



Kauno technologijos universitetas

Aplinkos inžinerijos institutas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Bioskaidžių lanksčiųjų pakuočių technologinio panaudojimo
gamyboje (siekiant pakeisti naudojamus klasikinius plastikus)
galimybių tyrimai ir poveikio aplinkai įvertinimas**

Baigiamasis magistro projektas

Arlanda Rylskytė

Projekto autorė

Doc. Visvaldas Varžinskas

Vadovas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Aplinkos inžinerijos institutas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Bioskaidžių lanksčiųjų pakuočių technologinio panaudojimo
gamyboje (siekiant pakeisti naudojamus klasikinius plastikus)
galimybių tyrimai ir poveikio aplinkai įvertinimas**

Baigiamasis magistro projektas

Darnus valdymas ir gamyba (6213EX001)

Arlanda Rylskytė

Projekto autorė

Doc. Visvaldas Varžinskas

Vadovas

Doc. dr. Inga Gurauskienė

Recenzentė

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Aplinkos inžinerijos institutas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

**Bioskaidžių lanksčiųjų pakuočių technologinio panaudojimo
gamyboje (siekiant pakeisti naudojamus klasikinius plastikus)
galimybių tyrimai ir poveikio aplinkai įvertinimas**

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.

Arlanda Rylskytė

Patvirtinta elektroniniu būdu

Rylskytė Arlanda. Bioskaidžių lanksčiųjų pakuočių technologinio panaudojimo gamyboje (siekiant pakeisti naudojamus klasikinius plastikus) galimybių tyrimai ir poveikio aplinkai įvertinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. 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: lanksčios pakuotės, tempiamasis stipris, biologinės kilmės plėvelės tempiamasis stipris, biologiškai skaidžios plėvelės tempimo stiprumas, būvio ciklo vertinimas.

Kaunas, 2021. 54 p.

Santrauka

Plastikas yra viena labiausiai paplitusių pakavimo medžiagų, jos metinė produkcija yra 368 milijonai tonų. Prognozuojama, kad gamybos ir plastiko atliekų kiekiai tik didės. Pastaraisiais metais ypatingas dėmesys yra skiriamas tvarioms pakuočių medžiagoms iš atsinaujinančių išteklių ir aplinkai draugiškesnių pakuočių atliekų tvarkymo scenarijų tobulinimui. Biologinės kilmės medžiagos yra įvardijamos kaip alternatyva įprastiems plastikams, tačiau norint šias medžiagas panaudoti esančiuose gamybos procesuose, reikia, kad jų fizikinės–mechaninės savybės atitiktų gamybinių technologijų reikalavimus, produktų atliekos būtų tvarkomos tinkamai ir kad alternatyvios medžiagos nesukeltų didesnio neigiamo poveikio aplinkai visame produktų būvio cikle. Šiame darbe buvo tiriamos trijų vienodo storio skirtingų rūšių lanksčių pakavimo plėvelių tempimo stiprumo savybės, kaip maksimali tempimo jėga ir galutinis tempimo stipris: monopolietileno plėvelė, biologiškai skaidoma monopolietileno plėvelė ir biologinės kilmės, kuri pagaminta iš 85 % cukranendrių. Iš gautų rezultatų nustatyta, kad biologinės kilmės maišelis parodė geras tempimo savybes ir gali būti naudojamas vietoj įprasto *PE* maišelio. Taip pat, siekiant išsiaiškinti tirtų medžiagų poveikį aplinkai, buvo atliktas būvio ciklo įvertinimo tyrimas ir išanalizuoti literatūros šaltiniai. Remiantis duomenis, nustatyta, kad iš biologinės kilmės plastikas išmeta mažiau CO₂ lyginant su tradiciniais plastikais. Norint pakeisti iškastinio kuro plastiką į biologinės kilmės, reikia ir toliau tirti skirtingos kilmės medžiagų fizikines–mechanines savybes bei atlikti poveikio aplinkai vertinimus.

Rylskytė, Arlanda. Feasibility and Environmental Impact Assessment of Technological Use of Biodegradable Flexible Packaging in the Production to Replace the Usage of Conventional Plastics. Master's Final Degree Project / supervisor associate professor 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, Production and Manufacturing Engineering (E10), Business (L01), Engineering Sciences.

Keywords: flexible packaging, tensile strength, biobased film tensile strength, biodegradable film tensile strength, life cycle assessment.

Kaunas, 2021. 54 p.

Summary

Plastic is one of the most used material for packaging with 368 million tons of annual production. Production volumes as well as plastic waste volumes are expecting to increase. Recent years special attention is being paid to sustainable packaging materials from renewable resources and improvement of environment friendly packaging end of life scenarios. Biological materials are identified as an alternative to conventional plastics, but their use in existing production processes requires that their physical and mechanical properties meet the requirements of production technology, that product waste is properly managed and that alternative materials do not have a significant negative impact on the environment throughout their life cycle. In this work, the tensile strength properties of three same thickness different sorts of flexible packaging films tensile strength properties as maximal tensile force and ultimate tensile strength were examined: mono-polyethylene film, biodegradable mono-polyethylene film and biobased plastic flexible packaging film containing 85 % of sugarcane bagasse. Also, in order to find out the impact of the studied substances on the environment, a life cycle assessment study was performed and the literature sources were analyzed. Based on the data, it has been found that plastics of biological origin emit less CO₂ compared to traditional plastics. In order to replace fossil fuel plastics with biobased, environmental assessments must be done and physical – mechanical properties of different origin materials must be further examined.

Turinys

Lentelių sąrašas	7
Paveikslų sąrašas	8
Santrumpų ir terminų sąrašas	9
Įvadas.....	11
1. Konvencinių plastikų ir biopolimerų apžvalga, panaudojimo, savybių ir atliekų tvarkymo tendencijos	12
1.1. Konvencinių plastikų ir biopolimerų klasifikacija	12
1.1.1. Polimerų klasifikacija pagal žaliavos kilmę	12
1.1.2. Polimerų klasifikacija pagal savybių kitimą veikiant temperatūrai	13
1.1.3. Konvencinių plastikų ir biopolimerų fizikinės–mechaninės savybės	14
1.1.4. Klasifikacija pagal panaudojimo sritis	15
1.2. Plastiko pakuotės	19
1.2.1. Plastikinių pakuočių gamybos technologijos	21
1.3. Plastiko ir plastikinių pakuočių teisinis reglamentavimas.....	23
1.4. Plastikinių lanksčių pakuočių atliekų tvarkymo tendencijos.....	28
1.4.1. Cheminis perdirbimas.....	29
1.4.2. Kompostavimas	30
1.4.3. Anaerobinis perdirbimas	31
2. Lanksčių pakuočių fiziko-mechaninių savybių ir būvio ciklo įvertinimo tyrimų metodika	33
2.1. Lanksčių pakuočių fiziko-mechaninių savybių bandymo metodika	33
2.2. Būvio ciklo įvertinimo tyrimo metodika	37
3. Lanksčių konvencinių ir biologinės kilmės pakuočių fiziko-mechaninių savybių tyrimo ir būvio ciklo įvertinimo tyrimų rezultatai.....	41
3.1. Lanksčių pakuočių fiziko-mechaninių savybių tyrimo rezultatai	41
3.2. Lanksčių pakuočių būvio ciklo vertinimo tyrimo rezultatai.....	44
Išvados	50
Literatūros sąrašas	51

Lentelių sąrašas

1 lentelė.	Kai kurių polimerų fizikiniai–mechaniniai parametrai ^[22]	15
2 lentelė.	Biopolimerų panaudojimas lanksčių pakuočių gamyboje ^[13]	18
3 lentelė.	Cheminės medžiagos <i>SUP</i> produktuose ^[6]	20
4 lentelė.	Pagrindiniai standartai susiję su kompostavimo ir biologinio skaidymo bandymais ^[41] 27	
5 lentelė.	Biopolimerų irimo sąlygos ir biologinio skaidomumo rodikliai ^[38]	31
6 lentelė.	Poveikio aplinkai vertinimui naudojamų metodų, duomenų bazės ir programinės įrangos pavyzdžiai ^[52]	39
7 lentelė.	Vidutinės didžiausios pasiektos jėgos rezultatai. Išilginės ir skersinės krypties bandiniai	42

Paveikslų sąrašas

1 pav.	Polimerų klasifikacija pagal kilmę ir skaidomumą ^[1]	13
2 pav.	Bendras plastikų paskirstymas ir pritaikymas 2019 m. ^[9]	16
3 pav.	Biologinių plastikų gamybos procentas pagal rūšis 2019 m. ^[11]	17
4 pav.	Biologinės kilmės plastikų pasiskirstymas Europos rinkoje 2019 metais ^[48]	18
5 pav.	Pasaulinis vienkartinio plastiko gamybos pasiskirstymas 2014 m. pagal regionus ^[49]	20
6 pav.	Ekstruderio schema ^[30]	22
7 pav.	Principinė plėvelės gamybos ekstrudiniu pūtimo būdu schema ir pavyzdys ^[30]	22
8 pav.	Pakuočių atliekų tvarkymo būdų hierarchijos įgyvendinimas ^[21]	23
9 pav.	Teisės aktų reglamentuojančių pakuočių projektavimą, gamybą ir atliekų tvarkymą, sąrašas ^[21]	25
10 pav.	Pakuotėms ir pakuočių atliekoms skirti Europos darnieji standartai ir techniniai reglamentai ^[21]	26
11 pav.	Plastikinių pakuočių identifikavimo kodai ^[8]	28
12 pav.	Plėvelių tempimo bandymų standas: 1 – pavara, 2 – jėgos matavimo blokas, 3 – viršutinis griebtas, 4 – bandinys, 5 – apatinis griebtas, 6 – stiprintuvas, 7 – keitiklis PicoScope, 8 – kompiuteris.....	34
13 pav.	Skaitmeninis mikrometras QuantuMike IP65.....	34
14 pav.	Tempimo bandymui naudojami maišeliai: A) monopolietileno, B) bioskaidaus monopolietileno ir C) biologinės kilmės plastiko, kurį sudaro 85 % cukrandendrių pluoštas.....	35
15 pav.	Plėvelių tempimo bandymams naudotų juostelės pavidalo bandinių bendras vaizdas: $L_0 = L$ – pirminis atstumas tarp griebtų (50 mm); b – bandinio plotis (10 mm); h – bandinio (plėvelės) storis (25 μm); l_3 – bandinio ilgis (100 mm) ^[57]	35
16 pav.	Tempimo diagramos pavyzdys ^[60]	35
17 pav.	Plėvelių tempimo bandymo eiga: a) – įtvirtintas griebtuose bandinys prieš tempimą; b) – būdingas tarpinis vaizdas bandinio tempimo eigoje.....	36
18 pav.	Būvio ciklo vertinimo struktūra ^[33]	37
19 pav.	Programinės įrangos „EcoImpact COMPASS“ pavyzdys ir analizuojamos alternatyvios medžiagos 40	
20 pav.	Biologinės kilmės (85 % cukrandendrių pluošto) lanksčios pakuotės išilginio ir skersinio mėginio tempimo diagramos.....	41
21 pav.	Plėvelių tempimo bandymų rezultatai, kai bandiniai išpjauti skersine maišelio kryptimi: vieno biologiškai skaidaus PE (žalias grafikas) ir dviejų biologinės kilmės (85% cukrandendrių pluoštas) bandinių palyginimas.....	42
22 pav.	Išilginių ir skersinių bandinių tempimo jėgos vidutiniai rezultatai.....	43
23 pav.	Išilginių ir skersinių bandinių stiprumo ribos vidutiniai rezultatai.....	44
24 pav.	Skirtingų žaliavų visuotinio klimato atšilimo potencialo diagrama.....	45
25 pav.	Alternatyvių lanksčiųjų plastikų poveikio aplinkai įvertinimas (BCI) globalinio atšilimo poveikio aplinkai kategorijoje.....	46
26 pav.	Globalinio klimato atšilimo potencialas, gaminant 1 kg granulių ^[18]	47
27 pav.	Globalinio klimato atšilimo potencialas gaminant 1 t plastiko ^[5]	48
28 pav.	Globalinio klimato atšilimo potencialas gaminant 1 maišelį iš PE, bio-PE ir PBAT / krakmolo ^[44]	49

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

ABS – akrilnitrilo butadieno stirenas;
BBP – benzilbutilftalatas;
BCV – būvio ciklo vertinimas;
Bio-PA – bio-poliamidas;
Bio-PBT – bio-polibutileno tereftalatas;
Bio-PE – bio-polietilenas;
Bio-PET – bio-polietilentereftalatas;
Bio-PEIT – bio-polietileno-ko-izorbito tereftalatas;
Bio-PP – bio- polipropilenas;
Bio-PTT – bio- politimetileno tereftalatas;
Bio-PVC – bio-polivinilchloridas;
BP – biopolimeras;
CA – celiuliozės acetatas;
CH₄ – metanas;
CO₂ – anglies dioksidas;
DBP – dibutilftalatas;
DEHP - bis(2-etilheksil) ftalatas;
DEP – dietilftalatas;
DMP – dimetilftalatas;
DNOP – di-n-oktilftalatas;
Doc. – docentas;
EPS – polistireno putplastis;
ES – Europos Sąjunga;
GPPS – bendros paskirties polistirenas;
HDEHP – dietilheksilfosforinė rūgštis;
HDPE – didelio tankio polietilenas;
H₂O – vanduo;
LDPE – mažo tankio polietilenas;
LLDPE – linijinis mažo tankio polietilenas;
MAPE – maleino rūgšties anhidrido polietilenas;
MIDF – mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas;
PBA – polibutileno adipatas;
PBAT – polibutileno adipato-tereftalatas;
PBS – polibutileno sukcinatas;
PBT – polibutileno tereftalatas;
PC – polikarbonatas;
PCL – polikaprolaktonas;
PE – polietilenas;
PEA – poliesteramidai;
PET – polietileno tereftalatas;
PHA – polihidroksialkanoatai;
PHB – polihidroksibutiratai;
PHV – polihidroksivaleratas;

PLA – polilaktinė rūgštis;
PMMA – akrilas;
POM – acetalas;
PP – polipropilenas;
PPO – polifenilenas;
PS – polistirenas;
PUR – poliuretanas;
PTFE – politetrafloretilenas;
PVA – polivinilo alkoholis;
PVC / PVDC – polivinilchloridas;
PVOH – polivinilo alkoholis;
SUP – vienkartiniai plastikai;
TPS – termoplastinis krakmolas;

Ivadas

Plastikas yra viena labiausiai paplitusių pakavimo medžiagų. Plastiko metinė produkcija pasaulyje 2019 m. siekė 368 milijonus tonų^[50]. Įprastas plastikas kelia didelį susirūpinimą dėl vizualinės taršos ir ypač dėl neigiamo poveikio aplinkai – 2018 m. plastiko atliekos pasiekė 29,1 mln. tonų ir, atsižvelgiant į žmonių populiacijos augimo ir vartojimo įpročių tendencijas, šis skaičius turėtų augti^[9]. Didžiausią problemą kelia vienkartinis pakuočių naudojimas ir nepakankamas perdirbimas. 2018 m. plastiko pakuočių perdirbimas EU siekė 41,5 %, o ~60 % – patenka į deginimo įrenginius, sąvartynus arba patenka į aplinką^[54].

Pastaraisiais metais ypatingas dėmesys yra skiriamas tvarioms pakuočių medžiagoms iš atsinaujinančių išteklių ir aplinkai draugiškesnių pakuočių atliekų tvarkymo scenarijų, tokių kaip mechaninis, cheminis ir biologinis perdirbimas, tobulinimui. Biologinės kilmės medžiagos yra alternatyva įprastiems plastikams. Jų poveikis aplinkai lyginant su iškastinio kuro plastikais yra mažesnis. Pagrindiniai privalumai, keičiant įprastas plastikines pakuotes į pagamintas iš atsinaujinančių medžiagų šaltinių, yra iškastinio kuro išsaugojimas, CO₂ emisijos poveikio klimato pokyčiams mažinimas^[45] ir plastiko taršos sukeliama neigiamo poveikio maisto produktų grandinei mažinimas.

Biologinės kilmės plastikai yra visiškai arba iš dalies pagaminti iš atsinaujinančių biologinių išteklių. Pakuočių gamyboje dažniausiai naudojami bioplastikai iš krakmolo mišinių, *PLA*, *bio-PET* ir *bio-PE*. Tuo tarpu monopolietilenas (*PE*), monopolipropilenas (*PP*) ir *PE/PP* mišiniai yra populiariausios iš iškastinio kuro gaminamos kietųjų ir lanksčiųjų pakuočių medžiagos. Šios medžiagos sudaro didžiausią dalį vartotojams tenkančių lanksčių pakuočių atliekų srauto – 70–80 %^[39].

Šiame darbe bus nagrinėjama konvencinių ir biologinės kilmės lanksčių pakuočių mechaninių savybių tyrimas ir jų poveikio aplinkai vertinimas, siekiant įvertinti technologines galimybes pakeisti iš iškastinio kuro pagamintą plastiką į biologinės kilmės.

Darbo tikslas – įvertinti sintetinio plastiko lanksčiosios pakuotės alternatyvių medžiagų iš atsinaujinančių šaltinių (lanksčiųjų pakuočių iš biologinės kilmės plastiko) technologinio pritaikymo galimybes ir poveikį aplinkai.

Tyrimo uždaviniai:

1. išanalizuoti atliktas mokslines publikacijas, susijusias su sintetinių plastikų ir biologinės kilmės polimerinių medžiagų savybių ir charakteristikų tyrimais;
2. atlikti sintetinių ir biologinės kilmės lanksčių pakuočių fiziko–mechaninių savybių (atsparumo tempimui tyrimą), siekiant įvertinti šių medžiagų technologinio pritaikymo egzistuojančiuose pramoniniuose procesuose galimybes;
3. išanalizuoti ir įvertinti sintetinių ir biologinės kilmės polimerų poveikį aplinkai, taikant būvio ciklo įvertinimo metodiką;
4. apibendrinti atliktų tyrimų rezultatus, pateikti išvadas ir rekomendacijas.

1. Konvencinių plastikų ir biopolimerų apžvalga, panaudojimo, savybių ir atliekų tvarkymo tendencijos

1.1. Konvencinių plastikų ir biopolimerų klasifikacija

Direktyvoje dėl tam tikrų plastikinių gaminių poveikio aplinkai mažinimo pateikiamas apibrėžimas: „**Plastikas** – 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.“^[7]

Direktyvoje dėl cheminių medžiagų registracijos, įvertinimo, autorizacijos ir apribojimų pateikiamas apibrėžimas: „**Polimeras** – junginys, susidedantis iš pasikartojančių vienodų ar skirtingų monomerų grupių (monomerinių grandžių) molekulių. Tokios molekulės turi būti pasiskirsčiusios tam tikrame molekulinio svorio diapazone, kuriame jų molekulinio svorio skirtumai iš esmės priklauso nuo monomerinių grandžių skaičiaus.“^[40]

Be cheminių plastikų polimerų struktūrų, yra keletas kitų svarbių charakteristikų, įskaitant molekulinę masę, termoplastiškumą ir termoreaktingumą bei kristališkumą. Polimero molekulinė masė yra atskirų atomų, sudarančių molekulę, atomų masės suma. Visų tam tikros rūšies polimero molekulių molekulinė masė nėra tokia pati. Yra molekulinės masės diapazonas arba pasiskirstymas. Kuo didesni molinės masės sklaidos indeksas, tuo platesnis molekulinės masės pasiskirstymas. Molekulinės masės intervalas gali paveikti plastikinių medžiagų savybes. Tam tikri plastikai paprastai yra mažos molekulinės masės polimerai, o molekulinė masė gali paveikti skvarbumo savybes^[27].

Polimerai klasifikuojami pagal kilmę (gamtiniai, pvz., celiuliozė, krakmolas, dirbtiniai, pvz., viskozė ir sintetiniai), paskirtį, savybes bei naudojimą (plastikai ir pluoštai)^[23].

1.1.1. Polimerų klasifikacija pagal žaliavos kilmę

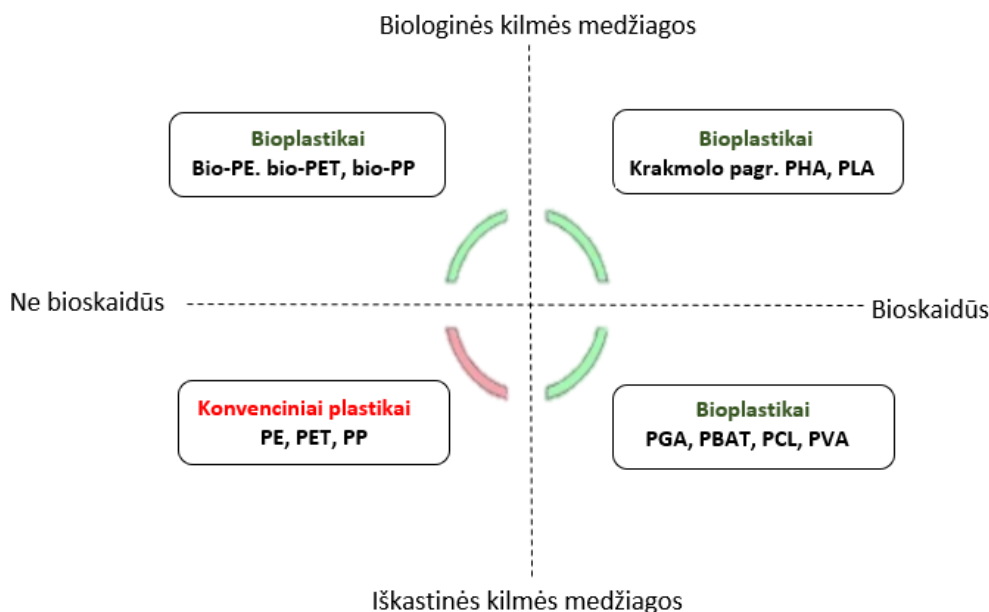
Polimerai pagal žaliavos kilmę yra klasifikuojami į dirbtinės (sintetinės) ir biologinės (gamtinės) kilmės.

Sintetiniai polimerai – tai iš monomerų (mažamolekulių junginių) gauti polimerai^[23]. Daugiausia gaminami iš naftos žaliavos. Sumaišius plastomerus su įvairiais priedais, pvz. plastifikatoriais ar dažikliais, gaunami plastikai^[23], kurie lengvai formuojami ir jų neveikia korozija.

Biologinės kilmės skaidus plastikas – tai tam tikros rūšies plastikas, kurio savybės gali atitikti naudojimo reikalavimus ir išlikti nepakitusiu, tačiau po naudojimo natūraliomis aplinkos sąlygomis gali suirti į aplinkai nekenksmingas medžiagas. Skaidymo principas yra tas, kad gamtoje esantys mikrobai (bakterijos, grybai, dumbliai ir kt.) gali suskaidyti į medžiagas (CO₂, H₂O, CH₄ ir biomasę), kurios integruojasi į natūralią ekosistemą^[47].

Biopolimerai skirstomi į tris pagrindines grupes:

- biologinės kilmės ir biologiškai skaidūs;
- biologinės / dalinai biologinės kilmės ir biologiškai neskaidūs;
- iškastinio kuro pagrindu ir biologiškai skaidūs^[1]. 1 paveiksle pateikta polimerų klasifikacija^[1].



1 pav. Polimerų klasifikacija pagal kilmę ir skaidomumą ^[1]

Biopolimerai, kurie gaminami iš atsinaujinančių išteklių ir yra biologiškai skaidomi, pvz., plastikas iš krakmolo, celiuliozės polimerai, baltymai, lignino ir chitozano plastikai, polilaktinė rūgštis (*PLA*), polihidroksi alkanoatai (*PHA*), bet taip pat polihidroksibutiratai (*PHB*), polihidroksivaleratas (*PHV*) ir jų kopolimerai skirtingais procentais ^[48].

Biopolimerai, kurių pagrindas yra naftos išteklių ir kurie yra 100% biologiškai skaidomi, pvz., polikaprolaktonas (*PCL*), polibutileno sukcinatas (*PBS*), polibutileno adipatas (*PBA*), polibutileno adipato-tereftalatas (*PBAT*) ir polivinilo alkoholis (*PVOH*) ^[48].

Biopolimeras, gautas naudojant monomerus, gautus iš mišrių biologinių ir naftos išteklių, pvz., poliesterius, gautus iš naftos tereftalio rūgšties ir biologiškai gauto etanolio, 1,4-butandiolio ir 1,3-propandiolio, pvz., polibutileno tereftalata (*bio-PBT*), politimetileno tereftalata (*bio-PTT*), polietileno-ko-izorbuto tereftalatas (*bio-PEIT*), poliuretanai (*PUR*) ir epoksidinės dervos (termoreaktingas plastikas) ^[48].

1.1.2. Polimerų klasifikacija pagal savybių kitimą veikiant temperatūrai

Šildant plastikus, jų savybės keičiasi ir pagal tai jie skirstomi į termoplastinius ir reaktoplastinius polimerus ^[23].

Reaktoplastiniai polimerai – kaitinant ir ilgiau palaikant aukštesnėje temp. jie negrįžtamai sukietėja. Pakartotinai kaitinant, jie jau nebeminkštėja. Pvz., *PUR*, silikono, epoksidinės ir fenolinės dervos, taip pat akrilas. Jie nėra tinkami pakartotinai perdirbti ^[23], ^[35].

Termoplastiniai polimerai – kaitinat, minkštėja ir tampa lengvai formuojami. Aušinant vėl sukietėja ir atgauna pradines savybes. Pvz., *PE*, *PA*, *PP*, *PC*, *PS*, *EPS*, *PET* ir *PVC*. Dėl tokio elgesio plastikus galima formuoti liejimo būdu ar presuoti, taip pat perdirbti ir pakartotinai panaudoti atliekas ^[27], ^[35].

Termoplastikai dar klasifikuojami pagal jų kristališkumą arba tvarkos laipsnį bendroje polimero struktūroje. Kai kurie plastikai gali būti visiškai amorfiški (pvz. *PVC*, *PS*, *PC*, *PMMA*, *ABS*, *PPO*) arba kristaliniai (pvz., *PE*, *PP*, *PA*, *POM*, *PTFE*). Kristališkumo laipsnis priklauso nuo polimero ir nuo jo apdorojimo technikos. Kai kurie polimerai, tokie kaip polietilenas, greitai kristalizuojasi ir pasiekia aukštą kristališkumą. Kiti, pavyzdžiui, *PET*, kristalizacijai reikia lėto aušinimo. Kristaliniai ir amorfiniai plastikai turi keletą būdingų skirtumų. Kristaliniai polimerai turi lydymosi temp., nes tik iki šios temp. yra kristalinės, kietos medžiagos, o amorfiniai polimerai turi stiklėjimo temperatūrą, tai temp., kai polimeras pasikeičia iš kieto ir trapaus, į minkštą ir lankstų. Kristaliniai plastikai pasižymi geresniu cheminiu atsparumu, didesniu stabilumu aukštesnėje temperatūroje. Amorfiniai plastikai paprastai turi didesnę atsparumą smūgiams, mažiau deformuojasi nei kristalinės medžiagos [27].

1.1.3. Konvencinių plastikų ir biopolimerų fizikinės–mechaninės savybės

Pagrindinės plastikų fizikinės–mechaninės savybės yra tankis, tirpumas, lankstumas, atsparumas tempimui, trinties jėgai, pradūrimui, lydymosi temp. ir kt. savybės.

Plastikų savybės yra svarbios parenkant polimerą įvairioms pakuotėms ar produktams gaminti. Pagrindiniai reikalavimai pakuotėms: barjerinės savybės (kad deguonis, vanduo, šviesa, skonis, aromatas ar riebalai nepatektų į pakuotę arba neišeitų iš jos), pralaidumas (leisti deguoniui ir anglies dioksidui prasiskverbti pro pakuotę apskaičiuotu greičiu, kad būtų ilgesnis produktų galiojimo laikas), atsparumas (svarbu gabenant ir laikant, kad pakuotės nesuplyštų, būtų atsparios smūgiams, pradūrimui), sandarumas, apdirbamumas bei išvaizda [4]. Tokios medžiagos kaip celofanas, *PE*, *PP*, poliesterio plėvelės yra puikios priemonės užkirsti vandens garų patekimui į produktą ar iš jo. Šios medžiagos dažnai naudojamos daugiasluoksnių plėvelių išoriniuose sluoksniuose. Kiti produktai, pvz., šviežios daržovės, turi kvėpuoti, kad būtų išvengta vandens kondensacijos ar pelėsio atsiradimo. Šiems produktams puikiai tinka tokios medžiagos kaip poliolefino plastomerai ir tam tikros rūšies celofanas [29].

Mechaninės savybės, tokios kaip klampumas, deformacija, stabilumas, lydymosi indeksas ir kt., yra svarbios gaminant aukštos kokybės produktus. Pvz., biopolimerų optinis grynumas ir molekulinė masė turi įtakos poli (pieno rūgšties) mechaninėms savybėms. Pavyzdžiui, elastingumas ir tempimas padidėja esant didesnei molekulinei masei. Be to, *PLA* reikia trumpo apdorojimo laiko, nes apdorojimo metu, ilgai veikiant aukštai temperatūrai, susidaro laktidas, dėl kurio sumažėja lydalo elastingumas ir klampa. Norint išvengti tokios reakcijos, jų molekulinė masė paprastai yra didinama. *PLA* mechaninės savybės panašios į *PET* plastiko. Polihidroksialkanoatai paprastai yra trapūs, mažai pailgėja ir lengvai suplėšomi, nes jie susidaro sudarydami trumpo ilgio monomerus, todėl tik didėjant grandinės ilgiui, komponentas tampa lankstesnis [15]. Pagrindinės plėvelių mechaninės savybės nustatomos atliekant tempimo ir gniuždymo bandymus:

- *Tempimo bandymai* atliekami ištempiant bandinį ir išmatuojant bandiniui skirtą apkrovą. Tai atliekama naudojant tempimo mašiną. Žinant mėginio matmenis, apkrovos ir deformacijos duomenis galima paversti įtempimo ir deformacijos kreive. Iš šios kreivės galima išgauti įvairias tempimo savybes. Pagal tempimo savybę, plastikai gali būti skirstomi: trapus (pvz., *PS*, akrilas), standus ir stiprus (pvz., *ABS*, polikarbonatas, poliamidai), standus ir kietas (pvz., modifikuoti poliamidai, *PS*) bei minkštas ir tvirtas (pvz., elastomerai) [19], [28], [26].

- *Gniuždymo bandymas* atliekamas norint įvertinti medžiagos tvirtumą ir stiprumą ir įvertinus gautus rezultatus, parenkama pakuotės konstrukcijos forma ir dydis ^[19]. Atsižvelgiant į paskirtį ir funkcionalumą, įvairias polimerines medžiagas galima pasirinkti atsižvelgiant į jų fizikines ir mechanines savybes. 1 lentelėje pateiktos kai kurių polimerų fizikinės–mechaninės savybės ^[22].

1 lentelė. Kai kurių polimerų fizikiniai–mechaniniai parametrai ^[22]

Eil. Nr.	Polimero rūšis	Tankis (g/cm ³)	Lydimosi temp. (°C)	Tamprumo modulis, E (GPa)	Tempimo stipris, σ (MPa)	Pailgėjimas (%)
1	LDPE	0,910–0,925	105–116	0,055–0,38	40–78	90–800
2	HDPE	0,94–0,96	120–140	0,4–1,5	14,5–38	2–130
3	PP	0,899–0,920	160–176	0,95–1,77	26–41,4	15–700
4	PC	1,2	155	2,1–3,5	55–70	200
6	PS	1,04–1,06	110–135	4–5	25–69	1–2,5
7	PLA	1,21	177–180	2,8	45	3
8	PET	1,3–1,4	280	2,1–2,8	55–60	1,5
9	PHB	1,25	168–172	1,7–2	24–27	6–9
10	Nailonai	1,1	215	1,3–3,5	55–90	20–50
11	PE	0,9–1,0	180	0,7–1,4	20–35	350
12	Linų pluoštas (45 %) + PLA	–	–	27–30	>300	–
13	6 sluoksnių linų pluoštas (24,82 %) + epoksidai	–	–	10,40	142	–
14	Bambuko pluoštas (35 %) + PLA	–	–	5,92	80,64	–
15	Kanapių pluoštas (40 %) + PHB	–	–	–	50–100	–

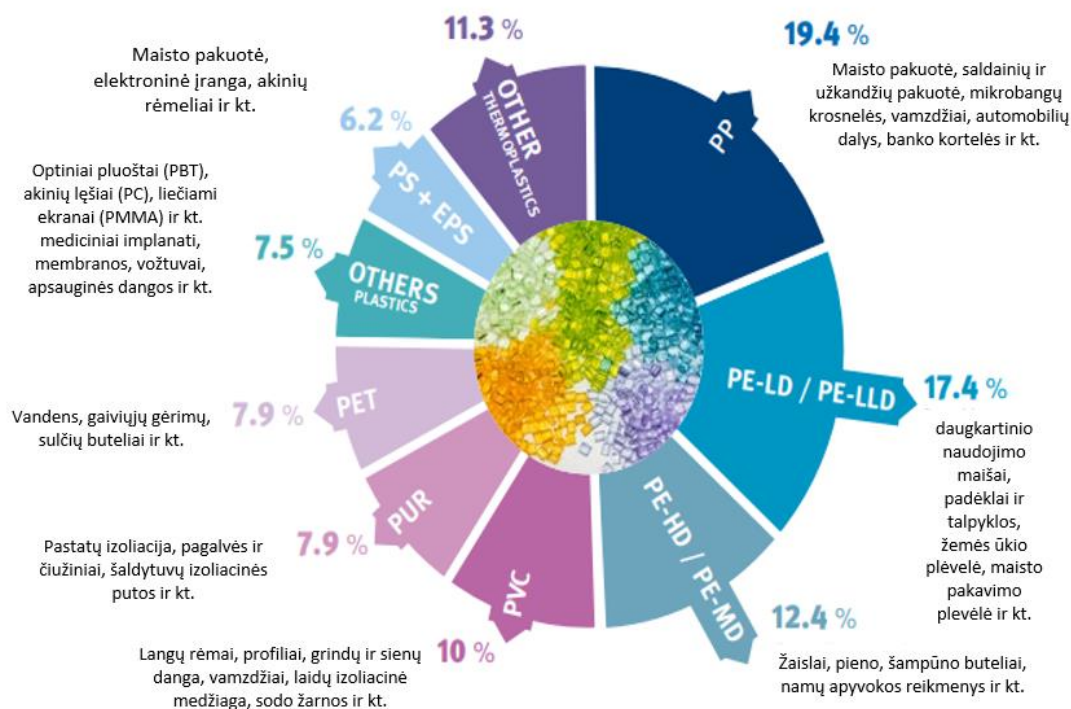
Tempimo stipris priklauso nuo polimero kokybės. Remiantis 1 lentelės duomenimis, natūralaus pluošto pridėjimas, pagerina polimero atsparumą tempimui. Geriausias atsparumas tempimui pastebimas *PLA*, kuriame yra 45 % linų pluošto.

1.1.4. Klasifikacija pagal panaudojimo sritis

Dėl lengvos gamybos, mažų sąnaudų, pralaidumo ir atsparumo cheminėms medžiagoms, temperatūrai ir šviesai, plastikai naudojami įvairiuose gaminiuose ir pakeitė daugybę kitų medžiagų, tokių kaip mediena, popierius, akmuo, oda, metalas, stiklas ar keramika. Šiuolaikiniame pasaulyje plastiką galima rasti komponentuose, pradedant nuo stacionarių daiktų ir baigiant kosminiais laivais ^[35].

Plastikai gaunami iš naftos, naudojami įvairiems tikslams. Septyni polimerų tipai apytiksliai padengia du trečdalius visos plastiko paklausos įvairiuose srityse (pakavimas, statyba, automobiliai, elektra ir elektronika ir kt.). Tai yra polistirenas (*PS*), polivinilchloridas (*PVC*), mažo tankio polietilenas (*LDPE*), didelio tankio polietilenas (*HDPE*), linijinis mažo tankio polietilenas

(LLDPE), polipropilenas (PP) ir polietileno tereftalatas (PET). 2 paveiksle pateiktas bendras plastikų pasiskirstymas ir pritaikymas Europoje 2019 m. [9], [48].



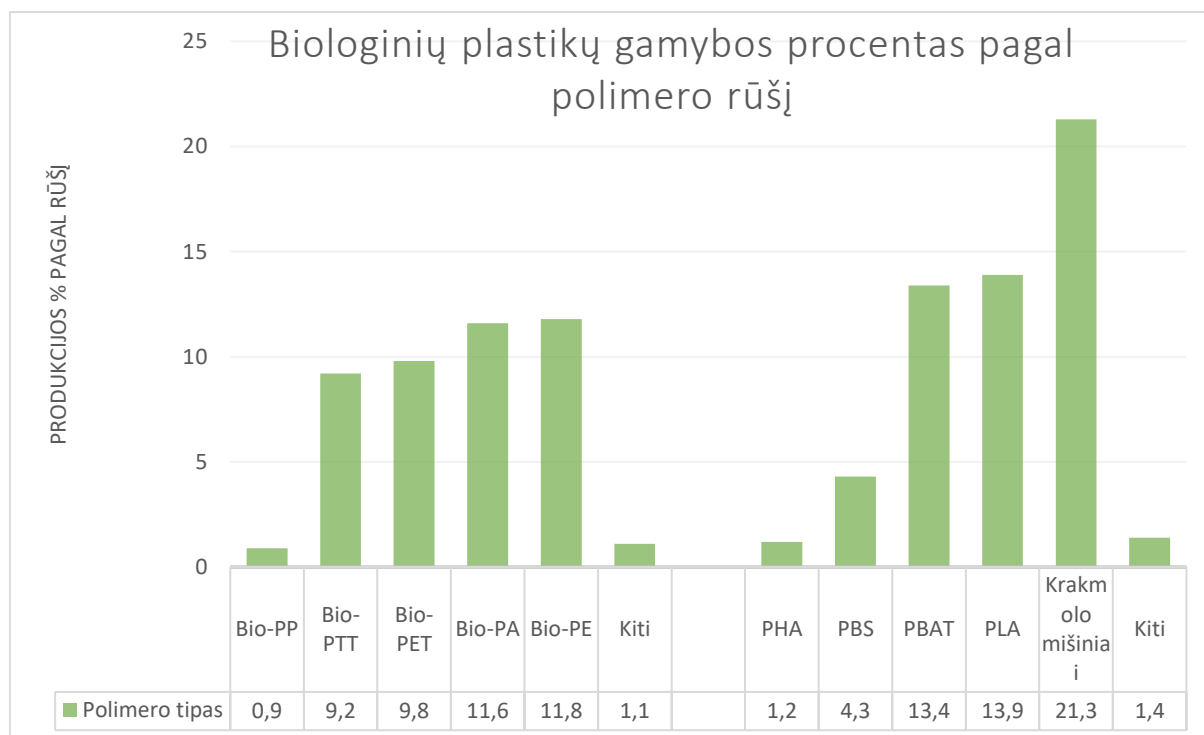
2 pav. Bendras plastikų pasiskirstymas ir pritaikymas 2019 m. [9]

Plastikai yra dažniausiai naudojama pakuočių medžiaga (39,6 % plastiko naudojama pakuočių pramonėje) [9].

Lanksčios pakuotės suprojektuotos ir pritaikytos įvairiems maisto produktams supakuoti. Maisto pramonėje galima pritaikyti tokias lanksčias pakuotes, kurios atitiktų įvairius reikalavimus, pvz., kad sausainiai išliktų traškūs ir švieži, pyragai drėgni, o duona minkšta. Lanksti pakuotė taip pat naudojama šviežiai ir apdorotai mėšai, žuviai ar paukštienai įvynioti. Vakuuminės pakuotės labai populiarios didelėje šio sektoriaus dalyje. Pakuotės gali būti didelio dydžio ir atsparios pradūrimui ar lengvai perkeliama, pvz., maišeliai ankštiniams augalams ar ryžiams. Prekybos centruose išpopuliarėjo vaisiai ir daržovės aptraukti lanksčia pakuote, pvz., agurkai. Lanksti pakuotė pasižyminti geromis barjerinėmis savybėmis yra geras sprendimas išlaikyti šaldytus maisto produktus ir ledus šviežius, tuo pačiu metu užkertant kelią kvapams. Lankstūs maišai yra tvirti ir gali ilgai išbūti žemoje šaldiklio temperatūroje. Ne tik maisto pramonėje, bet ir kituose produktuose plačiai naudojama lanksti pakuotė. Pvz., maišai ir maišeliai, pagaminti iš visų tipų lankstaus plastiko ir aliuminio folijos, yra naudojami pakauti viską, pradedant guminėmis pirštinėmis, baterijomis, spausdinimo kasetėmis ir t. t. Daugelyje sričių lanksčios pakuotės naudingos ir plačiai naudojamos [55].

Kai kurie pagrindiniai rinkos segmentai, kuriuose naudojama koekstruduota plėvelė: medicininė pakuotė, maisto pakuotės, sunkių produktų transportavimo krepšiai (trašos, chemikalai, naminių gyvūnėlių ėdalas ir kt.), vyniojimo plėvelė, šiukšlių maišai ir kt. [4].

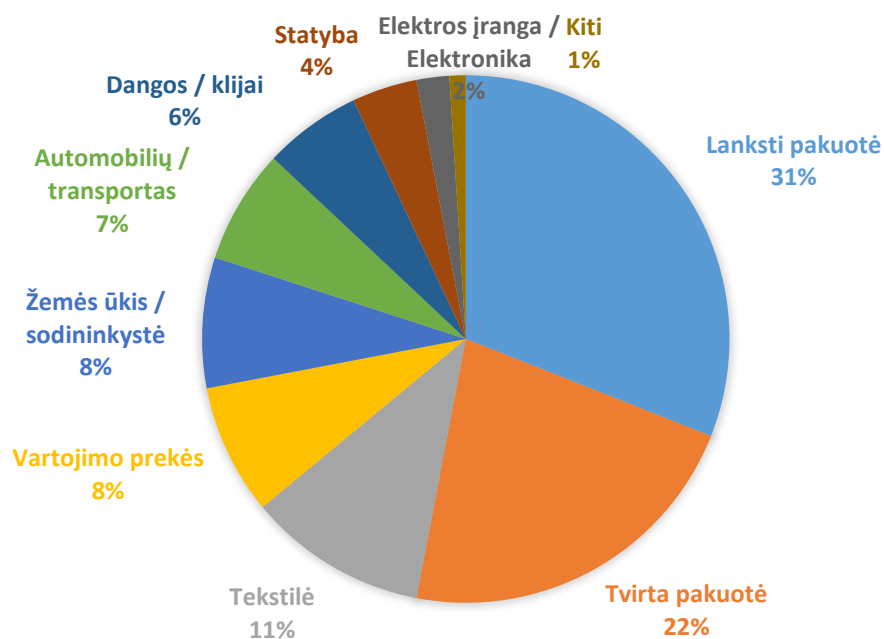
Biologinės kilmės plastikų naudojimas ir gamyba kiekvienais metais auga.. Neskaidžių biologinės kilmės plastikų pasauliniai gamybos pajėgumai 2019 m. sudarė apie 45 %, o biologiškai skaidžių plastikų – apie 55 % viso kiekio, kaip parodyta 3 paveiksle ^[48], ^[11].



3 pav. Biologinių plastikų gamybos procentas pagal rūšis 2019 m. ^[11]

Dėl gero biologinio skaidumo BP dažniausiai naudojami kaip minkštos maisto pakavimo medžiagos. Geriausiai parduodami produktai yra šiukšlių maišai, minkštos pakuotės. Ateityje pagrindinė BP rinka yra plastikinė pakavimo plėvelė, žemės ūkio plėvelė ir vienkartinis plastikinis maišelis. Palyginti su įprastomis naftos pagrindu pagamintomis plastikinėmis medžiagomis, BP kaina yra šiek tiek didesnė, tačiau žmonės nori rinktis naujus BP su didesne kaina, kad sumažintų poveikį aplinkai. Todėl BP pramonė turi didžiulę plėtros perspektyvą ir plačią taikymo rinką ^[47].

Didžiausia biologinės kilmės plastikų naudojimo sritis yra pakuotės (> 50 %, iš kurių lanksti pakuotė sudaro 31 %), po jų seka tekstilė, žemės ūkis ir sodininkystė, automobilių ir transporto prekės, dangos ir klizai, statyba, elektra ir elektronika ir kiti. Biologinės kilmės plastikų procentinis pasiskirstymas Europoje 2019 m. pateiktas 4 paveiksle ^[48].



4 pav. Biologinės kilmės plastikų pasiskirstymas Europos rinkoje 2019 metais ^[48]

Biologinis skaidumas yra bruožas, kurio dažnai siekiama ieškant greitai gendančių maisto produktų pakuočių. Lankstūs pakavimo sprendimai, tokie kaip plėvelės ir padėklai, ypač tinka šviežiams produktams, tokiems kaip vaisiai ir daržovės, nes jie suteikia ilgesnį galiojimo laiką. Maisto pakavimo reikalavimai yra tokie patys įvairūs ir jų yra daug, nes yra įvairių rūšių maisto. Šiandien pakavimo medžiagos ir procesai yra labai sudėtingi ir lengvai pritaikomi, kad atitiktų specifinius pritaikymo ir konservavimo poreikius. Kai reikia apsaugoti maistą ir pailginti galiojimo laiką, biologinės kilmės plastiko pakuočių savybės yra panašios į esamos įprastos pakuotės ir kartais net geresnės ^[10].

Pakuočių gamyboje biopolimerai susilaukė daug dėmesio, daugiausia dėl jų fizinių savybių, leidžiančių keisti molekulinę masę, cheminę sudėtį ir perdirbimo sąlygas. Įvairių biopolimerų (pvz. krakmolo ir celiuliozės) savybės yra gana puikios, palyginti su savybėmis, pastebimomis sintetiniuose plastikuose ^[47]. Biopolimerų panaudojimas lanksčių pakuočių gamybai pateiktas 2 lentelėje ^[13].

2 lentelė. Biopolimerų panaudojimas lanksčių pakuočių gamyboje ^[13]

	PLA	PHA	PBS	Celiuliozinė medžiaga	Mišiniai					Bio-PE	Bio-PET
					Krakmolos	PBS	PHA	PLA	PBAT		
Lanksčios pakuotės											
Maišelis	+	-	+	+	++	+	+	++	++	++	+
Skaidri plėvelė	++	-	-	++	-	+	-	++	-	++	++
Išorinės pakuotės	-	-	+	++	++	+	+	++	+	++	-
Tampri plėvelė	-	-	-	-	-	-	-	-	+	++	-

	PLA	PHA	PBS	Celiuliozinė medžiaga	Mišiniai					Bio-PE	Bio-PET
					Krakkolas	PBS	PHA	PLA	PBAT		
Susitraukianti plėvelė	+	-	-	-	-	-	+	+	++	+	+
Pirkinių / šiukšlių maišai	-	-	-	-	++	++	++	++	++	++	-
Tinkleliai	-	-	-	-	+	++	+	++	+	++	-
Etiketės	+	+	-	-	+	+	+	+	++	++	+

++ labai tinkamas; + dalinai arba gerai tinkamas

Kaip matyti iš pateiktos 2 lentelės duomenų, biopolimerai yra plačiai taikomi lanksčių pakuočių gamyboje, tačiau dėl specifinių savybių, jie nėra pritaikomi visoms lanksčioms pakuotėms. *PLA* tinkama skaidrių, susitraukiančių plėvelių, maišelių ir etikečių gamybai, o *PHA* tinkamas tik etiketėms. Taip pat galima pastebėti, kad biopolimerų mišiniai yra labiau pritaikomi lanksčių pakuočių gamyboje nei atskiri biopolimerai.

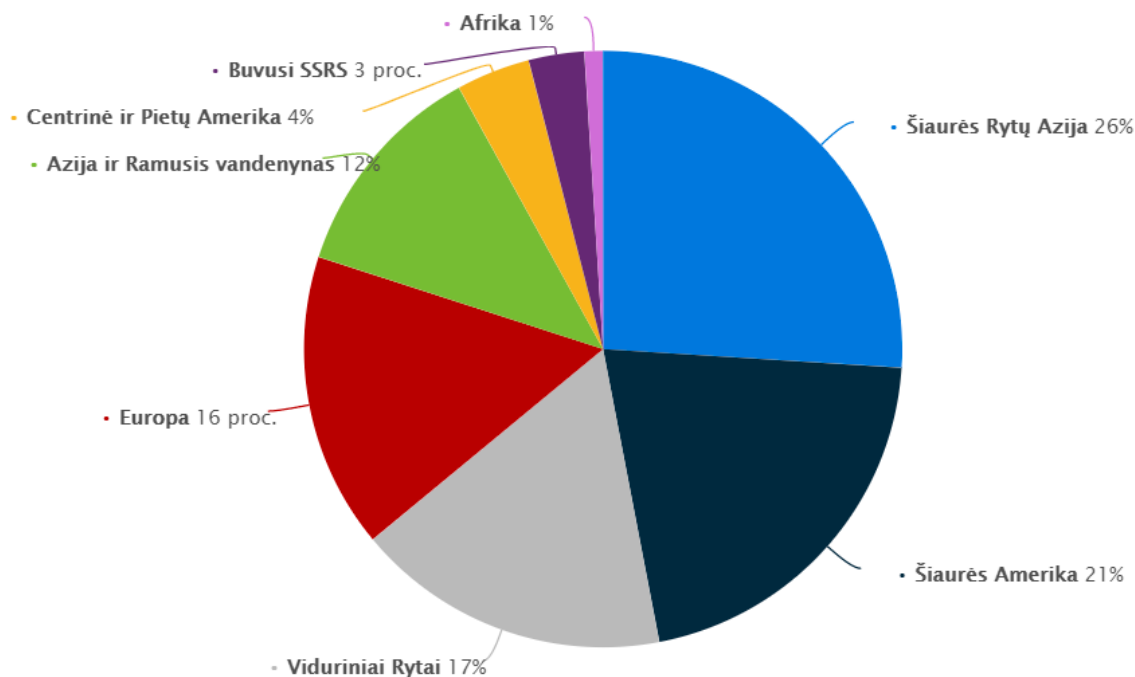
Biologinės kilmės skaidomi polimerai turi specifinių pranašumų žemės ūkyje ir sodininkystėje. Mulčiavimo plėvelės šiuose sektoriuose paprastai sparčiai žengia į priekį. Mulčiavimo plėvelių užkasimas po naudojimo, o ne surinkimas iš lauko, yra praktiškas ir ekonomiškumas sprendimo būdas. Biologiškai skaidomos mulčiavimo plėvelės šiandien yra labai gerai pritaikytos. Kitos perspektyvios žemės ūkio ir sodininkystės programos: bananų krūmų plėvelės, kurios turi apsaugoti nuo dulkių ir aplinkos poveikio, kurių po naudojimo nebereikia pašalinti ^[10].

Biologinės kilmės skaidomas plastikas taip pat suteikia galimybių prekiauti vazonais. Augalų vazonai yra geras pavyzdys. Nuskynus augalus, viską, įskaitant plėvelę, galima kompostuoti. Taip pat yra gėlių svogūnėlių, kuriuos supakuotus galima tiesiogiai pasodinti į dirvą. Pakuotė greitai išsisklaido, tada gali prasidėti augalų augimas ^[10].

1.2. Plastiko pakuotės

Direktyvoje dėl pakuočių ir pakuočių atliekų pateikiamas apibrėžimas: „**Pakuotė** – iš bet kurios rūšies medžiagų padaryti gaminiai, skirti prekėms, pradedant žaliavomis ir baigiant perdirbtomis produktais, izoliuoti, apsaugoti, tvarkyti, pristatyti ir pateikti iš gamintojo naudotojui ar vartotojui. Tais pačiais tikslais naudojami "negražintini" daiktai taip pat laikomi pakuotėmis.“ ^[53].

Direktyvoje dėl tam tikrų plastikinių gaminių poveikio aplinkai mažinimo pateikiamas apibrėžimas (angl. *single used plastic*, sutrumpinimas *SUP*): „**Vienkartinis plastikinis gaminy**s – vien arba iš dalies iš plastiko pagamintas gaminy, kuris nėra sukurtas, suprojektuotas ar pateiktas rinkai taip, kad per jo gyvavimo trukmę jį būtų galima panaudoti daugelį kartų ar ciklų, gražinant jį gamintojui pakartotinai užpildyti, arba pakartotinai panaudoti tam pačiam tikslui, kuriam jis buvo sukurtas.“ ^[7]. Vienkartinio plastiko daugiausiai gaminama Šiaurės Rytų Azijoje (26 proc.), o Europoje – 16 proc. (žr. 5 pav.) ^[49].



© „Statista“ 2021

5 pav. Pasaulinis vienkartinio plastiko gamybos pasiskirstymas 2014 m. pagal regionus ^[49]

Didėjanti *SUP* paklausa prisidėjo prie pasaulinio plastiko gamybos lygio, kuris 2019 m. pasaulyje siekė ~ 368 mln. tonų, iš kurių *SUP* produktai sudarė 50 % visos produkcijos ^[9], ^[36]. Dauguma *SUP* pašalinami į sąvartynus arba sudeginami, todėl prarandama vertinga žaliava. *SUP* veikiamas UV spinduliuotės, šilumos ir mechaninio poveikio skyla į mažus gabalėlius, kurių skersmuo mažesni nei 5 mm (mikroplastikus) ^[6].

Siekiant padaryti plastiką lankstesnį ir lengvai apdorojamą, vienkartinuose plastikuose plačiai naudojami plastifikatoriai, tokie kaip ftalatai arba ftalio rūgšties esteriai (angl. *PAE*) ^[6]. Vienkartiniai plastikai dėl savo ekonomiško ir universalumo yra plačiai naudojami prekybos centruose, pakavimo pramonėje. Dažnai naudojamos cheminės medžiagos, esančios *SUP*, išvardintos 3 lentelėje ^[6].

3 lentelė. Cheminės medžiagos *SUP* produktuose ^[6]

Plastikinis gaminys (polimeras)	Pavojingų cheminių medžiagų kiekis, mg/kg
1) plastikiniai maišeliai, (2) PVC maišeliai, (3) PVC plėvelės,	(1) Σ DEHP, DEP, BBP, DBP, DnOP, DMP (2) HDEHP, DEP, BBP, DBP, DnOP, DMP (3) Σ DEHP, DEP, BBP, DBP, DnOP, DMP
Maisto pakuotės (PVC)	DEHP, DBP
Maisto pakuotės (HDPE, PE, PP, PVDC, PS, PET)	DBP, DEHP
Greito maisto pakuotė (PP, PS, GPPS, PE plėvelė)	DEHP

Be plastifikatorių, plastikiniuose vienkartinuose produktuose yra cheminių medžiagų, tokių kaip antioksidantai, šilumos stabilizatoriai ir kt., kurie gali migruoti terminio apdorojimo ir laikymo metu. Pvz. acto rūgštis gali sukelti ūmų toksiškumą (bandymas su pelėmis) ^[6].

SUP miesto ir kaimo aplinkoje patenka į lietaus kanalizacijas, taip mažina nuotekų pratekėjimą. Nustatyta daug sužalojimų ir mirties atvejų tiek sausumos, tiek vandens gyvūnams. Pavojingos cheminės medžiagos, išsiskiriančios iš *SUP* atliekų, užteršia aplinką, laukinę gyvūniją bei gali turėti neigiamą poveikį žmonių sveikatai. Gyvūnai praryja plastiką (tiesiogiai valgo) arba gyvūnai ėda grobį, kuris prarijo plastiką, arba atsitiktinis nurijimas gali sukelti rimtą poveikį gyvūnams, ypač laukinei gamtai. Susipainiojus plastiko atliekose ir prarijus plastiką, žūsta jūros paukščiai, o *SUP* dažniausiai būna kaltininkai. Tyrimais nustatyta, kad > 45 % iš 367 jūrų paukščių rūšių yra suvalgę plastiką. Tyrimų duomenis, plastikinius maišelius praryja delfinai, taip pat vėžliai, kurie supainioja su maistu ^[6].

Pagrindiniai *SUP* atliekų šaltiniai yra pramonė, turizmas, rekreacinė veikla, namų ūkiai, nepakankamai išvalytos nuotekos, neapsaugoti sąvartynai, žuvininkystė, komercinė ir pramoginė laivyba. Nors plastiko atliekų fragmentai gali sklandyti ore, galiausiai jie atsiduria dirvožemyje arba plūduriuoja ant vandens ar nuskęsta ir galiausiai daro neigiamą poveikį aplinkai ^[6].

SUP maišai ir žemės ūkio mulčiavimo plėvelės likučiai yra pagrindinis dirvožemio taršos šaltinis. Mulčiavimo plėvelė buvo plačiai naudojama, nes padidina augalininkystės produkciją ir pajamas, išlaikydama drėgmę, taip tausodama vandens išteklius. Nustatyta, kad plastikinės plėvelės likučiai dirvožemyje sumažina vandens pasisavinimo efektyvumą, sumažina maistinių medžiagų pasisavinimą, dėl to sumažėja derlius. Plėvelėse dažniausiai naudojami priedai *PAE*, kurie buvo rasti daržovėse, vaisiuose ir grūduose ^[6].

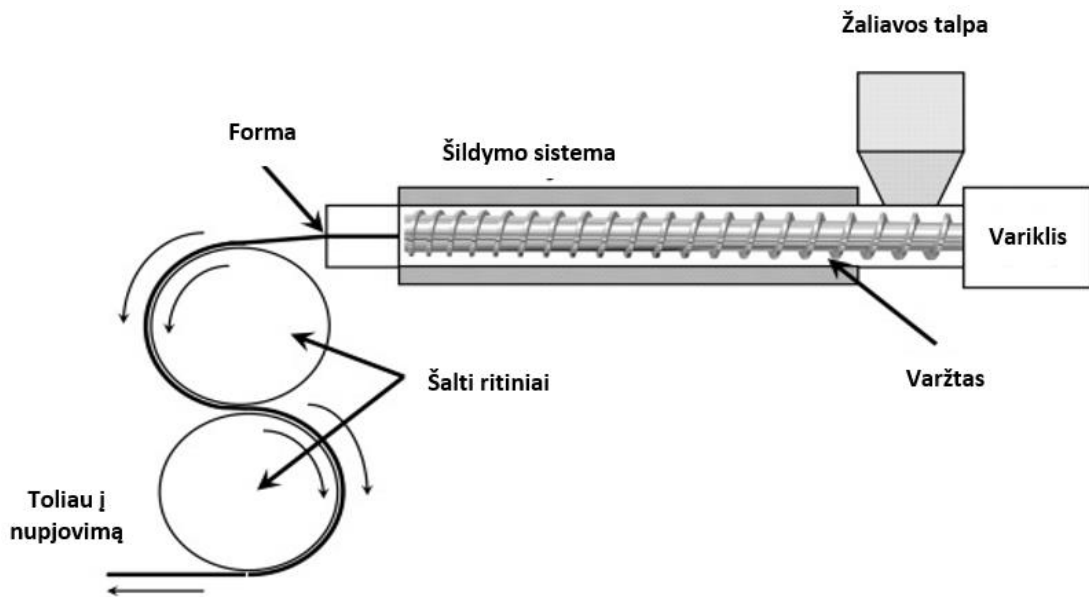
SUP dažniau pateks į aplinką, jūrą, nei daugkartiniai plastikai, todėl siekiant kovoti su taršos problema, buvo priimti teisės aktai. Pagal ES direktyvą „dėl plastikinių gaminių poveikio aplinkai mažinimo“, vienkartiniai plastikiniai gaminiai bus uždrausti nuo š. m. Liepos 3 d. Šis draudimas bus taikomas stalo įrankiams, lėkštėms, šiaudeliams ir kt. Toks sprendimas priimtas norint pereiti prie žiedinės ekonomikos, kurioje pirmenybė teikiama pakartotinai naudoti tinkamiems produktams, siekiant mažinti susidarancių atliekų kiekį. ES 80–85 % į jūrą išmestų atliekų sudaro plastikiniai gaminiai, iš kurių vienkartiniai nuo bendro kiekio sudaro 50 % ^[7]. Viso pasaulio vyriausybės taip pat turi strategijas uždrausti prekybą maišeliais, apmokestinti klientus už krepšius ir (arba) generuoti mokesčius iš juos parduodančių parduotuvių.

1.2.1. Plastikinių pakuočių gamybos technologijos

Lanksčių plastikinių pakuočių gamybai dažniausiai naudojamos technologijos: ekstruzinio formavimo, linijinis plėvelės liejimas ir pūtimo formavimo (*SBM*).

Ekstruzijos formavimo technologijos metu, lanksčios plastikinės pakuotės gamybai žaliava tiekama granulių pavidalu. Vienas iš būdų, kaip šias granules paversti plėvele (ar daugeliu kitų formų), yra apdorojant jas ekstruderyje (žr. 6 pav.). Plastikinės granulės pakraunamos į tiekimo bunkerį ir gravitacijos būdu tiekiamos į įkaitintą statinę, kurioje yra varžtas. Varžtas varo medžiagą žemyn statinės, kaitinamos virš polimero lydymosi temperatūros, kur ištirpsta plastikinės granulės. Priekinėje dalyje išlydytas plastikas praeina pro šampą, kuris suteikia galutiniam produktui profilį (šiam pvm. – plėvelę). Toliau plėvelė atvėsinama ant atšaldytų būgnų ar vandens vonioje. Kai

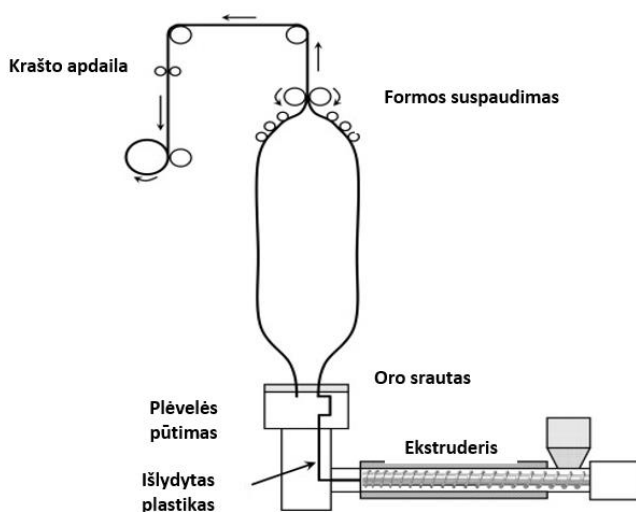
plėvelė atvėsta, ją galima apdoroti, apipjauti iki norimo pločio, susukti į ritinį. Plėvelės gamybai ekstruzijos būdu naudojami plastikai: *LDPE* ir *HDPE* [30].



6 pav. Ekstruderio schema [30]

Gaminant daugiasluoksnes plėveles naudojami keli ekstruderiai. Ekstruderis gali išlydytą sluoksnį uždėti ant kieto sluoksnio arba keli išlydyti sluoksniai gali būti vienas ant kito. Maišymas tarp išlydytų sluoksnių paprastai nevyksta. Šis procesas vadinamas koekstruzija [30].

Kitas ekstruzijos procesas naudojamas gaminant išpūstą plėvelę. Tokiu atveju ekstruzijos štampas yra apskritimo formos, o oro slėgis naudojamas tolesniam išsiplėtimui. Proceso schema pavaizduota 7 paveiksle. Ekstruzijos formavimui naudojami plastikai tokie kaip *PP*, *HDPE*, *LDPE* ir *PC* [30].



7 pav. Principinė plėvelės gamybos ekstrudiniu pūtimo būdu schema ir pavyzdys [30]

Išpūstos plėvelės procesas naudojamas gaminant įvairiausių produktus, pradedant paprastomis viensluoksnėmis plėvelėmis maišeliams ir baigiant labai sudėtingomis daugiasluoksnėmis struktūromis, naudojamomis maisto pakuotėse [30].

Seniausias plėvelių gamybos būdas yra nepertraukiamas tirpiklio liejimo procesas. Polimero tirpalas dedamas tolygiai ant ištisinio judančio diržo. Džiovinant išlietą tirpalą, susidaro plėvelė. Svarbiausia parinkti tinkamą tirpiklį, kuris ištirpintų tiek polimero, kad gautųsi pakankamai koncentruotas tirpalas (pvz. krakmolas ir vanduo, polikarbonatas ir metileno chloridas ir t. t.) [31].

Plastikinė plėvelė su metaline išvaizda yra labai paplitusi maisto pramonėje, pvz., saldainių, traškučių pakuotėse. Šis procesas vadinamas metalizacija ir vyksta esant dideliame vakuumui. Metalas gali sumažinti vandens garų ir deguonies prasiskverbimą per plėvelę [31].

1.3. Plastiko ir plastikinių pakuočių teisinis reglamentavimas

Pakuočių atliekų tvarkymas, remiasi atliekų hierarchija t. y. turi būti vengiama, kad susidarytų atliekos, o jei neįmanoma išvengti, ieškoma alternatyvų pakartotiniam panaudojimui, perdirbimui ar kitam būdai, kad atliekos nepatektų, ar tik maža dalimi, į sąvartynus. Pakuočių atliekų hierarchija pateikta 8 pav. [21].



8 pav. Pakuočių atliekų tvarkymo būdų hierarchijos įgyvendinimas [21]

Remiantis pakuočių atliekų hierarchija, labiausiai priimtinas būdas yra prevencija (kokybinė ir kiekybinė). Žemiau prioritetų ribos eina pakartotinis pakuotės naudojimas, pvz. užstato sistema ir kt. dar žemiau pagal prioritetą yra panaudotų pakuočių perdirbimas – medžiaginių išteklių (popieriaus, plastiko, metalo ar stiklo) atgavimas. Beveik žemiausiai hierarchijoje yra energijos

atgavimas deginant, o mažiausiai pageidaujamas pakuočių atliekų tvarkymo būdas – šalinimas sąvartyne ^[21].

Siekiant įgyvendinti atliekų tvarkymo hierarchijoje nustatytą eiliškumą bei sumažinti pakuočių atliekų kiekį sąvartynuose, yra priimta nemažai teisės aktų, reglamentuojančių pakuočių tvarkymą. Vienas iš pagrindinių teisės aktų – Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 94/62/EB dėl pakuočių ir pakuočių atliekų ^[21]. Direktyvoje Valstybės narės įpareigojamos imtis priemonių, kad užkirstų kelią pakuočių atliekų susidarymui, didintų rinkai pateiktų daugkartinių pakuočių dalį bei laikytųsi surinkimo ir perdirbimo tikslų ^[53].

Viena iš priemonių sumažinti pakuočių poveikį aplinkai – tikslų ir priemonių tikslams pasiekti nustatymas. Lietuvos valstybiniame atliekų tvarkymo plane 2014-2020 m. nurodoma, kad, „būtų sudarytos organizacinės ir (ar) techninės sąlygos kasmet surinkti ir panaudoti ne mažiau kaip 60 procentų pakuočių atliekų, skaičiuojant pagal patiektų vidaus rinkai pakuočių kiekį“ ^[24]. Taip pat, kad, „būtų sudarytos organizacinės ir (ar) techninės sąlygos kasmet surinkti ir perdirbti (eksportuoti (išvežti) perdirbti) 55–80 procentų pakuočių atliekų, skaičiuojant pagal patiektą vidaus rinkai pakuočių kiekį, atitinkamai pagal šias pakuočių medžiagas:

- plastikinių – ne mažiau kaip 22,5 procento, skaičiuojant tik medžiagą, kuri vėl perdirbama į plastiką“ ^[24].

Remiantis priimto nutarimo Nr. 1168, 2006 m. dėl apmokestinamųjų gaminių ir pakuočių atliekų naudojimo ir (ar) perdirbimo užduočių patvirtinimo, galioja šios pakuočių atliekų tvarkymo užduotys:

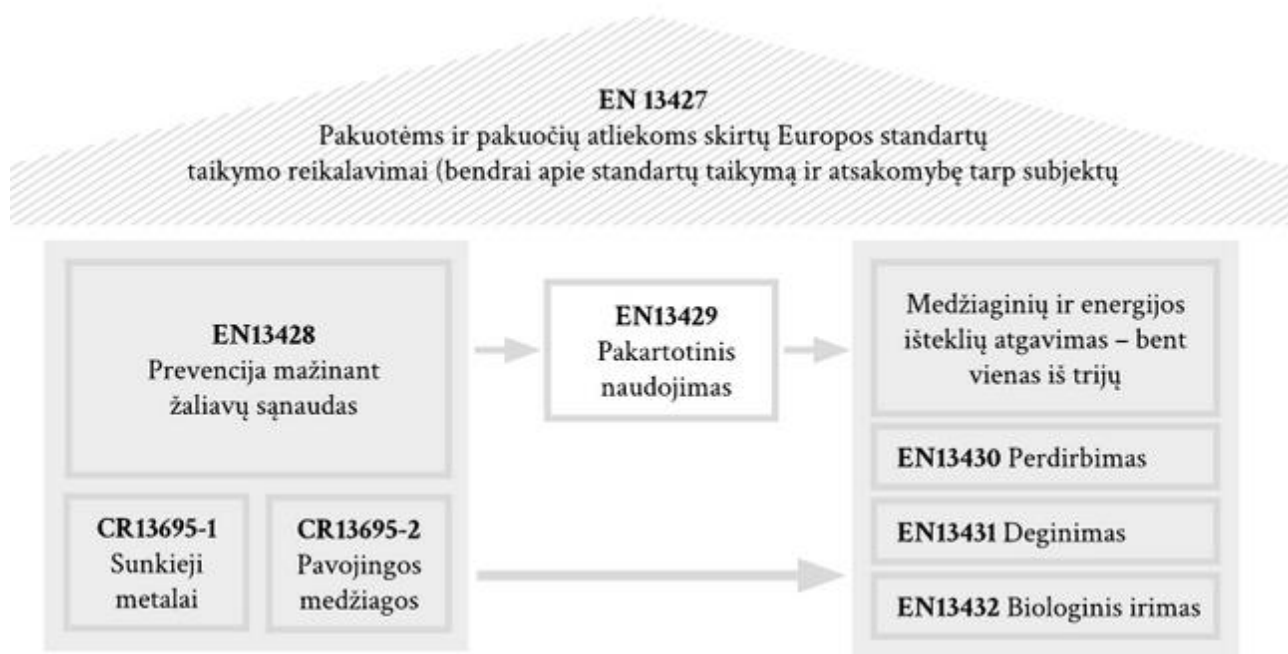
- plastikinė, įskaitant *PET* pakuotė – naudojimas 50 %, iš jo perdirbimas 37 %;
- kombinuota pakuotė – perdirbimas, ar kitoks naudojimas 25 %;
- plastikinė, įskaitant *PET* pakuotė – surinkimas ir perdirbimas nuo 2020 m. 90 % ^[51].

Šie reikalavimai taikomi visiems pakuočių gamintojams, o maisto produktų pakuotėms taikomi dar ir specialūs maisto saugos reikalavimai. Pakuotės taip pat turi atitikti neformalius reikalavimus, susijusius su produkto saugojimu, transportavimu, sandėliavimu ir pan. Formalius reikalavimus galima suskirstyti į neigiamo pakuočių poveikio aplinkai prevenciją bei maisto saugą. 9 paveiksle pateikiamas teisės aktų sąrašas ^[21].

<i>Teisės aktai, skirti neigiamo poveikio aplinkai prevencijai</i>		
I. Teisės aktai, skirti neigiamo poveikio aplinkai prevencijai	1 EB pakuočių ir pakuočių atliekų direktyva 94/62/EB.	
	2 LR pakuočių ir pakuočių atliekų tvarkymo įstatymas, Nr. IX-517, 2001 09 25.	
	3 Darnieji standartai	LST EN 13427:2006 (EN 13427:2004). Standartas apibrėžia bendruosius reikalavimus ir metodus, kurių būtina laikytis asmenims ir organizacijoms, atsakingoms už pakuočių ir įpakuotų produktų išleidimą į rinką.
		LST EN 13428:2006 (EN 13428:2004). Standartas reglamentuoja pakuočių minimizavimą, detalizuodamas Direktyvos II priedo reikalavimus.
		LST EN 13429:2007 (EN 13429:2004). Standartas nustato reikalavimus pakuotėms, priskiriamoms pakartotino naudojimo pakuočių grupei.
		LST EN 13430:2007 (EN 13430:2004). Standartas apibrėžia reikalavimus, kuriuos turi atitikti pakuotės, priskiriamos perdirbamųjų kategorijai.
		LST EN 13431:2007 (EN 13431:2004). Standartas apibrėžia reikalavimus, kuriuos turi atitikti pakuotės, priskiriamos deginamųjų kategorijai, kai deginant pakuočių atliekas siekiama išgauti energiją.
		LST EN 13432:2004 (EN 13432:2000). Standartas apibrėžia reikalavimus ir metodus, kuriais nustatomas pakuočių medžiagos tinkamumas kompostavimui ir biologiniam ardymui.
LST EN 13428 standartą papildantys dokumentai: LST 1655:2002 ir LST CEN/TR 13695-2:2004, reglamentuojantys sunkiųjų metalų ir pavojingųjų medžiagų kiekių nustatymo būdus pakuotėje.		
<i>Teisės aktai, skirti maisto saugai (higienos reikalavimai)</i>		
I. Reikalavimai pakuočių medžiagoms, besiliečiančioms su maistu	1 2002 m. sausio 28 d. EB reglamentas, nustatantis maistui skirtų teisės aktų bendruosius principus ir reikalavimus, įsteigiantis Europos maisto saugos tarnybą ir nustatantis su maisto saugos klausimais susijusias procedūras Nr.178/2002.	
	2 2000 04 04 d. Lietuvos Respublikos maisto įstatymas Nr. VIII-1608.	
	3 2004 m. spalio 27 d. EB reglamentas dėl žaliavų ir gaminių, skirtų liestis su maistu, ir panaikinantis Direktyvas 80/590/EEB ir 89/109/EEB Nr. 1935/2004.	
	4 Komisijos 2011 m. sausio 14 d. reglamentas (ES) dėl plastikinių medžiagų ir gaminių, skirtų liestis su maisto produktais, Nr. 10/2011.	
	5 2008 m. kovo 27 d. Komisijos reglamentas (EB) dėl perdirbto plastiko medžiagų ir gaminių, skirtų liestis su maistu, Nr. 282/2008.	
	6 Lietuvos higienos norma HN16: 2011 „Medžiagų ir gaminių, skirtų liestis su maistu, specialieji sveikatos saugos reikalavimai“, patvirtinta Lietuvos Respublikos sveikatos apsaugos ministro 2011 05 02 įsakymu Nr. V-417.	
	7 Direktyva 2007/42/EB dėl regeneruotos celiuliozės plėvelės.	
	8 Europos Bendrijos reglamentas EB 450/2009 dėl aktyvių ir išmaniųjų medžiagų ir gaminių.	
II. Reikalavimai pakuočių gamybos procesui ir įrenginiams	1 ISO 22000:2005 standartas. Maisto saugos vadybos sistemos. Bet kuriai maisto tvarkymo grandinės organizacijai keliami reikalavimai.	
	2 ISO/TS 22002-1:2009 standartas. Būtiniosios maisto saugos programos – 1 dalis: Maisto gamyba.	
	3 PAS 223:2011. Pradinės sąlygos ir projektavimo reikalavimai planuojant maisto saugos reikalavimais grįstą maisto pakuočių gamybą ir tiekimą.	
	4 FSSC 22000 standartas. Maisto saugos sistemų sertifikavimo standartas.	
	5 Reglamentas (EB) Nr. 2023/2006 (2006 12 22) dėl medžiagų ir gaminių, skirtų liestis su maistu, geros gamybos praktikos.*	
	6 EN 15593:2008 LST EN 15593:2008. Pakuotės. Higienos vadyba gaminant maisto gaminių pakuotes.	

9 pav. Teisės aktų reglamentuojančių pakuočių projektavimą, gamybą ir atliekų tvarkymą, sąrašas [21]

Direktyvoje 94/62/EB ES lygmeniu nustatyti pakuočių atliekų perdirbimo tikslai (pvz. plastiko pakuočių atliekų perdirbimo tikslas – 50 % iki 2025 m. ir 55 % iki 2030 m.), kuriais siekiama mažinti neigiamą poveikį aplinkai [53], [21]. Joje pateikiamos nuorodos į kitus standartus (EN 13427 – EN 13432), skirtus atitikti direktyvos reikalavimus, suteikiant metodinę pagalbą verslui. Pakuočių ir pakuočių atliekoms skirti Europos darnieji standartai patiekiami 10 paveiksle [21].



10 pav. Pakuotėms ir pakuočių atliekoms skirti Europos darnieji standartai ir techniniai reglamentai [21]

Darniajame standarte LST EN 13427:2006 (EN 13427:2004) ir kituose standartuose pateikiama sistema, kurios tikslas užtikrinti, kad į rinką išleidžiamos pakuotės atitiktų direktyvos nustatytus reikalavimus. Ūkio subjektai, teikiantys rinkai pakuotes, privalo užtikrinti, kad utilizavus pakuotes, pavojingų ir nuodingų medžiagų liktų tik minimalus kiekis ir pan. LST EN 13428:2006 standartas reglamentuoja pakuočių minimizavimą, LST EN 13429:2007 – nustatomi reikalavimai pakartotinio naudojimo pakuočių grupei, LST EN 13430:2007 – apibrėžiami reikalavimai perdirbamų kategorijai priskiriamoms pakuotėms, LST EN 13431:2007 (EN 13431:2004) – reikalavimai deginamųjų pakuočių kategorijai priskiriamoms pakuotėms, o LST EN 13432:2007 standartas nustato pakuočių medžiagų tinkamumą kompostavimui ir biologiniam irimui [21].

Nuo 2019 m. Vidurio ES galioja Direktyva 2019/904, kuria siekiama sumažinti tam tikrų plastikinių gaminių poveikį aplinkai. Šioje direktyvoje reikalaujama, kad visos valstybės narės, „užtikrintų ekologišką atliekų tvarkymą, kad būtų išvengta ir sumažinti jūrų šiukšles tiek iš jūros, tiek iš sausumos šaltinių“. Šiame dokumente numatytos skirtingos skirtingų plastikų strategijos, pavyzdžiui, rinkos apribojimai, vartojimo sumažinimas ir perėjimo (nors ir laipsniškas) prie žiedinės plastikinių medžiagų ekonomikos, kuris turi būti pasiektas skatinant originalaus ir tvaraus verslo plėtrą ir įgyvendinimą [35].

Biologiškai skaidžių pakuočių teisinis reglamentavimas

Dažniausiai nurodomas Europos standartas EN 13432, kurio taikymo sritis yra plati, nes apima visas pakuotes. Reikalavimai pakuotėms, kurios gali būti kompostuojamos ir biologiškai skaidomos [12]. Šis standartas veikia kartu su EN 14995, kuris skirtas ne pakavimo plastikams, o EN 13432 – visoms medžiagoms, skirtoms naudoti pakuotėse. Jie abu turi tuos pačius kriterijus, tačiau skiriasi taikymo sritimi. Jei plastikinis gaminytis atitinka bet kurį standartą, jis laikomas priimtiniu komercinėms kompostavimo sistemoms, bet ne namų kompostavimui. Šiame standarte nurodyti du biologinio skaidymo reikalavimai, atsižvelgiant į tai, ar naudojamas aerobinis ar

anaerobinis procesas. Minimalios ribinės vertės yra 90 % biologinis skaidymas per 6 mėnesius aerobiniam kompostavimui ir 60 % biologinis skaidymas per 2 mėnesius. Standartas rekomenduoja, kad bandymai būtų atliekami naudojant ISO 14855 standarto bandymo metodą, pagal kurį reikalaujama matuoti iš tiriamo mėginio išskiriamą CO₂ kaip biologinio skaidymo rodiklį ^[16].

Tarptautiniu mastu pripažintos įstaigos, tokios kaip Tarptautinė standartizacijos organizacija (ISO) ir Europos standartizacijos komitetas (CEN), aktyviai dalyvauja kuriant ir išleidžiant standartus. Biopolimerams ir biologiškai skaidiems plastikams taikomi tokie pat reikalavimai kaip ir įprastiems plastikams, tačiau dar taikomi papildomi reikalavimai ir standartai, susiję su kompostavimu ir biologinio skaidumo bandymais. Standartai pateikti 4 lentelėje ^[41].

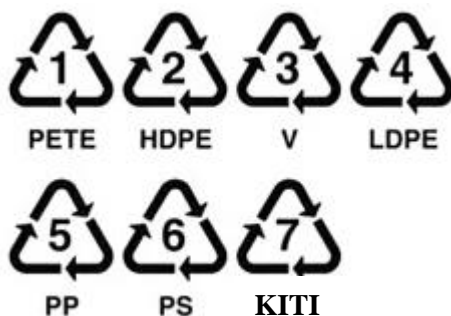
4 lentelė. Pagrindiniai standartai susiję su kompostavimo ir biologinio skaidymo bandymais ^[41]

Standartas	Pavadinimas
ISO standartai, susiję su kompostavimu ir biologiniu skaidymu	
ISO 17088:2012	Kompostuojamų plastikų specifikacijos
ISO 14021:2016	Aplinkosaugos etiketės ir deklaracijos. Savarankiškai deklaruojami teiginiai apie aplinką (II tipo aplinkosauginis ženklavimas)
ISO 14851:2019	Plastikinių medžiagų galutinio aerobinio biologinio skaidumo vandeninėje terpėje nustatymas. Metodas deguonies poreikiui matuoti uždareme respirometre
ISO 14852:2018	Plastikinių medžiagų galutinio aerobinio biologinio skaidumo vandeninėje terpėje nustatymas. Metodas analizuojant išsiskyrusį anglies dioksidą
ISO 14853:2016	Plastikai. Plastikinių medžiagų galutinio anaerobinio biologinio skaidymo vandeninėje sistemoje nustatymas. Biodujų gamybos matavimo metodas
ISO 14855-1:2012	Plastikinių medžiagų galutinio aerobinio biologinio skaidumo nustatymas kontroliuojamomis kompostavimo sąlygomis. Susidariusio anglies dioksido analizės metodas. 1 dalis. Bendrasis metodas
ISO 14855-2:2018	Plastikinių medžiagų galutinio aerobinio biologinio skaidumo nustatymas kontroliuojamomis kompostavimo sąlygomis. Išsiskyrusio anglies dioksido analizės metodas. 2 dalis. Anglies dioksido gravimetrinis matavimas, gautas atliekant laboratorinį bandymą.
ISO 15985:2014	Plastikai. Galutinio anaerobinio biologinio skaidymo ir suirimo nustatymas esant labai kietų medžiagų anaerobinio skaidymo sąlygoms. Išmetamų biodujų analizės metodas
ISO 16929:2019	Plastikinių medžiagų irimo laipsnio nustatytomis kompostavimo sąlygomis nustatymas bandomojo bandymo metu
ISO 17556: 2019	Galutinio aerobinio biologinio skaidumo dirvožemyje nustatymas, naudojant respirometrą matuojant deguonies poreikį arba išsiskyrusio anglies dioksido kiekį
ISO 20200: 2015	Plastikinių medžiagų irimo laipsnio nustatymas imituojant kompostavimo sąlygas atliekant laboratorinį bandymą
ISO 10210:2012	Plastikai. Plastikinių medžiagų biologinio skaidymo bandinių bandinių paruošimo metodai
Pakavimo ir kompostavimo standartai	
EN 14045: 2003	Pakuotė – pakuočių medžiagų irimo įvertinimas atliekant praktinius bandymus apibrėžtomis kompostavimo sąlygomis
EN 14046: 2003	Pakuotė. Galutinio aerobinio biologinio skaidumo įvertinimas kontroliuojamomis kompostavimo sąlygomis. Metodas analizuojant išsiskyrusį anglies dioksidą
EN 14806: 2005	Preliminarus pakuočių medžiagų irimo įvertinimas imituojant kompostavimo sąlygas atliekant laboratorinį bandymą

Kiekviena pakuotė išleidžiama į rinką turi atitikti atitinkamus reikalavimus. Kompostavimas yra alternatyvus plastiko atliekų tvarkymo būdas, tačiau, kad atitiktų kompostavimo kriterijus, polimerai turi būti bandomi atliekant atitinkamus bandymus, remiantis standartais ^[41].

1.4. Plastikinių lanksčių pakuočių atliekų tvarkymo tendencijos

Didžioji dalis plastikinių pakuočių yra identifikuojamos atitinkamais skaičiais (žr. 11 pav.). Septintas kodas taikomas daugeliui gana naujų plastikų, įskaitant ir biopolimerus ir jo praktinė vertė yra ribota. Kuo didesnis skaičius, tuo sunkiau medžiagą pelningai panaudoti naudingose vartotojams skirtose programose, išskyrus deginant ją energijai gauti ar šalinti sąvartynuose ^[8].



11 pav. Plastikinių pakuočių identifikavimo kodai ^[8]

Visas pakavimo medžiagas sieja tai, kad vartotojai perka produktus, o ne pakuotę aplink jį, todėl, panaudojus arba išpakavus produktą, pakavimo medžiaga atliko savo paskirtį ir yra išmetama ^[14].

Plastiko tarša yra viena pagrindinių suvokiamų grėsmių biologinei įvairovei. Dėl gausos, ilgaamžiškumo ir patvarumo aplinkoje tai kelia ypatingą susirūpinimą. Organizmų sąveika su plastiko atliekomis sukelia daugybę tiesioginių ir netiesioginių pasekmių, įskaitant galimą ir mirtiną poveikį. Dėl didesnių plastikinių medžiagų buvimo vandenyje, įvairūs organizmai gali į jį įsipainioti ar praryti. Tai dažnai sukelia didelę žalą ar net mirtį. Įsipainiojimas dažniau būna mirtinas (79 % visų atvejų), nei nurijimas (4 % visų atvejų). Dėl mažo dydžio mikroplastiką gali praryti daugybė organizmų, tokių kaip planktonai, paukščiai ar žuvys. Nors tikslus šių medžiagų toksiškumas vis dar nėra gerai žinomas, tačiau organizmai, prariję mikroplastiką, jaučia fizinį poveikį ir stresą, kai plastikas užstringa viduje, prarijus jaučiamas klaidingas sotumo jausmas, išsiskyrusios cheminės medžiagos, pvz. patvarūs organiniai teršalai, taip pat turi atitinkamą poveikį organizmui ^[35].

Plastikinės medžiagos išlieka ilgai po naudojimo. Pagal 2019 m. ataskaitą Europoje (ES ir už jos ribų) sąvartynuose buvo išvežta 7,2 mln. tonų plastiko atliekų, perdirbti surinkta 9,4 mln. tonų, o sudeginta maždaug 12,4 t. Perdirbama tik dalis plastiko atliekų ir tai yra brangus procesas dėl būdingo atskiro surinkimo, gabenimo ir perdirbimo ^[35].

Šalinimas sąvartyne yra plačiai taikomi atliekų tvarkymo būdai. Pakrančių teritorijose, kuriose yra sąvartynų, per gruntinį vandenį mikroplastikas gali nutekėti į vandenyną. Taip pat lanksčios pakuotės gali sudaryti anaerobines sąlygas ir palengvinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) išsiskyrimą, skaidant kitas organines medžiagas ^[2].

Perdirbimas yra vienas iš pageidaujamų variantų, nes jis yra aukštesnis atliekų tvarkymo hierarchijoje (žr. 9 pav.), taip suteikdamas medžiagų srauto apykaitą.

Plastikų perdirbimas yra sudėtingesnis nei metalų ar stiklo dėl daugybės skirtingų plastiko rūšių. Tarp perdirbimo būdų labiausiai pageidautinas mechaninis perdirbimas, nes išlaiko molekulinę struktūrą iš esmės nepakitusią. Mechaninis perdirbimas skirstomas į pirminį ir antrinį, atsižvelgiant į tai, ar atliekų šaltinis yra prieš vartotojus (angl. *preconsumer*), ar po vartotojų (angl. *postconsumer*). Prieš vartotojus gaunamos plastiko atliekos yra švarios ir vienos rūšies arba bent jau žinomos sudėties ir nereikalauja papildomo apdorojimo, o po vartotojų yra labai užteršti ir reikalauja papildomų veiksmų. Mechaninis perdirbimas paprastai apima keturis etapus. Surinkta medžiaga pirmiausia rūšiuojama, tuomet susmulkinama, nuplaunama ir džiovinama. Tada medžiagą galima perdirbti ir gaminti granules arba produktus ^[43], ^[46].

1.4.1. Cheminis perdirbimas

Cheminis plastikų perdirbimas yra procesas, kurio metu medžiagos paverčiamos polimerais (naujo plastiko gamybai) arba kuru. Šiuo tikslu egzistuoja kelios technologijos, tokios kaip termocheminės ir katalizinės konversijos metodai. Paprastai taikant šiuos metodus naudojami tirpikliai ir aukšta temperatūra. Apskritai, kuo aukštesnė temperatūra naudojama, tuo didesnis regeneruotų monomerų grynumo laipsnis ^[35].

Cheminis perdirbimas šiuo metu laikomas patraukliu technologiniu keliu siekiant sumažinti atliekų kiekį ir skatinti žiedinę ekonomiką. Norint pasiekti šį ambicingą tikslą, būtina iširti visas turimas technologijas. Tačiau kai kurios iš šių technologijų dar nepasiekė technologinio pasirengimo lygio, leidžiančio jas laikyti galimomis galimybėmis. Tai apima tokias technologijas kaip pirolizė, katalizinis krekingas ir įprastas dujinimas. Turimas technologijas reikėtų toliau vertinti kaip pagrindinę platesnio plastikinių atliekų problemos sprendimo (-ų) dalį. Kartu su kitomis priemonėmis, tokiomis kaip patobulintas plastiko dizainas ir plastiko naudojimo mažinimas, veiksmingas plastikų atliekų atskyrimas padarys šių technologijų žaliavas homogeniškesnes, o tai leis sukurti geresnį galutinį produktą, galbūt su mažesnėmis sąnaudomis. Tiesą sakant, dauguma nustatytų cheminio perdirbimo problemų tiksliai atspindi tradicinio mechaninio perdirbimo problemas: prieiga prie kokybiškų žaliavų, taršos sumažinimas ir reikalingų procesų kiekių gavimas. Taigi lieka „bendri“ plastiko atliekų tvarkymo sistemos iššūkiai ^[35].

Termocheminio perdirbimo technologijos yra perspektyvios plastikinių pakuočių atliekų mechaninio perdirbimo alternatyvos. Plastikų atliekos, kuriose yra daug anglies, pvz., *PE*, *PP* ir *PS* yra tinkama žaliava pirolizei. Be pridėtinių žaliavų, termocheminiai metodai tinka daugiasluoksnių plėvelių perdirbimui. Frakcijos kuriuose yra daugiasluoksnė pakuotė, iš dalies sudeginamos ir iš dalies perdirbamos mechaniškai. Iš anksto išrūšiuota aliuminio frakcija, kurioje taip pat gali būti aliuminio turinčios daugiasluoksnės pakuotės paprastai prieš atliekant aliuminio perlydymą, atliekamas pirolizės etapas, kuris pašalina plastikinius komponentus ^[2], ^[20].

Vienas iš svarbiausių iššūkių yra **daugiasluoksnė** medžiagos frakcija, kuri gali apimti įvairius plonų plastikinių plėvelių, tokių kaip *PE*, *PP*, *PET* ir *PVC*, ir spalvotųjų metalų, tokių kaip aliuminis ir alavas, sluoksnius ^[2]. Daugiasluoksnių pakuočių perdirbimo metodai: cheminis atskyrimas, tirpinimas–nusodinimas, energijos atgavimas deginant ^[20]. Buitinėse atliekose yra

daug pirminės pakuotės, dažniausiai daugiasluoksnės lanksčios pakuotės, kurias sunku atskirti nuo viensluoksnių, todėl, bet kuri lanksti pakuotė keliauja deginimui arba į sąvartyną ^[17].

Depolimerizacija sausoje aplinkoje – alifatinio poliesterio (pvz., *PLA*), depolimerizacija į jo ciklinį dimerą arba laktidą aukštesnėje temperatūroje (pvz., aukštesnėje nei lydymosi temp.). Didelės molekulinės masės *PLA* depolimerizacija vyksta lėtai, todėl vienas iš būdų pagreitinti – padidinti oligomerų koncentraciją *PLA*. Vienas iš būdų yra naudoti katalizatorius (pvz., IV, V grupės metalų junginius ir VIII periodinės lentelės grupes) kartu su aukšta temperatūra ^[34].

Daugelis minėtų cheminių medžiagų perdirbimo procesų sunaudoja daug energijos, per trumpą laikotarpį turi mažą monomerų išeią ir reikalauja pašalinti katalizatorius ir priedus, kurie buvo naudojami depolimerizacijai, hidrolizei ar solvolizei. Be to, jei *PLA* depolimerizacija atliekama terminio skaidymo arba cheminio skaidymo būdu, abu susidarančios mažos molekulinės masės junginio galai yra netaisyklingi ir tokio junginio negalima perpolimerizuoti į polimerą. Fermentinė depolimerizacija yra gana nauja cheminio perdirbimo technika. Šią metodą nuo fermentinės hidrolizės, atliekamos šalinant biologiškai skaidžius polimerus, skiria tai, kad pagrindinis tikslas yra pakartotinai naudoti produktus, susidariusius po fermentinio skaidymo. Fermentinė depolimerizacija ir repolimerizacija buvo atliekami siekiant išplėsti alifatinų poliesterių, tokių kaip *PCL*, *PBA*, *PBS*, *PBAS* ir *PLA*, kurie yra biologiškai skaidūs, fermentinį perdirbimą. Gaminami (cikliniai) oligomerai buvo lengvai perpolimerizuojami tuo pačiu katalizatoriumi, kad gautų poliesterį, kurio molekulinė masė būtų lygi arba didesnė, palyginti su pirminiu polimeru ^[34].

Nors mintis perdirbti biopolimerus atrodo keista, nes dauguma biopolimerų yra biologiškai skaidomi, tačiau yra keletas svarbių priežasčių, tokių kaip žaliavų trūkumas (pvz., polihidroksi rūgščių), mažinamas atsinaujinančių išteklių sunaudojimas ir kt. ^[8].

1.4.2. Kompostavimas

Kompostavimas yra greitesnis biologinio skaidymo procesas, kuris reikalauja papildomo žmogaus įsikišimo (reguliuojama drėgmė, temp., deguonis ir pan.), o galutinis produktas – kompostas, gausus maistinių medžiagų ir naudojamas kaip trąša. Kompostavimas skirstomas į aerobinį (procesas vyksta su deguonimi) ir anaerobinį (be deguonies). Abiejų procesas panašus, o skirtumas tik tas, kad anaerobinio kompostavimo metu išsiskiria metanas.

Kompostuojami plastikai – plastikai, kurie biologinių procesų metu, skaidomi į CO₂, vandenį ir neorganinius junginius bei biomasę tokiu greičiu, kuris atitinka kitas žinomas kompostuojamas medžiagas. Jie nepalieka vizualiai atskiriamų ar toksiškų likučių ^[25]. Kompostuojami polimerai turi atitikti atitinkamus kokybės kriterijus, kurie turi būti įrodyti standartizuotais bandymo metodais. Polimerus galima suskirstyti pagal kilmės šaltinį ar paruošimo būdą. Biologiškai skaidomi polimerai iš atsinaujinančių išteklių yra šie: *PLA*, *PHB*, *TPS*, celiuliozė, chitozanas, baltymai, o iš naftos šaltinių – alifatiniai poliesteriai ir kopoliesteriai (pvz., polibutileno sukcinatas (*PBS*)), aromatiniai kopoliesteriai (polibutileno adipato tereftalatas (*PBT*)), *PCL*, *PEA*, *PVA* ^[42].

Standartiniai kompostavimo eksperimentai leidžia palyginti skirtingus polimerus, nes jie vyksta kontroliuojamomis ir fiksuotomis sąlygomis. Tačiau kompostavimo eksperimentai atliekami esant aukštai ir pastoviai temp. (50–60 °C) bei esant didelei drėgmei. Be to, komposto mikrobu aktyvumas paprastai būna didesnis nei realiuose dirvožemiuose, todėl polimerų biologinis irimo greitis gali būti pervertintas. Daugelis tyrimų vyksta tik kelis mėnesius, kol medžiaga visiškai

nesuyra, dėl to sunku pasakyti, ar medžiaga yra visiškai biologiškai skaidoma [37]. Kai kurių biopolimerų irimo sąlygos ir biologinio skaidumo rodikliai pateikti 5 lentelėje [38].

5 lentelė. Biopolimerų irimo sąlygos ir biologinio skaidomumo rodikliai [38]

Bioplastikas		Skilimo sąlygos	Biologinis skaidomumas	
			%	Dienos
Krakmolo pagrindu	Bioplastikas, pagamintas iš bulvių	Kompostas, aerobinis, 58 °C	~ 85	90
Celiuliozės pagrindu	CA (iš linų pluošto)	Komunalinių kietųjų atliekų mišinys	44	14
PLA pagrindu	PLA	Sintetinė medžiaga, kurioje yra komposto, 58 °C	100	28
	PLA / PHB (75–25%)	Sintetinė medžiaga, kurioje yra komposto, 58 °C	100	35
PHA ir PHB pagrindu	PHA	Dirvožemis 35 °C	35	60
	PHA / ryžių lukštai (60 / 40 %)	Dirvožemis, 35 °C	> 90	60
	PHB	Upės vanduo Realios sąlygos ~ 20 °C	43,5	42
PBS pagrindu	PBS	Kompostas, aerobinis, pH 7–8, 58–65 °C, 50–55 % drėgmės	90	160
	PBS / sojos miltai (75 / 25 %)	Kompostas, aerobinis, pH 7–8, 58–65 °C, 50–55 % drėgmės	90	100

Remiantis duomenimis, krakmolo pagrindu pagamintas biopolimeras suyra per 3 mėnesius iki 85 % jo masės, kompostuojant aerobinėmis sąlygomis. Celiuliozės pagrindu pagaminti biopolimerai, komunalinių atliekų sraute suyra apie 44 % savo masės per 14 dienų. Kompostuojamas *PLA* gali suirti 100 % per 1 mėn. *PHA* dirvožemyje suyra iki 35 % per 2 mėn., o *PHA* ir ryžių lukštų mišinys suyra per tą patį laikotarpį daugiau nei 90 % savo masės. Remiantis tyrimų duomenimis, galima teigti, kad biopolimerų biologinis skaidymas ir kompostavimas vyksta pakankamai greitai ir nesiekia nei pusės metų.

1.4.3. Anaerobinis perdirbimas

Anaerobinis skaidymas vyksta be deguonies mezofilinėmis (37 °C) arba termofilinėmis (55 °C) sąlygomis. Trūkstant deguonies, organinės medžiagos paverčiamos metano dujomis, anglies dioksidu, vandenilio sulfidu, amoniaku ir vandeniui, dėl to vyksta skirtingų mikroorganizmų grupių metabolinės sąveikos seka. Likusi dalis yra vadinama pūdymo likučiais. Organinėse medžiagose sukaupta energija, skaidant anaerobiškai, išsiskiria kaip metanas, o dėl deguonies trūkumo, procese susidaro mažiau šilumos ir mažiau mikrobu biomės, priešingai nei aerobinio proceso metu. Biopolimeras *PHA* aerobinėmis sąlygomis per 5–6 savaites skyla į CO₂ ir vandenį, tačiau anaerobinėmis sąlygomis skilimas vyksta greičiau ir išskiriamas naudingas metanas. Remiantis mokslininkų atliktais tyrimais, ne visi bioskaidūs plastikai gali būti apdorojami anaerobinėmis sąlygomis. Bioplastikų biologinio skaidymo greitis didėja tokia tvarka: *PHB* > *PCL* > *PLA* > *PVA*. *PCL*, *PLA* ir *PVA* irimas trunka ilgiau, o *PBS* visai nesuyra anaerobinio kompostavimo sąlygomis [3].

Anaerobinio skaidymo metu bioplastikai gali būti maišomi su kitomis atliekomis, tokiomis kaip mėšlas, nuotekų dumblas, maisto atliekos ir kt., todėl bioplastiko maišeliai gali būti naudojami

maisto atliekoms surinkti. Surinktas metanas toliau naudojamas kaip atsinaujinantis energijos šaltinis. Po skaidymo likusios liekanos gali būti naudojamos kaip organinės trąšos žemės ūkyje ar sodininkystėje ^[1].

2. Lanksčių pakuočių fiziko-mechaninių savybių ir būvio ciklo įvertinimo tyrimų metodika

2.1. Lanksčių pakuočių fiziko-mechaninių savybių bandymo metodika

Siekiant įvertinti lanksčios pakuotės medžiagų fiziko-mechanines savybes ir galimybę naudoti biopolimerines plėveles gamyboje, buvo atliekamas tempimo bandymas. Šis metodas naudojamas tiriamų bandinių tempiamajam stipriui, tempimo moduliui bei kitiems įtempio ir deformacijos santykio aspektams nustatyti. Metodas yra tinkamas naudoti šioms medžiagoms:

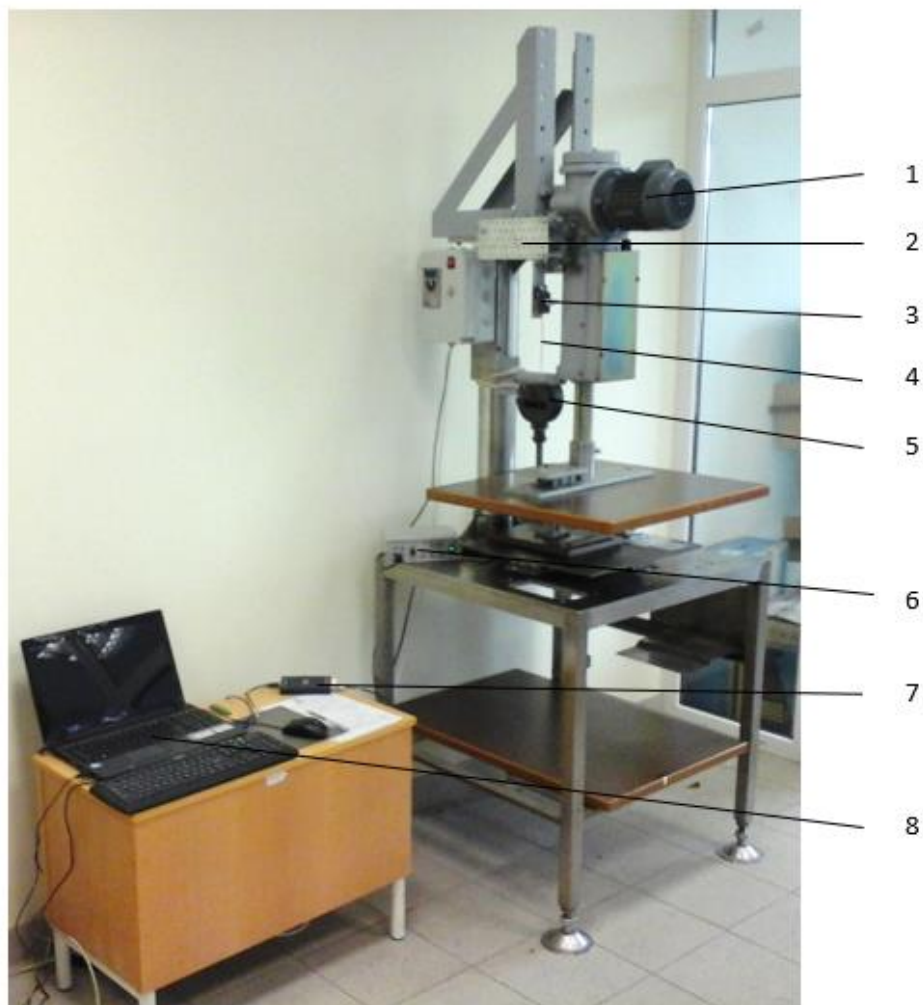
- standžioms ir pusiau standžioms termoplastinėms medžiagoms (pvz., lakštams ar plėvelėms);
- standžioms ir pusiau standžioms termoreaktingoms medžiagoms (pvz., lakštams) ^[56].

Tikslas – įvertinti vieno sluoksnio maišelių, pagamintų iš sintetinio plastiko, bioskaidaus sintetinio plastiko ir biologinės kilmės plastiko, nutrūkimo jėgą, atsparumą tempimui bei bandinio pailgėjimą. Tyrimo principas – tiriamasis bandinys ištempiamas pagrindine išilgine ir skersine ašimis pastoviu greičiu, kol bandinys sutrūks arba kol įtempis (apkrova) ar įtempimas (pailgėjimas) pasieks tam tikrą iš anksto nustatytą vertę. Atliekant procedūrą, išmatuojama bandinio išlaikoma apkrova ir pailgėjimas ^[56].

Reikšmė ir taikymas. Esant netinkamam plėvelės tamprumui bei stiprumui, maišelių eksploatacinės savybės gali pablogėti. Jei produkto svoris viršija polimerinės plėvelės tempiamąjį stiprį, pastaroji neatlaiko ir plyšta. Šis bandymo metodas skirtas palyginti monopolietileno, bioskaidaus monopolietileno ir biologinės kilmės plastiko, kuri sudaro 85 % cukranendrių pluoštas, atsparumą tempimui, siekiant atskleisti biologinės kilmės polimero naudą, pakeičiant tradicinius plastikus. Tempimo bandymas taikomas visoms nurodytoms medžiagoms, siekiant nustatyti jų elgseną, veikiant apkrovai, naudojant tam skirtą įrangą.

Tyrimo metodika. Tyrimas atliekamas pagal standartus: LST EN ISO 527-1:2019 „Plastikai – tempiamųjų savybių nustatymas – 1 dalis: pagrindiniai principai“ ^[56] ir LST EN ISO 527-3:2019 „Plastikai. Tempiamųjų savybių nustatymas. 3 dalis. Plėvelių ir lakštų bandymų sąlygos (ISO 527-3:2018)“ ^[57].

Matavimo aparatūra ir priemonės. Tyrimo darbams buvo naudotas Kauno technologijos universiteto MIDF Pakavimo inovacijų ir tyrimų centro bandymų stendas (12 pav.), įgalinantis atlikti plėvelės tipo medžiagų atsparumo tempimui tyrimus. Bandinių storio matavimai buvo atliekami naudojant skaitmeninį mikrometrą QuantuMike IP65, tikslumas 0,001 mm (žr. 13 pav.). Papildomos priemonės – žirklys (bandinių iškirpimui).



12 pav. Plėvelių tempimo bandymų stendas: 1 – pavara, 2 – jėgos matavimo blokas, 3 – viršutinis griebtas, 4 – bandinys, 5 – apatinis griebtas, 6 – stiprintuvas, 7 – keitiklis PicoScope, 8 – kompiuteris

Griebtai skirti laikyti bandinį, pritvirtinami prie mašinos taip, kad bandinio vidurinė linija sutampa su tempimo kryptimi. Tiriamasis bandinys turi laikytis taip, kad neišlystų iš griebtų.



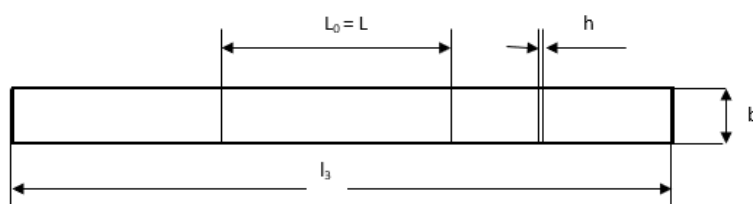
13 pav. Skaitmeninis mikrometras QuantuMike IP65

Ėminių ėmimas. Plėvelių tyrimui bandiniai imami iš 3 skirtingų maišelių: monopolietileno, bioskaidaus monopolietileno ir biologinės kilmės plastiko, kurį sudaro 85 % cukranendrių pluoštas (žr. 14 pav.). Iš kiekvieno maišelio iškerpami 5 bandiniai, iš viso 15 vnt.



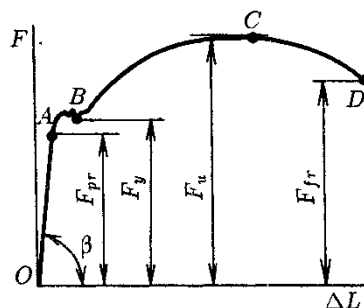
14 pav. Tempimo bandymui naudojami maišeliai: A) monopolietileno, B) bioskaidaus monopolietileno ir C) biologinės kilmės plastiko, kurį sudaro 85 % cukrandendrių pluoštas

Procedūra. Plėvelinių medžiagų mechaninio tempimo bandymai buvo atliekami vadovaujantis aukščiau paminėtais standartais, kuriuos taikant, nustatomas atitinkamos formos bandinių tamprumas ir kiti parametrai. Šios procedūros metu matuojamas juostelės pavidalo bandinio pailgėjimas sąryšyje su jo tempimo jėga. Tirtų plėvelių bandinių matmenys pateikti 15 pav.



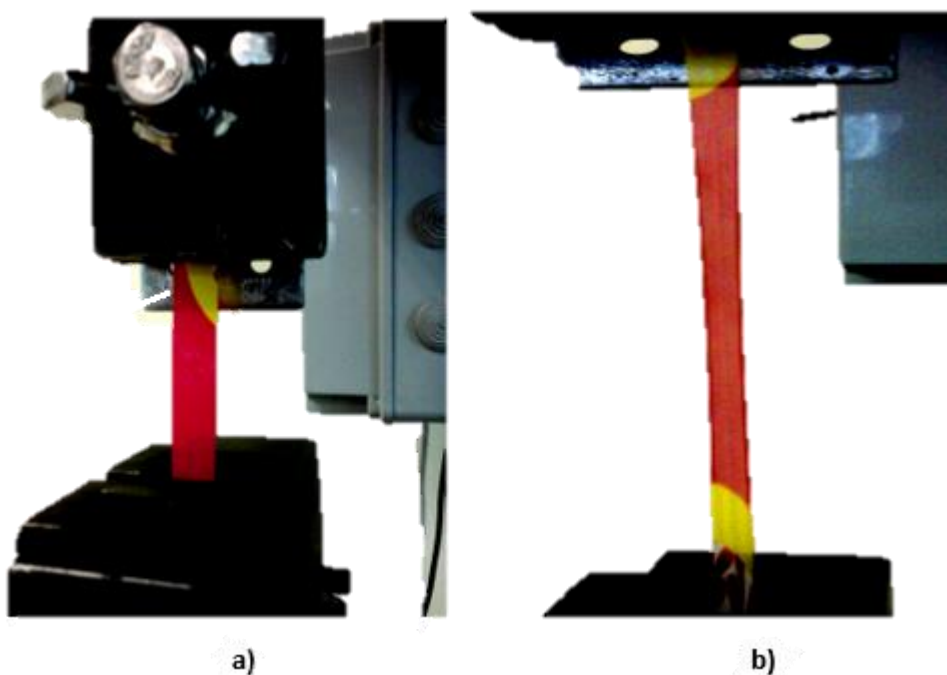
15 pav. Plėvelių tempimo bandymams naudotų juostelės pavidalo bandinių bendras vaizdas: $L_0 = L$ – pirminis atstumas tarp griebtų (50 mm); b – bandinio plotis (10 mm); h – bandinio (plėvelės) storis (25 μm); l_3 – bandinio ilgis (100 mm) [57]

Tempimo bandymo metu gaunama tempimo jėgos ir bandinio ilgio pokyčio priklausomybės $F(\Delta L)$ kreivė, kuri dažniausiai vadinama tempimo diagrama. Iš jos nustatomi svarbiausi bandomosios medžiagos mechaninių savybių rodikliai [60]. Tempimo diagramos pavyzdys pateiktas 16 pav.



16 pav. Tempimo diagramos pavyzdys [60]

Abscisių ašis rodo bandomojo ruožo ilgio pokytį, ordinačių – tempimo jėgos F (bandinio ašinės jėgos N) didumą. Deformavimo proceso pradžioje jėga ir ilgio pokytis kinta proporcingai, todėl ruožas OA yra tiesė. Po to proporcingumo nebelieka, nors deformacija dar vis tampri, tik vėliau prasideda medžiagos plastinis deformavimasis, iš pradžių nežymus, o ties tašku B – ir labai intensyvus, kai bandinys sparčiai tįsta nedidinant tempimo jėgos. Šis beveik horizontalus diagramos ruožas vadinamas **takumo aikštele**. Už takumo aikštelės eina kylantis medžiagos **stiprėjimo ruožas** – kol pasiekiamas taškas C . Iki taško C deformacija yra vienoda per visą bandomąjį ilgį, už šio taško deformacija susikoncentruoja vienoje bandinio vietoje, bandinyje ima formotis kaklelis su ryškiai sumažėjusiu bandinio skerspjūviu, todėl toliau tempimo jėga mažėja iki diagramos taško D , ties kuriuo bandinys nutrūksta. Ypatingųjų taškų ordinatės, t. y. ypatingosios tempimo jėgos reikšmės yra žymimos tarptautiniais indeksais – pirmosiomis atitinkamų anglų kalbos žodžių raidėmis: *per* – *roportion* (proporcingumas), *y* – *yield* (takumas), *v* – *ultimate* (maksimalus), *fr* – *fracture* (trūkimas). **Ypač svarbios būna reikšmės F_y ir F_u** , todėl bandymo metu jos nustatomos itin atidžiai. Šios įtempimų reikšmės apibūdina tam tikras mechanines medžiagų savybes ir yra šių savybių rodikliai. Stiprumo riba σ_u – didžiausios jėgos, kurią atlaiko bandinys, santykis su pradiniu skerspjūvio plotu ^[60]. Bandinio tempimo proceso eigą iliustruoja 17 pav.



17 pav. Plėvelių tempimo bandymo eiga: a) – įtvirtintas griebtuose bandinys prieš tempimą; b) – būdingas tarpinis vaizdas bandinio tempimo eigoje

Rezultatų apdorojimas. Stiprumo ribos skaičiavimui naudojama (1) formulė:

$$\sigma_u = F_u/A_0; \tag{1}$$

čia F_u – stiprumo ribos jėga;

A_0 – pradinis bandinio skerspjūvio plotas ^[32].

Bandinio skerspjūvio plotas skaičiuojamas pagal (2) formulę ^[32]:

$$A_0 = b \times h; \tag{2}$$

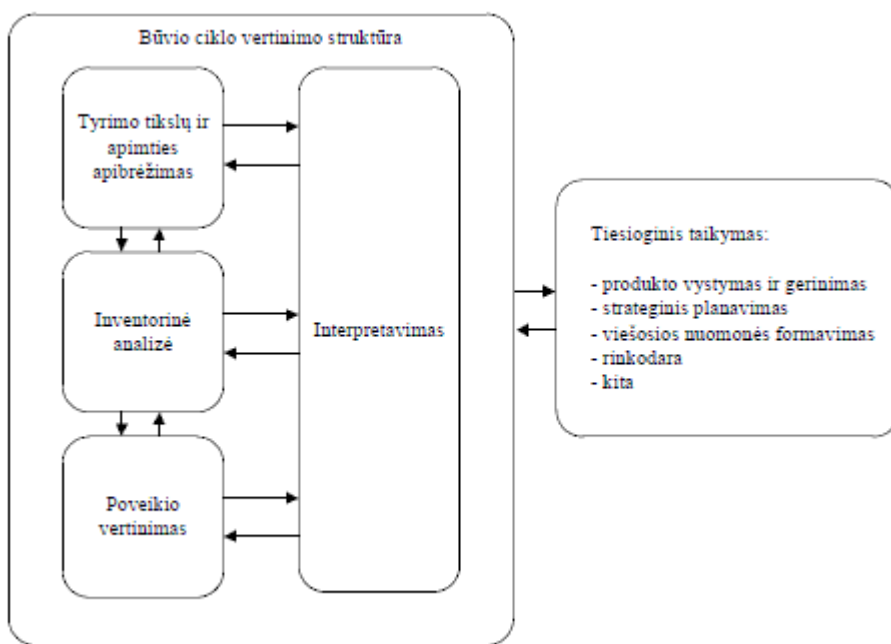
čia b – bandinio plotis;

h – bandinio storis.

2.2. Būvio ciklo įvertinimo tyrimo metodika

Būvio ciklo įvertinimas (*BCV*) – aplinkos vadybos metodas, vertinantis visų įeinančių ir išeinančių medžiagų daromą poveikį aplinkai per visą produkto būvio ciklą. *BCV* leidžia palyginti produktus pagal daromą poveikį aplinkai visuose gyvavimo ciklo stadijose ir nuspręsti, kurioje labiausiai veikia aplinką. *BCV* gali padėti identifikuoti galimybes gerinti produktų aplinkos aspektus jų būvio ciklo vietose ar parenkant atitinkamus sąveikos su aplinka veiksmingumo rodiklius, įskaitant matavimo metodus ^[58]. *BCV* metodika nurodo, kad produkto ar paslaugos sąvoka apima: paslaugas (pvz., transportas), programinę įrangą, techninę įrangą (pvz., detalės) ir gaminamos medžiagos ^[59].

Pagal ISO 14040 standartą *BCV* sudaro etapai, pateikti 18 pav.



18 pav. Būvio ciklo vertinimo struktūra ^[33]

Pirmiausia suformuluojamas tikslus klausimas, į kurį reikia atsakyti. Sekančiame etape analizuojamas produkto funkcijos procesų struktūra bei tarpusavio priklausomybė. Toliau sekančiu etapu siekiama apjungti ir interpretuoti rezultatus. Dažniausiai *BCV* atliekamas programine įranga ir duomenų bazėmis, kuriose sukaupti jau atliktų įvairių tyrimų duomenys ^[33].

Pagal ISO 14040 standarte pateiktą informaciją, reikia aiškiai aprašyti šiuos aspektus:

- funkcinį vienetą;
- produkto sistemos ribas;
- tiriamąją produkto sistemą;

- paskirstymo metodikas;
- poveikių kategorijas, poveikio vertinimo metodus ir interpretavimą;
- duomenų kokybės reikalavimus;
- prielaidas ^[59].

Funkcinis vienetas turi būti aiškiai apibrėžtas ir išmatuojamas, nes jis yra pagrindas tolimesniems *BCV* skaičiavimams. Labai svarbu pasirenkant funkcinį vienetą tai, kad lyginant panašius produktus ar paslaugas, pastarieji atliktų tą pačią ar bent panašią funkciją, priešingu atveju vertinimas būtų netikslus ^[33]. Produkto *sistemas ribos* gali būti labai įvairios ir plačios. Svarbu pasirinkti, kad sistema nebūtų labai plati arba per siaura. Sistemoms riboms apibrėžiamoms atsižvelgiant į duomenų prieinamumą, prielaidas ar apribojimo kriterijus ^[33].

BCV rezultatai charakterizuojami daugeliu *poveikio kategorijų* rodiklių. Tarpiniai įvertinimai:

- klimato kaita;
- stratosferos ozono sluoksnio ardymas;
- rūgštėjimas;
- eutrofikacija;
- fotocheminis ozono susidarymas;
- ekotoksiškumas;
- toksiškumas žmonėms;
- kietųjų dalelių susidarymas;
- jonizuojančioji spinduliuotė;
- žemės naudojimas;
- vandens naudojimas;
- abiotinių išteklių naudojimas;
- biotinių išteklių naudojimas ^[52].

Po tarpinio įvertinimo gaunamas rezultatas:

- žmogaus sveikata;
- ekosistemos kokybė arba natūrali aplinka;
- gamtos ištekliai ir ekosistemų paslaugos ^[52].

Savitasis globalinis klimato šiltėjimo potencialas. Šiltnamio efektą sukeliančiame procese, svarbiausi yra vandens garai atmosferoje. CO₂ – antros pagal svarbumą. Navicko, K. ir Venslausko, K., teigimu, „šiltnamio efektą sukeliančioms dujoms priskiriama ir hidrofluorangliavandeniliai (*HFC*), sieros heksafluoridas (SF₆) bei netiesioginio poveikio (CO, NO_x, SO₂) dujos, lakūs angliavandeniliai. Šios dujos išreiškiamos ekvivalentiniu CO₂ kiekiu pagal jų globalinį šiltėjimo potencialą (*GŠP*). Globalinio šiltėjimo potencialas – tai šiltnamio efektą sukeliančių dujų sukeliama klimato šiltėjimo potencialo vertė, lyginant su CO₂ ekvivalentu“. Navicko, K. ir Venslausko, K., teigimu, „*GŠP* apskaičiuojamas pagal vieno kilogramo dujų sukeliama šiltėjimo potencialą per šimto metų laikotarpį, palyginus su vienu kilogramu CO₂“ ^[33].

Poveikio aplinkai vertinimui pasirenkamos atitinkamos programinės įrangos metodai bei duomenų bazės, atsižvelgiant į analizuojamą produktą, sistemos ribas bei poveikio kategorijas. Ne visi metodai gali išanalizuoti eutrofikacijos, rūgštėjimo ir pan. poveikį. Poveikio aplinkai vertinimui pasirenkamos programinės įrangos, duomenų bazės ir metodų pavyzdžiai pateikiami 6 lentelėje ^[52].

6 lentelė. Poveikio aplinkai vertinimui naudojamų metodų, duomenų bazės ir programinės įrangos pavyzdžiai ^[52]

Programinė įranga	Duomenų bazė	Metodas
Open LCA	Ecoinvent	ILCD 2011
CCaLC2	Agri-footprint	ReCiPe
SimaPro8	US LCI	EDP
Gabi	ELCD	IPCC 2013 GWP 100a
Eco-it	EU ir Danish Input Output	CML
EcoImpact Compass	Swiss Input Output	Traci
-	-	EPS
-	-	Eco-Indicator
-	-	Impact

Sekantis žingsnis yra rezultatų analizė ir interpretacija, kurios metu nustatomas produkto poveikis aplinkai, taip pat pateikiamos rekomendacijos ir pan. ^[33].

Lanksčių pakuočių būvio ciklo įvertinimas

Medžiagos, gautos iš atsinaujinančių šaltinių, nebūtinai yra ekologiškos, daugiausia dėl jų auginimo ir išgavimo poveikio. Gyvavimo ciklo vertinimas yra būtinas norint įvertinti konvencinių plastikų pakeičiamumą į biologinės kilmės medžiagas. Šiuo atveju naudojama būvio ciklo vertinimo (*BCV*) metodika, siekiant įvertinti gaminio poveikį aplinkai ^[18].

Remiantis anksčiau nurodytais duomenimis ir standartu, atliekamas lanksčių pakuočių būvio ciklo vertinimas.

BCV sistemos ribos: nuo žaliavų išgavimo iki produkto (angl. *cradle-to-gate*).

Funkcinis vienetas: 1 t plastiko granulių.

Metodas: programinė įranga „CCaLC2“.

Poveikio kategorija: klimato kaita (dėl programoje esančių duomenų trūkumo kitos kategorijos nebuvo vertinamos).

Procedūra: būvio ciklo vertinimui pasirinktos medžiagos:

- *LDPE*;
- *LDPE* derva;
- *LLDPE* derva;
- *LLDPE* iš grūdų;
- *PLA* iš cukrinių runkelių;
- *PLA* iš kviečių.

Kita būvio ciklo įvertinimui naudojama programinė įranga buvo „COMPASS“ (platformos „EcoImpact“ dalis), duomenų bazė „Ecoinvent 3.7.1“, kuri skirta įvertinti, palyginti gaminių ir pakuočių poveikį aplinkai. Programa leidžia vartotojams atlikti būvio ciklo įvertinimą nuo „lopšio iki kapo“. Programinė įranga įvertina tiek pakuočių, tiek gaminių poveikį aplinkai. Poveikis apskaičiuojamas žaliavų išgavimui, gamybai / perdirbimui, gyvavimo pabaigos ir naudojimo fazei.

Pagal „COMPASS“ metodą pateikiami pagrindiniai *BCV* rodikliai: iškastinio kuro naudojimas, ŠESD išmetimas su ir be anglies įsisavinimu, vandens naudojimas, poveikis žmonėms, mineralinių išteklių naudojimas, eutrofikacija ir gėlo vandens ekotoksiškumas. Norint imituoti skirtingas sąlygas, programoje yra galimybė pasirinkti produkto gyvavimo pabaigos etapą, įvertinat procentais (pvz., 70 % medžiagos perdirbama, 25 % deginama ir 15 % į sąvartynus).

BCV funkcinis vienetas – 1 t žaliavos. Vertinama globalinio klimato atšilimo poveikio kategorija. Pasirinkti biologinės kilmės ir sintetiniai plastikai. Programinės įrangos vaizdas ir analizuojamos medžiagos pateiktos 19 pav.

The screenshot displays the EcoImpact COMPASS software interface. The left pane is divided into sections: 'Project' (Project Name: Flexible plastic comparison, Project Description: Project Description, Project Status: Open, Project Type: Internal), 'Product and Package' (FLEXIBLE PLASTIC ENVIRONMENTAL ANALYSIS, Package, EU, Qty: 1), and a table of materials. The right pane shows an 'Analysis Options' dialog box with the following settings:

- Calculation Type: Precalculated, server
- Analysis Method: COMPASS (2020)
- Result Type: Package Impact
- Selected Impact Categories: Fossil Fuel Use, GHG Emissions, Water Use, Freshwater Eutrophication, GHG Emissions (with Carbon Uptake), Freshwater Ecotoxicity

The dialog box has 'OK' and 'CANCEL' buttons at the bottom right.

Name	Total Mass	#	Transport
PS (1 x 1000kg)	6,000.00 kg	1	
. (1000 kg)	6,000.00 kg	1	
Bio-HDPE	0.00 kg	1	
Bio-LLDPE	1,000.00 kg	1	
HDPE (recycling scenario)	1,000.00 kg	1	
Item 1	0.00 kg	1	
LDPE (recycling scenario)	1,000.00 kg	1	
PLA	1,000.00 kg	1	
PLA (Sugarcane)	1,000.00 kg	1	
PP (recycling scenario)	1,000.00 kg	1	

19 pav. Programinės įrangos „EcoImpact COMPASS“ pavyzdys ir analizuojamos alternatyvios medžiagos

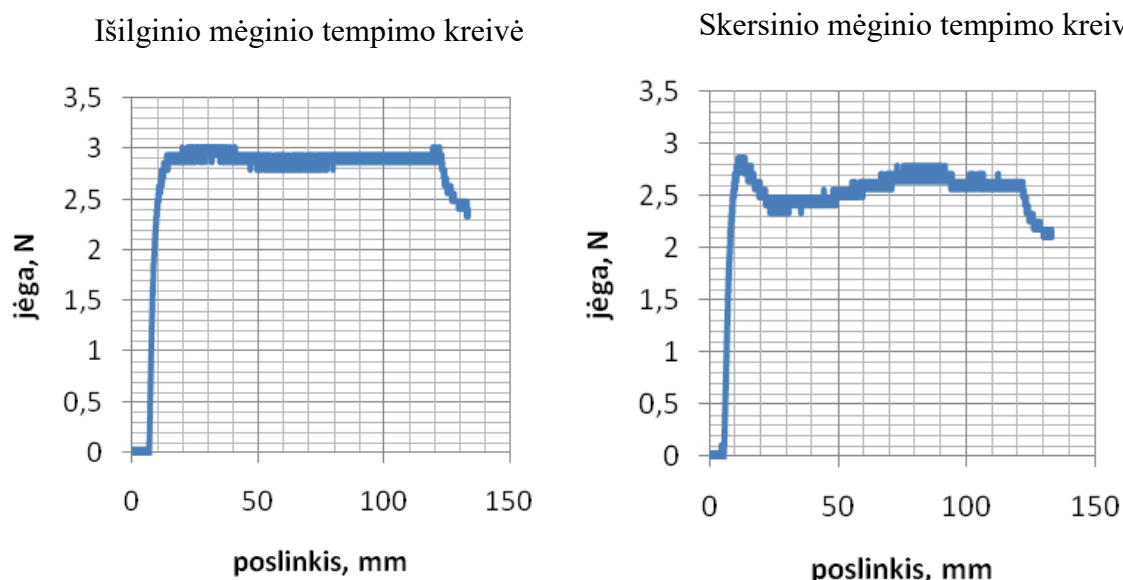
Kairėje paveikslė pusėje nurodytos medžiagos, naudojamos būvio ciklo įvertinimui, dešinėje – naudojamas metodas ir poveikio kategorijų pasirinkimo sąrašas.

3. Lanksčių konvencinių ir biologinės kilmės pakuočių fiziko-mechaninių savybių tyrimo ir būvio ciklo įvertinimo tyrimų rezultatai

3.1. Lanksčių pakuočių fiziko-mechaninių savybių tyrimo rezultatai

Lanksčių pakuočių fiziko-mechaninių savybių tyrimas buvo atliekamas su maišeliais, pagamintais iš monopolietileno, bioskaidaus monopolietileno ir biologinės kilmės plastiko, kurį sudaro 85 % cukranendrių pluoštas. Remiantis literatūros duomenis *HDPE* stiprumo riba svyruoja nuo 14,5–38 MPa. Kadangi šis plastikas plačiai naudojamas lanksčių pakuočių gamyboje, manoma, kad ši stiprumo riba yra pakankama. Atliekant maišelių tempimo bandymą, bioskaidaus monopolietileno ir biologinės kilmės maišeliai bus lyginami su monopolietileno maišeliu.

Pradėjus tempimo procesą, savirašis įtaisas nubrėžė grafiką. Iš kreivės buvo nustatyta didžiausia jėga, ties kuria bandinys pradeda siaurėti ir nutrūksta. Biologinės kilmės (85 % cukranendrių pluošto) lanksčios pakuotės išilginio ir skersinio mėginio tempimo diagramos pavyzdys pateiktas 20 pav.



20 pav. Biologinės kilmės (85 % cukranendrių pluošto) lanksčios pakuotės išilginio ir skersinio mėginio tempimo diagramos

Iš 20 pav. matome, kad deformavimo pradžioje jėga ir ilgio pokytis kinta proporcingai, todėl pradžioje yra tiesė. Po to medžiaga deformuojasi nežymiai ir pasiekia takumo ribą (išilginio mėginio 2,8 N, skersinio – 2,3 N). Pasiekus aukščiausią stiprėjimo ruožo tašką (išilginio mėginio – 3,1 N, skersinio – 2,9 N), deformacija susikoncentruoja vienoje mėginio vietoje, mėginyje ima formotis kaklelis su ryškiai sumažėjusiu mėginio skerspjūviu, todėl toliau tempimo jėga mažėja.

Didžiausia tempimo jėga gauta neskaidomo monopolietileno buvo 5,1 N – išilginė ir 5,3 N – skersinė. Biologiškai skaidaus monopolietileno ir biologinės kilmės plėvelės – atitinkamai 4,6 N, 2,7 N ir 3,3 N, 2,9 N. Tuomet apskaičiuojama stiprumo riba. Skaičiavimai:

$$A_0 = 10 \text{ mm} \times 0,025 \text{ mm} = 0,25 \text{ mm}^2,$$

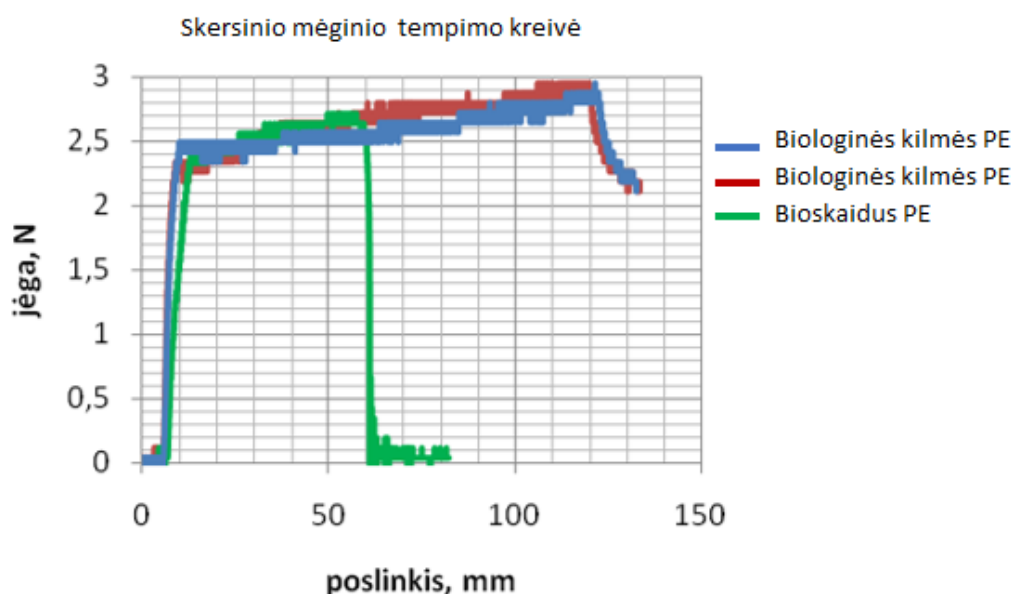
$$\sigma_u = \frac{4,6 \text{ N}}{0,25 \text{ mm}^2} = 18,4 \text{ MPa}.$$

Kiti skaičiavimai atliekami analogiškai. Įprastinės lanksčios pakavimo plėvelės (A) ir bioplastiko plėvelių (B, C) vidutinės didžiausios pasiektos jėgos rezultatai pateikti 7 lentelėje.

7 lentelė. Vidutinės didžiausios pasiektos jėgos rezultatai. Išilginės ir skersinės krypties bandiniai

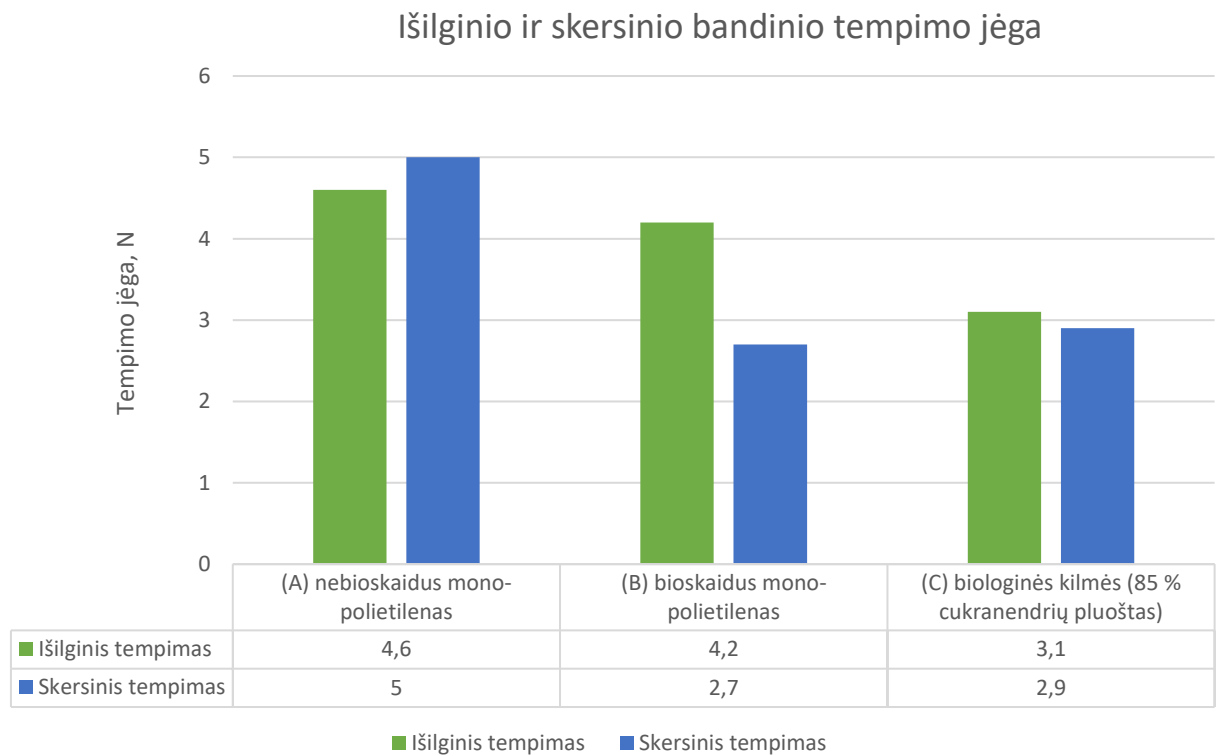
Bandiniai	Išilginis tempimas		Skersinis tempimas	
	Tempimo jėga (N)	Stiprumo riba (MPa)	Tempimo jėga (N)	Stiprumo riba (MPa)
(A) nebioskaidus mono-polietilenas	4,6	18,40	5,0	20,00
(B) bioskaidus mono-polietilenas	4,2	16,80	2,7	10,80
(C) biologinės kilmės (85 % cukranendrių pluoštas)	3,1	12,40	2,9	11,60

Atliktas biologinės kilmės plastikų skersinio bandinio tempimo kreivių palyginimas. Rezultatai pateikti 21 pav.



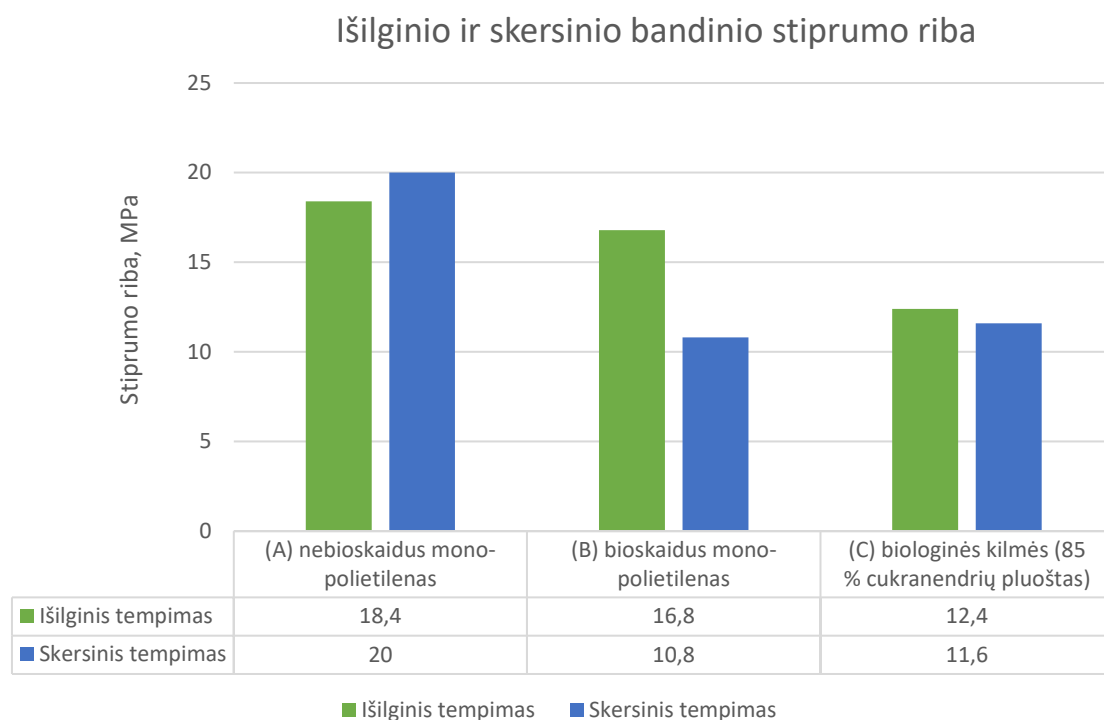
21 pav. Plėvelių tempimo bandymų rezultatai, kai bandiniai išpjauti skersine maišelio kryptimi: vieno biologiškai skaidaus PE (žalias grafikas) ir dviejų biologinės kilmės (85% cukranendrių pluoštas) bandinių palyginimas

Iš 21 paveikslo galime pastebėti, kad biologiškai skaidaus monopolietileno skersinio tempimo bandymo kreivė (žalias grafikas) staigiai krenta žemyn, tai parodo, kad bandys nutrūko nepasiekęs reikiamo 150 mm ilgio, o biologinės kilmės maišelio kreivės nežymiai skiriasi viena nuo kitos.



22 pav. Išilginių ir skersinių bandinių tempimo jėgos vidutiniai rezultatai

Remiantis 22 diagramos duomenis, geriausios tempimo savybės, t. y. didžiausia tempimo jėga (N) tiek skersinės tiek išilginės krypties mėginiuose, buvo nustatytos nebioskaidaus monopolietileno maišelio. Biologiškai skaidus monopolietilenas pasižymėjo geromis išilginės krypties mėginio tempiamosiomis savybėmis, pasiekdamas 4,2 N didžiausią tempimo jėgą, tačiau skersinių mėginių procesas nepasiekė 150 mm tikslinio pailgėjimo, nes visi mėginiai nutrūko vidutiniškai veikiami 2,7 N jėga. Biologiškai pagaminta lanksti pakuotė, kurioje yra 85% cukranendrių pluošto, didžiausia tempimo jėga abiejų krypčių mėginiuose buvo maždaug 3 N (3,1 ir 2,9).



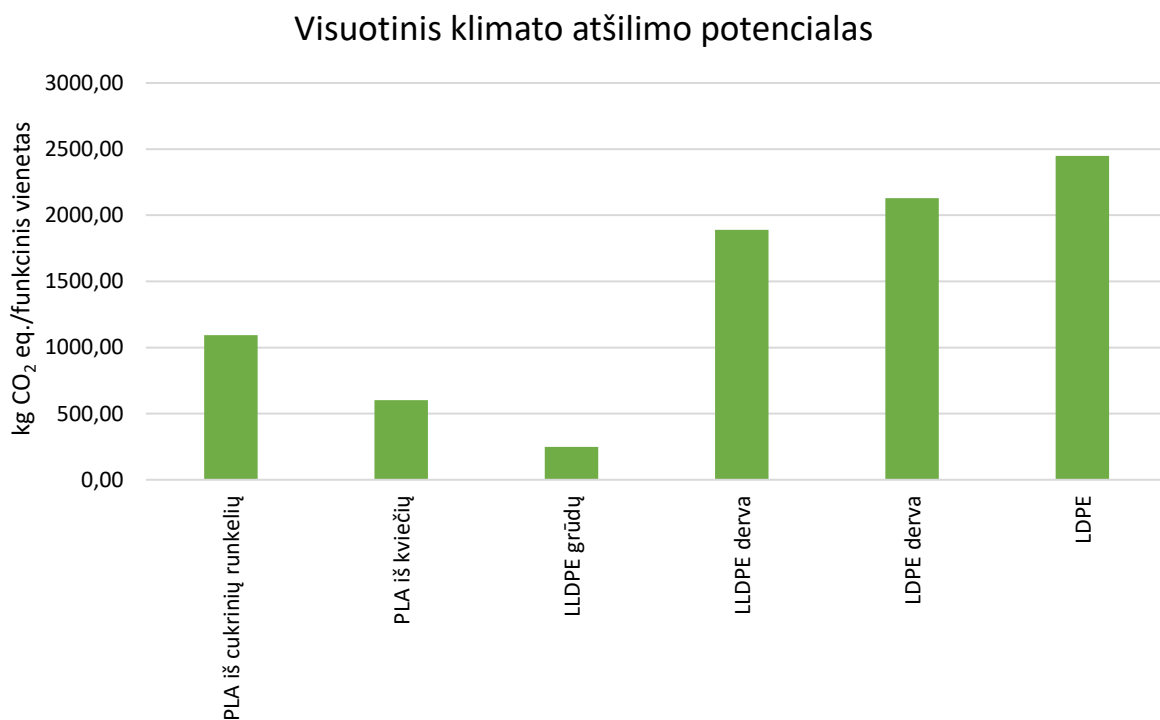
23 pav. Išilginių ir skersinių bandinių stiprumo ribos vidutiniai rezultatai

Remiantis 23 diagramos duomenis, geriausias tempimo stiprumas (MPa), tiek skersinės tiek išilginės krypties mėginiuose, buvo nustatytos nebioskaidaus monopolietileno maišelio. Biologiškai skaidus monopolietilenas pasižymėjo geromis išilginės krypties mėginio tempiamosiomis savybėmis, pasiekdamas 16,80 MPa galutinį tempimo stiprumą. Biologiškai pagaminta lanksti pakuotė, kurioje yra 85% cukranendrių pluošto, išilginių mėginių galutinis tempimo stipris buvo 12,4 MPa, skersinis – 11,60 MPa.

Įvertinus monopolietileno, bioskaidaus monopolietileno ir biologinės kilmės maišelių tempimo tyrimo rezultatus, galima teigti, kad biologinės kilmės medžiagos analizuotu atveju gali pakeisti sintetinės kilmės plėvelės lanksčios pakuotės gamyboje, tačiau tik tose gamybinėse linijose, kuriose maksimalūs naudojamų lanksčiųjų pakuočių medžiagos stiprumo ribos parametrai yra 11,60 MPa.

3.2. Lanksčių pakuočių būvio ciklo vertinimo tyrimo rezultatai

Buvo atliktas būvio ciklo vertinimas, siekiant išsiaiškinti konvencinių ir biologinės kilmės plastikų daromą poveikį aplinkai. Buvo analizuojamos medžiagos nuo žaliavos išgavimo iki granulių pagaminimo, naudojant programinę įrangą CCaLC2. Gauti rezultatai pateikiami 24 pav.

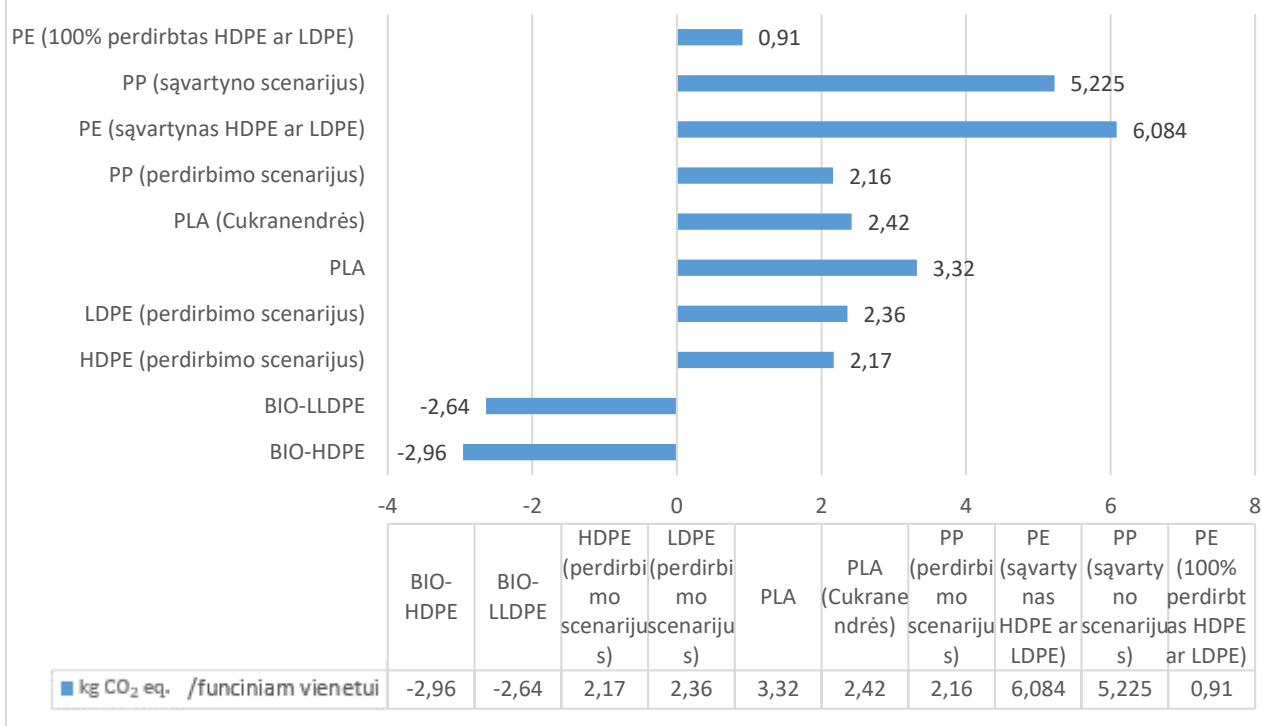


24 pav. Skirtingų žaliavų visuotinio klimato atšilimo potencialo diagrama

Remiantis 24 pav. duomenis matome, kad gaminant 1 t plastiko granulių, daugiausia CO₂ yra išmetama iš tradicinio plastiko *LDPE* – nuo 2130 iki 2448 (kg CO₂ eq./funkciniam vienetai). Gaminant plastiko granules iš biologinės kilmės medžiagų, išmetamo CO₂ kiekis svyruoja nuo 249 iki 1093 (kg CO₂ eq./funkciniam vienetai). Atliekant būvio ciklo vertinimą, pastebėta, kad bioplastikai turi aplinkosauginį privalumą, lyginant su plastikais, pagamintais iš iškastinio kuro. Pavyzdžiui *LLDPE* iš grūdų visuotinio klimato atšilimo potencialas yra 87 % mažesnis nei tradicinio *LLDPE*.

Buvo atliktas būvio ciklo įvertinimas naudojant programinę įrangą „EcoImpact COMPASS“. Alternatyvių lanksčiųjų plastikų poveikio aplinkai vertinimas (*BCV*) globalinio atšilimo poveikio aplinkai kategorijoje pateiktas 25 pav.

Alternatyvių lanksčiųjų plastikų poveikio aplinkai įvertinimas (BCI) globalinio atšilimo poveikio aplinkai kategorijoje



25 pav. Alternatyvių lanksčiųjų plastikų poveikio aplinkai įvertinimas (BCI) globalinio atšilimo poveikio aplinkai kategorijoje

Iš 25 paveikslo duomenų matome, kad gaminant 1 t *PLA* žaliavos yra išmetama 3,32 kg CO₂ ekv., o gaminant iš cukranendrių išmetamas kiekis yra šiek tiek mažesnis – 2,42 kg CO₂ ekv. Gaminant *Bio-PE* išmetama nuo -2,64 iki -2,96 kg CO₂ ekv. Neigiamas skaičius gaunamas todėl, kad auginant augalus, aplinkoje esantis anglies dvideginis yra absorbuojamas augalų. Biologinės kilmės bioskaidžių medžiagų gyvavimo ciklo pabaigoje, vertinant tai, kad jie yra kompostuojami, išsiskyręs CO₂ patenka atgal į dirvožemį. Todėl vertinant suminį CO₂ išmetimą, biologinės kilmės bioskaidžių medžiagų poveikis globalinio atšilimo kategorijoje yra neigiamas dydis.

Vertinant tai, kad *PE* ar *PP* galutinio naudojimo pabaigoje yra šalinami sąvartyne, jų poveikis yra beveik dvigubai didesnis nei *PLA* (*PE* – 6,084 kg CO₂ ekv., *PP* – 5,225 kg CO₂ ekv., *PLA* – 3,32 kg CO₂ ekv.). Įvertinus kitą scenarijų, kai *PP*, *LDPE* ir *HDPE* galutinio naudojimo pabaigoje yra perdirbami, jų poveikis globalinio klimato atšilimo kategorijoje tampa mažesnis nei *PLA* (*PP* – 2,16 kg CO₂ ekv., *LDPE* – 2,36 kg CO₂ ekv., *HDPE* – 2,17 kg CO₂ ekv., *PLA* – 3,32 kg CO₂ ekv.). Jeigu įvertinus tai, kad *PE* yra pagamintas iš perdirbto plastiko, jo poveikis globalinio atšilimo kategorijoje yra 0,91 kg CO₂ ekv., kuris yra daug mažesnis nei *PLA*. Tai reiškia, jei sintetinis plastikas yra perdirbamas, jo poveikis aplinkai yra mažesnis nei biologinės kilmės plastiko, šiuo atveju *PLA*.

Siekiant išsamiau išsiaiškinti plastikų poveikį aplinkai, buvo išanalizuotos kitos mokslinės publikacijos. Toliau pateikiami empirinio mokslinio tyrimo analizė, kurioje atlikti ir mokslinėse publikacijose publikuotų *BCV* tyrimų (tiriant konvencinių plastikų, biologinės kilmės polietileno ir iš cukranendrių pagamintų medžiagų poveikį aplinkai) analizė.

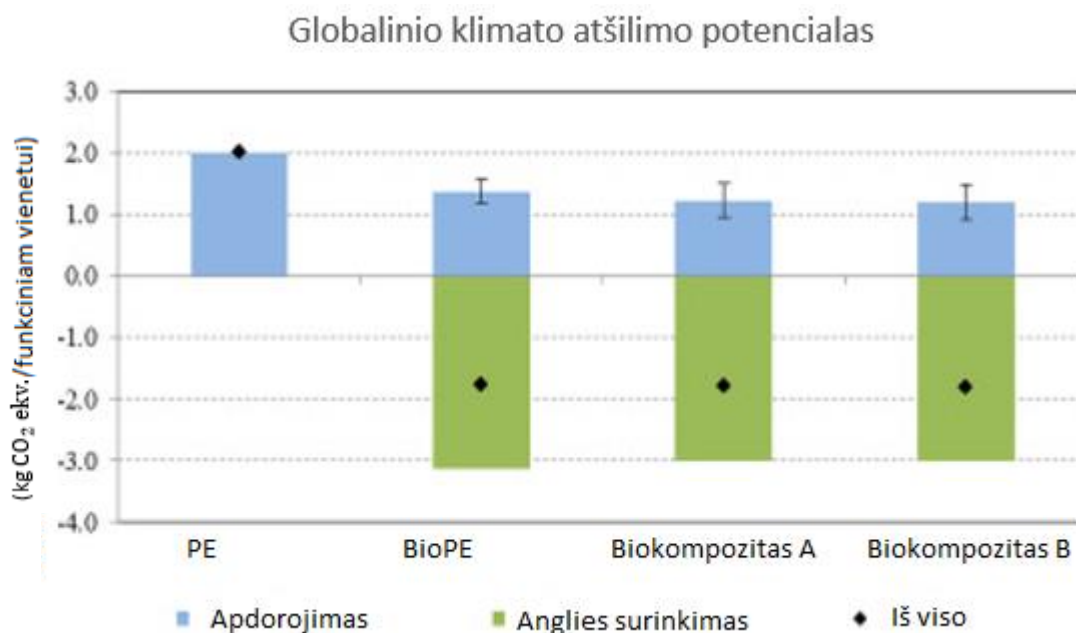
Autoriai ITA-Nagy, D. ir kt. atliko būvio ciklo vertinimą Brazilijoje. Buvo pasirinktos šios medžiagos: naftos pagrindu *PE*, *bio-PE* iš 100 % cukranendrių pluošto ir biokompozitai, susidedantys iš 76 % *bio-PE*, 20 % cukranendrių pluošto pagamintų skirtingais metodais ir 4 % maleino rūgšties anhidrido polietileno (*MAPE*) [18].

BCV sistemos ribos: nuo žaliavų išgavimo iki produkto (angl. *cradle-to-gate*) [18].

Funkcinis vienetas: 1 kg granulių [18].

Metodas: programinė įranga „SimaPro 8.5.2.0“ ir „Ecoinvent v3.4“ duomenų bazė. Duomenys apie bioetanolio ir bioetileno gamybos procesus buvo gauti tiesiogiai bendradarbiaujant su gamintojais [18].

BCV rezultatai pateikti 26 pav. Vertinamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimas 1 kg granulių, pagamintoms iš iškastinio *PE*, *bio-PE* ir kompozitų.



26 pav. Globalinio klimato atšilimo potencialas, gaminant 1 kg granulių [18]

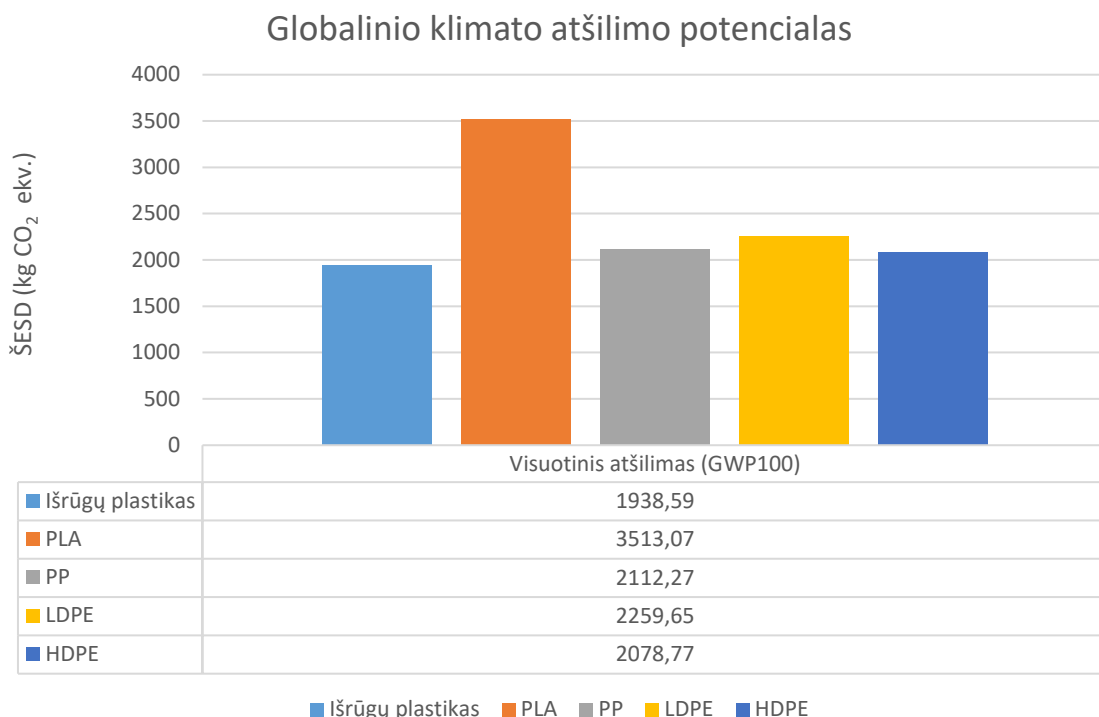
Remiantis tyrimo rezultatais, matome, kad *bio-PE* iš 100 % cukranendrių išmetamas CO₂ kiekis yra 1,38 kg CO₂ ekv., naftos pagrindo *PE* – 2,01 kg CO₂ ekv., biokompozitų A ir B atitinkamai – 1,22 kg CO₂ ekv. ir 1,20 kg CO₂ ekv. Surenkant anglį išmetamo CO₂ kiekis *bio-PE* yra (-1,76 kg CO₂ ekv.), kompozito A – (-1,79 kg CO₂ ekv.), kompozito B – (-1,81 kg CO₂ ekv.) [18]. Apibendrinant galima teigti, kad iš cukranendrių pagamintų *PE* granulių poveikis aplinkai, vertinant globalinio atšilimo potencialą, yra mažesnis nei naftos pagrindo *PE* granulių.

Autoriai Chalermthai, B. ir kt. atliko bioplastiko, pagaminto iš pieno išrūgų baltymų, kurie yra šalutinis sūrio gamybos produktas, būvio ciklo vertinimą. Kadangi išrūgos gaunamos iš sūrio gamybos atliekų srauto, todėl nėra atsižvelgiama į teršalų kiekį, susijusį su žemės ūkio etapu. Tyrimas atliekamas Abu Dabyje [5].

BCV sistemos ribos: nuo žaliavų išgavimo iki produkto (angl. *cradle-to-gate*) [5].

Funkcinis vienetas: 1 t bioplastiko [5].

Metodas: programinė įranga „SimaPro 8.4.0.0“ ir „CML Baseline 2000 ver. 2.05“ duomenų bazė. Skaičiavimams naudojama duomenų bazė „Ecoinvent 3“ [5]. Gauti rezultatai pateikiami 27 pav.



27 pav. Globalinio klimato atšilimo potencialas gaminant 1 t plastiko [5]

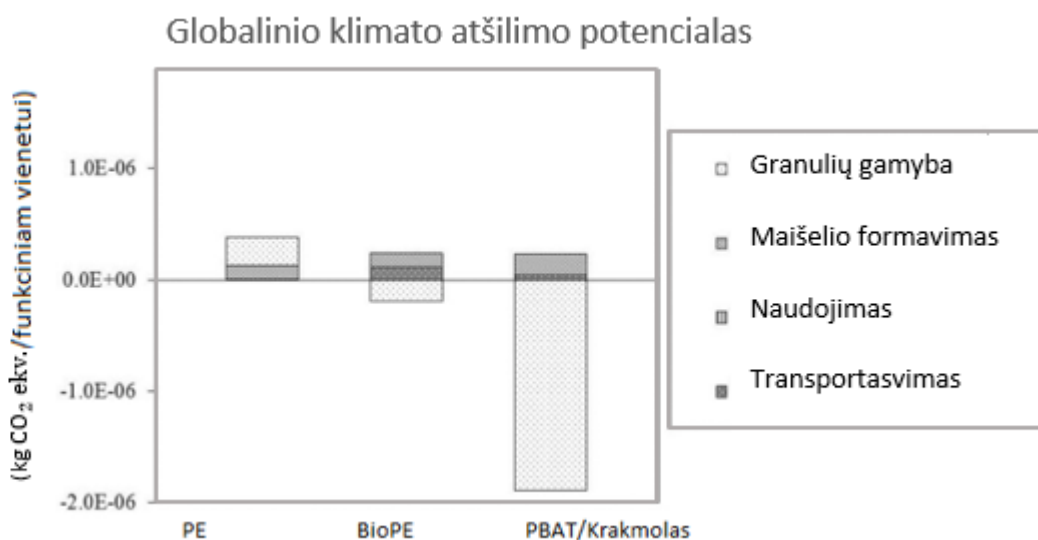
Iš 27 paveikslo duomenų matome, kad iš išrūgų pagaminto plastiko globalinio klimato atšilimo potencialas nesiekia 2000 kg CO₂ ekv., tuo tarpu iš *PP*, *LDPE* ir *HDPE* pagaminto plastiko – viršija šį skaičių. Iš *PLA* pagaminto plastiko globalinio klimato atšilimo potencialas siekia net 3500 kg CO₂ ekv. Remiantis gautais duomenimis, išrūgų plastiko gamyba yra mažiausias globalinio klimato šiltėjimo potencialo kategorijoje, palyginti su kitais polimerais. Gaminant 1 t išrūgų plastikų, atmosferoje išsiskiria 1939 kg CO₂ ekv., kuris yra mažesnis nei išskiriamo *PP*, *LDPE*, *HDPE* ir *PLA*.

Autoriai Saibuatrong, W. ir kt. įvertino *PE*, *bio-PE* (pagaminto iš šalutinio produkto, gaminant cukrų iš cukranendrių – melasos), ir *PBAT* / *krakmolo* šiukšlių maišų poveikį aplinkai. Autorių teigimu, *PBAT* ir *bio-PE* turi tas pačias geras mechanines savybes kaip *PE*, įskaitant stiprumą, lankstumą, tempimo savybes ir tinka naudoti maišeliams, žemės ūkio plėvelėms ir kt. Tyrimas atliktas Tailande. *PE* granulių *BCV* buvo gauta iš „Ecoinvent“ duomenų bazės 3.0. *PE* maišelio, kurio svoris $5,457 \times 10^{-5}$ kg, gamybai reikia $4,9 \times 10^{-3}$ kg *PE* granulių, $6,69 \times 10^{-4}$ kg cheminių priedų ir $8,3 \times 10^{-3}$ kWh elektros energijos. *Bio-PE* granulių gamyba susideda iš 6 etapų: cukranendrių auginimas, melasos išgavimas iš cukranendrių cukraus malimo ir rafinavimo metu, melasos perdirbimas į bioetanolį fermentuojant, bioetanolio dehidratacija į etileną ir polimerizacijos būdu gaminamos *bio-PE* granulės. Žaliavos gabenamos 28 t visiškai pakrautu sunkvežimiu [44].

BC sistemos ribos: nuo žaliavų išgavimo iki produkto (angl. *cradle-to-gate*), tai apima pagrindinius etapus: granuliu gavyba, medžiagų transportavimas į gamybos vietą ir maišelių gavyba [44].

Funkcinis vienetas: 1 maišelis [44].

Metodas: programinė įranga „SimaPro 8.2.3“ su „Eco-indicator 99“ [44]. Šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo rezultatai, gaminant 1 maišelį, pateikiami 28 pav.



28 pav. Globalinio klimato atšilimo potencialas gaminant 1 maišelį iš *PE*, *bio-PE* ir *PBAT / kraskmolo* [44]

Remiantis 28 paveikslo duomenis, matome, kad mažiausias globalinio klimato atšilimo potencialas yra *PBAT / kraskmolo* maišelio ($-1,65 \times 10^{-6}$ kg CO₂ ekv.), antroje vietoje yra *Bio-PE* maišelis ($-4,6 \times 10^{-7}$ kg CO₂ ekv.) ir didžiausias – *PE* maišelio ($3,87 \times 10^{-7}$ kg CO₂ ekv.) [44]. Remiantis tyrimo rezultatais nuo žaliavų išgavimo iki maišelio pagaminimo, *PBAT / kraskmolo* ir *bio-PE* maišeliai daro mažesnę poveikį visuotiniam atšilimui. Neigiamas skaičius rodo, kad cukranendrių auginimo metu buvo absorbuotas CO₂, o tai sumažino poveikį granuliu gavybos etape.

Atlikus būvio ciklo įvertinimą ir išanalizavus kitas mokslines publikacijas, galime teigti, kad biologinės kilmės lankčios pakuotės daro mažiausią poveikį globalinio klimato atšilimo kategorijoje. Palyginus plastikus pagamintus iš iškastinio kuro su biologinės kilmės, matome, kad biologinės kilmės plastikai dažniausiai turi neigiamą skaičių, kuris parodo, kad auginant biologinės kilmės žaliavas, vertinamas biogeninis anglies suvartojimas, kurį absorbuoja augdami augalai arba kuris patenka atgal į aplinką, kompostuojant biolginės kilmės plastikus ir pan.

Išvados

1. Išanalizavus literatūros šaltinius, nustatyta, kad plastikai yra dažniausiai naudojama pakuočių medžiaga, o polietilenas – dažniausiai naudojamas gaminant lanksčias pakuotes. Taip pat nustatyta, kad biologinės kilmės polimerai, lyginant mechanines savybes, yra alternatyva pakeičiant konvencinius plastikus.
2. Buvo atliktas 5 bandinių iš sintetinio nebioskaidaus monopolietileno, bioskaidaus monopolietileno ir biologinės kilmės (iš 85 % cukranendrių) maišelių tempimo bandymas. Atlikus tempimo tyrimą, nustatyta, kad pirmasis variantas parodė geriausias skersinės (20,00 MPa) ir išilginės (18,40 MPa) krypties tempimo savybes. Bioskaidus monopolietilenas parodė geras išilginės krypties tempimo savybes, tačiau skersinių mėginių procesas nepasiekė 150 mm tikslinio pailgėjimo ir nutrūkdavo. Lyginant abu konvencinius plastikus – bioskaidumą skatinančių priedų įterpimas į monopolietilena įtakoja medžiagos stiprumą ir 8,7 % sumažina medžiagos stiprumo ribą išilgine kryptimi ir 46 % – skersine. Lyginant lanksčios pakuotės medžiagas pagal kilmę – biologinės kilmės ir ne, medžiagos stiprumo riba skiriasi išilgine kryptimi 1,5 karto, skersine – 1,7 k. Biologinės kilmės medžiagos analizuotu atveju gali pakeisti sintetinės kilmės plėveles lanksčios pakuotės gamyboje, tačiau tik tose gamybinėse linijose, kuriose maksimalūs naudojamų lanksčiųjų pakuočių medžiagos stiprumo ribos parametrai yra 11,60 MPa.
3. Buvo atliktas būvio ciklo įvertinimas naudojant skirtingas programines įrangas („CCaLC2“ ir „EcoImpact COMPASS“). Analizei buvo pasirinkti konvenciniai plastikai bei biologinės kilmės medžiagos. „CCaLC2“ programinės įrangos analizės metu, nustatyta, kad granulių, pagamintų iš biologinės kilmės visuotinio klimato atšilimo potencialas yra mažesnis, lyginant su tradiciniais plastikais. „EcoImpact COMPASS“ programinės įrangos metu, nustatyta, kad biologinės kilmės plastikai turi neigiamą skaičių ir daro mažesnę poveikį globalinio klimato atšilimo kategorijoje. Neigiamas skaičius parodo, kad yra vertinamas biogeninis anglies kiekis, kurį absorbuoja augdami augalai arba kompostavimo metu, grąžinamas atgal į dirvožemį. Taip pat išanalizavus mokslines publikacijas pastebėta, kad gaminant granules, mažiausią poveikį visuotiniam klimato atšilimo potencialui turėjo *bio-PE*, (1,38 kg CO₂ ekv.) pagamintas iš cukranendrių, lyginant su standartiniu *PE* (2,01 kg CO₂ ekv.). Plastiko gamyboje mažiausiais poveikis buvo pastebimas iš išrūgų pagaminto plastiko. Maišelio gamyboje mažiausias globalinio klimato atšilimo potencialas yra *PBAT/krakmolo* maišelio ($-1,65 \times 10^{-6}$ kg CO₂ ekv.), antroje vietoje yra *Bio-PE* maišelis ($-4,6 \times 10^{-7}$ kg CO₂ ekv.) ir didžiausias – *PE* maišelio ($3,87 \times 10^{-7}$ kg CO₂ ekv.).
4. Atlikus fiziko-mechaninių savybių lanksčių pakuočių tyrimą, remiantis gautais rezultatais, nustatyta, kad biologinės kilmės lanksčios pakuotės gali pakeisti gamyboje esančius klasikinius plastikus. Iš atliktų būvio ciklo įvertinimo tyrimų rezultatų ir remiantis kitomis mokslinėmis publikacijomis, nustatyta, kad biologinės kilmės plastikai, daro mažesnę poveikį globalioje klimato atšilimo kategorijoje. Norint pakeisti iškastinio kuro plastiką į biologinės kilmės, reikia ir toliau tirti skirtingos kilmės medžiagų fizikines–mechanines savybes bei atlikti poveikio aplinkai vertinimus.

Literatūros sąrašas

1. ABRAHAM, A. et al. Anaerobic co-digestion of bioplastics as a sustainable mode of waste management with improved energy production – A review. In *Bioresource Technology* [interaktyvus]. 2021. Vol. 322, no. December 2020, p. 124537. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124537>>.
2. AHAMED, A. et al. Flexible packaging plastic waste – environmental implications, management solutions, and the way forward. In *Current Opinion in Chemical Engineering* [interaktyvus]. 2021. Vol. 32, p. 100684. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.coche.2021.100684>>.
3. BÁTORI, V. et al. Anaerobic degradation of bioplastics: A review. In *Waste Management*. 2018. Vol. 80, p. 406–413. .
4. BUTLER, T.I. and B.A. MORRIS. *PE-Based Multilayer Film Structures* [interaktyvus]. Elsevier Inc., 2016. 281–310 p. ISBN 9780323371001.
5. CHALERMTHAI, B. et al. Life cycle assessment of bio-plastic production from whey protein obtained from dairy residues. In *Bioresource Technology Reports* [interaktyvus]. 2021. Vol. 15, no. March, p. 100695. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100695>>.
6. CHEN, Y. et al. Single-use plastics: Production, usage, disposal, and adverse impacts. In *Science of the Total Environment* [interaktyvus]. 2021. Vol. 752, p. 141772. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141772>>.
7. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva, 2019 m. Birželio 5 d. (ES) 2019/904 „dėl tam tikrų plastikinių gaminių poveikio aplinkai mažinimo“. [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2021-03-25]. Prieiga per internetą: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32019L0904&from=LT>>.
8. ELSE, G.F. *Recycling*. 2014. ISBN 9780323266987.
9. PLASTIC EUROPE. *Plastics – the Facts 2020*. [Interaktyvus]. 2020. [Žiūrėta 2021-04-25]. Prieiga per internetą: <<https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/4312-plastics-facts-2020>>.
10. EUROPEAN BIOPLASTICS. *Applications for bioplastics*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-03-25]. Prieiga per internetą: <<https://www.european-bioplastics.org/market/applications-sectors/>>.
11. EUROPEAN BIOPLASTICS. *Bioplastic Market Data 2019*. In *European Bioplastics* [interaktyvus]. Žiūrėta [2021-05-12]. 2019. p. 1–4. Prieiga per internetą: <https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/Report_Bioplastics_Market_Data_2019.pdf>.
12. EUROPEAN BIOPLASTICS. *EN13432 Certified Bioplastics Performance in Industrial Composting*. [interaktyvus]. Žiūrėta [2021-03-05]. 2015. p. 5. Prieiga per internetą: https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_En_13432.pdf.
13. EUROPEAN BIOPLASTICS. *Bioplastics packaging - Combining performance with sustainability*. [interaktyvus]. [Žiūrėta 2021-05-12]. 2020. p. 1–4. Prieiga per internetą: https://docs.european-bioplastics.org/publications/fs/EUBP_FS_Packging.pdf
14. FEIL, A. and T. PRETZ. *Mechanical recycling of packaging waste*. 2020. 283–319 p. ISBN 9789038637594.
15. GEORGE, A. et al. A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. In *International Journal of Biological Macromolecules* [interaktyvus]. 2020. Vol. 154, p. 329–338. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.120>>.
16. HANN, S. et al.. *Study to provide information supplementing the study on the impact of the use of „oxo-degradable“ plastic on the environment*. 2017. 2016–2017 p. ISBN 9789279684845.
17. HORODYTSKA, O. et al. *Plastic flexible films waste management – A state of art review*. In *Waste Management* [interaktyvus]. 2018. Vol. 77, p. 413–425. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.023>>.

18. ITA-NAGY, D. et al. Life cycle assessment of bagasse fiber reinforced biocomposites. In *Science of the Total Environment* [interaktyvus]. 2020. Vol. 720. Prieiga per internetą: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720310974>>.
19. JONELYTĖ, E. POLIMERINIŲ PAKUOČIŲ GAMYBOS YPATUMAI UAB „AURIKA”. Baigiamasis magistro projektas. Kaunas, 2015.
20. KAISER, K. et al. Recycling of polymer-based multilayer packaging: A review. In *Recycling*. 2018. Vol. 3, no. 1. .
21. STANIŠKIS, K. et al. *Darni atliekų vadyba. Mokslo monografija*. Kaunas: Technologija, 2017. 472 p. ISBN 978-609-02-1414-5.
22. KHAN, M.Z.R. et al. Tensile and flexural properties of natural fiber reinforced polymer composites: A review. In *Journal of Reinforced Plastics and Composites* . 2018. Vol. 37, no. 24, p. 1435–1455. .
23. KIZINIEVIČ, O. and R. ŽURAUSKIENĖ. *Inovatyvios polimerinės statybinės medžiagos ir dirbiniai: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika, 2012. ISBN 9786094571657.
24. LR energetikos ministerija, “Dėl valstybinio strateginio atliekų tvarkymo 2014-2020 plano patvirtinimo,” no. 20, pp. 1–89, 2018.
25. MCKEEN, L. Renewable Resource and Biodegradable Polymers. In *The Effect of Sterilization on Plastics and Elastomers* . 2012. p. 305–317. .
26. MCKEEN, L.W. Introduction to Plastic Properties. In *The Effect of UV Light and Weather on Plastics and Elastomers* . 2013. p. 43–69. .
27. MCKEEN, L.W. Introduction to Plastics and Polymers. In *Permeability Properties of Plastics and Elastomers* . 2012. p. 21–37. .
28. MCKEEN, L.W. *Introduction to the Mechanical, Thermal, and Permeation Properties of Plastics and Elastomer Films*. . 2017. 25–64 p. ISBN 9780128132920.
29. MCKEEN, L.W. Markets and Applications for Films, Containers, and Membranes. In *Permeability Properties of Plastics and Elastomers* . 2012. p. 59–75. .
30. MCKEEN, L.W. Production of Films, Containers, and Membranes. In *Permeability Properties of Plastics and Elastomers* . 2012. p. 39–58. .
31. MCKEEN, L.W. Production of Films, Containers, and Membranes. In *Permeability Properties of Plastics and Elastomers* . 2017. p. 41–60. .
32. MIKUCKIS, F. *Medžiagų atsparumas. Metodiniai patarimai*. Kaunas, ARDIVA, 2008. ISBN 9789955896364.
33. NAVICKAS, K. and K. VENS LAUSKAS. *Biomės būvio ciklo analizė / mokomoji knyga. Kaunas: 2012. 84 p.* 2012. 1–84 p. ISBN 978.
34. NIAOUNAKIS, M. Chemical Recycling. In *Biopolymers Reuse, Recycling, and Disposal* . 2013. p. 167–192. .
35. PINTO DA COSTA, J. et al. The environmental impacts of plastics and micro-plastics use, waste and pollution: EU and national measures - Requested by the PETI committee. European Union - PE 658.279. [Interaktyvus]. 2020. Žiūrėta [2021-03-08]. Prieiga per internetą: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/658279/IPOL_STU\(2020\)658279_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2020/658279/IPOL_STU(2020)658279_EN.pdf).
36. PLASTIC OCEANS. Plastic Pollution Facts. [interaktyvus]. 2021. Žiūrėta [2021-04-28]. Prieiga per internetą: <<https://plasticoceans.org/the-facts/>>.
37. POLMAN, E.M.N. et al. Comparison of the aerobic biodegradation of biopolymers and the corresponding bioplastics: A review. In *Science of the Total Environment* [interaktyvus]. 2021. Vol. 753, p. 141953. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141953>>.
38. RAI, P. et al. Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers. In *Bioresource Technology* [interaktyvus]. 2021. Vol. 325, no. November 2020, p. 124739. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124739>>.

39. REBITZER, G. and G. HOULDER. CEFLEX GUIDE TO DESIGN FOR A CIRCULAR ECONOMY / Recycling flexible packaging in the real world Today's Presenters. [interaktyvus]. 2020. Prieiga per internetą: <<https://ceflex.eu/resources/>>.
40. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS REGLAMENTAS (EB) Nr. 1907/2006 2006 m. gruodžio 18 d. „dėl cheminių medžiagų registracijos, įvertinimo, autorizacijos ir apribojimų (REACH), įsteigiantis Europos cheminių medžiagų agentūrą, iš dalies keičiantis Direktyvą 1999/45/EB bei panaikinantį Tarybos reglamentą (EEB) Nr. 793/93, Komisijos reglamentą (EB) Nr. 1488/94, Tarybos direktyvą 76/769/EEB ir Komisijos direktyvas 91/155/EEB, 93/67/EEB, 93/105/EB bei 2000/21/EB“. [Žiūrėta 2021-03-08]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A02006R1907-20150601.41>. RUDNIK, E. Biodegradability Testing of Compostable Polymer Materials. In *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications* [interaktyvus]. 2013. no. 2008, p. 213–263. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-4557-2834-3.00011-2>>.
42. RUDNIK, E. *Compostable Polymer Materials: Definitions, Structures, and Methods of Preparation. Definitions, Structures, and Methods of Preparation*. Elsevier, 2013. 189–211 p. ISBN 9781455730032.
43. RUDOLPH, N. et al. Plastics Recycling—Conservation of Valuable Resources. In *Understanding Plastics Recycling*. 2017. p. 13–38. .
44. SAIBUATRONG, W. et al. Life cycle assessment focusing on the waste management of conventional and bio-based garbage bags. In *Journal of Cleaner Production* [interaktyvus]. 2017. Vol. 158, p. 319–334. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.006>>.
45. SHEN, L. et al. Product overview and market projection of emerging bio-based plastics. PRO-BIP. In *Group Science, Technology and Society* [interaktyvus]. 2009. no. June, p. 41. [Žiūrėta 2021-03-25]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/216092211_Product_overview_and_market_projection_of_emerging_bio-based_plastics_PRO-BIP_2009>.
46. SHEN, L. and E. WORRELL. Plastic Recycling. In *Handbook of Recycling: State-of-the-art for Practitioners, Analysts, and Scientists* [interaktyvus]. 2014. p. 179–190. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00013-1>>.
47. SHEN, M. et al. Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution? In *Environmental Pollution* [interaktyvus]. 2020. Vol. 263, p. 114469. Žiūrėta [2021-03-09]. Prieiga per internetą: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114469>>.
48. SIRACUSA, V. and I. BLANCO. Bio-polyethylene (Bio-PE), Bio-polypropylene (Bio-PP) and Bio-poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): Recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. In *Polymers*. 2020. Vol. 12, no. 8. .
49. TISEO, I. Distribution of single-use plastic production worldwide in 2014, by region. In *Chemicals & Resources* [interaktyvus]. 2021. [žiūrėta 2021-03-25]. Prieiga per internetą: <<https://www.statista.com/statistics/1000598/distribution-single-use-plastic-production-worldwide-by-region/>>.
50. TISEO, I. Global plastic production 1950-2019. In *Chemicals & Resources* [interaktyvus]. 2021. [Žiūrėta 2021-03-25]. Prieiga per internetą: <<https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/>>.
51. Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimas 2006 m. lapkričio 24 d., Nr. 1168 “dėl apmokestinamųjų gaminių ir pakuočių atliekų naudojimo ir (ar) perdirdavimo užduočių patvirtinimo”. [interaktyvus]. 2017. Vol. 4139, no. 81, p. 1–18. Prieiga per internetą: <https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/lt_ar_2017-07-01.pdf>.
52. Z. HAUSCHILD, M. et al. *Life cycle assessment. Theory and Practice*. . 1–1215 p. ISBN 9783319564746.
53. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 94/62/EB 1994 m. gruodžio 20 d. "dėl pakuočių ir

- pakuočių atliekų”. [Interaktyvus]. Žiūrėta [2021-05-12]. Prieiga per internetą: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:01994L0062-20180704&from=EN>>.
54. Eurostat Statistics Explained. 2020. Packaging waste statistics. [interaktyvus]. Prieiga per internetą: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Packaging_waste_statistics>.
55. Flexible Packaging Europe. [interaktyvus]. 2021. Žiūrėta [2021-05-15]. Prieiga per internetą: <<https://www.flexpack-europe.org/en/>>.
56. ISO 527-1. Plastics — Determination of tensile — Part 1: General principles. In *Iso* [interaktyvus]. 2012. p. 1–28. Prieiga per internetą: <www.iso.org>.
57. ISO 527-3. Plastics — Determination of tensile properties — Part 3: Test conditions for films and sheets. 2018. p. 1–9. .
58. LST EN ISO 14040:2007. Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas. Principai ir sandara (ISO 14040:2006). .
59. LST EN ISO 14044:2007. Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas: Reikalavimai ir nurodymai (ISO 14044:2006).
60. Medžiagų mechaninės savybės. [Interaktyvus]. Žiūrėta [2021-05-11]. Prieiga per internetą: http://www.techmat.vgtu.lt/konspektai/Skaic_mech/Inziner_met/Teorija/AGG_P5.pdf