



Kauno technologijos universitetas
Aplinkos inžinerijos institutas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Palyginamasis aplinkosauginis ir socialinis agroplėvelių būvio ciklo vertinimas

Baigiamasis magistro projektas

Domantė Lubytė

Projekto autorė

Doc. dr. Daina Kliugaitė

Vadovė

Kaunas, 2022



Kauno technologijos universitetas
Aplinkos inžinerijos institutas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Palyginamasis aplinkosauginis ir socialinis agroplėvelių būvio ciklo vertinimas

Baigiamasis magistro projektas
Darnus valdymas ir gamyba (6213EX001)

Domantė Lubytė

Projekto autorė

Doc. dr. Daina Kliaugaitė

Vadovė

Prof. dr. Jolanta Dvarionienė

Recenzentė

Kaunas, 2022

Lubytė Domantė. Palyginamasis aplinkosauginis ir socialinis agroplėvelių būvio ciklo vertinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Daina Kliaugaitė; 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: būvio ciklo vertinimas, socialinis būvio ciklo vertinimas, bioplastikas, mulčiavimo plėvelės, plastikas, biodegradacija.

Kaunas, 2022. 73 p.

Santrauka

Senkantys neatsinaujinantys išteklių, augantis plastiko atliekų kiekis pasaulyje ir prie to vis labiau prisidedantis žemės ūkio sektorius, skatina ieškoti alternatyvų ar aplinkai draugiškesnio plastiko gaminių naudojimo būdo ir vienas iš galimų problemos būdų sprendimų – ekoinovacija, bioplastikas, nors ir nagrinėjamas nemažai, bet vis dar susiduriama su sunkumais tinkamai vertinant ir/ar pritaikant jų naudojimą žemės ūkyje. Trūksta tyrimų vertinant bioplastiko poveikį remiantis būvio ciklo vertinimo (BCV) pagrindu, ypač siekiant įvertinti šį poveikį žemės ūkyje naudojamoms mulčiavimui skirtoms plėvelėms, aplinkosauginiu ir socialiniu požiūriu. Todėl šio tyrimo metu buvo atliekama palyginamoji analizė tarp, iš skirtingų medžiagų, tačiau tokią pačią funkciją atliekančių, mulčiavimui skirtų plėvelių vertinant jas pagal visa jų gyvavimo būvio ciklą siekiant išsiaiškinti ar kuriamos inovatyvios alternatyvos iš tiesų yra aplinkosauginiu socialiniu požiūriu pranašesnės už šiuo metu plačiausiai paplitusias įprastinio plastiko mulčiavimui skirtas plėveles.

Siekiant atlikti minėto pobūdžio tyrimus buvo panaudotas būvio ciklo vertinimams pritaikyta programa „SimaPro 9.1“ ir joje esančios duomenų bazės bei mokslinėje bei praktinėje literatūroje surinkti duomenys apie nagrinėjimui pasirinktas plėveles: polilaktido rūgšties arba polilaktido (PLA) pagrindu pagaminta plėvelė, polibutileno adipato tereftalatas (PBAT) pagrindu pagaminta plėvelė ir iš tradicinio mažo tankumo polietileno (LDPE) pagaminta plėvelė. Aplinkosauginis šių plėvelių vertinimas parodė, jog didžiausias poveikis aplinkai sugeneruojamas plastiko granulių gamybos metu, pilno aplinkosauginio BCV požiūriu didžiausias potencialus poveikis aplinkai prognozuojamas iš PBAT plastiko gaminamoms plėvelėms. O atlikus socialinį vertinimą granulių gamyboje naudojamoms žaliavoms gauti rezultatai parodė, jog didžiausios socialinės rizikos siejamos su LDPE ir PBAT granulėmis kyla dėl su naftos pramone siejamomis sudėtinėmis dalimis, tuo tarpu su PLA granulių gamyba siejamas pasėlių auginimo poreikis buvo atsakingas už didžiausias rizikas. Taip pat pastebėta, jog gaminant reikiamus komponentus PLA, PBAT ar LDPE granulėms Lietuvoje (LT) ar Lenkijoje (PL) galima tikėtis socialiai atsakingesnės gamybos, nei Kinijoje (CN). Tačiau vis dar sąlyginai nedidelio tikslumo rezultatus galintis pateikti socialinis produktų vertinimas ir spragų turintis aplinkosauginis būvio ciklo vertinimas parodė poreikį tolimesniems tokio tipo tyrimams ateityje.

Lubytė Domantė. Comparative Environmental and Social Life Cycle Assessment of Agrofilms. Master's final project / manager Assoc. prof. dr. Daina Kliaugaitė; Kaunas technology university, Institute of Environmental Engineering; Faculty of mechanical engineering and design

Field and field of study (group of fields of study): Environmental Engineering (E03) - Basic, Production Engineering (E10), Business (L01), Engineering Sciences.

Keywords: life cycle assessment, social life cycle assessment, bioplastics, mulching films, plastics, biodegradation.

Kaunas, 2022. 73 p.

Summary

The depletion of non-renewable resources, the growing amount of plastic waste in the world and the growing contribution to all of it from the agricultural sector are driving the search for alternative or more environmentally friendly uses of plastic products and one of the possible solutions to the problem: eco-innovation, bioplastics, but here are still difficulties in properly assessing and / or adapting their use in agriculture. There is a lack of research to assess the impact of bioplastics on the basis of life cycle assessment (LCA), in particular to assess this impact on mulching films used in agriculture, from an environmental and social point of view. Therefore, this study carried out a comparative analysis between mulching films made of different materials but with the same function throughout their life cycle in order to find out whether the innovative alternatives being developed are indeed more environmentally and socially superior than the currently widespread conventional ones.

In order to carry out this type of study, the SimaPro 9.1 program adapted for life cycle assessments and the databases and data found in the literature on the selected films were used: polylactic acid or polylactide (PLA) based film, polybutylene adipate terephthalate (PBAT) based film and a film made from traditional low density polyethylene (LDPE). The environmental assessment of these films showed that the highest environmental impact is generated during the production of plastic pellets, and the highest potential environmental impact from the point of view of full environmental BCV is predicted for PBAT plastic films. And the results of the social assessment for the raw materials used in the production of pellets showed that the highest social risks associated with LDPE and PBAT pellets are due to the components associated with the oil industry, while the crop demand for PLA pellets was responsible for the highest risks. It has also been observed that the production of the required components for PLA, PBAT or LDPE pellets in Lithuania (LT) or Poland (PL) can be expected to be more socially responsible than in China (CN). However, the social life cycle assessment methods are still relatively inaccurate, and LCA limitations showed the need for further research in the future.

Turinys

Lentelių sąrašas	6
Paveikslų sąrašas	7
Įvadas.....	10
1. Tradicinis plastikas	11
2. Bioplastikas	15
2.1. Polilaktido rūgštis arba polilaktidas (PLA)	16
2.1.1. PLA gamyba.....	17
2.2. Polibutileno adipato tereftalatas (PBAT)	18
2.3. Bioplastiko trūkumai	19
2.4. Tinkamiausi bioplastiko panaudojimo būdai.....	21
3. Agrotekstilė	23
3.1. Polietileninė mulčiavimo plėvelė	23
3.2. Mulčiavimo plėvelės iš bioplastiko	26
3.2.1. Mulčiavimo plėvelių gaminamas iš įvairių medžiagų mišinių.....	27
3.3. Aplinkosauginis būvio ciklo vertinimas	28
3.4. Socialinis būvio ciklo vertinimas	30
4. Metodika.....	32
4.1. Aplinkosauginio būvio ciklo vertinimo metodika.....	32
4.1.1. Būvio ciklo vertinimo tikslai, funkcinis vienetas, ribos	32
4.1.2. Inventorinė analizė	33
4.1.3. Nagrinėjami atliekų apdorojimo būdai	38
4.1.4. Produkto poveikio aplinkai būvio cikle vertinimo metodika	39
4.2. Socialinio būvio ciklo vertinimo metodika	42
4.2.1. Socialinio būvio ciklo vertinimo tikslai, funkcinis vienetas, ribos	43
4.2.2. Inventorinė analizė	44
4.2.3. Granulių socialinis būvio ciklo vertinimas.....	45
5. Rezultatai.....	48
5.1. Aplinkosauginis būvio ciklo vertinimas	48
5.1.1. Granulių gamybos būvio ciklo vertinimo rezultatai	48
5.1.2. Atliekų tvarkymo scenarijų būvio ciklo vertinimo rezultatai.....	52
5.1.3. Pilnas mulčiavimui skirtos plėvelės būvio ciklo vertinimas	55
5.2. Socialinis būvio ciklo vertinimas	58
Išvados	61
Diskusija ir rekomendacijos	63
Literatūros sąrašas:.....	66

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Europos ŽŪ plastiko rinka pagal produktus, prieš ir po produktų panaudojimo ir surinkimo, 2020 [38]	24
2 lentelė. Europos ŽŪ plastiko rinka pagal polimerų rūšis, prieš ir po produktų panaudojimo ir surinkimo, 2020 [38]	25
3 lentelė. Reikalingi įvediniai gaminant 1 kg PLA granulių.....	34
4 lentelė. Reikalingi įvediniai ir sugeneruojami išvediniai apdorojant 1 kg PLA plėvelės	35
5 lentelė. Reikalingi įvediniai gaminant 1 kg PLA granulių.....	37
6 lentelė. Reikalingi įvediniai ir sugeneruojami išvediniai apdorojant 1 kg PBAT plėvelės	37
7 lentelė. Tyrime nagrinėti atliekų apdorojimo būdai ir jų taikymas.....	38
8 lentelė. Poveikio aplinkai vertinimo lygiai: galutinis indeksas, žala aplinkai ir poveikio aplinkai kategorijos	41
9 lentelė. S-BCV vertinimui naudoti duomenys vertinant PLA/LDPE ir PBAT granulių gamybą..	44
10 lentelė. Socialines poveikio kategorijos ir jų socialines indikatorių subkategorijos [86,78]	47
11 lentelė. Tyrime išryškėjusios problemos.....	63

Paveikslų sąrašas

1 pav. Plastiko skirstymas į termoplastikus (thermoplastics) ir termosetus (thermosets) bei jų tolimesnis skirstymas [6]	11
2 pav. Produkto eksploataavimo trukmės pasiskirstymai aštuoniuose pramoninio naudojimo sektoriuose, pavaizduoti kaip normalaus logaritminio tikimybių pasiskirstymo funkcijos [25].....	14
3 pav. Pasauliniai bioplastiko gamybos pajėgumai 2021 m. (viršuje); prognozuojami pasauliniai bioplastiko gamybos pajėgumai 2026 m. (apačioje) [27].....	16
4 pav. Kompostavimo rezultatai Celiuliozės ir PBAT pagrindu pagamintoms plėvelėms [40]	18
5 pav. Europos biologiškai skaidžių plastikų sertifikatai [53]	20
6 pav. Biologiškai skaidžių plastikų vartojimo sektoriai pagal taikymą Europos Sąjungoje [42]....	21
7 pav. Plastiko pramonės scenarijus 2050 [50]	22
8 pav. Žemės ūkio plastiko ES atliekų masės srautas [49]	23
9 pav. Numatomas MP likučių kaupimasis dirvožemyje, kai MP įterpiama 200 kg/ha per metus 10 metų. Manoma, kad 10 % MP išliks dėl nesuyrančių plastikinių komponentų [54].....	27
10 pav. Naujų raktažodžių skaičius įvairiais biologiškai skaidžios mulčiavimo plėvelės tyrimų evoliucijos etapais [55]	29
11 pav. S-BCV supaprastintas principas vaizduojamas vertinant X produktą.....	31
12 pav. Būvio ciklo vertinimo etapai [72]	32
13 pav. Būvio ciklo vertinimo ribos ir struktūra	33
14 pav. Esama LDPE atliekų tvarkymo situacija. Grafike išreikšta procentaliai, lentelėje pavaizduotos modeliavimui pritaikytos reikšmės	36
15 pav. Medžiagos, kurios biologiškai skaidomos keturių rūšių biologinio atliekų apdorojimo metu [75]	39
16 pav. Kiekybinio poveikio aplinkai vertinimo etapų eiga ir sąsajos	40
17 pav. Socialinio būvio ciklo vertinimo struktūra. Žaliai apibraukta šiame tyrime naudojama riba	43
18 pav. Socialinio būvio ciklo vertinimo ribos (apibraukta žalia punktyrine linija) pavaizduotos BCV kontekste.....	43
19 pav. HS duomenų bazėje naudojamos indikatorių grupės [86].....	46
20 pav. Plastiko granulių gamybos procesų poveikis aplinkai įvertintas naudojant „Recipe 2016 Midpoint (H) V1.04” metodiką, vertinant charakterizavimas	48
21 pav. Plastiko granulių gamybos procesų poveikis aplinkai įvertintas naudojant „Recipe 2016 Midpoint (H) V1.04” metodiką, duomenys po normalizacijos: (A) granulių gamybos poveikis aplinkai pasirinktuose 7 poveikio kategorijose (Pt); (B) granulių gamybos poveikis aplinkai pasirinktuose 4 poveikio kategorijose (PE ^{eq})	49

22 pav. 1 kg PBAT granulių su UV stabilizatoriumi gamybos poveikio aplinkai vertinimas naudojant metodą: „ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04“: (A) Charakterizacija (%); (B) normalizacija (PE*year)	50
23 pav. 1 kg PLA granulių gamybos poveikio aplinkai vertinimas naudojant metodą: „ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04“: (A) Charakterizacija (%); (B) normalizacija (PE*year).....	51
24 pav. 1 kg LDPE granulių gamybos poveikio aplinkai vertinimas naudojant metodą: „ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04“ : (A) Charakterizacija (%); (B) normalizacija (PE*year).....	52
25 pav. 1 kg PBAT plėvelės su UV stabilizatoriumi atliekų apdorojimo poveikio aplinkai vertinimo rezultatai naudojant metodą: „IPCC GWP 100a“, Charakterizacija (%) pavaizduota grafike ir (kg CO ₂ ^{eq} /kg) lentelėje.....	53
26 pav. 1 kg PLA plėvelės atliekų apdorojimo poveikio aplinkai vertinimo rezultatai naudojant metodą: „IPCC GWP 100a“, Charakterizacija (%) pavaizduota grafike ir (kg CO ₂ ^{eq} /kg) lentelėje	54
27 pav. 1 kg LDPE plėvelės atliekų apdorojimo poveikio aplinkai vertinimo rezultatai naudojant metodą: „IPCC GWP 100a“, Charakterizacija (%) pavaizduota grafike ir (kg CO ₂ ^{eq} /kg) lentelėje	55
28 pav. LDPE/PLA/PBAT plėvelių poveikio aplinkai vertinimo rezultatai naudojant metodą: „IPCC GWP 100a, kg CO ₂ ^{eq} “	56
29 pav. Palyginamasis mulčiavimui naudojamos plėvelės gamybos būvio ciklo vertinimas (įtraukiant granulių gamybą, ekstruziją ir atliekų tvarkymo procesus) įvertinta naudojant metodą: „ReCiPe 2016 Endpoint (H) V.1,04“, (A) žalos įvertinimas (%); (B) svėrimas (mPt).....	57
30 pav. LDPE granulių gamybai naudojamų žaliavų palyginamasis būvio ciklo vertinimas tarp skirtingų šalių: Lietuvos (LT), Lenkijos (PL) ir Kinijos (CN). Naudotas metodas: „Social Hotspot 2019 Category Method w Weights“	58
31 pav. PBAT granulių gamybai naudojamų žaliavų palyginamasis būvio ciklo vertinimas tarp skirtingų šalių: Lietuvos (LT), Lenkijos (PL) ir Kinijos (CN). Naudotas metodas: „Social Hotspot 2019 Category Method w Weights“	59
32 pav. PLA granulių gamybai naudojamų žaliavų palyginamasis būvio ciklo vertinimas tarp skirtingų šalių: Lietuvos (LT), Lenkijos (PL) ir Kinijos (CN). Naudotas metodas: „Social Hotspot 2019 Category Method w Weights“	60

Santrumpų sąrašas

Santrumpos:

PE – polietilenas;

PS – poliesteris;

PP – polipropilenas;

JAV – Jungtinės Amerikos valstijos;

PHA – polihidroksialkanoatai;

PLA – polilaktido rūgštis arba polilaktidas;

PBAT – polibutileno adipato tereftalatas;

PBS – polibutileno sukcinatas;

PCL – polikaprolaktonas;

PET – polietileno tereftalatas;

LDPE – mažo tankio polietilenas;

PEF – poli(etileno 2,5-furandikarboksilatas);

ISO – Tarptautinė standartizacijos organizacija (angl. International Organization for Standardization);

EN – Europos standartai (angl. European standart);

ŽŪ – žemės ūkis;

MP – mulčiavimo plėvelė;

PD – fotodegraduojantis;

BCV – būvio ciklo vertinimas;

UV – ultravioletiniai spinduliai;

S-BCV – socialinis būvio ciklo vertinimas;

HS – (angl. social hotspots)

USD – Jungtinių Valstijų doleris (angl. United States Dolar);

GTAP – globalus mainų analizės projektas (angl. Global trade analysis project);

BVP – bendras vidaus produktas.

Įvadas

Gamtoje polimerai egzistuoja jau milijonus metų, tačiau juos sintetinti žmonija pradėjo vos prieš 200 metų, o 1869 m. sintetiniai polimerai tapo revoliucija sukėlusia inovacija ir įgijo bendrinį pavadinimą – plastikas [4,5,6]. Dėl šių polimerų universalumo ir plataus pritaikymo jų poreikis ir, tuo pačiu, gamybos mastai nuolat augo, sukuriant naują plastikų industrijos šaką, šiuo metu atsakingą už milijonus darbo vietų ir bilijonus eurų pridėtinės vertės [2].

Žemės ūkis, tai viena iš sričių, kurioje plastikas buvo pradėtas naudoti dėl savo plataus pritaikymo – produktų pakavimo, augalų apsaugos nuo paukščių, kenkėjų, piktžolių ir t. t. taip didinant derlių ar produktų ilgaamžiškumą ar kokybę [34,45]. Tačiau buvo pastebėta, jog plastikas, tinkamai jo nesurinkus ir nepašalinus, tampa aplinkai kenksminga atlieka, o žemės ūkyje naudojamas plastikas dažnu atveju yra sunkiai surenkamas, užterštas, dėl to ne visada perdirbamas ir sukuria potencialią grėsmę tiek aplinkai, tiek auginamų produktų kokybei [35,36,49].

Siekiant spręsti, su žemės ūkyje naudojamu plastikumu siejamas taršos problemas, pradėta ieškoti tradicinio plastiko alternatyvų ir viena iš jų – bioplastikas. Iš biologiškai skaidžių medžiagų pagamintos plastiko plėvelės siūlomos kaip vienas iš sprendimų pakeisti iš polietileno pagamintas mulčiavimui skirtas plėveles [35,36,49,53].

Tačiau, kuriant plėveles iš bioplastiko, skirtas naudoti žemės ūkyje, kaip jų aplinkosauginiai privalumai akcentuojami – greitesnė biodegradacija ir jų gamybai naudojamos žaliavos, išsamiai neįvertinant šių plėvelių bendro poveikio nuo joms naudojamų žaliavų gamybos pradžios iki pačių plėvelių gyvavimo pabaigos [42,46]. Todėl pastebėjus sisteminio požiūrio į siūlomas alternatyvas trūkumą, šiame darbe buvo pasitelktas būvio ciklo vertinimo principas, siekiantis įvertinti ir palyginti aplinkosauginį ir socialinį poveikį iš tradicinio ir biologiškai skaidaus plastiko pagamintas plėveles jų viso gyvavimo ciklo metu.

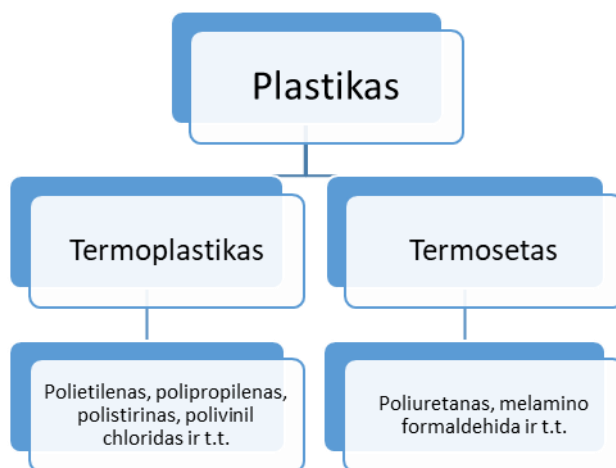
Darbo tikslas – palyginti aplinkosauginį ir socialinį skirtingų agroplėvelių poveikį, pasitelkiant būvio ciklo analizę.

Tyrimo uždaviniai:

1. išanalizuoti mokslinę literatūrą apie agroplėvelės (mulčiavimui skirtos plėvelės) gamybos, naudojimo ir šalinimo procesus, dažniausiai naudojamas šių plėvelių gaminimui medžiagas ir esamas jų alternatyvas bei jų būvio ciklo socialinius ir aplinkosauginius vertinimus;
2. surinkti duomenis apie mulčiavimui skirtas dangas, pagamintas polietileno ir bioplastiko pagrindu ir sudaryti inventorines būvio ciklo vertinimo lenteles;
3. atlikti palyginamąjį aplinkosauginį būvio ciklo vertinimą polietileno ir bioplastiko pagrindu gaminamoms plėvelėms;
4. įvertinti ir palyginti mulčiavimui skirtų dangų, pagamintų iš polietileno ir bioplastiko, socialines rizikas žaliavų išgavimo metu.

1. Tradicinis plastikas

Plastiko sąvoka pasaulyje atsirado palyginus neseniai, o jos pradinė reikšmė buvo ganėtinai paprasta – „lankstus ir lengvai formuojamas“, tačiau vėliau jis įgijo vis dar naudojamą apibrėžimą, kuris jį įvardina kaip polimerą [4]. „Plastikas – medžiaga, kurią sudaro polimeras <...> ir į kurią gali būti pridėta priedų ar kitų medžiagų bei kuri gali būti galutinių produktų pagrindinė struktūrinė sudedamoji dalis, išskyrus chemiškai nemodifikuotus gamtinius polimerus“ [3]. Polimerai gamtoje egzistuoja jau milijonus metų, tačiau sukurti sintetinį polimerą buvo pradėta bandyti ne pilnai prieš 200 metų, pirmasis svarbus atradimas šia linkme buvo Alexander‘io Parkes‘ono, šis pristatė pirmą žmogaus pagamintą polimerą ir jį pavadino „Parkesine“, tačiau sintetinius polimerus, kaip plastikus į rinką atvedė „Parkesine“ formulę patobulinęs John‘as Wesley Hyatt‘as ir skaičiuojama, kad nuo tada (1869 metais) plastikas tapo revoliuciją sukėlusia medžiaga [4,5]. Nuo to laiko plastiko gamyba tik augo, šias medžiagas tobulinant stipriai pradėta vystyti plastiko pramonė II Pasaulinio Karo metu. Maždaug šiuo metu, dėl karinių tikslų, buvo išrastas polietilenas (PE), poliesteris (PS), nailonas ir kiti monomerai, kurie vėliau buvo pradėti naudoti ir kituose srityse [5,6]. Dabar plastiko gamyba, vien Europoje tapo milžiniška industrijos šaka, kuri yra atsakinga už milijonus darbo vietų, tūkstančius įvairaus dydžio kompanijų, įmonės siejamos su plastiko gamyba sukuria apytiksliai apie 30 bilijonų eurų pridėtinės vertės per metus [2]. Ši pramonės šaka išvystyta taip gerai, jog yra net 7 vietoje pagal pridėtinės vertės kūrimą Europoje (panašią vertę sukuria farmacijos pramonė) turint omenyje, jog plastiko gamyba industriją pasiekė vos prieš gerus 70 metų toks spartus augimas tik rodo plastikinių gaminių poreikį ir svarbą ne tik pasauliui, bet ir pačiai Europai [8,9]. Jau 2014 metais apytiksliai 311 milijonų tonų plastiko buvo pagaminta, o tam prireikė net 6 % iš viso pagamintos naftos žaliavos. Taip sparčiai išaugęs plastiko poreikis augo ir toliau ir jau 2019 metais plastiko buvo pagaminta apytiksliai 368 milijonai tonų ir pagrindiniai naudojami plastikai buvo poliolefinai – polietilenas (PE) ir polipropilenas (PP) [8].



1 pav. Plastiko skirstymas į termoplastikus (thermoplastics) ir termosetus (thermosets) bei jų tolimesnis skirstymas [6]

Plastiko paklausa augo dėl plataus šių polimerų panaudojimo, jie turėjo daug savybių, kurios leido juos pritaikyti daugybėje sričių: mažas polimerų tankis, bet tuo pačiu išlaikomos puikios mechaninės savybės bei didelis patvarumas, o juos apdirbti yra ganėtinai lengva [6,8]. Tačiau kiekvienas plastiko mišinys skiriasi savo patvarumu, lankstumu ar kitomis savybėmis, todėl pasaulyje egzistuoja daug plastiko rūšių, bet kaip pagrindiniai pogrupiai įvardinti du: termoplastikai bei termosetai (žr. 1 pav.).

Termoplastikai sudaro beveik visą pagaminamo plastiko kiekį ~90 %, dėl jų labai svarbių savybių – chemiškai stabilūs tiek sąlyginai aukštoje, tiek žemoje temperatūroje, juos pakaitinus jie pradeda minkštėti ar lydėtis. Dėl minėtų savybių termoplastikai yra būtent tie polimerai, kuriuos galime perdirtbti, kadangi juos galima iš naujo performuoti, o jiems kietėjant iš naujo, medžiaga išlaiko visas savo pradines savybes, kadangi nevyksta joks cheminis surišimas [6,8,18,22]. Tuo tarpu termosetai yra labiau atsparūs aukštai temperatūrai ar mechaniniams pažeidimams, jie kietėjimo proceso metu sudaro chemines jungtis, kurios ir užtikrina, kad vėl šį plastiką kaitinant jis neišsilydytų, tokios savybės yra vertinamos gaminant elektronikai reikiamus komponentus ar kitus prietaisus, tačiau gyvavimo ciklo pabaigoje, kai tokiomis savybėmis pasižymintys plastikai tampa atliekomis, jų perdirtbimas yra neįmanomas, nes jų negalima išlydyti ir performuoti į naujus gaminius dėl susidariusių cheminių jungčių [6,8,17,18].

Tačiau, daugybė plastiko rūšių su skirtingomis savybėmis atsirado ne tik dėl skirtingų teigiamų šių plastikų savybių, bet ir dėl neigiamų, vieni geriau atlaiko temperatūros skirtumus, kiti chemini medžiagų poveikį, tačiau vieni pasižymi skilinėjimu, kiti per dideliu lankstumu ar labai lėta degradacija, ar yra labai degūs ir t. t. Dėl šių priežasčių, nuolatos kuriami nauji polimerai, naudojant įvairius mišinius, naujas medžiagas ar gamybos būdus, kad gauti ar panaikinti tam tikras savybes [6,18,19]. Pvz., įmaišant natūralios kilmės krakmolo į poliuretaną siekiama išspręsti šio plastiko skilinėjimo problemą, be to, tikimasi, kad toks mišinys prisidės prie šio polimero greitesnės biodegradacijos [19]. Kiti nepageidaujamas savybes sprendžia ne keičiant naudojamas medžiagas, o patį gamybos procesą ar medžiagų proporcijas, kaip Guogao Zhang'as gaminant elastomerą keitė kietumo savybes tiesiog gamybos procese naudojant mažiau vandens [20].

Kai kurie mokslininkai mano, kad plastikas pasaulį pakeitė taip stipriai, kad net siūlomą naują geologinės eros žingsnį - kainozojų (po holoceno) pradėti skaičiuoti nuo plastiko masinės gamybos pradžios (apytiksliai nuo XX a. vidurio), kadangi ši medžiaga drastiškai pakeitė tiek žmonių gyvenimus, tiek visą aplinką [6,15]. Plastiką randamas tiek vandenynų dugne, tiek kalnų viršūnėse ar gyvuose organizmuose [6,11,12], šie, šimtus metų natūralioje aplinkoje skylantys, polimerai yra tiesioginis dabartinių laikų žmonių palikimas ateinančioms kartoms, mokslininkai mano, kad ateityje geologai ras mūsų sukurtus ir paliktus plastikus ir pagal juos spręs apie geologinį amžių, todėl Raffaele Porta pabrėžia, jog mūsų amžius ateityje gali būti įvardijamas kaip „plastiko amžius“ [6,15].

Nors iš pradžių, žmonijos raidą pakeitę dalinai ar visiškai sintetiniai polimerai, buvo įvardijami kaip pigūs, netgi aplinką tausojantys junginiai, kurie saugo gamtą (jie buvo vadinami „dramblių ir vėžlių gelbėtojai“, nes dėl pastarųjų atsiradimo nebereikėjo polimerų išgauti iš šių gyvūnų kiautų ar ilčių), išaugus plastikų gamybai ir naudojimui, kartu su visomis teigiamomis savybėmis, buvo pradėtos nagrinėti ir problemos, kurias šios medžiagos sukėlė [4,7,8,22]. Visų pirma, tai, jog sintetiniai plastikai gaminami iš naftos produktų pradėjo kelti susirūpinimą, dėl su nafta siejamos taršos (išsiliejimai, naftos kasyba ar naftos, kaip išteklio, nestabilumo (naftos embargai ar panašūs politiniai veiksmai)), buvo pradėta kalbėti ir apie tiesioginę plastiko taršą, šio aptinkant vandenynuose (kasmet į vandenynus patenka nuo 5 iki 13 mln.t. plastiko atliekų), bei įvertinus tai, jog plastikas yra 500 ir daugiau metų biodegraduojanti atlieka, skylanti į mikroplastiką [5,4,8,23]. Tačiau pastebėta, kad net valdant šias atliekas, laikant jas sąvartynuose ar deginant, išsiskiria nepageidaujami junginiai, tokie kaip: dioksinai, furanai ar šiltnamio efektą sukeliančios dujos, o šių ir panašių dujų išsiskyrimas irgi yra vienas iš nepageidautinų reiškinių, kurį siekiama mažinti pasitelkiant kitus plastiko atliekų

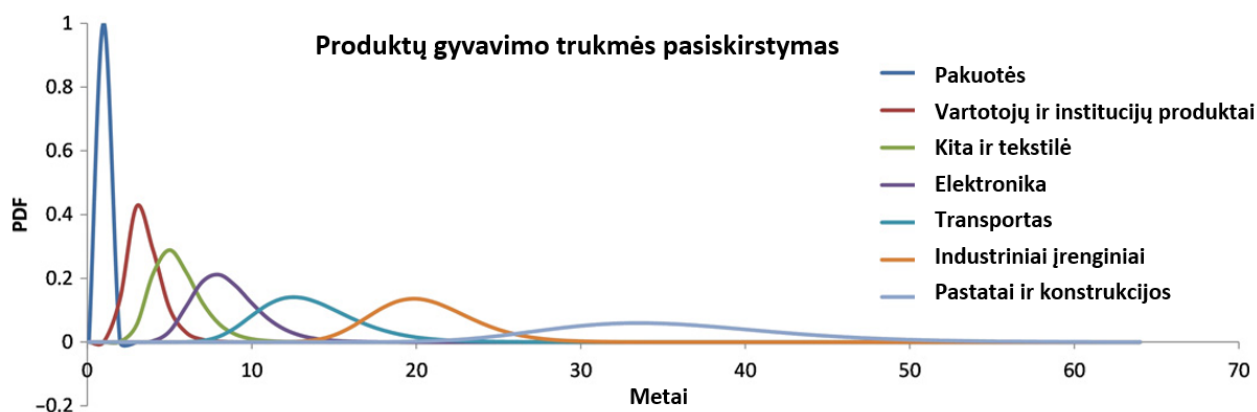
apdoravimo būdus, tokius kaip perdirbimas ar tiesiog siekiant mažinti plastiko suvartojimą (taikyti žiedinės ekonomikos principus) [21,22,25]. Plastiko perdirbimas parodo, kad tiek plastiko gamyba, tiek tolimesnis jo naudojimas ir atliekų apdorojimas yra glaudžiai susieti procesai. Perdirbant plastiką, mažėja reikiamas naujų žaliavų, pvz., naftos (gaminant plastiką iš tokių monomerų kaip etilenas, propilenas ir t. t. [25]) kiekis reikalingas pagaminti naujus plastikinius produktus, todėl paliečiami tiek gamybos, tiek galutinio panaudojimo srutai, o plastiko atsikratant sąvartyne, nėra pagaminama atgautinė žaliava ir visą reikiamą kiekį naujiems produktams reikia gaminti iš naujai išgautų žaliavų [22,23]. Todėl polimerų gamyba ir likęs gyvavimo ciklas yra tarpusavyje labai glaudžiai siejami procesai, bet vienas svarbiausių yra tinkamas plastikinių atliekų panaudojimas, apdorojimas nulemiantis visus kitus likusius su gamyba siejamus procesus [6,15,23].

Plastikas tapo neatsiejama šių dienų antropogeninės sistemos dalis ir nors tai apibrėš mus kaip šių dienų individus, tai parodys ne tik tai, jog sugebėjom sukurti tokius svarbus polimerus bet ir visas su jais atsiradusias problemas ir viena svarbiausių – plastikinės atliekos [6,7,8,15]. Plastiką randamas tiek vandenynų dugne, tiek kalnų viršūnėse, ar net gyvuose organizmuose [6,11,12]. Nagrinėjant Australijos ir Jungtinės Karalystės nuotekų valymo įrenginių dumblą nuo 1950 m. iki 2016 m. pastebėta, kad polimerų likučių kiekis didėjo atitinkamai augant plastikinių produktų gamybai ir poreikiui [11]. Jog plastiko gamyba neatsiejama nuo tiesioginės plastiko taršos buvo pastebėta ir Kinijoje atlikto tyrimo metu, kai vandens telkiniuose esančiuose netoli plastiką gaminančių įmonių buvo rastos padidėjusios mikroplastiko koncentracijos tiek dumble, tiek vandenyje, net gyvuose organizmuose (žuvų kepenyse ar net jų smegenyse) [12]. Plastiko likučiai ekosistemose randami įvairiomis formomis ir kiekiais ir už tai sukelia neatsakingas ar neefektyvus šių atliekų atsikratymas. Globaliu mastu, vis dar perdirbama mažiau nei 10 % viso pagaminamo plastiko, net 79 % vis dar išmetami į vandenynus ar sąvartynus [22]. Iki šiol vis dar plačiai naudojamas linijinės ekonomikos principas: „paimk – panaudok - išmesk“ milžiniškus plastiko atliekų kiekius paverčia atliekomis ar sudegina, kaip kurą. Vien Jungtinėse Amerikos valstijose (JAV) daugiau nei 90 % visų sugeneruotų plastiko atliekų 2018 m. vis dar nepateko į perdirbimo srutus ir nors pradėti taikyti žiedinės ekonomikos principai, į sąvartynus patenkantis plastiko kiekis pasaulyje ir toliau auga [9,10,16,42]. Žinant, kad jau 1980 m. JAV buvo pasiekusi atliekų krizę, dėl augančių atliekų kiekio ir poreikio statyti naujus sąvartynus, kuriems nebuvo vietos ar gyventojų pritarimo, panašios situacijos buvo matomos ir Japonijoje, Australijoje ir kituose šalyse [42].

Linijinis principas kelia grėsmę tiek patiems žmonėms (įvairaus pobūdžio tarša), tiek ekosistemoms, tiek išteklių saugumui (išteklių mažėjimas), kadangi plastiko gamybos mastai kiekvienais metais vis auga siekiant prisitaikyti prie vartotojiškumo bei augančios populiacijos keliamų poreikių [13,14]. Plastiko gamyba, kaip ir kiekvienas produktas, tiesiogiai priklauso nuo paklausos. Auganti paklausa, reiškia didėjančią pasiūlą, o tai atitinkamai reiškia didėjančius šio produkto virtimo atliekomis kiekius, kadangi galutiniai vartotojai ne visada renkasi tinkamus atliekų atsikratymo būdus (jas palieka tam neskirtuose vietose ar nerūšiuoja, degina ir t. t.) ar vartoja neatsakingai (nesistengia mažinti sunaudojamo vienkartinio plastiko kiekių) [21].

Tačiau ne visas plastikas atlieka tampa per trumpą laikotarpį, žinoma, dalis pagaminto plastiko turi, palyginus, neilgą jo naudojimo laiką, dėl šios priežasties Roland'as Geyer'as, Jenna R. Jambeck ir Kara Lavender Law paskaičiavo, kad tarp 1950 m. ir 2015 m. viso pagaminto plastiko vis dar apie 30 % yra naudojama, kadangi tokie produktai kaip pastatai, kelių dangos ir t. t. savyje turi daug plastiko, tačiau turi ilgą gyvavimo laiką (žr. 2 pav.). Todėl siekiant suprasti plastiko sukeltus padarinius

svarbu atkreipti dėmesį ne tik į jo gamybos ir gyvavimo pabaigos fazes, reikia nepamiršti pasverti ir jų atliekamos funkcijos trukmę [22,25,42].



2 pav. Produkto eksploatavimo trukmės pasiskirstymai aštuoniuose pramoninio naudojimo sektoriuose, pavaizduoti kaip normalaus logaritminio tikimybių pasiskirstymo funkcijos [25]

Sukurta daug plastiko rūšių, kadangi skirtingos savybės reikalingos vis kitokiam jo pritaikymui, vieni turi būti patvarūs ir ilgaamžiai, kad atliktų reikiamą funkciją ilgai ir kokybiškai, tuo tarpu kitų plastiko produktų gyvavimo laikas yra palyginus neilgas, tačiau jei vis tiek gaminami iš patvarių ir ilgaamžių polimerų tam, kad atliktų kitas reikiamas savybes (pvz., atsparumas karščiui, vandens pralaidumas, lankstumas ir t. t.) [23,25,42]. Dėl šios priežasties kuriamos alternatyvos, kurios atliktų tas pačias reikiamas funkcijas, tačiau sukurtų kuo mažiau nepageidaujamo poveikio atsisakant ar keičiant plastiką sudarančius komponentus, ar polimerų gamybos būdą, galiausiai pritaikant geriausią atliekų tvarkymo praktiką. Ir viena iš tokių inovacijų plastiko industrijoje, kuri gali prisidėti prie naudojamo plastiko sudėties ir reikiamų savybių pokyčio yra biopolimerai arba kitaip vadinami, bioplastikai [27,8,7,58]. Biopolimerai gali būti apibrėžiami kaip „polimerai, kuriuos žmonės chemiškai sintetina iš biologinių šaltinių, tokių kaip augaliniai aliejai, riebalai, dervos, cukrūs, baltymai ir aminorūgštys“ [58]. Todėl biopolimerai arba bioplastikas iš esmės keičia tradicinio plastiko gamybai naudojamas žaliavas ir siekiant suprasti tokio pokyčio poreikį ir teigiamas bei neigiamas savybes atsiranda poreikis atlikti tolimesnę jų analizę [55].

2. Bioplastikas

Augant taršos siejamos su tradiciniu plastikumu problemoms Europa, kaip ir visas pasaulis, pradėjo ieškoti sprendimo būdų ir vienas iš pasirinktų būdų yra pakeisti iš naftos gaminamą ne biodegraduojantį plastiką į bioplastiką [27,8,28,29]. Tiesa sakant, ši alternatyva nėra nauja, bioplastikas buvo išrastas anksčiau nei naftos pagrindu gaminamas plastikas (1862 m. išrado Aleksandr'as Park'as [40]), bet buvo pamirštas ir netobulintas, kadangi nafta buvo pigi žaliava ir gaminti plastiką iš jos buvo pigiausia ir paprasčiausia. Susidomėjimas bioplastiku grįžo tik maždaug prieš 30 metų, kai iškilo su tradicinio plastiko naudojimu susietos problemos [8]. Šiuo metu, 26 % bioplastiko gamybos pajėgumų yra Europoje ir prognozuojama, kad iki 2024 m. šie pajėgumai išaugs iki 31 % [64]. Bioplastikas yra ganėtinai platus apibrėžimas, į kurį telpa daug įvairių rūšių plastikų, pasak „European-bioplastics“ bioplastiku laikoma medžiaga „jei ji yra pagaminta iš biomasės, biologiškai skaidoma arba pasižymi abejomis savybėmis.“ [27]. Bioplastikas gali būti skirstomas ir pagal jam pagaminti naudojamus išteklius, remiantis šiais rodikliais bioplastikas skirstomas į 4 kategorijas [59]:

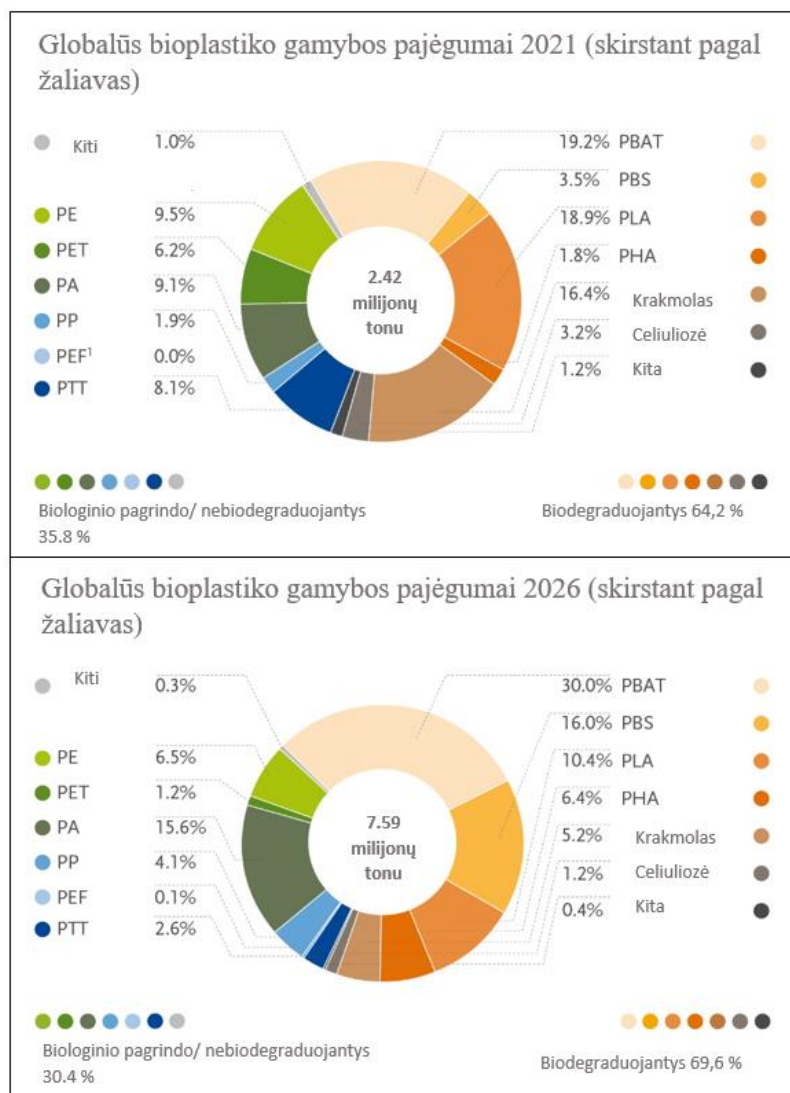
1. išgautas tiesiogiai iš natūralių žaliavų (krakmolos, celiuliozė, želatinas ir t. t.);
2. pagamintas cheminės sintezės būdu iš natūralios kilmės monomerų (polipieno rūgštis (PLA) ir t. t.);
3. išskiriamas iš mikroorganizmų ar bakterijų (polihidroksialkanoatai (PHA) ir t. t.);
4. gaminamas naudojant žaliavinę naftą (polibutileno adipato tereftalatas (PBAT)).

Remiantis Europos standartu EN13432 (plastikinėms pakuotėms), arba EN 14995 (ne pakuočių plastikui), ISO 17088 standartais (plastikui) [27,8,42], biologiškai skaidus plastikas irdamas aerobinėmis sąlygomis paprastai skyla į vandenį, anglies dvideginį ir kompostą, anaerobinėmis sąlygomis irdamas išskiria metano dujas [8,28]. Todėl šio plastiko oficialus apibrėžimas jį apibūdina kaip „plastikas, galintis fiziškai ir biologiškai suirti ir galiausiai suskilti į anglies dioksidą (CO₂), biomasę ir vandenį ir atitinkantis Europos standartus, taikomus pakuotėms, kurių atliekas galima panaudoti jas kompostuojant ar anaerobiškai skaidant.“ [3].

Pastarojo yra keletas rūšių: PLA, PBAT, PHA, PBS (polibutileno sukcinatas), PCL (polikaprolaktonas) ir t. t. [27,8,54]. Deja, bet šie plastikai kol kas sudaro < 1 % viso pagaminamo plastiko, tačiau į tai galima žiūrėti kaip į šių medžiagų atsiradimą rinkoje, kadangi jau dabar, ši, palyginus, nedidelė niša per metus pasiekia apie 2 trilijonus eurų siekiančią apyvartą ir sukuria bent 22 milijonus darbo vietų Europoje [41]. Be to, pranašaujama, kad šio plastiko paklausa ir gamybos apimtys ateityje tik augs, turint omenyje Europos plastiko strategiją ir joje minimą poreikį šio plastiko tolimesniai tyrinėjimui ir integravimui į esamą sistemą, kitus Europos įsipareigojimus kurti perdirbamą pakuotę, didinti jos perdirbimo kiekius, mažinti plastiko taršą vandenynuose ir t. t. Taip pat, augantis vartotojų sąmoningumas ir besikeičiantys poreikiai prisideda prie šio plastiko konkurencingumo augimo lyginant su tradiciniu plastikumu [27,29,7]. Lietuva, kaip ir kitos Europos Sąjungos šalys, taip pat yra ar bus įpareigota laikytis visų šių reikalavimų, todėl galima manyti, jog bioskaidaus bioplastiko rinka Lietuvoje taip pat turėtų tik augti.

Pasak „European-bioplastics“ globali bioplastiko produkcija kasmet tik auga ir tikimasi, kad šio plastiko jau 2026 m. bus pagaminama bent tris kartus daugiau, lyginant su 2021 m. ir sudarys jau bent

2 % iš viso pagaminamo plastiko [27]. Šį plastiką didžiaja dalimi sudarys biologiškai skaidus plastikas (žr. 3 pav.).



3 pav. Pasauliniai bioplastiko gamybos pajėgumai 2021 m. (viršuje); prognozuojami pasauliniai bioplastiko gamybos pajėgumai 2026 m. (apačioje) [27]

Šiuo metu didžiausią rinkos dalį iš biologiškai skaidžių ir iš biomasės pagamintų plastikų užima PLA – 18,9 % globalios bioplastikų produkcijos ir krakmolo mišiniai – 16,4 %. Tačiau tikimasi, kad augantis PBAT populiarumas dėl jo potencialo šį plastiką pavers vienu gausiausiai gaminamu biologiškai skaidžiu bioplastiku jau 2026 m. (30 % globalios bioplastiko produkcijos), taip PLA nustumiant į antrąją vietą lyginant pagal gamybos pajėgumus (10,4 % globalios produkcijos) (žr. 3 pav.) [27].

2.1. Polilaktido rūgštis arba polilaktidas (PLA)

Tačiau polilaktido rūgštis arba polilaktidas (PLA), vis dar vienas įdomiausių ir plačiausiai naudojamų biologiškai skaidžių bioplastikų, tapo pirmuoju biologiškai išgaunamu ir biologiškai skaidžiu polimeru, pagamintu pramoniniu mastu 1990-ųjų pabaigoje. Pasak S. Farah, D. G. Anderson ir R. Langer „PLA iki šiol yra plačiausiai ištirtas ir naudojamas biologiškai skaidomas alifatinis poliesteris žmonijos istorijoje“ [61]. PLA aplinkoje suyra per 6–24 mėnesius, priklausomai nuo gaminio dydžio

ir formos, jo izomerų santykio ir temperatūros. PLA biodegradacija įvardijamas kaip sudėtingas procesas, kurio trukmė siekia vos kelis mėnesius tik tinkamai gaminant ir paruošiant gaminį būsimoms produkto aplinkos (kurioje bus tikimasi jį apdoroti biodegradacijos būdu) sąlygoms. PLA yra netirpus vandenyje, bet nestabilus, jei yra veikiamas halogenintų angliavandenilių, ir pasižymi geromis termomechaninėmis savybėmis, panašiomis į polietileno tereftalata (PET) ir PP, nors turi tam tikrų būdingų trūkumų, tokių kaip trapumas ir padidėjęs drėgmės įsisavinimas. Dėl visų šių priežasčių jis buvo intensyviai naudojamas, ypač pakuojant, gaminant vienkartinius puodelius, dubenėlius, plėveles ir butelius [60,85].

Po vienerių metų jūrinėje aplinkoje 30 °C temperatūroje PLA biologiškai skaidosi tik maždaug 8 %. Tinkama temperatūra ir drėgnis yra vieni iš svarbiausių faktorių PLA skilimo procesams, dėl šios priežasties ir gaminant produktus iš PLA jų lydimo metu yra susiduriama su termine degradacija, kuri ne tik mažina galutinio produkto kiekius, bet ir gali gadinti gaminio mechanines savybes [61]. Yra manoma, kad šis plastikas iš tiesų turėtų būti įvardijamas tik kaip pramoniniam kompostavimui tinkamas plastikas [31]. Tačiau jis pripažintas ir kaip beįdegruojantis ir kaip perdirbamas, bet norint naudoti vieną ar kitą PLA plastiko tvarkymo būdą, reikia įvertinti sąlygas ar sukurti tinkamą infrastruktūrą. Neužtenka tik to, jog šis plastikas perdirbamas svarbu įvertinti PLA perdirbamumą, kuris turi prasidėti nuo geriausios PLA atliekų surinkimo strategijos ir galimybės sukurti nepriklausomą perdirbimo srautą, siekiant išsaugoti nusistovėjusių įprastinių plastikų perdirbimo būdus, tokių kaip PET [34,40,61], o tai padaryti nėra lengva dėl šių plastikų tarpusavio panašumų, šiuolaikiniai įrenginiai naudojami plastiko atskyrimui PET ir PLA plastiko tarpusavyje atskirti nesugeba, o kaip to padarinys, surinktos perdirbimui PET pakuotės gali užsiteršti nuo į perdirbimo srautą patekusio PLA [42].

2.1.1. PLA gamyba

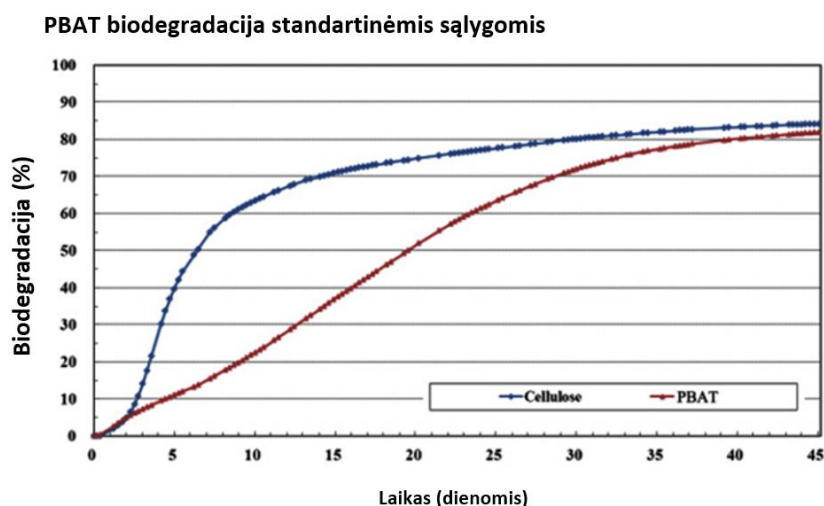
PLA gamyba suvokiama kaip ne vieną pranašumą (lyginant su kitais biopolimerais) turintis procesas, dėl pastarojo gamybai naudojamos pieno rūgšties, kurią galima išgauti iš ne maistui naudojamų kukurūzų, kurie tuo pačiu prisideda prie atmosferoje esančio anglies dvideginio (CO₂) fiksacijos, bei galimybės PLA perdirbti atgal į pieno rūgštį, be to, PLA turi geresnį terminį apdorojamumą lyginat su kitais bioplastikais ir t. t. Taip pat, kaip vienas iš PLA pranašumas įvardijamas nedidelis energijos suvartojimas gaminant PLA plastiką [59,61], tačiau tiek dėl energijos suvartojimo reikalingo gaminti PLA, tiek dėl CO₂ pašalinimo iš atmosferos kiekių galima rasti skirtingų nuomonių, vieni teigia, jog gaminant PLA sunaudojami mažesni kiekiai energijos ir dėl kukurūzų auginimo sugeriami CO₂ kiekiai kompensuoja ar net atstoja gamybos metu sugeneruojamas CO₂ emisijas [59], kiti PLA gamybai priskiria didesnius energijos poreikius (lyginant su iš naftos gaminamais plastikais) įtraukiant į skaičiavimus ir energiją reikiamą pagaminti medžiagas naudojamas PLA gamybai ir mano, kad CO₂ išskiriami kiekiai siejami su PLA gamyba turi būti vertinami atsižvelgiant į šio plastiko gyvavimo pabaigos (ang., end of life) procesus, kurių metu dėl skirtingų aplinkos sąlygų gali būti sugeneruojamas skirtingas CO₂^{eq} kiekis (nuo 16 % iki 163 % lyginant išskiriamus kiekius su į sąvartynus patekusiais tradicinio plastiko gaminiais) [60]. Skirtingų apimčių ir tikslumo tyrimai energijos poreikį PLA gamybai įvardija labai skirtingai: nuo 55 % mažesnio energijos poreikio gamybai iki beveik dvigubai didesnio energijos poreikio lyginant su tradiciniu plastikumu [59,60,61]. Tokia didelė gaunamų atsakymų amplitudė parodo tyrimų šioje srityje skirtumus ir palyginamumo problematiką [55].

Skirtumas tarp reikiamų energijos kiekių ir sukuriamų emisijų ar naudojamų žaliavų poreikių atsiranda ne tik dėl skirtingų tiriamos srities ribų (kai kurie mokslininkai vertina tik granuliu gamybą kaip produkcijos etapą [62]), bet ir vertinamų skirtingų gamybos būdų. Kadangi PLA plastikas, kaip jau minėta, pasižymi geromis termomechaninėmis savybėmis [61], jis į įvairius produktus (puodelius, maišelius, plėveles ir t. t.) gali būti paverstas skirtingais gamybos būdais, dažniausiai tipiniais tradicinio plastiko gamybai: įpurškiamasis liejimas, ekstruzija, įpurškiamo tempimo, pūtimo formavimo būdas, putos gamyba ir t. t. [42,55,59,61]. Todėl lyginant tradicinio ir PLA plastiko gamybos procesus labiausiai akcentuojami granuliu gamybos ir galutinio produkto atliekų apdorojimo scenarijai. Dėl šių tarpusavio skirtumo [60].

2.2. Polibutileno adipato tereftalatas (PBAT)

Įvardijamas, kaip vienas iš perspektyviausių bioplastikų – PBAT, manoma, jo jis turi potencialių plėtros perspektyvų įvairiuose srityse, dėl jo sąlyginai greitos biodegradacijos (45-60 dienų), jau po 20 dienų dirvožemyje galima tikėtis ~ 50 % suirimo (žr. 4 pav.) bei neapsunkintos plėvelės gamybos, kadangi ją galima pūsti naudojant standartinius PP plastikui naudojamus įrenginius, be reikšmingesnių pakeitimų. Tačiau pačio plastiko gamyba, nors įvardijama kaip išdirbta ir optimizuota, reikalauja įvairių polimerizacijos procesų, reikalaujančių ilgai trunkančių cheminių reakcijų, kurios reikalauja vakuuminių procesų, bei palaikomų aukštų temperatūrų visos reakcijos metu (~ 190 °C) [40].

PBAT plastikas išpopuliarėjo dėl jo geros biodegradacijos (dažnu atveju atitinkančios EN 13432 ar EN 14995 ir panašius standartus) manoma, kad pagrindinė biodegradacijos priežastis yra pakankamas tereftalio rūgšties (PTA) kiekis plėvelėje, bei dirvožemyje esantys mikroorganizmai, drėgmė ir tinkama temperatūra. PBAT yra vienas greičiausiai biodegraduojančių, tačiau geriausiai mažo tankio polietileno (LDPE) plėveles atitinkančių plastikų [40,87].



4 pav. Kompostavimo rezultatai Celiuliozės ir PBAT pagrindu pagamintoms plėvelėms [40]

PBAT tinka plėvelių gamybai ne tik dėl galimos biodegradacijos, bet ir dėl savo mechaninių savybių, kurios gaminant plėveles gali būti pranašesnės, net lyginant su plačiausiai išpopuliarėjusiu PLA plastikui, kadangi PBAT pasižymi geresniu lankstumu ir tamprumu, dėl šių priežasčių gali būti pučiamas iki plonesnės plėvelės ir dėl šių priežasčių yra panašus į LDPE plėveles [40,89].






Tačiau nepaisant jau komerciškai prieinamos ne vienos, PBAT pagrindu gaminamos, plėvelės, manoma, kad šio plastiko pagrindu gaminami gaminiai vis dar sudaro mažą rinkos dalį (< 1 %) dėl

brangios šio plastiko gamybos ir dėl to išaugančio savikainos, be to, greita biodegradacija ir panašios, bet dar LDPE plastikui iki galo neprilygstančios savybės vis dar reikalauja PBAT tobulinimo ar ieškojimo pigesnių žaliavų (dėl šios priežasties PBAT gali būti maišomas su PLA ir panašiais plastikais) [40]. Taip pat pradėtas kelti klausimas apie tokio tipo plėvelės poveikį po degradacijos, nors PBAT pagrindu gaminamos plėvelės greitai biodegraduoja, daugiausiai skylant į vandenį ir CO₂, tačiau manoma, jog likęs kompostas dirvožemyje taip pat gali padaryti įtakos vietinei ekosistemai suaktyvinant nebūdingai didelius kiekius mikroorganizmų ar kitų reakcijų dirvožemyje, pastebėta, jog palikus PBAT tipo plastiką dirvožemyje galima tikėtis sumažėjusio bendro azoto ir fosforo kiekio tame dirvožemyje [88]. Tam įtakos gali turėti tai, jog šis plastikas nėra sudaromas iš azotu ar fosforu turtingų medžiagų, PBAT yra gaminamas iš naftos pagrindu išgaunamų medžiagų tokių kaip: 1,4-butanediolis, adipo rūgštis, tereftalio rūgštis, gali būti įmaišyta priedų, siekiant pagerinti tam tikras savybes. PBAT gamyba iš natūralių medžiagų irgi įvardijama kaip galimas variantas, tačiau dar nėra plačiai išnagrinėtas [89].

2.3. Bioplastiko trūkumai

Tačiau, svarstant apie bioplastiką, kaip apie alternatyvą tradiciniam plastikui, reikia suprasti ir suvokti jo galimus neigiamus aspektus [42]. Bioplastikas visuomenei dažniausiai pateikiamas, kaip aplinkai draugiškesnė tradicinio plastiko alternatyva, o vartotojų suvokimas apie šiuos biologiškai skaidžius polimerus yra vis dar pakankamai ribotas, todėl sklindanti informacija ne būtinai formuoja reikiamą požiūrį į bioplastiko produktus. Vien komunikacija apie produktus pagamintus iš bioplastiko gali būti klaidinanti, kadangi oficialiai bioplastiku gali būti įvardinami polimerai, kurie yra pagaminti ir (ar) bioskaidūs, jie nebūtinai atitinka abi sąlygas ir kaip to padarinys gali susiformuoti žmonių požiūris į šiuos plastikus kaip į lygius, kai iš tiesų jų naudojimas ir atsikratymas iš esmės skiriasi [27,31,40]. Tačiau, pasak Australijoje atliktos apklausos, didelė dalis žmonių (30 % apklaustųjų) iš viso nežinojo kas yra bioplastikas ir net ~70 % apklaustųjų nebuvo tikri ar visas bioplastikas yra biodegraduojantis ar ne [40], o europiečiai pasigenda didesnės ir tikslesnės informacijos sklaidos apie bioplastiką [41]. Be to, biodegraduojančio plastiko žymėjimai skiriasi pagal tai, kokius standartus jie atitinka, nors ir visi standartai apibrėžia biodegraduojantį plastiką, jų reikalavimai plastikui skiriasi (žr. 5 pav.). Vartotojus informuojantys žymėjimai apie biologiškai skaidų plastiką nenurodo nei laikotarpio per kiek laiko toks plastikas turėtų suirti, nei kitų tam reikiamų sąlygų. Nurodoma, kad „sertifikavimas suteikia garantiją, kad gaminys atitinka standartą ir gali suirti tam tikromis sąlygomis.“ [53], o tokie neapibrėžtumai ir skirtumai tarp gaminių patenkančių po vienu apibrėžimu – biologiškai skaidus plastikas, gali sukurti nesusipratimų tarp vartotojų ir gamintojų. Todėl tolimesnis tinkamas visuomenės švietimas ar informavimas apie biologiškai skaidžius plastikus gali būti labai svarbus sėkmingam bioplastiko integravimui į rinką [27,40,41,53].

Biodegraduojančios agroplėvelės, kurios atitinka standartus, ne visada sugeba pasiekti šių norimų rezultatų realybėje (ne laboratorijoje), kadangi standartai sukurti taip, kad tyrimai būtų atliekami „ex-situ“ principu lemiančiu tam tikrus neatitikimus, kai plėvelė naudojama „in-situ“ aplinkoje (dirbamame lauke, pievoje, šiltnamyje ir t. t.). Kaip pavyzdys gali būti pateikiama PLA plėvelė, kuri pateikiama kaip bioskaidus produktas, tačiau, kad iš šios medžiagos pagaminta plėvelė suirtų gamintojo nurodytu tempu, ji turi irti 55-60 °C temperatūroje, o tokias temperatūras pasiekti dirbamame lauke yra tiesiog neįmanoma, šių plėvelių irimui taip pat svarbi viršutinio dirvožemio mikroflora, taip pat dažnai nėra pakankamai gausi, kad biodegradacija vyktų teoriškai numatytais tempais [36,37].

Ženklinimas	Atitinkantis standartas	Bandyminės sąlygos	Biodegradacijos testavimas
	EN 13432	Palaikoma temperatūra (20 - 30 °)	90 % per 12 mėnesių
	ISO 175561		90 % per mėnesius
	ASTM D7081 (pasitraukė iš rinkos)		90 % per 6 mėnesius
	EN 149872	20° ir 25°	90 % per 56 dienas
	EN 13432	58°	90 % per 6 mėnesius

5 pav. Europos biologiškai skaidžių plastikų sertifikatai [53]

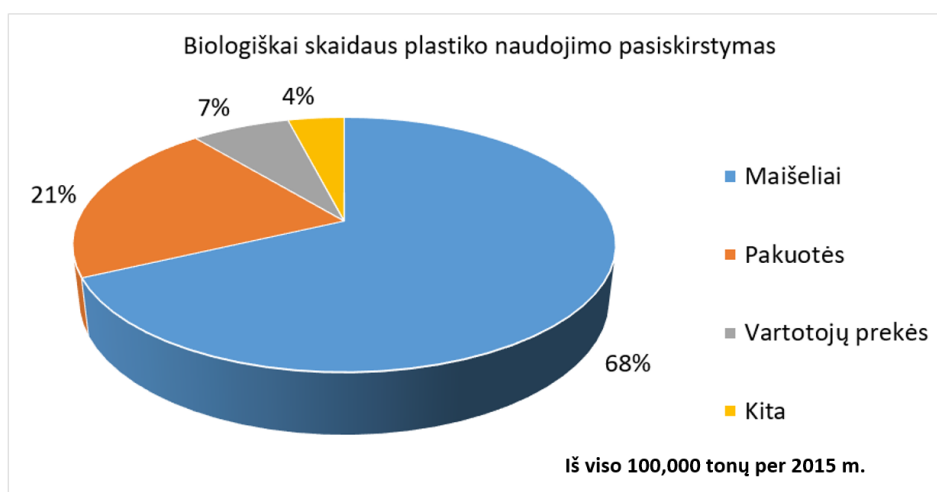
Teorijos ir praktikos neatitikimas tik didina abejones tarp mulčiavimo plėvelės naudojančių ūkių, kadangi jų pasirinkimą pirkti biodegraduojančią dangą lemia kaina, kokybė ir efektyvumas, o kol šie dalykai vis dar nėra iki galo suderinti ir išdirbti tokio tipo mulčiavimo plėvelės (MP) dar nėra populiarus pasirinkimas rinkoje [37,38]. Tačiau ir taikomi biodegradacijos standartai, net juos įgyvendinus lauko sąlygomis, neužtikrina dirvožemio apsaugos nuo taršos. C. Miles, L. D. Vetter ir S. Ghimire [54] pastebėjo, kad nėra nustatyto standartinio metodo matuoti MP biodegradacijos dirbamoje žemėje, autoriai šiuos matavimus atlieka jiems priimtina tvarka, dažniausiai sveriant likusį plėvelės kiekį ant dirvožemio, tačiau tokie matavimai nurodo tik kiekį suirusios plėvelės, o ne jos sugeneruotą CO₂ kiekį, kuris kaip tik įvardijamas kaip tinkamesnis MP biodegradacijos vertinimo vienetas [57], suvokiant, jog plėvelės fragmentai gali būti per maži ar per giliai ir būti nesurinkti ir neįvertinti.

Bioplastikui pagaminti, kaip ir paprastam plastikui, reikia žaliavų, nors šios ir natūralios kilmės (pvz., kukurūzai, dumbliai ir t. t.) jas pagaminti (užauginti) reikia ne tik vandens, maisto medžiagų bet ir žemės plotų. Todėl tarp mokslinės bendruomenės kilo abejonių ar bioplastikas netaps tiesioginiu konkurentu maisto pramonei. Šį klausimą nagrinėję autoriai J. A. Colwill'as, E. I. Wright'as, S. Rahimifard'as ir A. J. Clegg'as atliko modeliavimą, kurio metu rėmėsi prielaida, jog 2050 m. visas pagaminamas plastikas bus bioplastikas, dėl savo žaliavų kilmės (ne dėl biodegradacijos) ir pasiekė išvadas, kurios rodė, jog bioplastiko gamyba nebūtų rimta maisto produkcijos konkurentė, jeigu būtų orientuojamasi į žaliavų auginimo ir naudojimo efektyvumo didinimus bei alternatyvų ieškojimą [43]. O kitas tyrimas parodė, kad dabartinis žemės naudojimas bioplastikui reikalingų žaliavų auginimui siekia vos 0,01 % globalaus pasaulio sausumos ploto poreikio ir net jeigu visas plastikas būtų gaminamas iš tokių žaliavų, tam prireiktų tik 5 % [42], o „European-bioplastics“ prognozuoja, kad artimiausiu metu bioplastiko produkcijai naudojamos žemės plotai sudarys vos 0,06 % 2026 m. [27]. Todėl manyti, jog bioplastikas taps konkuruojančiu produktu prieš kitas žemės ūkio šakas rimto pagrindo nėra, tačiau tik tuo atveju jeigu šio plastiko produkcijos apimtys išliks mažos, bus stengiamasi naudoti alternatyvias žaliavas bei didinti produktyvumą [27,42,43].

2.4. Tinkamiausi bioplastiko panaudojimo būdai

Biodegraduojantis bioplastikas, kaip jau minėta, pasižymi išskirtinėmis savybėmis, kurios ne visur yra pritaikomos ar pageidaujamos, todėl biodegraduojantis plastikas yra įvardijamas kaip tinkamiausia alternatyva tradiciniam plastikui keliuose srityse. Manoma, kad toks plastikas galėtų būti puiki alternatyva plastiko gaminiams, kurie dažnu atveju patenka į vandens ekosistemas (pvz., vienkartiniai pirkiniai maišeliai, pirminis ir antrinis mikroplastikas ir t. t.) dėl pastarojo greitesnio skilimo į vandens organizmams nekenksmingus junginius, tokius kaip CO₂ [22,42].

Bioplastikas dėl savo greitos biodegradacijos, skilimo į nekenksmingus produktus ir kitų ypatybių taip pat buvo pradėtas naudoti ir farmacijoje. Įvairaus pobūdžio bioplastikas gali būti naudojamas kaip rišiklis ar net skonį maskuojanti medžiaga, vaistuose naudojamas bioplastikas gali padėti kontroliuoti vaistų išsiskyrimo laiką ir kitus procesus. Bioplastikas (dažniausiai kietasis želatinas ar panašūs mišiniai) kaip kapsulių apvalkalas sėkmingai naudojamas jau ilgiau nei 20 metų. O kietesni, bei ilgaamžiškesni bioplastikai dėl savo natūralios kilmės taip pat pradėti naudoti gaminant implantus (skirtus būti organizmo viduje), todėl bioplastikų naudojimo sritys medicinoje ganėtinai plačios dėl vis bandomų naujų plastiko mišinių ir gamybos būdų, tikėtina, kad jų naudojimas farmacijoje išlaikys esama poreikį [19,58].

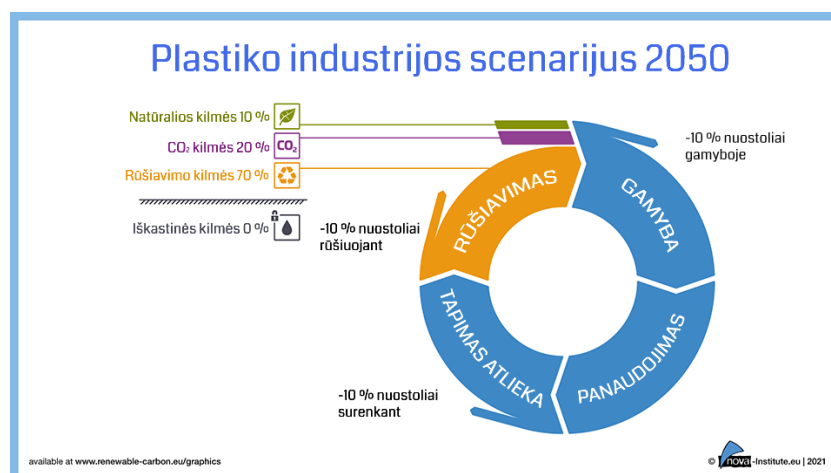


6 pav. Biologiškai skaidžių plastikų vartojimo sektoriai pagal taikymą Europos Sąjungoje [42]

Taip pat, biologiškai skaidus plastikas įvardijamas kaip alternatyvą gaminiams ar pakuotėms, kurie, greičiausiai neatsidurs perdirbimo procese dėl jų užterštumo kitais junginiais (pvz., šlapios servetėlės, maistu užterštos pakuotės ar agroplėvelės užterštos dirvožemiu) [35,36,42]. Todėl bioplastikas ir buvo daugiausiai taikomas tokiuose ar panašiuose produktuose (žr. 6 pav.). „European-bioplastics“ paskaičiavo, jog daugiausiai iš bioplastiko 2015 m. buvo pagaminta įvairaus pobūdžio maišelių (68 %) ir pakuočių (21 %) [42].

Tačiau, žvelgiant į Europos planus panašu, kad bioplastikas nėra siekiamybė pakuočių srityje, kadangi „Europos naujos plastikų ekonomikos vizijoje“ išdėstyti punktai orientuojasi į plastiko gaminių pakartotinį naudojimą ar perdirbimą į kitus plastiko produktus, o apie pačias pakuotes pasakyta, jog „iki 2030 m. visos Europos Sąjungos rinkai pateikiamos plastiko pakuotės yra arba tinkamos pakartotinai naudoti arba gali būti perdirbtos ekonomiškai efektyviais būdais.“, be to, „antrinis plastikinių pakuočių atliekų perdirbimas tampa panašaus masto kaip kitų pakavimo

medžiagų antrinis perdirbimas.“ Siekiama plastiko recirkuliacija visoje sistemoje, norint kiek įmanoma atsisakyti linijinės ekonomikos principų [9] (žr. 7 pav.).



7 pav. Plastiko pramonės scenarijus 2050 [50]

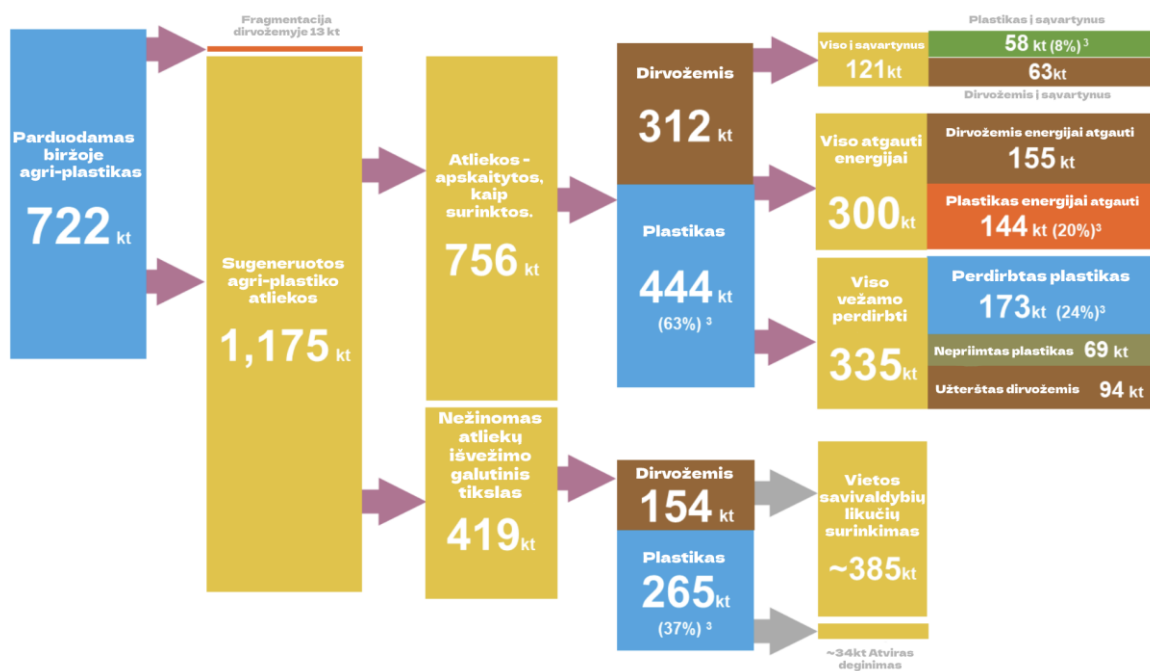
Todėl bioplastikas netūrėtų būti naudojamas kaip alternatyva leidžianti pasiekti šių ir panašių tikslų, kadangi šis dažnu atveju nėra perdirbamas į plastiko gaminius, bet kompostuojamas ir skyla į nekenksmingus junginius, kurie gali tapti maistinėmis medžiagomis augalams, energetiškai naudingomis dujomis (po anaerobinio apdorojimo) ir t. t. Bioplastiko perdirbimas į plastiką yra retas ir mažai naudojamas šių atliekų panaudojimo būdas ir tai gali būti viena iš priežasčių, kodėl šis plastikas nepakeis viso pakuotėse naudojamo plastiko [27,42].

Tačiau, manoma, kad 30 % plastikinių pakuočių niekada nebus tinkamos perdirbimui (pvz., organiškai nešvarios pakuotės, kombinuotos pakuotės ar kitokią funkciją atliekantys gaminiai ar kt.) [42]. Todėl ateityje galima tikėtis, kad bioplastikas kaip alternatyva gali būti naudojamas siekiant sumažinti poveikį aplinkai su tokiais plastikiniais gaminiiais, kurių perdirbimas yra sunkesnis ne tik dėl jų gamybai naudojamų medžiagų ar polimerų savybių (perdirbama ar neperdirbama), bet ir dėl jų sunkesnio surinkimo, užterštumo ir kitų aptartų savybių, kurių išvengti labai sunku arba neįmanoma. Dėl šios priežasties pradėta kreipti dėmesį į žemės ūkyje (ŽŪ) naudojamą plastiką, tiksliau agrotekstilę, ir su jos vis labiau augančiais naudojimo mastais atsirandančiu poreikiu ieškoti pigesnių, reikiamas funkcijas atliekančių ir aplinkai draugiškesnių alternatyvų. Ir kaip viena iš inovatyvių idėjų bandoma taikyti ŽŪ – bioplastikas [35,36,38].

3. Agrotekstilė

ŽŪ pritaikyta ir pradėta plačiai naudoti techninė tekstilė vadinama agrotekstile ir yra viena iš smarkiai besiplečiančių techninės tekstilės atšakų. Jos panaudojimo spektras labai įvairus: apsauga nuo vabzdžių, nuo tiesioginių saulės spindulių, paukščių ar kitų gyvūnų, drėgmės palaikymas, piktžolių kontrolė ir t. t. O ją naudojant pasiekama nauda dažniausiai siejama su produktyvumo didinimu bei mažėjančiu trąšų poreikiu. Pasak J. R. Ajmeri ir C. J. Ajmeri, į sąvoką agrotekstilė įeina visa tekstilė, „naudojama auginant, nuimant derlių, apsaugant ir saugant pasėlius ar gyvūnus“ [34,45].

Didelė dalis Europos ŽŪ naudojamo plastiko nėra skirta produktų pakavimui ar trumpalaikiam naudojimui. Per metus ŽŪ sunaudojama apytiksliai 721000 tonų ne pakavimui skirto plastiko, tai sudaro net 1,4 % viso Europos metinio plastiko poreikio. Didžioji dalis (81 %) šio plastiko pagaminta iš LDPE [38]. Iš PE pagaminti produktai, kurie nėra užteršti, juos lengva surinkti, dažniausiai įvardijami kaip perdirbami ir patenka į perdirbimą, todėl didžioji dalis susidariusių ŽŪ plastiko atliekų (63 %) yra tinkamai surenkamos ir patenka į tolimesnį atliekų apdorojimą, tačiau nepaisant šių atliekų teoriškai numatyto tinkamumo perdirbimui, vos 24 % ne pakavimui skirto ŽŪ sunaudojamo plastiko yra perdirbama (žr. 8 pav.) [49].



8 pav. Žemės ūkio plastiko ES atliekų masės srautas [49]

Plastikinės plėvelės turinčios sąlytį su žeme, yra užteršiamos, jas sunku surinkti dėl jų plono ir plyštančio sluoksnio ir visa tai sukelia tiek finansinių, tiek aplinkosauginių problemų jų gyvavimo ciklo pabaigoje. Tokios plėvelės yra mulčiavimui skirtos dangos – mulčiavimo plėvelės (MP) [35,36,38,45,46].

3.1. Polietileninė mulčiavimo plėvelė

Pagal „ISO 23517:2021“ standartą mulčiavimo plėvelė apibrėžiama taip: „plėvelė, pagaminta iš termoplastinės medžiagos, skirta naudoti žemės ūkyje ir sodininkystėje žemei uždengti, siekiant pagerinti pasėlių augimo sąlygas ir, priklausomai nuo spalvos, naikinti piktžoles“ [72]. Pasak N. Lee,

J. Joo, K. Y. Andrew ir J. Lee [45] šios plėvelės dažniausiai naudojamos tam, kad „padidinti pasėlių derlių, pagerinti produktų kokybę, išlaikyti dirvožemio drėgmę, sumažinti dirvožemio tankinimą, kontroliuoti piktžolių problemas ir sumažinti vandens, energijos ir cheminių medžiagų poreikį.“ MP pasaulinė rinka sukuria apytiksliai 4,1 milijardų dolerių vertės kas metus [46]. Ir tik maža dalis MP gaminama iš bioplastiko (~1 %) [38], didžioji dalis minėtas funkcijas atliekančių plėvelių gaminama iš naftos pagaminto plastiko – polietileno (PE). Teigiama, jog “siekiant gaminti labai lanksčias, ilgaamžiškas, lengvai apdirbamas ir be kvapo bei toksiškumo medžiagas, kurias galima pritaikyti pagal poreikius, PE tapo dažniausiai naudojama pagrindine medžiaga žemės ūkio MP gamyboje” [63]. MP pradėtos gaminti iš PE jau nuo 1956 m. ir skaičiuojama, kad jau po 61 m. pasaulinė iš PE pagamintų mulčiavimui skirtų plėvelių rinką siekė 2 mln. t. [48]. O 2018 m. daugiau nei 17,8 mln. ha. žemės buvo padengta iš polietileno pagamintomis plėvelėmis [55]. MP dažniausiai yra sezoniškai naudojamas gaminy, kuriuo laukus iš naujo dengia kartą per metus [54].

MP išpopuliarėjo dėl tinkamų mechaninių savybių, esant poreikiui, gero ar kaip tik riboto šviesos pralaidumo, gebėjimo sulaikyti vandenį ir lengvos bei pigios šių plėvelių gamybos iš naftos [47]. Pradėjus masiškai naudoti MP pasaulinis grūdų derlius išaugo 20-35 %, o užauginamos medvilnės kiekiai padidėjo net iki 60 % [48]. MP (PE) jų atsiradimo metu buvo įvardinamos kaip „baltoji revoliucija“ dėl minėtų savybių, tačiau pradėjus šias plėveles naudoti masiškai išryškėjo ir problematinės vietos – šių plėvelių surinkimas ir dirvožemio tarša plastikumu, dėl šios priežasties iš „baltosios revoliucijos“ PE mulčiavimui skirtos plėvelės įgavo „baltosios taršos“ pavadinimą [48]. MP po jų panaudojimo būna užterštos mineralinėmis, smėlio ar organinėmis atliekomis ar jų mišiniu su vandeniu ir dėl šios priežasties net sąlyginai didesnę svorį turinčios PE plėvelės po jų panaudojimo turi 3 ar net 4 kartus didesnę svorį lyginant su pradiniu (žr. 1 lentelė) [38]. Kadangi PE MP palikta dirvožemyje nesuyra išskyla poreikis šią plėvelę panaudojus tinkamai surinkti ir pašalinti iš žemės, tačiau MP surinkimas ir šalinimas iš dirvožemio yra brangus ir neefektyvus pagal CIPA „270–370 eurų už hektarą“ [37] arba „vidutinės 150 eurų surinkimo išlaidos už toną tokių atliekų atitinka 600 eurų už toną faktinio plastiko kiekio tose atliekose“ [38]. Šios plėvelės surinkimas ne tik, kad brangus, tačiau užima ir daug laiko, M. Valendija, S. Galinato ir A. Wszelaki [57] paskaičiavo, kad norint nuimti panaudota MP nuo dirvožemio, kur buvo auginti vaisiai ar daržovės, procesas užtrunka ~42 val./ha. Be to, net ir surinkta plėvelė, dažnu atveju, dėl savo užterštumo dirvožemiu, nebėra tinkama perdirbimui, dėl to atsiduria sąvartynuose ar atliekų deginimo įrenginiuose (žr. 8 pav.) [36,37,45]. Todėl pastebima, kad „toks užterštumo lygis būdingas tik agroplastikams ir <...> yra pagrindinė mažo perdirbimo priežastis“ [49].

1 lentelė. Europos ŽŪ plastiko rinka pagal produktus, prieš ir po produktų panaudojimo ir surinkimo, 2020 [38]

Produktai	Tonos (naujų)	%	Tonos (panaudojus)	%
Plėvelės	547000	76	927500	80
Lankstūs drėkinimo vamzdžiai	40000	5	48000	4
Tinklai	54500	8	80500	7
Špagatai	80000	11	104000	9

Tačiau aplinkosauginės problemas kelia ir tinkamai nesurinktos PE mulčiavimo plėvelės. Ši problema atsiranda dėl dažniausiai naudojamų LDPE mulčiavimui skirtų plėvelių (žr. 2 lentelė), kurios tiek dengimo, tiek jų nurinkimo metu gali suplyšti dėl jų plonumo, taip atskylant į mažesnius fragmentus,

kurie lieka dirvožemyje [46,48,49]. Oliver'is de Beaurepaire'as paminėjo, kad „rekomendacija naudoti tik įprastą mulčiavimo plėvelę, storesnę nei 25 μ, buvo įtraukta į atitinkamo standarto „EN 13655“ taikymo sritį, kai jis buvo peržiūrėtas, siekiant užtikrinti, kad jas būtų galima surinkti panaudojus“ [51]. Tačiau nėra žinoma ar storesnės, patvaresnės plėvelės iš tiesų prisidėtų prie efektyvesnio MP surinkimo, vis dar diskutuojama dėl optimaliausio storio ir kitų reikiamų MP savybių norint pasiekti geriausius rezultatus [49].

2 lentelė. Europos ŽŪ plastiko rinka pagal polimerų rūšis, prieš ir po produktų panaudojimo ir surinkimo, 2020 [38]

Polimerai				
LDPE	587000	81 %	975500	84 %
HDPE	54500	8 %	80500	7 %
PP	11 %	104000	104000	9 %

Buvo atlikti tyrimai ir bandant sužinoti LDPE tipo plėvelės degradaciją jos nesurenkant ir neardant, ją paliekant dirbtame lauke, kurių metu paskaičiuota, jog palikus tokią plėvelę galima tikėtis net iki 300 metų trunkančios biodegradacijos [63]. Taip pat, dėl įvairiausių aplinkos sąlygų (temperatūros, drėgmės, saulės spinduliuotės ir t. t.) LDPE plėvelė gali skilti (bio ar foto degradacija) ir dirvožemyje likti mažesnių fragmentų ar net mikroplastiko pavidalu [46,48]. Plastiko fragmentų akumuliacija dirvožemyje gali neigiamai paveikti dirvožemio savybes, augalų vegetacijos procesus, gali užteršti auginamus maisto produktus ar migruoti į kitą aplinką, tokią kaip vandens telkiniai, ar į gilesnius dirvožemio sluoksnius [25,48]. Nors ir renkant MP surenkama didžioji jų dalis, net likę maži kiekiai iš tiesų gali sukurti didelio masto taršą, per tam tikrą laiką, Europos komisijos užsakytame tyrime „įprastų ir biologiškai skaidžių plastikų svarba žemės ūkyje“ keliamo prielaida, kad jeigu vidutiniškai dirvožemyje kas metus lieka bent 5 % panaudotos MP, tai galima tikėtis 4,750 t. papildomų plastiko atliekų pasklidusių dirvožemyje kiekvienais metais [49].

Pastebima, kad kuo plonesnė plėvelė naudojama, tuo didesnė tikimybė, jog dirvožemis bus užterštas mikro- (< 5 mm) ir makro- (> 5 mm) plastikais, o tai galiausiai prisideda prie įvairaus pobūdžio toksiškumo, kadangi mikro plastikas gali adsorbuoti pesticidus, plastifikatorius ar mikroorganizmus ir migruojant juos pernešti [46]. O dėl lėtos biodegradacijos, migruoti ir neigiamai veikti supančia aplinką šie plastiko likučiai gali ir iki 500 metų ir kiekvienais metais naudojant MP likutinis plastiko kiekis dirvožemyje vis augti [4,8,23,49].

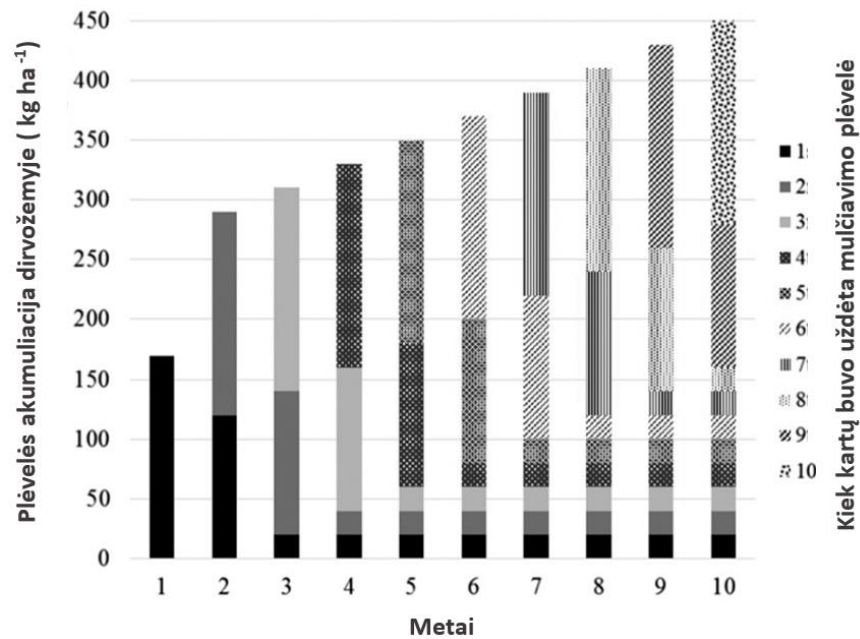
Svarbu ne tik MP apimtis ar skilimo greitis, bet ir jų sudėtis ar gebėjimas įsisavinti aplinkoje esančius komponentus. Vienas iš nerimą keliančių tipinių LDPE plastiko MP priedų, skirtų suteikti plėvelei reikiamo plastiškumo gali būti ftalato rūgšties esterių grupės komponentas. Tokie priedai kaip ftalatai gali užteršti dirvožemį ar jame auginamus produktus, kadangi jie nėra stipriai surišti su pačia plėvele ir nepaisant jų mažo tirpumo ar kitų savybių, vis tiek per laiką gali išsiskirti į dirvožemį. MP sudėtyje gali būti net iki 120 mg/kg ftalatų [63]. MP po jų naudojimo taip pat gali būti ir pačios perėmusios dalį teršalų iš dirvožemio, LDPE plėvelės laikui bėgant įgauna grublėtesnį paviršių ir dėl to prie jų gali adsorbuotis dalis organinių teršalų, tokių kaip pesticidai [64]. Todėl naudojant PE plėveles mulčiavimui derėtų atkreipti dėmesį į tinkamą šių plėvelių surinkimą, jų sudėti bei atliekų užterštumą ne tik dirvožemiu, bet ir kitomis galimai kenksmingomis medžiagomis [23,46,63,64].

Siekiant spręsti minėtas problemas siejamas su PE mulčiavimo dangomis, siūloma pasitelkti biodegradaciją kaip vieną iš galimų sprendimo būdų, kadangi nereiktų MP surinkti iš dirvožemio, jos biodegrduotų į nekenksmingus komponentus, nepaliekant plastiko fragmentų ir t. t. Dėl poreikio greitos ir kokybiškos biodegradacijos, bei išlaikomų būtinų savybių (apsauga nuo garavimo, šilumos sulaikymas ir t. t.) kaip sprendimo būdas siūloma alternatyva – MP iš bioplastiko, tačiau pastarųjų sudėtis, biodegradacija, mechaninės savybės ir t. t. kelia diskusijas ir poreikį tolimesniems tyrimams [35,36,42,53,63]. Svarbu, jog būtų rastas „kompromisas tarp būtinybės išlaikyti MP savybes naudojimo metu ir reikalavimo greitai biologiškai skaidytis po naudojimo išlieka pagrindiniu medžiagų mokslo iššūkiu.“ [63]

3.2. Mulčiavimo plėvelės iš bioplastiko

Biodegradacija – tai pageidaujama, tačiau ne būtina savybė siejama su agrotekstile. Iš pradžių kaip pirmos biodegrduojančios MP iš tiesu buvo net ne biodegrduojančios, o photodegrduojančios (PD) [55], tik vėliau, pastebėjus šių plėvelių grėsmę (skilimas į toliau nesuyrantį mikroplastiką), PD plėvelės buvo atskirtos nuo bioplastiko sąvokų, o 2021 m. ir uždraustos [49]. Todėl manoma, kad tolimesni tyrimai ir tinkami reikalavimai be galo svarbu, siekiant, kad bioplastiko integracija ir panaudojimas atneštų naudos, o ne sukurtų papildomus sunkumus. Kadangi mulčiavimui naudojamos plėvelės yra vienos iš labiausiai užterštų agrotekstilės šakų, siūloma šių plėvelių gamybai kaip PE alternatyvą naudoti bioplastikus [35,36,49,53].

Vis dar didžioji dalis agrotekstilės yra gaminama iš PE, kadangi iš šio plastiko pagamintos agroplėvelės pasižymi visomis kitomis būtinomis savybėmis, tačiau iš šios medžiagos pagaminta plėvelė nėra biodegrduojanti. Dėl šios priežasties, bandoma sukurti agrotekstilę, kuri ne tik atitiktų visus kitus šiai tekstilei keliamus reikalavimus, bet ir būtų biodegrduojanti, tiksliau, remiantis biodegradacijos standarto nustatytais reikalavimais „> 90 % anglies, esančios mulčio plastikiniuose polimeruose, per 2 metus turi virsti anglies dioksidu (CO₂), kai inkubuojamas viršutiniame dirvožemio sluoksnyje aerobinėmis sąlygomis standartiniu laboratoriniu tyrimu, esant pastoviai 20–28 °C temperatūrai“ [35,36]. Šios savybės įgyvendinimas ir tolimesnis taikymas yra be galo svarbus ir manoma, kad ateityje susilauks dar daugiau dėmesio. Tačiau, net atitinkant taikomą 90 % per 2 metus irimo standartą biodegrduojanti plėvelė vis tiek gali akumuliuoti dirvožemyje, dėl ne 100 % suirimo [54]. Dėl šios priežasties buvo atliktas teorinis modeliavimas atspindintis galimą biodegrduojančios MP akumuliaciją dirvožemyje, jeigu tokio tipo plėvelė tame pačiame lauke būtų naudojama kiekvienais metais uždengiant vis naują sluoksnį ir priimant prielaidą, kad pirmais MP naudojimo metais biodegradacija turėtų siekti 45 % suirimo lygį, o po 2 metų 90 % suirimo lygį. Net pasiekiant 90 % biodegradacijos lygį kiekvienais metais naudojant vis naujas bioskaidžias MP galima tikėtis vis didesnės liekamosios taršos po kiekvieno sezono, dėl liekančių 10 % dirvožemyje (žr. 9 pav.). Pagal minėtus skaičiavimus, naudojant biodegrduojančias MP tame pačiame lauke 10 metų, galima tikėtis net 450 kg/ha plastiko likučių dirvožemyje, kai tuo tarpu naudojant LDPE MP (20 μm storumo) tokiu pačiu tempu 10 metų, tik jas surenkant, po kiekvieno sezono, galima tikėtis 462,5 kg/ha likusių MP fragmentų dirvožemyje [54,57].



9 pav. Numatomas MP likučių kaupimasis dirvožemyje, kai MP įterpiama 200 kg/ha per metus 10 metų. Manoma, kad 10 % MP išliks dėl nesuyrančių plastikinių komponentų [54]

Tačiau galima rasti ir rezultatų rodančių, jog biodegraduojančio plastiko plėvelės dirvožemyje gali būti atsakingos už papildomą dirvožemio taršą plastiko fragmentais, tačiau priimama prielaida, jog šie po 2 metų pasiekia 100 % biodegradacijos lygį ir jų dirvožemyje nelieka [57]. Todėl, nors ir biodegradacijos funkcija suvokiama kaip sprendimo būdas siekiant išvengti dirvožemio taršos plastiku, kadangi biodegraduojanti plėvelė netūrėtų kelti taršos plastiku rizikos suyrant, reikalingi tolimesni tyrimai šioje srityje [36,56,57].

Biodegradacija, yra procesas priklausantis nuo daugybės aplinkos faktorių, net taikomi standartai negarantuoja biodegraduojančių plėvelių aplinkai ir auginamiems produktams saugaus naudojimo [42,56,55]. Todėl yra manančių, jog reiktų labiau fokusuotis ne ties biodegradacija, o ties medžiagomis, kurios naudojamos polimerų gamybai [42,46]. Nepamirštant, kad svarbu, jog ši plėvelė tinkamai atliktų savo funkciją pageidaujama laikotarpiu, MP turi būti atspari ekstremalioms aplinkos sąlygoms, sulaukyti drėgmę, šilumą ir t. t. tačiau pakankamai greitai ir tinkamai (skylant į aplinkai nekenksmingus komponentus) suirti natūralioje aplinkoje, o biodegraduojančios MP, kurios dažnu atveju yra organinės kilmės, nebūtinai pasižymi tokiomis pat geromis savybėmis, kaip iš naftos pagamintos PE plėvelės [56,57,63].

3.2.1. Mulčiavimo plėvelių gaminamas iš įvairių medžiagų mišinių

Todėl, siekiant sukurti alternatyvą iš tradicinio plastiko pagamintoms plėvelėms, reikia sukurti produktą, kuris savo savybėmis būtų pakankamai konkurencingas esamai plėvelei, todėl kuriant MP iš bioplastiko, dažnu atveju naudojami skirtingų komponentų mišiniai, tam, kad būtų išgaunamos poreikį atitinkančios plėvelės [59,61].

Skirtingi bioplastikai, turi skirtingas savybes, tarkim Poli(etileno 2,5-furandikarboksilat) (PEF) yra polimeras pagamintas iš biomasės ir pasižymi dideliu tempimo moduliui ir tvirtumu, kai tuo tarpu PBAT jau pagamintas iš naftos, tačiau yra bioskaidus ir pasižymi lankstumu, šie plastikai gali būti naudojami ir atskirai tačiau juos maišant galima pagerinti norimas savybes, pastebėta, kad maišant

PBAT su PEF (jeigu PEF mišinyje 3-7 %) gaunamas plastikas pasižymi geresniu atsparumu smūgiams ir prailgintu trūkimu (lyginat su tik iš PBAT ar PEF pagamintais plastikais) [65]. Tokie tamprūs plastikai gali būti naudojami gaminti mišinius su kitas reikiamas savybes turinčiais plastikais, tarkim jau minėtas PLA yra lyginant su PBAT gan tvirtas ir mažai lankstus, netgi lyginamas su akriliniu plastikumu, tačiau patvarus ir gaminamas iš atsinaujinančių medžiagų, todėl pasitelkus tinkamą plastiko mišinio santykį galima bandyti išgauti mulčiavimui tinkamą plastiko mišinį [65,70,71]. Pastaruoju metu populiarūs ir vis plačiau nagrinėjami bioplastikai pagaminti iš krakmolo ir įvairių priedų gerinančių bioplastiko reikiamas savybes. Kuriant mulčiavimui skirtas plėveles iš krakmolo buvo bandoma į jį įmaišyti glikolio ar karbamido, tačiau gauta per daug drėgmei jautri plėvelė [66], tačiau padengus krakmolo pagrindu su fosforo priemaišomis pagamintą MP chitozanu, gautos reikiamos terminės savybės, tačiau mechaninės savybės nebuvo tinkamos, todėl toks plėvelės mišinys taip pat nebus naudojamas žemės ūkyje [67]. Yra bandoma bioplastiką maišyti ne tik su kitų bioplastikumu, bet ir su kitokiais komponentais, tokiais kaip Ca^{2+} ir t. t., kurie bioplastikumi suteikia reikiamas savybes [69]. Tačiau dažniausiai komerciškai gaminami mišiniai skirti gaminti MP susideda iš: krakmolo, PLA, PBAT ir t. t. Mišiniai iš šių ar ne tokių populiarių biopolimerų ar kitų priedų tampa produktais gaminamais ir naudojamais ne tik laboratorijose, bet ir komercijoje, o šių produktų didėjančią įvairovę įrodo ir suteikti patentai, kurie jau skirti 158 skirtingiems mišiniams naudojamiems gaminti MP iš bioplastiko [70]. Tokio tipo tyrimai padeda ieškoti geriausių mišinių agropilėvelėms ar kitokiems bioplastiko gaminiams, o turint omenyje, jog mokslinių publikacijų apie biodegraduojančias MP kiekis per metus nuo 2018 m. siekia apie 60 naujų publikacijų kas metus, galima tikėtis vis daugiau naujų tyrimų apie naudojamus įvairius mišinius gaminant reikiamas plėveles [55]. Į mišinių gamybą, dėl poreikio panaudoti atliekas ar sumažinti pirminių žaliavų poreikį taip pat įtraukiamos medžiagos tinkamos bioplastiko gamybai, tačiau išgautos iš atliekomis įvardijamų srautų, jau yra bandoma panaudoti nuotekų valyklose susidarantį dumblą (dažniausiai naudojama PHA gamybai) ar pačias nuotekas iš gamybinių įmonių (tokių kaip iš cukraus etanolį gaminančios įmonės) ir t. t. [68,69].

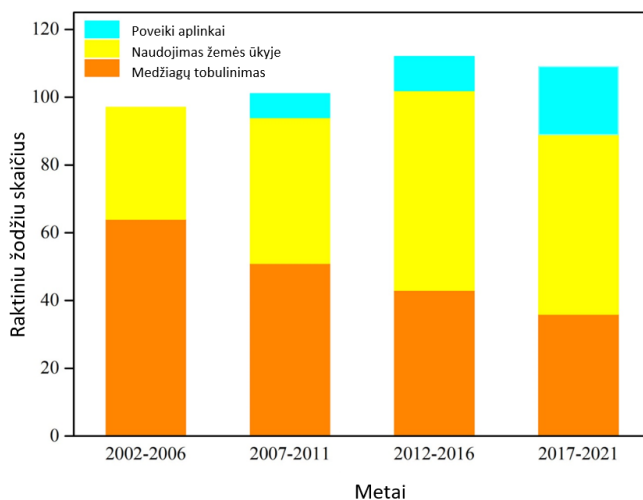
3.3. Aplinkosauginis būvio ciklo vertinimas

Vis dėlto biodegraduojanti MP pateikiama, kaip puiki alternatyva dabartinėms MP iš tradicinio plastiko, nors ir matomas poreikis griežtesniam šių plėvelių biodegradacijos kontroliavimui ar perdurbimo galimybių nagrinėjimui [35,49]. Tačiau plastiko gyvavimo ciklo pabaiga nėra atsakinga už visą jo sukurtą poveikį aplinkai ar kitoms sritims. Nors nagrinėjamos ir kitos tematikos siejamos su šiomis plėvelėmis, ne tik MP biodegradacijos, bet ir jų gamybos galimybės ir trūkumai, pradėta kalbėti apie šių plėvelių pačio naudojimo ypatumus žemės ūkyje ir jų aplinkosauginius trūkumus [54]. Norint tinkamai integruoti kuriamą inovaciją (šiuo atveju bioplastiko gaminius) į esamą ar būsimą sistemą, reikia ją išnagrinėti nuo pradžių iki galo, kad sprendžiant problemas atliekų ar kitoje produkcijos ar naudojimo srityje, nebūtų sukurtas didesnis neigiamas poveikis kitoje produkto gamybos ar gyvavimo stadijoje. Dėl šios priežasties vertinimams pradėtas naudoti BCV principas, kuris suteikia galimybę palyginti nagrinėjamus produktus (šiuo atveju plėvelę) ir nustatyti problematinės vietas [91].

Vertinant bioplastiko produktus jų pilno BCV metu dažnu atveju į tyrimus įtraukiami įvairūs atliekų scenarijai, pabrėžiant jų svarbą, siekiant išsiaiškinti tikėtiną aplinkosauginį poveikį. Tačiau beveik visais atvejais scenarijai yra teorinio pobūdžio ir naudojami duomenys gali būti imami remiantis procesų panašumais (pvz., kompostavimas gali būti vertinamas pasitelkiant duomenis apie virtuvės ar kitokių atliekų esamą kompostavimą, priimant prielaidą jog sugeneruojami tokie pat ar panašūs

išvediniai) ar remiantis jau atliktais kitų autorių pateiktais tyrimais, tokio pobūdžio duomenų naudojimas daugiausiai naudotas modeliuojant bioplastiko atliekų tvarkymo scenarijus (kompostavimą, perdirbimą) [89,91,92] arba atliekami vertinimai orientuojantis tik į gaminius iš bioplastiko atlikus apdorojimo procesus, neatsižvelgiant į visą likusį būvio ciklą [82]. Kai tuo tarpu tradicinio plastiko atliekų apdorojimo scenarijai yra plačiai išnagrinėti ir dažniausiai naudojami pasitelkiant jau sukurtas duomenų bazines [91,92]. Be to, skirtingi autoriai numato skirtingus galimus bioplastiko atliekų apdorojimo būdus remdamiesi sąlygomis, kuriuose numatomas šių atliekų apdorojimas, bei pačių atliekų sudėtimi. Pvz., tik 8 iš 24 nagrinėtų BCV mechaninį perdirbimą nagrinėjo kaip PLA plastikui tinkamą atliekų apdorojimo būdą, industrinio kompostavimo galimybė buvo siūloma 16 iš 24 atliktų tyrimų [83]. Bioplastiko tinkamumas vienam ar kitam atliekų apdorojimui atliekant BCV nusprendžiamas remiantis įvairiomis prielaidomis siejamomis su nagrinėjamos aplinkos veiksniais, esama ar būsima atliekų surinkimo ir apdorojimo infrastruktūra, gaminių sudėtimi ir t.t. Todėl svarbu atlikti kuo daugiau tokio tipo BCV siekiant įvairovės tyrimų, kurie galėtų būti palyginami tarpusavyje ir sukurtų aiškius reprezentatyvius rezultatus apie bioplastiko atliekų apdorojimus skirtingomis sąlygomis [60,83,91].

Didžioji dalis jau atliktų BCV vertinimų remiasi „IPCC GWP 100 a“ metodika ir skaičiuoja $\text{kg CO}_2^{\text{eq}}$ išreiškiamus rezultatus [60,82,83], tačiau yra tyrimų, kurie naudoja “ReCiPe Endpoint (H) V1.11.” ar “ReCiPe Midpoint (H) V1.11.” ar panašias metodikas siekiant įvertinti poveikį skirtingoms kategorijoms [52,93]. Dėl pateikiamos informacijos stokos sunku įvertinti tyrimų tikslumą ar tyrimo ribas, nagrinėjant atliktus BCV su bioplastiku, gautos išvados gali iš esmės skirtis, todėl sunku susidaryti bendrą nuomonę apie skirtingo plastiko gaminiu ir jų tarpusavio palyginimą. Pvz., gauti rezultatai gali rodyti, jog atliekų tvarkymo fazė visame BCV turi didžiausią indelį į poveikį aplinkai [60] kai tuo tarpu kiti šaltiniai teigia, jog produkto (plėvelės) gamyba sukuria didžiausią poveikį aplinkai, tuo tarpu net nevertindami atliekų scenarijaus [94].



10 pav. Naujų raktažodžių skaičius įvairiais biologiškai skaidžios mulčiavimo plėvelės tyrimų evoliucijos etapais [55]

Trūksta tyrimų, kurie aprėptų visą būvio ciklą, o ne būtų orientuoti į vieną ar kelis procesus esančius produkto būvio cikle (žr. 10 pav.). O tokio tipo tyrimai ŽŪ naudojamoms plėvelėms nėra gausūs, daugiausiai atliekami tyrimai taip pat orientuojasi į plėvelės biodegradaciją ir šio proceso atitikimui standartams, tokių tyrimų esmė įvertinti iš skirtingų mišinių sudarytų plėvelių biodegradaciją (ar kitokį atliekų apdorojimą) siekiant jas tarpusavyje palyginti, tačiau neištraukiant gautų rezultatų

vertinant pilną būvio ciklą. Atlikti BCV tyrimai su ŽŪ naudojamomis mulčiavimo plėvelėmis yra labai riboti dėl naudojamų duomenų kokybės, be to, tokio tipo atliktų tyrimų yra nėra daug, o dėl MP naudojimo augimo ir alternatyvų poreikio (aptarta 3.1 skirsnyje) atsiranda poreikis suprasti alternatyvų (bioplastiko plėvelių) ir esamų produktų (LDPE plėvelių) aplinkosauginio poveikio skirtumus atliekant išsamesnius ir daugiau galimybių nagrinėjančius vertinimus BCV požiūriu [10,52,55,60].

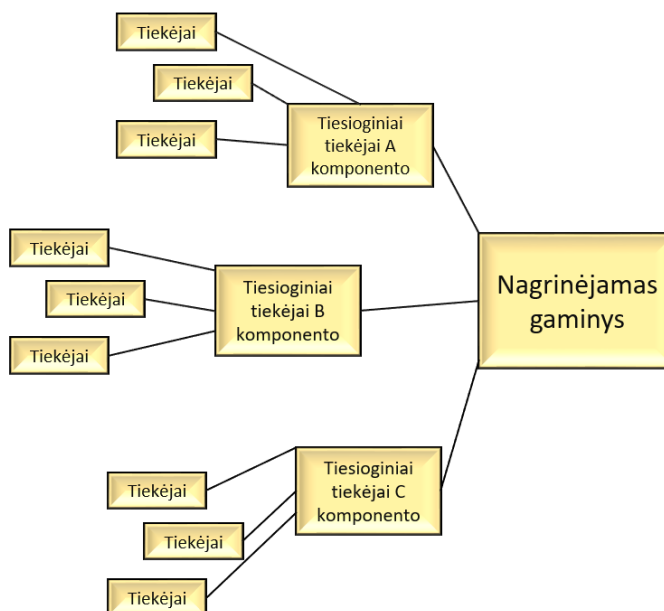
Trūksta vertinimų, kurie į bioplastiko produktus žiūrėtų ne remiantis viena problema ar sritimi, o visu MP gyvavimo ciklu. Dėl to pradėtas taikyti būvio ciklo vertinimo (BCV) metodas BCV dar nėra plačiai pritaikytas MP vertinimuose, bet tokių ar panašių tyrimų poreikis matomas dėl skirtingų duomenų sujungimo į vieną sistemą [52,55]. Kadangi pirmieji atlikti tyrimai nagrinėjantys mulčiavimui skirtas plėveles orientuojasi į pačių žaliavų gamybos ypatumus ir jų pritaikomumą (atsirado nuo 2002 m.) tik kiek vėliau (2006 m.) pradėta kreipti dėmesį į šių plėvelių biodegradacijos galimybes, keliamas aplinkosauginės dilemas (žr. 10 pav.) tačiau vis dar neužtenka tyrimų, kurie apimtų visas nagrinėjamas sritis ir tinkamai įvertintų potencialų šių plėvelių ekotoksiškumą aplinkai taikant platesnį sisteminį požiūrį [55].

3.4. Socialinis būvio ciklo vertinimas

Darnus vystymasis tampa svarbia dalimi pramonės ir ekonomikos kontekste, įvairaus pobūdžio politiniai sprendimai, visuomenės spaudimas ir kiti veiksniai skatina verslus siekti išskeltų darnaus vystymosi tikslų. Tačiau norint pasiekti keliamus tikslus požiūris į kuriamus produktus, paslaugas ar sistemas turi remtis tarpusavyje susijusių problemų sprendimu į jas žvelgiant neapibrėžtu, tačiau visą nagrinėjamą sistemą aprėpiančiu požiūriu. Kitaip tariant, norint iš tiesų suvokti problemines sritis nebeužtenka remtis tradiciniais rodikliais (pvz., bendruoju vidaus produktu (BVP) ar pan.), reikia pasitelkti globalesnį požiūrį į visą gaminį ar paslaugą aprėpiančią sistemą [78,95,97].

Dažu atveju sukuriama produkto socialinės, ekonominės ar aplinkosauginės rizikos vertinamos šalies ar regiono mastu, nesuvokiant sukuriamos pridėtinės vertės ar žalos viso būvio ciklo metu [95,96]. Tačiau aplinkosauginis BCV taikomas vis plačiau, siekiant šį būdą pritaikyti buvo sukurti įvairūs tarptautiniai standartai [72,73], metodikos t. t. tuo tarpu socialinis būvio ciklo vertinimas (S-BCV) yra naujai siūlomas vertinimo būdas, kuris dėl savo naujumo ir tobulinamų metodikų vis dar neturi nustatytų standartų, tačiau socialinių rizikų vertinimas atsiremia į tokius pačius ar panašius principus kaip BCV, todėl vertinant socialines rizikas remiamasi „LST EN ISO 14040:2006“ standarto nustatytomis gairėmis [95,96]. S-BCV apibrėžiamas kaip „socialinio poveikio (ir galimo poveikio) vertinimo metodas, kuriuo siekiama įvertinti socialinius ir socioekonominius produktų aspektus ir galimą teigiamą bei neigiamą jų poveikį jų gyvavimo ciklo metu, apimančių žaliavų gavybą ir perdirbimą; gamybą; platinimą; naudojimąsi; pakartotinį naudojimą; priežiūrą; perdirbimą; ir galutinis šalinimas“ [78]. Nors S-BCV metodika pradėta kurti nesenai (2011 m.) per pastaruosius 11 metų šioje srityje atsirado didžiąją dalį pasaulio šalių aprėpiančios duomenų bazės ir toliau tobulinamos metodikos, siekiama sukurti šį vertinimą tinkamai reguliuojančius standartus ir pradėti jį taikyti dar platesne prasme [78,97]. Tačiau naudojant S-BCV svarbu vertinant suprasti, jog atlikti tyrimai yra pritaikyti palyginimui ar produkto įvertinimui, tačiau gauti rezultatai gali būti vertinami tik rekomendacinio požiūrio principu ypatingai nagrinėjant atliekų apdorojimo scenarijus, energijos suvartojimus ir pan. [97,98], kol kas rekomenduojama šį metodą naudoti vertinant produkto ar paslaugos įvedinius, neįtraukiant energijos suvartojimo ir kitų procesų [78,97,98].

Tačiau S-BCV gali būti vertinamas kartu su aplinkosauginiu BCV taikant tuos pačius metodikos reikalavimus ir vertinant tuos pačius procesus ar gaminius jų duomenis pritaikant tiek socialiniam, tiek aplinkosauginiam vertinimui. S-BCV ir buvo sukurtas kaip įrankis skirtas praplėsti jau esamus BCV [95,96,99]. Tačiau vertinant S-BCV produktą sudarantys įvediniai (tik žaliavos) iš jų masės vertės (kg, g ir t. t.) turi būti paversti į piniginę vertę išreikštą USD, tokiu būdu tiekėjai (žr. 11 pav.) vertinant jų tiekiamo komponento indėlį (į sudaromą vertinamo produkto vertę) gali būti lyginami tarpusavyje. Piniginė išraiška pasirinkta siekiant geresnio tarpusavio palyginimo, kadangi daugumos socialinių dalykų pasverti masės vienetais negalima (vidutinis darbo užmokestis, darbo valandos ir t.t.) pinigine vertė buvo pasirinkta kaip viską jungiantis matavimo vienetas, tačiau ši vertė kiekvienoje subkategorijoje turi skirtingą reikšmę ir perskaičiavimo būdą. Pvz., subkategorija „skurdas“ vertinamas „santykiu kiekiu žmonių, kurių pajamos nukrenta žemiau skurdo ribos, skaičiaus“ priklausomai nuo šalies iš kurios atkeliauja produktas nustatomas žmogau reikiamas pajamų kiekis per dieną ir rizika šio pajamų kiekio nepasiekti siejama su nagrinėjama industrijos šaka, kuri tiekia komponentą, tačiau subkategorija „socialinės naudos“ vertinama pagal darbuotojų draudimo kokybę, išmokų kiekius už nedarbingumą, motinystės atostogų išmokas ir t.t. Šie skaičiavimai atliekami sukurtuose sistemose (viena pagrindinių yra „SimaPro“) [78,86].



11 pav. S-BCV supaprastintas principas vaizduojamas vertinant X produktą

Todėl S-BCV principas yra taikoma siekiant praplėsti požiūrį į nagrinėjamą produktą, dažnų atveju derinant kartu su aplinkosauginių BCV, nors jie gali būti vertinami ta pačia programine įranga ir abu rengiami remiantis „LST EN ISO 14040:2006“ standarto principu, jų naudojamų metodų skirtumai neleidžia gaunamų rezultatų susumuoti į vieną bendrą išvadą, tačiau atkreipia dėmesį į problematines vietas tiek aplinkosauginiu, tiek socialiniu klausimu ir gali padėti išvengti papildomo neigiamo poveikio tobulinant nagrinėjamą produktą [99]. Tokio tipo tyrimų atlikta sąlyginai nedaug (lyginat su aplinkosauginiu BCV), o mulčiavimui skirtų plėvelių vertinimas aplinkosauginiu ir socialiniu būvio ciklo vertinimo principu nėra atliktas.

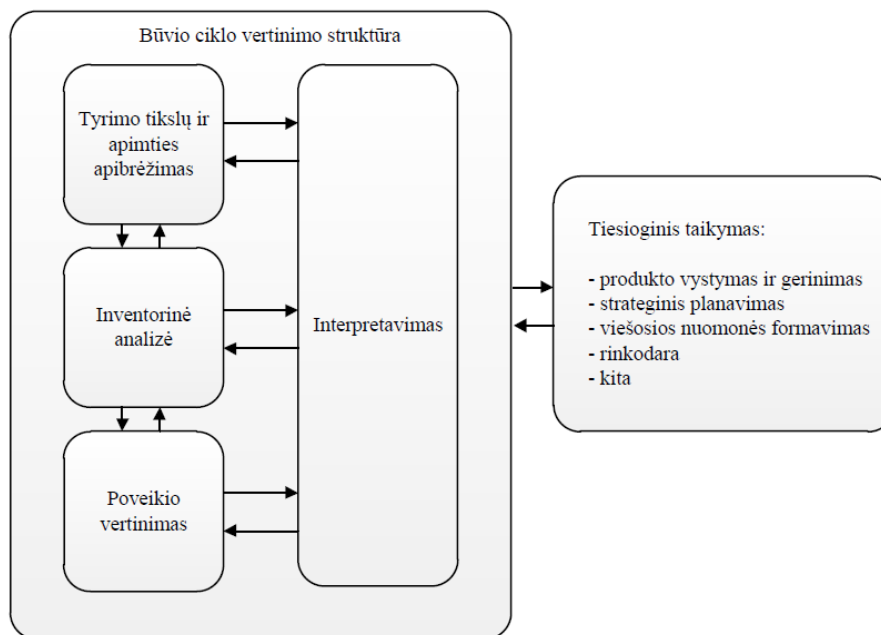
4. Metodika

4.1. Aplinkosauginio būvio ciklo vertinimo metodika

Gaminių (paslaugų), procesų ar veiklos neigiamų aplinkos apsaugos aspektų nustatymas atliekamas taikant būvio ciklo vertinimo (BCV) metodiką. BCV yra vienas iš aplinkos vadybos metodų, taikomų su gaminiais (paslaugomis) ar technologijomis susijusių aplinkos aspektų ir potencialių poveikių identifikavimui ir įvertinimui (žr. 12 pav.). BCV vertinimo metodika ir eiga pateikiama standartuose „LST EN ISO 14040:2006“ [72] ir „LST EN ISO 14044:2006“ [73].

ISO apibūdina BCV kaip „su gaminiu (paslauga) siejamų aplinkos aspektų ir potencialių poveikių vertinimo metodą, kuriuo [72,73]:

- kaupiami atitinkamų gaminių (paslaugų) sistemos įvedinių ir išvedinių inventoriniai duomenys;
- vertinami su šiais įvediniais ir išvediniais susiję poveikiai aplinkai;
- interpretuojami inventorinės analizės ir poveikio vertinimo tarpinių rezultatų, atsižvelgiant į tyrimo tikslus.



12 pav. Būvio ciklo vertinimo etapai [72]

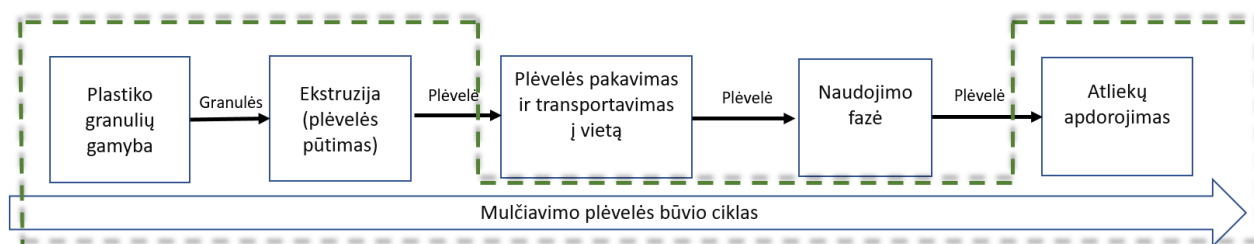
Apsibrėžiant BCV tyrimo tikslus ir apimtį, ISO reikalauja išnagrinėti ir aiškiai aprašyti šiuos aspektus: gaminį, jo funkcijas, funkcinį vienetą, gaminių sistemą, vertinimo ribas, duomenų tipą, prielaidas ir trūkumus.

4.1.1. Būvio ciklo vertinimo tikslai, funkcinis vienetas, ribos

Tyrimo tikslas: identifikuoti didžiausią neigiamą poveikį aplinkai keliančius aspektus siejamus su nagrinėjamais gaminiais (mulčiavimo plėvelėmis) ir nustatyti, kokiuose būvio ciklo fazės procesuose turi būti priimti sprendimai, siekiant gaminių poveikio aplinkai sumažėjimo, bei norint įvertinti kuris

iš nagrinėjamų gaminių pasižymi mažesniu poveikiu aplinkai visu jo gyvavimo ciklo metu. Tyrimo metu bus analizuojami žaliavų, gamybos, transportavimo, energijos ir atliekų sukelti poveikiai aplinkai, kurie bus įvertinti poveikio aplinkai indikatoriais skirtingose poveikių kategorijose.

Būvio ciklo vertinimo ribos: nuo žaliavų išgavimo iki produkto tapimo atlieka (ang., cradle to grave). Šiame tyrime bus nagrinėjamos mulčiavimui skirtos plastikinės plėvelės, įvertinant kiekvienos iš jų gamybai reikalingas žaliavas, ir joms pagaminti reikalingus energijos kiekius ir komponentus (kiti netiesioginiai įvediniai), taip pat vertinant plėvelės gamybos procesus (tiesioginiai procesai) ir plėvelių tapimo atlieka galimus variantus (antrinė netiesioginė veikla). Nagrinėjamas procesas atvaizduotas ir apibrėžtas žalia linija (žr. 13 pav.).



13 pav. Būvio ciklo vertinimo ribos ir struktūra

Funkcinis vienetas: 1 kg pagamintos skaidrios plėvelės.

Vertinant reikiamus įvedinius į plėvelės gamybai naudojamas granules, ekstruzijos proceso sąnaudas ir įvedinius bei išvedinius skirtinguose plėvelės (ang., end of life) scenarijuose.

4.1.2. Inventorinė analizė

Šiame poveikio aplinkai vertinimo darbe naudoti duomenys imti iš “SimaPro v.9.1” [102] esančių duomenų bazių, tokių kaip „Ecoinvent v. 3.6.“ [103] kurios talpina duomenis apie 25000 įvairių procesų ir medžiagų arba iš mokslinės literatūros, kurioje buvo nagrinėjamos šios medžiagos būvio ciklo vertinimo principu.

Toliau bus įvardinta kaip buvo įvertintas kiekvienas iš tiriamų produktų.

Mulčiavimui skirta plėvelė iš polilaktido rūgšties arba polilaktido (PLA) pagaminta iš 100 % PLA plastiko. Duomenys apie granulių gamyba buvo surinkti iš mokslinės literatūros [60], tačiau jie surinkti orientuojantis į ekologinį profilį, kuriame pateikiama informacija per bendrai sunaudojamų medžiagų ir energijos kiekį, o ne per granulių gamybos procesus, todėl naudojant šiuos duomenis negalima įvertinti konkrečių procesų poveikio, o patys duomenys surinkti 2007 m. Viena iš sudėtinių dalių buvo koreguojama modeliavimo programoje “SimaPro 9.1“, tai kukurūzų gamyba, šiam įvediniui pridodant papildomą neigiamą anglies dvideginio išsiskyrimą, siekiant, kad modeliuojant būtų įvertintas kukurūzų auginimo metu pasisavintas atmosferos CO₂, kurio kiekis buvo paimtas iš [75] (žr. 3 lentelė). Renkantis granulių gamybos proceso energijos įvedinius, buvo imti Lietuvos duomenys apie šalyje naudojama elektros energijos mišrą, o reikiama šiluminė energija buvo įvedama atitinkamai pagal [60] nurodytus kuro tipus, taip pat renkantis Lietuvoje sumodeliuotus energijos gaminimo procesus. Lietuviška energija buvo imta darant prielaidą, kad produktas būtų gaminamas Lietuvoje, tik jo sudedamosios dalys, jau atitinkamai, pasaulyje, pagal duomenis esančius duomenų bazėje (žr. 3 lentelė).

3 lentelė. Reikalingi įvediniai gaminant 1 kg PLA granulių

Energijos įvediniai [60]	MJ/kg
Natūralios (gamtinės) dujos	19,7
Elektra	6,68
Likutinė alyva	3.39
Anglis	0,24
Vandenilis	0,09
Sudėtinės dalys [60]	kg/kg
Kukurūzai	1.28
Sieros rūgštis (H ₂ SO ₄)	0.25
Azoto dujos	0.01
Natrio chloridas (NaCl)	0.11
Bauxites (aliuminio druskos)	0.0000060
Baritas (bario sulfatas)	0.001
Geležis	0,00033
Švinas	0,000002
Kalkakmenis (CaCO ₃)	0.79
Smėlis (SiO ₂)	0.01
Fosfatas (P ₂ O ₅)	0.01
Siera (elementinė)	0.01
Dolomitas	0,000004
Olivinė (šito nėra „SimaPro“ todėl neįtrauktas į modeliavimus)	0,000003
Kalio chloridas (KCl)	0.02
Kaolinas	0.02
Perdirbta geležis	0.0000067
Kukurūzų grūdų per fotosintezės procesą sugertas CO ₂ (avoided) [75]	-1,34

Plėvelės gamybai buvo modeliuojama ekstruzija, kadangi šis plėvelės gamybos būdas kituose mokslinio tipo tyrimuose nurodytas kaip pagrindinis ar dažnai naudojamas kaip ir su kitomis tokio tipo plėvelėmis. Buvo naudoti duomenys iš „SimaPro 9.1“ duomenų bazių apie LDPE ekstruziją, pakeičiant sunaudojamą energiją į lietuvišką, dėl prielaidos, jog procesas vyks Lietuvoje, bei reikiamus papildomus LDPE plastiko granulių įvedinius į jau aprašytas PLA plastiko granules.

Plėvelės tapimas atlieka literatūroje atliekant būvio ciklo vertinimą yra modeliuojamas teorinių scenarijų būdu, darant prielaidas vienam ar kitam galimam gyvavimo pabaigos scenarijuje, todėl šiame tyrime taip pat buvo įvertinti 3 skirtingi, šio plastiko atliekoms technologiškai galimi, scenarijai: kompostavimas, anaerobinis skaidymas ir deginimas (žr. 4 lentelė). Duomenys apie anaerobinio skaidymo ir kompostavimo procesus ir juose sugeneruojamus išlakas buvo surinkti iš [74], tačiau siekiant didesnio tikslumo industrinio kompostavimo duomenys buvo patikslinti remiantis [75] pateiktais duomenimis apie dirvožemyje užfiksuotas anglies ir azoto kiekius,

pastaruosius modeliavime vertinant kaip išvengtus (ang., avoided) produktus praturtinančius dirvožemį. Duomenys apie deginimo scenarijų buvo parinkti iš „SimaPro 9.1” programoje esančios duomenų bazės renkantis plastiko mišinį deginantį procesą, kaip atitikmenį, tačiau pakeičiant pagaminamos energijos kiekius pagal PLA kaloringumą (19,5 MJ/kg [60]).

4 lentelė. Reikalingi įvediniai ir sugeneruojami išvediniai apdorojant 1 kg PLA plėvelės

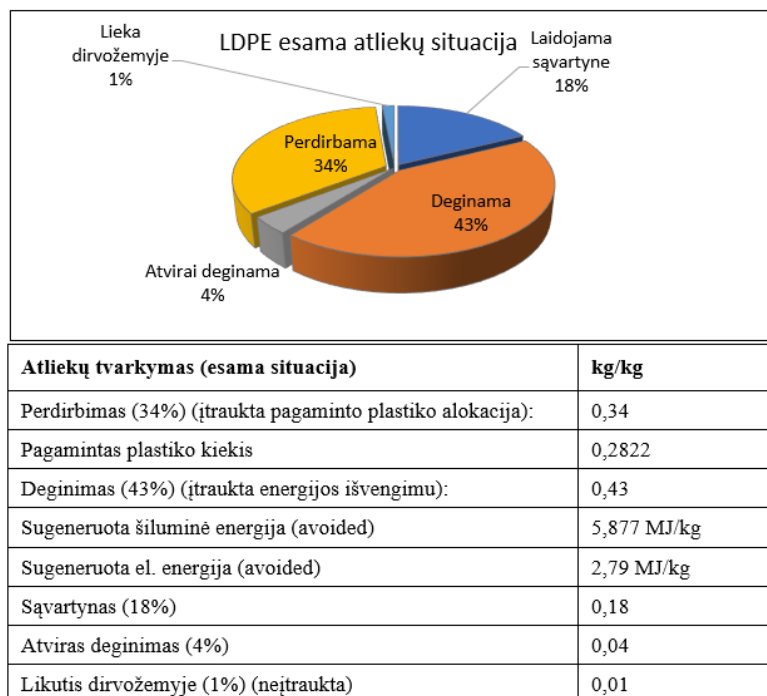
Industrinis kompostavimas PLA (iš 1 kg) [74]	g/kg
Pridėtinis vanduo	1000
CH ₄ emisijos (į orą)	1,3
CO ₂ emisijos (į orą)	1464
Susidariusi kompostinė medžiaga (lyginama su durpių pakaitalu):	400 (durpių)
<i>Organinė anglis (užfiksuota durpėse)</i>	-0,12 [6]
Anaerobinis kompostavimas [74]	g/kg
CO ₂ emisijos (į orą)	627
CH ₄ emisijos (surenkama) (neįtrauktas, nes pavirsta į toliau įtrauktą energiją)	344±3,4
Susidareęs digestato kiekis (toliau kompostuojamas):	397
<i>CO₂ emisija kompostuojant po pūdyimo (į orą)</i>	70,8
<i>CH₄ emisija kompostuojant po pūdyimo (į orą)</i>	2,86
<i>Atgautas energijos kiekis (deginant dujas)</i>	17,2 MJ/kg
Susidarančios komposto medžiagos kiekis (toliau skyla per 100 metų):	200
<i>CO₂ išsiskirs iš komposto dirvožemyje per 100 pirmųjų metų</i>	-152

Mažo tankio polietileno plėvelė (LDPE). Duomenys apie gamyboje naudojamus komponentus parinkti iš minėtos duomenų bazės, primant faktą, kad naudojami komponentai bus gaminami taip, kaip ten aprašyta, tik energija naudojama pačių granulių gamybai bus pakeičiama į Lietuvišką energiją (taip pat iš ten esančių duomenų bazių), darant prielaidą, kad granulės bus gaminamos Lietuvoje.

Plėvelės gamybai buvo modeliuojama ekstruzija, renkantis duomenys iš „SimaPro 9.1“ duomenų bazių apie LDPE ekstruziją, pakeičiant sunaudojamą energiją į lietuvišką, dėl prielaidos, jog procesas vyks Lietuvoje.

Lietuvoje šis atliekų srautas egzistuoja, tačiau neišskirtas atskirai, žemės ūkio atliekos sumuojamos į bendrus skaičius (kartu visas žemės ūkis, žuvininkystė ir miškininkystė). Atskirai surinkto plastiko kiekiai (ne pakuotės) apskaitomi labai maži, todėl modeliuojant LDPE plėvelių naudojamų mulčiavimui atliekų tvarkymo scenarijus nebuvo remtasi Lietuvos statistika žemės ūkiui. Buvo peržiūrėti šalies (Lietuvos) statistiniai duomenys atspindintys 2020 m. surinktas ir sutvarkytas atliekas, kurių atliekų kodas – 20104 (plastikų atliekos, išskyrus pakuotes). Kadangi net 51 % atliekų buvo paliktos kitiems metams (nesutvarkytos) ar tik ruošiamos šalinimui ar sutvarkymui, neaišku kas bus daroma su likusiomis atliekomis. Todėl šiam modeliui buvo panaudota Europos statistika

apibrėžianti žemės ūkyje naudojamus plastikus ir jų tvarkymo būdus. Plastiko atliekos užterštos todėl atlieka būna sudaryta iš: 722 kt. plastiko ir 453 kt. dirvožemio, tačiau neįtraukiant dirvožemio ir įimant tik gryną plastiko kiekį (722) [49], papildomi duomenys buvo naudoti paskaičiuoti kas nutinka į komunalinių atliekų srautą patekusiam plastikui Europoje [9 p.49], gauti rezultatai buvo sumodeliuoti juos įvardijant kaip „esama situacija“ (žr. 14 pav.).



14 pav. Esama LDPE atliekų tvarkymo situacija. Grafike išreikšta procentaliai, lentelėje pavaizduotos modeliavimui pritaikytos reikšmės

Dėl poreikio palyginti scenarijus LDPE plastiko plėvelės, su kitomis nagrinėjamomis plėvelėmis, buvo sukurti dar du galimi atliekų tvarkymo scenarijai LDPE plastikui: perdirbimas, deginimas ir laidojimas sąvartyne. Duomenys apie šiuos procesus buvo naudojami iš programoje esančios duomenų bazės, pridėdant išvengtus (ang., avoided) produktus. Į perdirbimo procesą buvo pridėtas išvengtas naujo plastiko gamybos kiekis (0,45 kg), remiantis tuo, jog nors ir LDPE yra įvardijamas kaip aukštą perdirbamumo lygį turintis plastikas, dėl pastarojo užterštumo dirvožemiu, ilgos ekspozicijos ant saulės ir dirvožemio (kadangi UV spinduliuote ir dirvožemio mikroflora šį plastiką ardo) išeiga po tokio plastiko perdirbimo buvo sumažinta iki 23 % [84]. O atliekų deginimo scenarijuje buvo pridėtas išvengtas naujos elektros ir šiluminės energijos gamybos poreikis, pagal sugeneruotą šių atliekų deginimo energiją turint omenyje 45 MJ/kg LDPE koringumą. Patekimo į sąvartyną scenarijus buvo naudotas iš duomenų bazių, renkantis modernų sąvartyną su dujų surinkimu ir panaudojimu.

Poli(butileno adipato kotereftalatas) (PBAT). Modeliuojant šio plastiko pagrindu gaminama granules buvo pasirinktas mišinys – 99 % PBAT ir 1 % UV stabilizatorius (Irganox 1010) [60]. Tačiau, stabilizatorius įvardijamas kaip komponentas, kurio pagrindą sudaro 2,6-di-tret-butilfenolis, todėl būtent jis imtas kaip įvedinys (žr. 5 lentelė).

5 lentelė. Reikalingi įvediniai gaminant 1 kg PLA granulių

PBAT su 1% UV stabilizatoriumi [89]	Kg/kg
1,4-butanediolis	0.41
Adipo rūgštis	0.37
Tereftalio rūgštis	0.33
2,6-di-tret-butilfenolis	0.01
Energija	MJ/kg
Šiluminės energijos poreikis	1
Elektros energijos poreikis	6,6

Plėvelės gamybai buvo modeliuojama ekstruzija, šis plėvelės gamybos būdas kituose mokslinio tipo tyrimuose nurodytas kaip pagrindinis ar dažnai naudojamas ir su kitomis tokio tipo plėvelėmis, kadangi nebuvo konkrečių duomenų apie šio plėvelės gamybos būdo įvedinius ir išvedinius PBAT gamybos metu, buvo naudoti duomenis iš „SimaPro 9.1“ duomenų bazių apie LDPE ekstruziją, pakeičiant sunaudojamą energiją į lietuvišką, dėl prielaidos, jog procesas vyks Lietuvoje, bei reikiamus papildomus LDPE plastiko granulių įvedinius į jau aprašytas PBAT plastiko granules.

Irganox 1010 naudojamas kaip UV stabilizatorius, nėra biologiškai skaidus ir gali išlikti aplinkoje, todėl bus modeliuojama taip, kad šis 1 % įvedinys, bus išvedinys į dirvožemį modeliuojant plėvelės kompostavimo namuose scenarijų (žr. 6 lentelė). O PBAT likęs kiekis bus skaičiuojamas pagal literatūroje aprašytus dujų išmetimus ir susidariusią durpėms prilyginamą frakciją, kuri perskaičiuota į dirvožemyje užrakintą organinę anglį ir azotą, modeliuojant daroma prielaida, kad dirvožemyje užfiksuota frakcija yra atitinkamų medžiagų papildomo įterpimo į dirvožemį išvengimas.

6 lentelė. Reikalingi įvediniai ir sugeneruojami išvediniai apdorojant 1 kg PBAT plėvelės

Namų kompostavimas [75]	kg/kg
CO ₂ emisijos (į orą)	1,6
CH ₄ emisijos (į orą)	0,004
N ₂ O emisijos (į orą)	0.72
Organinė anglis (užfiksuota durpėse)	-0,92
Azotas (užfiksuotas durpėse)	-0,32
2,6-di-tret-butilfenolis (į dirvožemį)	0,01
Deginimas [75]	
GWP [kg CO ₂] (panaudojau plastiko deginimą)	2.29 kg/kg
Sugeneruota šiluminė energija (alokacija)	6,53 MJ/kg
Sugeneruota el. energija (alokacija)	3,1 MJ/kg
Transportas į deginimo vietą	~100km (vadinasi 0,1 t/km)

Deginimo scenarijus parinktas remiantis LDPE duomenų bazėse sugeneruotu scenarijumi, papildomai buvo pridėtas išvengtas naujos elektros ir šiluminės energijos gamybos poreikis, pagal

sugeneruotą šių atliekų deginimo energiją, turint omenyje 50 MJ/kg PBAT kaloringumą nurodytą mokslinėje literatūroje (žr. 6 lentelė).

4.1.3. Nagrinėjami atliekų apdorojimo būdai

Kadangi atliekų tvarkymo scenarijų gali būti labai skirtingų, priklausomai nuo pačios atliekos, jos surinkimo būdo ir esamos atliekų apdorojimo sistemos. Todėl šiame tyrime buvo pasirinkta modeliuoti aplinkosauginį BCV su skirtingais plėvelių atliekų tvarkymo scenarijais (žr. 7 lentelė), tačiau scenarijai pasirinkti remiantis literatūra ir naudojamos programinės įrangos ir duomenų bazių galimybėmis, Europos statistikos duomenimis.

7 lentelė. Tyrime nagrinėti atliekų apdorojimo būdai ir jų taikymas

Atliekų apdorojimo būdai	Plėvelės, kurioms buvo pritaikytas šis scenarijus	Komentaras
Perdirbimas	LDPE	Perdirbimo procesas tradiciniam LDPE plastikui yra gerai išvystytas ir galimas tuo atveju jeigu atlieka nėra stipriai užteršta ar pažeista (degradacija nuo saulės spindulių, cheminė degradacija ir t.t.), todėl šis scenarijus įmanomas, tačiau priimant prielaidą, jog nagrinėjamos plėvelės yra plonos, užterštos ir veikiamos UV spinduliuotės, numatomi nedideli perdirbimo kiekiai [36,37,49]. PLA irgi įvardijamas kaip perdirbamas plastikas, tačiau dėl neegzistuojančių galimybių (nėra tam pastatytos sistemos) ir mažo tokio plastiko srauto ši galimybė nebuvo nagrinėjama [59,61,90]. Perdirbimas yra vienintelis (iš nagrinėjamų) atliekų apdorojimo būdų, kurio metu vėl išgaunama pradinė žaliava.
Laidojimas sąvartyne	LDPE, PBAT, PLA	Atliekų šalinimas sąvartyne vis dar vienas iš pagrindinių atliekų tvarkymo būdų (Europoje), atvežamos plastiko atliekos sukraunamos į sąvartyno kaupą ir paliktos gali irti iki 500 m. taip užimant plotą ir pamažu skylant į įvairaus pobūdžio medžiagas [9,22,42]. Tačiau PBAT ir PLA sąvartyne gali suirti greičiau ir dėl dalinai anaerobinių sąlygų (kaupas nemaišomas, kraunamos atliekos ant viršaus) išskirti ne tik CO ₂ , bet ir CH ₄ dujas [10].
Deginimas	LDPE, PBAT, PLA	Deginant plastiką išsiskiria daug kenksmingų dujų, tokių kaip dioksinais, furanai ir t.t. tačiau šiame darbe nagrinėjamas deginimas atliekamas tam pritaikytuose įrenginiuose, su pelenų sugavimo sistemomis (deginimo procesas iš „Ecoinvent“ duomenų bazės) [21,22]. Dėl mulčiavimui skirtų plėvelių užterštumo, bei neegzistuojančios PBAT ir PLA perdirbimo sistemos toks atliekų tvarkymo būdas yra tikėtinas visoms 3 nagrinėjamos plėvelėms [10, 36,49]
Industrinis aerobinis kompostavimas	PLA, PBAT	Šio atliekų apdorojimo būdu įprastai apdorojamos organinės kilmės atliekos, siekiant sumažinti jų apimtį, pagaminti kompostą, tai termofilinis procesas (žr. 13 pav.). Biodegraduojantis plastikas patenka į kompostavimo įrenginius ne dėl pačio komposto gamybos, bet dėl minėta atliekų apimties mažinimo ir nukenksminimo (biodegradacija iki CO ₂ , vandens garų ir organinės medžiagos) [8,28]. Siekiant kompostuoti plastiką aerobinėmis sąlygomis jis turi atitikti 3 reikalavimus: per pirmas 84 dienas plastikas turi suskilti į mažesnius nei 2 mm. fragmentus, po 180 dienų 90 % plastiko turi būti suirę ir gauti irimo produktai negali neigiamai paveikti komposto [8].
Industrinis anaerobinis kompostavimas	PLA	Anaerobinis kompostavimas šių tyrimų metu buvo imtas termofilinis, nes PBAT ir LDPE nebūdingas skaidymas anaerobinėmis sąlygomis ir nagrinėjamas tik PLA anaerobinis skilimas įvardijamas kaip tinkamas šios atliekos apdorojimo būdas tik esant aukštesnėms temperatūroms (žr. 13 pav.) [75].
Namų kompostavimas (paliekant dirvožemyje)	PBAT	Namų kompostavimas šiame tyrime įvardijamas kaip plėvelės suarimas į dirvožemį be kitokio papildomo apdorojimo. Iš tiriamų plėvelių taip kompostuojama gali būti tik PBAT plastiko pagrindu pagaminta plėvelė, kuri gali irti ir prie sąlyginai žemų temperatūrų, mažesnė temperatūra reiškia tiesiog lėtesnį irimą [75,82]

Kadangi tyrimo tikslas yra išnagrinėti tradicinio plastiko siūlomas alternatyvas iš bioplastiko, buvo nagrinėti ir tradiciniam plastikui nebūdinti atliekų tvarkymo būdai ir jų galimybės nagrinėjamos alternatyvoms (žr. 15 pav.).

	Anaerobinis apdorojimas	Aerobinis apdorojimas
50-60 °C	Krakmolas PLA Krakmolas/PCL PHA	Krakmolas PLA Krakmolas/PCL PHA PBAT
< 35°C	Krakmolas Krakmolas/PCL PHA	Krakmolas Krakmolas/PCL PHA PBAT

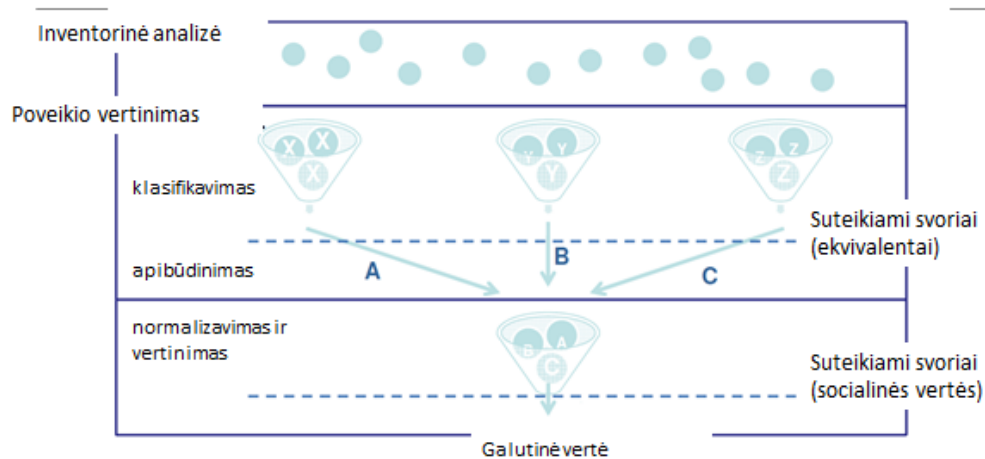
15 pav. Medžiagos, kurios biologiškai skaidomos keturių rūšių biologinio atliekų apdorojimo metu [75]

4.1.4. Produkto poveikio aplinkai būvio cikle vertinimo metodika

Atlikus inventorinę analizę, kiekybiškai analizuojamas ir palyginamas poveikis aplinkai, kurį sukelia ankstesnėje fazėje nustatytas medžiagų ir energijos poreikis bei susidarę išmetalai. Paprastai inventorinėje analizėje identifikuoti šaltiniai suklasifikuojami į tam tikras kategorijas (pvz., šiltnamio efektas, išteklių nykimas, ekotoksiškumas) ir kiekybiškai apskaičiuojamas šioms kategorijoms daromas potencialus poveikis (žr. 16 pav.).

Vadovaujantis „LST ISO 14040:2007“ standartu [73], poveikio aplinkai vertinimas susideda iš keturių etapų (žr. 13 pav.):

1. **klasifikavimas** – inventorinių duomenų priskyrimas poveikio kategorijoms;
2. **apibūdinimas arba charakterizavimas** – klasifikavimo duomenų apjungimas naudojant apibūdinimo ekvivalentus (charakterizavimo faktorius) įvertinamas inventorinio duomenų poveikio stiprumas konkrečiai poveikio kategorijai;
3. **normalizavimas** – procedūra reikalinga parodyti, koku mastu poveikio kategorija turi reikšmingą indėlį į bendras aplinkosaugos problemas. Normalizuoti rezultatai rodo aplinkosaugos problemų dydį. Normalizavimas yra išreiškiamas tiriamojo proceso ar medžiagos žala vienam žmogui (poveikio taškai (Pt)). Normalizuoti rezultatai visi gaunami vienodais vienetais ir tai leidžia lengviau juos palyginti tarpusavyje. Normalizavimas gali būti taikomas ir vidurio taško ir galutinio taško įvertinimams;
4. **grupavimas** – galimas duomenų apjungimas taikant svorinius koeficientus, galimas sujungimas į vieną aplinkos indeksą.



16 pav. Kiekybinio poveikio aplinkai vertinimo etapų eiga ir sąsajos

Būvio ciklo poveikio analize siekiama konvertuoti inventorinės analizės srautus į potencialų poveikį, vidurio vertinimo taškus (ang., midpoint) ir galutinio vertinimo taškus (ang., endpoint), pasekmes ar padarinius.

Šiame tyrime poveikio aplinkai vertinimui buvo naudojami metodai: “ReCiPe Endpoint (H) V1.11.”, “IPCC GWP 100a” ir “ReCiPe Midpoint (H) V1.11.”

ReCiPe Midpoint (H) V1.11 – 17 poveikio aplinkai kategorijų. Tačiau šiame darbe bus vertinamos atrinktos 7 kategorijos, darant prielaidą, kad jos geriausiai atspindi aktualiausias problematines vietas. Inventorinės analizės srautai konvertuojami į poveikio aplinkai indikatorius.

Toliau pateikiami poveikio aplinkai kategorijų aprašymai ir charakterizavimo veiksniai [77].

Klimato kaita. Būdingas klimato kaitos veiksnys yra pasaulinio atšilimo potencialas per 100 metų laikotarpį. Šis metodas remiasi Tarpyvyriausybines klimato kaitos komisijos (TKKK) 2013 m. 5 –ąja įvertinimo ataskaita. Matavimo vienetas yra kg anglies dioksido ekvivalento (kg CO₂^{eq}).

Sausumos ekotoksiškumas. Šis faktorius atspindi cheminės medžiagos toksiškumą ir išlikimą sausumoje. Matavimo vienetas yra kg 1,4-dichlorbenzeno (kg 1,4-DCB^{eq}).

Gėlo vandens ekotoksiškumas. Šis faktorius atspindi cheminės medžiagos toksiškumą ir išlikimą gėlame vandenyje. Matavimo vienetas yra kg 1,4-dichlorbenzeno (kg 1,4-DCB^{eq}).

Toksiškumas žmogui (kancerogeninis ir nekancerogeninis). Šis faktorius atspindi cheminės medžiagos toksiškumą ir kaupimąsi žmogaus maisto grandinėje. Matavimo vienetas yra kg 1,4-dichlorbenzeno (kg 1,4-DCB^{eq}).

Žemės naudojimas. Transformuotos ar tam tikrą laiką naudojamos žemės kiekis. Matavimo vienetas yra m² metinio derliaus ekvivalentai (m² a crop^{eq}).

Mineralinių išteklių trūkumas. Mineralinių išteklių trūkumą apibūdinantis veiksnys yra perteklinis rūdos potencialas. Matavimo vienetas yra kg vario (Cu) ekvivalentai (kg Cu^{eq}).

Iškastinių išteklių trūkumas. Iškastinių išteklių trūkumą apibūdinantis veiksnys yra iškastinio kuro potencialas, pagrįstas viršutine šilumingumo verte. Matavimo vienetas yra kg naftos ekvivalento (kg oil^{eq}).

ReCiPe Endpoint (H) V1.11 – 3 žalos kategorijos. Vidurio vertinimo taškų srautai konvertuojami į pasekmes ir padarinius. Apskaičiuojamas poveikis žmogaus sveikatai, ekosistemų kokybei ir ištekliams:

1. **poveikis žmogaus sveikatai** išreiškiamas kaip nenugyventas metų skaičius ir kaip negalios metų skaičius. Šie skaičiai sudaro vadinamąjį DALY indeksą – prisitaikymo prie negalios metai (Disability Adjusted Life Years). Apima tokias poveikio aplinkai kategorijas kaip toksiškumas žmogui, klimato kaitos potencialas, ozono sluoksnio plonėjimas, smogas ir t. t.
2. **žala ekosistemų kokybei** parodo rūšių išnykimą tam tikroje teritorijoje ir per tam tikrą laiko tarpą. Apima tokias poveikio aplinkai kategorijas kaip šiltnamio efektas, eutrofikacija, sausumos ekotoksiškumas ir t. t. (PDF m²/m);
3. **žala ištekliams** – tai papildoma energija, kurios reikės išgaunant mineralines medžiagas ir gamtinį kurą ateityje (darant prielaidą, kad metinė produkcija bus pastovi). Apima poveikio aplinkai kategorijas, tokias kaip mineralų, kuro iškasenų, atsinaujinančių ir neatsinaujinančių medžiagų išnaudojimas (kaina: 2000 US dolerių).

Galutinis indeksas (poveikio taškai) – vidurio ir galutinio vertinimo taškai gali būti apjungiami į vieną – suminį indikatorių – poveikio taškus (Pt). Žalos kategorijų apjungimas atliekamas remiantis prielaida, kad poveikis žmogaus sveikatai ir žala ekosistemoms yra vienodai svarbūs, tačiau dvigubai svarbesni už žalą ištekliams. Šiame tyrime poveikis aplinkai vertintas keliais lygiais (žr. 8 lentelė):

- pagal vieną galutinį indeksą, jungiantį visas poveikio aplinkai kategorijas – poveikio taškus; pateikiamas bendras poveikio taškų rezultatas ir poveikio taškai priskiriami kiekvienai poveikio aplinkai kategorijai;
- pagal poveikio aplinkai padarytas pasekmes ar padarinius – žalos kategorijas arba galutinius taškus;
- pagal poveikio aplinkai kategorijas, vidurinius taškus (midpoint) charakterizavimo rezultatus 7-iose poveikio aplinkai kategorijų.

8 lentelė. Poveikio aplinkai vertinimo lygiai: galutinis indeksas, žala aplinkai ir poveikio aplinkai kategorijos

Galutinis indeksas	Žalos kategorijos	Poveikio aplinkai kategorijos	Charakterizavimo rezultato matavimo vienetai
Poveikio taškai, Pt	Žala žmogaus sveikatai (DALY indeksas)	Klimato kaitos potencialas (poveikis žmogaus sveikatai)	kgCO ₂ ^{eq}
		Ozono sluoksnio retėjimas	kgCFC-11 ^{eq}
		Jonizuojančioji spinduliuotė	kBq Co-60 ^{eq}
		Fotocheminis ozono susidarymas	kg NO _x ^{eq}

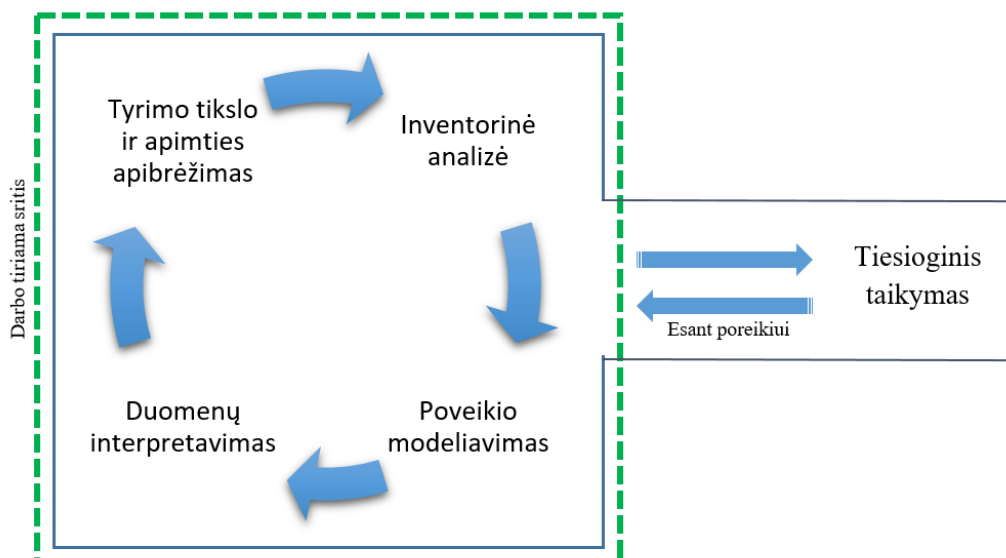
Galutinis indeksas	Žalos kategorijos	Poveikio aplinkai kategorijos	Charakterizavimo rezultato matavimo vienetai
Poveikio taškai, Pt	Žala žmogaus sveikatai (DALY indeksas)	Kietųjų dalelių susidarymas	kg PM _{2,5} ^{eq}
		Toksiškumas (kancerogeninis) žmonėms	kg 1,4-DB ^{eq}
		Toksiškumas (nekancerogeninis) žmonėms	kg 1,4-DB ^{eq}
		Vandens naudojimas (poveikis žmogaus sveikatai)	m ³
	Žala ekosistemų kokybei (Quality, PDF)	Klimato kaitos potencialas (sausumos ekosistemoms)	Kg CO ₂ ^{eq}
		Klimato kaitos potencialas (vandens ekosistemoms)	Kg CO ₂ ^{eq}
		Fotocheminis ozono susidarymas	kg NO _x ^{eq}
		Sausumos rūgštėjimas	kg SO ₂ ^{eq}
		Gėlo vandens eutrofikacija	kg P ^{eq}
		Jūros eutrofikacija	kg N ^{eq}
		Sausumos ekotoksiškumas	kg 1,4-DB ^{eq}
		Gėlo vandens ekotoksiškumas	kg 1,4-DB ^{eq}
		Jūrų ekotoksiškumas	kg 1,4-DB ^{eq}
		Žemės naudojimas	m ^{2a} crop ^{eq}
		Vandens naudojimas (poveikis sausumos ekosistemoms)	m ³
		Vandens naudojimas (poveikis vandens ekosistemoms)	m ³
	Žala ištekliams MJ	Mineralinių išteklių trūkumas	kg Cu ^{eq}
		Iškastinių išteklių trūkumas	kg oil ^{eq}

4.2. Socialinio būvio ciklo vertinimo metodika

Pagal UNEP išleistą gidą [78] „Socialinio būvio ciklo vertinimas (S-BCV) teikia informaciją apie socialinius ir socioekonominius sprendimų priėmimo aspektus, siekiant pagerinti organizacijos socialinius rezultatus ir galiausiai suinteresuotųjų šalių gerovę“. Šis metodas panašus į aptartą BCV dėl jam reikiamų duomenų ir naudojamos modeliavimo sistemos. Modeliuojant S-BCV taip pat naudojama „SimaPro 9.1“ programa, tačiau pasitelkiant kitą duomenų bazę: „Social hotspots (HS) database“. Tiksūs reikalavimai dar nėra išvystyti ir S-BCV yra modeliuojamas remiantis „LST EN ISO 14040:2006“ [72,79] pateiktomis gairėmis:

- tikslas ir tyrimo ribos;
- būvio ciklo inventorinė analizė;
- būvio ciklo poveikio vertinimas;
- interpretacija.

Kadangi šio tyrimo rezultatai nebus naudojami tiesiogiai, tyrimo ribos apsiriboja ties rizikos įvertinimu ir jos aptarimu (žr. 17 pav.):

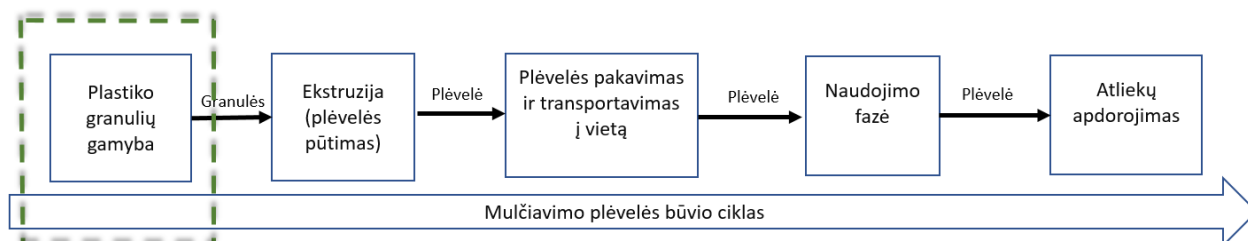


17 pav. Socialinio būvio ciklo vertinimo struktūra. Žaliai apibraukta šiame tyrime naudojama riba

4.2.1. Socialinio būvio ciklo vertinimo tikslai, funkcinis vienetas, ribos

Šis metodas naudojamas rasti problematines produktų ar paslaugų vietas, kurios kelia didžiausią riziką žmogui remiantis visa produkto gamyboje naudojamų žaliavų tiekimo grandine. Tačiau, metodika išvystyta tik gamybos procesams, nepritaikyta vertinti atliekų apdorojimo procesų, todėl šiuo metodu darbe vertinama nagrinėjamų skirtingų plastiko (PLA, LDPE ir PBAT) granulių gamybos procesų sukeltos socioekonominės rizikos. Siekiant geresnio suvokimo apie vietovės, kurioje išgaunama žaliava svarbą, tyrime lyginami 3 skirtingų šalių scenarijai (Lietuvos, Lenkijos, Kinijos) tiems patiems produktams, taikant prielaidą, jog sukuriama produkto vertė bus vienoda visuose nagrinėjamuose šalyse. Be to modeliuojamos tik sunaudojamos žaliavos, duomenų bazės kol kas nėra pritaikytos sunaudotos energijos poveikiui vertinti (žr. 18 pav.).

Naudojant SHSD (angl. Social Hot Spot Database) [104] duomenų bazę funkcinis vienetas yra paremtas pinigine ir masės reikšme, todėl šiame darbe **funkcinis vienetas**: reikiamas kiekis žaliavų pagaminti 1 t. granulių, žaliavų vertę išreiškiant „United States Dolar“ (USD) verte.



18 pav. Socialinio būvio ciklo vertinimo ribos (apibraukta žalia punktyrine linija) pavaizduotos BCV kontekste

4.2.2. Inventorinė analizė

Atliekant modeliavimus buvo nuspręsta atlikti palyginamąją analizę tarp 3 skirtingų plastiko granulių (PLA, LDPE ir PBAT), siekiant įvertinti jų sukeliamas socialines rizikas pagal tai, kurioje šalyje jos būtų gaminamos. Modeliavimu buvo pasirinktos 3 šalys: Lietuva (LT), Lenkija (PL) ir Kinija (CN). LT buvo pasirinkta dėl siekio įvertinti tokių granulių gamybos potencialias rizikas gaminant tokius produktus vietoje, PL pasirinkta kaip tikėtina tiekėjos alternatyva, kadangi šioje šalyje egzistuoja tiek plastiko, tiek mulčiavimui naudojamų plėvelių gamyba, o CN pasirinkta dėl šioje šalyje gausiai naudojamų ir gaminamų MP, kurios taip pat gali būti naudojamos ir Lietuvoje.

Remiantis LCA metodikoje pateiktais duomenimis apie granulių gamybai reikiamas medžiagas ir jų kiekius, naudojamų žaliavų kiekis buvo paverstas pinigine išraiška, remiantis šių žaliavų rinkos kaina 2017 m. Lietuvoje (USD 2017). Kadangi HS sukurta remiantis 2011 m. duomenimis, piniginę vertę reikėjo persiskaičiuoti į 2011 m. atitinkančias vertes. Todėl buvo priimta prielaida, jog nuo 2011 m. iki 2017 m. infliacija USD vertę sumažino 9 %, atitinkamai vertė buvo perskaičiuojama ją suamžinus 9 % (USD 2011). Įvedinius reikia priskirti pramonės sričiai, pagal „Global trade analysis project“ (GTAP) sukurtu kodu [80] (GTAP kategorija). Viskas buvo skaičiuota „Microsoft Excel“ programoje, duomenys apie nagrinėtas granules pateikti lentelėje (žr. 8 lentelė).

9 lentelė. S-BCV vertinimui naudoti duomenys vertinant PLA/LDPE ir PBAT granulių gamybą

Įvediniai (pagaminti 1t PLA granulių)	Kiekis (t)	Kilmės šalis	1 t. kaina (USD 2017)	Kaina (USD 2017)	Kaina (USD 2011)	GTAP kategorija
Kukurūzai	1.28	Lietuva	177	226.560	207.853	Other Grains
Sieros rūgštis (H ₂ SO ₄)	0.25	Lietuva	199	49.750	45.642	Manufacture of chemicals and chemical products
Azoto dujos	0.01	Lietuva	102	1.020	0.936	Manufacture of chemicals and chemical products
Natrio chloridas (NaCl)	0.11	Lietuva	30	3.300	3.028	Manufacture of chemicals and chemical products
Bauxites (aluminio druskos)	0.000006	Lietuva	80	0.000	0.000	Manufacture of chemicals and chemical products
Baritas (bario sulfatas)	0.001	Lietuva	80	0.080	0.073	Manufacture of chemicals and chemical products
Geležis	0.00033	Lietuva	622	0.205	0.188	Iron & Steel
Švinas	0.000002	Lietuva	622	0.001	0.001	Iron & Steel
Kalkakmenis (CaCO ₃)	0.79	Lietuva	3	2.370	2.174	Other Mining Extraction
Silikonas (SiO ₂)	0.01	Lietuva	37	0.370	0.339	Manufacture of chemicals and chemical products
Fosfatas (P ₂ O ₅)	0.01	Lietuva	340	3.400	3.119	Manufacture of chemicals and chemical products
Siera (elementinė)	0.01	Lietuva	60	0.600	0.550	Manufacture of chemicals and chemical products

Įvedinai (pagaminti 1t <u>PLA</u> granulių)	Kiekis (t)	Kilmės šalis	1 t. kaina (USD 2017)	Kaina (USD 2017)	Kaina (USD 2011)	GTAP kategorija
Dolomitas	0.000004	Lietuva	4	0.000	0.000	Other Mining Extraction
Olivine (šito nėra SimaPro)	0.000003	Lietuva	23900	0.072	0.066	Other Mining Extraction
Potassium chloride (KCL)	0.02	Lietuva	348	6.960	6.385	Manufacture of chemicals and chemical products
Kaolinas	0.02	Lietuva	186	3.720	3.413	Other Mining Extraction
Perdirbta geležis	0.0000067	Lietuva	622	0.004	0.004	Iron & Steel
Įvedinai (pagaminti 1t <u>LDPE</u> granulių)	Kiekis (t)	Kilmės šalis	1 t. kaina (USD 2017)	Kaina (USD 2017)	Kaina (USD 2011)	GTAP kategorija
Anglis	0.054	Lietuva	80	80.000	4.320	Coal
Nafta	1.272	Lietuva	345	345.000	438.840	Oil
Gamtinės dujos	0.35	Lietuva	293	293.000	102.550	Gas
Lignitas	0.06	Lietuva	78	78.000	4.680	Coal
Vanduo	1.22	Lietuva	0	0.000	0.000	Water supply
Įvedinai (pagaminti 1t <u>PBAT</u> granulių)	Kiekis (t)	Kilmės šalis	1 t. kaina (USD 2017)	Kaina (USD 2017)	Kaina (USD 2011)	GTAP kategorija
1,4-butanediolis	0.41	Lietuva	6695	6695.000	2744.950	Oil
Adipo rūgštis	0.37	Lietuva	1376	1376.000	509.120	Manufacture of chemicals and chemical products
Terephthalic acid	0.33	Lietuva	613	613.000	202.290	Oil
2,6-di-tret-butilfenolis	0.01	Lietuva	4780	4780.000	47.800	Oil

4.2.3. Granulių socialinis būvio ciklo vertinimas

Visu pirma vertinant S-BCV svarbu nustatyti iš kokios šalies ar regiono (pvz., Europos ir t. t.) atgabenami nagrinėjami komponentai, kadangi tai sukuria didelę įtaką rezultatams atspindint visuomeninius, politinius ir kultūrinius skirtumus potencialiai žalai.

Duomenys suvedami į „SimaPro 9.1“ programą naudojant HS duomenų bazę, kuri yra modulinio tipo ir į ją įeina pagrindiniai komponentai [86]:

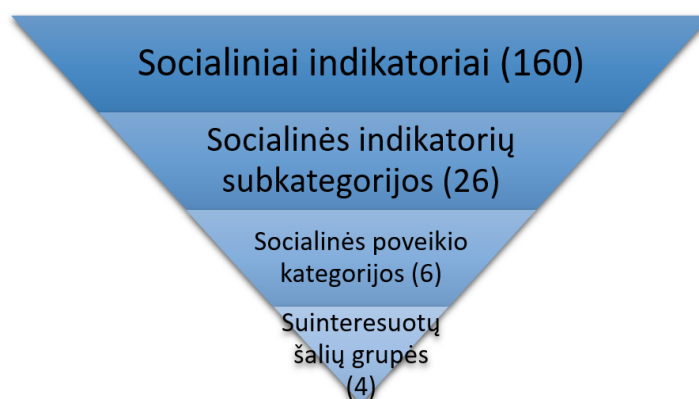
- informacija apie prekybos srautus tarp šalių arba suskirstytų pasaulio regionų;
- informacija apie ekonominio sektoriaus darbuotojų darbo valandas jas skaičiuojant remiantis sukuriama pinigine verte paversta į USD;

- informacija apie socialines rizikas ir galimybes kiekvienoje šalyje ir jo ekonomikos sektoriuje.

Todėl pasitelkus šią duomenų bazę identifikuojamos socialinės rizikos, jų karštieji taškai bei gali būti apskaičiuojamas socialinis pėdsakas.

Norint gauti minėtus rezultatus reikia surinktus ir pinigine verte perskaičiuotus duomenis suvesti pagal minėtas GTAP kategorijas, kurios kiekvieną produktą bendrine prasme priskiria prie jam taikomos industrijos šakos „GTAP koordinuoja Purdue universiteto Žemės ūkio ekonomikos katedros Pasaulinės prekybos analizės centras. Pagrindinis projekto palaikymas ir patarimai gaunami iš tarptautinių ir nacionalinių agentūrų iš viso pasaulio: PPO, ES JTC, Pasaulio bankas, JAV EPA ir t. t.“ [86].

HS duomenų bazė susideda iš informacijos siejamos su 160 indikatorių, kurie siejami su 26 subkategorijomis, 6 kategorijomis (dėl naudojamos HSDB rizika bus išreikšta 5 kategorijomis) ir 4 suinteresuotų šalių grupėmis: darbuotojai, vietinės bendruomenės, vertės grandinių dalyviai ir visuomenė (žr. 19 pav.) išreiškiant socialines rizikas ir galimybes vidutinėmis valandomis ekvivalentu kiekvienai šaliai, toks išsireiškimas leidžia paskaičiuoti socialinį pėdsaką ir identifikuoti problematines vietas.



19 pav. HS duomenų bazėje naudojamos indikatorių grupės [86]

S-BCV nėra apibrėžtas iki galo, jo koncepcija labai priklauso nuo pasirinkto modeliavimo ar duomenų bazių, tačiau pagrindinėmis sąvokomis laikomos [78]:

- **galimas socialinis poveikis** suprantamas kaip galimas socialinio poveikio buvimas, atsirandantis dėl veiklos/elgesio organizacijų, susijusių su produkto ar paslaugos gyvavimo ciklu ir paties produkto naudojimu;
- **socialinis pėdsakas**, tai galutinis S-BCV tyrimo rezultatas bendras arba pagal poveikio kategoriją ar subkategoriją;
- **socialinė „karštoji vieta“** suprantama kaip vieta ir (arba) veikla gyvavimo cikle, kur socialinė problema (kaip poveikis) ir (arba) socialinė rizika gali kilti.

Modeliuojant rezultatus pasirinkta nagrinėti 5 socialines poveikio kategorijas (žr. 10 lentelė), siekiant plačiau apžvelgti galimus socialinius poveikius.

10 lentelė. Socialines poveikio kategorijos ir jų socialines indikatorių subkategorijos [86,78]

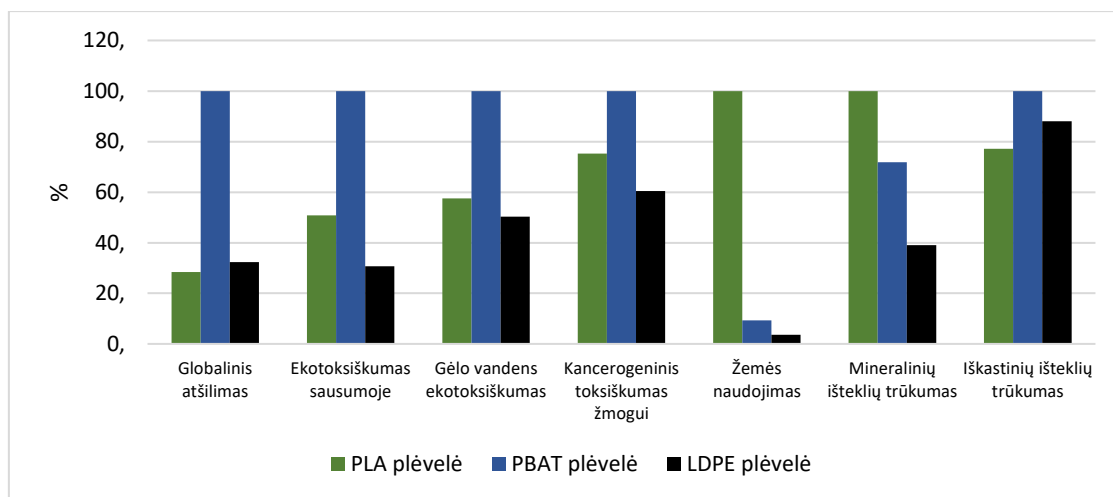
Kategorijos	Subkategorijos
Darbo teisės ir padorus darbas	Algos vertinimas 1. A
	Skurdas 1. B
	Vaikų darbas 1. C
	Priverstinis darbas 1. D
	Prailgintas darbo laikas 1. E
	Laisvė kurti asociacijas, kolektyvus, teisė streikuoti 1. F
	Migrantų darbas 1. G
	Socialinės naudos 1. H
	Darbo įstatymai/ konvencijos 1. I
	Diskriminacija 1. K
	Nedarbingumas 1. L
Sveikata ir saugumas	Profesinis toksiškumas ir kiti pavojai 2. A
	Susižalojimai ir mirtys 2. B
Žmogaus teisės	Vietinės teisės 3. A
	Lyčių lygybė 3. B
	Aukštos konfliktų tikimybės zonos 3. C
	Žmogaus sveikatos problemos, ligos ir kitos rizikos – neužkrečiamos 3. D
	Žmonių sveikatos problemos – užkrečiamos ligos 3. E
Valdžia	Teisinė sistema 4. A
	Korupcija 4. B
Visuomenė	Prieiga prie pagerinto geriamo vandens 5. A
	Prieiga prie pagerintos higienos 5. B
	Vaikai praleidžiantys mokyklą 5. C
	Prieiga prie ligoninės lovos 5. D
	Maži prieš didelius verslus (tik agrokultūroj) 5. E

5. Rezultatai

5.1. Aplinkosauginis būvio ciklo vertinimas

5.1.1. Granulių gamybos būvio ciklo vertinimo rezultatai

Tyrimo metu buvo modeliuojami scenarijai gaminant 3 skirtingų rūšių plastiko granules (PLA, PBAT ir LDPE) gauti rezultatai pavaizduoti juos tarpusavyje vertinant charakterizacijos būdu 7-iose skirtingose poveikio kategorijose. Kategorijos pasirinktos remiantis literatūroje nagrinėtomis kategorijomis ir siekiant atspindėti aktualiausias temas siejamas su šių medžiagų gamyba.

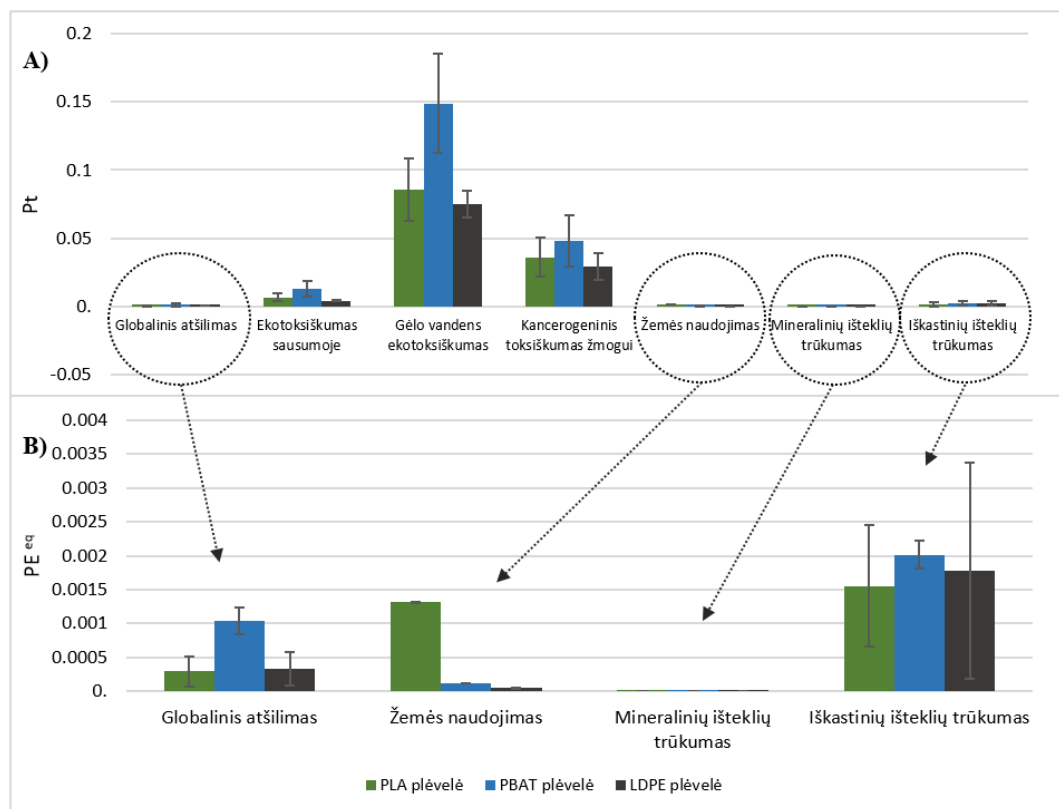


20 pav. Plastiko granulių gamybos procesų poveikis aplinkai įvertintas naudojant „Recipe 2016 Midpoint (H) V1.04” metodiką, vertinant charakterizavimas

Gauti rezultatai parodė, jog gaminamos PBAT granulės pasižymi didžiausiu poveikiu net penkiuose iš septynių poveikių kategorijų, PLA granulės lyginant su kitomis, siejamos su galimu didžiausiu poveikiu žemės naudojimo ir mineralinių išteklių trūkumo poveikio kategorijomis, o LDPE didžiausią poveikį sukuria iškastinių išteklių mažėjime (žr. 20 pav.)

Vertinant globalinį atšilimą didžiausią potencialų poveikį sukuria PBAT granulių gamyba (100 %), tuo tarpu net 3,5 karto mažesnę poveikį sukuria PLA gamyba ir 3 kartus mažesnę poveikį LDPE granulių gamyba. Ekotoksiškumas sausumoje parodė, jog PLA turi 1,96 karto mažesnę poveikį sausumos ekosistemoms, lyginant su PBAT, tačiau LDPE net 3,2 kartus mažesnę poveikį. Gėlo vandens toksiškumas pasižymi panašiomis proporcijomis rodančiomis beveik 2 kartais mažesnę įtaką PLA ir LDPE granulių, nei PBAT. Vienas iš mažiausių skirtumų gautas kancerogeninio toksiškumo žmogui vertinime, kur PBAT pasiekus didžiausią vertę PLA sukuria tik 1,33 karto mažesnę poveikį, o LDPE 1,7 karto mažesnę poveikį. Tačiau žemės naudojimas įvardijamas kaip PLA problematinė vieta, kadangi PBAT ir LDPE šio poveikio vertinime sukuria 10,8 ir 28,5 karto mažesnius pėdsakus lyginant su PLA. Mineralinių išteklių trūkumas irgi parodė, jog PLA granulių gamyba yra atsakinga už didžiausią poveikį šioje srityje, nors PBAT sukuria tik 1,4 karto mažesnę poveikį, lyginant su PLA, tačiau LDPE atsakingas už mažiausią poveikį šioje srityje (skiriasi net 2,6 karto nuo aukščiausios vertės). Iškastinių išteklių mažėjimas siejamas su visomis 3 granulių rūšimis, net ir su PLA, kuris traktuojamas kaip iš biologiškos kilmės medžiagų pagamintas plastikas [60,61,85], pastarasis nuo didžiausią potencialų poveikį turinčios PBAT gamybos skiriasi vos 1,3 karto, o PBAT vos 1,14 karto (žr.20 pav.)

Tačiau svarbiau duomenis suvokti ne tik lyginant granules tarpusavyje, bet ir akcentuojant poveikio sritis, kurios prognozuojamos būti paveiktos stipriausiai iš visų. Tokio tipo duomenys atsispindi atliktoje duomenų apie granulių gamybą normalizacijoje (žr. 21 pav.)



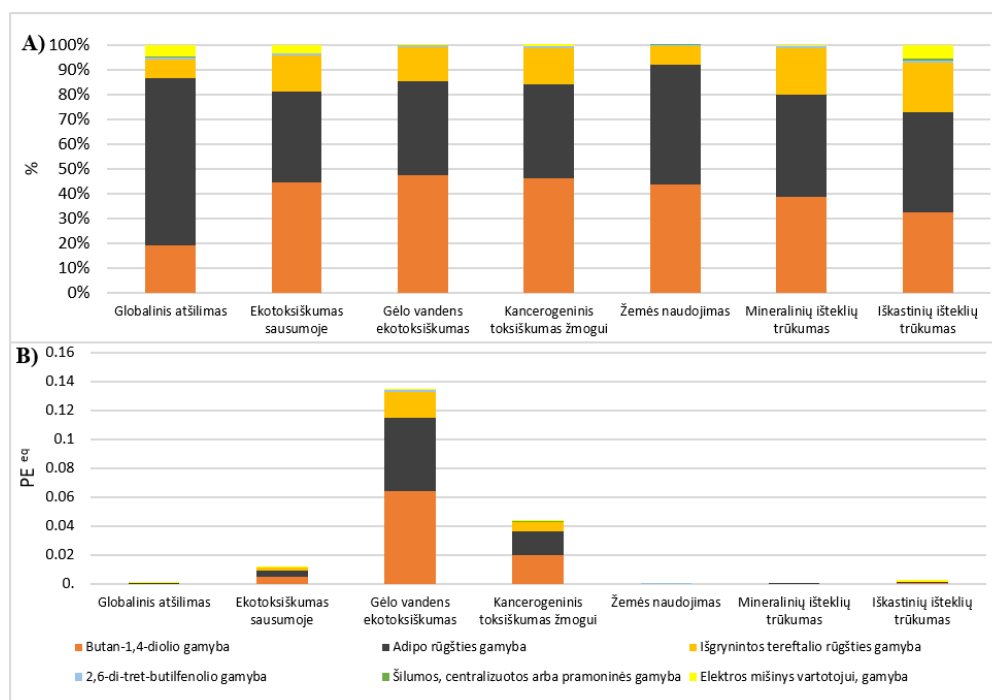
21 pav. Plastiko granulių gamybos procesų poveikis aplinkai įvertintas naudojant „Recipe 2016 Midpoint (H) V1.04“ metodiką, duomenys po normalizacijos: (A) granulių gamybos poveikis aplinkai pasirinktuose 7 poveikio kategorijose (Pt); (B) granulių gamybos poveikis aplinkai pasirinktuose 4 poveikio kategorijose (PE^{eq})

Normalizavus tų pačių poveikio kategorijų duomenis gauti rezultatai parodė, jog didžiausias poveikis gali būti siejamas su gėlo vandens ekotoksiškumu ir kancerogeniniu toksiškumu žmogui (pavaizduota A diagramoje) (žr. 21 pav.). Didžiausias poveikis abiejuose šiuose skiltyse priskirtas PBAT granulių gamybai. PBAT granulių gamyba sukuria net 1,9 karto didesnę riziką lyginant su PLA ir net 2,1 karto didesnę reikšmę lyginant su LDPE. Rizikos santykis išsilaiko panašus ir su kancerogeniniu žmogaus toksiškumu, tačiau ši poveikis siejamas su bendrąja prasme mažesniu poveikiu. Likusios poveikio sritys nekelia didelio susirūpinimo dėl jų numatomo mažo indėlio į poveikį aplinkai ir tokios poveikio sritys kaip „žemės naudojimas“ ir „mineralinių išteklių trūkumas“, kuriuos parodė didžiausias reikšmes siejamas su PLA gamyba lyginant su didžiausią įtaką prognozuojančiomis sritimis nesukuria didelio galimo poveikio (žr. 21 pav.)

Granulių gamyba susideda iš įvairių medžiagų ir procesų, todėl siekiant labiau išsiginčyti ir suprasti iš kur atsiranda jų gamybos poveikis vienai ar kitai nagrinėjamai poveikio sričiai gamyba buvo panagrinėta detalčiau, atvaizduojant pagrindinius 6 įvedinius sukeliančius didžiausią aplinkosauginę riziką nagrinėjamo produkto gamyboje.

Visu pirma buvo sumodeliuotas PBAT granulių gamybos procesas, kuriame išryškėjo 3 pagrindiniai indėlių į gaminio potencialų poveikį aplinkai turintys įvediniai (žr. 22 pav.): Butan-1,4-diolio gamyba,

adipo rūgšties gamyba ir išgrynintos tereftalato rūgšties gamyba. Pagal charakterizacijos duomenis (A) Butan-1,4-diolio gamyba ir adipo rūgšties gamyba atsakingos už ~ 85 % sukuriamo poveikio.



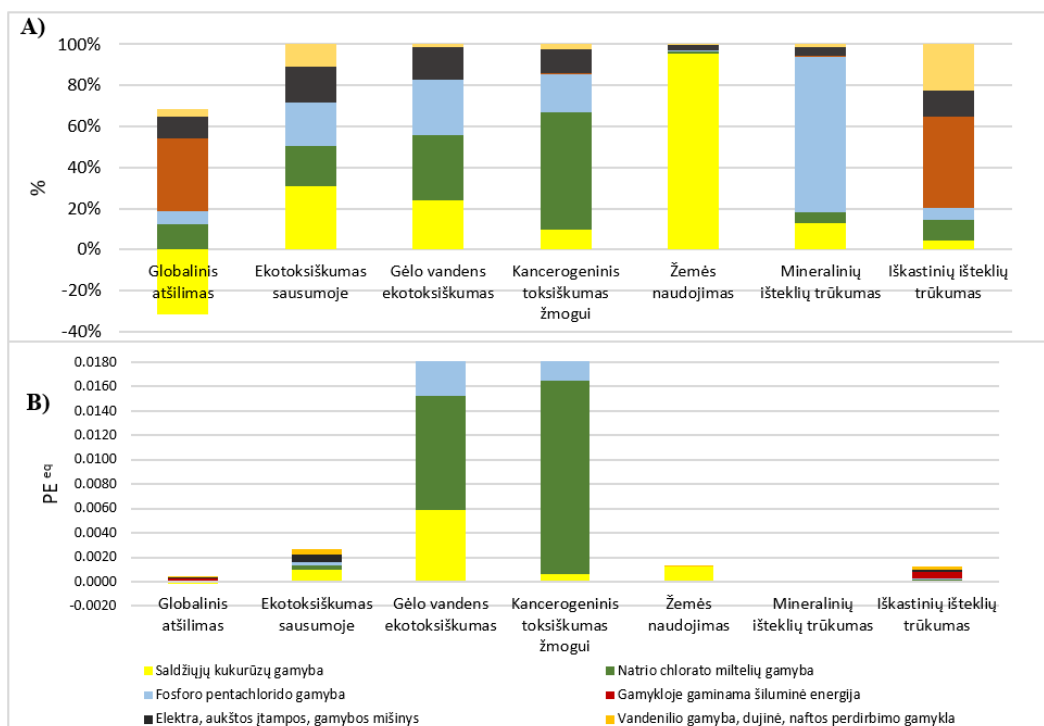
22 pav. 1 kg PBAT granulių su UV stabilizatoriumi gamybos poveikio aplinkai vertinimas naudojant metodą: „ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04“: (A) Charakterizacija (%); (B) normalizacija (PE*year)

Tačiau atlikus normalizaciją (B), jau prieš tai minėtos „gėlo vandens ekotoksiškumo“ ir „kancerogeninio toksiškumo žmonėms“ kategorijos siejamos su didžiausiu potencialiu poveikiu parodė, jog didžiausią įtaką šiose kategorijose sugeneruoja Butan-1,4-diolio gamyba ir vos 1,3 karto mažesnę įtaką sukuria adipo rūgšties gamyba (žr. 22 pav.). Pastarųjų medžiagų gamyboje didžiausią įtakos dalį sukuria procesams reikiamos energijos kiekis bei iš naftos gaminamos žaliavos (šie duomenys neatsispindi grafikuose, tačiau pastebėti gilinantis į šiuos procesus smulkiau).

Atlikus išsamesnius modeliavimus su PLA granulių gamyba charakterizacijos duomenimis (A) (žr. 22 pav.) daugiausiai indelio į potencialų aplinkos poveikį sukuria saldžiųjų kukurūzų auginimas, fosforo pentachlorido gamyba ir natrio chloratų miltelių gamyba. Gamykloje gaminama ir naudojama šiluminė energija taip pat parodė sąlyginai didelį indelį į globalaus atšilimo ir iškastinių išteklių trūkumo indikatorius (žr. 22 pav.), manoma, kad tokie gauti duomenys parodo PLA granulių gamyboje tiesiogiai naudojamos energijos problematiką dėl lyginant su PBAT ir LDPE didžiausio energijos poreikio (žr. 3 lentelė). Panaši problematika buvo pastebėta ir kitų autorių tyrimuose ir nurodyta, jog naudojamos energijos generavimas yra labai svarbus vertinant PLA BCV principu ir nurodė, jog pakeitus tradicinius elektros šaltinius į 100 % atsinaujinančius PLA žaliavos gamybos poveikis aplinkai gali sumažėti net iki kelių kartų [101].

Fosforo pentachlorido gamyba labiausiai prisideda tik prie mineralinių išteklių trūkumo indikatorius, o saldžiųjų kukurūzų auginimas prie žemės naudojimo indikatorius. Natrio chlorato miltelių gamyba labiausiai prisideda prie poveikio aplinkai rizikos sukeliant kancerogeninį toksiškumą ir gėlo vandens ekotoksiškumą, nors pagal charakterizaciją jo indėlis siejamas su šiais indikatoriais siekia tik 55 % ir 28 % atitinkamai, atlikus duomenų normalizaciją būtent šios dvi

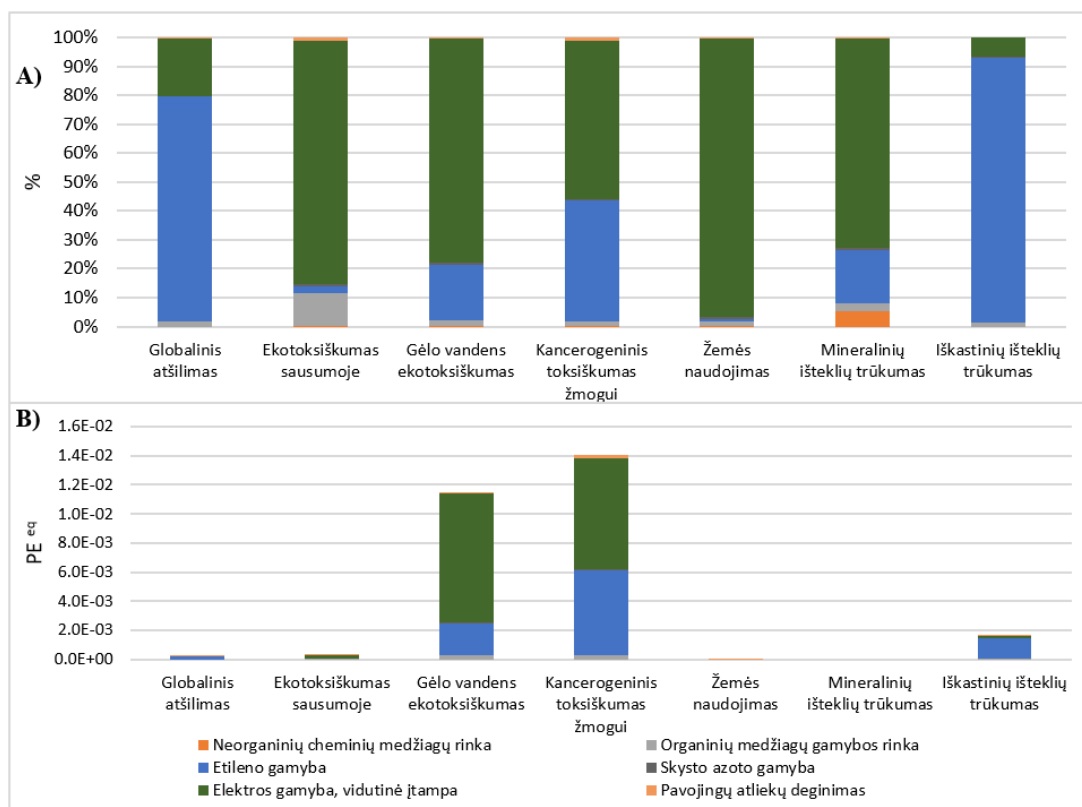
poveikio kategorijos yra atsakingos už didžiausią potencialią žalą (žr. 23 pav.), todėl PLA granulių gamyboje naudojamas natrio chloratas gali būti atsakingas už didžiąją dalį poveikio aplinkai siejamo su toksiškumu gėlam vandeniui ir žmonėms.



23 pav. 1 kg PLA granulių gamybos poveikio aplinkai vertinimas naudojant metodą: „ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04“: (A) Charakterizacija (%); (B) normalizacija (PE*year)

Išsamiau nagrinėjant LDPE granulių potencialų poveikį aplinkai rezultatai parodė, kad didžiausią dalį šio proceso galimo sukelti neigiamo poveikio sukuriama dėl elektros energijos gamybos (tiksliau el. en. sunaudojamas kiekis gaminant granules) ir etileno gamyba (žr. A dalis 24 pav.). Pastaroji didžiausią įtaką turi iškastinių išteklių trūkumo ir globalinio atšilimo srityse sugeneruojant 91 % ir 76 % bendro poveikio atitinkamai. Tačiau naudojamas elektros energijos kiekis granulių gamyboje yra pagrindinis įvedinys sukuriantis didžiausią įtaką likusiuose penkiuose poveikio srityse, sukuriant poveikį nuo 54 % kancerogeninio toksiškumo žmogui rizikos iki 96 % visos rizikos siejamos su žemės naudojimu (žr. 24 pav.).

Tačiau atlikus normalizaciją (žr. B dalis 24 pav.), jau prieš tai minėtos „gėlo vandens ekotoksiškumo“ ir „kancerogeninio toksiškumo žmonėms“ kategorijos siejamos su didžiausiu potencialiu poveikiu parodė, jog didžiausią įtaką šiose kategorijose sugeneruoja minėti įvediniai, tačiau elektros energija gėlo vandens ekotoksiškumui galimai turi net 4 kartus didesnę įtaką, nei etileno gamyba, tačiau toksiškumas žmonėms rodo aukštą potencialą tiek elektros gamybos, tiek etileno gamybos procesų, pastarasis skiriasi tik 1,18 karto (žr. 24 pav.). Todėl minėti du procesai kelia didžiausias aplinkosauginio poveikio rizikas siejamas su LDPE granulių gamyba.



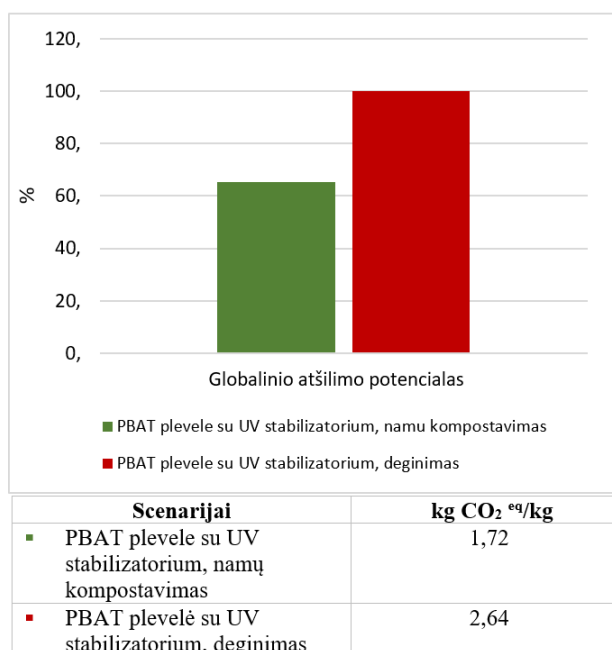
24 pav. 1 kg LDPE granulių gamybos poveikio aplinkai vertinimas naudojant metodą: „ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04“ : (A) Charakterizacija (%); (B) normalizacija (PE*year)

5.1.2. Atliekų tvarkymo scenarijų būvio ciklo vertinimo rezultatai

Atliekant modeliavimus buvo nuspręsta panagrinėti kelis galimus atliekų tvarkymo scenarijus, globalinio atšilimo potencialo kontekste, kiekvienai plėvelei, atsižvelgiant į literatūroje aptartus šių ir panašių atliekų galimus tvarkymo būdus.

Visu pirma buvo sumodeliuoti du galimi ir tikėtiniausi plėvelės pagamintos iš PBAT atliekų tvarkymo scenarijai: namų kompostavimas ir deginimas (anaerobinis skaidymas ar perdirbimas šio tipo plėvelei įvardijami kaip netaikomi ar neįmanomi). Ši plėvelė yra vienintelė iš nagrinėjamų, kuri gali būti paliekama suirti pačiame dirvožemyje, kadangi numatomas irimo laikas sąlyginai neilgas (70 % medžiagos suyra per 50-60 d. [75]). Gauti rezultatai parodė, jog pasirinkus šios plėvelės namų kompostavimą galima tikėtis 1,54 karto mažesnio neigiamo poveikio aplinkai, lyginant su šių plėvelių deginimu (uždaras) (žr. 25 pav.)

PBAT plėvelės kompostavimas namų sąlygomis nereikštų 100 % šios medžiagos suyrimo, visu pirma, kadangi šiame modeliavime naudojamas PBAT priedas „Irganox 1010“ nėra biologiškai skaidus ir suirus plastikui tiesiog lieka dirvožemyje, galimai prisidedamas prie neigiamo poveikio aplinkai, be to, kompostuojamas PBAT suskyla ir į organinės kilmės lukutinį kompostą, kuris prilyginamas durpių frakcijai, kurioje tikimasi, jog gali būti užfiksuota dalis anglies ir azoto, kurie į aplinką pasklis tik per ilgą laiką, be to, susidarančių dujų keikis ir sudėtis gali stipriai skirtis dėl kompostavimo sąlygų (oro temperatūra, drėgmė ir t. t.). Kitaip tariant PBAT plėvelės namų kompostavimas gali prisidėti prie dirvožemio gerinimo anglimi ir azotu, tačiau dėl naudojamų priedų ir irimo metu išskiriamų dujų neigiamo poveikio aplinkai tikimybė vis tiek išlieka [75,82].



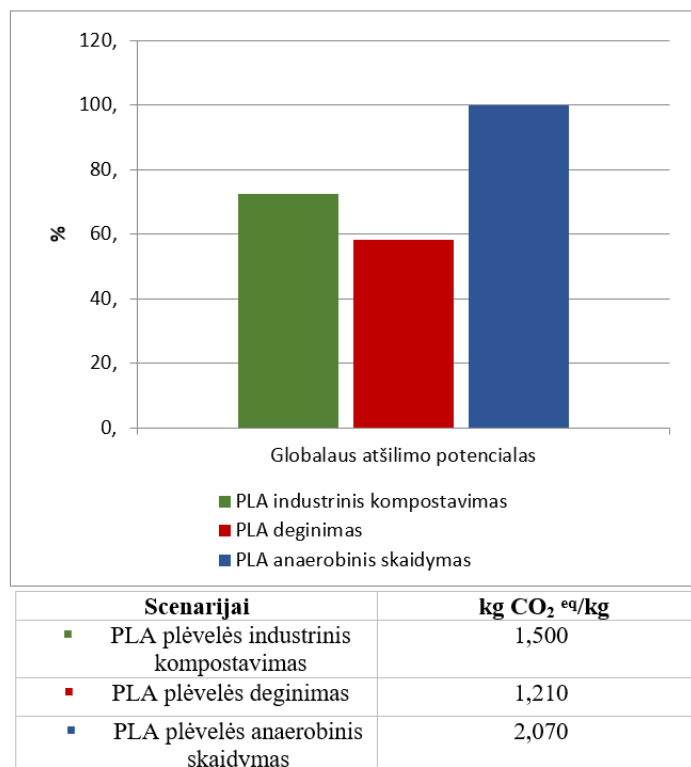
25 pav. 1 kg PBAT plėvelės su UV stabilizatoriumi atliekų apdorojimo poveikio aplinkai vertinimo rezultatai naudojant metodą: „IPCC GWP 100a“, Charakterizacija (%) pavaizduota grafike ir (kg CO₂ ^{eq}/kg) lentelėje

PBAT plėvelės deginimo scenarijus parodė didesnę galimą įtaką aplinkai (žr. 25 pav.), kadangi PBAT pasižymi didžiausiu kaloringumu (50 MJ/kg) iš visų nagrinėjamų plėvelių ir nors jį deginant išsiskirs didelis kiekis energijos, kurią bus galima panaudoti, tuo pačiu tikimasi, kad į atmosferą bus išmetamas didesnis kiekis šiltnamio dujų, taip pat šiam procesui prisiūmuotas reikiamas kuro kiekis atgabenti šią atlieką į deginimo įrenginius (žr. 7 lentelė), kai tuo tarpu paliekant plėvelė namų kompostavime jos tolimas gabenimas nebūtų reikalingas.

Plėvelės pagamintos iš PLA, kelia diskusijų dėl jų gebėjimo biodegraduoti ir nors vienur tokio tipo plėvelė pristatoma, kaip biodegraduojanti [60,61,75,85], į atliekų apdorojimą orientuotus tyrimus atlikę Hermn’as D. G., Debeet L., Wildie D., Blok k. ir Patel K. M. [75] gaminius iš PLA įvardino kaip namų kompostavimui netinkamus, tačiau buvo aptartas industrinis kompostavimas, anaerobinis skaidymas ir deginimas, todėl ir šiame tyrime buvo modeliuojami šie galimi atliekų scenarijai (žr. 26 pav.).

Gauti rezultatai parodė, jog PLA deginimo scenarijus turi mažiausią neigiamo poveikio riziką (1,7 karto mažesnę nei anaerobinio skaidymo ar 1,4 nei industrinio kompostavimo scenarijai), o anaerobinio skaidymo būdu apdorotos atliekos parodė didžiausią galimą poveikį (žr. 26 pav.). Manoma jog tokie rezultatai gauti modeliuojant deginimo scenarijų, dėl PLA mažo kaloringumo, kuris buvo siejamas su generuojamų išlaku kiekiu, nors ir sugeneruojamas energijos kiekis taip pat buvo mažesnis, kontroliuojamas tokios atliekos deginimas gali turėti sąlyginai mažesnę poveikį aplinkai. Lyginant su kitų autorių atliktais tyrimais deginimo scenarijus taip pat nepasižymi dideliu sugeneruojamu poveikiu siekiančiu 0,8-1,8 kg CO₂ ^{eq} [75,83,84], tačiau mažiausią galimą poveikį įvertinę autoriai, į išvengtus produktus skaičiavo reikiamų trąšų sumažėjimą [75], kai tuo tarpu kiti autoriai įvardija PLA kaip galintį suirti į kompostą tačiau komposte tik anglį paliekanti procesą [74], kuo buvo vadovaujamosi atliekant šiuos tyrimus.

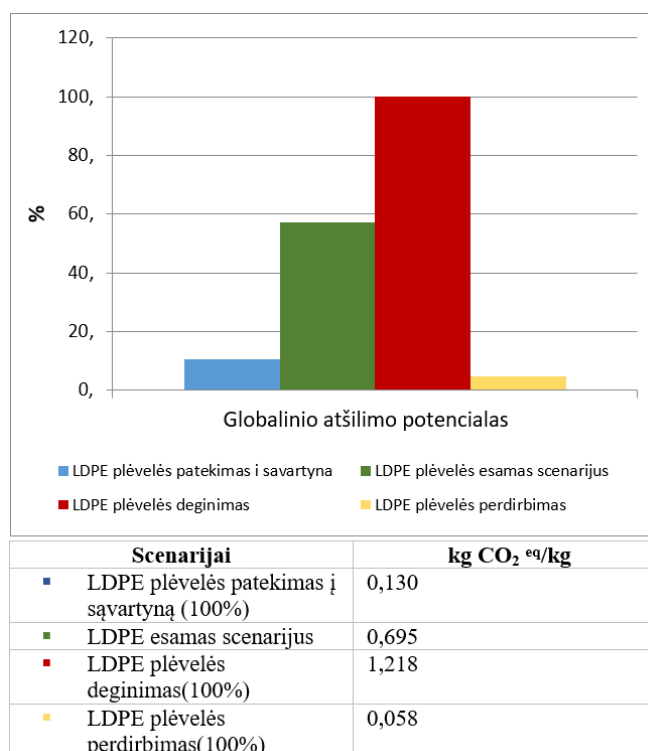
Anaerobinis (pramoninis surenkant dujas) skaidymas šiame darbe atlikto tyrimo metu parodė didžiausią globalinio atšilimo potencialą, šie rezultatai lyginant su kitų autorių atliktais tyrimais taip pat parodė bendrą tendenciją, kad toks atliekų apdorojimas (neįtraukiant perdirbimo ir patekimo į sąvartyną) gali būti atsakingas už didžiausią poveikį ir siekti 1,4-2,1 kg CO₂ eq [75,83], manoma, kad su šiuo atliekų apdorojimo scenarijumi siejama rizika atsiranda dėl padidinto metano išsiskyrimo, jo deginimo produktų, pats procesas reikalauja temperatūros palaikymo ir kitų procesų, taip pat reikalaujančių papildomo energijos kiekio [75].



26 pav. 1 kg PLA plėvelės atliekų apdorojimo poveikio aplinkai vertinimo rezultatai naudojant metodą: „IPCC GWP 100a“, Charakterizacija (%) pavaizduota grafike ir (kg CO₂ eq/kg) lentelėje

Taip pat šiame darbe buvo vertinta industrinio (aerobinio) kompostavimo galimybę, šis procesas parodė galimybę sugeneruoti 1,5 kg CO₂ eq (nagrinėtoje literatūroje šis rodiklis siekė 1,47-1,5 kg CO₂ eq [75,83]), šis poveikis galimai atsirado, kadangi atliekų apdorojimo metu sugeneruotos dujos ar esamas kaloringumas, nėra panaudojamas energijos gamybai, kaip naudingas išvedinys yra gaunamas tik kompostas, tačiau ir pastarasis savyje laiko tik nedidelius kiekius anglies (žr. 4 lentelė), toks kompostas negali būti siejamas su reikiamų trąšų pakaitalu (negalima modeliuojant įtraukti išvengiamų trąšų kiekio) [74], todėl dėl degradacijos procesų ir sukuriama menkaverčio komposto, kuris turi mažą teigiamą indelį į bendrą kg CO₂ eq pėdsaką, šis procesas gali sugeneruoti didesnę poveikį nei deginimas.

Galiausiai buvo įvertinti 3 galimi ir vienas esamas (pagal Europos statistiką) LDPE plėvelės tvarkymo kaip atliekos scenarijus (žr. 27 pav.). Didžiausią numatomą poveikį sugeneruoja deginimo scenarijus, net įvertinus papildomai sugeneruojamą energijos kiekį, šis scenarijus sugeneruoja didesnę taršos riziką 1,75 karto lyginant su dabartiniu scenarijumi, net 9,3 karto lyginant su patekimo į sąvartyną scenarijumi ir net 20,8 karto didesnę poveikį lyginant su perdirbimo scenarijumi.



27 pav. 1 kg LDPE plėvelės atliekų apdorojimo poveikio aplinkai vertinimo rezultatai naudojant metodą: „IPCC GWP 100a“, Charakterizacija (%) pavaizduota grafike ir (kg CO₂ ^{eq}/kg) lentelėje

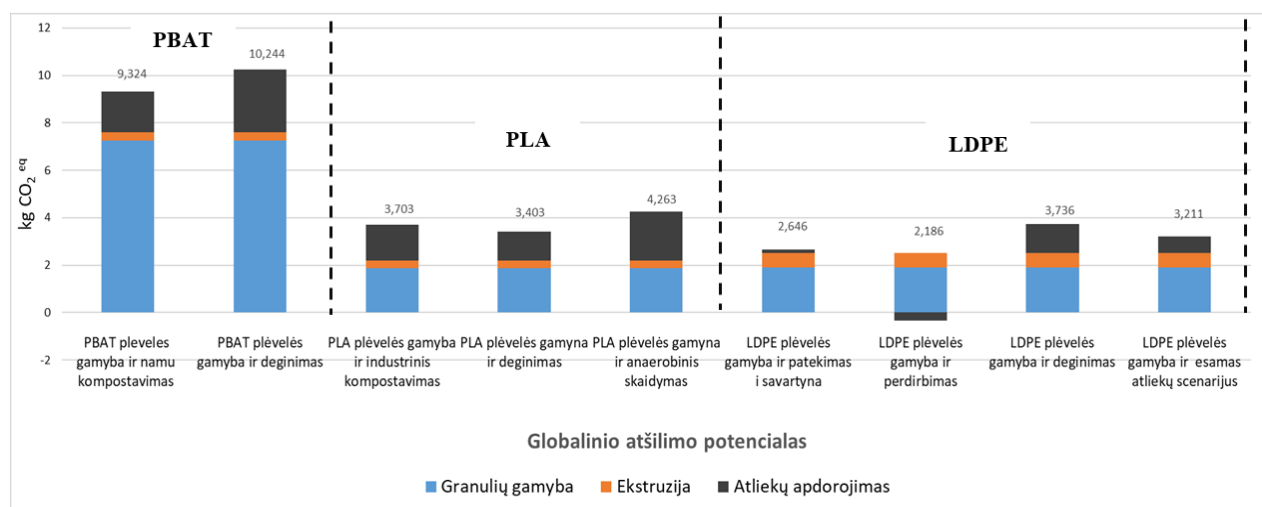
Modeliuojant deginimo scenarijų duomenys buvo imti iš naudotos duomenų bazės, atminusuojant pagamintos energijos kiekius. LDPE plastikas gaminamas naftos pagrindu todėl degdamas išskiria nenatūralios kilmės teršalus (CO₂, CH₄ ir t. t.), kaip patį didžiausią galimą poveikį sukeliantis scenarijus LDPE deginimas įvardintas ir kituose tokio pobūdžio tyrimuose, čia jis siekė 1,435 kg CO₂ ^{eq} ribas [84] taip pat naudojant „Ecoinvent“ duomenų bazę. Esamas plėvelės tvarkymo scenarijus susideda ir perdirbimo, patekimo į sąvartyną, perdirbimo, atviro ir uždaro deginimo, kadangi didelė dalis yra vis dar priskiriama kontroliuojamam (uždaram) deginimui (45 %) ir atviram deginimui (4 %) (žr. 27 pav.), šio scenarijaus poveikis didesnis lyginant su kitų, išskyrus deginimą.

Vieną mažiausių poveikių sugeneruoja LDPE plėvelės patekimas į sąvartyną (vos 0,130 kg CO₂) nors šis atliekų tvarkymo būdas nėra siejamas su gera praktika, tačiau vertinant jį pagal sugeneruojamą kg CO₂ ^{eq} gaunami maži rezultatai dėl plastiko labai lėto irimo sąvartynuose, modelis numato, kad per 100 metų suirs vos 1% šios žaliavos, kitas tyrimas atliktas tai panaudojant „Ecoinvent“ duomenis taip pat parodė, jog šis scenarijus sugeneruoja sąlyginai mažas emisijas [84]. Mažiausias tikėtinas poveikis aplinkas numatomas tokias atliekas perdirbant (žr. 27 pav.)

5.1.3. Pilnas mulčiavimui skirtos plėvelės būvio ciklo vertinimas

Siekiant visus gautus rezultatus sujungti į viena bendrą poveikį viso vertinto būvio ciklo požiūriu, nagrinėti procesai (granulių gamyba, plėvelės gamyba (ekstuzijos būdu) ir plėvelės kaip atliekos

apdorojimas) buvo sujungti į bendrą grafiką ir perskaičiuoti naudojant „IPCC GWP 100 a“ metodą parodantį potencialų poveikį aplinkai išreikštą $\text{kg CO}_2^{\text{eq}}$ (žr. 28 pav.)



28 pav. LDPE/PLA/PBAT plėvelių poveikio aplinkai vertinimo rezultatai naudojant metodą: „IPCC GWP 100a, $\text{kg CO}_2^{\text{eq}}$ “

Gauti rezultatai rodo, jog didžiausia aplinkosauginė rizika visų plėvelių nagrinėjamame būvio cikle yra siejama su granulių gamyba. Granulių gamyba, visuose nagrinėtuose scenarijuose, sudaro ne mažiau 50 % visos sukuriamos rizikos. Antras pagal svarbumą procesas yra pasirinktas atliekų apdoravimo būdas, kuris būvio cikle atsako nuo -4 iki iki 28 % viso bendro gaminio sugeneruojamo poveikio, o ekstruzija vos 4-6 % (žr. 28 pav.)

Iš PBAT plastiko gaminamos plėvelės, lyginant su kitomis nagrinėtomis, sukuria didžiausią potencialų poveikį aplinkai atitinkamai siekiantį 9,324-10,244 $\text{kg CO}_2^{\text{eq}}$, priklausomai nuo pasirinkto atliekų apdoravimo būdo (žr. 28 pav.). Deginimas siejamas su didesne aplinkosaugine rizika nei šių atliekų namų kompostavimas, tačiau dėl didelės granulių gamybos įtakos pasirenkamas atliekų apdoravimo scenarijus neparodė didelės reikšmės šiame procese.

Iš PLA plastiko gaminamos plėvelės parodė vidutiniškai 2,6 karto mažesnę galimą poveikį aplinkai lyginant su PBAT, tačiau vidutiniškai 1,3 karto didesnę poveikį lyginant su LDPE scenarijais. PLA būvio cikle reikšmingą poveikio dalį sudaro ne tik granulių gamyba, bet ir atliekų apdorojimas. Ir buvo nustatyta, jog PLA atliekų deginimas siejamas su mažiausia rizika aplinkai, lyginant su kitais nagrinėtais būdais.

Iš LDPE plastiko gaminamos plėvelės būvio ciklo vertinimas parodė mažiausią galimą poveikį, jeigu plėvelės gyvavimo ciklo pabaigoje apdoramos perdirbimo ar šalinimo į sąvartyną būdu (žr. 24 pav.), tačiau, priešingai nei PLA, šių plėvelių deginimo scenarijus siejamas su didžiausiu galimu poveikiu aplinkai renkantis LDPE plėveles.

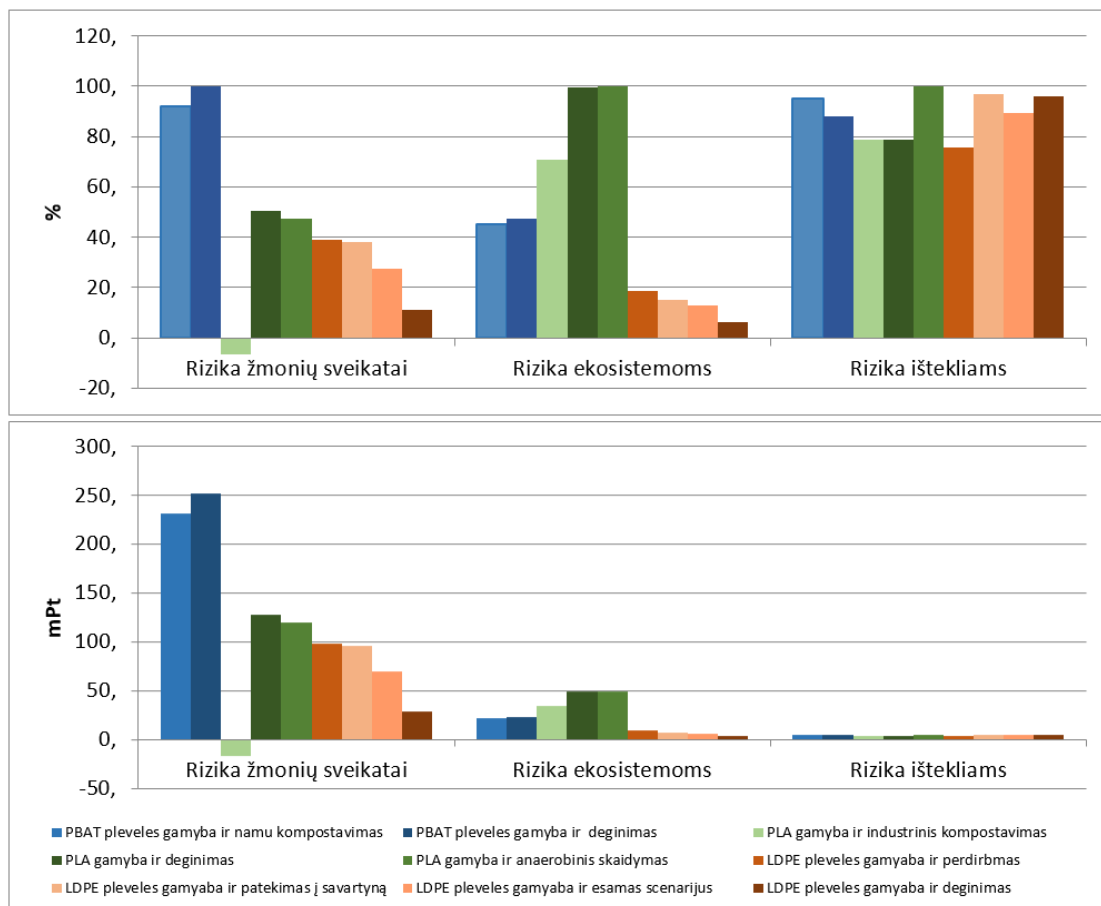
Todėl vertinant būvio ciklą „IPCC GWP 100 a“ metodu gauti rezultatai rodo, jog geriausias pasirinkimo variantas aplinkosauginiu požiūriu turėtų būti (žr. 28 pav.):

- LDPE plėvelė, gaminta ekstruzijos būdu ir gyvavimo pabaigoje nukreipiama į perdirbimą.

O blogiausias variantas, vertinant aplinkosauginiu požiūriu turėtų būti:

- PBAT plėvelė, pagaminta ekstruzijos būdu ir gyvavimo pabaigoje patekusi į atliekų deginimą.

Tačiau siekiant labiau išsiginėti į nagrinėjamų plėvelių sukeltą poveikį, visi nagrinėti scenarijai buvo palyginti juos vertinant su „ReCiPe Endpoint (H) V1.11“ metodu vertinant 3 žalos kategorijas: rizika žmonių sveikatai, rizika ekosistemoms ir rizika ištekliams.



29 pav. Palyginamasis mulčiavimui naudojamos plėvelės gamybos būvio ciklo vertinimas (įtraukiant granulių gamybą, ekstruziją ir atliekų tvarkymo procesus) įvertinta naudojant metodą: „ReCiPe 2016 Endpoint (H) V.1,04“, (A) žalos įvertinimas (%); (B) svėrimas (mPt)

Visu pirma buvo atliktas žalos vertinimas (A), kuris nagrinėja visas poveikio aplinkai kategorijas ir jas priskiria minėtoms žalos kategorijoms (žr. 8 lentelė), atlikus šiuos skaičiavimus gauti rezultatai parodė, jog didžiausia rizika žmonių sveikatai siejama su iš PBAT pagamintų plėvelių gamyba abiem jos scenarijais, o mažiausią rizika būtų sukeliama PLA plėvelės, kuri būtų galiausiai apdorojama industrinio kompostavimo būdu, gauta neigiama vertė simbolizuoja, jog atgauti ar išvengti produktai procesuose atsveria ir kompensuoja sugeneruojamą poveikį vertinamoms žalos kategorijoms, kurios įeina į „rizika žmonių sveikatai“ žalos kategoriją. LDPE plėvelių nagrinėti scenarijai taip pat parodė ne didesnę nei 40 % poveikį (lyginant didžiausią poveikį sukeliančiu scenarijumi) žmonių sveikatai (žr. 29 pav.)

Rezultatai apie potencialiai sukuriamą rizika ekosistemoms parodė, jog PBAT pagrindu gamintos ir kaip atlieka sutvarkytos plėvelės sukuria tik 43 % potencialaus poveikio lyginant su didžiausią poveikį sukuriančiu plėvelės būvio ciklu: PLA plėvelės gamyba ir anaerobinis skaidymas. Prie rizikos ekosistemoms PLA būvio cikle didžiają dalimi prisidėjo poreikis užauginti naudojamus kukurūzus, bei didelis elektros energijos suvartojimas gamybos proceso metu. PBAT plėvelių poveikis

ekosistemoms parodė sąlyginai nedidelę riziką, o mažiausia rizika siejama su LDPE plėvelės gamyba ir jos deginimu (žr. 29 pav.)

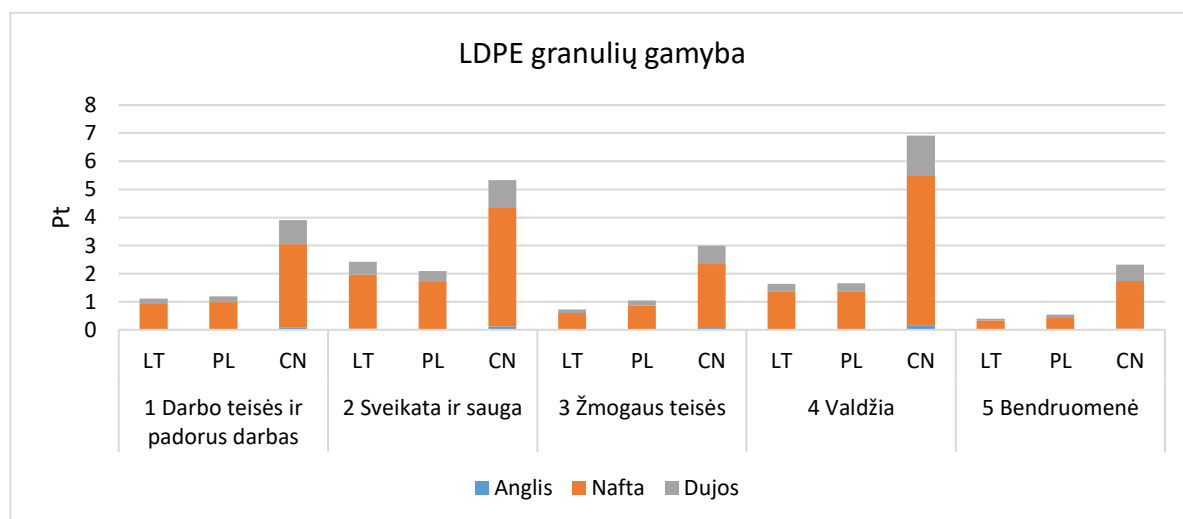
Rezultatai gauti apie riziką ištekliams parodė tarpusavyje mažiausius skirtumus (75-100 %), vertinant šią riziką didžiausias pavojus siejamas su PLA plėvelės gamyba ir anaerobiniu jos skaidymu, tačiau ir kiti plėvelių scenarijai parodė sąlyginai didelę riziką (žr. 29 pav.)

Tačiau atlikus rezultatų svėrimą (B), kur sukuriama žala paskirstoma: 2/5 rizika žmonių sveikatai, 2/5 rizika ekosistemoms ir 1/5 rizika ištekliams juos vertinant mPt (taškai išreikštas poveikis), darant prielaidą, kad pirmos dvi rizikos yra svarbesnės, nei paskutinė, gauti rezultatai rodo, jog didžiausia rizika sugeneruojama žmonių sveikatai, jeigu renkamasi gaminti plėvelę iš PBAT ekstruzijos būdu ir, o ją panaudojus sudeginti tam skirtuose įrenginiuose, o aplinkai geriausias variantas yra PLA plėvelės gamyba ir jos industrinis kompostavimas (žr. 29 pav.).

5.2. Socialinis būvio ciklo vertinimas

Siekiant susidaryti platesnį požiūrį į nagrinėjamą produktą, buvo nuspręsta įvertinti ir socialinio poveikio galimybes ir sukeltą riziką vertinant plastikinės plėvelės gamybai naudojamų granulių žaliavas, jas palyginant tarpusavyje. Ir aptarti galimybes identiškus produktus gaminti skirtinguose šalyse: (Lietuvoje (LT), Lenkijoje (PL) ir Kinijoje (CN)).

Šiuo principu vertinant LDPE granulėms gaminti reikiamus komponentus (palyginimas vyksta atsižvelgiant į naudojamo produkto sunaudojamą kiekį, kuris perskaičiuotas į USD (žr. 10 lentelė)), gauti rezultatai parodė, jog didžiausia tikimybė su produktu siejama neigiamu socialiniu poveikiu gali atsirasti dėl produkte naudojamų iš naftos pagamintų produktų (žr. 26 pav.), o tai reiškia, jog norint gaminti socialiai atsakingas LDPE granules, reiktų atkreipti dėmesį į šių žaliavų tiekėjus ir jų socialinę atsakomybę.



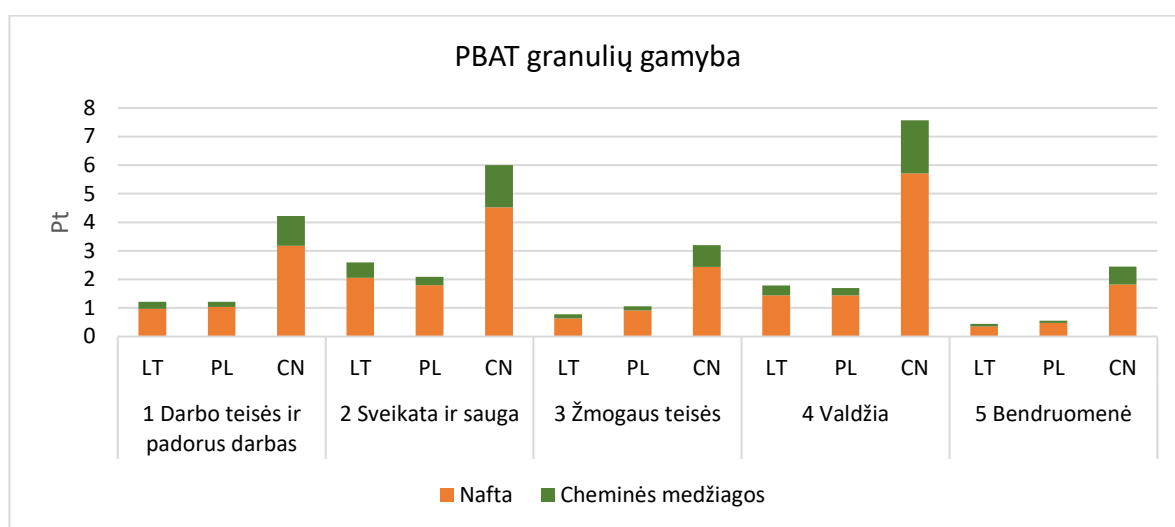
30 pav. LDPE granulių gamybai naudojamų žaliavų palyginamasis būvio ciklo vertinimas tarp skirtingų šalių: Lietuvos (LT), Lenkijos (PL) ir Kinijos (CN). Naudotas metodas: „Social Hotspot 2019 Category Method w Weights“

Tačiau socialinė rizika pasiskirsto skirtingai po 5 kategorijas bei, labai priklauso nuo šalies, kurioje šie produktai bus gaminami ir išgaunami. Gauti rezultatai parodė, jog LT ir PL gaminant reikiamas žaliavas, bus sukuriama labai panašaus lygio rizika visose kategorijose, tačiau didžiausia rizika

siejama su darbuotojų sveikata ir sauga, tai indikuoja, jog gaminant reikiamus plastiko gamybai produktus iš naftos LT arba PL reiktų labiausiai atkreipti dėmesį į sąlygas siejamas su darbuotojų sveikata ir sauga (žr. 30 pav.),

CN šio tyrimo metu parodė didžiausią atskirti, matuojant riziką, lyginant su LT ir PL. Tai indikuoja, jog gaminant tuos pačius produktus CN, vietoje LT ar PL, socialinės rizikos tikimybė atitinkamai pagal rizikos kategorijas gali išaugti nuo dvigubai didesnio poveikio sveikatos ir saugumo kategorijoje iki beveik 6 kartus padidėjusios rizikos siejamos su vietine bendruomene (žr. 30 pav.)

Nagrinėjant kitų granulių gamyboje (PBAT) naudojamas žaliavas gauti rezultatai parodė, jog didžiausia tikimybė su produktu siejamu neigiamu socialiniu poveikiu gali atsirasti dėl produkte (taip pat kaip ir LDPE) naudojamų iš naftos pagamintų produktų (žr. 31 pav.), o tai reiškia, jog norint gaminti socialiai atsakingas LDPE granules, reiktų atkreipti dėmesį į šių žaliavų tiekėjus ir jų socialinę atsakomybę.

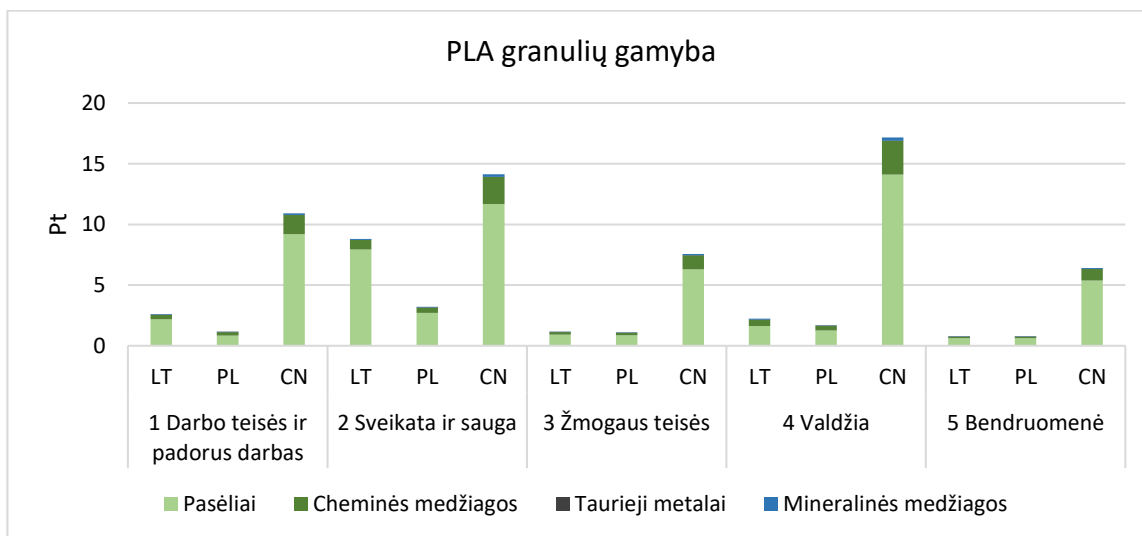


31 pav. PBAT granulių gamybai naudojamų žaliavų palyginamasis būvio ciklo vertinimas tarp skirtingų šalių: Lietuvos (LT), Lenkijos (PL) ir Kinijos (CN). Naudotas metodas: „Social Hotspot 2019 Category Method w Weights“

Tačiau modeliuojant scenarijus su skirtingomis šalimis gauti rezultatai parodė, jog LT ir PL gaminant reikiamas žaliavas, bus sukuriama labai panašaus lygio rizika visuose kategorijose, tačiau didžiausia rizika siejama su darbuotojų sveikata ir sauga, tai indikuoja, jog gaminant reikiamus plastiko gamybai produktus iš naftos LT arba PL reiktų labiausiai atkreipti dėmesį į sąlygas siejamas su darbuotojų sveikata ir sauga (žr. 31 pav.)

CN šio tyrimo metu parodė didžiausią atskirti, matuojant riziką, lyginant su LT ir PL. Tai indikuoja, jog gaminant tuos pačius produktus CN, vietoje LT ar PL, socialinės rizikos tikimybė atitinkamai pagal rizikos kategorijas gali išaugti nuo 2.8 karto didesnio poveikio sveikatos ir saugumo kategorijoje iki beveik 4,7 kartus padidėjusios rizikos siejamos su valdžia (žr. 31 pav.)

Nagrinėjant kitų granulių gamyboje (PLA) naudojamas žaliavas gauti rezultatai parodė, jog didžiausia tikimybė su produktu siejamu neigiamu socialiniu poveikiu gali atsirasti dėl produkte naudojamų natūralios kilmės produktų, kurie auginami pasėliuose (šiuo atveju kukurūzų auginimas) (žr. 32 pav.), o tai reiškia, jog norint gaminti socialiai atsakingas PLA granules, reiktų atkreipti dėmesį į šios žaliavos tiekėjus ir jų socialinę atsakomybę.



32 pav. PLA granulių gamybai naudojamų žaliavų palyginamasis būvio ciklo vertinimas tarp skirtingų šalių: Lietuvos (LT), Lenkijos (PL) ir Kinijos (CN). Naudotas metodas: „Social Hotspot 2019 Category Method w Weights“

Tačiau modeliuojant scenarijus su skirtingomis šalimis gauti rezultatai parodė, jog LT ir PL gaminant reikiamas žaliavas, bus sukuriama labai panašaus lygio rizika visuose kategorijose, išskyrus “sveikata ir sauga” kategorijoje. LT antroje kategorijoje turi net 2.3 karto didesnę riziką šioje pramonėje dirbantiems žmonėms, lyginant su PL ir tik 1.6 kartus mažesnę šio pobūdžio riziką lyginant su CN.

Tačiau CN šio tyrimo metu, kaip ir su kitomis nagrinėtomis granulėmis, parodė didžiausią atskirti, matuojant riziką, lyginant su LT ir PL. Tai indikuoja, jog gaminant tuos pačius produktus CN, vietoje LT ar PL, socialinės rizikos tikimybė atitinkamai pagal rizikos kategorijas gali išaugti nuo 1,4 karto didesnio poveikio sveikatos ir saugumo kategorijoje iki beveik 10 kartus padidėjusios rizikos siejamos su valdžia (žr. 32 pav.)

Išvados

1. Šiame darbe buvo nagrinėtos mulčiavimui skirtos plėvelės ir tradicinių produktų alternatyvos – MP iš bioplastiko. Nagrinėtoje literatūroje buvo pastebėta, jog minėto pobūdžio plėvelės didžiąja dalimi yra gaminamos iš LDPE plastiko ir gyvavimo ciklo pabaigoje būna užterštos dirvožemiu ar sunkiai surenkamos, o liekanti aplinkoje sukuria riziką ilgalaikiai plastikui taršai [23,24,7,33]. LDPE gamybos metu naudojamos žaliavos yra iš neatsinaujinančių išteklių, kurių naudojimas ateityje bus vis labiau ribojamas [9,50]. Bioplastiko alternatyvos, kurias siūloma naudoti vietoje tradicinės LDPE MP gali spręsti minėtas problemas su kuriomis susiduriama naudojant LDPE plėveles, tačiau net ir jau komerciškai prieinamos PLA ar PBAT pagrindu gaminamos plėvelės nebūtinai pasižymės norimomis savybėmis, kadangi tai labai stipriai siejama su plėvelių sudėtimi (naudojamais priedais ir mišinio santykiu), jų naudojimo sąlygomis, dirvožemio ir temperatūros pokyčiais bei jų gamybai naudojamų žaliavų, procesų ar galutinio atliekų apdorojimo būdo.
2. Atliktiems tyrimams duomenys buvo renkami iš duomenų bazių ir skirtingų literatūros šaltinių, kurie taip pat vertino tokius pačius ar panašius (sudėtimi identiškus) produktus, dėl tikslumo ir geresnio pritaikymo tyrimo metu, duomenys apie kiekvieną gaminį buvo verčiami į tarpusavyje vienodus masės ar energijos matavimo vienetus (g ir ar kg ir MJ) perskaičiuotus vienam funkciniam vienetui, atliekant aplinkosauginį vertinimą. Tie patys duomenys buvo perskaičiuoti į piniginę vertę (USD) ir panaudoti skaičiuojant socialines rizikas.
3. Atlikus būvio ciklo vertinimą, kurio metu tarpusavyje buvo lyginamos 3 rūšių MP (pagamintos iš PLA, PBAT ar LDPE) gauti rezultatai parodė, kad didžiausias poveikis aplinkai sugeneruojamas visų rūšių plastiko granulių gamybos metu, šis procesas sugeneruoja ne mažiau nei 50 % bendro plėvelės galimo poveikio aplinkai, tačiau nors ir granulių gamyba atsakina už didžiausius poveikius visų nagrinėtų procesų metu, PBAT granulių gamyba sukuria 7,26 kg CO₂^{eq}, tuo tarpu LDPE tik 1,91 kg CO₂^{eq}, o PLA granulės atsakingos už mažiausią poveikį – 1,86 kg CO₂^{eq}, vertinant globalinio atšilimo potencialą. Didžiausias viso būvio ciklo metu sugeneruojamas poveikis aplinkai prognozuojamas iš PBAT plastiko gaminamoms plėvelėms, kurios sukuria potencialų poveikį aplinkai siekiantį 9,324–10,244 kg CO₂^{eq}, priklausomai nuo pasirinkto atliekų apdorojimo būdo. Mažiausias poveikis aplinkai numatomas renkantis tradicinio plastiko (LDPE) MP, tačiau jeigu šios kaip atliekos yra surenkamos ir pridudamos perdirbimui, net nedidelis perdirbimo lygis (numatomas perdirbamumas 23 %) vis tiek kompensuoja žalą, kuri būtų sukuriamą gaminant naują plastiką (-0,33 kg CO₂^{eq}).
4. Tačiau vertinant nagrinėtas MP su „ReCiPe Endpoint (H) V1.11“ metodu, kuris galimus poveikius sugrupuoja į 3 žalos kategorijas: „rizika ekosistemoms“, „rizika žmonių sveikatai“ ir „rizika ištekliams“ gauti rezultatai parodė, jog didžiausią riziką žmonių sveikatai sukuria PBAT plėvelių būvio ciklas, tačiau didžiausia rizika ekosistemoms siejama su PLA plėvelės gamyba ir galutiniu apdorojimu dėl šiame produkte naudojamų natūralios kilmės žaliavų (poreikis jas auginti ir tinkamai apdirbti) bei didžiausio energijos poreikio viso proceso metu (lyginant su kitais nagrinėtais PBAT ir LDPE gaminiais). Rizika siejama su ištekliais skiriasi sąlyginai nedaug tarpusavyje tarp visu scenarijų, tačiau atlikus „svėrimą“ gauti rezultatai parodė, kad didžiausia poveikio apkrova siejama su rizika žmonių sveikatai, todėl potencialiai sukeliama PBAT plėvelės poveikis aplinkai yra didžiausias (230-250 mPt priklausomai nuo atliekų apdorojimo scenarijaus).

5. Atlikus būvio ciklo analizę, kurios metu buvo įvertintas socialinis poveikis plastiko granulių gamyboje naudojamoms medžiagoms, gauti rezultatai parodė, jog su didžiausiomis socialinėmis rizikomis LDPE granulių gamyboje siejami iš naftos produktų gaminami komponentai, tačiau gaminant šiuos komponentus Lietuvoje (LT) ar Lenkijoje (PL) galima tikėtis socialiai atsakingesnės gamybos, nei Kinijoje (CN). PBAT granulių gamyba pasižymėjo labai panašaus masto ir pobūdžio rizikomis, kadangi didžiausios socialines rizikos rodikliai siejami su naudojamų žaliavų gaminamų iš naftos. Be to, gaminant šiuos komponentus Lietuvoje (LT) ar Lenkijoje (PL) galima tikėtis socialiai atsakingesnės gamybos, nei Kinijoje (CN). PLA granulių gamyba išsiskyrė, kadangi didžiausia socialinė rizika siejama su pasėlių auginimu (arba tiksliau, su kukurūzų auginimu), gaminant reikiamus komponentus Lietuvoje (LT) ar Lenkijoje (PL) taip pat galima tikėtis socialiai atsakingesnės gamybos, nei Kinijoje (CN), tačiau renkantis Lietuvoje esančius tiekėjus norit būti socialiai atsakingais, reiktų labiausiai atkreipti dėmesį į su sveikata ir sauga siejamas socialines rizikas.

Diskusija ir rekomendacijos

Atlikus tyrimą pasitelkiant tiek aplinkosauginį tiek socialinį BCV buvo pastebėti svarbūs aspektai, kurie nebuvo akcentuojami tyrimo metu, tačiau vertinant gautus rezultatus ar atliekant tolimesnius tyrimus svarbu juos suvokti ir, jeigu tai įmanoma, įtraukti siekiant tikslesnių ir geriau nagrinėjamas sąlygas atvaizduojančių tyrimų (žr. 11 lentelė).

11 lentelė. Tyrime išryškėjusios problemos

Aplinkosauginis būvio ciklo vertinimas (BCV)	
Išryškėjusios tyrimo problematikos	Komentaras
Atlikti moksliniai tyrimai naudojantys aplinkosauginį BCV tarpusavyje gali labai skirtis	Tyrimai skiriasi dėl skirtingos metodikos, duomenų rinkinių ir kitų nuo autoriaus priklausančių aspektų. Visu pirma, tyrimuose naudojamos plastiko granulės gali būti vertinamos įtraukiant arba neįtraukiant granulėse naudojamų priedų (stabilizatorių, plastifikatorių ir t. t.), nors vykdant tyrimus remiantis „ISO 14040:2006“ [72] ir „ISO 14044:2006“ [73] standartais neįtraukti naudojamų medžiagų galima tik įrodant, jog jos nesudarys daugiau nei 1 % sukuriamo poveikio. Modeliuojant BCV nebūtinai įtraukiamos visos gaminio būvio ciklo stadijos, dėl to sunku palyginti su kitais gautais rezultatais, kai skiriasi tyrimų ribos.
Duomenų aiškumo ir kokybės trūkumas	Nagrinėjami procesai, dėl duomenų trūkumo dažnu atveju gali būti pasirenkami remiantis panašumo principu, o tai mažina duomenų kokybę ir jų patikimumą [96]. Šiame darbe nagrinėti duomenys taip pat buvo imti remiantis kitais atliktais moksliniais tyrimais, statistikos duomenimis ir t. t. o tai sukuria riziką duomenų nepatikimumui, nagrinėtuose BCV taip pat informacija apie duomenis buvo ribota, manoma, jog dėl komercinių ar kitų priežasčių.
Aplinkos sąlygų skirtumai gali turėti įtaką galutiniams atliekų apdorojimo rezultatams	Vertinant bioplastiko plėvelių būvio ciklo paskutinę grandį (atliekų apdorojimas) gauti rezultatai labai tiksliai neatspindi galimos situacijos, kadangi į skaičiavimus nėra įtraukiamos tikslios aplinkos sąlygos (naudojami gauti vidurkiai sukuriamo poveikio), kuriuose atlieka suyra. Turint omenyje, kad vėsesnio ir lietingesnio klimato šalyse (tokiuose kaip Lietuva) biodegradacija dirvožemyje ar atviro kompostavimo būdu gali būti lėtesnė bei sugeneruoti skirtingas išmetalų proporcijas, dėl galimo nenumatyto anaerobinio skaidymo [83].
Metodikoje neįtraukiama „šiukšlinimo“ rizika	Aplinkosauginis būvio ciklo vertinimas nėra pritaikytas vertinti „šiukšlinimo“ tikimybių ir galimo poveikio. Šiukšlinimą suvokiant kaip atsitiktinį atliekos atsikratymą tam nepritaikytoje aplinkoje. Turint omenyje, jog viena labiausiai akcentuojamų su plastikumu siejamų problemų ir yra pastarojo patekimas į vandens ar sausumos ekosistemas „šiukšlinimo“ būdu. Įvertinti būtent šį reiškinį vertinant biodegraduojantį ir nebiodegraduojantį plastiką yra labai svarbu, suvokiant didelius skirtumus tarp šių plastikų potencialaus poveikio aplinkai (vienas gali suirti per kelis mėnesius, kitas per kelis ir daugiau šimtmečių ir t. t.)
Atliktas tyrimas vertina subrendusias ir nesubrendusias gamybos sistemas	Tradicinio plastiko gamyba yra jau daugiau nei 100 metų tobulinama, subsidijuojama ir plačiai išplitusi industrijos šaka, tuo tarpu bioplastiko gamyba užima mažą rinkos dalį, o mulčiavimui skirtų plėvelių pavidalu rinkoje atsirado vos prieš 30 metų ir dar nėra plačiai naudojama, tai vis dar besivystantis produktas [100]
Žemės naudojimo vertinimo trūkumai	Vertinant žemės naudojimo poreikį iš natūralios kilmės žaliavų gaminamam plastikui ir iš naftos kilmės žaliavų gaminamam plastikui į modeliavimus įtraukiamas sausumos ploto poreikis žaliavų auginimui ir panašioms procesams, tuo tarpu iš naftos pagamintoms žaliavoms į modeliavimus nėra įtraukiamas sausumos teritorijos poreikis dėl aptvertų teritorijų, saugant naftos kasyklas, ekologinių katastrofų tikimybės (naftos išsiliejimas, sukelti gaisrai ir t.t.) ir jų poveikis žemės naudojimui.

Aplinkosauginis būvio ciklo vertinimas (BCV)	
Išryškėjusios tyrimo problematikos	Komentaras
I šio tipo vertinimą negalima įtraukti sukuriamos praktinės vertinamų produktų naudos ar žalos	Šio tyrimo metu gauti rezultatai parodė, jog didžiausią galimą poveikį aplinkai iš nagrinėtų plėvelių sukuria PBAT pagrindu pagaminama plėvelė, net ją paliekant suirti dirvožemyje, tačiau modelis neatspindi praktinės naudos, kurią sukuria šios plėvelės naudojimas ir toks atliekų apdirbimo būdas. Plėvelės suirimas dirvožemyje išvengia papildomo darbo ją surenkant, pridudant atliekų tvarkytojams ir t.t. sutaupoma nemažai papildomam darbui skiriamo laiko ir pastangų, šio tipo plėvelė į dirvožemį suariama kartu su paprastu arimu, kuris būtų vykdomas nepaisant naudojamos plėvelės. Kai tuo tarpu kitos plėvelės turi po jų naudojimo būti šalinamos iš dirvožemio ir vežamos atitinkamam apdorojimui.
Egzistuojančios atliekų apdorojimo sistemos nepritaikytos bioplastikui	Bioplastiko integracija į sistemą reikalautų sistemos tobulinimo ir pritaikymo pasirinktam bioplastiko atliekų apdorojimo scenarijų, net pasirinkus biologiškai skaidžių plastikų apdorojimą kompostavimo būdu įgyvendinti šio plastiko patekimą į reikiamą atliekų srautą nebūtų taip paprasta, tokio tipo plastikas turėtų būti atskirtas ir atitinkamai išrūšiuojamas pagal jam tinkamą atliekų apdorojimo būdą, o turint omenyje didelę įvairovę bioplastiko ir skirtingas šios atliekos tvarkymo galimybes, rūšiavimas ir tinkamas apdorojimas yra ateities iššūkis, kuris turėtų būti įtraukiamas į panašaus pobūdžio galimybių studijas ateityje [90]
Nagrinėtos bioplastiko plėvelės negali būti naudojamos ilgesniam laikotarpiui	Nagrinėtų PBAT plėvelių vidutinis suirimo laikas dirvožemyje ~ 2 mėnesiai, PLA nors ir nagrinėtas kaip dirvožemyje neskaidus plastikas, dėl jam būdingos greitesnės degradacijos (lyginant su tradiciniu plastikumu) galėtų būti naudojami tik trumpesniam (sezoniškam) laikotarpiui, kai tuo tarpu tradicinio plastiko plėvelė gali būti naudojama 3 ir daugiau metų (priklauso nuo jos storio ir kitų savybių). Todėl atliekant šį tyrimą nebuvo remtasi į plėvelės galimą naudojimo laikotarpį darant prielaidą, jog visos plėvelės būtų naudojamos tokį pat laiką.
Socialinis būvio ciklo vertinimas (S-BCV)	
Išryškėjusios tyrimo problematikos	Komentaras
S-BCV vertina tiek teigiamas tiek neigiamas savybes, tačiau teigiamos nėra aiškiai atspindimos	Atliekant S-BCV nagrinėjami socialiniai indikatoriai gali atspindėti tiek teigiamas tiek neigiamas savybes, tačiau sumuojant galimas rizikas į bendras reikšmes teigiami aspektai išminusuojami ir nėra atvaizduojami rezultatuose vertinamas bendrai sukurtas kategorijos rizikos taškas (Pt).
Gauti S-BCV ir aplinkosauginio BCV rezultatai nėra tarpusavyje palyginami	Nors ir nagrinėjami tie patys produktai ir taikomi būvio ciklo vertinimo reikalavimai, gauti rezultatai S-BCV siejami su įvedinių gamyba skirtinguose šalyse, be to, produktai suskirstomi juos priskiriant pramonės šakai (pvz., naftos, dujų ir t.t.) dėl to gauti rezultatai nėra tiesiogiai palyginami su atliktu aplinkosauginiu BCV ir yra vertinami atskirai at darant bendrines prielaidas [99].
S-BCV yra pakankamai naujas ir tobulinimo reikalaujantis metodas	S-BCV pradėtas naudoti 2011 m. ir vis dar įvardijamas kaip besivystantis, konkrečios reguliacijos neturintis, tačiau daug perspektyvos turintis produktų vertinimo metodas, tuo tarpu aplinkosauginis BCV jau yra standartizuotas, jam sukurta virš 30 duomenų bazių, atliktas didelis kiekis panašaus pobūdžio tyrimų. Todėl kol kas S-BCV nėra labai tikslūs ir tikėtina, kad toliau tobulėjant duomenų bazėms ir sistemoms, gaunami rezultatai nagrinėjant tą patį produktą gali keistis.

Taigi, gauti rezultatai parodė, jog renkantis plėvelės sezoniniam naudojimui (~ 3 mėnesiams) PBAT plėvelės gali būti patogus (suyrant dirvoje, nereikia surinkti ir t. t.) variantas, tačiau aplinkosauginiu požiūriu siejamas su didžiausia netiesiogine tarša, tai reiškia jog renkantis PBAT plėvelė su siekiu tapti aplinkai draugiškesniu ūkiu nebūtinai bus pasiekiamas tikslas. O norint MP naudoti ne vienerius metus, bioplastikas nėra tinkamas variantas dėl galimai greitesnės biodegradacijos.

Gauti rezultatai ir nagrinėta literatūra parodė, jog kol bioplastikų gamyba vis dar reikalauja daug skirtingų žaliavų, energijai reiklų gamybos procesų ir šioms atliekoms nepritaikytų atliekų

apdorojimo sistemų, tol atsakingas tradicinio plastiko naudojimas žemės ūkyje rodo geresnes perspektyvas aplinkosauginiu požiūriu. Tačiau, tai nėra principas, kuris galioja visur ir ūkininkai naudojantys šias plėveles turėtų rinktis produktus tik gerai įsivertinę esamas ir galimas plėvelių naudojimo ir apdorojimo sąlygas, bei renkantis tiekėjus domėtis siūlomų MP sudėtimi ir kilmės šalimi.

Literatūros sąrašas:

1. *Lietuvių kalbos žodynas*. [interaktyvus][žiūrėta 2022-05-12] Prieiga per: <http://www.lkz.lt/>
2. *Plastics – the Facts*. 2020. [interaktyvus][žiūrėta 2022-05-12] Prieiga per: https://plasticseurope.org/wp-content/uploads/2021/09/Plastics_the_facts-WEB-2020_versionJun21_final.pdf
3. Lietuvos Respublikos Seimas. *Lietuvos Respublikos atliekų tvarkymo įstatymas*. 2022. [interaktyvus][žiūrėta 2022-05-12] Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/TAIS.59267/asr>
4. History and Future of Plastics. *Science history institute*. [interaktyvus][žiūrėta 2022-05-12] Prieiga per: <https://www.sciencehistory.org/the-history-and-future-of-plastics>
5. Plastics industry association. *History of plastics*. [interaktyvus][žiūrėta 2022-05-12] Prieiga per: <https://www.plasticsindustry.org/history-plastics>
6. Raffaele P. Anthropocene, the plastic age and future perspectives. Febspress. 2021. [interaktyvus][žiūrėta 2022-04-25] Prieiga per internetą: <https://febs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2211-5463.13122>
7. Calero M., Godoy V., Quesada L., Martín-Lara M Green strategies for microplastics reduction. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2021. [interaktyvus][žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452223620301395?via%3Dihub>
8. Fredi G., Dorigato A. Recycling of bioplastic waste: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. 2021. [interaktyvus][žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504821000373>
9. Europos Komisija. *Europinė plastikų žiedinėje ekonomikoje strategija*. 2018. [interaktyvus][žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028&from=EN>
10. Razza F., Briani C., Breton T., Marzaa D. Metrics for quantifying the circularity of bioplastics: The case of bio-based and biodegradable mulch films. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020. [interaktyvus][žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920300756#bib0019>
11. Okoffo D. I., Donner E., McGrath S. P., Tschärke B. J., O'Brien J., O'Brien S., Ribeiro F., Burrows S. D., Toapanta T., Rauert C., Samanipour S., Mueller J. F., Thomas K. V. Plastics in biosolids from 1950 to 2016: A function of global plastic production and consumption. *Water Research*. 2021. [interaktyvus][žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135421005650>
12. Li B., Su L., Deng H., Chen Q., Shi H. *Microplastics in fishes and their living environments surrounding a plastic production area*. 2020. [interaktyvus][žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720321781>
13. Sassanelli C., Rosa P., Rocca R., Terzi S. *Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review*. 2019. [interaktyvus][žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619315355?pes=vor#bib58>
14. Gu H., Geng H., Wang D., Li W. *A new method for the treatment of kitchen waste: Converting it into agronomic sprayable mulch film*. 2021. [interaktyvus][žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X21001902#b0050>

15. .Porta R. *The Plastics Sunset and the Bio-Plastics Sunrise*. 2019. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2079-6412/9/8/526/htm>
16. Recycle Coach. 7+ *Revealing Plastic Waste Statistics*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://recyclecoach.com/resources/7-revealing-plastic-waste-statistics-2021/#:~:text=Globally%20to%20date%2C%20there%20is,how%20much%20plastic%20exists%20here.>
17. Chen D., Li J., Yuan Y., Gao C., Cui Y., Li S., Wang H., Peng., Liu X., Wu Z., Ye J. *A new strategy to improve the toughness of epoxy thermosets by introducing the thermoplastic epoxy*. 2022. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386122000052>
18. AIP Precision Machining. *Thermosets vs Thermoplastics*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://aiprecision.com/thermoplastics-vs-thermosets/>
19. Amjed N., Bhatti I. A., Simon L., Castel C. D., MAhmoed K. Z, Zuber M. *Preparation and characterization of thermoplastic polyurethanes blended with chitosan and starch processed through extrusion*. 2022. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813022004640>
20. Amjed N., Bhatti I., Simon L., Castel C., Zia K., Zuber M., Hafiz I., Murtaza M. *Preparation and characterization of thermoplastic polyurethanes blended with chitosan and starch processed through extrusion*. 2022. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702121003886>
21. Jacobsen L., Pedersen S., Thogersen J. *Drivers of and barriers to consumers' plastic packaging waste avoidance and recycling – A systematic literature review*. 2022. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X22000228>
22. Tejaswini M., Pathak P., Ramkrishna S., Ganesh P. *A comprehensive review on integrative approach for sustainable management of plastic waste and its associated externalities*. 2022. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722010658#bb0470>
23. Genovese A., Acquaye A., Figueroa A., Koh S. *Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications*. 2015. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048315001322?via%3Dihub>
24. Geyer R., Jambeck J. R., Lavender K. L. *Production, use, and fate of all plastics ever made*. 2017. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1700782>
25. Auta H., Emenike C., Hauziah S. *Distribution and importance of microplastics in the marine environment: A review of the sources, fate, effects, and potential solutions*. 2017. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016041201631011X?via%3Dihub>
26. Turner D., Williams I., Kemp S. *Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials*. 2015. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344915301245?via%3Dihub>
27. European Bioplastics. *Bioplastics market data*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.european-bioplastics.org/market/>

28. Cho R. *The Truth About Bioplastics*. 2017. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://news.climate.columbia.edu/2017/12/13/the-truth-about-bioplastics/>
29. Europos Komisija. *Europinė plastikų žiedinėje ekonomikoje strategija*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1516265440535&uri=COM:2018:28:FIN>
30. Europos Parlamentas ir Europos Sąjungos Taryba. *Europos Parlamento ir Tarybos Direktyva (ES) 2018/852*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0852>
31. Hoffman L., Ashworth P., Laycock B., Pratt S., Lant P. *Public attitudes towards bioplastics – knowledge, perception and end-of-life management*. 2019. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919303854>
32. Bishop G., Styles G., Lens P. *Environmental performance of bioplastic packaging on fresh food produce: A consequential life cycle assessment*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621025907>
33. Meeks D., Hottle T., Bilec M., Landis A. *Compostable biopolymer use in the real world: Stakeholder interviews to better understand the motivations and realities of use and disposal in the US*. 2015. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344915301208>
34. Debnath S. *13 - Sustainable production and application of natural fibre-based nonwoven*. 2017. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081020418000135?fbclid=IwAR0dB46uNj1rkC9ZZk8SN4zzu2i_QjjUNQXwWjndsyw5Av3Ba-z9UJe_2Jo
35. Griffin-LaHue D., Ghimire S., Yu Y., Scheenstra E., Miles C., Flury M. *In-field degradation of soil-biodegradable plastic mulch films in a Mediterranean climate*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721053158>
36. Liu X., Chen C., Sun J., Wang X. *Development of natural fiber-based degradable nonwoven mulch from recyclable mill waste*. 2020. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20307261>
37. Siwek P., Domagala-Swiatkiewicz I., Bucki P., Puchalski M. *Biodegradable agroplastics in 21st century horticulture*. 2019. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://ichp.vot.pl/index.php/p/article/view/144/133>
38. Plasticulture. *The European Plasticulture Strategy*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://apeeurope.eu/wp-content/uploads/2021/10/EPS-EPA-2021.pdf>
39. Ape UK. *Agriculture Plastics Environment*. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://ape-uk.com/>
40. Jian J., Xiangbin Z., Xianbo H. *An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)–PBAT*. 2020. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542504820300014#bib38>
41. Filho W., Salvia A., Bonoli A., Saari U., Voronova V., Kloga M., Kumbhar S., Olszewski K., Quevedo D., Barbir J. *An assessment of attitudes towards plastics and bioplastics in Europe*. 2020. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720362616>

42. Dilkes-Hoffman L., Pratt S., Lant P., Laycock B. *19 - The Role of Biodegradable Plastic in Solving Plastic Solid Waste Accumulation*. 2019. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128131404000194?via%3Dihub>
43. Colwill J., Wright E., Rahimifard S., Clegg A. *Bio-plastics in the context of competing demands on agricultural land in 2050*. 2011. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19397038.2011.602439>
44. Chen N., Li X., Simunek J., Shi H., Hu Q., Zhang Y. *Evaluating the effects of biodegradable and plastic film mulching on soil temperature in a drip-irrigated field*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198721001896>
45. Lee N., Joo J., Lin K., Lee J. *Thermochemical conversion of mulching film waste via pyrolysis with the addition of cattle excreta*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343721013397>
46. Hayes D. *Enhanced end-of-life performance for biodegradable plastic mulch films through improving standards and addressing research gaps*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211339821000277#bib0005>
47. Chen L., Qiang T., Chen X., Ren W., Zhang H. *Fabrication and evaluation of biodegradable multi-cross-linked mulch film based on waste gelatin*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894721012250>
48. Li S., Ding F., Flury M., Wang Z., Xu L., Li S., Jones D., Wang J. *Macro- and microplastic accumulation in soil after 32 years of plastic film mulching*. 2022. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749122001592#undfig1>
49. Hann S., Fletcher E., Molteno S., Sherrington C., Elliot L., Kong M., Koite A., Sastre S., Martinez V. *Relevance of Conventional and Biodegradable Plastics in Agriculture*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://ec.europa.eu/environment/system/files/2021-09/Agricultural%20Plastics%20Final%20Report.pdf>
50. Carus M., Berg C. *Scenario for the Plastic Industry 2050*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://renewable-carbon.eu/publications/product/scenario-for-the-plastic-industry-2050-png/>
51. European Bioplastics. *New EU standard for biodegradable mulch films in agriculture published*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.european-bioplastics.org/new-eu-standard-for-biodegradable-mulch-films-in-agriculture-published/>
52. Bioplastics News. *The History of Bioplastics*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://bioplasticsnews.com/2018/07/05/history-of-bioplastics/>
53. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: file:///C:/Users/Dzidzocorona/Downloads/bpe-handbook_public.pdf
54. Hayes D. G., Miles C., Ghimire S. *Suitability of Biodegradable Plastic Mulches for Organic and Sustainable Agricultural Production Systems*. 2017 [žiūrėta 2022-04-25].
55. Liu L., Zou G., Zuo Q., Li S., Bao Z., Jin T., Liu D., Du L. *It is still too early to promote biodegradable mulch film on a large scale: A bibliometric analysis*. 2022. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422001110>

56. Hayes D. G., Miles C., Ghimire S. Suitability of Biodegradable Plastic Mulches for Organic and Sustainable Agricultural Production Systems. 2017 [žiūrėta 2022-04-25]. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25].
57. European Bioplastics. *Expert Statement (Bio)Degradable Mulching Films*. 2017. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: https://docs.european-bioplastics.org/publications/OWS_Expert_statement_mulching_films.pdf
58. Deb P., Kokaz S., Abed S., Paradkar A., Tekade R. *Chapter 6 - Pharmaceutical and Biomedical Applications of Polymers*. 2019. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128179093000066>
59. Jamshidian M., Tehrany E., Imran M., Jacquot M., Desobry S. *Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies*. 2010. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://ift.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x?src=getftr>
60. Benavides T. P., Lee U., Mehrjerdi Z. O. Life cycle greenhouse gas emissions and energy use of polylactic acid, bio-derived polyethylene, and fossil-derived polyethylene. 2020. [žiūrėta 2022-04-25] Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620340555>
61. Farah S., Anderson D., Langer R. *Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications — A comprehensive review*. 2016. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169409X16302058?via%3Dihub#bb0015>
62. Vink E., Rabago K., Glassner D., Gruber P. *Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production*. 2003. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391002003725?via%3Dihub#SEC7.6>
63. Steinmetz Z., Wollmann C., Schaefer M., Buchmann C., David J., Troger J., Munoz K., Fror O., Schaumann G. *Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation?*. 2016. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716301528>
64. Vanderreydt I., Rommens T., Tenhunen A., Mortensen L. F., Tangle I. Greenhouse gas emissions and natural capital implications of plastics. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: file:///C:/Users/Giedrius/Downloads/ETC_2.1.2.1_GHGEmissionsOfPlastics_FinalReport_v7.0_ED.pdf
65. Zhang Q., Jiang M., Wang G., Zhou G. *Novel biobased high toughness PBAT/PEF blends: morphology, thermal properties, crystal structures and mechanical properties*. 2020. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/NJ/C9NJ04861H>
66. Yang Y., Li P., Jiao J., Yang Z., Lv M., Li Y., Zhou C., Wang C., He Z., Liu Y., Song S. *Renewable sourced biodegradable mulches and their environment impact*. 2020. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030442382030203X>
67. Merino D., Mansilla A., Gutierrez T., Casalongue C., Alvarez V. *Chitosan coated-phosphorylated starch films: Water interaction, transparency and antibacterial properties*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1381514818303286?token=B43F477B7AB1B9C529>

AB39B14F156D4BFF650633698CDF303CD250084F56EB240F3B04603A555FDFD613C5FF
BED206D9&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220508172946

68. Santos N., Ragazzo G., Cerri B., Soares M., Kieckbusch T., Silva M. *Physicochemical properties of konjac glucomannan/alginate films enriched with sugarcane vinasse intended for mulching applications*. 2020. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141813020346778>
69. Novelli L., Sayavedra S., Rene E. *Polyhydroxyalkanoate (PHA) production via resource recovery from industrial waste streams: A review of techniques and perspectives*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852421003242#b0180>
70. Menossi M., Cisneros M., Alvarez V., Casalongue C. *Current and emerging biodegradable mulch films based on polysaccharide bio-composites. A review*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-021-00685-0#Tab9>
71. Briassoulis D. *An Overview on the Mechanical Behaviour of Biodegradable Agricultural Films*. 2004. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/B:JOOE.0000010052.86786.ef.pdf>
72. ISO. [ISO 23517:2021(en)]. *Plastics — Soil biodegradable materials for mulch films for use in agriculture and horticulture — Requirements and test methods regarding biodegradation, ecotoxicity and control of constituents*. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:23517:ed-1:v1:en>
73. Lietuvos Standartizacijos Departamentas. [ISO 14040:2006]. *Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas. Principai ir sandara*. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: https://vb.ktu.edu/primos-explore/fulldisplay?docid=LSDPRIMO615889&context=L&vid=KTU&lang=lt_LT&search_scope=KTU&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=default_tab&query=title,contains,ISO%2014040,AND&sortby=rank&mode=advanced&pfilter=lang,exact,eng,AND&pfilter=exact,standards,AND&offset=0
74. Rossi V., Cleeve-Edwards N., Lundquist L., Schenker U., Dubois C., Humbert S., Jolliet O. *Life cycle assessment of end-of-life options for two biodegradable packaging materials: sound application of the European waste hierarchy*. 2015. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614008725#bib28>
75. Hermann B., Debeer L., Wilde B., Blok K., Patel M. *To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment*. 2011. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391011000206?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=70bc4c82785e9079
76. European Court Of Auditors. *EU action to tackle the issue of plastic waste*. 2020. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-22]. Prieiga per: https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/RW20_04/RW_Plastic_waste_EN.pdf
77. National Institute for Public Health and the Environment. *ReCiPe 2016 v1.1*. 2016. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-22]. Prieiga per: https://pre-sustainability.com/legacy/download/Report_ReCiPe_2017.pdf
78. Benoît Norris, C., Traverso, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, T., Russo Garrido, S., Berger, M., Valdivia, S., Lehmann, A., Finkbeiner, M., Arcese, G. *Guidelines for Social Life*

- Cycle Assessment of Products and Organizations*. 2020. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-22]. Prieiga per: <https://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2021/01/Guidelines-for-Social-Life-Cycle-Assessment-of-Products-and-Organizations-2020-22.1.21sml.pdf>
79. Garrido S. *Social Life-Cycle Assessment: An Introduction*. 2017. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/social-life-cycle-assessment>
80. Global trade analysis project [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-22]. Prieiga per: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases/contribute/detailedsector57.asp>
81. Merino D., Mansilla A., Gutierrez T., Casalongue C., Alvarez V. *Chitosan coated-phosphorylated starch films: Water interaction, transparency and antibacterial properties*. 2018. [žiūrėta 2022-04-22].
82. Weng Y., Jin Y., Meng Q., Wang L., Zhang M., Wang Y. *Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions*. 2013. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941813000962>
83. Spierling S., Rottger C., Venkatachalam V., Mudersbach M., Herrmann C., Endres H. *Bio-based Plastics - A Building Block for the Circular Economy?*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117307849?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7105956f1e7d415d
84. Choi B., Yoo S., Park S. *Carbon Footprint of Packaging Films Made from LDPE, PLA, and PLA/PBAT Blends in South Korea*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/7/2369/htm>
85. Weng Y. X., Jin Y. J., Meng Q. Y., Wang L., Zhang M., Zhong Y. *Biodegradation behavior of poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly(lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions*. 2013. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-04-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142941813000962>
86. Norris C. B., Bennema M., Norris G. *The social hotspots database supporting documentation*. 2019. [žiūrėta 2022-04-25].
87. Goldsberry C. *Researchers demonstrate that PBAT does, indeed, biodegrade in agricultural soil*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-25]. Prieiga per: <https://www.plasticstoday.com/sustainability/researchers-demonstrate-pbat-does-indeed-biodegrade-agricultural-soil>
88. Li C., Cui Q., Li Y., Zhang K., Lu X., Zhang Y. *Effect of LDPE and biodegradable PBAT primary microplastics on bacterial community after four months of soil incubation*. 2022. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-25]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389422001418>
89. Schrivvers L. D., Leroux F., Verney V., Patel K. M. *Ex-ante Life Cycle Assessment of polymer nanocomposites using organo-modified Layered Double Hydroxides for potential application in agricultural films*. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-27]. Prieiga per: <https://pubs.rsc.org/en/content/getauthorversionpdf/C4GC00830H>
90. Maga D., Hiebel M., Thonemann N. *Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid*. 2019. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-27]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919302319#fig0025>
91. Bishop G., Styles D., Lens L. N. P. *Environmental performance comparison of bioplastics and petrochemical plastics: A review of life cycle assessment (LCA) methodological decisions*. 2021.

- [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-29] Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344921000586#bib0127>
92. Beigbeder J., Soccalingame L., Perrin D., Benezet J. C., Bergeret A. *How to manage biocomposites wastes end of life? A life cycle assessment approach (LCA) focused on polypropylene (PP)/wood flour and polylactic acid (PLA)/flax fibres biocomposites*. 2019. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-29] Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18306755>
93. Maga D., Hiebel M., Thonemann N. *Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid*. 2019. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-29] Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344919302319#fig0010>
94. Benavides P. T., Mehrjerdi O. J. Z., Lee U. *Life cycle inventory for polylactic acid production in GREET 2019*. 2019. [žiūrėta 2022-05-20]
95. Valdivia S., Bäckes G. J., Traverso M., Sonnemann G., Cucurachi S. ir kiti. *Principles for the application of life cycle sustainability*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-29] Prieiga per:
[assessmenthttps://link.springer.com/article/10.1007/s11367-021-01958-2](https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-021-01958-2)
96. Reinales d., Zambrana-Vasquez D., Saez-De-Guinoa A. *Social Life Cycle Assessment of Product Value Chains Under a Circular Economy Approach: A Case Study in the Plastic Packaging Sector*. 2020. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-29] Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/16/6671/htm>
97. Traverso M., Bell L., Saling P., Fontes J. *Towards social life cycle assessment: a quantitative product social impact assessment*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-29] Prieiga per:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1168-8>
98. Grubert Emily. *Rigor in social life cycle assessment: improving the scientific grounding of SLCA*. 2018. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-29] Prieiga per:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1117-6>
99. Fauzi T. R., Lavoie P., Sorelli L., Heidari D. M., Amor B. *Exploring the Current Challenges and Opportunities of Life Cycle Sustainability Assessment*. 2019. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-29] Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/3/636/htm>
100. Ißbrücker Constance. *Using LCA to compare bio-based and fossil-based plastics is not that simple*. 2021. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-20] Prieiga per: <https://www.european-bioplastics.org/using-lca-to-compare-bio-based-and-fossil-based-plastics-is-not-that-simple/>
101. Vink E. T. H., Rabago R. K., Glassner D. A., Gruber P. R. *Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production*. 2003. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-28] Prieiga per:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391002003725?via%3Dihub#FIGGR3>
102. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-30] Prieiga per: <https://simapro.com/>
103. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-30] Prieiga per: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
104. [interaktyvus] [žiūrėta 2022-05-30] Prieiga per: <http://www.socialhotspot.org/>