> Bandymams paruošta briauninė siūlė .....	39
<b>15 pav.</b> Maišelio bandinys litavimo metu .....	41
<b>16 pav.</b> Bandinys tempimo bandymo metu .....	43
<b>17 pav.</b> Konvencinių plėvelių įtempio-deformacijos kreivė .....	44
<b>18 pav.</b> Perdirbtų plėvelių įtempio-deformacijos kreivė .....	44
<b>19 pav.</b> Bioskaidžių plėvelių įtempio-deformacijos kreivė .....	45
<b>20 pav.</b> reLDPE bandinys po tempimo bandymo .....	46
<b>21 pav.</b> Konvencinių ir perdirbtų plėvelių jėgos-poslinkių kreivė .....	47
<b>22 pav.</b> Bioskaidžių plėvelių siūlių jėgos-poslinkių kreivė .....	48
<b>23 pav.</b> Siūlės bandinio įtvirtinimas tempimo mašinos griebtuvuose .....	49
<b>24 pav.</b> Bandinio trūkimas per siūlę .....	49
<b>25 pav.</b> Siūlės deformacija po bandymo .....	49
<b>26 pav.</b> Bandinys „Oxipack“ vakuuminėje kameroje prieš sandarumo testą .....	50
<b>27 pav.</b> Vakuumo stabilizavimo etapas .....	50
<b>28 pav.</b> Mažo intensyvumo nuotėkis .....	52
<b>29 pav.</b> Didelis pakuotės nesandarumas .....	52
<b>30 pav.</b> Pažeista pakuotė .....	52
<b>31 pav.</b> LDPE pakuočių scenarijų įtaka klimato kaitos kategorijai .....	55
<b>32 pav.</b> reLDPE pakuočių scenarijų įtaka žemės naudojimo kategorijai .....	56
<b>33 pav.</b> PLA pakuočių scenarijų įtaka klimato kaitos kategorijai .....	58
<b>34 pav.</b> Sąvartyno scenarijų įtaka klimato kaitos kategorijai .....	59
<b>35 pav.</b> Sąvartyno scenarijų įtaka žemės naudojimo kategorijai .....	59
<b>36 pav.</b> Deginimo scenarijų įtaka klimato kaitos kategorijai .....	61
<b>37 pav.</b> Perdirbimo ir kompostavimo scenarijų įtaka neatsinaujinančių energijos išteklių kategorijai .....	62

## Santrumpų sąrašas

ASTM – Amerikos bandymų ir medžiagų draugija;  
ATR – atenuotos visiškos atspindžio spektroskopija;  
BF – bazalto pluoštas;  
bio-PET – biokilmės polietileno tereftalatas;  
CF – anglies pluoštas;  
DMTA – dinaminė mechaninė terminė analizė;  
DSC – diferencialinė skenuojančioji kalorimetrija;  
ES – Europos Sąjunga;  
EVOH – etileno–vinilo alkoholio kopolimeras;  
FTIR – Furjė transformacijos infraraudonoji spektroskopija;  
HDPE – didelio tankio polietilenas;  
ISO – Tarptautinė standartizacijos organizacija;  
LCA – gyvavimo ciklo analizė;  
LDPE – mažo tankio polietilenas;  
LLDPE – linijinis mažo tankio polietilenas;  
OPP – orientuotas PP;  
OPET – orientuotas PET;  
OTR – deguonies pralaidumo koeficientas;  
PA – poliamidas;  
PBAT – polibutileno adipato tereftalatas;  
PBS – polibutileno sukcinatas;  
PC – polikarbonatas;  
PE – polietilenas;  
PE-g-AA – akrilo rūgštimi graftuotas polietilenas;  
PE-g-MA – maleino rūgštimi graftuotas polietilenas;  
PEF – polietileno furanoatas;  
PET – polietileno tereftalatas;

PHA – polihidroksialkanoatai;  
PHB – polihidroksibutiratas;  
PLA – polilaktidas (polilaktinė rūgštis);  
PP – polipropilenas;  
PPWR – ES Pakuočių ir pakuočių atliekų reglamentas;  
PS – polistirenas;  
PS-co-GMA – polistireno-ko-glicidilmetakrilato kopolimeras;  
PTT – politrimetileno tereftalatas;  
PVC – polivinilchloridas;  
PVOH – polivinilo alkoholis;  
r-PET – perdirbtas polietileno tereftalatas;  
SEM – skenuojanti elektroninė mikroskopija;  
TGA – termogravimetrinė analizė;  
TPS – termoplastinis krakmolas;  
WVTR – vandens garų pralaidumo koeficientas.

## Įvadas

Plastikų gamyba per pastarąjį šimtmetį išaugo nuo 1,7 mln. tonų iki daugiau kaip 367 mln. tonų per metus. Tuo tarpu plastikinės pakuotės tapo vienu svarbiausių plastiko pramonės sektorių dėl nedidelio svorio, gerų eksploatacinių savybių ir ekonominio efektyvumo. Tačiau augantis plastikinių pakuočių vartojimas didina aplinkosauginį poveikį bei skatina ieškoti tvaresnių alternatyvų. Europos Sąjungoje plastiko pakuočių atliekų tvarkymas tampa vienu svarbiausių žiedinės ekonomikos iššūkių, todėl didėja dėmesys perdirbamoms, pakartotinai naudojamoms ir biologiškai skaidžioms pakavimo medžiagoms. Temos aktualumą didina nauji Europos Sąjungos teisės aktų reikalavimai, numatantys, kad ateityje rinkai tiekiamos pakuotės turi būti pritaikytos perdirbimui, pakartotiniam naudojimui arba biologiniam skaidymui. Dėl šių priežasčių tradicinės daugiasluoksnės plastikinės pakuotės palaipsniui keičiamos lengviau perdirbamomis vienasluoksnėmis pakuotėmis bei bioplastikais. Vis dėlto mokslinėje literatūroje nurodoma, kad bioskaidžios medžiagos dažnai pasižymi prastesnėmis fizikinėmis-mechaninėmis, barjerinėmis ir sandarinimo savybėmis nei konvenciniai poliolefinai, todėl jų taikymo galimybės pramonėje išlieka diskusijų objektu. Nors mokslinėje literatūroje plačiai nagrinėjamos bioplastikų savybės ir jų modifikavimo galimybės, vis dar trūksta tyrimų, kuriuose vienodomis sąlygomis būtų kompleksiskai lyginamos konvencinės, perdirbtos ir bioskaidžios plėvelės. Taip pat ribotai analizuojamas šių medžiagų tinkamumas realioms pakavimo operacijoms, vertinant ne tik fizikines-mechanines ir barjerines savybes, bet ir siūlių formavimo kokybę, pakuočių sandarumą bei aplinkosauginį poveikį per visą gyvavimo ciklą.

Tyrime taikomi eksperimentiniai ir analitiniai metodai. Plėvelių mechaninės savybės vertinamos pagal EN ISO 527-3 ir ASTM D882 standartus, siūlių stiprumas – pagal ASTM F88/F88M metodiką, o pakuočių sandarumas – pagal ASTM F2338 vakuomo slėgio mažėjimo metodą. Medžiagų aplinkosauginis poveikis vertinamas atliekant gyvavimo ciklo analizę (LCA) „OpenLCA“ programine įranga, naudojant ecoinvent duomenų bazę ir tarptautinių ISO 14040 bei ISO 14044 standartų principus.

**Tikslas:** įvertinti bioskaidžių plėvelių tinkamumą pakeisti konvencinių poliolefinų lanksčias plastikines pakuotes, analizuojant jų fizikines-mechanines savybes, siūlių formavimo ir maišelio sandarumo parametrus bei aplinkosauginį poveikį.

### Uždaviniai:

1. išanalizuoti mokslinėje literatūroje pateikiamus lanksčių plastikinių pakuočių tyrimus, teisinį reglamentavimą, rinkoje naudojamų pakuočių asortimentą bei jų struktūrines ypatybes;
2. ištirti konvencinių, perdirbtų ir bioskaidžių plėvelių fizikines ir mechanines savybes;
3. įvertinti plėvelių siūlių formavimo galimybes, siūlių mechaninį stiprumą ir pakuočių sandarumą;
4. atlikti skirtingų plėvelių gyvavimo ciklo analizę (LCA) ir įvertinti jų poveikį aplinkai;
5. palyginti tirtų medžiagų technines ir aplinkosaugines savybes bei pateikti rekomendacijas dėl jų taikymo kaip alternatyvų tradicinėms lanksčioms pakuotėms.

## 1. Plastiko, pakuočių ir tvarumo teorinis kontekstas

### 1.1. Plastikų rūšys, savybės ir klasifikacija

Plastikai išlieka viena svarbiausių pakavimo medžiagų grupių dėl jų funkcinių savybių ir plataus pritaikymo, tačiau augantis jų vartojimas ir atliekų kiekis kelia reikšmingų aplinkosauginių iššūkių. Dėl to vis daugiau dėmesio skiriama biologiškai skaidiems polimerams kaip tvaresnei alternatyvai, ypač vertinant lanksčių pakuočių barjerinius ir funkcinius reikalavimus. Atsižvelgiant į tai, svarbu apžvelgti pagrindines plastikų grupes ir jų savybes, kurios lemia jų tinkamumą įvairioms pakavimo funkcijoms. Siekiant įvertinti jų pritaikomumą, būtina palyginti bioskaidžių ir konvencinių plėvelių savybes.

#### 1.1.1. Plastiko samprata, savybės ir funkcijos

Plastiko naudojimas sparčiai augo nuo XX a. vidurio (nuo 1,7 mln. tonų iki 367 mln. tonų per metus), kai prasidėjo jo masinė gamyba ir taikymas pramonėje. Iš pradžių plastikas buvo naudojamas nedideliais kiekiais, tačiau pramonės plėtra lėmė nuolatinį jo vartojimo didėjimą įvairiuose sektoriuose, tokiuose kaip vandens butelių, farmacinių produktų ir pakuočių gamyba [1]. Europos Parlamento ir Tarybos direktyvoje „Dėl tam tikrų plastikinių gaminių poveikio aplinkai mažinimo“ plastikas yra apibrėžiamas kaip „medžiaga, kurią sudaro polimeras [...], į kurią gali būti pridėta priedų ar kitų medžiagų ir kuri gali būti galutinių produktų pagrindinė struktūrinė sudedamoji dalis, išskyrus chemiškai nemodifikuotus gamtinius polimerus.“ [2] Tai gali reikšti tiek termoreaktyvias, tiek termoplastines medžiagas, tačiau pastarosios yra gerokai labiau paplitusios ir sudaro didžiąją dalį pasaulinės plastiko gamybos. Plastiko savybes lemia polimerų struktūra, tačiau jos gali būti modifikuojamos pridėdant įvairių priedų arba keičiant gamybos procesą. Dažniausiai naudojamų plastikų perdirbimo numeriai pateikiami 1 paveiksle [3].



1 pav. Spalvomis koduojami plastiko perdirbimo numeriai - raudona – nesaugu; geltona – santykinai saugu; žalia – saugu naudoti [3]

1 pav. pavaizduoti simboliai parodo bendrą plastiko sudėtį, teikia informaciją apie saugumą ir perdirbamumą. Šie simboliai žymimi skirtingomis spalvomis, siekiant pabrėžti informaciją apie naudojimo saugumą. Plastikai, pažymėti kodais 1, 2, 4 ir 5, laikomi saugiais maistui ir lengvai perdirbamais. 1 žymi PET, o 2, 4 ir 5 – poliolefinus (HDPE, LDPE, PP). Kodu 3 (PVC) ir 6 (PS) žymimi plastikai perdirbami retai dėl sudėtingos sudėties ir galimų sveikatos rizikų (pvz., PVC gali išskirti dioksinus, PS – stireną). Kodas 7 apima polikarbonatą ir įvairius mišinius, todėl jų sudėtis neaiški ir jie paprastai neperdirbami [3].

Plastikų savybių ir taikymo įvairovė lemia jų funkcionalumą skirtingose pramonės srityse, todėl svarbu apžvelgti pagrindines naudojamų medžiagų grupes. 1 lentelėje pateikiamos dažniausiai aptinkamų plastikų savybės ir tipinės jų taikymo sritys, leidžiančios įvertinti jų tinkamumą įvairioms pakuotėms.

**1 lentelė.** Plastikinių medžiagų pavadinimai, charakteristikos ir tipinis panaudojimas [3]

Plastiko rūšis	Pagrindinės savybės	Tipinės taikymo sritys
<b>Polietilenai (PE)</b>	Atsparūs chemikalams, geri elektros izoliatoriai; tvirti, turi mažą trinties koeficientą; žemas stipris ir prastas atsparumas atmosferos poveikiui	Lanksčios talpos, žaislai, puodeliai, akumuliatorių dalys, ledo formelės, plėvelės
<b>Polipropilenai (PP)</b>	Atsparūs šiluminiam deformavimuisi; puikios elektros savybės ir atsparumas nuovargiui; chemiškai inertiški; nebrangūs; prastas atsparumas UV spinduliams	Sterilizuojamos talpos, pakuotės, plėvelės, televizorių korpusai, lagaminai
<b>Poliesteriai (PET/ PETE)</b>	Viena tvirčiausių plėvelių; puikus atsparumas nuovargiui ir plyšimui; atsparūs drėgmei, rūgštims, riebalams, alyvoms ir tirpikliams	Magnetinės juostos, drabužiai, padangų kordai, gėrimų buteliai
<b>Fluorangliavan deniliai (PTFE / TFE)</b>	Chemiškai inertiški, puikios elektros savybės, mažas trinties koeficientas, atsparūs aukštai temperatūrai; santykinai silpni ir turi prastas šaltojo tekėjimo savybes	Aukštos temperatūros elektronikos dalys, antikoroziniai sandarikliai, cheminiai vamzdžiai ir vožtuvai, nelipnios dangos, guoliai
<b>Vinilai (PVC ir kt.)</b>	Universalios medžiagos; paprastai standžios, bet gali būti lanksčios su plastifikatoriais; dažnai kopolimerizuojamos; jautrios šiluminiam deformavimuisi	Grotelių plokštės, grindų dangos, vamzdžiai, sodo žarnos, elektros laidų izoliacija

Plastikinių pakuočių analizėje svarbiausi yra PE, PP, PET ir PA, nes jie sudaro pagrindinius daugiasluoksnių plėvelių mechaninio stabilumo, barjerinių ir sandarinimo sluoksnius. Šių medžiagų pakeitimas tvaresnėmis alternatyvomis yra vienas pagrindinių iššūkių kuriant perdirbamas ar biologiškai skaidžias daugiasluoksnes pakuotes.

Plastikų klasifikacija pagal žaliavų kilmę ir skaidumo savybes yra svarbi vertinant tiek tradicinių, tiek biologinės kilmės polimerų taikymo galimybes pakuotėse. 2 lentelėje pateikiamos keturios pagrindinės plastikų grupės, išskiriant jų kilmę, naudojamus polimerų tipus ir biologinio skaidumo potencialą.

**2 lentelė.** Plastiko klasifikacija pagal žaliavų kilmę [1]

Nr.	Tipas	Plastiko produktai	Žaliavų šaltinis	Skaidumas
1	Iškastinės kilmės plastikai	PE, PS, PVC, PP, PC	Iškastinis kuras (nafta, gamtinės dujos)	Neskaidūs (nebiologiškai skaidūs)
2	Iškastinės kilmės plastikai	PBS, PCL, PBAT	Iškastinis kuras (nafta, gamtinės dujos)	Iš dalies biologiškai skaidūs
3	Biokilmės plastikai	Bio-PE, Bio-PET, Bio-PVC	Biologiniai išteklių (kukurūzai, cukranendrės)	Iš dalies biologiškai skaidūs
4	Biokilmės plastikai	PHA, PHB, PLA, PU	Biologiniai išteklių (kukurūzai, cukranendrės, augalinis aliejus)	Biologiškai skaidūs

Daugiasluoksnių pakuočių analizėje svarbu atskirti plastikų grupes, kurios turi biokilmės analogų, nes tai leidžia realiai vertinti tradicinių sluoksnių pakeitimą tvaresnėmis alternatyvomis. Biologiškai skaidūs polimerai, tokie kaip PLA, PHA ar PHB, suteikia galimybę kurti funkcionalias ir aplinkai palankesnes pakuotes, todėl jų reikšmė nuolat didėja mažinant plastiko poveikį aplinkai.

## 1.1.2. Polimerų samprata ir klasifikacija

Visuotinėje lietuvių enciklopedijoje polimerai apibrėžiami kaip „stambiamolekuliai junginiai, medžiagos, kurias sudaro makromolekulės [...]. Polimerai, kurių pagrindinė grandinė sudaryta tik iš anglies ir vandenilio atomų (toks yra polistirenas, polietilenas), vadinami homograndininiais.“ [4]

Pagal kilmę polimerai gali būti suskirstyti į tris pagrindines grupes:

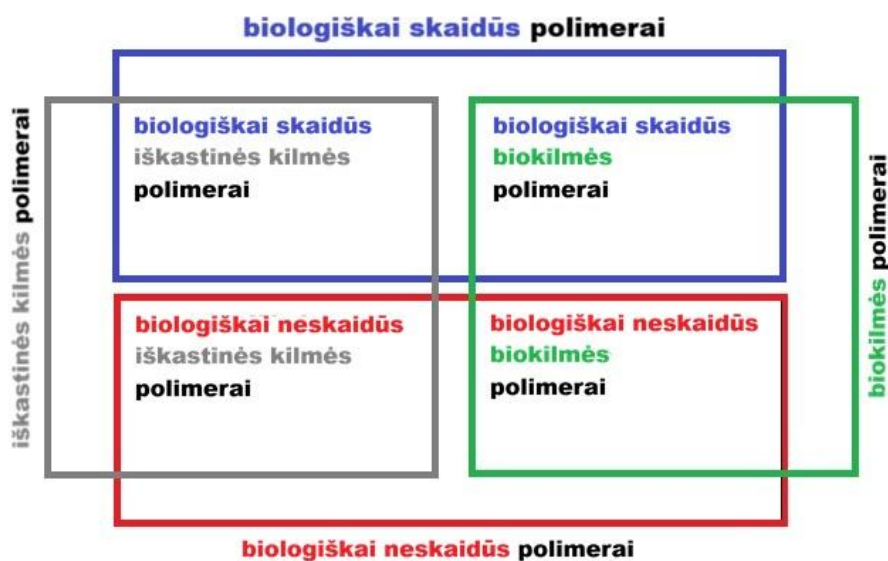
- natūralius, gaunamus iš augalų ar gyvūnų (pvz., vilna, celiuliozė, natūralus kaučiukas);
- pusiau sintetinius, kai natūralūs polimerai modifikuojami priedais (pvz., celiuloidas, vulkanizuotas kaučiukas);
- sintetinius, susidarantius polimerizacijos reakcijų metu iš vieno ar kelių monomerų (pvz., nailonas, epoksidinės dervos, poliolefinai).

Pagal cheminę sudėtį polimerai skirstomi į organinius ir neorganinius. Organinių polimerų karkasą sudaro anglies atomų grandinės, o neorganiniai (pvz., silikonai) formuojami iš silicio, azoto ar kitų neorganinių elementų junginių. Dauguma šiandien naudojamų polimerų yra sintetiniai organiniai, gaunami polimerizacijos būdu iš naftos, gamtinių dujų ar anglies išteklių [3].

## 1.2. Bioplastikai

### 1.2.1. Bioplastikų samprata ir jų klasifikavimas

Vartotojams dažnai kyla neaiškumų dėl biopagrindo ir biologiškai skaidžių plastikų bei juos sudarančių polimerų. Šios sąvokos dažnai apibendrinamos terminu „bioplastikai“. Biopagrindo polimerai, dar vadinami biopolimerais, tokie kaip celiuliozė, krakmolos ar ligninas, yra sudaryti iš anglies, gaunamos iš atsinaujinančių biologinių šaltinių. Tačiau biopagrindo plastikas nebūtinai yra biologiškai skaidus, o tiek biopagrindo, tiek iškastinės kilmės polimerai gali būti ir skaidūs, ir neskaidūs. Šis skirtumas svarbus, nes dėmuo „bio“ dažnai sukelia nesusipratimų, kaip matyti 2 paveiksle [5].



2 pav. Plastikinių medžiagų, įskaitant biologiškai skaidžius ir biologinės kilmės polimerus, apžvalga ir jų ryšys [5]

Bioplastikai skirstomi į tris kategorijas:

- **biologinės kilmės ir biologiškai skaidžius** ((polilaktidą (PLA), polihidroksialkanoatus (PHA), krakmolo mišinius, biologinės kilmės polikarbonatą bei polibutileno sukcinatą (PBS));
- **biologinės kilmės ir biologiškai neskaidžius** (pvz., biologinės kilmės PET, PP ir PE „drop-in“ sprendimus, pasižyminčius tokiomis pačiomis savybėmis kaip iškastiniai analogai ir tinkamus perdirbti esamose linijose, taip pat kitus neskaidžius bioplastikus, tokius kaip PEF, PTT ar PA);
- **iškastinės kilmės ir biologiškai skaidžius** (pvz., polikaprolaktoną (PCL)).

Vienas iš biopagrindo polimerų privalumų yra tas, kad jų gamybai nereikia neatsinaujinančių iškastinio kuro išteklių. Todėl tikėtina, kad mažėjant iškastinių žaliavų prieinamumui bioplastikų reikšmė toliau didės, o jų naudojimas taps svarbia alternatyva tradiciniams plastikams [6]. Siekiant aiškiau atskirti dažnai painiojamus terminus, susijusius su biopagrindo ir biologiškai skaidžiais plastikais, 3 lentelėje [7] pateikiami pagrindiniai bioplastikų sąvokų apibrėžimai.

**3 lentelė.** Sutrumpintos sąvokos, susijusios su bioplastikais [7]

Terminas	Apibrėžimas
Biopagrindo plastikas (angl. Biobased plastic)	Plastikas, kuriame yra organinės anglies iš atsinaujinančių šaltinių – augalinės, gyvūninės ar mikrobinės kilmės.
Biologiškai skaidus plastikas (angl. Biodegradable plastic)	Plastikas, kuris mikroorganizmams metabolizuojant plastike esančią anglį suvirsta į CO <sub>2</sub> (ir CH <sub>4</sub> ), mikrobinę biomasę ir mineralines druskas.
Biopolimeras (angl. Biopolymer)	Polimeras, pagamintas gyvo organizmo arba iš jo išskirtų komponentų (pvz., fermentų).
Suyrantis plastikas (angl. Degradable plastic)	Plastikas, galintis suirti tam tikromis aplinkos sąlygomis per nustatytą laikotarpį, prarandant eksploatacines savybes. Skaidymasis gali vykti dėl hidrolizės, oksidacijos, fotodegradacijos ar jų kombinacijos (ASTM D883-20a).
Skaidymas (angl. Degradation)	Cheminiai pokyčiai polimerinėje medžiagoje, kurie paprastai lemia nepageidaujamus savybių pokyčius.
Plastiko biodegradacija (angl. Plastic biodegradation)	Visų organinių plastiko komponentų mikrobinė konversija į CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , mikrobinę biomasę ir mineralines druskas aerobinėmis arba anaerobinėmis sąlygomis.
Atsinaujinamumas (angl. Renewability)	Išteklių gebėjimas natūraliai atsikurti per pagrįstą laikotarpį, todėl jie gali būti naudojami tvariai. Atsinaujinantys ištekliai (saulės, vėjo, hidroenergija, biomasė, geoterminė energija) yra alternatyva ribotiems iškastiniams ištekliams.
Biosintezė (angl. Biosynthesis)	Polimerai gali būti gaunami sintetiniais metodais (pvz., naudojant slėgį ar katalizatorius) arba natūraliai sintetinami augalų (pvz., krakmolas) ar bakterijų (pvz., PHA).
Biologiškas skaidumas (angl. Biodegradability)	Polimerų skaidymas iki mažesnių junginių, kol jie visiškai mineralizuojami į CO <sub>2</sub> ir H <sub>2</sub> O. Biodegradaciją sukelia mikroorganizmų fermentai.
Biokompatibilumas (angl. Biocompatibility)	Medžiagos gebėjimas saugiai sąveikauti su gyvais audiniais nesukeliant žalos ar imuninės reakcijos. Ne visi bioplastikai yra biokompatibilūs; kai kurie iškastiniai plastikai taip pat gali būti biokompatibilūs.

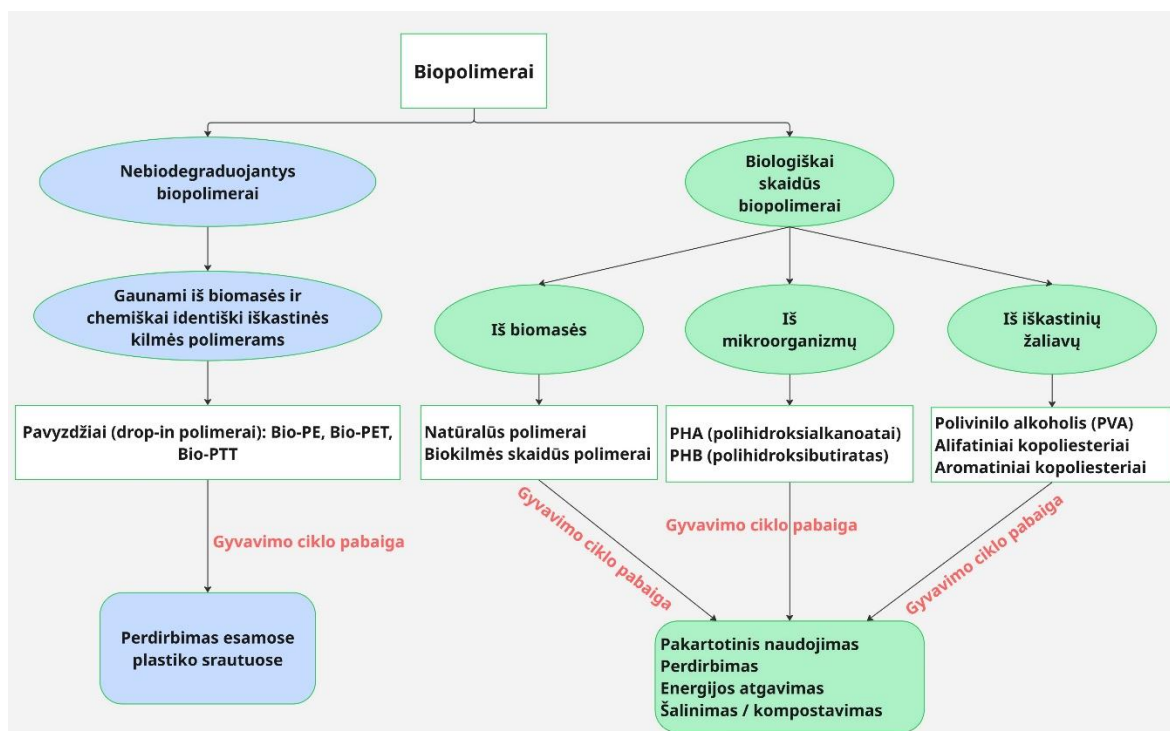
Tinkamas šių sąvokų supratimas yra būtinas siekiant tiksliai vertinti bioplastikų savybes ir jų taikymo galimybes.

### 1.2.2. Biologinis skaidumas ir kompostavimas

Biologinis skaidumas yra skirstomas į kelis tipus:

- biologiškai skaidų;
- bendrą (anaerobinį) biologiškai skaidų;
- namų (aerobinį) biologiškai skaidų.

Biologiškai skaidūs plastikai dažniausiai sintetunami iš biopagrindo žaliavų, kurių anglis gaunama iš augalinės kilmės komponentų, o dalis konvencinių plastikų gaminama iš neatsinaujančių išteklių, tokių kaip nafta ar gamtinės dujos. Aplinkos poveikis, įskaitant klimato kaitą ir taršą bei riboti iškastinių polimerų ištekliai paskatino didesnę dėmesį aplinkosauginėms problemoms ir biologiškai skaidžių polimerų taikymui. Šie polimerai gali būti pramoninės kilmės (pvz., polilaktinė rūgštis) arba susidaryti natūraliai, todėl egzistuoja skirtingų tipų skaidžios medžiagos [8]. Biopolimerų klasifikavimas pagal biologinį skaidumą ir jų gyvavimo ciklo pabaigos scenarijus pateikiamas 3 paveiksle.

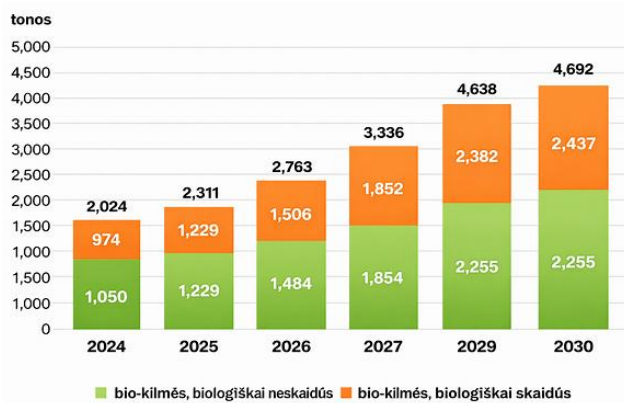


3 pav. Biopolimerų klasifikavimas pagal biologinį skaidumą ir gyvavimo ciklo pabaigos scenarijus [8]

3 paveiksle pateikta biopolimerų klasifikacija išryškina jų kilmės, skaidumo ir gyvavimo ciklo pabaigos skirtumus. Toks suskirstymas leidžia geriau suprasti, kokie veiksniai lemia skirtingas biopolimerų savybes ir jų taikymo galimybes.

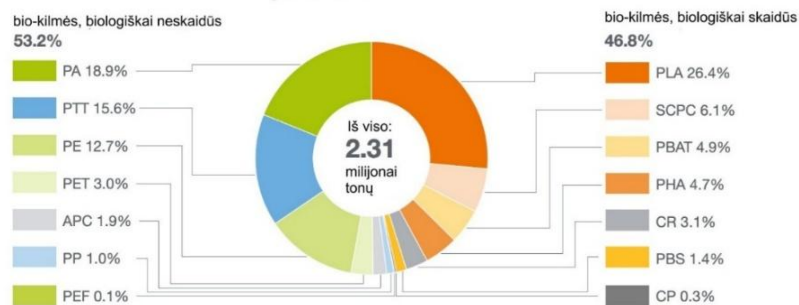
### 1.2.3. Bioplastikų gamyba, rinka ir taikymo sritys

Remiantis Europos bioplastikų asociacijos duomenimis, bioplastikai sudaro tik apie 0,5 % iš daugiau nei 430 mln. tonų pasaulinės plastiko gamybos, tačiau jų rinka nuosekliai plečiasi. Prognozuojama, kad gamybos pajėgumai didės nuo 2,31 mln. tonų 2025 m. iki 4,69 mln. tonų 2030 m., o tai rodo augantį susidomėjimą tvariomis alternatyvomis ir spartėjantį technologinį vystymąsi [9]. 4 paveiksle pateikiami realūs pasauliniai bioplastikų gamybos pajėgumai nuo 2024 m. ir jų prognozuojamas augimas iki 2030 m.



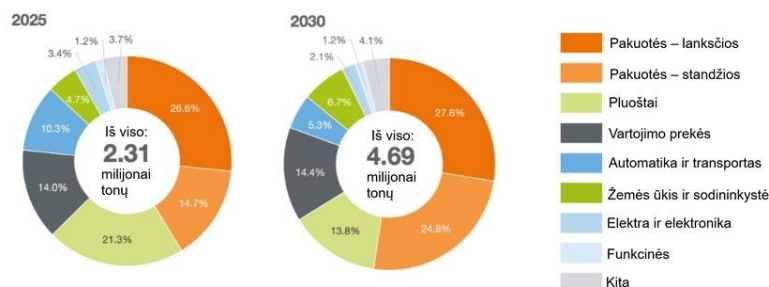
4 pav. Pasauliniai bioplastikų gamybos pajėgumai [9]

Didžiausią bioplastikų rinkos dalį sudaro pakuotės, kurios 2025 m. siekė 41,3 % visos paklausos. Likusi dalis tenka pluoštams, vartojimo prekėms, automobilių, žemės ūkio ir kitoms pramonės šakoms. Bioplastikų struktūra pagal plastikų rūšis rodo, kad rinkoje dominuoja tiek biopagrindo, biologiškai neskaidūs, tiek biopagrindo, biologiškai skaidūs polimerai. Visa tai galima matyti 5 paveiksle „Pasauliniai bioplastikų gamybos pajėgumai pagal plastikų rūšis“ [9], kuriame pateikiama bioplastikų rinkos struktūra pagal skirtingus plastikų tipus.



5 pav. Pasauliniai bioplastikų gamybos pajėgumai pagal plastikų rūšis [9]

Nors gamybos efektyvumas skiriasi tarp atskirų polimerų (nuo 28 % iki 100 %), 2025 m. pasaulinis pajėgumų panaudojimo vidurkis siekė apie 72 %, o Europos biopagrindo sektoriuje – 73 %. Tai rodo stabiliai augančią ir diversifikuojančią pramonę, kurioje didėja tiek biopagrindo, tiek biologiškai skaidžių medžiagų pasiūla. Visa tai galima pamatyti 6 pav. [9].



6 pav. Pasauliniai bioplastikų gamybos pajėgumai 2025 m. ir 2030 m. pagal rinkos segmentus [9]

Apibendrinant galima teigti, kad bioplastikų rinka pasižymi nuosekliu augimu, kurį lemia tiek didėjantys gamybos pajėgumai, tiek plintantis jų taikymas įvairiuose sektoriuose. Nors bioplastikai

sudaro tik nedidelę dalį pasaulinės plastiko rinkos, jų struktūra pagal plastikų rūšis ir rinkos segmentus rodo vis didesnę technologinę brandą bei diversifikaciją.

### **1.3. Lanksčios pakuotės ir jų struktūra**

#### **1.3.1. Pakuotės samprata**

Europos Parlamento ir tarybos direktyvoje 94/62/EB dėl pakuočių ir pakuočių atliekų, pakuotė yra apibrėžiama kaip „iš bet kurios rūšies medžiagų padaryti gaminiai, skirti prekėms, pradedant žaliavomis ir baigiant perdirbtais produktais, izoliuoti, apsaugoti, tvarkyti, pristatyti ir pateikti iš gamintojo naudotojui ar vartotojui. Tais pačiais tikslais naudojami „negrąžintini“ daiktai taip pat laikomi pakuotėmis.“ [10] Direktyvos II priede nustatyti esminiai reikalavimai pakuočių sudėčiai ir projektavimui, apimantys pakuotės svorio ir tūrio minimizavimą, pavojingų medžiagų ribojimą bei galimybę pakartotinai naudoti ar perdirbti pagal atliekų hierarchiją. Šie kriterijai sudaro teisinį pagrindą tvarių pakuočių kūrimui ir jų poveikio aplinkai mažinimui [10].

ES politika pastaraisiais metais dar labiau sustiprino tvarumo reikalavimus. Europos plastiko strategijoje (2018 m.) ir Europos žaliajame kurse (2019 m.) numatyta, kad iki 2030 m. visos plastikinės pakuotės ES rinkoje turi būti pakartotinai naudojamos arba perdirbamos ekonomiškai efektyviu būdu, kartu mažinant perteklines pakuotes ir skatinant antrinių žaliavų rinką. Šios iniciatyvos atspindi kryptingą siekį pereiti prie žiedinės pakuočių sistemos, kurioje pirmenybė teikiama prevencijai ir aukštos kokybės perdirbimui [11].

#### **1.3.2. Lanksčios pakuotės ir jų struktūra**

Plastikinės plėvelės naudojamos įvairiose srityse ir paprastai skirstomos į pakuotes bei kitos paskirties gaminius. Pakuotės skirstomos į pirmines, skirtas tiesiogiai produktui apsaugoti, ir antrines ar tretines, kurios užtikrina logistikos, transportavimo bei sandėliavimo efektyvumą. Pagal struktūrą plėvelės skirstomos į vienasluoksnes ir daugiasluoksnes. Vienasluoksnės plėvelės, gaminamos iš PE, PP ar PET, paprastai yra 20–200 μm storio ir naudojamos antrinei bei tretinei pakuotei. Daugiasluoksnės plėvelės sudarytos iš kelių polimerinių ar sudėtinių sluoksnių ir taikomos pirminėje pakuotėje, kai reikalingos specifinės barjerinės, mechaninės ar sandarinimo savybės [12].

Lanksčios pakuotės apima maišelius, paketėlius, plėveles, įvyniojimus ir suspaudžiamus indus. Jos plačiai naudojamos maisto, gėrimų, medicinos, chemijos ir elektronikos sektoriuose. Dažniausiai naudojami termoplastiniai polimerai, tokie kaip PET, PE ir PP, kurie gali būti derinami su orientuotais ar metalizuotais sluoksniais (pvz., OPET, OPP, metalizuotu PET), siekiant pagerinti barjerines ir mechanines savybes. Plastiką sudaro didžiausią lanksčios pakuotės dalį (apie 76,8 %), o popierius ir aliuminis sudaro mažesnę dalį. Nors apie 80 % vienos medžiagos plėvelių teoriškai yra perdirbamos, faktiškai perdirbama tik 14 %, daugiausia dėl sudėtingų daugiasluoksnių struktūrų ir technologinių apribojimų [13].

#### **1.3.3. Lanksčių pakuočių ekologinė žala**

Daugiasluoksnės plėvelės kelia didelių iššūkių atliekų tvarkymo sistemoms, nes jų sudėtinga struktūra apsunkina efektyvų atskyrimą ir perdirbimą. Dėl to lankstusis pakuočių atliekų srautas dažnai laikomas ekonomiškai nepatraukliu, o didelė dalis po vartojimo susidaranti atliekų vis dar patenka į sąvartynus. Europoje beveik 59 % plastiko atliekų siejama būtent su lanksčiomis

pakuotėmis, o nepakankamas surinkimas ir netinkamas tvarkymas lemia dirvožemio taršą, mikro- ir nanoplastikų patekimą į ekosistemas bei galimą jų kaupimąsi maisto grandinėje. Besivystančiose šalyse, kur perdirbimo infrastruktūra silpnesnė, dažnai pasitaiko nelegalaus atliekų deginimo, didinančio oro taršą ir pavojų sveikatai. Reikšminga problema išlieka ir jūrų tarša: kasmet į vandenynus patenka apie 8 mln. tonų plastiko, o lankstūs pakuočių likučiai sudaro didelę šio srauto dalį. Plastiko atliekos kelia tiesioginę grėsmę jūrų gyvūnijai, o suskilusios į mikro- ir nanoplastikus daro ilgalaikį poveikį ekosistemoms. Lanksčios pakuotės taip pat prisideda prie maisto švaistymo, netinkamos barjerinės ar sandarinimo savybės gali lemti 20–25 % namų ūkių maisto atliekų susidarymą, o užterštas turinys apsunkina perdirbimą [14].

Atsižvelgiant į šias aplinkosaugines problemas, Europos Sąjunga įgyvendina griežtėjančius reikalavimus pakuotėms. Direktyva (ES) 2019/904 dėl tam tikrų plastikinių gaminių poveikio aplinkai mažinimo [15], Direktyva 2008/98/EB dėl atliekų ir tam tikrų direktyvų panaikinimo [16] bei Reglamentas (ES) 2024/1781 [17], nustatantis tvarių produktų ekologinio projektavimo (ekodizaino) reikalavimų sistemą, įtvirtina prevencijos, perdirbimo galimybių ir gamintojo atsakomybės principus. Nacionaliniu lygmeniu šiuos tikslus įgyvendina Lietuvos Respublikos pakuočių ir pakuočių atliekų tvarkymo įstatymas, Atliekų tvarkymo įstatymas [18] ir Mokesčio už aplinkos teršimą įstatymas [19].

Esminis pokytis susijęs su naujuoju ES Pakuočių ir pakuočių atliekų reglamentu (ES) 2025/40 [20], kuris nuo 2030 m. sausio 1 d. įpareigoja, kad į ES rinką būtų tiekiamos tik perdirbamos, pakartotinai naudojamos arba biologiškai skaidžios pakuotės. Tai reiškia, kad sudėtingos daugiasluoksnės struktūros, kurios šiuo metu sudaro didelę lanksčių pakuočių dalį, bus palaipsniui ribojamos, o gamintojai turės pereiti prie homogeninių medžiagų ar biologinės kilmės sprendimų.

#### **1.4. Plėvelių fizikinių–mechaninių ir barjerinių savybių tyrimai**

Pastaraisiais metais didėjantis plastiko atliekų kiekis ir žiedinės ekonomikos principų diegimas paskatino intensyvius alternatyvių pakavimo medžiagų tyrimus. Literatūroje daug dėmesio skiriama bioskaidžių polimerų, tokių kaip PLA, PBAT, PHA ir TPS, savybių gerinimui bei jų pritaikymui lanksčioms pakuotėms [21]. Bioplastikai vertinami kaip perspektyvi alternatyva tradiciniams plastikams dėl mažesnės priklausomybės nuo iškastinių žaliavų ir galimybės mažinti aplinkosauginį poveikį, tačiau jų naudojimą vis dar riboja mechaninės savybės, terminis stabilumas ir aukštesnė kaina [22].

Literatūroje nurodoma, kad bioskaidžios plėvelės dažniausiai pasižymi mažesniu mechaniniu atsparumu ir prastesnėmis barjerinėmis savybėmis nei tradiciniai polimerai. Nustatyta, kad biodegrazuojamų plastikų tempiamasis stipris gali būti 15–40 % mažesnis, o deguonies pralaidumas 50–70 % didesnis nei įprastų plastikų [23]. Taip pat pabrėžiama, kad pagrindiniai biopolimerų trūkumai yra trapumas, jautrumas drėgmei ir ribotas terminis stabilumas [24]. Be to, dauguma bioplastikų efektyviai suyra tik kontroliuojamomis kompostavimo sąlygomis, todėl jų aplinkosauginiai pranašumai ne visuomet pasireiškia realiomis naudojimo ir atliekų tvarkymo sąlygomis [25].

Siekiant pagerinti bioskaidžių plėvelių savybes, aktyviai kuriami įvairūs kompozitai ir modifikuotos medžiagos. Tyrimai rodo, kad TPS plėvelių modifikavimas bičių vašku, augaliniu mikropluoštu ir LDPE dalelėmis gali reikšmingai padidinti tempiamąjį stiprį bei sumažinti vandens garų pralaidumą [21]. Taip pat nustatyta, kad nanokompozitų technologijos yra viena perspektyviausių krypčių

biodegruojamų plėvelių barjerinėms savybėms gerinti, nes sluoksniniai nanoužpildai gali ženkliai sumažinti deguonies ir vandens garų difuziją [26]. Pabrėžiama, kad nanostruktūrų formavimas leidžia vienu metu gerinti fizikines-mechanines, barjerines ir kitas pakuočių savybes [27].

Svarbi lanksčių pakuočių charakteristika yra siūlių formavimo kokybė ir sandarumas. Nustatyta, kad geriausiomis sandarinimo savybėmis pasižymi mažo tankio polietilenas, linijinis mažo tankio polietilenas ir jų modifikacijos, nes šios medžiagos turi žemą lydymosi temperatūrą ir didelį amorfinės fazės mobilumą [28]. Tyrimai taip pat rodo, kad siūlės stiprumą lemia ne tik sandarinimo temperatūra, bet ir kontakto sąlygos, slėgis bei šilumos perdavimo efektyvumas sandūros zonoje [29]. Tai patvirtina, kad optimali siūlės kokybė priklauso tiek nuo medžiagos savybių, tiek nuo tinkamai parinktų technologinių parametru.

Barjerinės savybės yra vienas svarbiausių veiksnių maisto pakuotėse. Nustatyta, kad dujų ir vandens garų pralaidumą daugiausia lemia polimero kristališkumas, grandinių standumas ir molekulinė struktūra [30]. Tarp plačiausiai naudojamų barjerinių medžiagų išskiriamas EVOH, pasižymintis itin geromis deguonies barjerinėmis savybėmis, tačiau jautrus drėgmei, todėl dažniausiai naudojamas daugiasluoksnėse pakuotėse kartu su apsauginiais išoriniais sluoksniais [31]. Šios savybės paaiškina, kodėl daugiasluoksnės struktūros vis dar plačiai taikomos maisto pakuotėse, nepaisant sudėtingesnio jų perdirbimo.

Literatūroje taip pat daug dėmesio skiriama perdirbtų ir biokilmės polimerų taikymui. Nustatyta, kad net nedidelės PLA/ PBAT priemaišos gali pabloginti perdirbtų PP ir PS mechanines savybes, todėl efektyvus atliekų rūšiavimas išlieka svarbia kokybiško perdirbimo sąlyga [32]. Kiti tyrimai parodė, kad procesinis formavimas leidžia sėkmingai atkurti bio-PET ir perdirbto PET mišinių mechanines savybes [33]. BioPE pagrindo kompozitų tyrimai taip pat rodo, kad natūralių pluoštų ir suderinamumo priedų naudojimas gali padidinti medžiagų standumą bei sumažinti priklausomybę nuo iškastinės kilmės žaliavų [34].

Aplinkosauginiu požiūriu biologiškai skaidžios medžiagos ne visada pasižymi mažesniu poveikiu klimatui. Nustatyta, kad optimizuoti biodegruojamų plastikų gamybos procesai gali sumažinti CO<sub>2</sub> emisijas 25–60 %, tačiau kartu didina žemės ir vandens išteklių naudojimą [23]. Taip pat pabrėžiama, kad realų bioplastikų aplinkosauginį pranašumą gali užtikrinti tik efektyvi kompostavimo infrastruktūra ir žiedinės ekonomikos principų taikymas [25].

Apibendrinant, bioskaidžios plėvelės turi potencialo pakeisti dalį tradicinių pakuočių medžiagų, tačiau jų mechaninės, barjerinės ir sandarinimo savybės vis dar dažnai nusileidžia polietileno pagrindo plėvelėms. Todėl siekiant išplėsti jų taikymą būtina toliau tobulinti medžiagų sudėtį, sandarinimo technologijas ir atliekų tvarkymo infrastruktūrą. Šios išvalgos pagrindžia poreikį eksperimentiškai įvertinti bioskaidžių, tradicinių ir perdirbtų plėvelių savybes bei jų tinkamumą lanksčių pakuočių gamybai.

### **1.5. Barjerinės ir fizikinės-mechaninės savybės**

Barjerinės ir mechaninės savybės yra vieni svarbiausių lanksčių pakuočių funkcinių rodiklių, lemiančių tiek produkto apsaugą, tiek pakuotės veikimą realiomis naudojimo sąlygomis. Barjerinės charakteristikos, tokios kaip OTR ir WVTR, tiesiogiai lemia pakuotės tinkamumą skirtingoms maisto produktų grupėms. Medžiagos, pasižyminčios didelėmis OTR ar WVTR vertėmis, neužtikrina

pakankamos apsaugos oksidacijai jautriems produktams, o mažos pralaidos vertės yra būtinos ilgesniam galiojimo laikui ir kontroliuojamos atmosferos palaikymui.

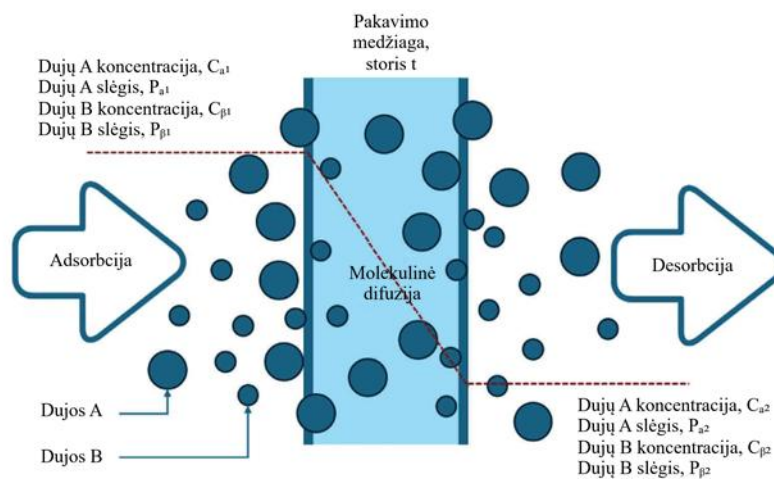
Be barjerinių parametru, lanksčių pakuočių funkcionalumui itin svarbios ir fizinės bei mechaninės savybės, lemiančios plėvelės atsparumą apkrovoms, deformacijoms ir procesiniams veiksniams. Tempimo stipris, tamprumas ir tamprumo modulis apibrėžia medžiagos elgseną tempiant, jos atsparumą plyšimui ir gebėjimą išlaikyti struktūrinį vientisumą pakavimo, transportavimo ir sandėliavimo metu. Pailginimas iki trūkio parodo, kiek medžiaga gali deformuotis neplyšdama, o tai ypač svarbu plėvelėms, naudojamoms automatizuotose pakavimo linijose ar formuojant maišelius.

Fiziniai parametrai, tokie kaip šiluminis sandarumas, lemia pakuotės hermetiškumą ir sandarinimo proceso stabilumą, o atsparumas karščiui parodo, ar medžiaga išlaikys formą ir mechanines savybes terminio apdoravimo, sterilizacijos ar karšto užpildymo metu. Formos išlaikymas ir standumas yra svarbūs vartotojo patirčiai, produkto pateikčiai ir pakuotės funkcionalumui, ypač kai reikalingas tikslus užlenkimas ar struktūrinis stabilumas. Terminio stabilumo rodikliai leidžia įvertinti polimero atsparumą oksidacinei ir šiluminei degradacijai, kuri gali lemti mechaninių ir barjerinių savybių prastėjimą laikymo metu.

Šių parametru visuma leidžia įvertinti, kaip skirtingi tradiciniai ir biologiškai skaidūs polimerai veikia daugiasluoksnėse plėvelių struktūrose ir kokį vaidmenį jie gali atlikti užtikrinant reikiamą barjerinį ir mechaninį efektyvumą.

### 1.5.1. Dujų pralaidumas

Dujų judėjimas per polimerines pakavimo medžiagas aiškinamas tirpimo–difuzijos principu. Šis modelis apima tris nuoseklius etapus: dujų molekulių adsorbciją ant plėvelės paviršiaus, jų difuziją per polimero matricą ir desorbciją kitoje pusėje. Procesą lemia polimero struktūra, kristališkumas, laisvo tūrio kiekis ir aplinkos sąlygos, tokios kaip temperatūra ar drėgmė. Pralaidumas ( $P$ ), apibrėžiamas kaip difuzijos koeficiento ir tirpumo koeficiento sandauga, nusako medžiagos gebėjimą praleisti dujas esant slėgio gradientui, o praktiniai parametrai – OTR, WVTR ir dujų pralaidumo greitis (GTR) – parodo realų dujų srautą per tam tikro storio plėvelę. Barjerinės savybės priklauso nuo polimero molekulinės sandaros ir sąveikos su prasiskverbiančiomis dujomis [35]. Pagrindinis dujų pernašos mechanizmas schematiškai pavaizduotas 7 paveiksle.



7 pav. Scheminė dujų prasiskverbimo per polimerinę pakavimo plėvelę iliustracija [35]

Scheminėje dujų prasiskverbimo per polimerinę pakavimo plėvelę iliustracijoje pavaizduoti pagrindiniai proceso etapai: molekulių prisijungimas prie išorinio (aukštesnio slėgio) paviršiaus (adsorbicija), jų judėjimas per polimerinę matricą (difuzija) ir pasišalinimas per vidinį (žemesnio slėgio) paviršių (desorbicija). Dujų pernašą lemia koncentracijos ir dalinio slėgio skirtumai abiejose plėvelės pusėse, o bendras pralaidumas priklauso nuo dujų tirpumo medžiagoje ir jų sklidimo greičio. Jei medžiaga neturi defektų, dujų judėjimas vyksta difuzijos būdu ir aprašomas tirpimo–difuzijos principu, kurio eigą lemia tarp molekulinės sąveikos, tokios kaip van der Valso jėgos ar vandeniliniai ryšiai. Polimero pobūdis turi didelę įtaką dujų skverbimuisi: hidrofilinės medžiagos (pvz., PVA ar celiuliozės dariniai) lengviau sąveikauja su polinėmis dujomis, o hidrofobinės (PE, PP, PET) dažniau praleidžia nepolines dujas. Difuzijos intensyvumą taip pat lemia molekulių dydis, kristališkumo laipsnis, tinklinis susiejimas ir segmentinis grandinių judumas – didesnis kristališkumas ir mažesnis laisvas tūris mažina pralaidumą. Šie reiškiniai yra glaudžiai susiję su maisto sauga, nes deguonies, anglies dioksido ir vandens garų patekimas gali skatinti oksidaciją bei mikroorganizmų augimą. Todėl mažo pralaidumo medžiagos ar pakavimas modifikuotoje atmosferoje leidžia sulėtinti gedimo procesus ir pailginti produkto galiojimo laiką, o temperatūra išlieka vienu svarbiausių veiksnių, darančių įtaką šiems procesams [35].

Daugiasluoksnėse plėvelėse barjerinės savybės dažnai gerinamos įtraukiant polinius polimerus, tokius kaip EVOH, PA ar PVDC, kurie ženkliai sumažina deguonies skverbimąsi. Kadangi EVOH yra jautrus drėgmei ir sunkiai formuojamas karščiu, jis dažnai įterpiamas tarp PA sluoksnių, kurie pagerina mechanines savybes ir apdorojimo galimybes. Daugiasluoksnė ekstruzija yra ekonomiškiausias būdas tokioms struktūroms formuoti, o PE ir PP naudojami kaip pagrindiniai sluoksniai dėl gerų mechaninių savybių, nors jų barjerinės savybės deguoniui yra ribotos [36].

„Poli(etileno-ko-vinilo alkoholis) (EVOH) yra gerai žinomas dėl labai mažo dujų pralaidumo ir plačiai naudojamas pakuočių pramonėje. Jis dažnai naudojamas su polietilenu ir polipropilenu siekiant pagerinti barjerines savybes. Taip pat EVOH gali būti naudojamas PBAT savybėms gerinti. PBAT laikomas potencialiu LDPE pakaitalu pakuočių ir žemės ūkio srityse bei PET – maisto pakuotėse. Reikalingos barjerinės savybės priklauso nuo taikymo srities. Pavyzdžiui, plėvelės, kurių deguonies pralaidumas mažesnis nei  $20 \times 10^{-14} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{cm Hg}$  ir vandens garų pralaidumas mažesnis nei  $15 \times 10^{-13} \text{ g} \cdot \text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ , laikomos aukšto barjero plėvelėmis maisto pakuotėse.“ [37]

### 1.5.2. Barjeriniai sluoksniai

Daugiasluoksnėse plėvelėse skirtingi sluoksniai atlieka specifines funkcijas, nuo mechaninio stabilumo iki barjerinių savybių ar sandarinimo. Sudėtingesnėse struktūrose, pavyzdžiui, penkių sluoksnių plėvelėse, centrinį barjerinį sluoksnį (pvz., PA-6 ar EVOH) paprastai supa sukibimo sluoksniai, užtikrinantys sukibimą su vidiniais ir išoriniais sluoksniais. Dažniausiai naudojamų funkcinių sluoksnių ir jų medžiagų apžvalga pateikiama 4 ir 5 lentelėse [38].

4 lentelė. Įprastų funkcinių sluoksnių apžvalga [38], 1 dalis

Mechaninis stabilumas	Deguonies barjeras	Drėgmės barjeras	Šviesos barjeras	Sluoksnių sujungimo (Angl. tie-layer) medžiagos	Sandarinimo sluoksnis (Angl. sealant)
HDPE	EVOH	PE (LD, LLD, HD)	Aliuminis	Poliuretanai	LLDPE
PP, OPP	PVDC	PP, OPP	TiO <sub>2</sub> užpildyti polimerai	Rūgštimi / anhidridu graftinti poliolefinai	LDPE

**5 lentelė.** Įprastų funkcinių sluoksnių apžvalga [38], 2 dalis

Mechaninis stabilumas	Deguonies barjeras	Drėgmės barjeras	Šviesos barjeras	Sluoksnių sujungimo (Angl. tie-layer) medžiagos	Sandarinimo sluoksnis (Angl. sealant)
OPET	Poliamidai (nylon, BOPA)	EVA	–	–	EVA
PS	Poliesteriai, OPET	Ionomerai	–	–	Ionomerai
Popierius	Dangos (SiO <sub>x</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , PVOH, nanodalelės)	PVDC	–	–	PP, OPP
–	Aliuminis	–	–	–	PA, OPA
–	–	–	–	–	PET, OPET

Pagal Vokietijos pakuočių rinkos tyrimų bendrovę klasifikaciją daugiasluoksnės plėvelės skirstomos į penkias kategorijas: paprastus daugiasluoksnius plastiko kompozitus be barjerinio sluoksnio, plėveles su organiniais barjeriais, metalizuotas plėveles su aliuminio oksido ar silicio oksido dangomis, terminiu būdu suformuotas plėveles ir plastiko kompozitus su aliuminio folija. Šios kategorijos 2016 m. Europoje sudarė apie 17,7 mlrd. m<sup>2</sup>, kas atitinka maždaug 1,89 Mt daugiasluoksnės pakuotės. Ši reikšmė apskaičiuota remiantis Vokietijos 2009 m. duomenimis, darant prielaidą, kad daugiasluoksnių pakuočių sudėtis Europoje buvo panaši. Penkių pagrindinių medžiagų kombinacijų dalis sudaro 56,3 % visos plastiko pagrindu pagamintos lanksčios pakuotės, o likusi dalis, daugybė kitų kombinacijų, tarp kurių dominuoja PET–PO daugiasluoksnės struktūros [38].

### 1.5.3. Medžiagų savybių palyginimo matrica

Skirtingi polimerai pasižymi nevienodomis barjerinėmis, fizikinėmis ir mechaninėmis savybėmis. Todėl jų tinkamumas lanksčioms pakuotėms vertinamas analizuojant šių parametrų visumą. Barjerinės charakteristikos lemia produkto apsaugą nuo oksidacijos ir drėgmės poveikio, o mechaninės bei fizikinės savybės nusako medžiagos elgseną pakavimo, transportavimo ir laikymo metu. Daugiasluoksnėse plėvelėse šios savybės viena kitą papildo, todėl atskirų polimerų funkcionalumas vertinamas ne tik pagal jų individualius parametrus, bet ir pagal jų vaidmenį struktūroje. Polimerų savybės kinta priklausomai nuo plėvelės storio, orientacijos, kristalinės struktūros ir gamybos technologijos. Dėl to 5 lentelėje yra pateikiama lanksčių pakuočių plėvelių savybių palyginimo matrica, matricos vertės laikytinos tipinėmis, o ne absoliučiomis, atspindinčiomis realų savybių kitimą pramoninėse sąlygose.

Siekiant sistemiškai palyginti tradicinių ir biologiškai skaidžių polimerų savybes, sudaryta lanksčių pakuočių plėvelių savybių matrica, kurioje pateikiami pagrindiniai mechaniniai, terminiai ir barjeriniai rodikliai. Ji leidžia įvertinti medžiagų tinkamumą daugiasluoksnėms pakuotėms bei nustatyti jų stipriąsias ir ribojančias savybes. Ši matrica sudaro pagrindą tolesnei analizei, kurioje nagrinėjamas medžiagų potencialas ir jų pritaikomumas lanksčių pakuočių struktūrose. Kadangi skirtingi šaltiniai naudoja nevienodas matavimo sąlygas (pvz., 23 °C ar 38 °C temperatūrą, 0 % ar 65 % santykinę drėgmę), kai kurie parametrai pateikiami intervalais. Tai leidžia tiksliau atspindėti realias eksploatacines sąlygas, kuriomis plėvelės savybės gali reikšmingai kisti.

6 lentelė. Lanksčių pakuočių plėvelių savybių palyginimo matrica

Medžiaga	Tempimo stipris (MPa)	Prailgėjimas (%)	Šiluminis sandarumas (°C) SIT/HSW	Atsparumas karščiui (°C) T <sub>m</sub> /T <sub>g</sub>	Formos išlaikymas po užlenkimo (geras/vidutinis/prastas)	Degunies barjeras (cm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /24h)	Vandens garų pralaidumas (g/m <sup>2</sup> ·24h)	Biologinis skaidumas	Terminis stabilumas	Kaina, €/t
LDPE	12 [23]	600 [23]	90–110/110–140 [28]	102/–20 [39]	Geras	30 [23]	16–23 [24]	Neskaidomas [23]	Geras	2354 [40]
LLDPE	15–17 [24]	745 [24]	95–115/115–145 [28]	122[24]/–110 [41]	Geras	3500 [30]	4,8–7,9 [24]	Neskaidomas	Geras	2090 [40]
HDPE	16–40 [39]	5–12 [39]	125–140/140–170 [29]	125/–90 [39]	Vidutinis [39]	2570 [26]	4,7–7,8 [24]	Neskaidomas	Labai geras	2089 [40]
PP	28,7 [32]	134,46 [32]	130–150/150–170 [28]	160 [24]/–10 [42]	Vidutinis	1488 [26]	9,3–11 [24]	Neskaidomas	Labai geras	2119 [40]
PET	85 [23]	4 [23]	200–230/230–260 [28]	255/69 [39]	Prastas	20 [23]	32 [24]	Neskaidomas [23]	Labai geras	1900 [43]
OPA (PA)	78 [39]	300 [39]	50–80 [44]	223/53 [39]	Geras [39]	40,6 [26]	10–25 [45]	Neskaidomas	Labai geras	2690 [46]
EVOH	60 [24]	250 [24]	165–190/50–63 [31]	160 [24]/50 [47]	Prastas	0,092 [26]	22–124 [24]	Neskaidomas	Geras [31]	6000 [48]
PLA	65 [23]	5 [23]	100–130/130–160 [28]	150/60 [39]	Prastas	80 [23]	63–342 [25]	Skaidomas (80 % / 12 sav.) [23]	Blogas	2800 [49]
PBAT	45 [23]	4 [23]	90–110/110–130 [28]	115/–30 [25]	Geras	100 [23]	1380 [25]	Skaidomas [23]	Vidutinis	1350 [48]
PBS	40 [25]	230 [25]	90–110/110–130 [28]	115/–15 [25]	Vidutinis	208 [25]	175 [25]	Skaidomas	Vidutinis	3400 [48]
PHA/PHB	50 [23]	8 [23]	110–130/130–150 [28]	165/4 [25]	Prastas	150 [23]	106 [25]	Labai gerai skaidomas [23]	Blogas	2500 [40]
Bio-PE	19,1 [34]	270 [34]	90–110/110–140 [28]	146/–110 [50]	Vidutinis [50]	2500–4000 [30]	6–11 [30]	Neskaidomas [50]	Labai geras	3250 [46]
Bio-PET	56,8 [33]	494,6 [33]	200–230/230–260 [28]	326,6/81,7 [51]	Prastas	50–70 [30]	30–40 [30]	Neskaidomas	Labai geras	2500 [46]

Sandarinimo pradžios temperatūra (angl. Seal Initiation Temperature (SIT)) apibrėžiama kaip žemiausia temperatūra, kurioje sandarinimo sluoksnio polimeras pradeda formuoti stabilų suvirinimo siūlą. Šioje temperatūroje amorfinė polimero fazė tampa pakankamai judri, o dalis kristalinių pradeda tirpti, todėl polimerų grandinės gali prasiskverbti per sąlyčio paviršių ir sudaryti pirminius tarp molekulinis ryšius. SIT yra kritinis parametras, nes jis lemia minimalias sandarinimo sąlygas, reikalingas sandariai pakuotei suformuoti. Per žema temperatūra lemia nepakankamą siūlės stiprį, o per aukšta temperatūra – plėvelės deformaciją ar perdegimą [52].

Šiluminio sandarinimo langas (angl. Heat Seal Window (HSW)) apibrėžiamas kaip temperatūrų intervalas, kuriame sandarinimo siūlė išlieka stabili, stipri ir techniškai patikima. Tai yra praktinis parametras, rodantis pakavimo proceso lankstumą. Platesnis HSW reiškia, kad sandarinimas yra mažiau jautrus temperatūros pokyčiams, todėl sumažėja broko tikimybė ir padidėja proceso stabilumas. Siauras HSW būdingas polimerams, kurių kristalinė struktūra tirpsta staigiai (pvz., PP, PET), todėl reikalauja tikslesnės temperatūros kontrolės [53].

SIT ir HSW yra vieni svarbiausių parametru, vertinant plėvelių tinkamumą sandarinimui. Medžiagos, turinčios žemą SIT ir platų HSW (pvz., LDPE, LLDPE), pasižymi geru sandarinamumu ir yra plačiai naudojamos kaip vidiniai sandarinimo sluoksniai. Tuo tarpu polimerai, kurių SIT yra aukštas, o HSW siauras (pvz., PP, PET), dažniau naudojami kaip struktūriniai arba barjeriniai sluoksniai, o ne kaip pagrindiniai sandarinimo komponentai. Šie parametrai tiesiogiai lemia pakuotės sandarumą, siūlės stiprį, gamybos greitį ir bendrą proceso patikimumą. Svarbu pabrėžti, kad SIT ir HSW nėra vien tik medžiagos savybė, jie labai priklauso ir nuo plėvelės orientacijos, kristalinės struktūros bei naudojamos sandarinimo technologijos. Todėl net tos pačios cheminės sudėties polimerai gali pasižymėti skirtingu sandarinamumu priklausomai nuo jų apdorojimo istorijos.

Savybių palyginimo matrica rodo, kad skirtingi polimerai pasižymi nevienodomis barjerinėmis, mechaninėmis ir fizikinėmis charakteristikomis, todėl jų funkcionalumas lanksčiose pakuotėse skiriasi. Poliolefinai (LDPE, LLDPE, HDPE) išsiskiria geromis mechaninėmis savybėmis, žema sandarinimo temperatūra ir ekonomišku, tačiau jų deguonies barjeras yra ribotas, todėl jie dažniausiai naudojami kaip išoriniai arba sandarinimo sluoksniai daugiasluoksnėse struktūrose. Priešingai, tokie polimerai kaip PET ar EVOH pasižymi geresnėmis barjerinėmis savybėmis, tačiau jų mechaninės ir perdirbimo savybės riboja naudojimą vienasluoksnėse plėvelėse, todėl jie integruojami kaip vidiniai barjeriniai sluoksniai. Dėl to, kad nė vienas polimeras vienu metu nepasižymi aukštu barjeru, geru sandarinamumu ir mechaniniu atsparumu, daugiasluoksnės struktūros tampa ne pasirinkimu, o būtinybe. Tik sluoksnių kombinacija leidžia suderinti tarpusavyje prieštaraujančias savybes ir pasiekti reikiamą funkcionalumą.

Biologiškai skaidūs polimerai (PLA, PBAT, PBS, PHA/PHB) turi potencialo būti naudojami tvariose pakuotėse, tačiau jų mechaninės savybės, terminis stabilumas ir barjeriniai parametrai dažnai yra prastesni nei tradicinių plastikų, todėl jų taikymas reikalauja modifikavimo arba derinimo su kitomis medžiagomis. Matrica rodo, kad nė vienas polimeras vienu metu neatlieka visų funkcijų, todėl daugiasluoksnės plėvelės yra būtinos siekiant suderinti barjerines, mechanines, sandarinimo ir perdirbimo savybes.

Remiantis publikacijoje „Biologiškai skaidūs plastikai kaip tvarios alternatyvos: pažanga, pagrindai, iššūkiai ir ateities kryptys“ pateiktais duomenimis, galima įvertinti biologiškai skaidžių polimerų

potencialą pakeisti dalį tradicinių, iškastinės kilmės pakuočių medžiagų. Jų pritaikomumas priklauso nuo gebėjimo atkartoti įprastų plastikų funkcines savybes [25]:

- PLA gali pakeisti PET ir PS dėl panašių mechaninių savybių, standumo ir skaidrumo;
- PGA gali būti naudojamas vietoje PET ir poliamidų dėl labai gerų barjerinių savybių ir mechaninio atsparumo;
- PCL gali būti LDPE alternatyva dėl didelio lankstumo ir tamprumo;
- PBS gali pakeisti LDPE ir PP dėl panašių mechaninių savybių ir geresnio terminio atsparumo;
- PBAT gali būti naudojamas vietoje LDPE ir LLDPE dėl didelio pailgėjimo ir atsparumo deformacijai;
- PHA (ypač P3HB) gali pakeisti PE, PP ar PS dėl pakankamo standumo ir terminio stabilumo.

Šie duomenys rodo, kad biologiškai skaidūs polimerai gali pakeisti dalį tradicinių plastikų, tačiau jų taikymą riboja eksploatacinės savybės ir technologiniai apribojimai. Todėl, vertinant biopolimerų potencialą pakeisti tradicines medžiagas, būtina atsižvelgti ne tik į jų cheminę sudėtį ar biodegradaciją, bet ir į realias gamybos, perdirbimo bei eksploatacijos sąlygas. Tik suderinus šiuos aspektus galima objektyviai įvertinti jų tinkamumą pramoninėms pakuotėms.

Vertinant tirtų pakuočių medžiagų pritaikomumą pramoninėje gamyboje, konvenciniai polimerai (PET, HDPE, LLDPE, PP) ir tradicinis LDPE (2354 €/t) išlaiko konkurencinį pranašumą dėl plačiai išvystytų gamybos technologijų, didelių gamybos apimčių ir masto ekonomijos. Didžiausia kaina nustatyta specializuotiems barjeriniams polimerams, tokiems kaip OPA (2690 €/t) ir EVOH (6000 €/t), kurių gamyba pasižymi sudėtingesniais technologiniais procesais. Praktikoje šių medžiagų sąnaudos dažnai mažinamos naudojant jas tik kaip plonus funkcinius sluoksnius daugiasluoksnėse struktūrose. Tvarių plastikų grupėje stebimas nevienodas kainų pasiskirstymas: komerciškai labiau paplitęs PLA (2800 €/t) yra pigesnis už PBS ar PHA, o santykinai maža PBAT kaina (1350 €/t) sudaro galimybes ekonomiškai pagrįstų polimerų mišinių kūrimui. Iš atsinaujinančių žaliavų gaminami bio-PET (2500 €/t) ir bio-PE (3250 €/t), nors chemiškai identiški savo iškastinės kilmės analogams, pasižymi didesne rinkos kaina. Gauti rezultatai rodo, kad perėjimas prie tvaresnių pakuočių medžiagų gali didinti gamybos sąnaudas, todėl ekologinio projektavimo etape būtina vertinti ne tik aplinkosauginę naudą, bet ir technologinį bei ekonominį tokių sprendimų pagrįstumą.

## **1.6. Gyvavimo ciklo vertinimas**

### **1.6.1. Iškastinių ir biopagrindo polimerų gyvavimo ciklo vertinimas**

2020 m. atlikta biopagrindo ir iškastinio kuro pagrindu pagamintų polimerų gyvavimo ciklo vertinimų (LCA) analizė siekė įvertinti esamų tyrimų palyginamumą ir nustatyti, ar galima patikimai identifikuoti mažesnę poveikį aplinkai turinčius polimerus. Išanalizavus 56 publikacijas nustatyta, kad tik 25 iš jų iš dalies atitiko Europos Sąjungos Produkto aplinkosauginio pėdsako (angl. Product Environmental Footprint, PEF) metodikos reikalavimus, o tai rodo reikšmingą metodologinį nevienodumą.

Rezultatai parodė didelę duomenų variaciją tiek tarp skirtingų polimerų, tiek tarp to paties polimero tyrimų. Kai kuriose poveikio kategorijose, pavyzdžiui, energijos naudojimo, skirtumai viršijo 400 %, todėl vienareikšmės išvados apie biopagrindo ir iškastinių polimerų pranašumą nėra pagrįstos. Nors biopagrindo polimerai dažnai laikomi palankesniais klimato kaitos požiūriu, kitose kategorijose (pvz., eutrofikacijos, rūgštėjimo ar ekotoksiškumo) jų poveikis gali būti lygiavertis arba net didesnis

nei iškastinių alternatyvų. Kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, PLA ar PET, nustatytas daugiau nei dvigubai didesnis poveikis, o biopagrindo ir iškastinio PET rezultatai buvo artimi, leidžiantys daryti išvadą, kad lemiamą reikšmę turi ne žaliavos kilmė, o pats polimero tipas. Be to, identifikuotos svarbios metodologinės problemos, ypač susijusios su CO<sub>2</sub> absorbcijos kreditų taikymu biopagrindo medžiagoms, kurie gali iškreipti klimato kaitos vertinimus, jei neatsižvelgiama į emisijas gyvavimo ciklo pabaigoje. Taip pat pažymima, kad biopagrindo polimerų gamyba dar nėra pilnai optimizuota, todėl dabartiniai rezultatai gali neatspindėti jų ilgalaikio potencialo. Atsižvelgiant į tai, PEF metodikos taikymas laikomas būtinu siekiant užtikrinti nuoseklius ir palyginamus rezultatus [54].

### **1.6.2. Lanksčių pakuočių LCA**

2024 m. atliktame aplinkosauginiame gyvavimo ciklo vertinime (LCA) analizuotos dvi lanksčių pakuočių grupės: metalizuotas PET ir PET/PE bei metalizuotas PP ir PP/PP. Tyrimo tikslas – nustatyti, kaip žiedinės ekonomikos principai (perdirbtos žaliavos dalis ir energijos šaltinis) gali sumažinti šių pakuočių poveikį aplinkai. Vertinimas atliktas naudojant realius gamybos duomenis ir „SimaPro“ programinę įrangą, taikant CED ir CML-IA metodus. Sukurti penki scenarijai, kuriuose kito perdirbtos žaliavos kiekis ir elektros energijos šaltinis.

Rezultatai parodė, kad didžiausią įtaką poveikiui mažinti turi perdirbtų žaliavų dalies didinimas. Scenarijai, kuriuose naudojama iki 75 % antrinių žaliavų, pasižymėjo mažiausiu energijos poreikiu ir reikšmingai sumažintu poveikiu daugumoje kategorijų. Tuo tarpu energijos šaltinio keitimas į atsinaujinančius išteklius turėjo mažesnę poveikį bendram rezultatui. CML-IA analizė atskleidė, kad didžiausias poveikis siejamas su jūrų ekotoksiškumu, o jo mažinimas tiesiogiai priklauso nuo perdirbtų medžiagų naudojimo masto. Panašios tendencijos nustatytos ir polipropileno (PP) pakuotėse. Tai leidžia teigti, kad žiedinės ekonomikos kontekste efektyviausia strategija yra ne tik energijos šaltinių keitimas, bet visų pirma perdirbtų medžiagų integravimas į gamybos procesus [13].

### **1.6.3. Daugiasluoksnių plėvelių LCA**

Daugiasluoksnių pakuočių LCA tyrimai rodo, kad jų aplinkosauginis efektyvumas priklauso ne tik nuo medžiagų sudėties, bet ir nuo konstrukcijos bei gamybos technologijų. 2014 m. atliktas tyrimas parodė, kad mažo storio daugiasluoksnių plėvelių naudojimas gali sumažinti transportavimo ir logistikos poveikį dėl mažesnės masės [55].

Gamybos technologijos pasirinkimas taip pat turi reikšmingą įtaką. Nustatyta, kad laminavimas be tirpiklių leidžia sumažinti energijos sąnaudas, žaliavų naudojimą ir padidinti gamybos efektyvumą, lyginant su tradiciniais metodais [56]. Tai rodo, kad net nedideli technologiniai pakeitimai gali turėti reikšmingą poveikį viso gyvavimo ciklo rezultatams.

Gyvavimo ciklo pabaigos analizė atskleidžia, kad perdirbimas yra efektyviausias daugiasluoksnių plėvelių atliekų tvarkymo būdas. PA/PE plėvelių atveju nustatytas reikšmingas poveikio sumažėjimas globalinio atšilimo (–58 %), išteklių išekvojimo (–40 %) ir iškastinio kuro naudojimo (–43 %) kategorijose [57]. Šie rezultatai siejami su galimybe susigrąžinti polimerus ir pakartotinai juos panaudoti. Vis dėlto daugiasluoksnių struktūrų perdirbimas išlieka technologiniu požiūriu sudėtingas. Tokie metodai kaip selektyvus tirpinimas laikomi perspektyviais, tačiau jų taikymas vis dar ribotas, todėl reikalingi tolimesni tyrimai ir technologinė plėtra. Tai rodo, kad daugiasluoksnių pakuočių tvarumas priklauso ne tik nuo medžiagų pasirinkimo, bet ir nuo realių atliekų tvarkymo galimybių bei technologinių sprendimų, leidžiančių užtikrinti jų perdirbamumą.

## 1.7. Atliekų tvarkymas

### 1.7.1. Atliekų hierarchija ir plastiko atliekų susidarymas

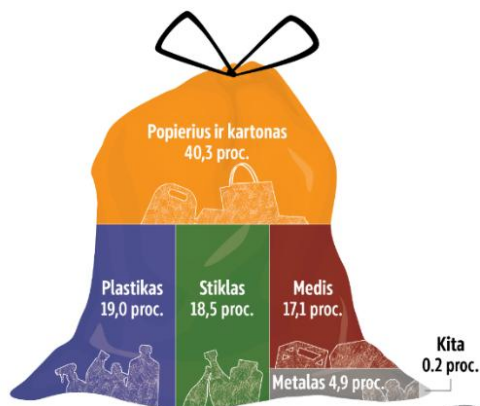
Atliekų tvarkymo prioritetai Europos Sąjungoje grindžiami atliekų hierarchija, nustatyta Atliekų pagrindų direktyvoje (Direktyva 2008/98/EB) [16]. Kaip nurodoma, „atliekų hierarchija taikoma kaip prioritetų tvarka atliekų prevencijos ir tvarkymo teisės aktuose bei politikoje“ [58]. Ši hierarchija (8 pav.) nustato aiškią prioritetų seką: prevencija, paruošimas pakartotiniam naudojimui, perdirbimas, kitas panaudojimas (pvz., energijos atgavimas) ir galiausiai šalinimas.



8 pav. Atliekų hierarchija [59]

Hierarchijos viršuje yra prevencija, tai yra priemonės, kurių imamasi dar prieš produktui tampa atliekomis. Toliau seka paruošimas pakartotiniam naudojimui, perdirbimas, kitas panaudojimas (pvz., energijos atgavimas) ir galiausiai atliekų šalinimas, kuris laikomas mažiausiai pageidautinu sprendimu. Iš esmės „šalinimas yra bet kokia operacija, kuri nėra panaudojimas, net jei jos antrinis rezultatas yra energijos ar medžiagų atgavimas“ [58]. Šia atliekų hierarchine schema norima parodyti, kad pirmenybė visada yra teikiama atliekų prevencijai, o atliekų vežimas į sąvartynus turėtų būti paskutinė išeitis.

Pakavimo atliekos sudaro reikšmingą ES atliekų srautą (9 pav.), o jų analizė pagal medžiagas leidžia identifikuoti prioritetingas sritis prevencijai ir perdirbimui.



9 pav. Pakavimo atliekos ES, pagal pakavimo medžiagas, 84 mln. tonų 2021 m. [60]

ES duomenimis, plastiko atliekų perdirbimo lygis siekia 40,7 %, o energijos atgavimas sudaro apie 35 % [61]. Nors perdirbimo rodikliai nuosekliai augo (nuo 25,2 % 2005 m. iki 40,7 % 2022 m.), dalis

atliekų vis dar eksportuojama dėl ribotų vietinių perdirbimo pajėgumų. Plastiko tarša išlieka viena iš pagrindinių aplinkosauginių problemų: kasmet į aplinką patenka 19–23 mln. tonų plastiko, o 2019 m. plastiko gyvavimo ciklas sukėlė apie 1,8 mlrd. tonų šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų. Prognozuojama, kad iki 2060 m. šis kiekis gali daugiau nei patrigubėti [61]. Tai rodo, kad nepaisant augančių perdirbimo rodiklių, plastiko atliekų problema išlieka struktūrinė ir reikalauja ne tik technologinių, bet ir vartojimo mažinimo sprendimų.

### 1.7.2. Vartojimo įtaka atliekų susidarymui ir poveikiui aplinkai

Plastiko pakuočių perdirbimo rodikliai ES valstybėse ženkliai skiriasi, atspindėdami tiek infrastruktūros išsivystymo lygį, tiek vartojimo įpročius (10 pav.). Nors bendras perdirbimo lygis didėja, vien atliekų tvarkymo sistemų tobulinimas nėra pakankamas mažinant bendrą poveikį aplinkai.



10 pav. Kiek plastiko yra perdirbama (2022 m.) [61]

Nors plastiko perdirbimas ES nuosekliai auga ir 2022 m. siekė 40,7 %, vien atliekų tvarkymo gerinimas nėra pakankamas mažinant bendrą poveikį aplinkai. Kaip nurodoma, „augantis vartojimas išlieka pagrindine problema, nes net ir efektyvios atliekų tvarkymo sistemos negali kompensuoti didėjančio plastiko naudojimo“ [62]. Modeliavimas rodo, kad 2030 m. ES galėtų sutaupyti 7,3 mln. tonų CO<sub>2</sub> ekv., jei būtų plačiai naudojamas antrinis PET ir efektyvios atliekų tvarkymo sistemos. Tačiau beveik toks pats poveikio sumažėjimas (6,8 mln. tonų CO<sub>2</sub> ekv.) būtų pasiektas vien tik stabilizuojant PET vartojimą ties 2020 m. lygiu. Derinant abu veiksnius, sumažėjimas galėtų siekti iki 12 mln. tonų CO<sub>2</sub> ekv. Tai patvirtina, kad mažesnis vartojimas kartu su geru perdirbimu yra efektyvesnis nei didelis vartojimas net ir su pažangiomis atliekų tvarkymo sistemomis.

### 1.7.3. Bioplastikinių atliekų tvarkymas ir biologinis skaidumas

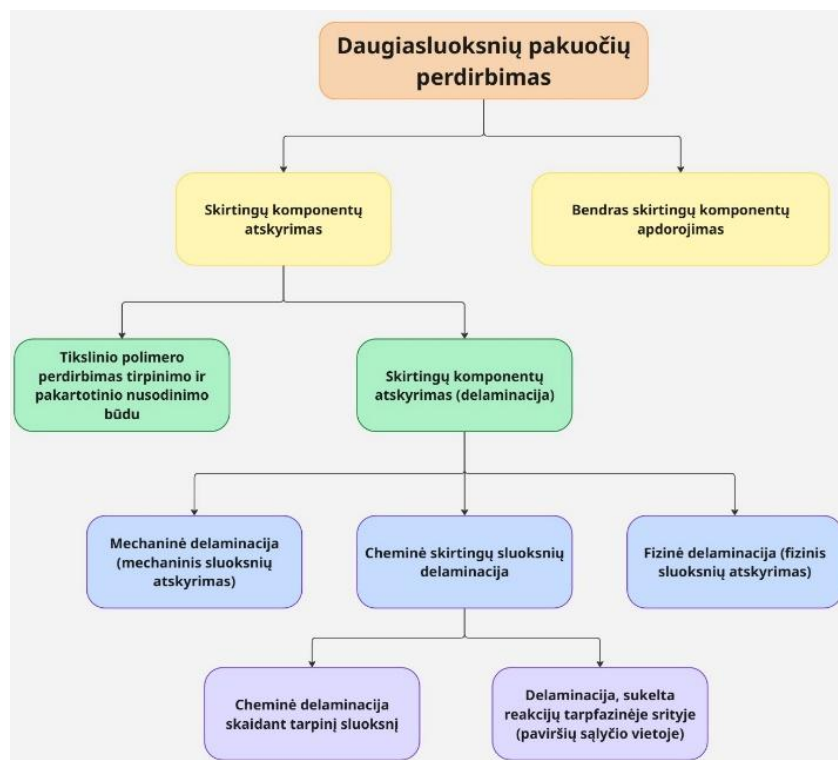
Biologiškai skaidūs plastikai yra medžiagos, kurios tam tikromis sąlygomis gali būti suskaidytos mikroorganizmų veikimo metu jų gyvavimo ciklo pabaigoje. Prie šios grupės priskiriami ir kompostuojami plastikai, kurie paprastai suyra tik pramoniniuose kompostavimo įrenginiuose, todėl jų surinkimas ir tinkamas nukreipimas yra būtinas [63].

Biologinis skaidumas taikomas tik organinei plastiko daliai, todėl plastikai su neorganiniais polimerais ar dideliu neorganinių priedų kiekiu nėra laikomi biologiškai skaidžiais. Skaidymo procesas vyksta dviem etapais: polimero grandinių suskaidymu į mažesnius junginius ir jų pavertimu į CO<sub>2</sub>, metaną bei mikrobinę biomasę. Šių procesų greitis priklauso nuo aplinkos sąlygų, todėl tas pats plastikas skirtingose terpėse gali irti labai skirtingu tempu. Dėl to biologinio skaidumo vertinimas turi būti atliekamas pagal aiškiai apibrėžtus kriterijus, nustatančius, koku mastu ir per kokį laikotarpį plastikas turi suirti konkrečioje aplinkoje [5].

Bioplastikų gyvavimo ciklo pabaigos tvarkymo sprendimai apima kompostavimą, anaerobinį skaidymą, mechaninį ir cheminį perdirbimą. Kompostuojami plastikai efektyviausiai suyra tik kontroliuojamomis sąlygomis, o anaerobinis skaidymas leidžia iš dalies jų energinį potencialą panaudoti biodujų gamybai. Tuo tarpu perdirbimo efektyvumas priklauso nuo atliekų rūšiavimo kokybės ir technologinių galimybių. Netinkamas bioplastikų šalinimas gali lemti jų ilgalaikį išlikimą aplinkoje arba šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas sąvartynuose. Todėl tvarus šių medžiagų valdymas reikalauja aiškos ženklavimo sistemos, atskiro surinkimo ir tinkamai išvystytos infrastruktūros, taip pat aktyvaus institucijų, pramonės ir vartotojų bendradarbiavimo [64].

#### 1.7.4. Lanksčių pakuočių atliekų tvarkymas

Ne biologiškai skaidžių plastikų atliekų kiekio augimas yra tiesiogiai susijęs su trumpu pakuočių naudojimo ciklu ir jų plačiu paplitimu dėl ekonominio efektyvumo [65]. Dėl šios priežasties vis didesnis dėmesys skiriamas lanksčių pakuočių, ypač daugiasluoksnių plėvelių, atliekų tvarkymo sprendimams. Daugiasluoksnės plėvelės kelia iššūkių dėl sudėtingos struktūros, apsunkinančios jų perdirbimą. Pagrindiniai perdirbimo keliai (11 pav.) apima: a) sluoksnių atskyrimą, leidžiantį perdirbti kiekvieną polimerą atskirai; b) bendrą perdirbimą, naudojant suderinamumą gerinančius priedus [38, 65].



11 pav. Daugiasluoksnių plėvelių atliekų perdirbimo metodų santrauka [38, 65]

Sluoksnių atskyrimas gali būti atliekamas taikant selektyvų tirpinimą, nusodinimą arba fizinius, mechaninius ir cheminius sluoksnių atskyrimo metodus. Tuo tarpu bendras perdirbimas dažniau taikomas homogeniškomis poindustrinėms atliekoms. Pastaruoju metu vis daugiau dėmesio skiriama ekologinio projektavimo principams, siekiant supaprastinti perdirbimą. Vienas iš perspektyvių sprendimų – priverstinė daugiasluoksnė ekstruzija, leidžianti kurti daugiasluoksnes struktūras su mažesniu sluoksnių skaičiumi ir geresnėmis perdirbimo galimybėmis [65]. Apibendrinant, atliekų tvarkymo hierarchija, plastiko vartojimo tendencijos ir bioplastikų bei daugiasluoksnių pakuočių gyvavimo ciklo pabaigos ypatumai rodo, kad vien technologinių sprendimų nepakanka. Tvarus atliekų valdymas reikalauja prevencijos, efektyvaus perdirbimo, aiškaus ženklavimo ir išvystytos infrastruktūros, o medžiagų pasirinkimas turi būti vertinamas viso gyvavimo ciklo kontekste.

## 2. Plėvelių ir siūlių tyrimo metodika

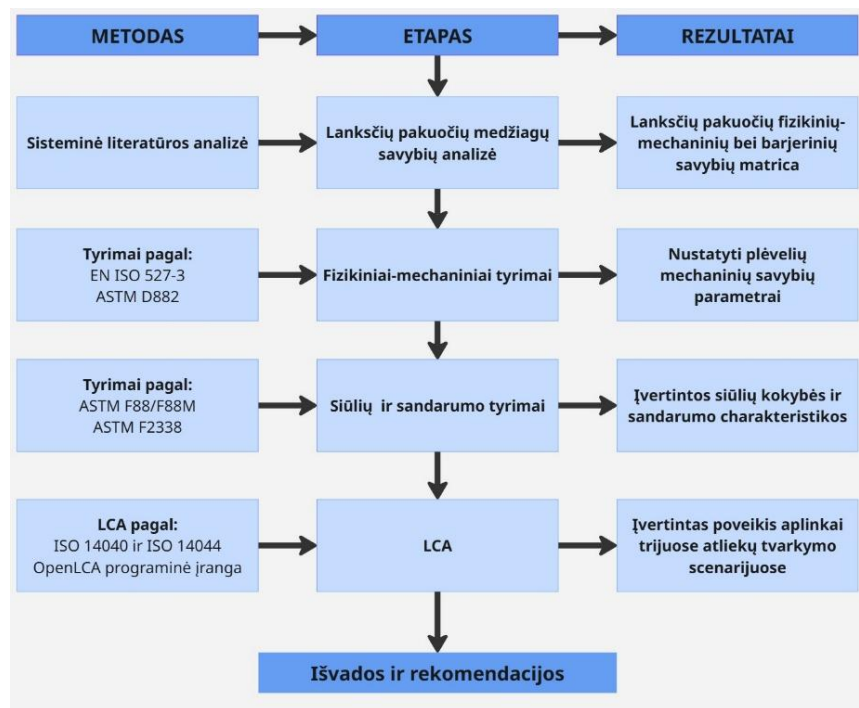
### 2.1. Tyrimas ir jo etapai

Šio tyrimo tikslas yra įvertinti tradicinių ir bioskaidžių plėvelių, turinčių barjerines savybes, tinkamumą lanksčių pakuočių gamybai. Vertinimas atliekamas analizuojant jų fizikines–mechanines savybes, siūlių formavimo ir maišelio sandarumo parametrus bei aplinkosauginį poveikį. Tyrimas orientuotas į praktinį plėvelių elgsenos palyginimą realiomis gamybos sąlygomis ir jų substitucijos galimybių įvertinimą, kaip numatyta darbo uždaviniuose.

Tyrimas atliktas keturiais etapais:

- *Fizikinių–mechaninių savybių tyrimai* (Nustatytos pagrindinės mechaninės charakteristikos, leidžiančios įvertinti plėvelių atsparumą tempimui, deformacijai ir tinkamumą pakuočių gamybai.);
- *Siūlių formavimas ir siūlių stiprumo bandymai* (Įvertinta, kaip skirtingos plėvelės reaguoja į terminį sandarinimą, kokie parametrai reikalingi bioskaidžioms plėvelėms ir ar siūlės atitinka reikalaujamą mechaninį stiprį.);
- *Pakuotės sandarumo tyrimai* (Nustatyta, ar suformuoti maišeliai yra sandarūs, kokio slėgio jie neatlaiko ir ar bioskaidžios plėvelės gali užtikrinti reikiamą barjerinį funkcionalumą.);
- *LCA* (Aplinkosauginis poveikis vertintas pagal ISO 14040 ir ISO 14044 principus, naudojant „OpenLCA“ programinę įrangą, siekiant įvertinti bioskaidžių plėvelių aplinkosauginį veiksmingumą lyginant su tradicinėmis alternatyvomis.).

Metodologinė schema (12 pav.) apibendrina visą tyrimo eigą, nuo eksperimentinių bandymų iki rezultatų analizės ir interpretavimo. Schemoje nuosekliai pateikiami bandinių paruošimo, mechaninių bandymų, siūlių formavimo, sandarumo tyrimų ir LCA analizės etapai, kurių metu surinkti duomenys naudojami kompleksiniam medžiagų vertinimui. Tokiu būdu schema aiškiai parodo ryšį tarp eksperimentinių matavimų, rezultatų analizės ir galutinių tyrimo išvadų.



12 pav. Metodologinė schema

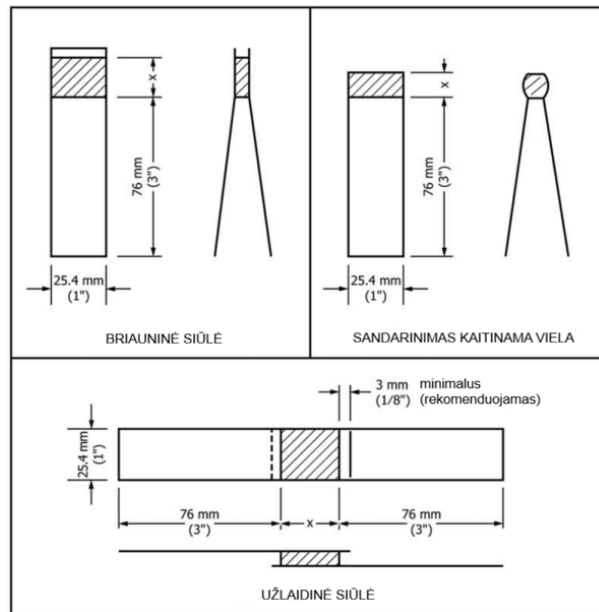
## 2.2. Plėvelės fizikinių-mechaninių savybių tyrimai

### 2.2.1. Bandinių paruošimas

Iš kiekvienos plėvelės buvo paruošti dviejų tipų standartizuoti bandiniai pagal EN ISO 527-3, ASTM D882-12, ISO 11339, ASTM F88/F88M ir ASTM F2338-05 standartų reikalavimus. Bandiniai iškirpti išilgine kryptimi (MD), siekiant įvertinti gamybos proceso įtaką mechaninėms savybėms. Prieš bandymus bandiniai kondicionuoti kontroliuojamoje temperatūros ir drėgmės aplinkoje, užtikrinant rezultatų atkuriamumą ir palyginamumą tarp skirtingų plėvelių tipų.

EN ISO 527-3 ir ASTM D882-12 standartai apibrėžia tempimo bandymų metodiką lanksčioms plėvelėms. Pagal šių standartų reikalavimus tempimo bandymų juostelių plotis turi būti ne mažesnis kaip 10 mm ir ne didesnis kaip 25 mm, o ilgis – ne mažesnis kaip 150 mm. Didelio tūsumo medžiagoms leidžiama sumažinti atstumą tarp griebtuvų iki 50 mm.

Siūlių tempimo bandymai atlikti remiantis ISO 11339 ir ASTM F88/F88M-15 standartais, kurie pateikia rekomenduojamus bandinių matmenis bei skirtingų siūlių formavimo metodus. Tyrimui pasirinkta briauninė siūlė (angl. fin seal), nes ji tiksliausiai atitinka siūlę, susidarantią maišelio formavimo metu. Rekomenduojami bandinių matmenys pateikti 13 paveiksle [66].



13 pav. Rekomenduojami bandinio matmenys [66]

ASTM F2338-05 standartas aprašo pakuočių nesandarumo nustatymo metodą, pagrįstą vakuumo slėgio mažėjimo principu (angl. k. vacuum decay), kuris plačiai taikomas pakuočių sandarumo vertinimui. Standarte konkretūs bandinių matmenys nėra apibrėžiami, nes jie priklauso nuo naudojamos įrangos parametrų. Šiam tyrimui pasirinkti 150 × 200 mm matmenų bandiniai, tinkami naudoti pralaidumo testavimo įrangai.

### 2.2.2. Tempimo bandymas

Tempimo bandymai atlikti siekiant nustatyti plėvelių mechanines savybes veikiant tempiamajai apkrovai ir įvertinti jų tinkamumą lanksčių pakuočių gamybai. Bandiniai tirti universalio 10 kN galios tempimo–gniuždymo mašina Tinius Olsen „H10KT“, pritaikyta plonų polimerinių plėvelių mechaninių savybių analizei. Įrenginyje naudoti 0,5 kN ir 10 kN jėgos jutikliai, leidžiantys registruoti skirtingo stiprio bandinių apkrovas.

Bandymų metu taikytas 100 N apkrovos diapazonas, tinkamas plonų plėvelių tempimo bandymams, bei 800 mm poslinkio diapazonas, užtikrinantis galimybę registruoti didelius pailgėjimus iki lūžio. Pradinis bandinio įtempimas nustatytas 0,5 N apkrova, pašalinant juostelės laisvumą ir užtikrinant stabilų jėgos registravimą nuo bandymo pradžios. Daugumai bandinių taikyta 100 mm darbinė bazė pagal EN ISO 527-3 standarto rekomendacijas plonomis plėvelėms, tačiau didelio tūsumo medžiagoms (PP-VD ir rLDPE-90) bazė sumažinta iki 50 mm, nes standartinis poslinkio diapazonas nebuvo pakankamas bandiniui nutraukti. Bandymo greitis parinktas 200 mm/min, užtikrinant stabilų deformacijos registravimą bandymo metu.

Tempimo bandymų metu jėgos ir poslinkio duomenys registruoti programine įranga „QMAT PRO 1.0.20“, o rezultatai sisteminėti ir analizuoti naudojant Microsoft Excel. Prieš bandymus įranga buvo kalibruota, siekiant užtikrinti matavimo tikslumą ir rezultatų atkuriamumą. Pagal techninę specifikaciją apkrovos matavimo tikslumas siekia  $\pm 0,5\%$  nuo rodmens, padėties matavimo tikslumas  $\pm 0,01\%$  arba 0,001 mm, o greičio matavimo tikslumas  $\pm 0,005\%$ .

Bandymo metu bandiniai buvo tempiami tolygiai didinant apkrovą iki lūžio, o registruoti jėgos ir poslinkio duomenys panaudoti įtempio–deformacijos kreivėms sudaryti. Remiantis bandymo

duomenimis apskaičiuotas tempimo stipris ir pailgėjimas iki lūžio. Tyrimo rezultatai panaudoti tradicinių, perdirbtų ir bioskaidžių plėvelių mechaninėms savybėms bei jų tinkamumui pakuočių gamybai įvertinti.

## **2.3. Siūlių stiprumo bandymai**

### **2.3.1. Siūlių formavimas**

Siūlės buvo formuojamos naudojant eksperimentinę šiluminio sandarinimo įrangą, pritaikytą modeliuoti pramoninių šaldytų maisto produktų pakuočių sandarinimo sąlygas. Nors įrenginys nėra komercinis ir neturi gamintojo identifikacijos, jis užtikrina kontroliuojamą sandarinimo procesą. Įranga veikė fiksuotos temperatūros režimu, todėl visoms plėvelėms buvo taikoma vienoda sandarinimo temperatūra. Pagrindinis reguliuojamas parametras buvo kaitinimo trukmė, parenkama taip, kad susiformuotų stabili ir vientisa siūlė. Įrenginio konstrukcija paremta pramoninių briauninio sandarinimo (angl. k. fin seal) mazgų veikimo principais, todėl suformuotos siūlės savo geometrija ir formavimo principu yra artimos komercinėse pakuotėse naudojamoms siūlėms bei tinkamos tolesniems mechaniniams ir sandarumo tyrimams. Paruošta siūlė pateikta 14 paveiksle.



**14 pav.** Bandymams paruošta briauninė siūlė

### **2.3.2. Siūlių stiprumo bandymas**

Siūlių stiprumo bandymai atlikti vadovaujantis ASTM F88/F88M–15 standarto reikalavimais. Iš kiekvieno suformuoto maišelio išpjautos 25 mm pločio juostelės, kurių siūlė orientuota bandinio centre. Bandinių ilgis buvo ne mažesnis kaip 150 mm, siekiant užtikrinti pakankamą atstumą griebtuvų įtvirtinimui ir stabilų atplėšimo procesą.

Bandymai atlikti universalio tempimo–gniuždymo mašina Tinius Olsen „H10KT“, taikant 300 mm/min bandymo greitį pagal ASTM F88/F88M standarto rekomendacijas lanksčių plėvelių ir siūlių bandymams. Bandinių galai buvo įtvirtinami taip, kad siūlė sutaptų su bandymo ašimi, o atplėšimo kryptis atitiktų griebtuvų judėjimo trajektoriją. Bandymo metu registruotos jėgos–poslinkio kreivės. Remiantis jomis apskaičiuotas vidutinis siūlės stipris (N/25 mm), maksimalus siūlės stipris bei įvertintas plyšimo pobūdis: vientisas atplėšimas, dalinis atplyšimas, plėvelės plyšimas arba siūlės atsiskyrimas. Vidutinė jėga apskaičiuota neįtraukiant pradinio jėgos didėjimo ir galutinio kritimo sričių, kaip numatyta ASTM F88/F88M metodikoje.

Kiekvienam plėvelės tipui atlikta po tris bandymus. Gauti rezultatai statistiškai įvertinti apskaičiuojant vidurkį, standartinį nuokrypį ir variacijos koeficientą. Rezultatai naudoti siūlių kokybei, vientisumui ir tinkamumui lanksčių pakuočių gamybai vertinti.

### 2.3.3. Pakuotės sandarumo tyrimai

Pakuotės sandarumas buvo vertinamas naudojant „Stationary Leak Tester“ (SLT) įrangą [67], veikiančią vakuuminio slėgio kritimo principu. Tai nedestrukcinis metodas, leidžiantis aptikti tiek didelius, tiek mikro nuotėkius, nepažeidžiant tiriamos pakuotės. Bandymui naudojami tie patys maišeliai, kurie buvo suformuoti siūlių formavimo etape.

SLT įrenginys sukuria vakuumą aplink tiriamą pakuotę, naudodamas dvi sandarias membranas, kurios suformuoja uždara bandymo kamerą. Vakuumui susidarius, sistema stebi slėgio pokyčius kameroje. Jei pakuotėje yra nuotėkis, oras iš aplinkos patenka į kamerą, sukeldamas slėgio padidėjimą. Šis pokytis registruojamas ir analizuojamas automatiškai. Metodas atitinka ASTM F2338 standartą, kuris yra vienas iš pripažintų nedestrukcinų nuotėkio aptikimo metodų.

Bandymo eiga apima keturis pagrindinius etapus:

- *Paruošimas.* Įrenginys prijungiamas prie elektros tinklo ir suslėgto oro tiekimo (5–8 bar). Prieš bandymą atliekama automatinė sistemos patikra;
- *Bandinio įdėjimas.* Atidaromas dangtis, maišelis įdedamas tarp dviejų membranų ir dangtis uždaromas;
- *Bandymo inicijavimas.* Paspaudžiamas starto mygtukas. Sistema automatiškai sukuria vakuumą ir pradeda slėgio stebėjimą;
- *Slėgio stabilizacija ir matavimas.* Įrenginys matuoja slėgio pokyčius per nustatytą laiką. (Jei slėgis išlieka stabilus, pakuotė laikoma sandaria; Jei registruojamas slėgio padidėjimas, nustatomas nuotėkis.);
- *Rezultatų pateikimas.* Rezultatai pateikiami vizualiai: Žalia šviesa (OK) – pakuotė sandari; Raudona šviesa (NOT OK) – aptiktas nuotėkis. Ekrane pateikiama informacija apie nuotėkio intensyvumą.

Pagal įrangos algoritmą galimi keli rezultatų tipai:

- „Pack OK“ – pakuotė sandari, slėgio pokytis neviršija nustatytų ribų.
- „Big Leak“ – didelis nuotėkis, slėgio pokytis viršija leistiną ribą per trumpą laiką.
- „Pack Leak“ – nustatytas mažesnio intensyvumo nuotėkis.
- „Non-return valve leak“ – galimas vožtuvo arba membranos sandarumo sutrikimas (įrangos techninis signalas).
- „Membrane leak / Air pressure low“ – įrangos diagnostinis pranešimas, rodantis, kad vakuumas nepasiekia reikiamos vertės (gali būti dėl pakuotės skylės, membranos pažeidimo ar nepakankamo oro slėgio).

Šie rezultatai leidžia įvertinti ne tik pakuotės sandarumą, bet ir siūlės kokybę bei plėvelės tinkamumą naudoti realiose pakavimo sąlygose.

Tyrimui suformuoti trys 150 × 200 mm dydžio maišeliai, naudojant tą pačią eksperimentinę šiluminio sandarinimo įrangą kaip ir siūlių formavimo etape. Maišelio siūlės litavimą galima matyti 15 pav. Prieš sandarinimą plėvelės ruošiniai iškirpti 300 × 400 mm matmenų, kad po užlenkimo ir siūlių formavimo būtų gauti numatyti maišelio matmenys. Toks formatas parinktas siekiant užtikrinti pakankamą vidinį tūrį vakuumo slėgio mažėjimo metodo (ASTM F2338) jautrumui bei stabilų bandinio įdėjimą į SLT kamerą. 150 × 200 mm maišelių formatas atitinka tipinius šaldytų maisto

produktų pakuočių matmenis, todėl bandiniai yra artimi komercinėse pakuotėse naudojamoms struktūroms ir leidžia vertinti rezultatų praktinį pritaikomumą pakuočių sandarumo analizėje.



**15 pav.** Maišelio bandinys litavimo metu

Pakuočių sandarumo bandymas buvo nedestrukcinis, todėl tie patys maišeliai galėjo būti naudojami pakartotiniams matavimams. Taikytas vakuumo slėgio mažėjimo metodas pasižymi jautrumu mikro nuotėkiams ir automatizuotu rezultatų registravimu, sumažinančiu operatoriaus įtaką matavimams. Naudota įranga taip pat suteikia galimybę tirti skirtingų dydžių ir formų lanksčias pakuotes.

## **2.4. LCA**

### **2.4.1. Darbo eiga**

Gyvavimo ciklo vertinimas (LCA) yra metodas, skirtas produkto ar proceso poveikiui aplinkai vertinti viso gyvavimo ciklo metu – nuo žaliavų išgavimo iki galutinio atliekų tvarkymo. Šis metodas apima žaliavų gavybą, gamybos procesus, energijos naudojimą, šalutinių produktų susidarymą, naudojimo etapą ir atliekų tvarkymą, todėl leidžia įvertinti bendrą aplinkosauginį poveikį bei identifikuoti reikšmingiausias poveikio šaltinius [54].

LCA metodika grindžiama tarptautiniais ISO 14040 ir ISO 14044 standartais, apibrėžiančiais pagrindinius analizės principus, struktūrą ir etapus. Kadangi šie standartai nenustato konkrečių poveikio kategorijų ar duomenų kokybės kriterijų, praktikoje taikomi skirtingi poveikio vertinimo metodai. Siekiant didesnio rezultatų palyginamumo Europos Sąjungoje sukurta Product Environmental Footprint (PEF) metodika, paremta ILCD sistema, detalizuojančia poveikio kategorijas, duomenų kokybės kriterijus ir vertinimo procedūras [54].

Šiame tyrime gyvavimo ciklo analizė atlikta naudojant „OpenLCA“ programinę įrangą. Tai profesionali, modulinė LCA modeliavimo sistema, leidžianti kurti detalius produktų gyvavimo ciklo modelius, integruoti įvairias duomenų bazes (pvz., ecoinvent) ir atlikti poveikio aplinkai vertinimą pagal tarptautinius standartus. „OpenLCA“ suteikia galimybę tiksliai apibrėžti procesų grandines, atliekų srautus, energijos ir medžiagų sąnaudas, o taip pat apskaičiuoti klimato kaitos potencialą, energijos naudojimą ir kitus poveikio rodiklius. Programinė įranga pasirinkta dėl lankstumo, galimybės modeliuoti skirtingus atliekų tvarkymo scenarijus ir užtikrinti didesnę rezultatų detalumą bei palyginamumą tarp skirtingų pakuočių medžiagų.

Atliekant tyrimą, LCA analizė apėmė funkcinio vieneto nustatymą, sistemos ribų apibrėžimą, inventorizacijos duomenų surinkimą ir poveikio kategorijų vertinimą. Gauti rezultatai naudoti tradicinių ir bioskaidžių plėvelių aplinkosauginiam veiksmingumui palyginti bei jų galimybėms pakeisti tradicines medžiagas lanksčių pakuočių gamyboje įvertinti.

### 3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai ir analizė

Skirtingų polimerų terminėms ir fizinėms savybėms tirti buvo parinkta 13 bandinių, apimančių tris plastikų grupes: konvencinius naftos pagrindo polimerus (LDPE, HDPE, PP), perdirbtus polimerus (rLDPE) bei biologiškai skaidžias ir kompostuojamas medžiagas (PLA, PBAT, krakmolo mišinius). Bandiniai atrinkti iš skirtingų taikymo sričių, įskaitant pramonines plėveles, maisto produktų pakuotes ir prekybos tinklų maišelius. 7 lentelėje pateikiama bandinių sudėtis, struktūrinės charakteristikos ir deklaruojamas storis.

**7 lentelė.** Tyrimui naudojamų plastikinių plėvelių ir pakuočių charakteristikos

Bandinio kodas	Medžiaga	Plėvelės tipas	Struktūra	Storis, $\mu\text{m}$	Lydomosi pobūdis	Gamintojas/tiekėjas
LDPE-75	LDPE	Termoplastikas	Homogeniška, monolitinė	75	Tolygus, skaidrėja, lydosi	„Granplasta“ [68]
LDPE-120	LDPE	Termoplastikas	Homogeniška, monolitinė	120	Lėtas, klampus lydymasis	„Granplasta“ [68]
HDPE-20	HDPE	Termoplastikas	Pusiau kristalinė	20	Greitas, tampa skaidrus	„Granplasta“ [68]
rLDPE-90	Re LDPE 90 %	Perdirbtas termoplastikas	Nevienalytė (su priemaišomis)	75	Drumstas, netolygus lydymasis	–
rLDPE-IKI	Re LDPE 90 % - 100 %	Perdirbtas termoplastikas	Nevienalytė	50	Gali atsirasti suodžių/nuosėdų	Parduotuvė „IKI“
PP-VD	PP	Termoplastikas	Kristalinė, orientuota	20	Aukšta temperatūra, staigus skystėjimas	„Vilniaus duona“
BIO-RIMI	PBAT ir kukurūzų krakmolas	Bioplastikas (kompostuojamas)	Kompozitinė (bio-mišinys)	25	Traukiasi, tampa lipnus, „kepa“	Parduotuvė „RIMI“
BIO-14	PLA / PBAT mišinys	Bioplastikas (kompostuojamas)	Polimerų lydinys	14	Greitai minkštėja, saldus kvapas	„Pacalan“ [69]
BIO-C1	Termoplastinis krakmolas ir biopolimerai	Bioplastikas (kompostuojamas)	Polimerų lydinys (TPS)	60	Burbuliuoja, anglėja, rudoja	„Carrefour“
BIO-C2	Krakmolas ir PBAT	Bioplastikas (kompostuojamas)	Kompozitas (ISO 16620-2)	10	Jautrus drėgmei, žema lydymosi temperatūra	„Carrefour“
TIPA-60	TIPA 302 [70]	Kompostuojamas laminatas	Daugiasluoksnė (laminuota)	60	Sluoksniuojasi arba traukiasi	„TIPA Compostable Packaging“
TIPA-35	TIPA 318	Kompostuojamas laminatas	Daugiasluoksnė	35	Netolygus, priklausomai nuo sluoksnio	„TIPA Compostable Packaging“
TIPA-45	T.LAM 607 [71]	Aukšto barjero laminatas	Daugiasluoksnė struktūra	45	Sudėtingas, gali nesilydyti vientusiai	„TIPA Compostable Packaging“

Lentelės duomenys rodo aiškius struktūrinius skirtumus tarp tradicinių ir biologiškai skaidžių plastikų. Tradiciniai polimerai pasižymi homogeniškesne struktūra, o biologiškai skaidžios medžiagos dažniausiai sudarytos iš kelių polimerinių komponentų, todėl jų lydomosi pobūdis yra nevienalytis. Mažiausiu storiu pasižymintys bandiniai (BIO-14, BIO-C2) yra augalinės kilmės, todėl

tikėtina, kad jie bus jautresni terminėms deformacijoms. Perdirbto plastiko bandiniuose (rLDPE-90, rLDPE-IKI) taip pat pastebėta nevienalytė struktūra, siejama su gamybos procese išlikusiomis priemaišomis. Šie duomenys naudojami tolesnei lydymosi temperatūros ir mechaninio atsparumo analizei.

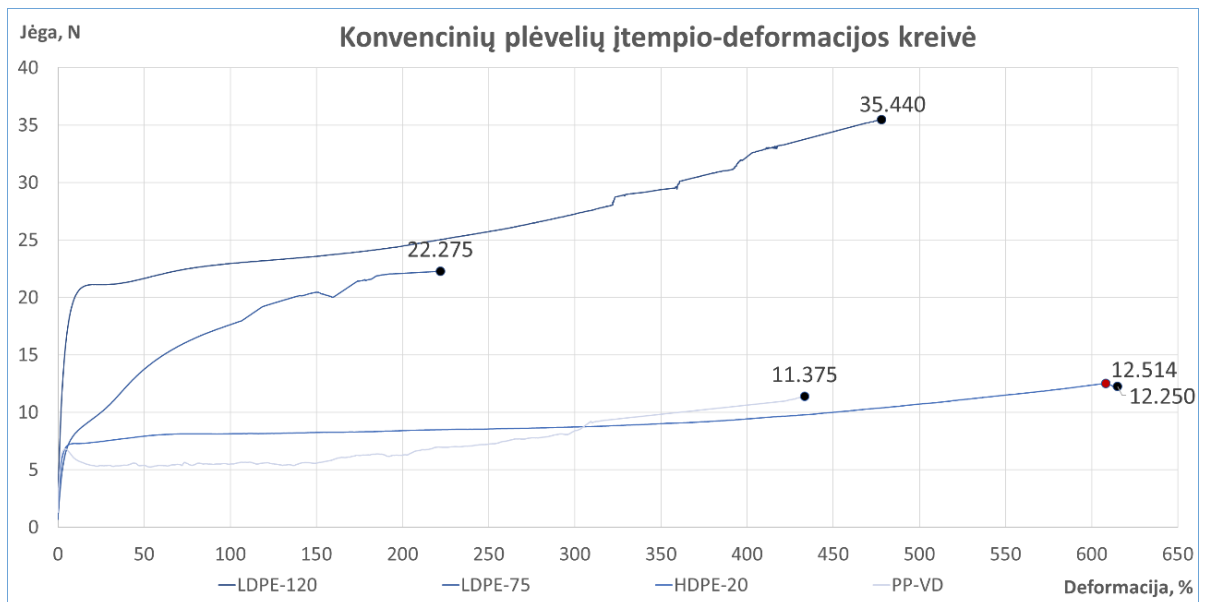
### 3.1. Plėvelių mechaninių savybių rezultatai

16 paveiksle pateiktas bandinio vaizdas tempimo bandymo metu. Jame matyti plėvelės juostelė, įtvirtinta tempimo-gniuždymo mašinos griebtuvuose ir tempiama iki lūžio, registruojant jėgos bei deformacijos pokyčius.



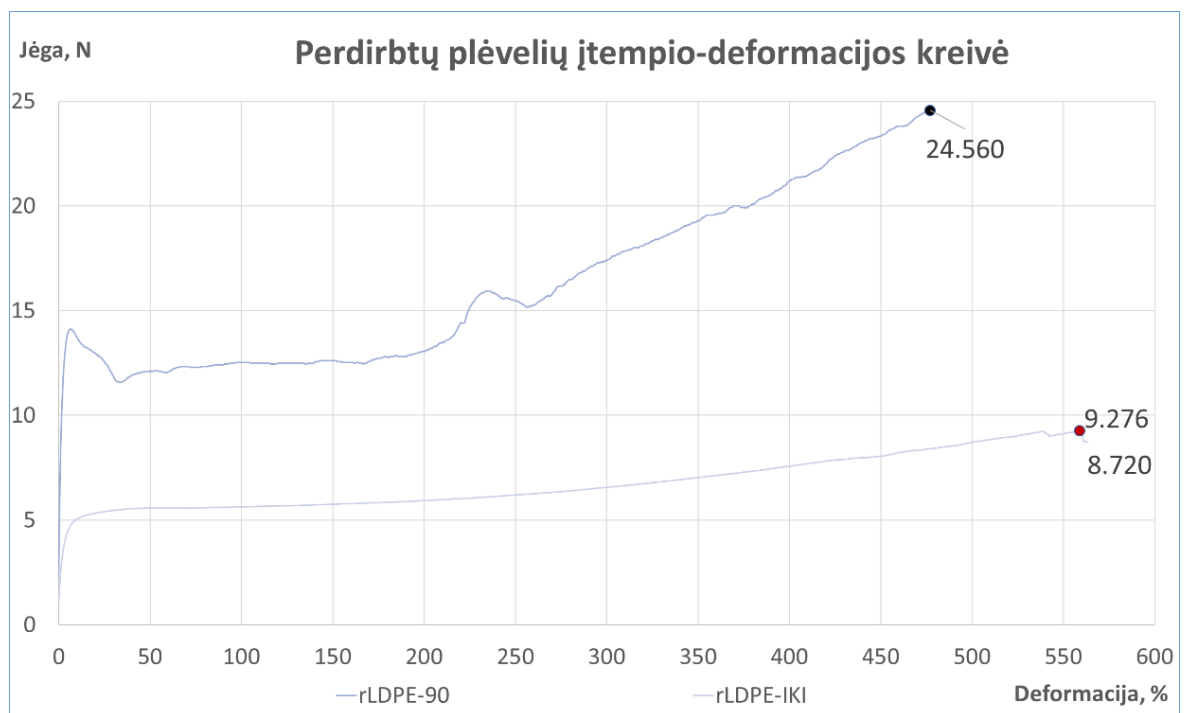
16 pav. Bandinys tempimo bandymo metu

Atliekant PP-VD ir rLDPE-90 tempimo bandymus nustatyta, kad dėl itin didelio medžiagų tūsumo standartinė 100 mm darbinė bazė buvo nepakankama bandiniui nutraukti, nes pasiektas maksimalus „Tinius Olsen H10KT“ įrenginio poslinkio diapazonas. Dėl to bandymai buvo pakartoti, sumažinant darbinę bazę nuo 100 mm iki 50 mm bei naudojant trumpesnius, 50 mm ilgio bandinius. Toks sprendimas leido užtikrinti bandinio lūžį ir tiksliau įvertinti medžiagos mechaninį elgesį esant didelėms deformacijoms. 17 pav. pateiktos konvencinių plėvelių įtempio-deformacijos kreivės.



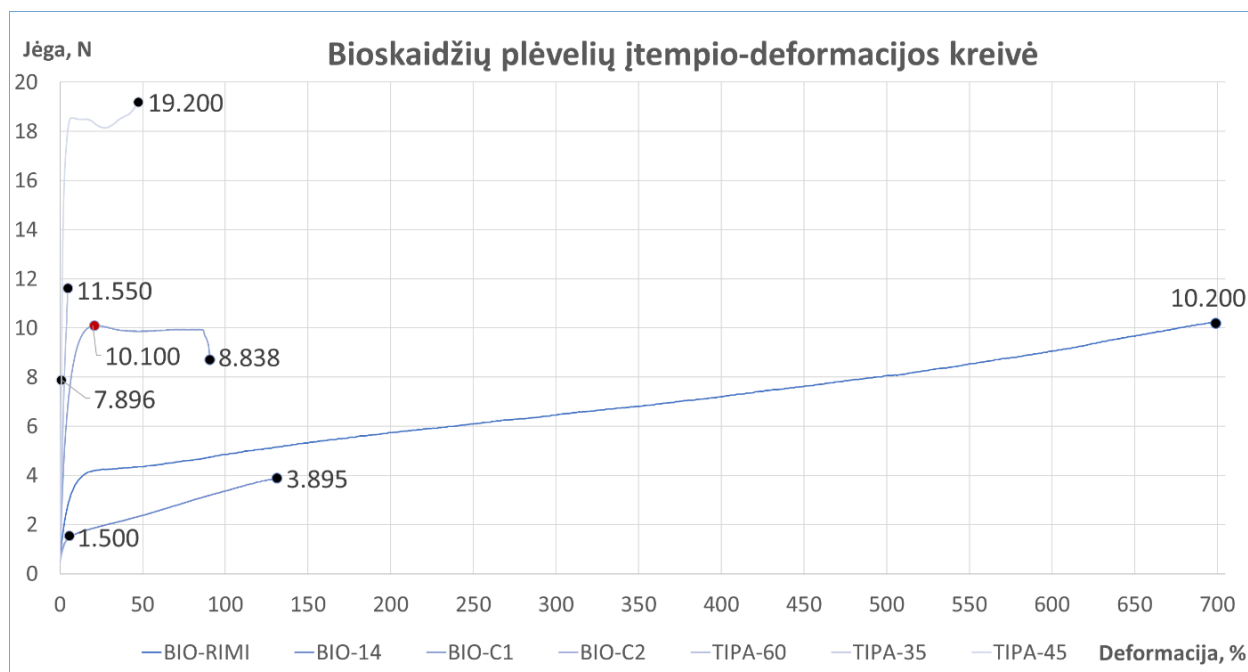
17 pav. Konvencinių plėvelių įtempio-deformacijos kreivė

17 paveikslo kreivės rodo, kad LDPE ir HDPE plėvelėms būdingas tipinis poliolefinų mechaninis elgesys – ilga plastiško tekėjimo sritis ir didelis pailgėjimas iki lūžio. LDPE-120 bandinys pasiekė didžiausią jėgą (35,44 N) ir pasižymėjo itin dideliu pailgėjimu iki lūžio (440,8 %). Kreivėje stebimas kakliuko formavimasis bei stabilus plastiškas tekėjimas. LDPE-75 demonstravo mažesnę stiprį (22,28 N), tačiau taip pat deformavosi plastiškai. HDPE-20 išsiskyrė didesniu įtempiu lūžio momentu (41,79 MPa), tačiau mažesniu pailgėjimu nei LDPE, kas būdinga didesnio kristališkumo polietilenui. PP-VD kreivėje aiškiai matoma takumo riba, po kurios sekė plastiškas tekėjimas. Gauti rezultatai rodo, kad konvencinės plėvelės pasižymi aukštu mechaniniu stabilumu ir yra tinkamos procesams, kuriems reikalingas didelis deformacinis pajėgumas. 18 pav. pateiktos perdirbtų plėvelių įtempio-deformacijos kreivės.



18 pav. Perdirbtų plėvelių įtempio-deformacijos kreivė

Perdirbtų plėvelių kreivės rodo itin didelį deformacinį pajėgumą ir ryškų plastišką tekėjimą. rLDPE-90 bandinys pasižymėjo ypač dideliu pailgėjimu (1060 %), o bandymas buvo nutrauktas nepasiekus lūžio ribos. Kreivėje matomas ilgas plastiško tekėjimo ruožas, būdingas mažo tankio polietilenui. rLDPE-IKI bandinio stipris buvo mažesnis (9,28 N), tačiau deformacija išliko didelė (555 %). Toks elgesys gali būti susijęs su perdirbtoje medžiagoje esančiomis priemaišomis ar mišriomis polimerų frakcijomis. Rezultatai patvirtina, kad perdirbtas LDPE išlaiko polietilenui būdingą elastingumą, tačiau dėl struktūrinio nevienalytiškumo gali deformuotis netolygiai. 19 pav. pateiktos bioskaidžių plėvelių įtempio–deformacijos kreivės.



19 pav. Bioskaidžių plėvelių įtempio-deformacijos kreivė

Bioskaidžių plėvelių kreivės rodo mažesnę pailgėjimą iki lūžio ir trapesnę mechaninį elgesį. BIO-RIMI, BIO-14 ir BIO-C1 bandiniai demonstravo vidutinį tempimo stiprį (8–11 N), tačiau jų deformacija buvo ribota. Kreivėse stebimas staigus lūžis be ilgos plastiško tekėjimo srities. BIO-C2 pasižymėjo mažiausiu mechaniniu atsparumu – didžiausia registruota jėga siekė tik 1,50 N, o pailgėjimas iki lūžio sudarė vos 3,8 %. TIPA plėvelės (60, 35 ir 45) demonstravo mišrų mechaninį elgesį – vidutinį stiprį, tačiau mažą pailgėjimą iki lūžio (4–42 %), būdingą kompostuojamų polimerų mišiniams. Šie rezultatai rodo, kad bioskaidžios plėvelės pasižymi mažesniu mechaniniu stabilumu, todėl jų taikymas yra ribotas procesuose, kuriems reikalingas didelis pailgėjimas arba atsparumas tempimui. 8 ir 9 lentelėse pateikiami tempimo bandymų rezultatų santrauka

8 lentelė. Tempimo bandymų rezultatų santrauka, 1 dalis

Bandinio kodas	Bandinių skaičius (n)	Didžiausia jėga, N	Įtempis lūžio momentu, MPa	Deformacija lūžio momentu, %
LDPE-75	3	22,28 ± 4,89	16,83 ± 5,01	154,4 ± 76,8
LDPE-120	3	35,44 ± 4,46	17,73 ± 2,42	440,8 ± 58,2
HDPE-20	3	12,51 ± 2,32	41,79 ± 7,74	609 ± 8,23
rLDPE-90	3	24,56 ± 1,46	24,04 ± 1,30	1060 ± 68,3
rLDPE-IKI	3	9,28 ± 0,84	12,18 ± 1,07	555 ± 13,56

### 9 lentelė. Tempimo bandymų rezultatų santrauka, 2 dalis

Bandinio kodas	Bandinių skaičius (n)	Didžiausia jėga, N	Įtempis lūžio momentu, MPa	Deformacija lūžio momentu, %
PP-VD	3	11,38 ± 1,78	38,98 ± 5,93	645 ± 223
BIO-RIMI	3	10,20 ± 1,43	22,85 ± 3,89	556 ± 142,9
BIO-14	3	3,90 ± 1,10	23,63 ± 5,18	172,5 ± 37,3
BIO-C1	3	10,10 ± 0,76	8,31 ± 1,61	38,22 ± 37,16
BIO-C2	3	1,50 ± 0,38	6,18 ± 5,16	3,80 ± 2,33
TIPA-60	3	11,55 ± 1,06	11,84 ± 1,26	4,40 ± 0,32
TIPA-35	3	7,90 ± 0,56	0,66 ± 0,90	5,21 ± 3,72
TIPA-45	3	19,20 ± 0,62	28,09 ± 1,19	42,6 ± 7,98

7 ir 8 lentelių duomenys rodo, kad konvencinės plėvelės pasižymi didžiausiu tempimo stipriu ir pailgėjimu iki lūžio, perdirbtos plėvelės – itin dideliu deformaciniu pajėgumu, o bioskaidžios medžiagos – mažiausiu mechaniniu atsparumu. Kai kurie bandiniai, ypač rLDPE plėvelės, demonstravo itin didelį pailgėjimą ir nepasiekė lūžio net esant maksimaliam įrangos poslinkio diapazonui. Tokiuose bandiniuose stebėtas ryškus plastiškas tekėjimas bei kakliuko formavimasis, būdingas mažo tankio polietilenui ir jo perdirbtoms versijoms. 20 pav. pateiktas rLDPE bandinys po tempimo bandymo.



20 pav. reLDPE bandinys po tempimo bandymo

20 paveiksle matyti stipriai ištemptas bandinys su ryškiu kakliuko formavimusi. Lūžis neįvyko dėl didelio segmentinio polimerų grandinių judumo ir gebėjimo deformuotis plastiškai. Tuo tarpu bioskaidžių plėvelių bandiniai dažniausiai nutrūko esant mažesniai pailgėjimui, o jų lūžio vietose stebėti trapiojo lūžio požymiai.

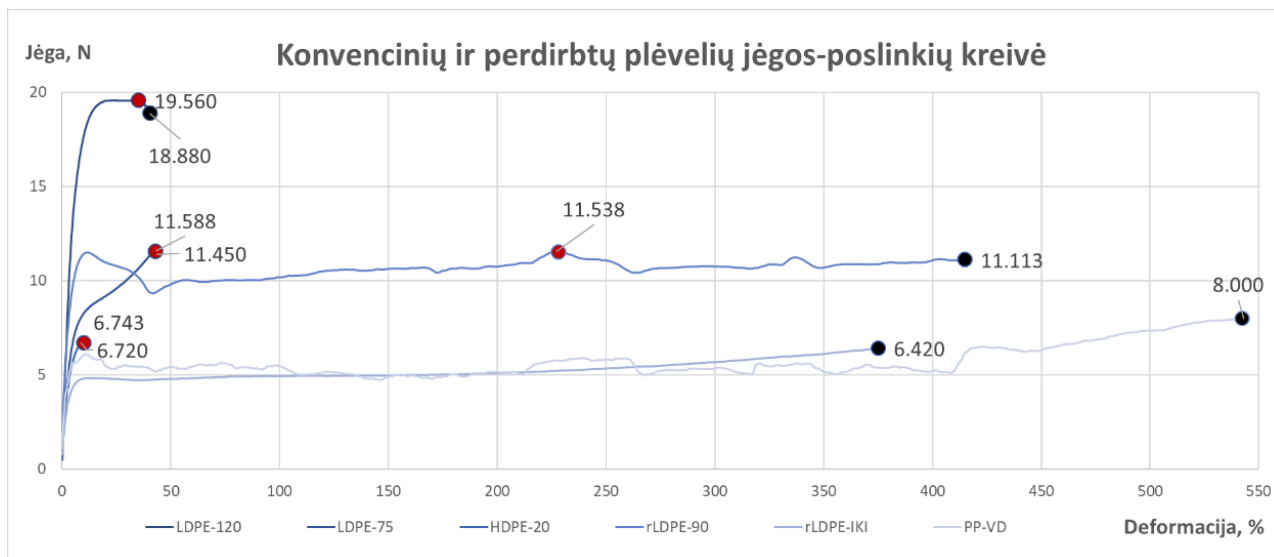
Visų bandinių įtempio-deformacijos kreivės pateiktos Priedo Nr. 1 bendrame grafike. Grafikas rodo aiškų medžiagų pasiskirstymą pagal mechaninį elgesį: konvencinės plėvelės demonstravo ilgą plastiško tekėjimo sritį ir didelį pailgėjimą iki lūžio, perdirbtos plėvelės pasižymėjo itin dideliu deformaciniu pajėgumu, o bioskaidžios medžiagos dažniausiai demonstravo trumpas kreives ir trapų lūžį.

### 3.2. Siūlių stiprumo rezultatai

Analizuojami siūlių stiprumo bandymų rezultatai, gauti atliekant atplėšimo bandymus pagal ASTM F88/F88M metodiką. Siūlės stiprumas yra vienas svarbiausių lanksčių pakuočių kokybės rodiklių, lemiantis pakuotės vientisumą ir atsparumą eksploatacinėms apkrovoms. Pateikiami vidutinio ir

maksimalaus siūlės stiprio rodikliai bei plyšimo pobūdžio analizė, leidžianti įvertinti siūlės formavimo kokybę ir sąveiką tarp plėvelės sluoksnių. Skirtingų medžiagų rezultatai lyginami siekiant nustatyti plėveles, sudarančias patikimiausias sandarinimo siūles.

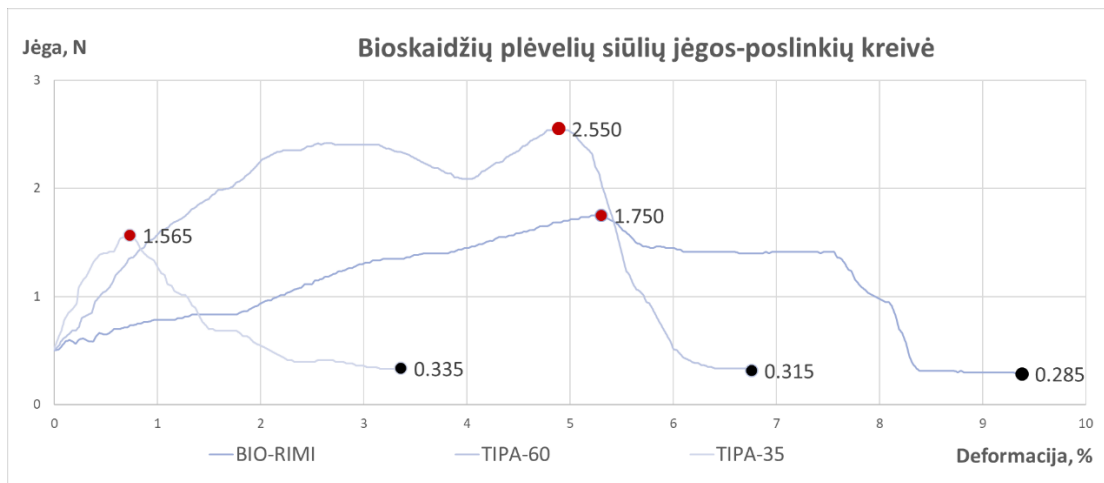
21 pav. pateiktos konvencinių ir perdirbtų plėvelių siūlių jėgos-poslinkio kreivės. Šios kreivės rodo skirtingą medžiagų mechaninį elgesį atplėšimo metu, tačiau dauguma konvencinių ir perdirbtų plėvelių išlaiko pakankamą siūlės stiprį, tinkamą sandarinimo procesams.



21 pav. Konvencinių ir perdirbtų plėvelių jėgos-poslinkių kreivė

Konvencinių plėvelių siūlės pasižymi vidutiniu stipriu ir ribotu pailgėjimu, o perdirbtos plėvelės - didesniu deformaciniu pajėgumu. LDPE-120 siūlė pasiekė didžiausią jėgą (19,56 N), rodydama gerą sluoksnių sukibimą ir stabilų sandarinimo režimą. LDPE-75 siūlės stipris siekė 11,59 N, o deformacija iki lūžio sudarė 43,08 %, būdinga plastiškai deformuojančioms LDPE siūlėms. HDPE-20 siūlė pasižymėjo mažesniu stipriu (6,74 N), tačiau išlaikė vidutinę deformaciją (26,51 %), kas atitinka didesnę HDPE kristališkumą ir mažesnę siūlės homogeniškumą.

PP-VD siūlė demonstravo 8 N stiprį ir itin didelį pailgėjimą (522,5 %), rodantį intensyvią plastinę deformaciją ir gerą sluoksnių sukibimą. Perdirbtų plėvelių siūlės taip pat pasižymėjo dideliu deformaciniu pajėgumu. rLDPE-90 siūlė pasiekė 11,54 N stiprį ir 259 % pailgėjimą, o rLDPE-IKI – 6,42 N stiprį ir 370 % deformaciją. Šie rezultatai rodo, kad perdirbtas LDPE išlaiko polietileniui būdingą plastiškumą, tačiau siūlės stipris gali mažėti dėl struktūrinio nevienalytiškumo ir priemaišų. 22 pav. pateiktos bioskaidžių plėvelių siūlių jėgos-poslinkio kreivės. Šios kreivės rodo ženkliai mažesnę siūlių stiprį ir ribotą deformaciją, lyginant su konvencinėmis ir perdirbtomis plėvelėmis.



**22 pav.** Bioskaidžių plėvelių siūlių jėgos-poslinkių kreivė

BIO-RIMI siūlė pasiekė 1,75 N stiprį, o deformacija sudarė 7,83 %. TIPA-60 siūlė pasižymėjo 2,55 N stipriu ir 7,66 % deformacija, o TIPA-35 buvo silpniausia (1,57 N) su labai mažu pailgėjimu (1,53 %). Šie rezultatai rodo ribotą bioskaidžių medžiagų terminiu būdu formuojamų siūlių stabilumą. Apibendrinant visų bandinių rezultatus, 10 lentelėje pateikiama siūlių stiprumo ir deformacijos rodiklių santrauka.

**10 lentelė.** Siūlės tempimo bandymų rezultatų santrauka

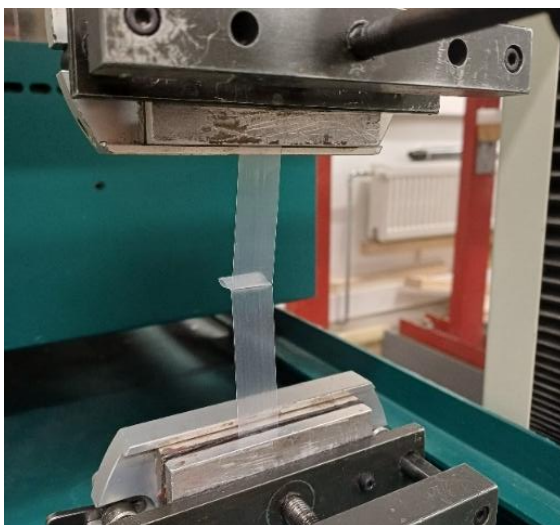
Bandinio kodas	Bandinių skaičius (n)	Didžiausia jėga, N	Įtempis lūžio momentu, MPa	Deformacija lūžio momentu, %
LDPE-75	3	11,59 ± 1,09	8,65 ± 3,59	43,08 ± 4,67
LDPE-120	3	19,56 ± 3,41	8,32 ± 4,50	24,33 ± 16,94
HDPE-20	3	6,74 ± 2,58	7,85 ± 12,54	26,51 ± 16,68
rLDPE-90	3	11,54 ± 1,63	7,72 ± 3,29	259,1 ± 182,9
rLDPE-IKI	3	6,42 ± 0,48	8,15 ± 0,57	370,4 ± 15,94
PP-VD	3	8,00 ± 0,35	23,34 ± 1,15	522,50 ± 30,41
BIO-RIMI	3	1,75 ± 0,03	0,74 ± 0,6	7,83 ± 2,25
TIPA-60	3	2,55 ± 0,86	0,44 ± 0,39	7,66 ± 2,11
TIPA-35	3	1,57 ± 0,19	2,05 ± 2,00	1,53 ± 1,60

9 lentelės duomenys rodo, kad:

- konvencinės plėvelės sudaro stipriausias siūles (11–20 N);
- perdirbtos plėvelės pasižymi dideliu pailgėjimu (259–370 %);
- bioskaidžios plėvelės sudaro silpnas siūles (1,5–2,5 N) ir labai mažą deformaciją (1–8 %).

Iš 13 tirtų plėvelių tik 9 sudarė tinkamas siūles. Keturių medžiagų siūlės nebuvo tinkamos bandymui dėl nesuforuotos arba nekokybiškos sandarinimo zonos. TIPA-45 visiškai nesilydė, BIO-14 ir BIO-C1 sudarė nehomogeniškas ir mechaniškai silpnas siūles, o BIO-C2 lydėsi netolygiai, todėl stabilus sandarinimo procesas nebuvo užtikrintas. Tai rodo, kad kai kurių bioskaidžių plėvelių terminio sandarinimo langas yra siauras arba nesuderinamas su taikytu režimu.

23 pav. pateiktas bandinio įtvirtinimas tempimo mašinoje. Siūlė įtvirtinta taip, kad apkrova būtų perduodama per siūlės centrą, užtikrinant tolygų jėgos pasiskirstymą ir korektišką atplėšimo procesą.



**23 pav.** Siūlės bandinio įtvirtinimas tempimo mašinos griebtuvuose

24 pav. pateiktas plyšimo pobūdis. Kai kuriuose bandiniuose plyšimas vyko per siūlę, kas rodo ribotą sandarinimo kokybę arba medžiagos nesuderinamumą su sandarinimo režimu. Kitais atvejais plėvelė plyšo šalia siūlės, rodydama, kad siūlės stipris viršijo pačios plėvelės mechaninį atsparumą.



**24 pav.** Bandinio trūkimas per siūlę

25 paveiksle pateikta siūlės deformacija po bandymo, kur matomas lokalus plėvelės ištempimas ir struktūriniai pakitimai siūlės zonoje.



**25 pav.** Siūlės deformacija po bandymo

Visų bandinių siūlių jėgos–poslinkio kreivės pateiktos Priedo Nr. 2 bendrame grafike. Grafikas rodo aiškų medžiagų pasiskirstymą į dvi grupes: konvencinės ir perdirbtos plėvelės pasižymi stipriomis ir plastiškomis siūlėmis, o bioskaidžios plėvelės – silpnomis, trapiomis arba nevisiškai susiformavusiomis siūlėmis.

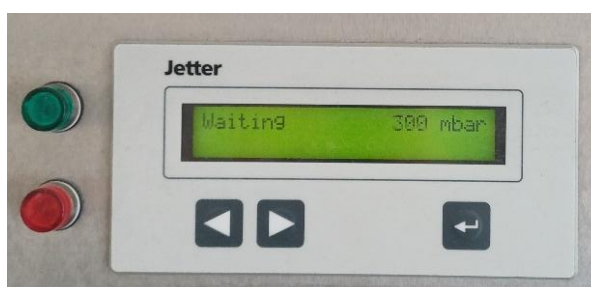
### 3.3. Pakuotės sandarumo rezultatai

Pateikiami pakuočių sandarumo tyrimų rezultatai, gauti taikant vakuumo slėgio mažėjimo metodą pagal ASTM F2338 standartą. Sandarumas yra vienas svarbiausių pakuotės eksploatacinių rodiklių, ypač šaldytų maisto produktų pakuotėse, kur net nedideli nuotėkiai gali turėti įtakos produkto kokybei ir laikymo stabilumui. 26 paveiksle pateiktas bandinys, įdėtas į „Oxipack“ vakuuminę kamerą prieš sandarumo bandymą. Ant pakuotės uždedama lanksti membrana, sandariai prispaudžianti bandinį prie kameros paviršiaus ir sudaranti uždara bandymo tūrį. Tokia sistema leidžia atlikti nedestrukcinį pakuotės sandarumo vertinimą vakuumo slėgio mažėjimo metodu.



26 pav. Bandinys „Oxipack“ vakuuminėje kameroje prieš sandarumo testą

Sandarumo bandymų metu „Oxipack“ įranga pirmiausia sumažindavo slėgį nuo 991 mbar iki 286 mbar, o vėliau registruodavo slėgio pokyčius bandinio viduje. Pagal slėgio kitimo greitį ir dydį sistema automatiškai priskirdavo rezultatą: „Pack OK“, „Pack Leak“ arba „Big Leak“. 27 paveiksle pateiktas vakuumo stabilizavimo etapas, kuriame registruojamas slėgio padidėjimas iki maždaug 300 mbar.



27 pav. Vakuumo stabilizavimo etapas

Iš viso tyrimui buvo numatyta tirti 13 skirtingų plėvelių medžiagų, tačiau tinkamas sandarinimo siūlės pavyko suformuoti ne visoms. Kiekvienai medžiagai planuota paruošti po tris maišelių bandinius, tačiau stabilios siūlės suformuotos tik 8 medžiagoms. Daliai plėvelių sandarinimo metu buvo būdingas per greitas lydymasis arba terminė degradacija, dėl kurių nesusiformavo vientisa siūlė. Kitoms medžiagoms nustatytas lydalio nestabilumas ir dujų susidarymas, lėmė mechanškai silpnų ir

sandarumo bandymams netinkamų siūlių formavimąsi. Kai kurių medžiagų kiekis taip pat buvo nepakankamas, nes didžioji dalis bandinių sunaudota tempimo bandymams. Dėl šių priežasčių galutiniam sandarumo vertinimui naudoti tik tie maišelių bandiniai, kurių siūlės buvo suformuotos stabiliai ir buvo tinkamos tolimesniems tyrimams. Galutiniai slėgio rodmenys ir įrangos pateikti sandarumo įvertinimai pateikiami 11 lentelėje.

**11 lentelė.** Pakuotės sandarumo testo rezultatai

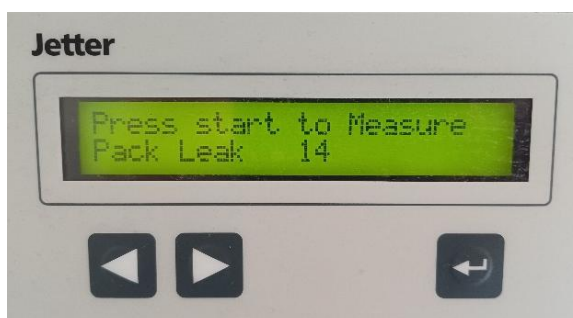
Bandinio kodas	Bandinio Nr.	Įrangos įvertinimas	Galutinis slėgis, mbar
LDPE-120	1	Pack OK	308
	2	Big Leak	335
	3	Pack OK	309
LDPE-75	1	Pack OK	307
	2	Pack OK	305
	3	Pack OK	306
HDPE-20	1	Pack OK	312
	2	Pack OK	312
	3	Pack OK	312
rLDPE-75	1	Pack OK	307
	2	Big Leak	415
	3	Big Leak	506
PP-VD	1	Big Leak	324
	2	Pack Leak 14	320
	3	Pack Leak 15	324
LDPE-IKI	1	Pack OK	309
	2	Pack OK	304
	3	Pack OK	306
BIO-RIMI	1	Big Leak	582
	2	Pack OK	309
	3	Pack OK	307
BIO-14	1	Pack OK	325
	2	Pack OK	306
	3	Pack OK	315

Analizuojant rezultatus nustatyti ryškūs skirtumai tarp skirtingų medžiagų. Konvencinės plėvelės, tokios kaip LDPE, HDPE ir dalis PP bandinių, daugeliu atvejų buvo įvertintos kaip „Pack OK“, o tai rodo gerą siūlės vientisumą ir pakankamą atsparumą vakuomo apkrovai. Ypač stabiliais rezultatais pasižymėjo HDPE bandiniai, kurių visų matavimų slėgio reikšmės buvo identiškios. Tuo tarpu perdirbtų ir bioskaidžių plėvelių rezultatai pasižymėjo didesne variacija, nustatyti tiek mažo intensyvumo nuotėkiai, tiek ryškūs nesandarumai.

Dalis rLDPE ir bioskaidžių bandinių buvo įvertinti kaip „Big Leak“, rodantys struktūrinius pažeidimus arba nepakankamą siūlės stiprumą. PP-VD bandiniuose taip pat nustatyti nestabilūs sandarumo rezultatai, kurie gali būti siejami su siauresniu sandarinimo temperatūrų langu ir mažesniu

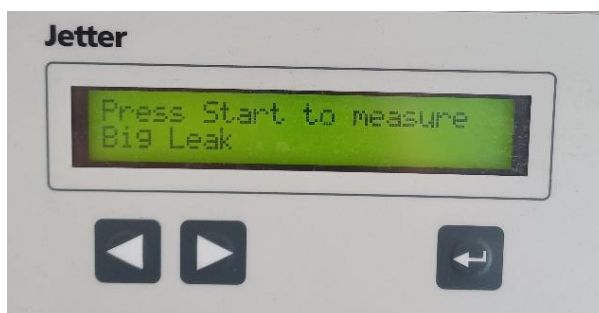
lydalo stabilumu. Gauti rezultatai rodo, kad bioskaidžios plėvelės, nepaisant jų aplinkosauginių privalumų, vis dar pasižymi mažesniu sandarumo stabilumu, ypač formuojant siūles terminiu būdu.

Svarbu pažymėti, kad net ir sandariuose bandiniuose galutinės slėgio reikšmės nebuvo identiškos. Šiuos skirtumus lėmė plėvelės elastingumas, storis, vidinis pakuotės tūris, membranos prispaudimo mikrovariacijos ir sensoriaus matavimo tolerancija. Dėl šių priežasčių net „Pack OK“ bandiniuose nustatyti kelių mbar skirtumai laikomi normaliu reiškiniu, nesusijusiu su pakuotės nesandarumu. Tokios variacijos būdingos vakuuminio tipo sandarumo bandymams ir neturi reikšmingos įtakos rezultatų patikimumui.



28 pav. Mažo intensyvumo nuotėkis

29 paveiksle pateiktas „Big Leak“ pranešimas, rodantis ryškų pakuotės nesandarumą. Tokiu atveju pakuotė nesugeba išlaikyti vakuumo, todėl slėgis pakyla labai greitai, o sistema rezultatą automatiškai klasifikuoja kaip didelį nuotėkį. Tai rodo esminį pakuotės defektą, pvz., plėvelės plyšimą (30 pav.), lokalų pažeidimą ar nepakankamai suformuotą siūlę (28 pav.).



29 pav. Didelis pakuotės nesandarumas



30 pav. Pažeista pakuotė

### 3.4. Gyvavimo ciklo analizė

Kadangi eksperimentinėje tyrimo dalyje buvo analizuojamos trys skirtingos polimerinių plėvelių grupė, konvenciniai plastikai (LDPE), perdirbti plastikai (rLDPE) ir bioplastikai (PLA), gyvavimo

ciklo vertinimo (LCA) modeliavimui pasirinktos būtent šios trys medžiagos. 12 lentelėje pateikiami visų analizuotų pakuočių medžiagų galutinio gyvavimo ciklo scenarijų parametrai, sumodeliuoti „OpenLCA“ programine įranga.

**12 lentelė.** LDPE, rLDPE ir PLA pakuočių galutinio gyvavimo ciklo srautų suvestinė

Įeinantis srautas	Išeinantis srautas	Priimantis procesas	Kiekis	Vienetas
Atliekų LDPE šaldymo maišelis	Polietileno atliekos	Polietileno atliekų tvarkymas, sąvartynas \ Cutoff, U – RoW	1	kg
	Polietileno atliekos	Polietileno atliekų tvarkymas, sąvartynas \ Cutoff, U – RoW	0,15	kg
	Mažo tankio polietileno granulės	Mažo tankio polietileno pakuočių atliekų perdirbimas \ Cutoff, U – RER	0,85	kg
	Polietileno atliekos	Polietileno atliekų tvarkymas, komunalinis deginimas \ Cutoff, U – GLO	1	kg
Atliekų perdirbtos LDPE šaldymo maišelis	Polietileno atliekos	Polietileno atliekų rinkta \ Cutoff, U – LT	1	kg
	Perdirbtos polietileno/polipropileno granulės	Polietileno/polipropileno atliekų perdirbimas \ Cutoff, U – RER	0,85	kg
	Polietileno/polipropileno atliekų produktas	Polietileno/polipropileno atliekų produkto surinkimas galutiniam šalinimui \ Cutoff, U – Europa be Šveicarijos	0,15	kg
	Polietileno atliekos	Polietileno atliekų tvarkymas, komunalinis deginimas \ Cutoff, U – GLO	1	kg
Atliekų PLA šaldymo maišelis	Polilaktido (PLA) granulės	Polilaktido (PLA) granuliu gamyba \ Cutoff, U – GLO	0,8	kg
	Biologinės atliekos	Biologinių atliekų tvarkymas, atviras sąvartynas \ Cutoff, U – RoW	0,2	kg
	Biologinės atliekos	Biologinių atliekų tvarkymas, komunalinis deginimas \ Cutoff, U – GLO	1	kg

Lentelėje pateikiami pakuočių gyvavimo pabaigos scenarijų parametrai, susiejantys 1 kg pradinį atliekų kiekį (įeinantį srautą, atitinkantį funkcinį vienetą) su išeinančiomis frakcijomis ir jas apdorojančiaisecoinvent duomenų bazės procesais. Išeinantys srautai – antrinės perdirbtos granulės, biologiškai skaidžios medžiagos bei likutinės neperdirbamos atliekos – algoritmiškai susieti su specifinėmis technologijomis (mechaniniu perdirbimu, pramoniniu kompostavimu, deginimu ar šalinimu sąvartyne) ir parinkti pagal realistišką geografinį reprezentatyvumą (RER – Europos regiono vidurkis, RoW – likęs pasaulis, GLO – pasaulinis vidurkis). Atliekų pasiskirstymo masės dalys nustatytos vadovaujantis tipinėmis technologinėmis išėigomis: LDPE ir rLDPE perdirbimo scenarijuose naudingajai frakcijai priskiriama 0,85 kg, o likutinei masei – 0,15 kg; PLA kompostavimo atveju 0,80 kg modeliuojama kaip suskaidoma medžiaga, o 0,2 kg, kaip likutinė biologinių atliekų dalis. Tuo tarpu nediferencijuotuose deginimo ar sąvartyno scenarijuose, kur medžiagų ar energijos atgavimas šiame lygmenyje nėra modeliuojamas, visas 1 kg srautas patenka į vieną galutinį procesą, taip užtikrinant tyrimo skaidrumą prieš atliekant galutinius poveikio kategorijų skaičiavimus.

### 3.5. LCA rezultatų interpretacija

Eksperimentinėje tyrimo dalyje tirtų pakuočių medžiagų aplinkosauginiam poveikiui įvertinti atlikta gyvavimo ciklo analizė (LCA), naudojant „OpenLCA“ programinę įrangą ir „ReCiPe Midpoint (H)“ poveikio vertinimo metodą. Analizuotos trys plėvelių grupės: LDPE, rLDPE ir PLA. Toks pasirinkimas užtikrino metodinį nuoseklumą tarp eksperimentinių tyrimų ir LCA analizės bei sudarė galimybę palyginti skirtingos kilmės medžiagų poveikį aplinkai įvairiais gyvavimo ciklo pabaigos scenarijais. Rezultatai leido įvertinti jų potencialą prisidėti prie tvaresnių pakuočių sprendimų kūrimo.

#### 3.5.1. LDPE scenarijų rezultatai

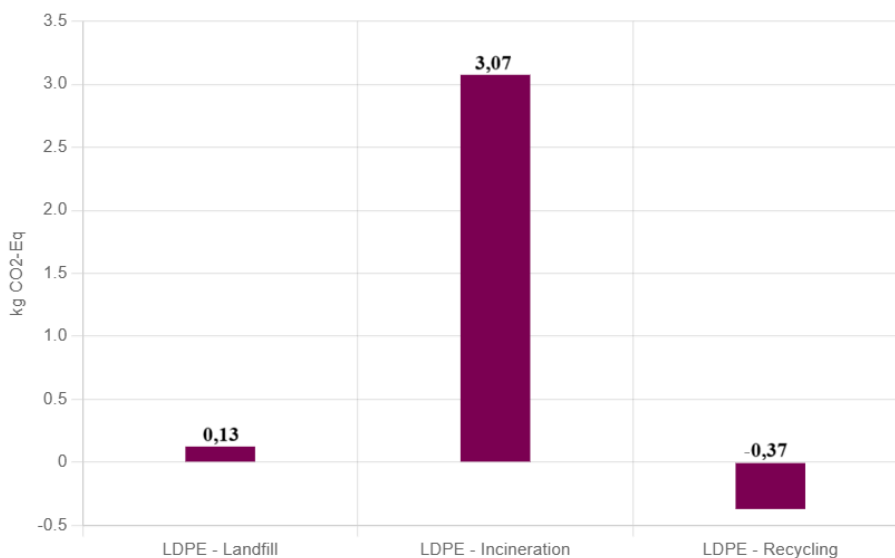
13 lentelėje pateikiami LDPE pakuočių trijų gyvavimo ciklo pabaigos scenarijų – deginimo, sąvartyno ir perdirbimo – poveikio kategorijų rezultatai. Lentelės duomenys leidžia įvertinti, kaip skirtingos atliekų tvarkymo technologijos keičia tradicinio LDPE poveikį aplinkai. Kadangi LDPE yra iškastinės kilmės polimeras, jo aplinkosauginis profilis ypač priklauso nuo to, ar medžiaga po panaudojimo yra sudeginama, ar pavyksta sėkmingai atgauti antrines žaliavas mechaninio perdirbimo metu.

13 lentelė. LDPE scenarijų rezultatai

Poveikio kategorijos	Vienetai	LDPE - Deginimas	LDPE - Sąvartynas	LDPE - Perdirbimas
Rūgštėjimas: sausumos ekosistemose	kg SO <sub>2</sub> -Eq	0,00016	6,41E-07	-0,00121
Klimato kaita	kg CO <sub>2</sub> -Eq	3,07498	0,12546	-0,37034
Ekotoksiškumas: gėluosiuose vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	0,00043	0,16438	-0,03116
Ekotoksiškumas: jūrų vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	0,00749	0,23108	-0,03649
Ekotoksiškumas: sausumos ekosistemose	kg 1,4-DCB-Eq	9,05737	0,00032	-0,53105
Energijos ištekliai: neatsinaujinantys, iškastiniai	kg oil-Eq	0	0	-0,09057
Eutrofikacija: gėluosiuose vandenyse	kg P-Eq	0	0	-0,00026
Eutrofikacija: jūrų vandenyse	kg N-Eq	2,03E-07	0,0002	-6,82E-05
Poveikis žmogaus sveikatai: kancerogeninis (vėžį sukeliantis)	kg 1,4-DCB-Eq	1,70E-05	0,00045	-0,06312
Poveikis žmogaus sveikatai: nekancerogeninis	kg 1,4-DCB-Eq	0,03908	3,30187	-0,64386
Jonizuojanti spinduliuotė	kBq Co-60-Eq	0	0	-0,15206
Žemės naudojimas	m <sup>2</sup> *a crop-Eq	0	0,00274	-0,01037
Medžiagų ištekliai: metalai ir mineralai	kg Cu-Eq	0	0	-0,00693
Ozono sluoksnio nykimas	kg CFC-11-Eq	1,14E-07	0	-2,45E-07
Kietųjų dalelių susidarymas	kg PM <sub>2,5</sub> -Eq	4,97E-05	9,19E-07	-0,0005
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis žmogaus sveikatai	kg NO <sub>x</sub> -Eq	0,00043	1,43E-08	-0,00082
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis sausumos ekosistemoms	kg NO <sub>x</sub> -Eq	0,00043	1,71E-08	-0,00085
Vandens naudojimas	m <sup>3</sup>	0,00153	0,00022	-0,00414

Gauti rezultatai parodo, kad LDPE perdirbimas pasižymi mažiausiu neigiamu poveikiu aplinkai, o deginimas – didžiausiu. Kaip matyti 31 paveiksle, klimato kaitos kategorijoje didžiausias poveikis

nustatytas deginimo scenarijuje, kur emisijos siekia 3,07498 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Šalinimas sąvartyne sukelia mažesnę tiesioginį šiltnamio efektą, sudarantį 0,12546 kg CO<sub>2</sub>-Eq. Priešingai nei terminis apdorojimas, mechaninio perdirbimo scenarijus šioje kategorijoje rodo neigiamą poveikio rodiklį (–0,37034 kg CO<sub>2</sub>-Eq). Tai rodo aplinkosauginę naudą, gaunamą dėl pirminių žaliavų gamybos procesų išvengimo. Šalinimas sąvartyne pasižymi vidutinėmis reikšmėmis, tačiau tam tikrose kategorijose, pavyzdžiui, nekancerogeninio poveikio žmogaus sveikatai segmente, jo pėdsakas viršija deginimo scenarijaus vertes, o tai įrodo, kad ilgalaikis LDPE kaupimasis ir degradacija sąvartynuose gali kelti papildomų toksikologinių rizikų ekosistemoms.



31 pav. LDPE pakuočių scenarijų įtaka klimato kaitos kategorijai

### 3.5.2. reLDPE scenarijų rezultatai

14 ir 15 lentelėse pateikiami perdirbto LDPE (rLDPE) scenarijų rezultatai, leidžiantys įvertinti, kaip antrinės žaliavos elgiasi skirtinguose gyvavimo ciklo pabaigos procesuose. Kadangi rLDPE jau pradiniam gamybos etape yra antrinis produktas, jo bendrasis poveikio profilis iš esmės skiriasi nuo pirminio LDPE, o pakartotinis perdirbimo scenarijus gali suteikti dar žymesnę aplinkosauginę naudą.

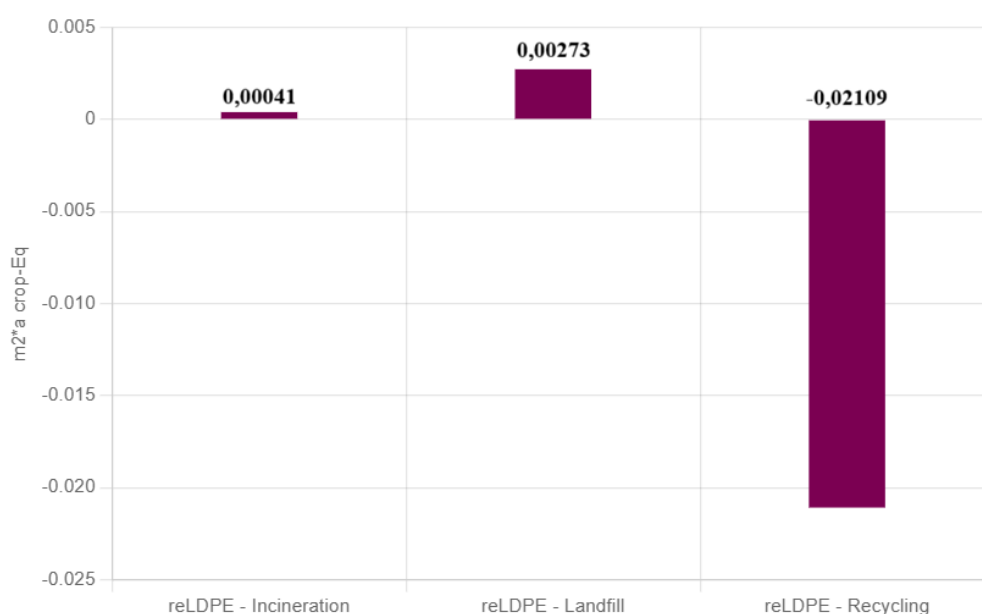
14 lentelė. reLDPE scenarijų rezultatai, 1 dalis

Poveikio kategorijos	Vienetai	reLDPE - Deginimas	reLDPE - Sąvartynas	reLDPE - Perdirbimas
Rūgštėjimas: sausumos ekosistemose	kg SO <sub>2</sub> -Eq	0,0002	0,00015	–0,00223
Klimato kaita	kg CO <sub>2</sub> -Eq	3,0998	1,21852	–0,95351
Ekotoksiškumas: gėluosiuose vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	0,2235	0,18673	–0,28418
Ekotoksiškumas: jūrų vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	0,32168	0,26575	–0,36357
Ekotoksiškumas: sausumos ekosistemose	kg 1,4-DCB-Eq	9,09857	4,38847	–1,47271
Energijos ištekliai: neatsinaujinantys, iškastiniai	kg oil-Eq	0,00678	0,01075	–0,15311
Eutrofikacija: gėluosiuose vandenyse	kg P-Eq	4,29E-06	3,22E-06	–0,00049

15 lentelė. reLDPE scenarijų rezultatai, 2 dalis

Poveikio kategorijos	Vienetai	reLDPE - Deginimas	reLDPE - Sąvartynas	reLDPE - Perdirbimas
Eutrofikacija: jūrų vandenyse	kg N-Eq	2,87E-06	0,00013	-0,00025
Poveikis žmogaus sveikatai: kancerogeninis (vėžį sukeliantis)	kg 1,4-DCB-Eq	0,02767	0,01438	-0,15011
Poveikis žmogaus sveikatai: nekancerogeninis	kg 1,4-DCB-Eq	1,78523	2,7796	-6,00967
Jonizuojanti spinduliuotė	kBq Co-60-Eq	0,00028	0,00045	-0,27189
Žemės naudojimas	m <sup>2</sup> *a crop-Eq	0,00041	0,00273	-0,02109
Medžiagų išteklių: metalai ir mineralai	kg Cu-Eq	0,00164	0,00123	-0,02037
Ozono sluoksnio nykimas	kg CFC-11-Eq	1,18E-07	7,17E-08	-1,30E-06
Kietųjų dalelių susidarymas	kg PM2,5-Eq	6,78E-05	7,99E-05	-0,00088
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis žmogaus sveikatai	kg NOx-Eq	0,00047	0,00032	-0,00159
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis sausumos ekosistemoms	kg NOx-Eq	0,00048	0,00033	-0,00163
Vandens naudojimas	m <sup>3</sup>	0,00168	0,00074	-0,00856

Remiantis modeliavimo rezultatais, rLDPE pakartotinis perdirbimas suteikia didžiausią aplinkosauginę naudą visose vertintose kategorijose. Klimato kaitos kategorijoje šis procesas sumažina generuojamą poveikį iki -0,95 kg CO<sub>2</sub> eq., o deginimo alternatyva sukelia apie 3,10 kg CO<sub>2</sub> eq. emisijų. 35 paveiksle matoma, kad šalinimas sąvartyne pasižymi ypač dideliu neigiamu poveikiu klimato kaitai, siekiančiu 1,22 kg CO<sub>2</sub> eq. Šie dėsningumai rodo, kad rLDPE atliekų nukreipimas į sąvartynus yra technologiškai neefektyvus bei aplinkai žalingas sprendimas, o nuoseklus perdirbimas yra būtina sąlyga siekiant dekarbonizuoti plastiko pakuočių gyvavimo ciklą.



32 pav. reLDPE pakuočių scenarijų įtaka žemės naudojimo kategorijai

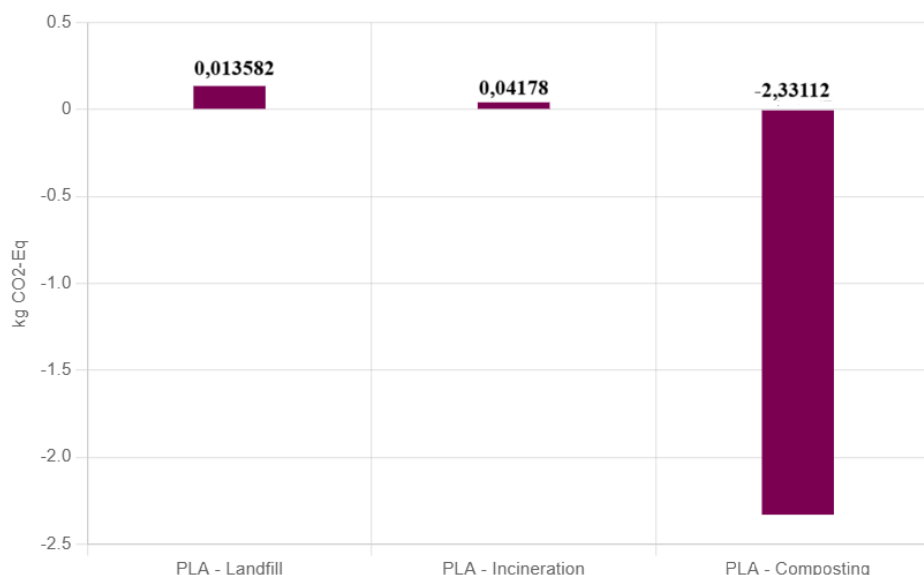
### 3.5.3. PLA scenarijų rezultatai

16 lentelėje pateikiami PLA kompostavimo, deginimo ir sąvartyno scenarijų rezultatai. PLA, kaip augalinės kilmės bioplastikas, pasižymi iš esmės kitokia degradacijos eiga nei iškastiniai polimerai, todėl jo poveikio profilis yra išskirtinis ir tiesiogiai priklauso nuo biologinio skaidymo sąlygų.

16 lentelė. PLA scenarijų rezultatai

Poveikio kategorijos	Vienetai	PLA - Kompostavimas	PLA - Deginimas	PLA - Sąvartynas
Rūgštėjimas: sausumos ekosistemose	kg SO <sub>2</sub> -Eq	-0,01017	0,00014	0,00015
Klimato kaita	kg CO <sub>2</sub> -Eq	-2,33112	0,04178	0,13582
Ekotoksiškumas: gėluosiuose vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	-0,13331	0,00747	0,00099
Ekotoksiškumas: jūrų vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	-0,16458	0,01002	0,00136
Ekotoksiškumas: sausumos ekosistemose	kg 1,4-DCB-Eq	-4,06492	0,09913	0,05709
Energijos ištekliai: neatsinaujinantys, iškastiniai	kg oil-Eq	-0,62707	0,00607	0,0095
Eutrofikacija: gėluosiuose vandenyse	kg P-Eq	-0,00099	4,99E-05	1,19E-05
Eutrofikacija: jūrų vandenyse	kg N-Eq	-0,00125	1,21E-05	2,60E-06
Poveikis žmogaus sveikatai: kancerogeninis (vėžį sukeliantis)	kg 1,4-DCB-Eq	-0,34335	0,03073	0,01186
Poveikis žmogaus sveikatai: nekancerogeninis	kg 1,4-DCB-Eq	-2,64379	0,32919	0,03123
Jonizuojanti spinduliuotė	kBq Co-60-Eq	-0,13815	0,00036	0,00038
Žemės naudojimas	m <sup>2</sup> *a crop-Eq	-1,62443	0,00082	0,00097
Medžiagų ištekliai: metalai ir mineralai	kg Cu-Eq	-0,03431	0,00179	0,00093
Ozono sluoksnio nykimas	kg CFC-11-Eq	-8,50E-06	5,77E-07	3,74E-07
Kietųjų dalelių susidarymas	kg PM <sub>2,5</sub> -Eq	-0,00407	5,45E-05	5,90E-05
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis žmogaus sveikatai	kg NO <sub>x</sub> -Eq	-0,00591	0,00026	7,06E-05
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis sausumos ekosistemoms	kg NO <sub>x</sub> -Eq	-0,00636	0,00026	7,44E-05
Vandens naudojimas	m <sup>3</sup>	-0,10186	0,00151	6,56E-05

Pramoninis PLA kompostavimas išsiskiria kaip mažiausio neigiamo poveikio scenarijus, o klimato kaitos kategorijoje šis procesas suteikia didžiausią aplinkosauginę naudą (-2,33 kg CO<sub>2</sub> eq.), kas vaizduojama 33 paveiksle. Tokį rezultatą lemia tai, kad kompostavimo metu išsiskiriančios biogeninės emisijos, pagal LCA metodologiją, nėra priskiriamos iškastiniam CO<sub>2</sub> eq. Tuo tarpu deginimas ir šalinimas sąvartyne sukelia nedidelius, bet teigiamus šiltnamio efekto dujų kiekius. PLA kompostavimas taip pat pasižymi minimaliomis vertėmis ekotoksiškumo bei žemės naudojimo kategorijose, o tai patvirtina, kad ši medžiaga gali funkcionuoti kaip tvaresnė alternatyva tradiciniam plastikui, jei yra užtikrinama reikalinga pramoninio biologinio skaidymo infrastruktūra.



33 pav. PLA pakuočių scenarijų įtaka klimato kaitos kategorijai

### 3.5.4. Sąvartyno scenarijaus palyginimas tarp medžiagų

17 ir 18 lentelėse pateikiamas LDPE, rLDPE ir PLA šalinimo sąvartyne scenarijų palyginimas, leidžiantis identifikuoti, kuri medžiaga šio proceso metu sukelia didžiausią aplinkosauginį poveikį. Šis palyginimas yra svarbus praktiniu požiūriu, kadangi sąvartynai vis dar sudaro reikšmingą pakuočių atliekų tvarkymo struktūros dalį.

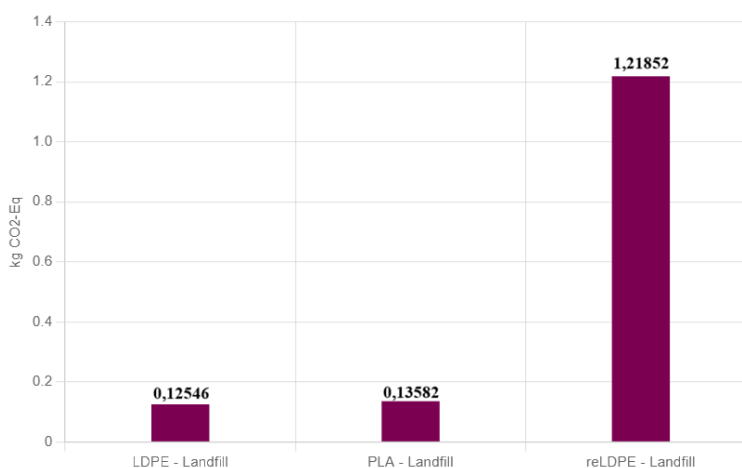
17 lentelė. Sąvartyno scenarijaus palyginimas tarp medžiagų, 1 dalis

Poveikio kategorijos	Vienetai	LDPE - Sąvartynas	PLA - Sąvartynas	reLDPE - Sąvartynas
Rūgštėjimas: sausumos ekosistemose	kg SO <sub>2</sub> -Eq	6,41E-07	0,00015	0,00015
Klimato kaita	kg CO <sub>2</sub> -Eq	0,12546	0,13582	1,21852
Ekotoksiškumas: gėluosiuose vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	0,16438	0,00099	0,18673
Ekotoksiškumas: jūrų vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	0,23108	0,00136	0,26575
Ekotoksiškumas: sausumos ekosistemose	kg 1,4-DCB-Eq	0,00032	0,05709	4,38847
Energijos ištekliai: neatsinaujinantys, išskastiniai	kg oil-Eq	0	0,0095	0,01075
Eutrofikacija: gėluosiuose vandenyse	kg P-Eq	0	1,19E-05	3,22E-06
Eutrofikacija: jūrų vandenyse	kg N-Eq	0,0002	2,60E-06	0,00013
Poveikis žmogaus sveikatai: kancerogeninis (vėžį sukeliantis)	kg 1,4-DCB-Eq	0,00045	0,01186	0,01438
Poveikis žmogaus sveikatai: nekancerogeninis	kg 1,4-DCB-Eq	3,30187	0,03123	2,7796
Jonizuojanti spinduliuotė	kBq Co-60-Eq	0	0,00038	0,00045
Žemės naudojimas	m <sup>2</sup> *a crop-Eq	0,00274	0,00097	0,00273

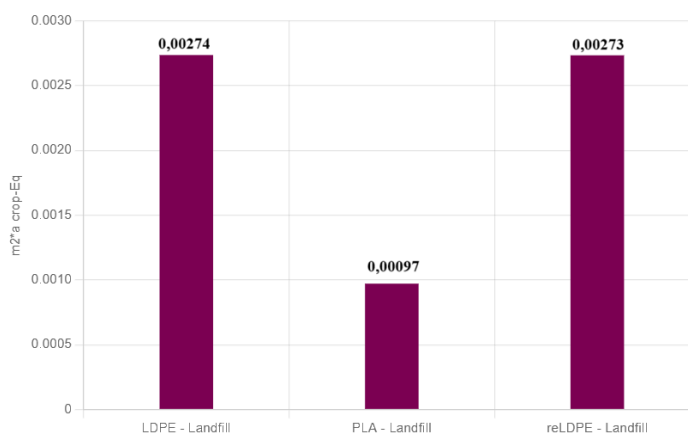
**18 lentelė.** Sąvartyno scenarijaus palyginimas tarp medžiagų, 2 dalis

Poveikio kategorijos	Vienetai	LDPE - Sąvartynas	PLA - Sąvartynas	reLDPE - Sąvartynas
Medžiagų ištekliai: metalai ir mineralai	kg Cu-Eq	0	0,00093	0,00123
Ozono sluoksnio nykimas	kg CFC-11-Eq	0	3,74E-07	7,17E-08
Kietųjų dalelių susidarymas	kg PM2.5-Eq	9,19E-07	5,90E-05	7,99E-05
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis žmogaus sveikatai	kg NOx-Eq	1,43E-08	7,06E-05	0,00032
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis sausumos ekosistemoms	kg NOx-Eq	1,71E-08	7,44E-05	0,00033
Vandens naudojimas	m <sup>3</sup>	0,00022	6,56E-05	0,00074

35 paveiksle galima matyti, kad rLDPE šalinimas sąvartyne sukelia didžiausią neigiamą poveikį klimato kaitai (1,22 kg CO<sub>2</sub> eq.), o LDPE bei PLA pėdsakai yra tarpusavyje panašūs ir žymiai mažesni. Tai parodo, kad jau perdirbtų plastikų išmetimas į sąvartynus yra ypač neefektyvus, nes galutinai prarandama galimybė išlaikyti žaliavas uždarame cikle. Žemės naudojimo kategorijoje LDPE ir rLDPE pasižymi analogiškais reikšmėmis, o PLA demonstruoja mažesnę poveikį, kas atitinka jo trumpojo ciklo biogeninę kilmę.



**34 pav.** Sąvartyno scenarijų įtaka klimato kaitos kategorijai



**35 pav.** Sąvartyno scenarijų įtaka žemės naudojimo kategorijai

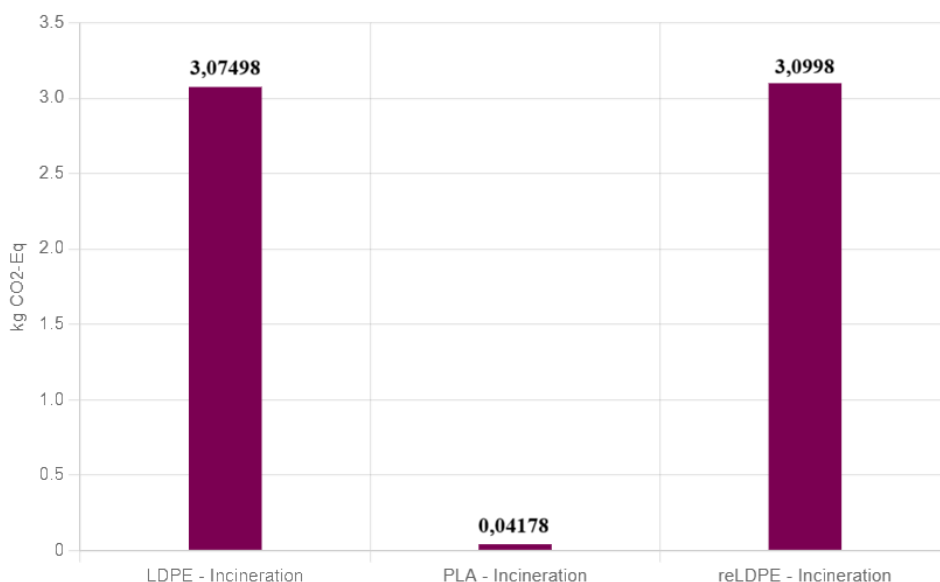
### 3.5.5. Deginimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų

19 lentelėje pateikiamas LDPE, rLDPE ir PLA deginimo scenarijų tarpusavio palyginimas. Kadangi energetinis atliekų realizavimas yra dažnai taikoma technologija, svarbu įvertinti, kaip skirtingos polimerų struktūros elgiasi terminio apdorojimo metu.

19 lentelė. Deginimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų

Poveikio kategorijos	Vienetai	LDPE - Deginimas	PLA - Deginimas	reLDPE - Deginimas
Rūgštėjimas: sausumos ekosistemose	kg SO <sub>2</sub> -Eq	0,00016	0,00014	0,0002
Klimato kaita	kg CO <sub>2</sub> -Eq	3,07498	0,04178	3,0998
Ekotoksiškumas: gėluosiuose vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	0,00043	0,00747	0,2235
Ekotoksiškumas: jūrų vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	0,00749	0,01002	0,32168
Ekotoksiškumas: sausumos ekosistemose	kg 1,4-DCB-Eq	9,05737	0,09913	9,09857
Energijos išteklių: neatsinaujinantys, iškastiniai	kg oil-Eq	0	0,00607	0,00678
Eutrofikacija: gėluosiuose vandenyse	kg P-Eq	0	4,99E-05	4,29E-06
Eutrofikacija: jūrų vandenyse	kg N-Eq	2,03E-07	1,21E-05	2,87E-06
Poveikis žmogaus sveikatai: kancerogeninis (vėžį sukeliantis)	kg 1,4-DCB-Eq	1,70E-05	0,03073	0,02767
Poveikis žmogaus sveikatai: nekancerogeninis	kg 1,4-DCB-Eq	0,03908	0,32919	1,78523
Jonizuojanti spinduliuotė	kBq Co-60-Eq	0	0,00036	0,00028
Žemės naudojimas	m <sup>2</sup> *a crop-Eq	0	0,00082	0,00041
Medžiagų išteklių: metalai ir mineralai	kg Cu-Eq	0	0,00179	0,00164
Ozono sluoksnio nykimas	kg CFC-11-Eq	1,14E-07	5,77E-07	1,18E-07
Kietųjų dalelių susidarymas	kg PM2.5-Eq	4,97E-05	5,45E-05	6,78E-05
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis žmogaus sveikatai	kg NOx-Eq	0,00043	0,00026	0,00047
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis sausumos ekosistemoms	kg NOx-Eq	0,00043	0,00026	0,00048
Vandens naudojimas	m <sup>3</sup>	0,00153	0,00151	0,00168

19 lentelėje galima matyti, kad LDPE ir rLDPE deginimas sukelia labai panašų poveikį klimato kaitai, svyruojantį tarp 3,07 ir 3,10 kg CO<sub>2</sub> eq., tuo tarpu PLA deginimas pasižymi žymiai mažesniu pėdsaku, siekiančiu 0,04 kg CO<sub>2</sub> eq. 36 paveiksle galima matyti, kad PLA deginimas yra mažiausio intensyvumo scenarijus šioje grupėje. Nepaisant to, PLA deginimas išlieka mažiau palankus aplinkosaugos požiūriu nei pramoninis kompostavimas, todėl specializuotos biologinio skaidymo infrastruktūros plėtra yra kritinė siekiant maksimaliai išnaudoti šio biopolimero potencialą.



36 pav. Deginimo scenarijų įtaka klimato kaitos kategorijai

### 3.5.6. Perdirbimo bei kompostavimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų

20 ir 21 lentelėse pateikiami abiejų tipų plastikų (LDPE ir rLDPE) mechaninio perdirbimo bei PLA pramoninio kompostavimo scenarijų palyginamieji rezultatai. Šie scenarijai parodo uždaro ciklo principus, nes leidžia efektyviai atgauti medžiagas arba sumažinti iškastinio anglies dvideginio emisijas.

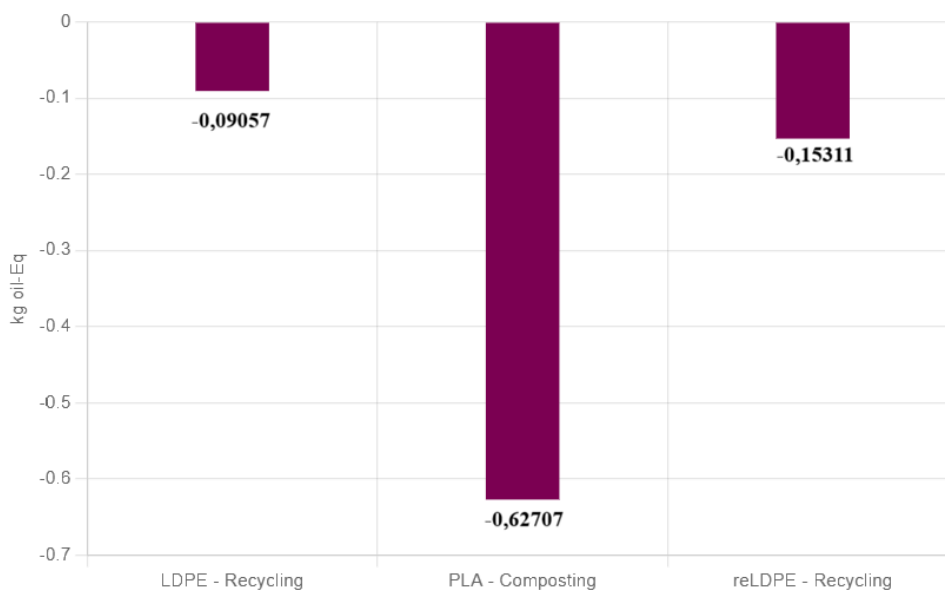
20 lentelė. Perdirbimo bei kompostavimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų, 1 dalis

Poveikio kategorijos	Vienetai	LDPE - Perdirbimas	PLA - Kompostavimas	reLDPE - Perdirbimas
Rūgštėjimas: sausumos ekosistemose	kg SO <sub>2</sub> -Eq	-0,00121	-0,01017	-0,00223
Klimato kaita	kg CO <sub>2</sub> -Eq	-0,37034	-2,33112	-0,95351
Ekotoksiškumas: gėluosiuose vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	-0,03116	-0,13331	-0,28418
Ekotoksiškumas: jūrų vandenyse	kg 1,4-DCB-Eq	-0,03649	-0,16458	-0,36357
Ekotoksiškumas: sausumos ekosistemose	kg 1,4-DCB-Eq	-0,53105	-4,06492	-1,47271
Energijos ištekliai: neatsinaujinantys, iškastiniai	kg oil-Eq	-0,09057	-0,62707	-0,15311
Eutrofikacija: gėluosiuose vandenyse	kg P-Eq	-0,00026	-0,00099	-0,00049
Eutrofikacija: jūrų vandenyse	kg N-Eq	-6,82E-05	-0,00125	-0,00025
Poveikis žmogaus sveikatai: kancerogeninis (vėžį sukeliantis)	kg 1,4-DCB-Eq	-0,06312	-0,34335	-0,15011
Poveikis žmogaus sveikatai: nekancerogeninis	kg 1,4-DCB-Eq	-0,64386	-2,64379	-6,00967
Jonizuojanti spinduliuotė	kBq Co-60-Eq	-0,15206	-0,13815	-0,27189
Žemės naudojimas	m <sup>2</sup> *a crop-Eq	-0,01037	-1,62443	-0,02109
Medžiagų ištekliai: metalai ir mineralai	kg Cu-Eq	-0,00693	-0,03431	-0,02037

**21 lentelė.** Perdirbimo bei kompostavimo scenarijaus palyginimas tarp medžiagų, 2 dalis

Poveikio kategorijos	Vienetai	LDPE - Perdirbimas	PLA - Kompostavimas	reLDPE - Perdirbimas
Ozono sluoksnio nykimas	kg CFC-11-Eq	-2,45E-07	-8,50E-06	-1,30E-06
Kietųjų dalelių susidarymas	kg PM2.5-Eq	-0,0005	-0,00407	-0,00088
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis žmogaus sveikatai	kg NOx-Eq	-0,00082	-0,00591	-0,00159
Fotocheminių oksidantų susidarymas: poveikis sausumos ekosistemoms	kg NOx-Eq	-0,00085	-0,00636	-0,00163
Vandens naudojimas	m <sup>3</sup>	-0,00414	-0,10186	-0,00856

37 paveiksle galima matyti, kad visos trys medžiagos šiuose scenarijuose suteikia grynąją aplinkosauginę naudą. Didžiausia aplinkosauginė nauda fiksuojama PLA kompostavimo metu (-2,33 kg CO<sub>2</sub> eq. klimato kaitos kategorijoje), tačiau rLDPE pakartotinis perdirbimas taip pat pasižymi reikšmingu poveikio sumažėjimu, siekiančiu -0,95 kg CO<sub>2</sub> eq. Tradicinio LDPE perdirbimas suteikia mažesnę, tačiau vis tiek statistiškai ir aplinkosaugai reikšmingą naudą. Šie rezultatai parodo, kad tiek bioplastikų kompostavimas, tiek antrinių plastikų perdirbimas veikia kaip būtinos ir viena kitą papildančios priemonės, siekiant minimizuoti bendrą pakuočių sektoriaus poveikį aplinkai.



**37 pav.** Perdirbimo ir kompostavimo scenarijų įtaka neatsinaujinančių energijos išteklių kategorijai

## Išvados

1. Per pastaruosius 70 metų pasaulinė plastiko gamyba išaugo nuo 1,7 mln. t iki daugiau kaip 430 mln. t, o lanksčios pakuotės sudaro apie 59 % visų plastiko atliekų. Europos Sąjungos reglamentavimas numato, kad nuo 2030 m. rinkai galės būti tiekiamos tik perdirbamos arba biologiškai skaidžios pakuotės, todėl alternatyvių medžiagų funkcinių savybių vertinimas tampa būtinas. Fizikinių-mechaninių bei barjerinių savybių literatūrinė analizė parodė, kad geriausias mechanines, barjerines ir eksploatacines savybes vis dar užtikrina tradiciniai poliolefinai – LDPE, LLDPE ir PP. Nors bioplastikų gamyba sparčiai auga, jų mechaninis stipris ir barjerinės savybės dažnai nusileidžia tradiciniams plastikams. Tyrimo metu, remiantis mokslinės literatūros duomenimis, buvo sudaryta lanksčių pakuočių plėvelių fizikinių-mechaninių ir barjerinių savybių palyginimo matrica. Ji leidžia sistemingai įvertinti skirtingų medžiagų tinkamumą lanksčių pakuočių gamybai ir jų atitiktį tvarumo reikalavimams.
2. Eksperimentiniai tyrimai atskleidė reikšmingus skirtumus tarp konvencinių, perdirbtų ir bioskaidžių plėvelių mechaninių savybių. Didžiausia tempimo jėga nustatyta LDPE-120 plėvelėje (35,44 N), o didžiausias pailgėjimas iki lūžio – rLDPE-90 plėvelėje (1060 %). Tirtos bioskaidžios plėvelės pasižymėjo mažiausiu mechaniniu atsparumu – jų lūžis fiksuotas esant 1,50–3,00 N apkrovai, o deformacija siekė tik 1–8 %. Gauti rezultatai rodo, kad konvencinės ir perdirbtos poliolefinų plėvelės išlaiko geresnes mechanines savybes nei tirti biologiškai skaidūs bandiniai.
3. Siūlių stiprumo bandymai parodė, kad tvirčiausias siūles sudarė LDPE pagrindo plėvelės, kurių siūlių stiprumas siekė 11,59–19,56 N, o bioskaidžių plėvelių siūlių stiprumas buvo 1,57–2,55 N. Sandarumo tyrimai atskleidė, kad konvencinės plėvelės stabiliai išlaikė vakuomo apkrovą (305–312 mbar), o daliai bioskaidžių bandinių nustatyti reikšmingi nesandarumai, kai slėgis pakilo iki 582 mbar. Šie rezultatai rodo, kad tirtų bioskaidžių plėvelių taikymas hermetiškomis lanksčioms pakuotėms yra ribotas be papildomos medžiagų ar sandarinimo parametrų optimizacijos.
4. Gyvavimo ciklo analizė atlikta trimis medžiagoms (LDPE, rLDPE ir PLA), modeliuojant skirtingus jų gyvavimo pabaigos scenarijus. LDPE ir rLDPE atvejais vertinti deginimo, šalinimo sąvartyne ir mechaninio perdirbimo scenarijai, o PLA atveju – deginimo, šalinimo sąvartyne ir pramoninio kompostavimo scenarijai. Taip pat atliktas analogiškų scenarijų palyginimas tarp skirtingų medžiagų. Nustatyta, kad uždaro ciklo sprendimai užtikrina didžiausią aplinkosauginę naudą. Didžiausias teigiamas poveikis klimato kaitos kategorijoje nustatytas PLA pramoninio kompostavimo scenarijuje (–2,33 kg CO<sub>2</sub>-Eq), o pakartotinis rLDPE perdirbimas pasiekė –0,95 kg CO<sub>2</sub>-Eq ir buvo efektyviausias fosilinių išteklių taupymo požiūriu. Tuo tarpu didžiausias neigiamas poveikis nustatytas deginimo scenarijuose: LDPE deginimas sukėlė 3,07 kg CO<sub>2</sub>-Eq, o rLDPE – 3,10 kg CO<sub>2</sub>-Eq emisijų.
5. Techninių savybių požiūriu geriausius rezultatus parodė tradicinės LDPE, LLDPE ir PP plėvelės, pasižymėjusios didesniu mechaniniu atsparumu, stipresnėmis siūlėmis ir geresniu sandarumu. Aplinkosauginiu požiūriu didžiausią potencialą demonstravo PLA ir perdirbtas LDPE, tačiau bioskaidžių plėvelių platesnį taikymą šiuo metu riboja mažesnis mechaninis atsparumas, silpnesnės siūlės ir didesnis nesandarumo dažnis.

## Rekomendacijos

Remiantis atliktų eksperimentų ir gyvavimo ciklo vertinimo rezultatais, lanksčių pakuočių gamyboje rekomenduojama teikti prioritetą monostruktūrinėms PE sistemoms bei antriniam rLDPE (didinant jo dalį iki 30–50 %), nes mechaninis perdirbimas LCA modeliavime pasižymėjo didžiausiu aplinkosauginiu pranašumu. Tuo tarpu trapesnį polilaktidą (PLA) tikslinga naudoti tik

nehermetiškomis, mažo apkrovimo pakuotėms regionuose, turinčiuose išvystytą pramoninio kompostavimo infrastruktūrą, arba toliau tirti jo mišinius su kitais biopolimerais siūlių elastingumui gerinti. Gamintojams patariama optimizuoti terminius siūlių formavimo parametrus ir diegti kokybės kontrolės sistemas, kurios leistų suvaldyti perdirbtų žaliavų savybių svyravimus bei sumažinti gamybinį broką. Siekiant ilgalaikio pakuočių tvarumo, įmonių sprendimai jau projektavimo etape turėtų būti grindžiami ekologinio projektavimo principais, o laboratorinius monostruktūrinių bei kompostuojamų plėvelių rezultatus ateityje rekomenduojama perkelti į pilno masto pramoninius bandymus realioje pakavimo įrangoje.

## Literatūros sąrašas

1. Mangal Mangal, Chebrolu Venkateswara Rao, Tamal Banerjee. Bioplastic: An Eco-Friendly Alternative to Non-Biodegradable Plastic, Jun 15, 2023, vol. 72, no. 11. pp. 984–996. Prieiga per: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/pi.6555> DOI 10.1002/pi.6555.
2. 2019 M. Birželio 5 D. Europos Parlamento Ir Tarybos Direktyva (ES) 2019/904 Dėl Tam Tikrų Plastikinių Gaminių Poveikio Aplinkai Mažinimo (Tekstas Svarbus EEE). , June 5, 2019 [žiūrėta 2026-05-14]. Prieiga per: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>.
3. Plastic Waste for Sustainable Asphalt Roads Woodhead Publishing, /01/01, 2022 [cituota 2026-05-11]. *Polymers and Plastics: Types, Properties, and Manufacturing*, pp. 3–28. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323857895000010>.
4. *Polimerai*. Prieiga per: <https://www.vle.lt/straipsnis/polimerai/> [žiūrėta 2026-04-05].
5. Group of Chief Scientific Advisors. *Biodegradability of Plastics in the Open Environment - Publications Office of the EU*. Publications Office of the European Union. Dec 14, 2020 Prieiga per: <https://op.europa.eu/en/web/eu-law-and-publications/publication-detail/-/publication/0c0d6267-433a-11eb-b27b-01aa75ed71a1> [žiūrėta 2026-05-14]. DOI 10.2777/690248.
6. MAZHANDU, Z.S., et al. Integrated and Consolidated Review of Plastic Waste Management and Bio-Based Biodegradable Plastics: Challenges and Opportunities. *Sustainability*, /1, 2020, vol. 12, no. 20. pp. 8360. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/20/8360> [žiūrėta 2026-05-14] ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su12208360.
7. LACKNER, M., MUKHERJEE, A. and KOLLER, M. What are “Bioplastics”? Defining Renewability, Biosynthesis, Biodegradability, and Biocompatibility. *Polymers*, /1, 2023, vol. 15, no. 24. pp. 4695. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/24/4695> [žiūrėta 2026-04-05] ISSN 2073-4360. DOI 10.3390/polym15244695.
8. YOUNIS, H., ABDELRAHMAN, F., SAMER, M. and ABDELLATIF, H. Bioplastics within the Circular Bioeconomy IntechOpen, -11-12, 2024 [cituota 2026-05-11]. *An Overview of Biodegradable Polymers and Types of Bioplastics: Properties and Applications*. Prieiga per: <https://www.intechopen.com/chapters/1201338> ISBN 9780850149500 9780850149517 9780850149524.
9. Bioplastics Market Development Update 2025: European Bioplastics, 2025 Prieiga per: <https://www.european-bioplastics.org/market/> [žiūrėta 2025-03-14].
10. *EUR-Lex - 01994L0062-20180704 - EN - EUR-Lex*. , 1994Dec 20Nr. [žiūrėta Mar 13, 2026]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:01994L0062-20180704>.
11. Guillaume Ragonnaud. *Revision of the Packaging and Packaging Waste Directive*. Apr, 2024 Prieiga per: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/745707/EPRS\\_BRI\(2023\)745707\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2023/745707/EPRS_BRI(2023)745707_EN.pdf) [žiūrėta 2026-03-13].
12. HORODYTSKA, O., VALDÉS, F.J. and FULLANA, A. Plastic Flexible Films Waste Management – A State of Art Review. *Waste Management*, -07-01, 2018, vol. 77. pp. 413–425. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18302447> [žiūrėta 2026-03-16] ISSN 0956-053X. DOI 10.1016/j.wasman.2018.04.023.
13. TUNÇOK-ÇEŞME, B., YILDIZ-GEYHAN, E. and ÇİFTÇİOĞLU, G.A. Environmental Life Cycle Assessment of Two Types of Flexible Plastic Packaging Under a Sustainable Circular

- Economy Approach. *Sustainability*, /1, 2024, vol. 16, no. 8. pp. 3149. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/8/3149> [žiūrėta 2026-03-14] ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su16083149.
14. FARRUKH, A., MATHRANI, S. and SAJJAD, A. A Systematic Literature Review on Environmental Sustainability Issues of Flexible Packaging: Potential Pathways for Academic Research and Managerial Practice. *Sustainability*, /1, 2022, vol. 14, no. 8. pp. 4737. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/8/4737> [žiūrėta 2026-03-16] ISSN 2071-1050. DOI 10.3390/su14084737.
15. *Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the Reduction of the Impact of Certain Plastic Products on the Environment (Text with EEA Relevance)*. , June 5, 2019 [žiūrėta 2026-04-19]. Prieiga per: <http://data.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>.
16. *Europos Parlamento Ir Tarybos Direktyva 2008/98/EB Dėl Atliekų Ir Panaikinanti Kai Kurias Direktyvas*. , 2008Nov 22Nr. [žiūrėta 2026-04-19]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:02008L0098-20251016>.
17. *Europos Parlamento Ir Tarybos Reglamentas (ES) 2024/1781 Dėl Tvarių Gaminių Ekologinio Projektavimo Reikalavimų*. , 2024Jun 28Nr. [žiūrėta Apr 19, 2026]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX:32024R1781>.
18. *VIII-787 Lietuvos Respublikos Atliekų Tvarkymo Įstatymas*. , 1998Jun 30Nr. [žiūrėta 2026-04-19]. Prieiga per internetą: <https://e-tar.lt/portal/lt/legalAct/TAR.8D38517814F1/cThueylIRO>.
19. *VIII-1183 Lietuvos Respublikos Mokesčio Už Aplinkos Teršimą Įstatymas*. , 1999May 28Nr. [žiūrėta 2026-04-19]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/tt/legalAct/TAR.FFF9AE9162EE>.
20. *Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on Packaging and Packaging Waste, Amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and Repealing Directive 94/62/EC*. , 2024-12-19Nr. [žiūrėta 2026-04-10]. Prieiga per internetą: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L\\_202500040&pk\\_campaign=todays\\_OJ&pk\\_source=EUR-Lex&pk\\_medium=X&pk\\_content=Environment&pk\\_keyword=Regulation](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202500040&pk_campaign=todays_OJ&pk_source=EUR-Lex&pk_medium=X&pk_content=Environment&pk_keyword=Regulation).
21. GARAVITO, J., CASTELLANOS-GONZÁLEZ, S., PEÑA-VENEGAS, C.P. and CASTELLANOS, D.A. Development and Characterization of Reinforced Flexible Packaging Based on Amazonian Cassava Starch through Flat Sheet Extrusion. *Polymers*, /1, 2026, vol. 18, no. 6. pp. 675. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2073-4360/18/6/675> [žiūrėta 2026-03-29] ISSN 2073-4360. DOI 10.3390/polym18060675.
22. Exploration of Bioplastics: A Review. -08-31, 2022 Prieiga per: <https://www.orientjchem.org/vol38no4/exploration-of-bioplastics-a-review/> [žiūrėta 2026-03-29].
23. HUSSAIN, A. and NOOR, S. The Development of Biodegradable Plastics: Challenges and Opportunities for Sustainable Packaging Solutions. *Nova Integrata: Journal of Multidisciplinary Studies*, December 31, 2025, vol. 3, no. 2. pp. 16–31. Prieiga per: <https://nijms.online/index.php/journal/article/view/68> [žiūrėta 2026-04-27] ISSN 3106-1346. DOI 10.66382/nijms2.68.
24. SHAIKH, S., YAQOOB, M. and AGGARWAL, P. An Overview of Biodegradable Packaging in Food Industry. *Current Research in Food Science*, 2021, vol. 4. pp. 503–520. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2665927121000496> ISSN 2665-9271. DOI 10.1016/j.crfs.2021.07.005.

25. HWANG, E., et al. Biodegradable Plastics as Sustainable Alternatives: Advances, Basics, Challenges, and Directions for the Future. *Materials*, /1, 2025, vol. 18, no. 18. pp. 4247. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/18/4247> [žiūrēta 2026-04-27] ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma18184247.
26. YUE, S., et al. Recent Progress of Biodegradable Polymer Package Materials: Nanotechnology Improving both Oxygen and Water Vapor Barrier Performance. *Nanomaterials*, /1, 2024, vol. 14, no. 4. pp. 338. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2079-4991/14/4/338> [žiūrēta 2026-04-28] ISSN 2079-4991. DOI 10.3390/nano14040338.
27. DEMETS, R., et al. Macromolecular Insights into the Altered Mechanical Deformation Mechanisms of Non-Polyolefin Contaminated Polyolefins. *Polymers*, /1, 2022, vol. 14, no. 2. pp. 239. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/2/239> [žiūrēta 2026-05-29] ISSN 2073-4360. DOI 10.3390/polym14020239.
28. BAMPs, B., BUNTINX, M. and PEETERS, R. Seal Materials in Flexible Plastic Food Packaging: A Review. *Packaging Technology and Science*, Jul 1, 2023, vol. 36, no. 7. pp. 507–532. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/369914980\\_Seal\\_materials\\_in\\_flexible\\_plastic\\_food\\_packaging\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/369914980_Seal_materials_in_flexible_plastic_food_packaging_A_review) [žiūrēta 2026-04-28] ISSN 0894-3214. DOI <https://doi.org/10.1002/pts.2732>.
29. MIHINDUKULASURIYA, S.D. and LIM, L. Heat Sealing of LLDPE Films: Heat Transfer Modeling with Liquid Presence at Film–film Interface. *Journal of Food Engineering*, -05-01, 2013, vol. 116, no. 2. pp. 532–540. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877412006346> [žiūrēta 2026-04-28] ISSN 0260-8774. DOI 10.1016/j.jfoodeng.2012.12.027.
30. HEDENQVIST, M.S. Handbook of Environmental Degradation of Materials M. KUTZ ed., Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2005 *Chapter 26 - Barrier Packaging Materials*, pp. 547–563. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780815515005500288> ISBN 9780815515005. DOI 10.1016/B978-081551500-5.50028-8.
31. MAES, C., et al. Recent Updates on the Barrier Properties of Ethylene Vinyl Alcohol Copolymer (EVOH): A Review. *Polymer Reviews*, -04-03, 2018, vol. 58, no. 2. pp. 209–246. Prieiga per: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15583724.2017.1394323> [žiūrēta 2026-04-28] ISSN 1558-3724, 1558-3716. DOI 10.1080/15583724.2017.1394323.
32. POSTAWA, P., et al. Mechanical and Structural Consequences of PLA/PBAT Contamination in Polypropylene and Polystyrene Recycling. *Materials*, /1, 2025, vol. 18, no. 24. pp. 5523. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1996-1944/18/24/5523> [žiūrēta 2026-04-27] ISSN 1996-1944. DOI 10.3390/ma18245523.
33. MONTAVA-JORDA, S., et al. Mechanical Recycling of Partially Bio-Based and Recycled Polyethylene Terephthalate Blends by Reactive Extrusion with Poly(Styrene-Co-Glycidyl Methacrylate). *Polymers*, /1, 2020, vol. 12, no. 1. pp. 174. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/1/174> [žiūrēta 2026-04-28] ISSN 2073-4360. DOI 10.3390/polym12010174.
34. FERREIRA, E.d.S.B., et al. Toward Producing Biopolyethylene/Babassu Fiber Biocomposites with Improved Mechanical and Thermomechanical Properties. *Polymers*, /1, 2024, vol. 16, no. 3. pp. 419. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2073-4360/16/3/419> [žiūrēta 2026-04-28] ISSN 2073-4360. DOI 10.3390/polym16030419.
35. David J. Alcarde Jr., et al. Gas Permeation as the Nexus of Food Safety and Sustainability in the Packaging Industry. *Journal of Food Quality*, Feb 23, 2026. pp. 1–26. Prieiga per:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/jfq/3278398> ISSN 0146-9428. DOI 10.1155/jfq/3278398.

36. SHARBAFIAN, F., et al. Investigation and Comparison of Alternative Oxygen Barrier Coatings for Flexible PP Films as Food Packaging Material. *Coatings*, /9, 2024, vol. 14, no. 9. pp. 1086. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2079-6412/14/9/1086> [žiūrēta 2026-04-22] ISSN 2079-6412. DOI 10.3390/coatings14091086.

37. ELHAMNIA, M., MOTLAGH, G.H. and JAFARI, S.H. Improved Barrier Properties of Biodegradable PBAT Films for Packaging Applications using EVOH: Morphology, Permeability, Biodegradation, and Mechanical Properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, vol. 140, no. 20. pp. e53855. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/app.53855> ISSN 0021-8995. DOI 10.1002/app.53855.

38. KAISER, K., SCHMID, M. and SCHLUMMER, M. Recycling of Polymer-Based Multilayer Packaging: A Review. *Recycling*, /3, 2018, vol. 3, no. 1. pp. 1. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2313-4321/3/1/1> [žiūrēta 2026-03-16] ISSN 2313-4321. DOI 10.3390/recycling3010001.

39. *Polymers Properties | Matmake*. Prieiga per: <https://matmake.com/polymers.html> [žiūrēta 2026-04-26]

40. M. S.R.O. *Plastics Polymer Prices | PlasticPortal*. Prieiga per: <https://www.plasticportal.eu/price-reports> [žiūrēta 2026-05-30].

41. Overview of Materials for Linear Low Density Polyethylene (LLDPE), Film Grade. Prieiga per: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=48fba88d2f7e4279978ed05fa575cadf> [žiūrēta 2026-04-27].

42. Overview of Materials for Polypropylene, Film Grade. Prieiga per: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=642060cb11204fcb95164a82edc4b5fa> [žiūrēta 2026-04-27].

43. *Polyethylene Terephthalate (PET) Price Index & Chart 2026*. Prieiga per: <https://www.imarcgroup.com/polyethylene-terephthalate-pricing-report>.

44. What is OPA Film ? – TOYOBO (Thailand) Co.,Ltd. Prieiga per: <https://toyobo.co.th/en/knowledge-hub/blog-film/opa-film/> [žiūrēta 2026-04-28].

45. Biaxially Oriented Nylon Films Guide | Pilcher Hamilton. -09-24, 2025 Prieiga per: <https://www.pilcherhamilton.com/biaxially-oriented-nylon-films-complementary-to-polyester-in-packaging/> [žiūrēta 2026-04-28].

46. M. S.R.O. *Average Resin Prices I PlasticPortal.Eu*. Prieiga per: <https://www.plasticportal.eu/polymer-prices> [žiūrēta 2026-05-30].

47. Overview of Materials for Ethylene Vinyl Alcohol (EVOH). Prieiga per: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=744899e4ab06482da9cf86d8f450db0d> [žiūrēta 2026-04-27].

48. Market Prices for Commodities in Central and Easter Europe. Prieiga per: [https://plasticker.de/preise/preise\\_myceppi\\_en.php](https://plasticker.de/preise/preise_myceppi_en.php) [žiūrēta 2026-05-30].

49. M.D.F. LTD. *Europe Bioplastics Market Size & Share Report, 2033*. Prieiga per: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/europe-bioplastics-market> [žiūrēta 2026-05-30].

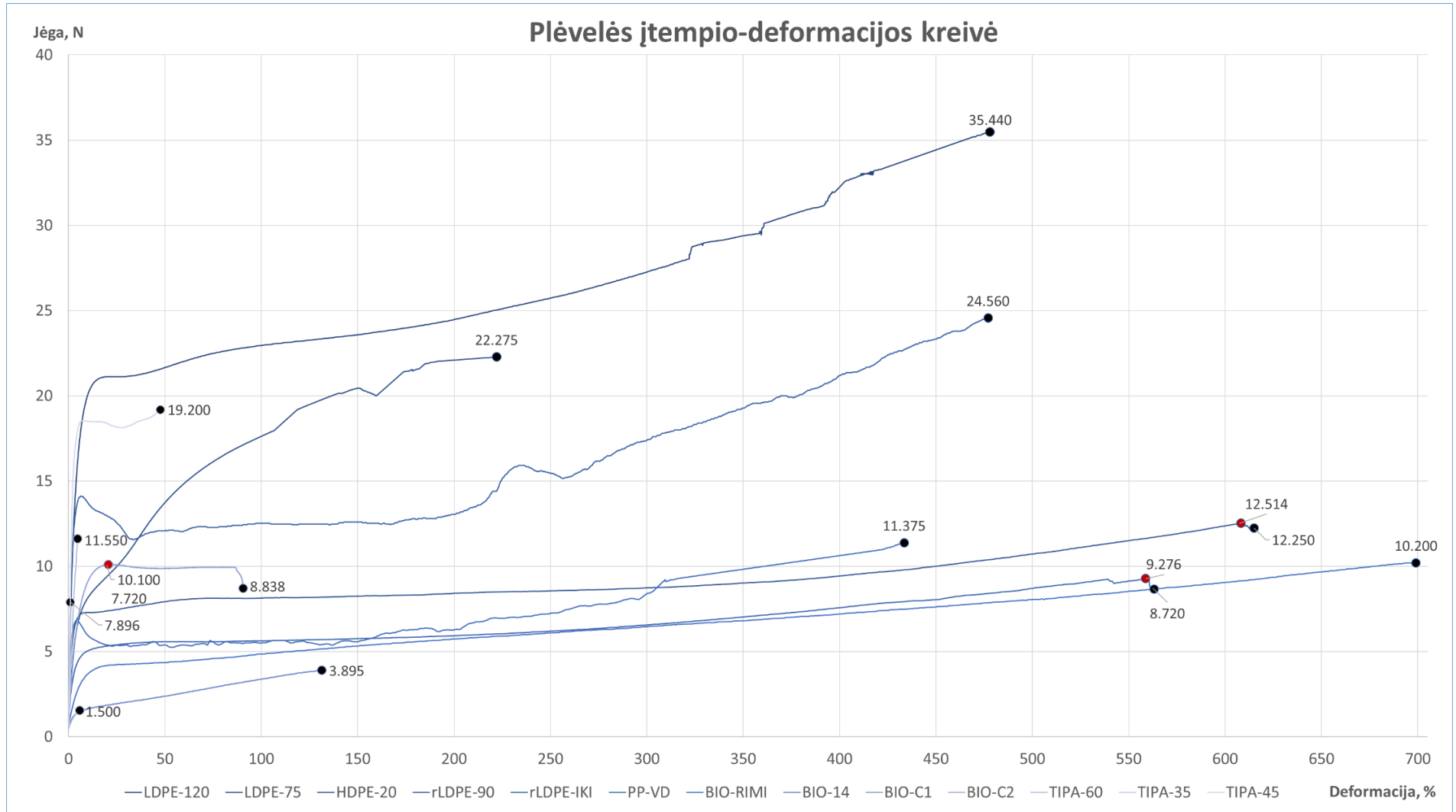
50. EHMAN, N.V., et al. Biocomposites of Bio-Polyethylene Reinforced with a Hydrothermal-Alkaline Sugarcane Bagasse Pulp and Coupled with a Bio-Based Compatibilizer. *Molecules*, /1, 2020,

- vol. 25, no. 9. pp. 2158. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1420-3049/25/9/2158> [žiūrėta 2026-04-28] ISSN 1420-3049. DOI 10.3390/molecules25092158.
51. KUCIEL, S., MAZUR, K., ROBAKOWSKA, M. and PAUKSZTA, D. Mechanical, Thermal and Performance Evaluation of Hybrid Basalt/Carbon Fibers Reinforced Bio-Based Polyethylene Terephthalate (BioPet) Composites. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, -07-02, 2024, vol. 11. Prieiga per: [https://www.researchgate.net/publication/381947118\\_Mechanical\\_Thermal\\_and\\_Performance\\_Evaluation\\_of\\_Hybrid\\_BasaltCarbon\\_Fibers\\_Reinforced\\_Bio-Based\\_Polyethylene\\_Terephthalate\\_BioPet\\_Composites](https://www.researchgate.net/publication/381947118_Mechanical_Thermal_and_Performance_Evaluation_of_Hybrid_BasaltCarbon_Fibers_Reinforced_Bio-Based_Polyethylene_Terephthalate_BioPet_Composites) [žiūrėta 2026-04-28] DOI 10.1007/s40684-024-00616-w.
52. MORRIS, B.A. The Science and Technology of Flexible Packaging Oxford: William Andrew Publishing, 2017 7 - *Heat Seal*, pp. 181–257. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323242738000071> ISBN 9780323242738. DOI 10.1016/B978-0-323-24273-8.00007-1.
53. MOHAMMADI, R.S., TABATABAEI, S.H. and AJJI, A. Peelable Clay/PE Nanocomposite Seals with Ultra-Wide Peelable Heat Seal Temperature Window. *Applied Clay Science*, 2018, vol. 158. pp. 132–142. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169131718301078> ISSN 0169-1317. DOI 10.1016/j.clay.2018.03.001.
54. WALKER, S. and ROTHMAN, R. Life Cycle Assessment of Bio-Based and Fossil-Based Plastic: A Review. *Journal of Cleaner Production*, -07-10, 2020, vol. 261. pp. 121158. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620312051> [žiūrėta 2026-03-14] ISSN 0959-6526. DOI 10.1016/j.jclepro.2020.121158.
55. SIRACUSA, V., et al. Environmental Assessment of a Multilayer Polymer Bag for Food Packaging and Preservation: An LCA Approach. *Food Research International*, -08-01, 2014, vol. 62. pp. 151–161. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996914001094> [žiūrėta 2026-03-16] ISSN 0963-9969. DOI 10.1016/j.foodres.2014.02.010.
56. HE, H., et al. Applied Properties and Life Cycle Assessment of Flexible Packaging Lamination Processes: A Comparative Study. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, March 1, 2021, vol. 26, no. 3. pp. 561–574. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01883-4> [žiūrėta 2026-03-16] ISSN 1614-7502. DOI 10.1007/s11367-021-01883-4.
57. COSTAMAGNA, M., et al. Environmental Assessment of the Recycling Process for Polyamides - Polyethylene Multilayer Packaging Films. *Sustainable Materials and Technologies*, -04-01, 2023, vol. 35. pp. e00562. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214993722001762> [žiūrėta 2026-03-16] ISSN 2214-9937. DOI 10.1016/j.susmat.2022.e00562.
58. *Waste Hierarchy - EUR-Lex*. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/glossary/waste-hierarchy.html> [žiūrėta 2026-05-05].
59. *Atliekų Pagrindų Direktyva - Aplinka - Europos Komisija*. Prieiga per: [https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en) [žiūrėta 2026-03-14].
60. *Kaip Sumažinti Pakavimo Atliekas ES? (INFOGRAFIKAI)*. Prieiga per: <https://www.europarl.europa.eu/topics/lt/article/20231109STO09917/kaip-sumazinti-pakavimo-atliekas-es-infografikai> [žiūrėta 2026-03-13].

61. *Plastiko Atliekos Ir Ju Perdirbimas ES: Faktai Ir Skaičiai*. Prieiga per: <https://www.europarl.europa.eu/topics/lt/article/20181212STO21610/plastiko-atliekos-ir-ju-perdirbimas-es-faktai-ir-skaiciai> [žiūrėta 2026-03-13].
62. ANDREASI BASSI, S., TONINI, D., SAVEYN, H. and ASTRUP, T.F. Environmental and Socioeconomic Impacts of Poly(Ethylene Terephthalate) (PET) Packaging Management Strategies in the EU. *Environmental Science & Technology*, January 4, 2022, vol. 56, no. 1. pp. 501–511. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00761> [žiūrėta 2026-03-16] ISSN 0013-936X. DOI 10.1021/acs.est.1c00761.
63. *Biologiniai, Biologiškai Skaidūs Ir Kompostuojami Plastikai. Aplinka*. Prieiga per: [https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/biobased-biodegradable-and-compostable-plastics\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/biobased-biodegradable-and-compostable-plastics_en) [žiūrėta Mar 14, 2026].
64. YADAV, K. and NIKALJE, G.C. Comprehensive Analysis of Bioplastics: Life Cycle Assessment, Waste Management, Biodiversity Impact, and Sustainable Mitigation Strategies. *PeerJ*, September 11, 2024, vol. 12. pp. e18013. Prieiga per: <https://peerj.com/articles/18013> [žiūrėta 2026-04-20] ISSN 2167-8359. DOI 10.7717/peerj.18013.
65. CABRERA, G., LI, J., MAAZOUZ, A. and LAMNAWAR, K. A Journey from Processing to Recycling of Multilayer Waste Films: A Review of Main Challenges and Prospects. *Polymers*, /1, 2022, vol. 14, no. 12. pp. 2319. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/12/2319> [žiūrėta 2026-05-16] ISSN 2073-4360. DOI 10.3390/polym14122319.
66. *ASTM F88/F88M–15: Standard Test Method for Seal Strength of Flexible Barrier Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015 [žiūrėta 2026-05-10]. Prieiga per: <https://mdcpp.com/doc/standard/ASTMF88F88M-15.pdf> MDCPP.
67. *Oxipack - Stationary Leak Tester*. Prieiga per: <https://www.oxipack.com/products/stationary-leak-tester-slt> [žiūrėta 2026-04-06].
68. LDPE, HDPE, MDPE rankovės, pusrankovės, juostos Prieiga per: <https://granplasta.lt/ldpe-hdpe-mdpe-rankoves-pusrankoves-juostos/> [žiūrėta 2026-05-11].
69. PACLAN Prieiga per: <https://paclan.pl/strona-glowna/> [žiūrėta 2026-05-11].
70. Home Compostable, Highly Transparent Film | TIPA 302 Prieiga per: <https://tipa-corp.com/reel/tipa-302/> [žiūrėta 2026-05-11].
71. Compostable Laminate: T.LAM 607 | TIPA Compostable Reels Prieiga per: <https://tipa-corp.com/reel/t-lam-607/> [žiūrėta 2026-05-11].

# Priedai

## 1 priedas. Plēvelēs ītempio-deformācijas kreivē



2 priedas. Siūlės jėgos-poslinkių kreivė

