



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

**Celiuliozės acetato siūlų poveikis aplinkai  
būvio ciklo požiūriu**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Vesta Čiteikytė**

Projekto autorė

**Doc. Inga Stasiulaitienė**

Vadovė

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

# **Celiuliozės acetato siūlų poveikis aplinkai būvio ciklo požiūriu**

Baigiamasis magistro projektas

Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

---

**Vesta Čiteikytė**

Projekto autorė

**Doc. Inga Stasiulaitienė**

Vadovė

**M. d. Darius Čiužas**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2026**



**Kauno technologijos universitetas**

Cheminės technologijos fakultetas

Vesta Čiteikytė

## **Celiuliozės acetato siūlų poveikis aplinkai būvio ciklo požiūriu**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Vesta Čiteikytė

*Patvirtinta elektroniniu būdu*

Vesta Čiteikytė. Celiuliozės acetato siūlų poveikio aplinkai vertinimas būvio ciklo metodu. Magistro baigiamasis projektas / vadovė doc. dr. Inga Stasiulaitienė; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aplinkos inžinerija (E03), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: celiuliozė, acetatas, siūlai, perdirbimas, būvio ciklo vertinimas.

Kaunas, 2026. 70 p.

### **Santrauka**

Celiuliozės acetato siūlų gamyba tekstilės pramonėje laikoma viena iš regeneruotų pluoštų gamybos krypčių, tačiau šio proceso poveikis aplinkai vis dar priklauso nuo naudojamų žaliavų, energijos sąnaudų ir taikomų technologinių sprendimų. Šiame darbe atliktas celiuliozės acetato siūlų gamybos poveikio aplinkai vertinimas, taikant būvio ciklo vertinimo (BCV) metodą ir lyginant skirtingus žaliavų naudojimo scenarijus. Tyrimo metu vertinta iš pirminės celiuliozės ir iš perdirbtų tekstilės atliekų gautos antrinės celiuliozės pagamintų siūlų gamyba. Taip pat analizuota skirtingų perdirbtų žaliavų proporcijų ir energijos šaltinių įtaka galutiniams rezultatams bei vertinti produkto būvio ciklo pabaigos scenarijai – energinis panaudojimas bei perdirbimas.

Darbas atliktas remiantis ISO 14040/44:2006 standartais. Funkciniu vienetu pasirinktas 1 kg celiuliozės acetato siūlų. Vertinimui naudota „SimaPro 9.0“ programinė įranga ir ReCiPe 2016 metodas. Tyrime nustatytos sistemos ribos, atlikta inventorinė analizė ir poveikio vertinimas pagal poveikio kategorijas bei galutinio poveikio kategorijas – žmonių sveikatą, ekosistemas ir išteklius.

Atlikus modeliavimą nustatyta, kad didžiausią įtaką bendram poveikiui aplinkai turėjo acto anhidrido naudojimas ir energijos sąnaudos. Lyginant pirminės ir antrinės žaliavos scenarijus nustatyta, kad vertinant tik gamybos etapą („nuo vartų iki vartų“), daugumoje poveikio kategorijų skirtumai nesiekė 2 %. Tačiau išplėtus sistemos ribas ir įtraukus produkto būvio ciklo pabaigos procesus nustatyta, kad perdirbimo scenarijuje poveikis žmonių sveikatos kategorijoje padidėjo 51,5 %, ekosistemų – 48,5 %, o išteklių kategorijoje 29,2 %, lyginant su energinio panaudojimo scenarijumi. Didžiausi skirtumai tarp scenarijų nustatyti jūrų eutrofikacijos, gėlo vandens ekotoksiškumo ir jonizuojančios spinduliuotės kategorijose.

Analizuojant skirtingas perdirbtų žaliavų proporcijas nustatyta, kad didžiausias poveikis aplinkai pasireiškė dalinio perdirbimo scenarijuose, kai gamybos procese kartu naudojama tiek pirminė, tiek antrinė žaliava. Tuo tarpu 100 % perdirbtos žaliavos scenarijuje poveikis daugumoje kategorijų sumažėjo. Papildomai įtraukus saulės energijos naudojimą nustatytas dar mažesnis poveikis žmonių sveikatos, ekosistemų ir išteklių kategorijose.

Jautrumo analizė parodė, kad sumažinus acto anhidrido ir elektros energijos poreikį 10 %, galutinio poveikio kategorijose nustatytas 4-7 % poveikio sumažėjimas, tačiau reikšmingų bendrų rezultatų pokyčių nenustatyta.

Gauti rezultatai rodo, kad celiuliozės acetato siūlų gamybos poveikį aplinkai galima mažinti optimizuojant technologinius procesus, didinant perdirbtų žaliavų panaudojimą ir taikant atsinaujinančius energijos šaltinius.

Vesta Čiteikytė. The Environmental Impact of Cellulose Acetate Fibers from a Life Cycle Perspective. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof., Inga Stasiulaitienė; Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Environmental Engineering (E03), Engineering Sciences.

Keywords: cellulose acetate, yarn, fibers, recycled, life cycle assessment, LCA.

Kaunas, 2026. 70 pages.

### Summary

The production of Cellulose Acetate Fibers is considered one of the regenerated Fiber production pathways in the textile industry, but its Environmental Impact still depends on the raw materials used, energy consumption, and applied technological processes. In this thesis, the Environmental Impact of Cellulose Acetate Yarn production was assessed using the Life Cycle Assessment (LCA) method by comparing different raw material scenarios. The study evaluated yarn production from virgin Cellulose and secondary Cellulose obtained from Recycled textile waste. In addition, the influence of different proportions of Recycled materials and energy sources on the final results was analysed, together with End-of-Life scenarios including energy recovery and Recycling.

The study was carried out in accordance with ISO 14040/44:2006 standards. The functional unit selected for the assessment was 1 kg of Cellulose Acetate Yarn. The assessment was performed using SimaPro 9.0 software and the ReCiPe 2016 method. System boundaries were defined, inventory analysis was performed, and Environmental Impacts were evaluated according to endpoint Impact categories, including human health, ecosystems, and resources.

The modeling results showed that the greatest contribution to the overall Environmental Impact originated from the use of acetic anhydride and energy consumption processes. Comparing virgin and Recycled raw material scenarios indicated that, when evaluating only the production stage (“gate-to-gate”), differences in most Impact categories did not exceed 2 %. However, after expanding the system boundaries and including End-of-Life processes, the Recycling scenario showed an increase in Environmental Impact of 51.5 % in the human health category, 48.5 % in ecosystems, and 29.2 % in resources compared with the energy recovery scenario. The largest differences between scenarios were identified in marine eutrophication, freshwater ecotoxicity. Analysis of different Recycled material proportions showed that the highest Environmental Impacts occurred in partial Recycling scenarios, where both virgin and Recycled raw materials were used simultaneously. In contrast, the 100 % Recycled Cellulose scenario resulted in reduced Impacts across most Impact categories. Additional integration of solar energy further reduced Impacts in human health, ecosystems, and resource categories.

Sensitivity analysis showed that reducing acetic anhydride and electricity consumption by 10 % resulted in a 4–7 % reduction in Endpoint category results, while no significant changes in overall assessment trends were identified.

The obtained results indicate that the Environmental Impact of Cellulose Acetate Fiber production can be reduced by optimising technological processes, increasing the use of Recycled raw materials, and applying renewable energy sources.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas</b> .....	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas</b> .....	<b>8</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas</b> .....	<b>9</b>
<b>Įvadas</b> .....	<b>11</b>
<b>1 Literatūros apžvalga</b> .....	<b>12</b>
1.1 Tekstilės sektorius žiedinės ekonomikos kontekste .....	12
1.1.1 Tekstilės pramonės reikšmė pasaulio ekonomikoje ir pagrindiniai aplinkosauginiai iššūkiai	12
1.1.2 Tekstilės sektoriaus iššūkiai būvio ciklo vertinimo požiūriu.....	14
1.1.3. Tvari tekstilė – poveikio aplinkai mažinimo galimybės .....	16
1.2 Tekstilės pluoštų įvairovė ir paplitimas.....	16
1.2.1 Natūralūs, sintetiniai ir pusiau sintetiniai (regeneruoti) pluoštai .....	17
1.2.2 Regeneruoti pluoštai .....	19
1.3 Celiuliozės acetatas - savybės, gamyba.....	19
1.4 Tekstilės atliekų perdirbimas.....	24
1.4.1 Celiuliozės atgavimas iš tekstilės atliekų.....	25
1.4.2 Tekstilės atliekų perdirbimo poveikis aplinkai būvio ciklo požiūriu.....	26
1.5 Celiuliozės acetato būvio ciklo vertinimo tyrimų kritinė analizė.....	28
1.6. Literatūros apžvalgos analizė .....	31
<b>2 Tyrimo metodika</b> .....	<b>33</b>
2.1. Tyrimo tikslo, funkcinio vieneto ir sistemos ribų apibrėžimas .....	33
2.1.1 Celiuliozės acetato siūlų iš pirminių ir antrinių žaliavų gamybos scenarijų sistemos ribos ...	34
2.1.2 Sistemos ribų išplėtimas.....	34
2.2. Būvio ciklo vertinimo inventorinė analizė .....	36
2.3 Būvio ciklo poveikio vertinimas .....	39
2.4 Rezultatų interpretavimas ir jautrumo analizė.....	41
<b>3 Rezultatai</b> .....	<b>43</b>
3.1 Būvio ciklo vertinimo inventoriniai duomenys.....	43
3.2 Būvio ciklo vertinimo rezultatai .....	45
3.2.1 Celiuliozės acetato siūlų gamybos iš pirminių ir antrinių žaliavų scenarijų palyginimas .....	45
3.2.2 Scenarijų palyginimas nuo žaliavų iki atliekų tvarkymo .....	48
3.2.3 Scenarijų palyginimas keičiant perdirbtos tekstilės kiekį žaliavų sudėtyje .....	50
3.3 Jautrumo analizė .....	52
<b>Išvados</b> .....	<b>54</b>
<b>Literatūros sąrašas</b> .....	<b>56</b>
1 Priedas. A ir B scenarijų charakterizuoti ir normalizuoti duomenys.....	61
2 priedas. A1 ir B1 scenarijų charakterizuoti ir normalizuoti duomenys.....	63
3 priedas. C1–C5 scenarijų charakterizuoti ir normalizuoti duomenys.....	65
4 priedas. Jautrumo analizės charakterizuoti ir normalizuoti duomenys.....	69

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Pagrindinės aplinkosaugos problemos, susijusios su tekstilės gaminių būvio ciklo etapais	15
2 lentelė. Sistemingas pluoštų sąrašas ir jų apibūdinimas ir(ar) sudėtis	17
3 lentelė. Celiuliozės acetato siūlų gamybos inventoriniai duomenys pagal A ir B scenarijus.	37
4 lentelė. Celiuliozės acetato siūlų būvio ciklo pabaigos procesų inventoriniai duomenys A1 ir B1 scenarijams.	39
5 lentelė. Poveikio kategorijų trumpiniai naudojami pateikiant rezultatus	40
6 lentelė. Poveikio kategorijos ir reikšmė celiuliozės acetato siūlų būvio ciklo vertinime	41
7 lentelė. Celiuliozės acetato siūlų gamybos inventoriniai duomenys pagal A ir B scenarijus.	43
8 lentelė. Celiuliozės acetato siūlų būvio ciklo pabaigos procesų inventoriniai duomenys A1 ir B1 scenarijams.	44

## Paveikslų sąrašas

1 pav. Tekstilės gamybos grandinė [11].	13
2 pav. Tekstilės būvio ciklas, apimantis nuo žaliavų (lopšys) iki tekstilės atliekų šalinimo (kapas) arba perdirbimo į pluoštus įvairiais metodais (lopšys), įskaitant būvio ciklo vertinimo tyrimų įvesties ir išvesties duomenis [7].	15
3 pav. Tekstilės pluoštų pasaulinė produkcija [16].	18
4 pav. Regeneruotų pluoštų išgavimo seka [19].	19
5 pav. Celiuliozės acetato cheminės struktūros pakeitimo schema [22].	20
6 pav. Celiuliozės triacetato siūlų gamybos schema [25, 26].	21
7 pav. Acetato pluošto gamybos schema [26].	22
8 pav. Celiuliozės acetato suirimo schema [21].	23
9 pav. Celiuliozės acetato perdirbimo proceso schema [30].	25
10 pav. Neapdorotas miskantas (rMis), mechaniškai išgautas miskantas apdorotas tirpikliu DMSO, mažinančiu polifenolių ir lignino likučius (meMis_DMSO), mechaniškai išgautas miskantas apdorotas šarmu (meMis_NaOH) ir stiklo pluošto (GF) aplinkosauginio veiksmingumo palyginimas (1 kg funkciniam vienetai). Kiekvienoje kategorijoje aukščiausią balą surinkusi vertė lygi 100 % [41].	30
11 pav. Celiuliozės acetato gamybos indėlis į klimato kaitą (būvio ciklo vertinimo rezultatai) [41].	31
12 pav. Būvio ciklo vertinimo metodika remiantis standartais ISO 14040/44:2006 [42].	33
13 pav. Celiuliozės acetato siūlų gamybos būvio ciklo vertinimo sistemos ribos [41, 47].	34
14 pav. Išplėstos sistemos ribos (trumpinys CA siūlai schemoje yra celiuliozės acetato siūlai). ---	35
15 pav. Celiuliozės acetato siūlų gamybos schema [25, 26, 47].	37
16 pav. Celiuliozės acetato siūlų iš pirminių (A) ir antrinių (B) žaliavų scenarijų charakterizuotų duomenų santykinis poveikio kategorijų palyginimas (%).	46
17 pav. Galutinio poveikio kategorijų charakterizuotų rezultatų palyginimas tarp A ir B scenarijų: a) poveikis ištekliams (USD2013), b) poveikis žmonių sveikatai (DALY), c) poveikis ekosistemoms (species·yr), d) poveikio sumažėjimas (%).	47
18 pav. A ir B scenarijų normalizuotų galutinio poveikio kategorijų palyginimas.	48
19 pav. A1 ir B1 scenarijų charakterizuotų poveikio kategorijų palyginimas (%).	49
20 pav. Normalizuotų galutinio poveikio kategorijų poveikio padidėjimas B1 scenarijuje, lyginant su A1 scenarijumi (%).	49
21 pav. Perdirbtų žaliavų dalies (C1-C5 scenarijuose) įtaka charakterizuotų poveikio kategorijų reikšmėms, kai A1 scenarijus prilygintas 100 %.	50
22 pav. Galutinio poveikio kategorijų normalizuotų rezultatų palyginimas skirtinguose perdirbtų žaliavų proporcijų scenarijuose (C1-C5 scenarijuose).	51
23 pav. Optimizuoto B scenarijaus poveikio pokytis, lyginant su baziniu B scenarijumi (%).	52
24 pav. Optimizuoto B scenarijaus galutinio poveikio kategorijų pokytis, lyginant su baziniu B scenarijumi (%).	53

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

BCV – būvio ciklo vertinimas;

CH<sub>4</sub> – metanas;

CO<sub>2</sub> – anglies dioksidas;

DEHP – di(2-etilheksil)ftalatas;

DINP – diizononilftalatas;

GPGB – geriausi prieinami gamybos būdai;

H<sub>2</sub>O – vanduo;

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – sieros rūgštis;

KD – kietosios dalelės;

LOJ – lakieji organiniai junginiai;

NMMO – N-metilmorfolino-N-oksidas;

NO<sub>x</sub> – azoto oksidai;

PFAS – perfluoralkilo ir polifluoralkilo medžiagos;

PFOA – perfluoroktano rūgštis;

PFOS – perfluoroktano sulfonatas;

SO<sub>x</sub> – sieros oksidai;

ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos.

### Terminai:

**Acetilinimas** – cheminis procesas, kurio metu celiuliozės hidroksilo grupės pakeičiamos acetilo grupėmis, siekiant gauti celiuliozės acetatą.

**Acetilinimo laipsnis** – rodiklis, nusakantis, kokia dalis celiuliozės hidroksilo grupių yra pakeista acetilo grupėmis acetilinimo proceso metu.

**Diacetatas** – celiuliozės acetato rūšis, kuriai būdingas mažesnis acetilinimo laipsnis ir dalinai išlikusios hidroksilo grupės.

**Esterifikuota celiuliozė** – chemiškai modifikuota celiuliozė, kurios hidroksilo grupės reakcijos metu pakeistos esterio grupėmis.

**Triacetatas** – celiuliozės acetato rūšis, pasižyminti dideliu acetilinimo laipsniu, kai beveik visos hidroksilo grupės pakeistos acetilo grupėmis.

## Įvadas

Tekstilės pramonė yra viena sparčiausiai augančių pramonės šakų pasaulyje, tačiau ji yra ir viena iš didžiausių aplinkosauginius iššūkius keliančių pramonės sektorių. Tekstilės gamyba ir vartojimas daro reikšmingą poveikį klimato kaitai, vandens išteklių naudojimui bei energijos sąnaudoms, tačiau ypatingai – atliekų susidarymui. Remiantis Europos Komisijos duomenimis, tekstilės vartojimas užima ketvirtą vietą pagal neigiamą poveikį aplinkai ir klimato kaitai bei trečią vietą pagal vandens ir gamtinių išteklių naudojimą pasauliniu mastu. Nuo 2000 iki 2015 m. pasaulinė tekstilės gamyba padvigubėjo, o iki 2030 m. drabužių ir avalynės vartojimas prognozuojamas dar labiau augantis. Tuo pačiu didėja ir tekstilės atliekų kiekiai, kuriuos papildomai skatina greitosios mados tendencijos bei ribotos perdirbimo galimybės.

Siekiant mažinti tekstilės sektoriaus poveikį aplinkai, vis daugiau dėmesio skiriama žiedinės ekonomikos principams, tvarių žaliavų naudojimui ir regeneruotų pluoštų gamybai. Vienas iš tokių pluoštų yra celiuliozės acetatas – pusiau sintetinis pluoštas, gaminamas cheminiu būdu apdorojant natūralią celiuliozę. Šis pluoštas pasižymi geromis eksploatacinėmis savybėmis, plačiomis pritaikymo galimybėmis ir potencialiai mažesniu poveikiu aplinkai, ypač naudojant antrines žaliavas.

Pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio skiriama tekstilės atliekų perdirbimui ir antrinės celiuliozės panaudojimui naujų tekstilės gaminių gamyboje. Tačiau galutinis produkto poveikis aplinkai priklauso ne tik nuo žaliavos kilmės, bet ir nuo naudojamų technologinių procesų, energijos sąnaudų bei cheminių medžiagų naudojimo efektyvumo. Dėl šios priežasties būtina vertinti visą produkto būvio ciklą – nuo žaliavų paruošimo iki galutinio produkto gamybos.

Vienas plačiausiai taikomų metodų produkto poveikiui aplinkai vertinti yra būvio ciklo vertinimas (BCV). Ši metodika grindžiama ISO 14040/44:2006 standartais ir leidžia sistemingai įvertinti produkto poveikį aplinkai viso būvio ciklo metu. Šis metodas suteikia galimybę nustatyti didžiausią poveikį darančius procesus, palyginti skirtingus gamybos scenarijus ir įvertinti galimas poveikio mažinimo priemones.

Baigiamojo projekto tikslas - atlikti iš pirminių ir antrinių žaliavų (tekstilės atliekų) pagamintų celiuliozės acetato siūlų gamybos lyginamąjį būvio ciklo vertinimą, siekiant įvertinti ir palyginti jų poveikį aplinkai.

Uždaviniai:

1. atlikti mokslinės literatūros apžvalgą apie celiuliozės acetato siūlų technologinius gamybos procesus, žaliavas, jų kilmę bei poveikį aplinkai;
2. nustatyti nagrinėjamus scenarijus, sistemos ribas, funkcinių vienetą ir surinkti inventorinius duomenis būvio ciklo vertinimo atlikimui;
3. atlikti poveikio vertinimą pasirinktu metodu ir nustatyti pagrindinius aplinkosauginius poveikio aspektus;
4. atlikti jautrumo analizę.

## **1 Literatūros apžvalga**

### **1.1 Tekstilės sektorius žiedinės ekonomikos kontekste**

Tekstilė plačiai naudojama įvairiuose pramonės sektoriuose ir kasdienėje aplinkoje – drabužių gamyboje, patalpų ar įrenginių apstatymo gaminiuose, pavyzdžiui, balduose ir užuolaidose, automobilių salonuose, taip pat valymo priemonių gamyboje, filtravimo sistemose ir medicinos reikmenų gamyboje. Tradiciškai tekstilės ir drabužių pramonė daugelyje pasaulio regionų veikia pagal linijinį modelį „paimk-pagamink-išmesk“, kuris grindžiamas intensyviu žaliavų naudojimu ir ribotu medžiagų grąžinimu į gamybos ciklą. Dabar vis daugiau kalbama apie tai, kad dėl didelio vartojimo masto tekstilės sektorius daro reikšmingą poveikį aplinkai, todėl pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio skiriama šio sektoriaus tvarumo didinimui [1].

Europos Sąjunga siekia transformuoti šį sektorių pereinant prie žiedinės ekonomikos principų. Nuo 2015 m., kai buvo paskelbtas pirmasis žiedinės ekonomikos veiksmų planas, intensyviai ieškoma geriausių tekstilės pramonės strategijų, kaip vystyti pažangą darant mažesnę žalą aplinkai. Vadovaujantis Europos žaliuoju kursu ir Europos Sąjungos pramonės strategija, siekiama užtikrinti tvarų, klimatui neutralų, energiją ir išteklius taupantį bei gamtą tausojantį augimą, grindžiamą švarios ir žiedinės ekonomikos principais. Pagal šią viziją, iki 2030 m. Europos Sąjungos rinkoje tiekiami tekstilės gaminiai turėtų būti ilgaamžiai ir perdirbami, gamyboje turėtų būti plačiai naudojami perdirbti pluoštai, o toksiškos cheminės medžiagos neturėtų būti naudojamos siekiant geriausių socialinių ir aplinkosauginių interesų. Norint sukurti klestinčią ir inovatyvią tekstilės ekosistemą, būtinos pažangios technologijos, tokios kaip pluošto perdirbimas iš vieno į kitą lygiagrečiai sumažinant tekstilės atliekų deginimą ir šalinimą sąvartynuose iki minimumo. Šiems tikslams pasiekti reikia išsamių tyrimų ir technologinių inovacijų, kurios leistų kurti aplinkai draugiškesnius sprendimus visame tekstilės būvio cikle [2, 3].

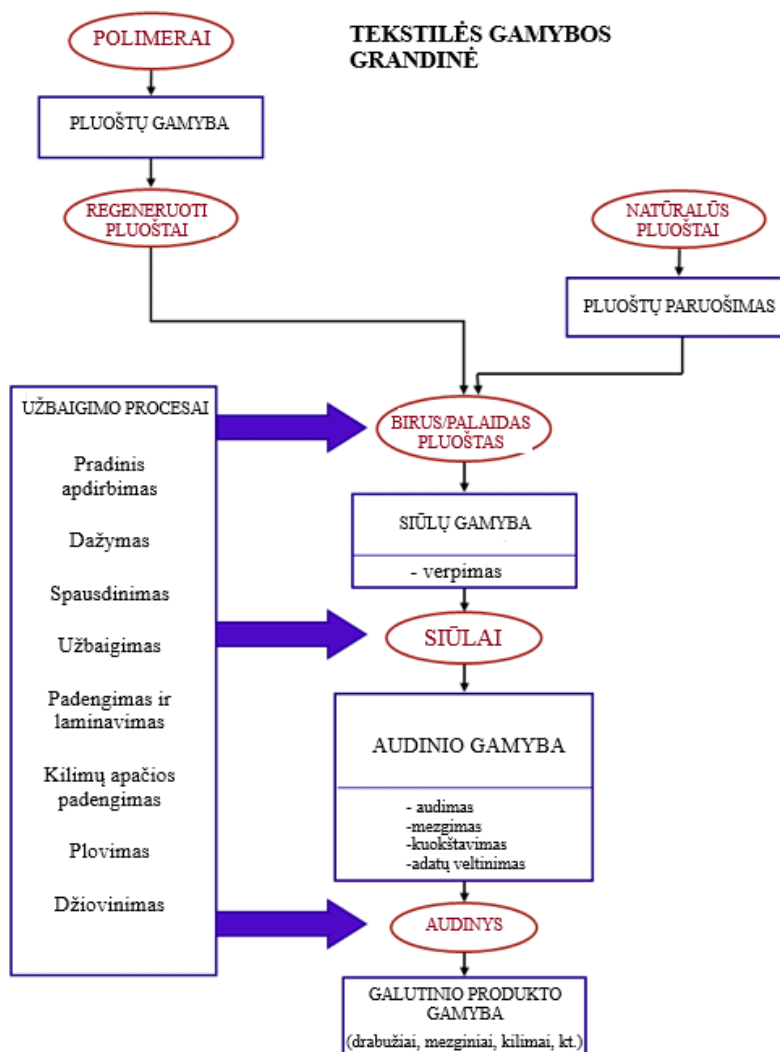
#### **1.1.1 Tekstilės pramonės reikšmė pasaulio ekonomikoje ir pagrindiniai aplinkosauginiai iššūkiai**

Tekstilės pramonė užima svarbią vietą pasaulio ekonomikoje. Tai viena iš reikšmingiausių tarptautinės prekybos sričių – tekstilės gaminiai yra septintoji pagal dydį pasaulyje prekiaujamų prekių grupė, o bendra tarptautinės prekybos apimtis siekia apie 882 milijardus JAV dolerių. Kinija šiuo metu yra didžiausia tekstilės produkcijos eksportuotoja pasaulyje – 2022 m. duomenimis, jos dalis sudarė 32,2 % viso pasaulinio tekstilės eksporto. Antroje vietoje – Bangladešas, eksportuojantis 6,13 % pasaulio tekstilės. Kitos reikšmingos eksportuotojos – Indija, Turkija ir Jungtinės Amerikos Valstijos, kurių kiekvienos indėlis į pasaulinį tekstilės eksportą sudaro po 5 % [4].

Visgi, pagrindinė tekstilės gamyba vyksta Kinijoje. Žinoma, kad Kinija, iš esmės, naudojami iškastinio kurio energija, kas ir padaro ją didžiausia šiltnamio efektą sukeliančių dujų (ŠESD) teršėja pasaulyje. Tuo tarpu Europa, kaip regionas, esanti antra eksportuotoja po Kinijos, turi branduolinę energiją ir atsinaujinančiąją energiją, todėl jos poveikis aplinkai yra mažesnis. Taigi, tekstilės pluošto gamybos poveikis aplinkai gali reikšmingai skirtis priklausomai nuo geografinės vietos ir naudojamų energijos šaltinių. Pavyzdžiui, Švedijoje naudojamas atsinaujinančios energijos derinys suteikia aplinkosauginių pranašumų, palyginti su regionais, kuriuose dominuoja iškastinis kuras, tokiais kaip Kinija [4, 5].

Pasaulinė tekstilės pramonė yra ketvirta pagal pirminių žaliavų ir vandens vartojimą po maisto, būsto ir transporto sektorių, taip pat penkta pagal ŠESD emisijas. Šis sektorius yra atsakingas už 8–10 % visų pasaulinių ŠESD emisijų ir taip reikšmingai prisideda prie klimato kaitos [6]. Prognozuojama, kad iki 2050 m. tekstilės sektoriaus indėlis į pasaulinio anglies dioksido (CO<sub>2</sub>) emisijas gali dar labiau išaugti. Kita vertus, skaičiavimai rodo, kad tekstilės atliekų pakartotinis naudojimas ir perdirbimas galėtų sumažinti pramonės emisijas net 55 %, pabrėžiant perdirbimo naudą [7]. Šiuo metu mažiau nei 1 % visos pasaulyje pagaminamos tekstilės perdirbama į naujus tekstilės gaminius [8, 9].

Kaip minėta, pagrindinis tekstilės pramonės sektoriaus iššūkis yra didelis ŠESD išmetimas į atmosferą per visą produkto būvio ciklą – nuo žaliavų paruošimo, gamybos ir transportavimo iki gaminių naudojimo bei susidariusių atliekų deginimo ar šalinimo sąvartynuose. Įvairiuose literatūros šaltiniuose ypač dažnai aptinkamas ir mokslininkų mėgstamas palyginimas – tekstilės pramonė visame pasaulyje išskiria apie 1,7 milijardo tonų CO<sub>2</sub> ir sudaro 10 % viso pasaulinio CO<sub>2</sub> emisijų, kas yra daugiau nei aviacijos ir laivybos pramonės emisijas sudėjus kartu (10). Be CO<sub>2</sub>, tekstilės pramonės procesuose taip pat išsiskiria sieros oksidai (SO<sub>x</sub>), azoto oksidai (NO<sub>x</sub>) ir kietosios dalelės (KD), susidarančios deginant iškastinį kurą energijai gauti tekstilės technologiniams procesams vykdyti. Šiems procesams reikalingos aukštos temperatūros vonios, garo generavimas, džiovinimas [11].



1 pav. Tekstilės gamybos grandinė [11].

Svarbu paminėti, kad tekstilės gamyboje dominuoja tarptautiniai srautai (kai žaliavos (apdirbtos ir neapdirbtos) importuojamos iš įvairių pasaulio šalių). Tekstilės pramonė išsiskiria ypač ilgomis ir sudėtingomis tiekimo ir gamybos grandinėmis (žr. 1 paveikslas). Tekstilės gamybos grandinėje ryškiausia įtaką aplinkai gali daryti sudėtingi pluoštų apdirbimo procesai. Apdirbimo procesai – pradinis apdirbimas, dažymas, spausdinimas, įvairūs užbaigimo procesai, padengimas ir laminavimas cheminėmis medžiagomis ir šių gaminių plovimas, džiovinimas. Visi šie procesai yra ypatingai imlūs energijai bei reikalauja didelio kiekio vandens. Šių procesų metu susidaro įvairūs taršos srautai, tokie kaip mikroplastikas, tekstilės atliekos bei cheminėmis medžiagomis ir dažais užterštos nuotekos [11].

Vertinant tekstilės pramonės poveikį aplinkai svarbu atsižvelgti ir į tai, kad tekstilės gamybos technologiniams procesams naudojamas labai didelis kiekis vandens. Apie 20 % pasaulinės pramoninių nuotekų taršos kyla iš tekstilės gamybos procesų, ypač iš pluoštų apdirbimo ir dažymo etapų [6]. Iš natūralių pluoštų per metus išplaunama 50 000-100 000 tonų priemaišų, o 200 000-250 000 tonų per metus sudaro druskos, skirtos apdoroti pluoštams gamybos metu [11]. Tekstilės skalbimo mašinų nuotekose daugiau nei 40 000 tonų sudaro sintetinių pluoštų atliekos nusėdančios su nuotekų dumblu [12], todėl dar viena rimta aplinkosauginė problema - mikroplastiko tarša. Tekstilės sektorius sudaro apie 35 % viso į vandenynus patenkančio pirminio mikroplastiko kiekio [6]. Taip pat būtina pažymėti dar vieną svarbią aplinkosaugos problemą – pesticidų ir insekticidų naudojimą tekstilės pluoštų auginimo metu [1]. Dideli pesticidų kiekiai naudojami natūralių pluoštų, pavyzdžiui, medvilnės, auginime, o gyvūninės kilmės pluoštų gamyboje papildomai naudojamos įvairios veterinarinės ir apsauginės cheminės medžiagos. Vėlesniuose pluoštų apdorojimo procesuose šios medžiagos gali prisidėti prie toksiškų junginių patekimo į tekstilės gamybos nuotekas [11].

### **1.1.2 Tekstilės sektoriaus iššūkiai būvio ciklo vertinimo požiūriu**

Būvio ciklo vertinimas (BCV) yra vienas iš labiausiai žinomų metodų, naudojamų sistemingam produkto ar paslaugų sistemos aplinkosauginių aspektų kiekybiniam vertinimui visais būvio ciklo etapais [13]. Visame tekstilės produkto būvio cikle ekologinis pėdsakas kinta priklausomai nuo tekstilės kokybės ir produkto būvio ciklo etapų [1].

1 lentelėje pateiktos apibendrintos pagrindinės aplinkosauginės problemos (pagal įtaką mažėjančia tvarka) tekstilės gaminio būvio ciklo atžvilgiu, pagrinde kylančios dėl linijinės ekonomikos modelio šiame sektoriuje. Dirbtinių (sintetinių) pluoštų gamyba, įvairūs apdirbimo procesai, plovimas ir džiovinimas – labai imlūs energijai. O didelis vandens ir cheminių medžiagų sunaudojimas prasideda nuo žaliavų auginimo etapo ir baigiasi apdorotų pluoštų plovimu. Kietosios atliekos, kaip aplinkosauginė problema, vertinama kaip po tekstilės produkto naudojimo susidariusi nebepanaudojama, neperdirbama atlieka. Nors ir tekstilės gamybos metu susidaro įvairių kietųjų atliekų. Ir žinoma, transportavimas, kuris neatsiejama žaliavų, cheminių medžiagų, ir tekstilės produktų transportavimo visame pasaulyje įvairiausiais būdais, problema. Jis vertinamas kaip tiesioginiai CO<sub>2</sub> išmetimai.

Vandens sunaudojimas ir užterštos nuotekos, kaip minėta, yra taip pat pagrindinė aplinkosauginė problema. Todėl svarbu paminėti, kad tekstilės pramonės geriausiuose prieinamuose gamybos būduose (GPGB) labai didelė dalis dėmesio skiriama tinkamam nuotekų valymui ir antriniam panaudojimui, taip uždarant vandens srautus tekstilės pramonėje [11].

**1 lentelė.** Pagrindinės aplinkosaugos problemos, susijusios su tekstilės gaminių būvio ciklo etapais [1].

Aplinkosauginės problemos	Didžiausią įtaką aplinkai turintys produkto būvio ciklo etapai
Energijos vartojimas	Dirbtinių pluoštų gamyba, verpalų gamyba, apdailos procesai, drabužių skalbimas ir džiovinimas naudojimo etape.
Vandens ir chemijos priemonių naudojimas	Pluošto auginimas, šlapias išankstinis apdorojimas, dažymas, apdaila ir skalbimas.
Kietosios atliekos	Daugiausia gaminių šalinimas pasibaigus jų būvio ciklui, tekstilės / drabužių gamyba.
Tiesioginiai CO <sub>2</sub> išmetimai	Transportavimas pasauliniu mastu išsklaidytose tiekimo grandinėse.

2 paveiksle pavaizduota tekstilės produkcijos būvio ciklo schema. Didžiausi poveikio aplinkai rodikliai tekstilės produkto būvio cikle yra įeinančios ir išeinančios iš būvio ciklo medžiagos, o tekstilės gaminių šalinimas arba deginimas yra esminė tekstilės gaminių būvio ciklo problema. Į būvio ciklą įtraukus antrinį panaudojimą, mechaninį ir cheminį perdirbimus, siekiant išgauti kokybiškas antrines žaliavas siūlų gamybai, įvestys ir išvestys turėtų mažėti, taip sumažinant poveikį aplinkai [7].



**2 pav.** Tekstilės būvio ciklas, apimantis nuo žaliavų (lopšys) iki tekstilės atliekų šalinimo (kapas) arba perdirbimo į pluoštus įvairiais metodais (lopšys), įskaitant būvio ciklo vertinimo tyrimų įvesties ir išvesties duomenis [7].

Apibendrinant tekstilės sektoriaus iššūkius būvio ciklo požiūriu, tekstilės poveikis aplinkai susidaro viso būvio ciklo metu – nuo žaliavų išgavimo iki atliekų tvarkymo. Todėl, siekiant žiedinės ekonomikos įgyvendinimo tekstilės sektoriuje, poveikio mažinimas turi apimti visus etapus, o ne tik atskiras gamybos grandis. Toliau nagrinėjamos galimybės šiam poveikiui mažinti, pereinant prie tvaresnių sprendimų.

### **1.1.3. Tvari tekstilė – poveikio aplinkai mažinimo galimybės**

ES tvarios ir žiedinės tekstilės strategijoje („COM(2022) 141 final“) numatytas tekstilės sektoriaus pertvarkymas, siekiant tvaraus ir žiedinio modelio iki 2030 m. Jame daugiausia dėmesio skiriama ilgaamžiškumui, perdirbimui, antriam pluošto naudojimui, pavojingų toksiškų medžiagų šalinimui ir socialinei atsakomybei per visą tekstilės būvio ciklą [2].

2023 m. atnaujintame GPGB orientaciniame dokumente, skirtame tekstilės pramonei pagal Pramoninių emisijų direktyvą 2010/75/ES (taršos integruotos prevencijos ir kontrolės), pateikiamos išsamios techninės rekomendacijos, kaip sumažinti aplinkos taršą visais tekstilės gamybos etapais – nuo pluošto apdorojimo iki galutinio produkto. GPGB dokumente siūlomi įvairūs metodai, kurie apima energijos vartojimo efektyvumo didinimą, švaresnių technologijų taikymą, vandens ir cheminių medžiagų sąnaudų mažinimą, nuotekų ir oro taršos kontrolės gerinimą. Priemonės yra tiesiogiai susijusios su tekstilės sektoriaus dekarbonizacija ir prisideda prie bendro Europos sąjungos tikslo – pasiekti klimato neutralumą iki 2050 m. [11].

Ankstesniame skyriuje aptarta, kad didžiausias poveikis aplinkai tekstilės pramonėje yra daromas audinių paruošimo, dažymo ir plovimo įrenginiuose, kuriuose naudojama daugiausiai energijos ir vandens (sunaudoto vandens pėdsakas gali būti įvertinamas net 87 % bendro vandens sunaudojimo). Dėl šių priežasčių technologiniai sprendimai, tokie kaip cheminių reagentų receptūros optimizavimas, procesų automatizavimas, energijos šaltinių modernizavimas ir pakartotinis išteklių, žaliavų, reagentų panaudojimas, gali reikšmingai prisidėti prie tvarios tekstilės gamybos įgyvendinimo. Tyrimai rodo, kad jei tekstilės pramonės įrenginiuose būtų įdiegti visi rekomenduojami GPGB, bendrą anglies pėdsaką būtų galima sumažinti 1,179 kg CO<sub>2</sub>eq/kg produkto, o tai atitinka 16,8 % sumažėjimą, o vandens sunaudojimą būtų įmanoma sumažinti net iki 68,5 % [14].

Kadangi tekstilės pramonė ir jos vartojimas įprastai priklauso linijiniam ekonomikos modeliui, žiedinės ekonomikos principai, tokie kaip atliekų susidarymo prevencija, antrinis panaudojimas, ilgaamžiško produkto kūrimas, medžiagų atgavimas gamybos procesų metu – yra esminiai siekiant sumažinti poveikį aplinkai. Tyrimai rodo, kad strategijos taikomos lėtai, o didžiausias dėmesys skiriamas medvilnei ir poliesteriui. Tačiau natūralioms bei mažiau paplitusioms medžiagoms dar trūksta tyrimų. Pagrindinę įtaką daro vartotojų nuostatos, technologijų trūkumas, kuriamų mišrių audinių sudėtingumas perdirbimo atžvilgiu, todėl švietimas ir sistemų permainos būtinos [15].

## **1.2 Tekstilės pluoštų įvairovė ir paplitimas**

Per pastaruosius dešimtmečius pasaulinė pluošto gamyba smarkiai išaugo. 1975 m. duomenimis buvo pagaminta 34 milijonų tonų pluošto, o 2021 m. siekė 113 milijonų tonų. Remiantis dabartiniu augimu, prognozuojama, kad 2030 m. gali siekti iki 149 milijonų tonų. Šį augimą daugiausia lemia sintetiniai pluoštai, ypač poliesteris, kurie sudaro didžiąją dalį visos gamybos apimties. Dėl šios priežasties, pramonė išlieka labai priklausoma nuo iškastinio kuro. Pavyzdžiui, 85 % poliesterio yra gaminama iš grynujų iškastinių žaliavų, o tik 15 % – iš perdirbto plastiko [16].

## 1.2.1 Natūralūs, sintetiniai ir pusiau sintetiniai (regeneruoti) pluoštai

Tekstilės gamyboje gali būti naudojama daugybė pluoštų. JAV federalinė prekybos komisija kartu su Tarptautine standartizacijos organizacija sudarė pluoštų sąrašą „Tekstilė – Dirbtiniai pluoštai – Bendriniai pavadinimai“ [17] ir 2 lentelėje pateikiamas daugiausiai naudojamų pluoštų skirstymas pagal kilmę. Iš esmės pluoštai yra kilę iš dirbtinių arba natūralių žaliavų. Dirbtinių pluoštų šaltinis daugiausia yra naftos produktai, o augalai, jų sėklos ir gyvūnai yra natūralių pluoštų šaltiniai.

**2 lentelė.** Sistemingas pluoštų sąrašas ir jų apibūdinimas ir(ar) sudėtis [17].

Šaltinis		Pluoštas	Apibūdinimas/sudėtis
Regeneruoti pluoštai	Celiulioziniai	Viskozė	Regeneruota celiuliozė; ≤15 % hidroksilo grupių pakeitimų.
		Modalas	Regeneruota celiuliozė, viskozės proceso modifikacija – didesnis stiprumas ir minkštumas
		Acetatas	Celiuliozės acetatas; ≥92 % acetilinta = triacetatas.
		Liocelis	Regeneruota celiuliozė, gaminama be cheminių reagentų
Natūralūs	Augaliniai	Žievės	Linai
		Lapų	Sizals, abaka
		Sėklų	Medvilnė
	Gyvūniniai	Plaukai	Vilna, kailis
		Šilkas	Tikrojo šilkverpio siūlai, gijos
Dirbtiniai	Naftos produktų	Akrilas	≥85 % akrilnitrilo vienetų sintetiniame polimere.
		Poliesteris	≥85 % pakeistos aromatinės karboksirūgšties esterio vienetų.
		Nailonas	Poliamidas, kuriame <85 % amidinių jungčių sujungtos su aromatiniais žiedais.

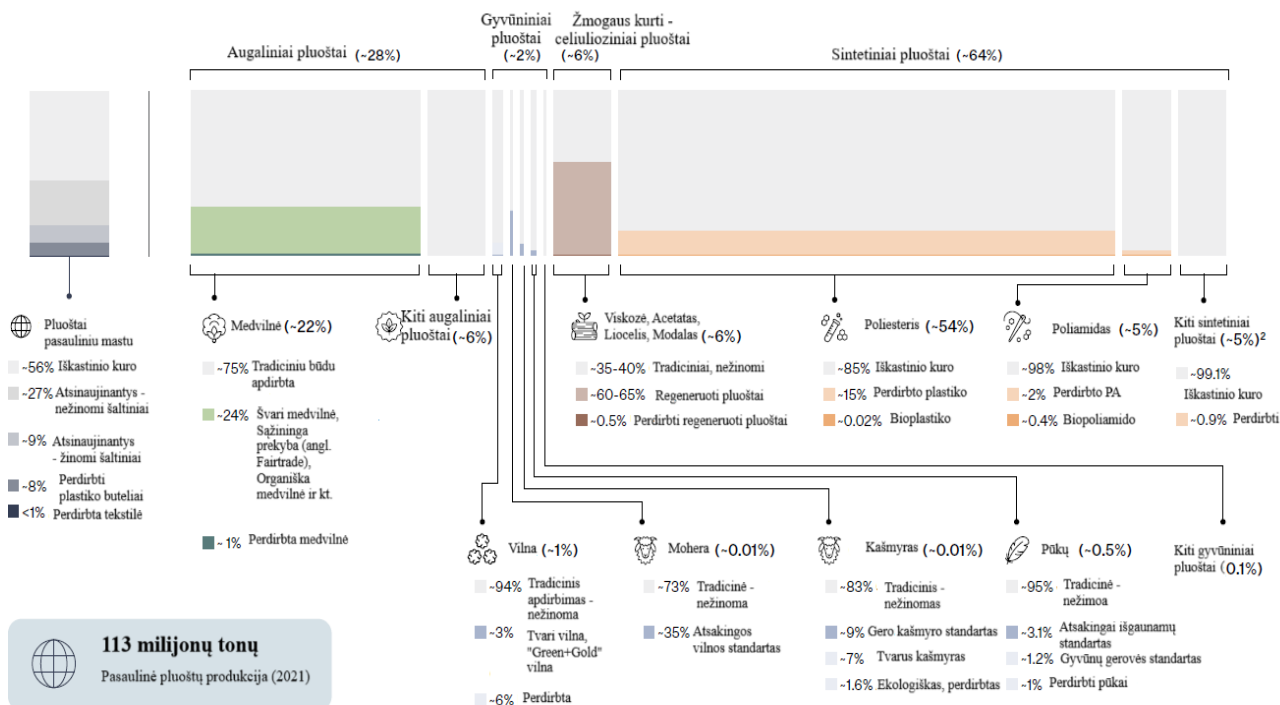
Tekstilė gaminama naudojant grynas natūralių ir sintetinių pluoštų formas ir derinius. Natūralūs pluoštai yra medvilnė, linas, šilkas ir vilna. Įprasti sintetiniai pluoštai yra akrilas, poliesteris, poliamidas (nailonas). Viskozė, modalas, liocelis ir acetatas patenka į atskirą natūralios kilmės pluoštų kategoriją, kurie yra chemiškai modifikuoti ir todėl vadinami „dirbtiniais“ arba „pusiau sintetiniais“, kurių pagrindinė žaliava yra celiuliozė. Pavyzdžiui, viskozės pluoštas, kuris daugiausia sudarytas iš natūralių medžiagų – pirmiausia medienos masės, – yra chemiškai apdorojamas, kad susidarytų dirbtinai modifikuoti celiuliozės pagrindu pagaminti pluoštai [12].

Poliesteris, kuris dažnai derinamas su medvilne, kad drabužis būtų patogus ir kuo ilgiau išliktų gera jo kokybė. Dėl šios priežasties poliesteris dominuoja sintetikos rinkoje dėl savo mažos kainos ir eksploatacinių pranašumų. Jis sudaro daugiau nei 60 % viso tekstilės sektoriuje sunaudojamo pluošto. Natūralūs pluoštai, pavyzdžiui, medvilnė, sudaro apie 25 %, o regeneruoti celiuliozės pluoštai dėl kad laikomi tvariais, turi potencialą augti tekstilės pramonėje [11].

Kaip minėta, pasaulinėje pluošto rinkoje dominuoja sintetiniai pluoštai, tokie kaip poliesteris ir poliamidas, bet tik 15 % poliesterio gaunama iš perdirbtų šaltinių, o didžioji dauguma (85 %) lieka iš iškastinio kuro [16]. Tai išryškina didelį iššūkį tekstilės pramonės tvarumo pastangoms, ypač didinant perdirbtų ir atsinaujinančių medžiagų naudojimą.

2021 m. duomenimis iš visų paruoštų pasaulinės produkcijos 113 milijonų tonų tekstilės pluoštų apie 56 % pagaminama iš iškastinio kuro (3 paveikslas). Tuo tarpu apie 27 % pagamintų pluoštų sudaro pluoštai, pagaminti iš atsinaujinančių šaltinių, tačiau nėra duomenų apie jų kilmę. Tik apie 9 % sudaro pluoštai iš atsinaujinančių šaltinių, kurių kilmė žinoma. Įdomu tai, kad tarp šių pasaulio pluošto kiekių įsiterpia pluoštai iš perdirbto plastiko butelių, kurie sudaro 9 %, tačiau mažiau nei 1 % viso pluoštų gamybos kiekio tenka perdirbtai tekstilei. Sintetiniai pluoštai, iš kurių 54 % yra poliestesis, sudaro didžiausią dalį pasauli pasaulinėje pluoštų gamyboje – 64 %, o 85 % jų pagaminta iš iškastinio kuro, o tik 15 % iš perdirbto poliesterio, kai tuo tarpu tik 0,02 % sudaro bioplastikai.

Taip pat iš visų pasaulyje naudojamų pluoštų, 2021 m. duomenimis, apie 28 % sudaro augaliniai pluoštai, iš kurių didžiausia dalis (apie 22 %) tenka medvilnės pluoštams. Svarbu paminėti, kad tik 1% medvilnės pluošto perdirbama. Gyvūniniai pluoštai sudaro 2 % ir kiekvienos rūšies perdirbama taip pat apie 1 %. O štai žmogaus sukurti – celiulioziniai pluoštai (tokie kaip viskozė, acetatas, liocelis ir modalas), sudaro apie 6% viso pasaulio pluoštų gamybos. Iš jų 60-65 % yra regeneruoti, o perdirbti tik 0,05 %.



3 pav. Tekstilės pluoštų pasaulinė produkcija [16].

Nors regeneruoti pluoštai sudaro labai mažą dalį pasaulio pluoštų gamybos, regeneruotas pluoštas, toks kaip liocelis, vertinamas kaip daug žadantis pluoštas dėl to, kad jo gamyboje nėra naudojamos pavojingos cheminės medžiagos. Tačiau celiuliozės acetatui pagaminti reikia papildomų cheminių medžiagų ir specialių sąlygų [11].

Tekstilės pluoštų gamybos poveikis aplinkai priklauso nuo daugelio dalykų. Pirmiausia kaip auginamas pluoštas, kokios papildomos auginimo priemonės naudojamos ir kaip po to pluoštas apdorojamas patekęs į gamybą. Tekstilės pluoštai apdorojami įvairiomis druskomis, padidinančiomis plotą medžiagomis, aliejais, paviršinio aktyvumo medžiagomis, organiniais tirpikliais ir įvairiomis pagalbinėmis medžiagomis, kurios daugiau ar mažiau turi ekotoksikologinį poveikį. Visgi didžiausia dalis kenksmingų aplinkai ir žmogui medžiagų į aplinką gali patekti iš pluoštų klijavimo, paruošimo ir natūralių medžiagų esančių kaip pluoštų priemaišos [11].

Apibendrinant galima sakyti, kad pluoštų pasirinkimas ir jų apdorojimo technologijos yra vieni svarbiausių veiksnių vertinant tekstilės poveikį aplinkai.

### 1.2.2 Regeneruoti pluoštai

Tekstilės pramonėje regeneruoti pluoštai sulaukia vis daugiau dėmesio dėl jų potencialo derinti eksploatacines savybes su mažesniu poveikiu aplinkai. Regeneruoti pluoštai gaminami cheminiais procesais transformuojant celiuliozės turinčias žaliavas į tirpalus, iš kurių, taip pat naudojant įvairius cheminius procesus, vėliau formuojami pluoštai. Dažniausiai naudojamos žaliavos yra medienos masė, medvilnės pūkeliai ar tekstilės atliekos, kurie įprastai laikomi mažesnės vertės biomasės šaltiniais [18].



4 pav. Regeneruotų pluoštų išgavimo seka [19].

4 paveiksle grafiškai pavaizduota regeneruoto pluošto išgavimo seka. Regeneruoto pluošto gamyboje dažniausiai naudojama tirpalo verpimo technologija. Šio proceso metu celiuliozė ištirpinama tam tikruose tirpikliuose gaunant celiuliozės polimerų tirpalus, kurie vėliau įvairiais, įprastai šlapio ar sauso-šlapiojo verpimo arba elektroverpimo, metodais suverpiami į pluoštus. Kiekvienas metodas turi įtakos gautų pluoštų struktūrai, gijų išsidėstymui ir paties pluošto stiprumui. Pavyzdžiui, sausojo-šlapiojo verpimo technologija leidžia pasiekti geresnę pluoštų orientaciją ir didesnę mechaninį stiprumą [18].

Celiuliozės pagrindu pagaminti regeneruoti pluoštai plačiai naudojami tekstilės pramonėje dėl savo minkštumo, kaip minėta, gerų mechaninių savybių, tačiau jų gaminimo technologijos pasižymi skirtingais aplinkosauginiais poveikiais. Pavyzdžiui, liocelio gamyboje naudojamas netoksiškas tirpiklis N-metilmorfolino-N-oksidas (NMMO), kuris laikomas mažiau toksišku nei viskozės gamyboje naudojami tirpikliai. Tačiau liocelio gamybos proceso metu reikalingos aukštesnės temperatūros ir specifinės technologinės sąlygos. Dėl šios priežasties moksliniuose tyrimuose dažniau analizuojami alternatyvūs tirpikliai, tokie kaip joniniai skysčiai arba šarmų ir karbamido sistemos, siekiant sumažinti technologinių procesų poveikį aplinkai, nors vis dar kyla iššūkių, susijusių su kaina ir pačių pluoštų mechaninėmis savybėmis [18].

Pastaruoju metu ypatingai daug dėmesio skiriama tirti alternatyvių žaliavų naudojimui regeneruotų pluoštų gamyboje. Tiriamos tokios medžiagos kaip bakterinė celiuliozė, žemės ūkio atliekos ir net baltymų pagrindu pagamintos medžiagos, tokios kaip kazeinas ar keratinas. Šių žaliavų panaudojimas gali prisidėti prie efektyvesnio biologinių išteklių naudojimo ir mažinti atliekų susidarymą tekstilės gamybos grandinėje [18].

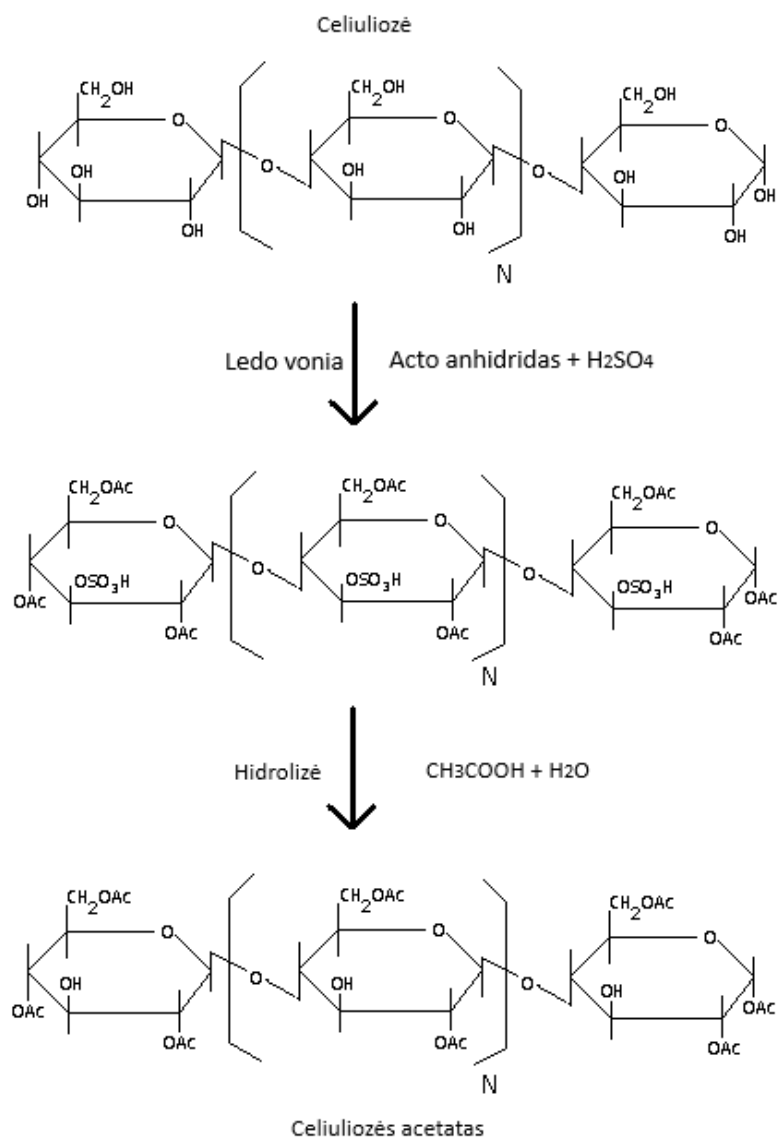
### 1.3 Celiuliozės acetatas - savybės, gamyba

Celiuliozės acetatas yra vienas pirmųjų chemiškai modifikuotų biopolimerų, atsiradusių XIX a. pabaigoje, tiksliau pirmą kartą susintetintas 1865 m Prancūzijoje naudojant acto anhidridą. Pirmojo pasaulinio karo metu prasidėjo pramoninė celiuliozės acetato gamyba, kai buvo gaminamas nedegus

lakas, naudojamas lėktuvų sparnų audiniams padengti. Vėliau celiuliozės acetatas buvo įvertintas kaip šilko pakaitalas tekstilės pramonėje ir buvo pradėtas naudoti sportinių, apatinių, pamušalų, marškinių, kaklaraiščių ir namų tekstilės audinių gamybai [20].

### Gamyba ir savybės

Celiuliozės acetato polimeras gaminamas acetilinant gryną celiuliozę, įprastai išgaunamą iš medienos masės. Celiuliozės acetato gamyboje acetilinimas yra celiuliozės molekulės hidroksigrupių (-OH) pakeitimas acetilo grupėmis. Principinė celiuliozės acetilinimo reakcija pavaizduota 5 paveiksle. Grynos, natūralios celiuliozės grandinėje esančios hidroksigrupės (-OH) reaguoja su acto anhidridu ledo vonioje (žemoje temperatūroje, siekiant išvengti nepageidaujamų reakcijų), kai reakcijos katalizatorius yra sieros rūgštis ( $H_2SO_4$ ), ir susidaro visiškai acetilintas tarpinis produktas, kuriame dauguma hidroksigrupių pakeistos acetilo grupėmis (-OAC). Šis pakeitimas yra vadinamas acetilimo laipsniu (arba pakeitimo), kuris parodo celiuliozės acetato kokybę ir lemia celiuliozės acetato produkto savybes, tokias kaip termoplastiškumas, kuris suteikia produktui tvirtumo ir atsparumo nepalankioms sąlygoms [21].

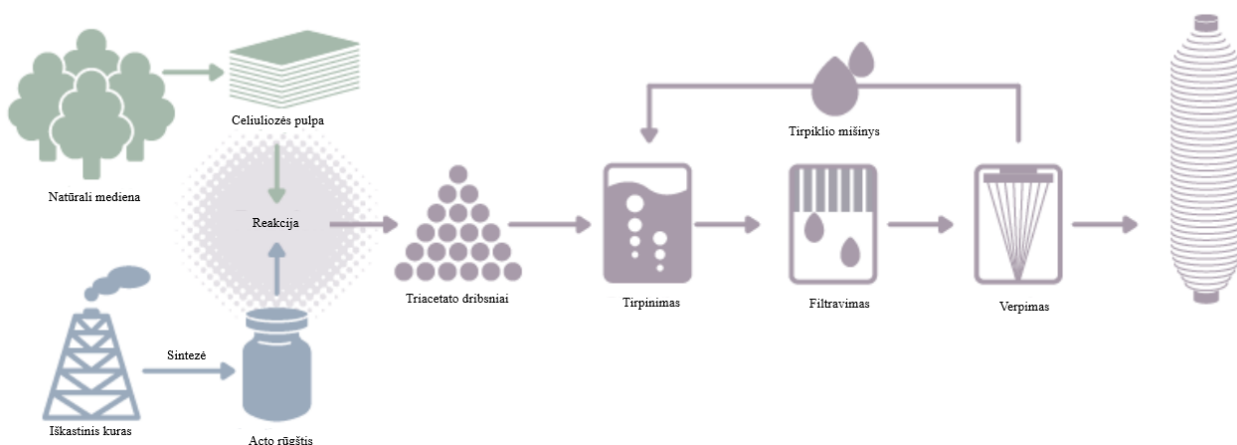


5 pav. Celiuliozės acetato cheminės struktūros pakeitimo schema [22].

Nagrinėjant celiuliozės acetato savybes, svarbu atkreipti dėmesį į minėtą acetilavimo laipsnį, kuris ne tik nulemia celiuliozės acetato savybes, bet ir parodo jo kokybę. Remiantis acetilavimo laipsnio skirtumais, celiuliozės acetatas skirstomas į diacetatą ir triacetatą. Diacetatas yra dalinai esterifikuota celiuliozė (pakeitimo laipsnis 2,2-2,5) ir lengvai tirpsta acetone, todėl naudojamas klasikinėje sauso verpimo technologijoje. Triacetato pakeitimo laipsnis 3,0 – tai yra visiškai acetilintas polimeras. Diacetatas naudojamas tekstilėje, tabako filtrų pramonėje, o triacetatas, dėl savo didesnio cheminio stabilumo ir kitokių tirpumo savybių naudojamas membranoms gaminti – elektronikos, optikos ir kitose aukštųjų technologijų srityse [23].

Acetilavimo etape celiuliozės molekulėje lieka katalizatoriaus junginių (pavyzdžiui,  $-\text{OSO}_3\text{H}$ ), būdingų acetilavimo tarpinėms formoms. Toliau atliekama hidrolizė, kurios metu į mišinį įvedamas vanduo. Hidrolizės metu sumažinamas acetilavimo laipsnis, nes dalis acetilo grupių pašalinama, o jų vietoje atsistato tam tikras  $-\text{OH}$  grupių kiekis bei išsiskiria acto rūgštis. Taip susidaro celiuliozės acetatas, kuriame dalis celiuliozės hidroksigrupių pakeistos acetilo grupėmis, nulemiančiomis celiuliozės acetato tirpumą organiniuose tirpikliuose. Celiuliozės acetato pluošto gamyboje dažniausiai naudojamas tirpiklis yra acetonas, kuris pluoštui suteikia termoplastines savybes, lengvą ir gerą formavimą, galimybę gaminti plėveles ir membranas [22].

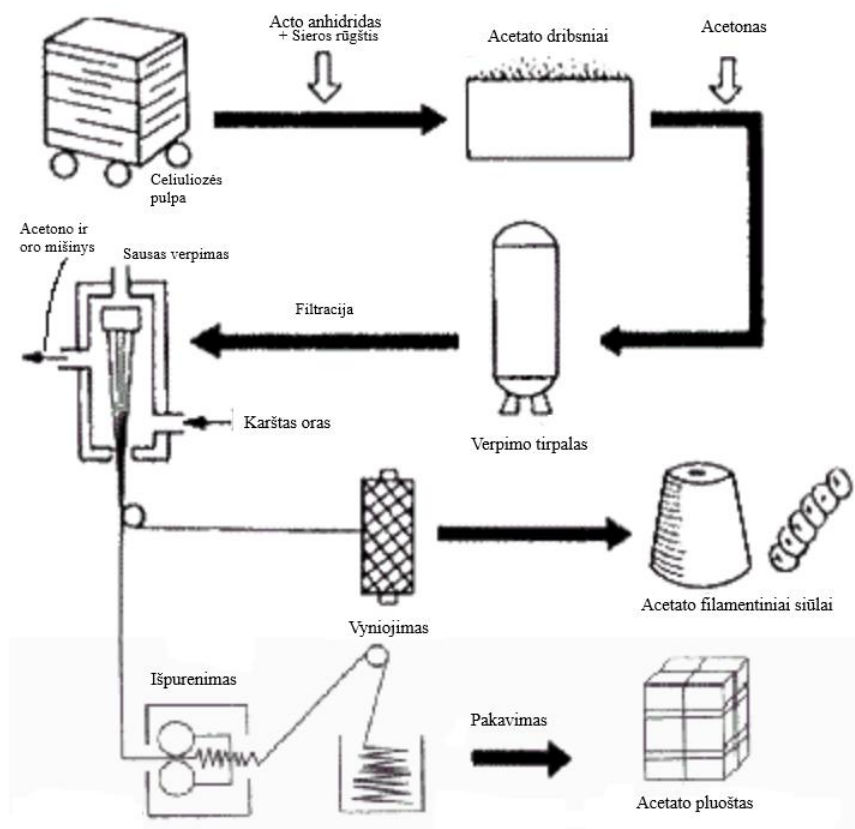
6 paveiksle pavaizduota principinė celiuliozės acetato pluošto gamybos schema, kuri plačiai naudojama įvairiuose literatūros šaltiniuose kaip labiausiai atspindinti celiuliozės acetato pluošto gamybos esmę. Šioje schemoje parodoma, kad įprastai gamyba pradedama celiuliozės (medienos) masę paveikiant acto rūgštimi (atkreipiant dėmesį, kad ji susintetinama naudojant iškastinį kurą). Taip susidaro triacetato dribsniai, kurie ištirpinami, filtruojami ir suverpiami į gijas, kurios gali būti paverčiamos pluoštu. Schemoje parodyta, kad tirpiklio mišinys po verpimo gražinamas į tirpinimą, todėl galima sakyti, kad aplinkosauginiu požiūriu, verpimo procesas yra uždaras ir gamybos metu susidarę tirpalo su celiulioze mišiniai yra panaudojami dar kartą tiems patiems procesams vykdyti [24].



**6 pav.** Celiuliozės triacetato siūlų gamybos schema [25, 26].

Kadangi šiuo tyrimu siekiama išsiaiškinti celiuliozės acetato siūlų gamybos ypatumus, 9 paveiksle pavaizduota dažniausiai moksliniuose tyrimuose naudojama ir aprašoma celiuliozės acetato siūlų gamybos principinė schema, kurioje gaminamas diacetatas naudojant organinį tirpiklį acetoną. Šiame gamybos procese naudojama speciali sauso verpimo technika, kai į verpimo kamerą paduodant karštą orą iš verpimo tirpalo išgarinamas acetono ir oro mišinys [26].

Šioje schemeje, palyginus su 7 paveiksle pateikta celiuliozės triacetato siūlų schema, detaliau parodyta tirpalo verpimo eiga. Verpimo tirpalas yra filtruojamas ir paduodamas į verpimo įrenginį, kuriame naudojant karštą orą išgarinamas acetonas iš verpimo tirpalo. Karštas oras leidžia celiuliozės acetatą suverpti į nenutrūkstamas gijas, kurios toliau arba vyniojamos į filamentinius siūlus, arba išpurenamos taip pagaminant celiuliozės acetato pluoštą.



7 pav. Acetato pluošto gamybos schema [26].

Literatūroje pažymima, kad viena iš pagrindinių problemų, lemiančių celiuliozės acetatų pluoštų kokybę, yra acetone netirpių dalelių buvimas verpimo tirpale. Šios dalelės sumažina tirpalo filtracijos efektyvumą, didina verpimo įrangos kapiliarų užsikimšimo riziką ir gali sukelti pluošto nutrūkimą. Ši problema išryškėja tada, kai celiuliozės acetatas gaminamas iš žemesnės kokybės celiuliozės, turinčios daugiau priemaišų. Atlikto naujausio tyrimo metu nustatyta, kad netirpios priemaišos susidaro iš nepakankamai acetilintos kristalinės celiuliozės ir mažų likusių hemiceliuliozių kiekių. Acetone netirpios dalelės pasižymi gerokai didesne molekuline mase nei celiuliozės acetatas ir išlaiko panašumą į pradinės acetilinio naudojamos celiuliozės pulpos kristalinę struktūrą. Priemaišų buvimą parodo pakeitimo laipsnis, kuris yra 1,13-1,41, žymiai mažesnis už celiuliozės acetato 2,27-2,58. Minėto tyrimo rezultatai rodo, kad siekiant riboti netirpių dalelių susidarymą būtina tiksliau valdyti acetilimo procesą, užtikrinti tolygesnę reakcijos eigą ir naudoti aukštos kokybės žaliavą. Tolimesniuose tyrimuose siūloma didesnę dėmesį skirti žaliavos paruošimo bei aktyvinimo procedūroms, kad būtų padidintas celiuliozės reaktyvumas ir pagerintos galutinio celiuliozės acetato produkto formavimo savybės bei kokybė [23].

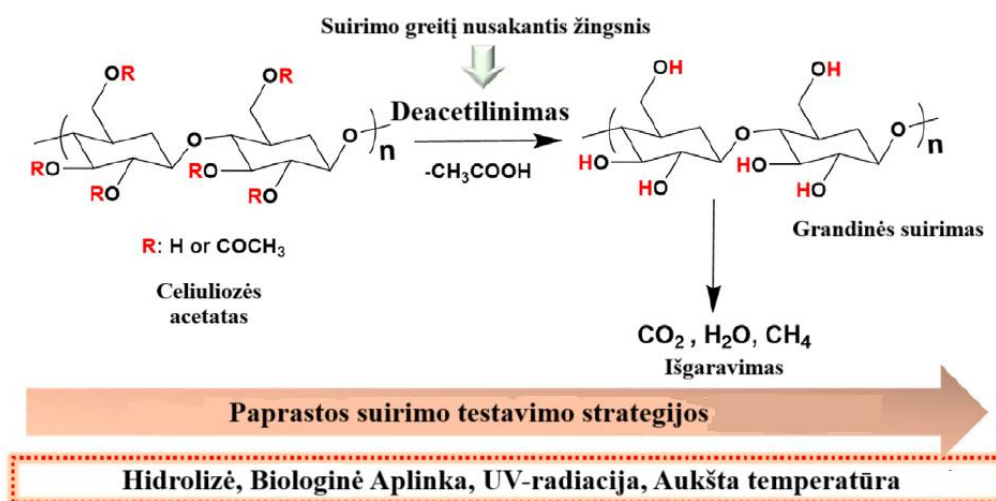
Vertinant aplinkosauginiu požiūriu – celiuliozės acetatas iš visų pluoštų išsiskiria kaip pluoštas, kuris sukurtas iš atsinaujinančių išteklių ir biologiškai skaidžių medžiagų, todėl poveikis aplinkai yra

mažesnis nei tradicinių sintetinių iškastinio kuro polimerų. Tekstilės pramonėje jis dažnai naudojamas lengviems ir kvėpuojantiems audiniams gaminti, kurie suteikia natūraliems pluoštams būdingą minkštumą ir švelnumą. Tyrėjai Siqi ir Feng Zhang [27], atliko tyrimą, kurio metu nustatė, kad celiuliozės acetatas yra tinkamas gaminti hierarchine porų struktūra pasižyminčią tekstilę, padengtą celiuliozės acetatu. Šis technologija audiniui suteikia saulės šviesos atspindėjimo galimybę ir oro pralaidumą, dėl įvairaus dydžio mikroporų. Šie tyrėjai nustatė, kad medžiaga vėsina odos paviršių, lėtina ledo tirpimą ir yra atspari mechaniniam poveikiui, todėl tinkama praktiniam naudojimui [27].

Taip pat, kalbant apie šiuolaikines technologijas ir aplinkosaugines problemas, celiuliozės acetatas gali būti panaudojamas ir aplinkosauginiuose sprendimuose. Vienas iš jų celiuliozės acetato/hidroksiapatito kompozito galimybė adsorbuoti bisfenolį A iš užteršto vandens. Šis kompozitas pasižymi plėvelės suformavimu, geru elastingumu ir stipria tarpmolekuline sąveika, dėl to gali būti panaudojamas vandens valymo technologijose [28].

### Biologinis skaidumas

Celiuliozės acetatas laikomas ekologišku pluoštu, kas labai aktualu šiuo metu siekiant tvarios tekstilės gamybos tikslo. Jo biodegradacija yra šiuo metu tiriama ir nėra vieningos nuomonės apie jo produktų visišką suirimą natūralioje aplinkoje. Mokslininkai ieško būdų, kaip sukurti tokias celiuliozės acetato formas, kurios užtikrintai suirtų tam tikroje terpėje, pavyzdžiui, komposte, dirvožemyje ar jūrinėje aplinkoje. Pasak Yadav ir Hakkarainen [21], celiuliozės acetato skaidymąsi natūralioje aplinkoje lemia įvairūs vidiniai ir išoriniai veiksniai: acetilinimo laipsnis (kuo didesnė acetilo grupių koncentracija, tuo atsparesnis celiuliozės acetatas degradacijai), kristališkumas, molinė masė, teršalai, fermentų aktyvumas ir konkrečios aplinkos sąlygos (temperatūra, drėgmė, pH, saulės šviesa, deguonies, maisto medžiagų ir mikroorganizmų prieinamumas). Todėl norint tinkamai įvertinti celiuliozės acetato pluošto suirimo galimybes, pirmiausiai reikia atkreipti dėmesį į jo struktūrą ir molekulinis pokyčius (žr. 8 paveikslas), nes tikrasis biologinis suirimas vertinamas pagal organinės medžiagos suirimą iki CO<sub>2</sub>, vandens (H<sub>2</sub>O) ir metano (CH<sub>4</sub>) bei mikrobinės biomasės [21].



8 pav. Celiuliozės acetato suirimo schema [21].

Celiuliozės acetato suirimo schemeje parodyta, kad celiuliozės acetato suirimo procese, deacetylinimas yra laikomas ribojančiu veiksniu (žingsniu). Deacetylinimas priklauso nuo šių sąlygų (testavimui taikomų strategijų): hidrolizė, įprasta biologinė aplinka, UV spinduliuotė ir aukšta

temperatūra. Šiose sąlygose celiuliozės acetato pluoštas turėtų suirti į CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O ir CH<sub>4</sub>. Celiuliozės acetato acetilinimo laipsniui esant žemesniam (apie 1,5–1,85) pluoštas gali būti biologiškai suskaidomas komposto sąlygomis (net 80 % pluošto mineralizuojasi iki CO<sub>2</sub>), o didesnio acetilinimo laipsnio (>2,5) – suyra lėčiau ar visai nesuyra [21].

Celiuliozės acetatas pastaraisiais metais naudojamas pakuočių gamyboje ir turi biologinio skaidumo savybę, todėl tampa alternatyva įprastoms plastikinėms pakuotėms [29]. Dėl netoksiškumo ir galimybės suirti natūralioje aplinkoje, celiuliozės acetatas taikomas ir tose srityse, kur reikia vienkartinės, bet biologiškai suyrančios medžiagos – pavyzdžiui, medicinoje (vaistų gamyboje, žaizdų tvarstymo medžiagose bei medicininiuose implantuose) [29, 30].

Taigi, kalbant apie celiuliozės acetato siūlų ekologiškumą ir biologinį skaidumą, galima daryti preliminarią išvadą, kad celiuliozės acetatas, kuris pasižymi termoplastiškumu, tvirtumu ir atsparumu aplinkos sąlygoms, jis bus neskaidus biologiškai dėl didelio acetilinimo laipsnio. Todėl siekiant sugeneruoti celiuliozės acetato pluoštą, turintį savybę suirti natūralioje (ar kompostavimo) aplinkoje, reikia tolimesnių tyrimų, kadangi šiuo metu viena iš didžiausių aplinkosauginių problemų yra tekstilės atliekos. Tai reikalauja dar didesnio mokslininkų dėmesio. Tekstilės atliekų, įskaitant ir regeneruotų pluoštų, perdirbimas yra vienas iš pagrindinių tyrimų objektų visoje pasaulinėje tekstilės rinkoje ir pramonėje.

#### **1.4 Tekstilės atliekų perdirbimas**

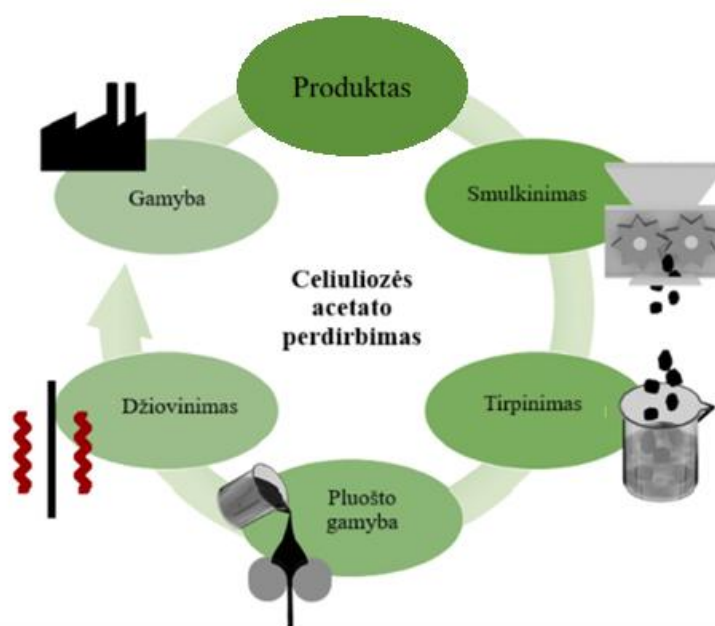
Šiuo metu mažiau nei 1 % tekstilės atliekų perdirbama į naujus drabužius, nors kasmet pasaulyje pagaminama mažiausiai 53 mln. tonų pluošto [31]. Europos Sąjungoje kasmet susidaro apie 7–7,5 mln. tonų tekstilės atliekų, iš kurių tik 30–35 % surenkama atskirai, o į naujus pluoštus grąžinama mažiau nei 1 % [32]. Tekstilės atliekų perdirbimas tampa viena svarbiausių žiedinės ekonomikos kryptų tekstilės sektoriuje. Šiuolaikinė tekstilės atliekų perdirbimo praktika vis dažniau orientuojasi į uždarnosios ciklinės sistemos kūrimą. Ši sistema paremta naudotų medvilnės tekstilės atliekų pavertimu nauju regeneruotu pluoštu. Kitaip sakant, siekiama sukurti tokią sistemą, kurioje iki 90 % pasaulinių tekstilės atliekų būtų techniškai įmanoma perdirbti, o ne nukreipti į sąvartynus ar deginimą [7].

Didžiausią iššūkį kelia mišrūs pluoštai, ypač poliesterio ir medvilnės audiniai, kurie dominuoja rinkoje ir negali būti efektyviai perdirbami vien mechaniniu būdu. Pluoštai yra stipriai susipynę struktūroje, todėl cheminiams reagentams sunku juos pasiekti, o atskyrimo efektyvumas mažėja. Mechaninis perdirbimas sąlygoja pluošto trumpėjimą bei kokybės praradimą, todėl perdirbtą tekstilę būtina maišyti su pirminiais pluoštais. Šiuo metu itin aktuali naujų technologijų plėtra tekstilės sektoriuje, kurios leistų efektyviai apdoroti mišrius audinius ir atgauti aukštos kokybės celiuliozė, užtikrinant tekstilės sektoriaus tvarumą ir mažinant priklausomybę nuo pirminių žaliavų [31].

Tekstilės atliekų perdirbimo srityje taikomos žaliosios technologijos, leidžiančios ne tik atskirti pluoštus, bet ir regeneruoti proceso metu naudojamas chemines medžiagas. Naujausi tyrimai rodo, kad taikant rūgštinį apdorojimą galima efektyviai pašalinti dažus ir tekstilės apdorojimo chemines medžiagas, o gauta celiuliozė pasižymi tinkamomis mechaninėmis savybėmis tolesniam panaudojimui, pavyzdžiui, tekstilės siūlų gamyboje. Svarbu tai, kad naudojamos rūgštys ir tirpikliai gali būti regeneruojami ir pakartotinai naudojami, taip sumažinant žaliavų poreikį ir susidarančių atliekų kiekį, o tai didina proceso ekonominę ir aplinkosauginę efektyvumą [33].

### 1.4.1 Celiuliozės atgavimas iš tekstilės atliekų

Tyrimai parodė, kad celiuliozės acetatas gali būti sėkmingai gaminamas iš tekstilės atliekų, ypač iš 100 % medvilnės audinių. Homogeninis acetilinimas, kuris yra tradicinis celiuliozės apdorojimo būdas, suteikia galimybę medvilnės tekstilės atliekas paversti į naują pluoštą, tinkamą naujos tekstilės gamybai. Šio proceso metu, kaip ir minėta ankstesniuose skyriuose apie celiuliozės acetato gamybą, smulkiai supjaustytos panaudotos tekstilės atliekos mirkomos ledinėje acto rūgštyje (žr. 9 paveikslas), o po to, panaudojant acto rūgšties anhidridą ir sieros rūgšties mišinį, išgaunama celiuliozės acetato masė. Ji išplaunama distiliuotu vandeniu, džiovinama, ir gali būti naudojama kitų produktų gamybai [34].



9 pav. Celiuliozės acetato perdirbimo proceso schema [30].

Viena iš sparčiai vystomų technologijų – nanoceliuliozės gamyba iš antrinių celiuliozės šaltinių, tokių kaip perdirbtas popierius ar tekstilė. Tokie pluoštai dėl savo biologinės kilmės, biologinio skaidumo ir mechaninių savybių, leidžia juos naudoti kaip sutvirtinančius komponentus biokompozitams, pakuotėms ar tekstilės gaminiams. Lyginant celiuliozės nanopluoštą, pagamintą iš perdirbtos celiuliozės, su pagamintu iš pirminės žaliavos, nustatyta, kad nanoceliuliozės gamyba iš perdirbto pluošto reikalauja mažiau energijos. Perdirbtos žaliavos atveju, gamybos procese energijos sąnaudos yra maždaug 7 % mažesnės nei apdorojant pirminę medienos masę. Tai gali būti laikoma reikšmingu privalumu, nes energijos poreikis yra vienas didžiausių nanoceliuliozės gamybos komponentų [35].

Mikrostruktūrinė analizė parodė, kad iš perdirbtos žaliavos išgauta nanoceliuliozė pasižymi labai panašiais parametrais kaip ir iš pirminio pluošto pagaminta nanoceliuliozė. Tai reiškia, kad perdirbtos kilmės pluoštai geba išlaikyti aukštą kokybę net po pakartotinio naudojimo ciklą ir gali būti tinkami tekstilės pluoštų stiprinimui ar naujų kompozitų formavimui. Galima teigti, kad perdirbtos žaliavos pagrindu pagaminta nanoceliuliozė ženkliai gerina galutinio produkto mechanines savybes. Nanoceliuliozės technologijos tyrimo metu į suformuotus lakštus įdėjus 20 % perdirbto pluošto nanoceliuliozės, jų tempiamasis stipris padidėjo beveik dvigubai: nuo 30 Nm/g iki 55 Nm/g. Tokie

rezultatai rodo didelį sutvirtinimo potencialą tekstilės pramonėje, ypač gaminant plonesnius ar mažiau žaliavų reikalaujančius audinius ir kompozitus [35].

Kitas naujausias tyrimas parodė, kad nors ir spalvotos medvilninės tekstilės yra laikomos vienu iš sudėtingiausių perdirbti tekstilės rūšių, taikant šarminės hidrolizės ir redukuojančios medžiagos derinį gali būti pašalinama iki 98,5 % dažų, o gauta antrinė žaliava gali būti panaudojama naujų celiuliozės pluoštų gamybai. Nustatyta, kad gautos celiuliozės pulpos baltumo indeksas viršija 80, kas atitinka tirpinamosios, acetilinimo procese naudojamos pirminės celiuliozės reikalavimus. Svarbu tai, kad perdirbimo metu pluošto struktūra beveik nenukenčia – polimerizacijos laipsnis sumažėja tik nuo maždaug 1200 iki 1000, o iš gautos pulpos pagaminti regeneruoti pluoštai pasižymi aukštu mechaniniu stiprumu, siekiančiu apie 165 MPa, pranokstančiu viskozinės medžiagos savybes [36].

Taigi apibendrinant literatūroje randamą informaciją, apie celiuliozės atgavimą iš tekstilės atliekų, galima sakyti, kad natūralių ar regeneruotų pluoštų tekstilės atliekų perdirbime vienas svarbiausių etapų yra celiuliozės ištirpinimas. Natūralios celiuliozės struktūra pasižymi didelėmis kristalinėmis savybėmis ir stipriais vandeniliniiais ryšiais, kurie lemia jos atsparumą tirpikliams. Dėl šios priežasties mechaninis perdirbimas dažnai nesugeba atkurti pluošto kokybės, o tekstilės atliekos panaudojamos tik žemos vertės gaminiuose. Šiame kontekste cheminiai tirpinimo metodai tampa esminiu veiksnium siekiant kokybiško perdirbimo „iš tekstilės į tekstilę“, kai iš panaudotos tekstilės atgaunamas tirpus celiuliozės polimeras ir formuojamas naujas regeneruotas pluoštas [37].

#### **1.4.2 Tekstilės atliekų perdirbimo poveikis aplinkai būvio ciklo požiūriu**

Tekstilės atliekų perdirbimas, kaip minėta, šiuo metu plačiai tiriama sritis. Perdirbimo metodai yra gerinami, siekiant sumažinti perdirbimo daromą poveikį aplinkai ir taip sukurti žiedinės ekonomikos modelį tekstilės sektoriuje. Literatūroje randama prieštaringų nuomonių, dėl perdirbimo poveikio aplinkai, dėl sudėtingų technologinių procesų taikymo. Tačiau tyrimais, kurie lygina pirminių ir perdirbtų pluoštų aplinkosauginius rodiklius, nustatyta, kad perdirbimo pranašumas yra akivaizdus. Vienas iš tyrimų – tekstilės atliekų perdirbimo BCV analizė – parodė, kad mišrių tekstilės atliekų perdirbimo poveikis aplinkai labai priklauso nuo perdirbimo būdų. Svarbu atkreipti dėmesį, kad minėto tyrimo metu palyginus visus pirminių ir antrinių pluoštų gamybos procesus nustatyta, kad rezultatai labai priklauso nuo pasirinktų sistemos ribų ir inventoriaus duomenų. Sistemos ribos gali būti visas būvio ciklas arba tik pasirinktas gamybos etapas, todėl pačių gamybos ar perdirbimo metodų tarpusavio palyginimas poveikio aplinkai atžvilgiu yra sudėtingas [7, 38].

Pluoštų iš pirminių žaliavų gamybos metu emisijos į aplinką sudaro 40 kg CO<sub>2</sub> ekv./kg, vandens poreikis labai didelis, o energijos poreikis yra daugiau kaip 140 kWh energijos vienam kilogramui pagaminto pluošto. Pluoštų perdirbimo metu emisijos sudaro apie 10 kg CO<sub>2</sub> ekv./kg, vandens sunaudojimas yra mažesnis, o energijos poreikis ne daugiau nei 70 kWh/kg. Taip pat nustatyta, kad, kai naudojami aplinkai palankūs tirpikliai, tokie kaip tetrahidrofurfurilo alkoholis ar  $\gamma$ -valerolaktonas, selektyvus elastano atskyrimas tirpinimo metodu gali sumažinti CO<sub>2</sub> emisijas maždaug 60 %. O fermentiniai metodai, kurie taikomi poliesterio ir medvilnės mišiniams, rodo dar mažesnes emisijas (apie 0,9 kg CO<sub>2</sub> ekv./kg), tačiau jų poveikį aplinka labiausiai nulemia elektros energijos poreikis ir naudojami reagentai. Nors šie rodikliai gali skirtis priklausomai nuo perdirbimo technologijos ar tekstilės tipo, jie atspindi bendrą dažniausiai šiuo metu naudojamų perdirbimo metodų vidurkį ir parodo, kad gamyba iš perdirbtų žaliavų sukelia mažesnę poveikį aplinkai nei gamyba iš pirminių pluoštų. Minėto tyrimo metu nustatyta, kad panaudotos medvilnės pavertimas nanoceliulioze gali

sumažinti poveikį aplinkai, nes paties proceso emisijos sudaro apie 63,7 kg CO<sub>2</sub> ekv./kg ir yra mažesnės už mokslinėje literatūroje nurodomą vidurkį, nors gamyba ir reikalauja didelio kiekio energijos [7, 38].

Nors tekstilės atliekų perdirbimas laikomas tvariu sprendimu, jis yra susijęs ir su pavojingų teršalų susidarymu. Perdirbant tekstilę išsiskiria halogeninti antipirenai bei per- ir polifluoroalkilinės medžiagos (PFAS), tokios kaip perfluoroktano rūgštis (PFOA) ir perfluoroktano sulfonatas (PFOS). Šios medžiagos pasižymi dideliu patvarumu aplinkoje, bioakumuliacijos potencialu ir ilgalaikiu poveikiu ekosistemoms bei žmonių sveikatai. Kiti dažnai tekstilės atliekose aptinkami teršalai yra ftalatų grupės plastifikatoriai, tokie kaip di(2-etilheksil)ftalatas (DEHP) ir diizononilftalatas (DINP), kurie siejami su endokrininės sistemos sutrikimais. Taip pat tekstilės gaminiuose gali būti sunkiųjų metalų – švino (Pb), kadmio (Cd), gyvsidabrio (Hg), kurie į atliekų srautą patenka iš dažų, pigmentų ar kitų apdorojimo medžiagų. Tekstilės atliekų perdirbimo metu išsiskiria lakieji organiniai junginiai (LOJ), ypač kaitinant polimerines medžiagas, o mechaninis smulkinimas skatina mikroplastiko formavimąsi [7].

Teršalai patenka į aplinką įvairiais keliais: mechaninio smulkinimo metu į orą išsiskiria kietosios dalelės, šiluminiai procesai generuoja LOJ, o cheminio perdirbimo technologijos gali sukelti nuotekų užterštumą tirpikliais, detergentais ir plastifikatoriais. Žinoma, kad šios medžiagos kelia didelę riziką vandens ekosistemoms, blogina vandens kokybę ir gali sukelti toksišią, kancerogeninę ar hormonų veiklą trikdančią poveikį žmonėms. Todėl, nors perdirbimas turi aplinkosauginių privalumų, saugiam jo taikymui būtinos griežtos reguliacinės priemonės, rizikos vertinimas ankstyvose technologijų kūrimo stadijose ir geresnės medžiagų inžinerijos praktikos [7].

Viena iš pažangiausių technologijų yra cheminis tekstilės perdirbimas celiuliozės karbamato metodu. Jis leidžia medvilnės sudėtyje esančią celiuliozę paversti nauju pluoštu. Kadangi tai cheminis uždaro ciklo perdirbimo metodas, kuriuo gaunamas celiuliozės karbamato pluoštas, jis pasižymi vidutiniu, bet palankesniu poveikiu – apie 2,2 kg CO<sub>2</sub> ekv./kg ir maždaug 90 MJ energijos poreikiu, kuris yra mažesnis nei pirminių pluoštų gamyboje. Ši technologija išsiskiria tuo, kad vietoje tradicinėje viskozės gamyboje naudojamo toksiško anglies disulfido čia naudojama švelnesnė, vandens pagrindo šarminė terpė ir karbamidas, todėl procesas yra mažiau kenksmingas aplinkai. Iš panaudotos tekstilės atskyrus celiuliozės turinčias frakcijas (daugiau nei 88 % celiuliozės), jos mechaniskai smulkinamos, apdorojamos rūgštiniu ir šarminiu virinimu, balinamos ir paverčiamos beveik 100 % celiuliozės mase. Vėliau, pridėjus karbamido ir kaitinant, susidaro celiuliozės karbamato polimeras, iš kurio šarminėje terpėje paruošiamas verpimo tirpalas. Toliau vyksta šlapio verpimo procesas, formuojant naują regeneruotą pluoštą [32].

Minėto tyrimo, celiuliozės karbamato BCV, rezultatai parodė, kad šios technologijos poveikis aplinkai yra palyginti mažas ir patenka į „žemutinę–vidutinę“ ribą, lyginant su pirminiais pluoštais. Vienam kilogramui gauto pluošto tenka apie 2,2 kg CO<sub>2</sub> ekv. šiltnamio efektą sukeliančių dujų, 1,6 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O ekv. vandens trūkumo poveikio ir maždaug 90 MJ energijos poreikio. Didžiausią poveikio dalį perdirbimo procesuose sudaro elektros energijos suvartojimas bei natrio hidroksido gamyba. Tačiau vertinimai parodė, kad naudojant atsinaujinančią elektros energiją poveikį galima sumažinti 40-46 %, o vėjo ir hidroenergijos derinys duoda geriausią rezultatą. Žemės naudojimo poveikis siekia apie 92 Pt, bet jis taip pat žymiai mažesnis nei gaminant medvilnę, kuri reikalauja didelių žemės plotų auginimui. Todėl vertinta, kad tekstilės atliekų perdirbimas cheminiu būdu gali ženkliai mažinti aplinkos taršą, tačiau perdirbimo plėtos sėkmė priklauso nuo surinkimo sistemų kokybės,

pakankamo celiulioze turtingų atliekų srauto ir nuo energijos šaltinių, naudojamų pramoniniuose perdurbimo įrenginiuose. Celiuliozės karbamato technologija šiuo metu yra vienas iš realiausių būdų pereiti prie pramoninio masto perdurbimo „iš pluošto į pluoštą“ Europoje [34].

### 1.5 Celiuliozės acetato būvio ciklo vertinimo tyrimų kritinė analizė

Europos sąjungos žiedinės tekstilės strategijoje akcentuojama būtinybė integruoti būvio ciklo analizės principus į visą tekstilės gamybos sistemą, siekiant sumažinti aplinkosauginę naštą visame sektoriuje (2). Produkto aplinkosauginio veiksmingumo vertinimas atliekant būvio ciklo analizę leidžia suprasti jo tvarumo potencialą visoje produkto vertės grandinėje – nuo žaliavų gavybos ir cheminio modifikavimo iki būvio ciklo pabaigos scenarijų, tokių kaip biologinis skaidymas, deginimas ar perdurbimas [41].

Žinoma, kad natūralios tekstilės poveikį aplinkai lemia žaliavos, naudojami cheminiai reagentai ir energijos šaltiniai gamybos metu. Pavyzdžiui, Spinelli ir kt. [5] pabrėžia geografinės padėties svarbą nustatant anglies pėdsaką, nes vietinės energijos naudojimo struktūra ir žaliavų ar produkcijos transportavimo atstumai tiesiogiai veikia išmetamų teršalų kiekį [5].

Foroughi ir kt. [28] atliko celiuliozės būvio ciklo analizę, siekdami įvertinti šį produktą kaip potencialiai mažo anglies kiekio alternatyvą. Tyrėjų teigimu, būvio ciklo analizės metodika leidžia visapusiškai įvertinti poveikį aplinkai skirtinguose celiuliozės produkto gyvavimo etapuose, todėl tyrimas buvo suskirstytas į du pagrindinius etapus – „nuo lopšio iki vartų“ ir „nuo lopšio iki kapo“, priklausomai nuo duomenų prieinamumo. Vertinant skirtingų celiuliozės formų poveikį aplinkai, analizuoti svarbūs poveikio aspektai: suminis energijos poreikis, ozono sluoksnio ardyimas (išreiškiamas CFC-11 ekvivalentais), rūgštėjimas sausumoje (SO<sub>2</sub> ekvivalentais), eutrofikacija (fosforo ekvivalentai gėlam vandeniui, azoto – jūriniam), vandens sunaudojimas, toksiškumas žmogui (1,4-dichlorbenzeno ekvivalentais), iškastinio kuro išekvojimas (naftos ekvivalentais), bei klimato kaita, vertinama per ŠESD emisijas, išteklių naudojimą, atliekų susidarymą bei pasaulinio atšilimo potencialą (išreiškiamas CO<sub>2</sub> ekvivalentais). Taip labai svarbu paminėti, kad norint įvertinti šiuos poveikius, buvo naudojama SimaPro (versija 1.08, PRé Sustainability, Nyderlandai) ir ReCiPe metodika, kuri transformuoja būvio ciklo inventorius duomenis į rodiklių reikšmes [28].

Taigi, Foroughi ir kt. [28] atlikto celiuliozės būvio ciklo analizės metu, nustatė, kad iš celiuliozės pagamintos medžiagos, įskaitant chemiškai modifikuotas jos formas, gali tapti mažai anglies dioksido į aplinką išskiriančiomis alternatyvomis, jei jų gamybos procesai bus kruopščiai optimizuoti. Pagrindinės strategijos apima energijos suvartojimo mažinimą, tirpiklių regeneravimo sistemų diegimą ir šalutinių produktų pakartotinį panaudojimą kitiems tikslams. Tačiau dauguma esamų celiuliozės būvio ciklo vertinimo tyrimų daugiausia dėmesio skiria ankstyviesiems etapams, pirmiausia nuo žaliavų gavybos iki gamybos („nuo lopšio iki vartų“), o duomenų, susijusių su būvio ciklo pabaigos etapu, vis dar trūksta [28].

Pažymėtina, kad iš tekstilės atliekų, o ne iš grynos celiuliozės, pagamintas celiuliozės acetatas gali gerokai sumažinti poveikį aplinkai. Kitas tyrimas įrodė, kad perdurbtas celiuliozės acetatas išlaiko mechanines savybes, panašias į grynos celiuliozės, tuo pačiu sumažindamas pirminių žaliavų poreikį ir išmetamų teršalų kiekį. Derinant tai su GPGB, tokiais kaip energiją taupantis tirpiklių regeneravimas ir švaresni cheminiai procesai, celiuliozės pluošto gamybos anglies ir vandens pėdsakus galima gerokai sumažinti [2, 11, 14].

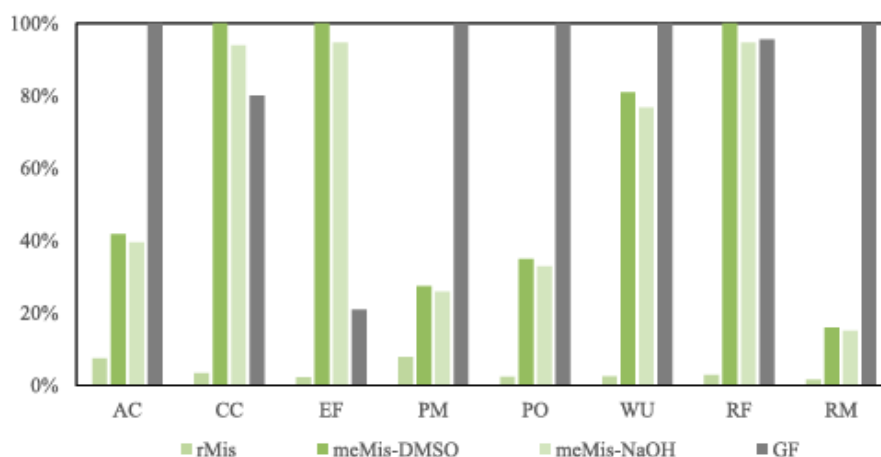
Remiantis atliktais tyrimais, perdirbtos celiuliozės grynumas yra aukštesnis, o kristališkumas mažesnis negu grynos celiuliozės, kas turėtų pagerinti acetilinimo procesą ir tirpimo efektyvumą. Darytina išvada, kad mokslinėje literatūroje dažniausiai randama informacija, kad celiuliozės acetatas yra perspektyvi medžiaga tvaraus pluošto vystymo kontekste, ypač kai jo gamyba optimizuojama taikant žiedinės ekonomikos strategijas, efektyvias technologijas ir lokalizuotas mažo poveikio energijos sistemas [39, 40].

Nors celiuliozės acetatas pristatomas kaip tvari, biologinės kilmės alternatyva naftos pagrindo polimerams, naujausi BCV tyrimai rodo, kad jo gamyba gali sukelti ženkliai didesnę poveikį aplinkai nei tradiciniai, iškastinio kuro pagrindu pagaminti termoplastai. Tyrimo, kuriame įvertinti miscanthus pluošto celiuliozės acetato kompozitai, nustatyta, kad būtent celiuliozės acetato gamyba lemia daugiau kaip 75 % visų kompozito poveikio kategorijų, nepaisant to, kad naudojamas biomasės pluoštas, kuris laikomas žemo poveikio žaliava. Atliekant BCV nustatyta, kad pagrindinis celiuliozės acetato gamybos poveikio šaltinis yra acto anhidrido naudojimas acetilinimo procese, nes vien jo sintezė, pavyzdžiui, acetaldehido oksidacija, priskiriama itin energetiškai intensyviems procesams ir sudaro iki dviejų trečdalių klimato kaitos rodiklio visame celiuliozės acetato būvio cikle. Todėl net ir naudojant mažo poveikio natūralų miscanthus pluoštą, bendras celiuliozės acetato kompozito BCV rezultatas išlieka nepalankus. Tyrimas parodė, kad celiuliozės acetato-Miscanthus kompozitai turi daugiau nei tris kartus didesnę klimato kaitos potencialą (apie 8.3–8.9 kg CO<sub>2</sub> ekv./kg) palyginti su stiklo pluoštu sustiprintu polipropileno (PP-GF) kompozitu (2.46 kg CO<sub>2</sub> ekv./kg), ir ši tendencija išliko visose vertintose kategorijose: iškastinių išteklių sunaudojime, vandens naudojime, rūgštėjimo potenciale, eutrofikacijoje ir kietųjų dalelių formavime [41].

Analizė taip pat atskleidė, kad pluošto tipas nėra lemiantis faktorius – miscanthus pluoštas pats savaime pasižymi mažesniu poveikiu nei stiklo pluoštai, tačiau celiuliozės acetato polimeras daro didesnę poveikį. Net fibriliavimas ir ekstruderio procesai, nors reikalaujantys nemažai energijos, sudaro tik antraeilę dalį bendro kompozito poveikio. Daugiau kaip trys ketvirtadaliai viso poveikio kyla dėl celiuliozės acetato, o pluošto kilmė sudaro minimalų indėlį. Net jei celiuliozės acetato kompozitai pasižymi mechaninėmis savybėmis, panašiomis į stiklo pluoštu sustiprintą polipropileno, jų aplinkosauginis naudingumas nėra geresnis. Tyrimai įrodo, kad celiuliozės pluoštais sutvirtintas celiuliozės esteris, nepaisant jo kilmės iš biomasės, gali būti ne toks ekologiškas, kaip manyta iš pradžių, o industrinės kokybės celiuliozės acetatas neturi aplinkosauginių pranašumų prieš polipropileno. Tai rodo, jog celiuliozės acetato tvarumas nulemtas ne jo biologinės kilmės, o gamyboje naudojamos chemijos, dėl acetanhidrido sintezės imlumo energijai, todėl celiuliozės acetato kompozitai sunkiai konkuruos su polipropileno pagal BCV rodiklius [41].

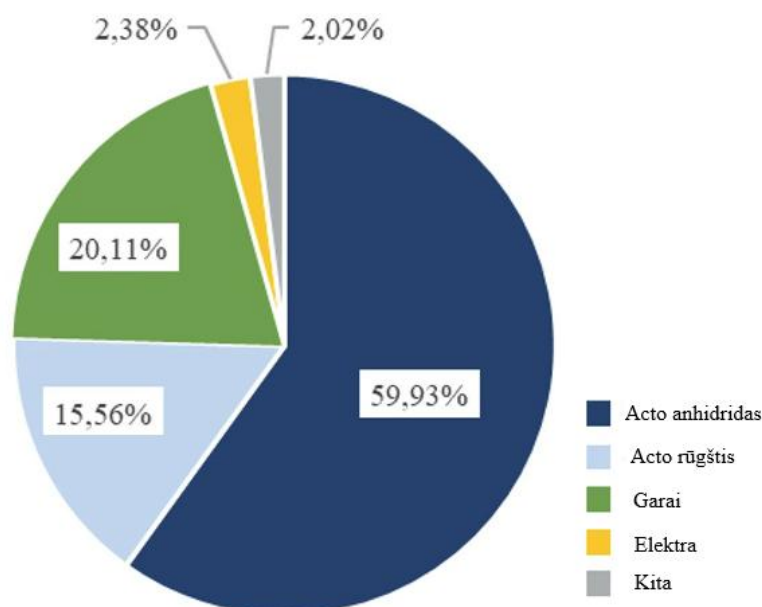
Grafiko (žr. 10 paveikslas) duomenys rodo, kad stiklo pluoštas (GF) nėra didžiausio poveikio medžiaga visose kategorijose. Klimato kaitos (CC), eutrofikacijos (EF) ir iškastinių išteklių naudojimas (RF) kategorijose stiklo pluošto (GF) poveikis aplinkai yra mažesnis nei kai kurių chemiškai modifikuotų miskanto pluoštų. Tai ypač ryšku meMis–NaOH atveju, kuriam priskiriamas didžiausias poveikis klimato kaitos, eutrofikacijos ir iškastinių išteklių naudojimo kategorijose. Šį rezultatą lemia didelės NaOH gamybos energijos sąnaudos bei su tuo susijusios emisijos. Tuo tarpu stiklo pluoštas išlieka vienas taršiausių kietųjų dalelių formavimosi (PM), fotocheminės oksidacijos (PO), vandens naudojimo (WU) ir žaliavų suvartojimo (RM) kategorijose dėl energijai imlios lydymo technologijos. Tai atskleidžia, kad miskanto pluošto aplinkosauginis profilis priklauso nuo taikomo

cheminio pirminio apdorojimo, o chemiškai modifikuotas pluoštas ne visuomet yra tvaresnė alternatyva nei tradicinis stiklo pluoštas [41].



**10 pav.** Neapdorotas miskantas (rMis), mechaniškai išgautas miskantas apdorotas tirpikliu DMSO, mažinančiu polifenolių ir lignino likučius (meMis\_DMSO), mechaniškai išgautas miskantas apdorotas šarmu (meMis\_NaOH) ir stiklo pluošto (GF) aplinkosauginio veiksmingumo palyginimas (1 kg funkciniam vienetai). Kiekvienoje kategorijoje aukščiausią balą surinkusi vertė lygi 100 % [41].

Diagramoje (žr. 11 paveikslas) pateikiamas prieš tai minėto tyrimo celiuliozės acetato gamybos procesų indėlis į klimato kaitos potencialą, remiantis BCV rezultatais, kurie parodė, kad didžiausią bendro poveikio dalį sudaro acto anhidrido naudojimas – 59,93 %, todėl galima teigti, kad pagrindinis emisijų šaltinis yra ne tik šios cheminės medžiagos naudojimas, bet ir jos gamybos technologija, pasižyminti dideliu energijos intensyvumu. Reikšmingą dalį sudaro ir garų naudojimas (20,11 %), susijęs su šiluminės energijos poreikiu technologiniuose procesuose. Acto rūgšties indėlis siekia 15,56 %, todėl ji taip pat prisideda prie bendro klimato kaitos potencialo, nors mažesne apimtimi nei acto anhidridas. Elektros energijos dalis sudaro 2,38 %, o kiti veiksniai – 2,02 %, todėl jų įtaka bendram rezultatui yra santykinai nedidelė. Apibendrinant galima teigti, kad didžioji dalis poveikio klimato kaitai susijusi su celiuliozės acetato gamyboje naudojamomis cheminėmis medžiagomis, tuo tarpu energijos ištekliai sudaro mažesnę, tačiau vis tiek reikšmingą dalį. Tyrimo autoriai nurodo, kad tradiciniai keteno ar acetaldehido oksidacijos procesai yra aplinkosauginiu požiūriu nepalankūs. Todėl reikšmingas emisijų mažinimo potencialas slypi tiek gamybos proceso energetinio efektyvumo didinime, tiek alternatyvių, mažesnio anglies pėdsako technologijų plėtroje. Nors pastaraisiais metais siūlomi inovatyvūs sprendimai, tokie kaip joninių skysčių naudojimas ar alternatyvios celiuliozės žaliavos, šie metodai kol kas išlieka laboratorinio masto ir jų pilnas BCV dar nėra prieinamas [41].



**11 pav.** Celiuliozės acetato gamybos indėlis į klimato kaitą (būvio ciklo vertinimo rezultatai) [41].

Tokie tyrimai atskleidžia, kad visgi egzistuoja prieštaringa nuomonė, kad biologinės kilmės polimerai savaime užtikrina geresnius poveikio aplinkai vertinimo rodiklius. Nors celiuliozės acetatas dažnai laikomas tvariu dėl biologinės kilmės, jo realus poveikis aplinkai dažnai gali viršyti polipropileno poveikį aplinkai, o tvarumo spraga kyla iš acetilinimo chemijos ir energijos poreikio. Tai ypač aktualu tekstilės perdirbimo tematikoje, kur celiuliozės acetatas naudojamas kaip potenciali regeneruotų pluoštų forma – siekiant realios naudos, reikalingos inovacijos ne žaliavos kilmėje, o procesų optimizacijoje. Pagrindinis poveikis aplinkai kyla iš acto anhidrido, nepriklausomai nuo celiuliozės kilmės [41].

Taigi, atlikti tyrimai BCV metodu parodo, kad tai yra vienas iš tinkamų būdų nustatyti celiuliozės acetato siūlų gamybos poveikį aplinkai pasirenkant kelis alternatyvius šių siūlų gamybos kelius, aktualius šiuo metu tekstilės pramonėje – skirtingas celiuliozės žaliavas, išgautas iš grynos celiuliozės ir iš tekstilės atliekų atgautos celiuliozės. Kadangi siūlų gamyba yra tekstilės pramonės pagrindas, tekstilės produktų perdirbimas į aukštos kokybės antrines žaliavas yra vienas iš pagrindinių pasaulinių tekstilės tyrimų objektų.

## 1.6. Literatūros apžvalgos analizė

Apibendrinant literatūros apžvalgą galiu teigti, kad pastarieji 5 metai tekstilės pramonėje, pradedant nuo pramonės taršos kontroliavimo direktyvų (direktyva 2010/75/EU) rekomendacijų pritaikymo analizuojant jau esamas technologijas ir kuriant naujas, prisitaikant prie tvarumo strategijų ir kintančios aplinkos, leido pasistūmėti link žiedinės ekonomikos metodų. Europos komisija, rengianti stebėjimo ataskaitas, suteikia galimybę įvertinti pasaulines tekstilės tendencijas, o GPGB tekstilės sektoriaus atstovams – sužinoti esamas ir taikomas technologijas, bei naujausias tekstilės pramonės technologijas, kurias taikant galima pasiekti sumažintą poveikį aplinkai.

Ieškant realiai tvarios tekstilės galimybių, pradedama nuo žaliavos, kuri patekusi į gamybos ciklą suteiktų galimybę apdoroti ir ruošti pluoštą nedarant reikšmingo poveikio aplinkai. Kadangi tekstilės atliekos ne tik kelia susirūpinimą, bet ir yra pasaulinė problema, mokslininkai ieško būdų, kaip padidinti galimybes perdirbti tekstilės gaminius tokiais būdais, kurie būtų mažiausiai žalingi aplinkai

būvio ciklo požiūriu. Kadangi sintetiniai pluoštai sudaro didžiausią dalį pasaulyje naudojamų pluoštų, o jų žaliava yra iškastinis kuras, tyrimais ieškoma būdų, kaip šiuos pluoštus pakeisti gamtai palankesniais pluoštais, darančiais kaip įmanoma mažesni poveikį aplinkai. Dėl šios priežasties tokios savybės kaip biologinis skaidumas ir lengvas perdirbamumas yra pagrindinis tyrimų tikslas.

Regeneruoti pluoštai – daug žadanti pluoštų rūšis, ne tik dėl to, kad jų žaliava – atsinaujinantis šaltinis (augalai, mediena), bet ir dėl to, kad jie turi savybę suirti natūralioje aplinkoje, kas puikiai užpildo žiedinės ekonomikos ir tvarios tekstilės reikalavimus, žvelgiant iš būvio ciklo perspektyvos. Celiuliozės acetatas yra vienas iš regeneruotų pluoštų pritaikymo pavyzdžių, kuris jau turi gan plačią pritaikymo sritį – ne tik tekstilės pramonėje, bet ir pakuočių bei kitų kasdien reikalingų priemonių gamyboje, kur ypatingai reikalingas pluošto natūralus suirimas.

Tyrimai atskleidžia, kad poveikis aplinkai gali ir nepriklausyti nuo žaliavos kilmės, bet gali būti nulemiamas gamybos procesuose naudojamų cheminių medžiagų, kurioms sintetinti reikalingi dideli kiekiai energijos. Tačiau tyrimais taip pat pagrindžiama, kad jei gamybos procesai optimizuoti ir pritaikytos naujausios technologijos, leidžiančios gaminti celiuliozės acetato siūlus uždaramame procese – grąžinant reakcijoms reikalingas chemines medžiagas, jas regeneruojant ir išgryninant – poveikis aplinkai gali būti sumažintas.

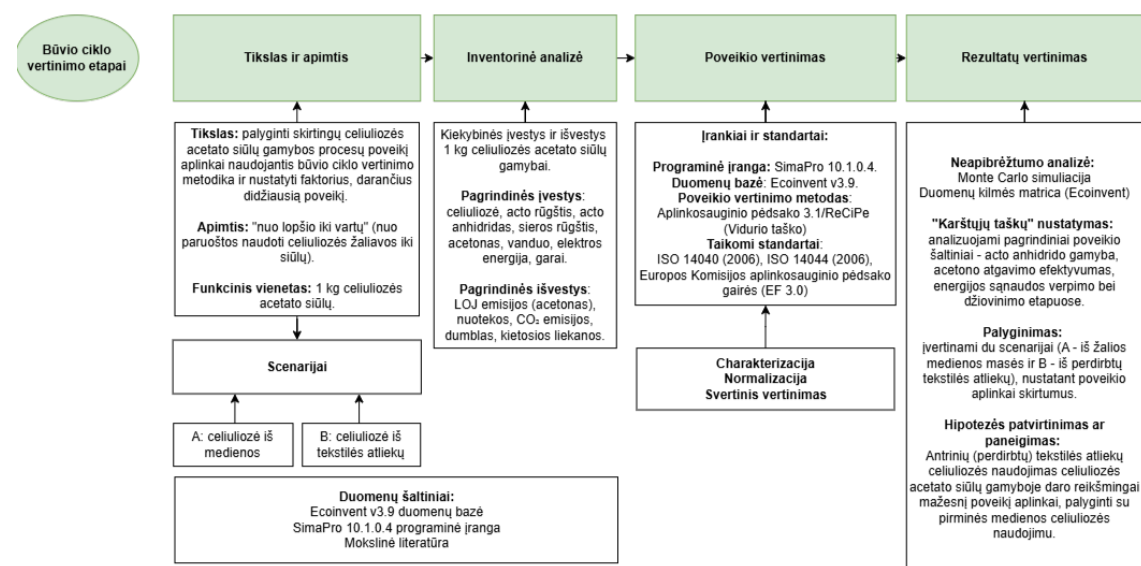
Celiuliozės acetato siūlai gali būti gaminami iš įvairių žaliavų. Tekstilės atliekos viena iš jų. Tyrimais nustatyta, kad įmanoma išgauti aukštos kokybės celiuliozę iš tekstilės atliekų, kuri tinkama naudoti celiuliozės acetato gamybai, o poveikis aplinkai daromas mažesnis, nes energijos kiekis apdoroti tokios rūšies celiuliozei yra mažesnis. Lyginant šias dvi žaliavas celiuliozės acetato siūlų gamybai būvio ciklo metodu, galima įtraukti šių žaliavų kelią iki gamybos, taip išplečiant BCV sistemos ribas, tačiau žaliavų auginimo, paruošimo keliai yra labai skirtingi, pasaulinio masto, todėl renkantis tokį tyrimą reikėtų pradėti nuo konkrečių produktų. Šiuo tyrimu siekiama atlikti dviejų skirtingų tipų - pirminių ir antrinių žaliavų pagamintų celiuliozės acetato siūlų gamybos lyginamąjį BCV, daugiausia dėmesio skiriant poveikiui aplinkai per poveikio aplinkai kategorijas.

## 2 Tyrimo metodika

Būvio ciklo vertinimo (BCV) metodas suteikia galimybę įvertinti produkto gamybos metu naudojamų procesų ir cheminių medžiagų daromą poveikį aplinkai per visą jo būvio ciklą – nuo žaliavų išgavimo iki atliekų sutvarkymo bei nustatyti aplinkosauginius „karštuosius taškus“ ir palyginti skirtingas technologines alternatyvas [42].

BCV atliekamas remiantis keturiais tarptautiniais ISO 14040:2006 serijos standartais, nustatančiais principus, struktūrą ir reikalavimus, užtikrinančius BCV kokybę ir pagrįstumą, o kiti trys standartai (ISO 14041/42/43/44) papildo pirmąjį [43]. ISO 14040:2006 yra standartas, kuris apibrėžia BCV principus ir sistemą. Šiame standarte nustatytas bendras BCV metodas - keturių etapų produkto (ar sistemos) būvio ciklo ištyrimas (žr. 12 paveikslas):

1. tikslo ir apimties apibrėžimas – apibrėžiama, ką siekiama įvertinti ir kokios ribos taikomos;
2. būvio ciklo inventorinė analizė – renkami duomenys apie medžiagų srautus, energiją, emisijas;
3. būvio ciklo poveikio vertinimas – inventoriniai duomenys transformuojami į poveikio kategorijas;
4. būvio ciklo interpretavimas – įvertinami gauti rezultatai, formuluojamos išvados [44].



12 pav. Būvio ciklo vertinimo metodika remiantis standartais ISO 14040/44:2006 [42].

12 paveikslo BCV metodikos schemoje atsispindi visi šio tyrimo metu priimami sprendimai, kurie yra svarbiausi BCV etapuose. BCV etapų nuoseklus įgyvendinimas užtikrina tyrimo kokybę, palyginamumą ir patikimumą, todėl BCV metodika plačiai taikoma tiek pramonės gamybos vertinime, tiek akademinuose tyrimuose [44, 45].

### 2.1. Tyrimo tikslo, funkcinio vieneto ir sistemos ribų apibrėžimas

Šio tyrimo tikslas – įvertinti skirtingų celiuliozės acetato siūlų gamybos procesų poveikį aplinkai, lyginant skirtingus žaliavų naudojimo scenarijus, taikant BCV metodiką.

Funkcinis vienetas yra 1 kg pagamintų celiuliozės acetato siūlų [35, 41, 46]. Šis funkcinis vienetas kiekybiškai įvertina apibrėžtą produkto funkciją bei nurodo, kurios BCV įvestys ir išvestys yra

susijusios [44]. Šis funkcinis vienetas leidžia palyginti skirtingų gamybos scenarijų poveikio rodiklius – nepriklausomai nuo žaliavos kilmės ar gamybos ypatumų [35, 46].

Vadovaujantis mokslinė literatūra, į sistemos ribas idealiu atveju turėtų būti įtraukti visi su produktu susiję procesai, tačiau tai sudėtinga ir nepraktiška dėl duomenų ir sąnaudų apribojimų bei skirtingų produktų panaudojimų. Todėl mažiau reikšmingi procesai išbraukti iš produkto gamybos sistemos [44].

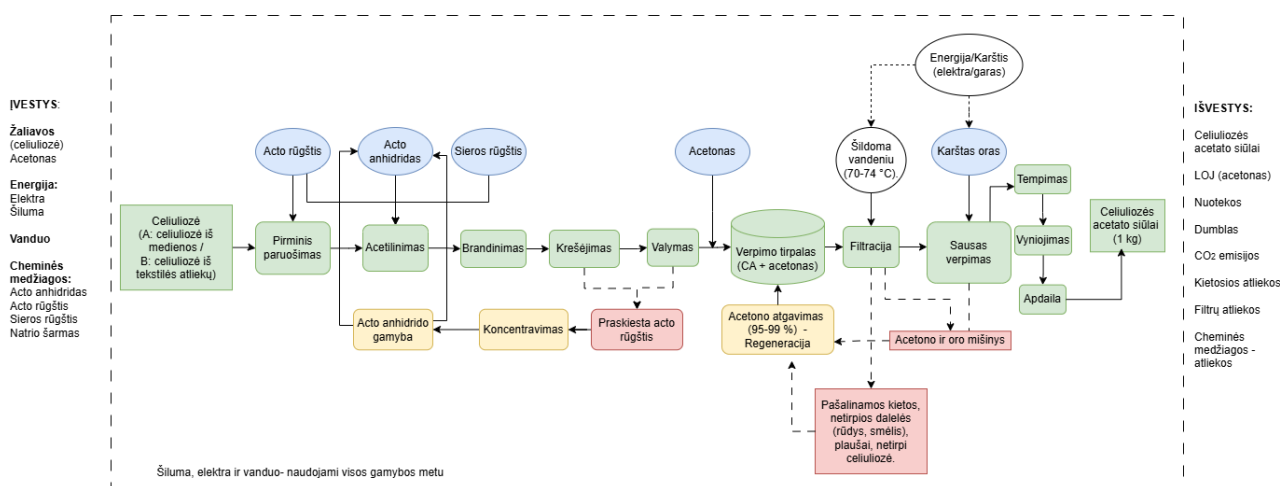
### 2.1.1 Celiuliozės acetato siūlų iš pirminių ir antrinių žaliavų gamybos scenarijų sistemos ribos

Pirmojoje tyrimo dalyje pasirinkti du celiuliozės acetato siūlų gamybos baziniai scenarijai:

A – tradiciniai siūlai, pagaminti iš pirminių žaliavų (neperdirbtos) celiuliozės;

B – siūlai, pagaminti iš antrinės žaliavos – perdirbtos celiuliozės, gautos iš perdirbtų tekstilės atliekų.

Remiantis mokslinė literatūra ir technologinėmis celiuliozės acetato gamybos schemomis, numatoma, kad BCV sistemos ribos yra nuo „vartų iki vartų“, t. y. celiuliozės acetato gamyba nuo paruoštos naudoti gamyboje žaliavos iki pagamintų celiuliozės acetato siūlų (žr. 13 paveikslas). Žaliavos paruošimo, produkto naudojimo ir šalinimo etapai šioje tyrimo dalyje nebuvo vertinami [38].



13 pav. Celiuliozės acetato siūlų gamybos būvio ciklo vertinimo sistemos ribos [41, 47].

Celiuliozės acetato siūlų gamybos BCV ribose yra įtraukiami šie gamybos etapai (žr. 13 paveikslas):

1. žaliavų (celiuliozės iš pirminės žaliavos arba perdirbtos celiuliozės) paruošimas;
2. acetilinimo procesas (su acto rūgštimi, anhidridu ir sieros rūgštimi (katalizatoriumi));
3. krešėjimo ir valymo etapas (acto rūgštis grąžinama į acto anhidrido gamybą acetilinimo procesui);
4. tirpinimas (acetono naudojimas) - verpimo tirpalo gamyba;
5. sausas verpimas (išgarinamas acetonas ir grąžinamas į verpimo tirpalo gamybą);
6. energijos, vandens ir cheminių medžiagų naudojimas;
7. gamybos atliekų, nuotekų, emisijų susidarymas.

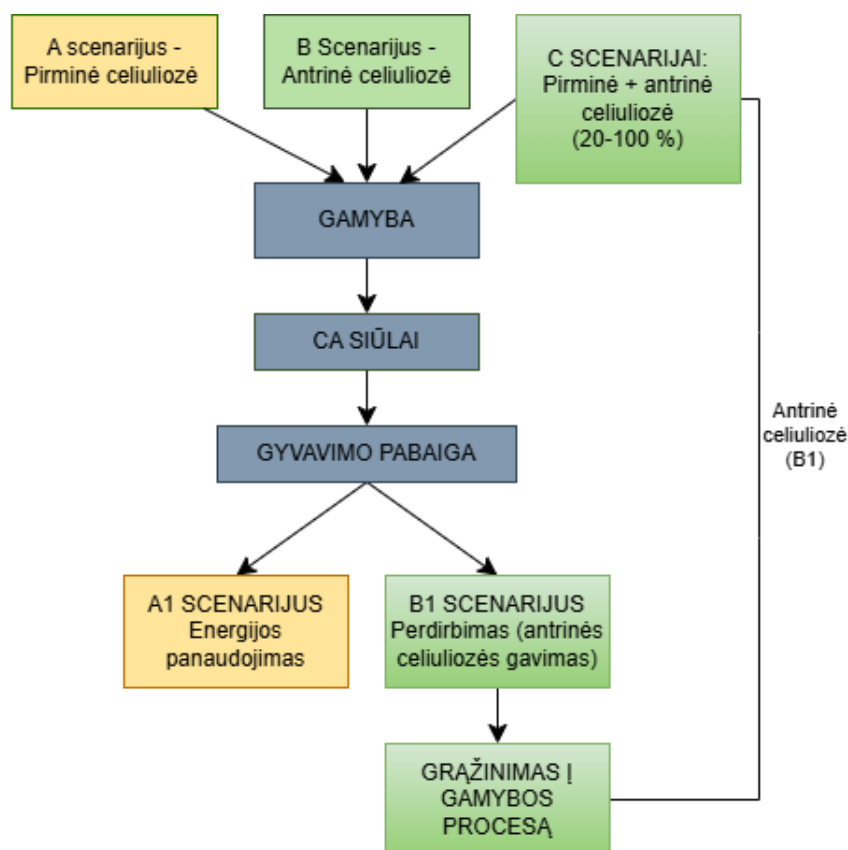
### 2.1.2 Sistemos ribų išplėtimas

Pradiniame tyrimo etape sistemos ribos apibrėžtos įtraukiant tik celiuliozės acetato siūlų gamybos procesą. Siekiant išsamiau įvertinti produkto būvio ciklą ir galimus aplinkosauginio veiksmingumo

gerinimo būdus, sistemos ribos išplėstos, į modelį įtraukiant pagamintų siūlų tvarkymą po naudojimo. Į sistemos ribas neįtraukiamas celiuliozės acetato siūlų transportavimas į tekstilės produkto gamybos vietą. Taip pat neįtraukiamas tekstilės produkto gaminimas, transportavimas bei tekstilės produkto naudojimas. Tačiau įtraukiamas surinktų celiuliozės acetato siūlų, kaip tekstilės atliekų transportavimas, laikant, kad visų scenarijų atvejais, siūlai transportuojami 100 km. A1 scenarijaus atveju priimama prielaida, kad celiuliozės acetato siūlai surenkami ir taip pat transportuojami 100 km į energinį panaudojimą (deginimą). B1 scenarijaus atveju priimama prielaida, kad po naudojimo surinkti siūlai, kaip tekstilės atliekos transportuojami 100 km į perdirbimo įmonę. Toks sistemos ribų išplėtimas leido įvertinti ne tik A ir B scenarijų gamybos procesų poveikį aplinkai, bet ir nustatyti papildomų produkto būvio cikle esančių procesų – deginimo ir perdirbimo įtaką bendram produkto būvio ciklo poveikiui aplinkai.

Pirmiausiai modeliuoti du baziniai scenarijai, remiantis jau paruoštais A ir B scenarijų procesais (žr. 14 paveikslas):

1. A1 scenarijus, kuriame po naudojimo produktas nukreipiamas į energinį panaudojimą – deginimą;
2. B1 scenarijus, kuriame po naudojimo siūlai surenkami ir perdirbami.



**14 pav.** Išplėstos sistemos ribos (trumpinys CA siūlai schemeje yra celiuliozės acetato siūlai).

Siekiant įvertinti žaliavų kilmės įtaką produkto būvio ciklo poveikiui aplinkai, remiantis B1 scenarijaus analizės logika, sudarytas C scenarijus, kuriame modeliuotas perdirbtų žaliavų integravimas į gamybos procesą, keičiant pirminių ir antrinių žaliavų proporcijas. Sumodeliuota, kad C scenarijuose į celiuliozės acetato siūlų gamybą grąžinama dalis po perdirbimo (B1 scenarijaus) gautos antrinės žaliavos, ją derinant su pirmine aukšto grynumo celiulioze. C scenarijuose vertinama pirminės ir antrinės žaliavos proporcijų įtaka galutiniam produkto poveikiui aplinkai. Modeliuojant

C scenarijaus procesus, laikoma, kad žaliavų kiekio įvestis, kuri naudota B scenarijuje (perdirbtos tekstilės celiuliozės acetato siūlų gamybos), išlieka tokia pati, bet keičiama pačios žaliavos sudėtis pagal toliau nurodytas proporcijas:

1. C1 scenarijus – į gamybą pateikiama 20 % celiuliozės, atgautos iš tekstilės atliekų (B1 proceso) ir 80 % aukšto grynumo pirminės celiuliozės;
2. C2 scenarijus – į gamybą pateikiama 40 % celiuliozės, atgautos iš tekstilės atliekų (B1 proceso) ir 60 % aukšto grynumo pirminės celiuliozės;
3. C3 scenarijus – į gamybą pateikiama 80 % celiuliozės, atgautos iš tekstilės atliekų (B1 proceso) ir 20 % aukšto grynumo pirminės celiuliozės;
4. C4 scenarijus – į gamybą pateikiama 100 % celiuliozės, atgautos iš tekstilės atliekų (B1 proceso);
5. C5 scenarijus – papildomas scenarijus, kuris modeliuotas C4 scenarijaus pagrindu – į gamybą pateikiama 100 % celiuliozės, atgautos iš tekstilės atliekų (B1 proceso), bet elektros energijos šaltinis pakeičiamas į atsinaujinančios energijos (saulės šviesos energijos) naudojimą.

Toks sistemos ribų išplėtimas, apimantis gamybą, atliekų tvarkymą ir antrinių žaliavų grąžinimą į gamybos procesą, leidžia poveikį aplinkai vertinti platesniu būvio ciklo požiūriu.

## **2.2. Būvio ciklo vertinimo inventorinė analizė**

Inventoriniai duomenys surinkti iš mokslinės literatūros ir pramoninio šaltinio – įmonės, gaminančios celiuliozės acetato siūlus. Inventorinės analizės metu identifikuojami ir kiekybiškai įvertinami visi į sistemą įeinantys ir iš jos išeinantys srautai, įskaitant žaliavas, energiją ir emisijas.

Šiame BCV etape modeliavimas atliekamas atsižvelgiant į pasirinktus scenarijus, kurie skiriasi žaliavų kilme ir proporcijomis. Vertinami žaliavų, energijos ir cheminių medžiagų srautai bei jų įtaka procesui.

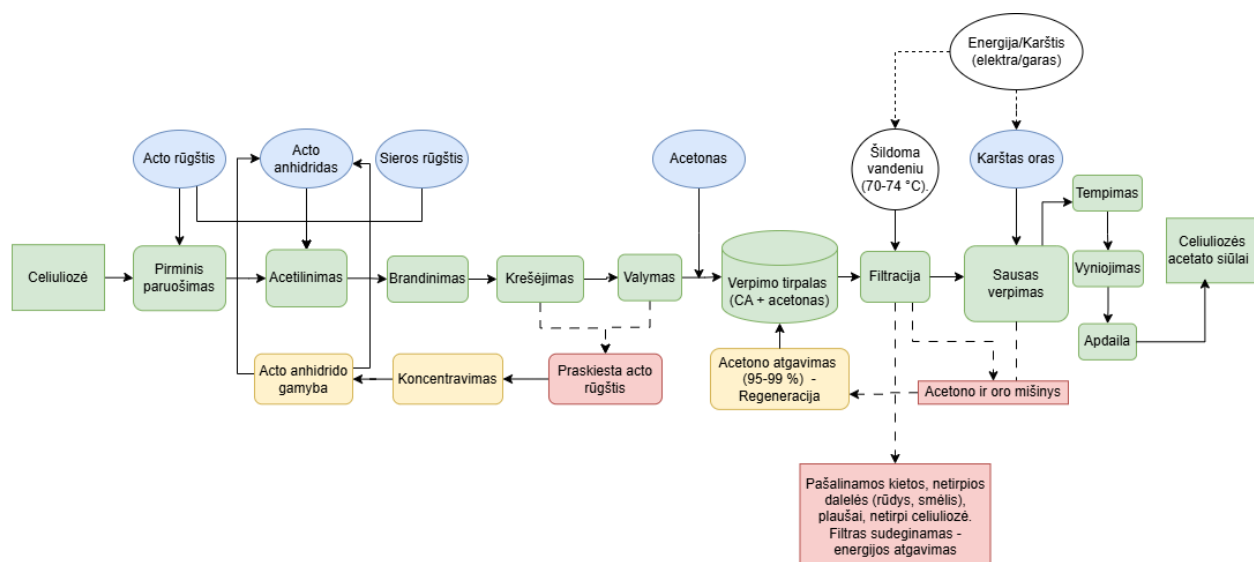
### **Duomenys pagal celiuliozės acetato siūlų gamybos procesą**

Inventorinėje analizėje įvertinami visi įeinantys ir išeinantys srautai, susiję su celiuliozės acetato siūlų gamyba (žr. 15 paveikslas). Į įvesčių kategoriją įtraukiamos celiuliozės žaliavos (celiuliozė), cheminės medžiagos bei energija. Į išvesčių kategoriją įtraukiamas galutinis produktas (celiuliozės acetato siūlai) bei susidaranti atliekos.

Siekiant tiksliau atvaizduoti gamybos procesą, modeliavimas buvo atliekamas etapais, išskiriant tarpinius produktus:

1. Nuo žaliavos acetilinimo iki celiuliozės acetato granulių;
2. Nuo celiuliozės acetato granulių iki galutinio produkto.

Vėliau šie etapai buvo sujungti į vieną bendrą procesą, todėl galutinėje inventorinėje lentelėje granulės pateikiamos kaip tarpinio proceso dalis – įvestis reikalinga pagaminti 1 kg siūlų.



15 pav. Celiuliozės acetato siūlų gamybos schema [25, 26, 47].

### Inventorinių duomenų lentelės sudarymo principai

Inventoriniai duomenų lentelė (žr. 3 lentelė) sudaryta remiantis celiuliozės acetato siūlus gaminančios įmonės pateiktomis proceso lygmens duomenimis ir mokslinės literatūros šaltiniais. Renkamų duomenų srautai išreikšti vienam funkciniam vienetui – 1 kg celiuliozės acetato siūlų. A scenarijuje naudojama pirminė medienos celiuliozė, o B scenarijuje – iš tekstilės atliekų gauta celiuliozė. A ir B scenarijui duomenys renkami pagal acetilinimo procese naudojamus reagentus. Taip pat reakcijai vyksti svarbus katalizatoriaus (sieros rūgšties), kurios kiekis numatomas abiem scenarijams vienodas. Acetonas, naudojamas verpimo tirpalo gamybai, remiantis moksline literatūra ir įmonės duomenimis, yra regeneruojamas (apie 95–99 % acetono grąžinama į procesą) [21, 22, 23].

Verpimo procese naudojamo garo bei elektros energijos sąnaudos nustatomos remiantis įmonės duomenimis. Papildomai išskiriama atsinaujinančios elektros energijos dalis, kuri, remiantis įmonės duomenimis, taip pat yra naudojama ir įtraukiama siekiant įvertinti energijos šaltinių įtaką. Bendras vandens sunaudojimas gamyboje laikomas pastovus abiem scenarijams, remiantis įmonės duomenimis ir moksline literatūra. Emisijos iš verpimo tirpalo nustatomos darant prielaidą, kad dalis acetono, nepaisant regeneracijos, patenka į aplinką arba lieka produkte. Inventorinių duomenų lentelės išvesties srautai apima skystas procesines nuotekas, kurios susidaro valymo procese, bei kietąsias atliekas – filtrus. Galutinio produkto kiekis laikomas lygus funkciniam vienetui (1 kg).

3 lentelė. Celiuliozės acetato siūlų gamybos inventoriniai duomenys pagal A ir B scenarijus.

Aprašymas	Inventorius	Matav. vienetai	Celiuliozė iš medienos - A	Celiuliozė iš tekstilės atliekų - B	Duomenų šaltinis
<b>Įvestys</b>					
Aukšto grynumo celiuliozė	Celiuliozė	kg/kg	X	X	X
Acetilinimas	Acto rūgštis (CH <sub>3</sub> COOH)	kg/kg	X	X	X
	Acto anhidridas ((CH <sub>3</sub> CO) <sub>2</sub> O)	kg/kg	X	X	X

Aprašymas	Inventorius	Matav. vienetai	Celiuliozė iš medienos - A	Celiuliozė iš tekstilės atliekų - B	Duomenų šaltinis
Katalizatorius	Sieros rūgštis (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	kg/kg	X	X	X
Paruoštos verpimo tirpalui granulės – tarpinis produktas (naudota proceso skaidymui modeliuojant)	Acetato granulės	kg/kg	X	X	X
Grynas	Acetonas	kg/kg	X	X	X
Verpimui naudojamas garas	Garas/karštas oras (energija)	kWh/kg	X	X	X
Visai gamybai naudojama elektros energija	Elektros energija	kWh/kg	X	X	X
	Atsinaujinanti elektros energija (saulės)	kWh/kg	X	X	X
Visos gamybos	Vanduo	kg/kg	X	X	X
Emisijos iš verpimo tirpalo - Regeneracija	Acetonas (95–99%), laikoma, kad didžioji dalis regeneruojama	kg/kg	X	X	X
<b>Išvestys</b>					
Skystos procesinės nuotekos: Likusios proceso ar valymo nuotekos, turinčios acetono ar celiuliozės acetato pėdsakų	Skystos nuotekos	m <sup>3</sup> /kg	X	X	X
Pagaminti siūlai	Celiuliozės acetato siūlai	kg/kg	1	1	[35, 41, 46]
Gamybos atliekos - filtrai	Kietos atliekos	kg/kg	X	X	X

### Būvio ciklo pabaigos procesų inventoriūs

Kadangi sistemos ribos yra išplėtos iki atliekų tvarkymo ir atgautų žaliavų panaudojimo, renkami išplėstų sistemos ribų scenarijų inventoriniai duomenys (žr. 4 lentelė). Perdurbimo proceso inventoriniai duomenys sudaryti remiantis literatūros šaltiniais ir masės balanso principu. Remiantis moksline literatūra turi būti žinomas celiuliozės atgavimo rodiklis, kuris naudojamas apskaičiuoti galimą atgauti celiuliozės kiekį iš tekstilės atliekų [30, 34, 48].

Perdurbimo procesams reikalingos elektros energijos įvestis taip pat pasirenkama remiantis panašių technologinių procesų BCV duomenimis. Kietųjų atliekų kiekis gali būti apskaičiuotas kaip neatgauta žaliavos dalis (1 kg – atgauta medžiaga), darant prielaidą, kad dalis pašalinama kaip atliekos, o likusi dalis grąžinama į gamybos procesą. Transportavimo atstumas, kaip minėta apibrėžiant išplėstas sistemos ribas, laikomas tipiniu (100 km), o elektros energijos sąnaudos laikomos vienodos visiems papildomai vertinamiems scenarijams [34, 41, 48].

**4 lentelė.** Celiuliozės acetato siūlų būvio ciklo pabaigos procesų inventoriniai duomenys A1 ir B1 scenarijams.

Aprašymas	Inventorius	Matav. vienetai	Celiuliozės acetato siūlai -A1	Celiuliozė iš tekstilės atliekų – B1	Duomenų šaltinis
<b>Įvestys</b>					
Tekstilės atliekos	Celiuliozės acetato siūlų atliekos - tekstilės atliekos	kg	1	1	Prielaida (funkcinis vienetas 1 kg)
Elektros energija	Laikoma vienoda visiems scenarijams	kg/kg	-	X	X
Transportavimas	-	km	100	100	Laikomas tipiniu atstumu
<b>Išvestys</b>					
Atgavimo rodiklis	Atgaunama žaliava	kg/kg	-	X	X
Kietos atliekos	Susidarančios atliekos	kg/kg	-	X	X

### 2.3 Būvio ciklo poveikio vertinimas

Celiuliozės acetato siūlų būvio ciklo poveikio vertinimo etape kiekybiniai inventoriniai duomenys paverčiami į aplinkosauginius poveikio rodiklius. Tai leidžia nustatyti, kurie gamybos procesai, energijos srautai ar naudojamos medžiagos, pavyzdžiui, acto anhidridas, daro didžiausią įtaką bendram poveikiui aplinkai [38, 41].

BCV atliktas SimaPro 9.0 programine įranga, naudojantis Ecoinvent duomenų baze ir taikant ReCiPe2016 metodiką. Ši metodika leidžia vertinti poveikį tiek vidurio taško, tiek galutinio taško poveikio lygmenyse ir yra plačiausiai taikoma aplinkosaugos tyrimuose [49, 50].

#### Reikšmių pasirinkimas

ReCiPe2016 metodo esmė – susieti inventorinės analizės duomenis su realiu poveikiu aplinkai, žmogaus sveikatai ir ištekliams. Metodas apima du analizės lygius: vidurio taško (tarpinį), kai vertinami atskiri poveikio procesai, tokie kaip šiltnamio efektas ar vandens eutrofikacija, ir galutinio taško, kai rezultatai sujungiami į tris apsaugos sritis (žmonių sveikatą, ekosistemų būklę ir gamtinių išteklių išsaugojimą). ReCiPe2016 metodas leidžia ne tik kiekybiškai išmatuoti poveikį, bet ir palyginti skirtingas medžiagas ar technologijas pagal bendrą aplinkosauginį poveikį [41, 50].

ReCiPe2016 metodikoje nurodoma, kad poveikio vertinimas atliekamas trimis etapais:

1. klasifikavimas – kai kiekvienas medžiagų srautas priskiriamas atitinkamai poveikio kategorijai, pavyzdžiui, CO<sub>2</sub> – klimato kaita, SO<sub>2</sub> – rūgštėjimas ir t.t.;
2. charakterizavimas – kai duomenys paverčiami į bendrus poveikio rodiklius, taikant konversijos koeficientus, pavyzdžiui, CH<sub>4</sub> → 28 × CO<sub>2</sub> eq.;
3. normalizavimas ir svėrimas – kai rezultatai išreiškiami prilyginant funkciniam vienetu (šio tyrimo atveju – 1 kg celiuliozės acetato siūlų), o svėrimas leidžia nustatyti didžiausius poveikio šaltinius („karštuosius taškus“) [50].

## Poveikio kategorijos ir jų žymėjimas

Taikant ReCiPe2016 metodą, BCV inventoriaus duomenys charakterizuojami į poveikio kategorijas. Siekiant supaprastinti rezultatų pateikimą ir palyginimą grafikuose, kiekvienai poveikio kategorijai priskirti trumpiniai. Poveikio kategorijų pavadinimai ir jų atitinkami trumpiniai pateikiami 5 lentelėje.

**5 lentelė.** Poveikio kategorijų trumpiniai naudojami pateikiant rezultatus [38, 41, 49, 50].

Poveikio kategorija	Trumpinys
Visuotinis atšilimas, žmonių sveikata	VA žm
Visuotinis atšilimas, sausumos ekosistemos	VA saus
Visuotinis atšilimas, gėlo vandens ekosistemos	VA gv
Stratosferos ozono sluoksnio nykimas	SO nyk
Jonizuojančioji spinduliuotė	JS
Ozono susidarymas, žmonių sveikata	OS žm
Smulkiųjų kietųjų dalelių susidarymas	KD
Ozono susidarymas, sausumos ekosistemos	OS saus
Sausumos rūgštėjimas	SR
Gėlo vandens eutrofikacija	GE
Jūrų eutrofikacija	JE
Sausumos ekotoksiškumas	SE
Gėlo vandens ekotoksiškumas	GEk
Jūrų ekotoksiškumas	JEk
Kancerogeninis toksiškumas žmonėms	KT žm
Nekancerogeninis toksiškumas žmonėms	NT žm
Žemės naudojimas	ŽN
Mineralinių išteklių trūkumas	MI
Iškastinių išteklių trūkumas	II
Vandens suvartojimas, žmonių sveikata	VS žm
Vandens suvartojimas, sausumos ekosistema	VS saus
Vandens suvartojimas, vandens ekosistemos	VS vand

## Charakterizavimas

Charakterizavimo metu kiekvieno sunaudojamo ištekliaus ar emisijos į aplinką poveikis kiekybiškai įvertinamas pagal aplinkos mechanizmą. Pavyzdžiui, anglies dioksidas, metanas ir azoto oksidas yra priskiriami klimato kaitos kategorijai, o jų poveikis išreiškiamas CO<sub>2</sub> ekvivalentais (kg CO<sub>2</sub> eq) taikant atitinkamus konversijos koeficientus. Apibūdinimo koeficientas yra kiekvienam elementariam srautui būdingas santykis, parodantis, kiek vienas jo vienetas prisideda prie bendro poveikio rodiklio [50].

Remiantis moksliniais tyrimais 6 lentelėje pateikiamos pagrindinės poveikio kategorijos, kurios atspindi svarbiausius celiuliozės acetato siūlų gamybos aspektus ir atitinka ReCiPe2016 metodikoje taikomus rodiklius tekstilės sektoriuje. Visų poveikio kategorijų rezultatai šiame tyrime pateikiami vienam funkciniam vienetui – 1 kg celiuliozės acetato siūlų.

**6 lentelė.** Poveikio kategorijos ir reikšmė celiuliozės acetato siūlų būvio ciklo vertinime [38, 41, 49, 50].

Poveikio kategorija	Trumpas aprašymas	Matavimo vienetas	Reikšmė tyrimui
Klimato kaita	Šiltnamio efektą sukeliančių dujų (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O) emisijos.	kg CO <sub>2</sub> eq	Įvertina energijos vartojimo ir žaliavų gamybos poveikį.
Rūgštėjimas	Rūgštinių junginių emisijos (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> ) į atmosferą	mol H <sup>+</sup> eq	Aktuali acto anhidrido gamybos ir garavimo procesams.
Eutrofikacija	Maistinių medžiagų išsiskyrimas į vandenį (N, P junginiai).	kg P eq	Parodo nuotekų poveikį vandenų būklei.
Kietųjų dalelių formavimasis	KD <sub>2.5</sub> emisijos iš energijos deginimo procesų.	kg PM <sub>2.5</sub> eq	Susiję su žaliavų apdorojimu. Susijusi su garų ir šilumos generavimu.
Vandens naudojimas	Vandens sunaudojimas visame gamybos cikle.	m <sup>3</sup>	Itin svarbi gamybos procesams.
Iškastinių išteklių naudojimas	Naftos, dujų ir anglies sunaudojimas.	MJ	Atspindi energijos poreikį ir jo intensyvumą.
Metalų išteklių naudojimas	Metalų bei mineralų naudojimas įrangos ar reagentų gamyboje.	kg Cu eq	Netiesioginis poveikis dėl pramoninės įrangos gamybos.
Atliekų susidarymas	Kietųjų liekanų ir dumblo kiekis po gamybos procesų.	kg	Vertina likučių tvarkymo ir šalinimo aspektus.

### Rezultatų charakterizavimo metodas

ReCiPe2016 metodikoje numatytos trys vertinimo perspektyvos (I, H, E), kurios leidžia atspindėti skirtingus požiūrius į aplinkosauginius sprendimus, sugrupuoti panašias prielaidas ir pasirinkimus:

- 1) individualistinė (I) – remiasi trumpalaikėmis pasekmėmis, technologiškai optimistine prielaida ir žmogaus prisitaikymo galimybėmis;
- 2) hierarchistinė (H) – pagrįsta labiausiai paplitusiais mokslo ir politikos principais, laikoma „vidurinė“ ir dažniausiai taikoma perspektyva;
- 3) egalitarinė (E) – apima ilgesnį laikotarpį ir vertina net ir nepatvirtintus, tačiau potencialiai svarbius poveikius, laikoma atsargiausia [50].

Šiame tyrime pasirinkta hierarchistinė (H) perspektyva, nes ji laikoma standartine ir tinkamiausia tarptautiniam poveikio vertinimui [50].

### Normalizavimas

Normalizavimas nėra privalomas pagal ISO 14040/44 standartą, tačiau, kadangi dažnai taikomas rezultatų interpretacijai supaprastinti, jis naudojamas šiame tyrime. Jo metu kiekvienos poveikio kategorijos vertės palyginamos su atitinkama etalonine (vidutine pasauline arba regionine) reikšme, siekiant gauti santykinį poveikio dydį [41, 50].

### 2.4 Rezultatų interpretavimas ir jautrumo analizė

Šioje BCV dalyje atliekama gautų duomenų analizė ir vertinimas, siekiant užtikrinti jų atitiktį tyrimo tikslui ir apibrėžtai apimčiai. Rezultatai interpretuojami atsižvelgiant į poveikio kategorijų reikšmes bei jų tarpusavio skirtumus, identifikuojant aplinkosauginiu požiūriu palankiausią scenarijų. Analizuojami inventorinės analizės ir poveikio vertinimo rezultatai, siekiant nustatyti pagrindines

problemas, susijusias su duomenų kokybe, taikytų metodų patikimumu, atliktomis prielaidomis bei reikšmingiausiomis, labiausiai susijusiomis su tiriamo produkto būvio ciklo poveikio kategorijomis [51].

Be bendrų poveikio kategorijų rezultatų analizės, vertinamas atskirų procesų indėlis į bendrą poveikį aplinkai, identifikuojant pagrindinius poveikio šaltinius. Scenarijų A, B ir C rezultatai lyginami tarpusavyje, siekiant įvertinti pirminių ir antrinių žaliavų naudojimo bei perdirbimo įtaką bendram poveikiui aplinkai. Interpretavimo metu identifikuojami tie būvio ciklo etapai („karštieji taškai“), kurie labiausiai prisidėjo prie bendro poveikio aplinkai. Ši analizė turi padėti nustatyti, kurie procesai – pavyzdžiui, A ir B scenarijuose – acetilinimo reakcija, acetono regeneracija ar energijos gamyba – daro didžiausią poveikį klimato kaitai, rūgštėjimui ar energijos naudojimui [41, 50]. C scenarijų analizė leidžia įvertinti, kaip skirtingas antrinės žaliavos panaudojimo lygis veikia bendrą būvio ciklo poveikį aplinkai. Santykinis rezultatų pateikimas pasirinktas siekiant aiškiau palyginti scenarijų tarpusavio skirtumus, kadangi skirtingų poveikio kategorijų absoliučios reikšmės ir vienetai labai skiriasi. Bazinis scenarijus buvo prilygintas 100 %, o kitų scenarijų rezultatai pateikti santykinė išraiška bazinio scenarijaus atžvilgiu.

Pažymėtina, kad interpretavimo etapas yra kartotinis procesas, t. y. gavus rezultatus gali būti nustatytos sritys, kurias reikėtų patikslinti ankstesniuose BCV etapuose, siekiant didesnio tyrimo tikslumo ir patikimumo [51].

### **Jautrumo analizė**

Jautrumo analizė taikoma siekiant įvertinti rezultatų patikimumą ir nustatyti, kaip pagrindinių parametrų pokyčiai gali paveikti galutinius poveikio vertinimo rezultatus [51]. Ši analizė leidžia įvertinti modelio stabilumą ir duomenų kokybę, keičiant pasirinktus įvesties parametrus [50].

Šiame tyrime jautrumo analizė taikoma vertinant pagrindinių įvesties parametrų, tokių kaip energijos sąnaudos ir cheminių medžiagų kiekiai, pokyčių įtaką bendram poveikiui aplinkai. Analizė atlikta keičiant atskirus modelio parametrus (acto anhidrido kiekio sumažinimas 10 % ir energijos naudojimo sumažinimas 10%) ir vertinant jų įtaką poveikio kategorijų rezultatams.

### 3 Rezultatai

#### 3.1 Būvio ciklo vertinimo inventoriniai duomenys

Inventoriniai duomenys (žr. 7 lentelė) sudaryti remiantis įmonės pateiktas proceso lygmens duomenimis ir literatūros šaltiniais. Visi srautai išreikšti vienam funkciniam vienetui – 1 kg celiuliozės acetato siūlų. A scenarijuje naudojama pirminė medienos celiuliozė, o B scenarijuje – iš tekstilės atliekų gauta celiuliozė. Celiuliozės kiekiai (0,592 kg/kg A scenarijuje ir 0,598 kg/kg B scenarijuje) nustatyti taikant masės balanso principą, įvertinant galutinio produkto sudėtį ir žaliavos kilmės skirtumus. Celiuliozės acetato granulės (0,918 kg/kg A scenarijuje ir 0,928 kg/kg B scenarijuje) pateikiamos kaip tarpinis proceso srautas, nustatytas remiantis įmonės duomenimis. Šis dydis atspindi granuliu kiekį, reikalingą 1 kg siūlų pagaminti verpimo etape.

Acetilinimo proceso reagentų kiekiai (acto rūgštis – 1 kg/kg ir acto anhidridas – atitinkamai 0,984 ir 0,975 kg/kg) nustatyti remiantis literatūros duomenimis [43], darant prielaidą, kad reakcijos sąlygos A ir B scenarijuose yra analogiškos. Katalizatoriaus (sieros rūgšties) kiekis laikomas pastovus – 0,2 kg/kg [21, 22, 23]. Acetono sąnaudos (0,330 ir 0,2728 kg/kg) nustatytos pagal įmonės duomenis, įvertinant, kad didžioji dalis tirpiklio yra regeneruojama. Modelyje laikoma, kad apie 95–99 % acetono grąžinama į procesą, todėl lentelėje pateikiama tik faktinė sunaudojama (nuostolių) dalis.

Verpimo procese naudojamo garo (0,01105 ir 0,01108 kWh/kg) bei elektros energijos (2,458 ir 2,468 kWh/kg) sąnaudos nustatytos remiantis įmonės duomenimis. Papildomai išskirta atsinaujinančios elektros energijos dalis (0,0717 ir 0,072 kWh/kg), kuri įtraukiama siekiant įvertinti energijos šaltinių įtaką.

Bendras vandens sunaudojimas gamyboje laikomas pastovus abiem scenarijams ir sudaro 10,27 kg/kg produkto, remiantis įmonės duomenimis. Emisijos iš verpimo tirpalo (0,306 kg/kg) nustatytos darant prielaidą, kad dalis acetono, nepaisant regeneracijos, patenka į aplinką arba lieka produkte.

Išvesties srautai apima skystas procesines nuotekas (0,0043 m<sup>3</sup>/kg), kurios susidaro valymo procese, bei kietąsias atliekas – filtrus (0,045 kg/kg). Galutinio produkto kiekis laikomas lygus funkciniam vienetui (1 kg).

**7 lentelė.** Celiuliozės acetato siūlų gamybos inventoriniai duomenys pagal A ir B scenarijus.

Aprašymas	Inventorius	Matav. vienetai	Celiuliozė iš medienos - A	Celiuliozė iš tekstilės atliekų - B	Duomenų šaltinis
<b>Įvestys</b>					
Aukšto grynumo celiuliozė	Celiuliozė	kg/kg	0,592	0,598	Apskaičiuota taikant masės balanso principą.
Acetilinimas	Acto rūgštis (CH <sub>3</sub> COOH)	kg/kg	1	1	[41]
	Acto anhidridas ((CH <sub>3</sub> CO) <sub>2</sub> O)	kg/kg	0.984	0.975	[41]
Katalizatorius	Sieros rūgštis (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	kg/kg	0.2	0.2	[21, 22, 23]
Paruoštos verpimo tirpalui granulės – tarpinis produktas (naudota proceso skaidymui modeliuojant)	Acetato granulės	kg/kg	0.918	0.928	Įmonės duomenys
Grynas	Acetonas	kg/kg	0.330	0.2728	Įmonės duomenys

Aprašymas	Inventorius	Matav. vienetai	Celiuliozė iš medienos - A	Celiuliozė iš tekstilės atliekų - B	Duomenų šaltinis
Verpimui naudojamas garas	Garas/karštas oras (energija)	kWh/kg	0,01105	0.01108	Įmonės duomenys
Visai gamybai naudojama elektros energija	Elektros energija	kWh/kg	2.458	2.468	Įmonės duomenys
	Atsinaujinanti elektros energija (saulės)	kWh/kg	0.0717	0.072	Įmonės duomenys
Visos gamybos	Vanduo	kg/kg	10.27	10.27	Įmonės duomenys
Emisijos iš verpimo tirpalo - Regeneracija	Acetonas (95–99%), laikoma, kad didžioji dalis regeneruojama	kg/kg	0.306	0.306	Įmonės duomenys
<b>Įvestys</b>					
Skystos procesinės nuotekos: Likusios proceso ar valymo nuotekos, turinčios acetono ar celiuliozės acetato pėdsakų	Skystos nuotekos	m <sup>3</sup> /kg	0,0043	0,0043	Įmonės duomenys
Pagaminti siūlai	Celiuliozės acetato siūlai	kg/kg	1	1	[35, 41, 46]
Gamybos atliekos - filtrai	Kietos atliekos	kg/kg	0.045	0.045	Įmonės duomenys

### Būvio ciklo pabaigos procesų inventorius

Toliau pateikiami išplėstų sistemos ribų scenarijų inventoriniai duomenys (žr. 8 lentelė). Inventorinėje analizėje suformuoti C scenarijai, kuriuose į gamybos procesą įtraukiama dalis B1 scenarijuje gautos antrinės celiuliozės. Šiuose scenarijuose modeliuojamos skirtingos pirminės ir antrinės žaliavos proporcijos (20–100 %), išlaikant tą patį funkcinį vienetą. Tokiu būdu suderinami A scenarijaus pirminės žaliavos srautai su B1 scenarijuje gautos antrinės žaliavos srautais.

**8 lentelė.** Celiuliozės acetato siūlų būvio ciklo pabaigos procesų inventoriniai duomenys A1 ir B1 scenarijams.

Aprašymas	Inventorius	Matav. vienetai	Celiuliozės acetato siūlai -A1	Celiuliozė iš tekstilės atliekų – B1	Duomenų šaltinis
<b>Įvestys</b>					
Tekstilės atliekos	Celiuliozės acetato siūlų atliekos - tekstilės atliekos	kg	1	1	Prielaida (funkcinis vienetas 1 kg)
Elektros energija	Laikoma vienoda visiems scenarijams	kWh/kg	-	7,6	[41]
Transportavimas	-	km	100	100	Laikomas tipiniu atstumu
<b>Išvestys</b>					
Atgavimo rodiklis	Atgaunama žaliava	kg/kg	-	0,49	Eksperimentiniai duomenys iš literatūros [30, 34, 48]
Kietos atliekos	Susidaranti atliekos	kg/kg	-	0,51	[34, 41, 48]

Išplėstame modelyje vertinami produkto būvio ciklo pabaigos scenarijai. A1 scenarijuje celiuliozės acetato siūlai po naudojimo nukreipiami į energinį panaudojimą (deginimą). Šiame scenarijuje taikomi tik transportavimo ir galutinio atliekų tvarkymo procesai. B1 scenarijuje siūlai surenkami, transportuojami ir perdirbami, atgaunant antrinę celiuliozę, kuri grąžinama į gamybos procesą.

Perdirbimo proceso inventoriniai duomenys sudaryti remiantis literatūros šaltiniais ir masės balanso principu. Atgavimo rodiklis (0,49 kg/kg) nustatytas pagal moksliniuose tyrimuose pateiktus tekstilės atliekų perdirbimo ir celiuliozės išgavimo rezultatus [30, 34, 48].

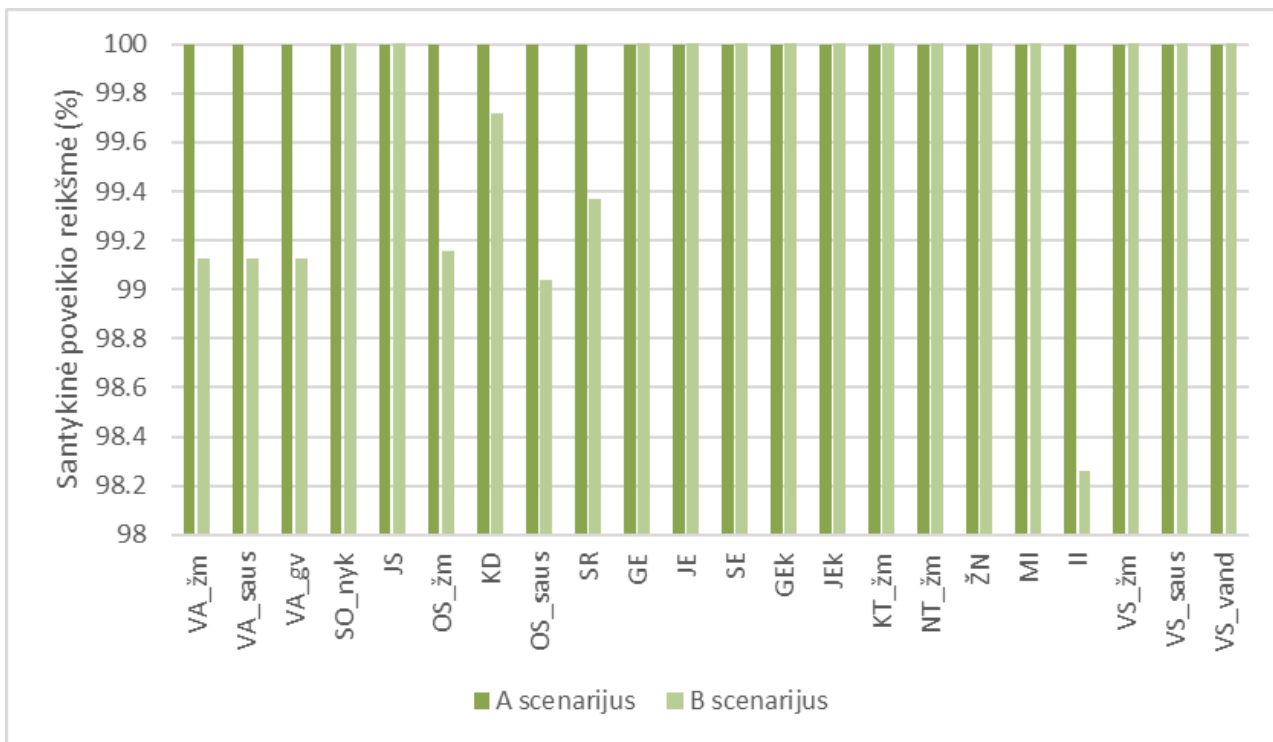
Elektros energijos sąnaudos modelyje pritaikytos remiantis panašių technologinių procesų BCV duomenimis, laikant, kad perdirbimo etapas apima mechaninį ir cheminį apdorojimą. Kietųjų atliekų kiekis apskaičiuotas kaip neatgauta žaliavos dalis (1 kg – atgauta medžiaga), darant prielaidą, kad dalis pašalinama kaip atliekos, o likusi dalis grąžinama į gamybos procesą. Transportavimo atstumas laikomas tipiniu (100 km), o elektros energijos sąnaudos laikomos vienodos visiems scenarijams [34, 41, 48].

## **3.2 Būvio ciklo vertinimo rezultatai**

### **3.2.1 Celiuliozės acetato siūlų gamybos iš pirminių ir antrinių žaliavų scenarijų palyginimas**

Atlikus celiuliozės acetato siūlų, pagamintų iš pirminių žaliavų (A scenarijaus) ir celiuliozės acetato siūlų, pagamintų iš tekstilės atliekų celiuliozės (B scenarijaus) palyginimą nustatyta, kad skirtumai tarp scenarijų daugumoje poveikio kategorijų buvo nedideli. Charakterizuoti rezultatai pateikiami papildinto mastelio grafike, leidžiančiame aiškiau įvertinti skirtumus, o pilni rezultatų duomenys pateikti 1 priedo 1 paveiksle ir 1 lentelėje. Remiantis SimaPro grafiko modeliavimo principu, A scenarijaus reikšmės pateiktos kaip atskaitos taškas (100 %), o B scenarijaus rezultatai išreikšti procentais A scenarijaus atžvilgiu. Siekiant aiškiau parodyti nedidelius skirtumus tarp scenarijų, grafiko mastelis sumažintas iki 98–100 % intervalo. Rezultatuose pateikiamuose grafikuose naudojamų poveikio kategorijų trumpiniai ir jų paaiškinimai pateikti 2.3 skyriaus 5 lentelėje.

16 paveiksle pateiktas santykinis poveikio kategorijų palyginimas rodo, kad abiejų nagrinėjamų scenarijų – celiuliozės acetato siūlų iš pirminės ir perdirbtos tekstilės gamybos – charakterizuotų duomenų rezultatai daugumoje poveikio kategorijų buvo labai panašūs. Daugelyje kategorijų skirtumai svyravo 99–100 % ribose, o tai rodo, kad bendras poveikis aplinkai tarp scenarijų kito nežymiai. Didžiausi skirtumai nustatyti visuotinio atšilimo (VA), fotocheminio ozono susidarymo (OS), turinčio įtakos žmonių sveikatai ir sausumos ekosistemoms, bei sausumos rūgštėjimo (SR) kategorijose, kuriose B scenarijaus poveikis buvo šiek tiek mažesnis. Tokie skirtumai gali būti siejami su mažesnėmis žaliavų (įrodo beveik 2 % išteklių išekvojimo (II) sumažėjimas B scenarijuje), energijos ar vandens sąnaudomis kai kuriuose B scenarijaus inventorizacijos etapuose.



**16 pav.** Celiuliozės acetato siūlų iš pirminių (A) ir antrinių (B) žaliavų scenarijų charakterizuotų duomenų santykinis poveikio kategorijų palyginimas (%).

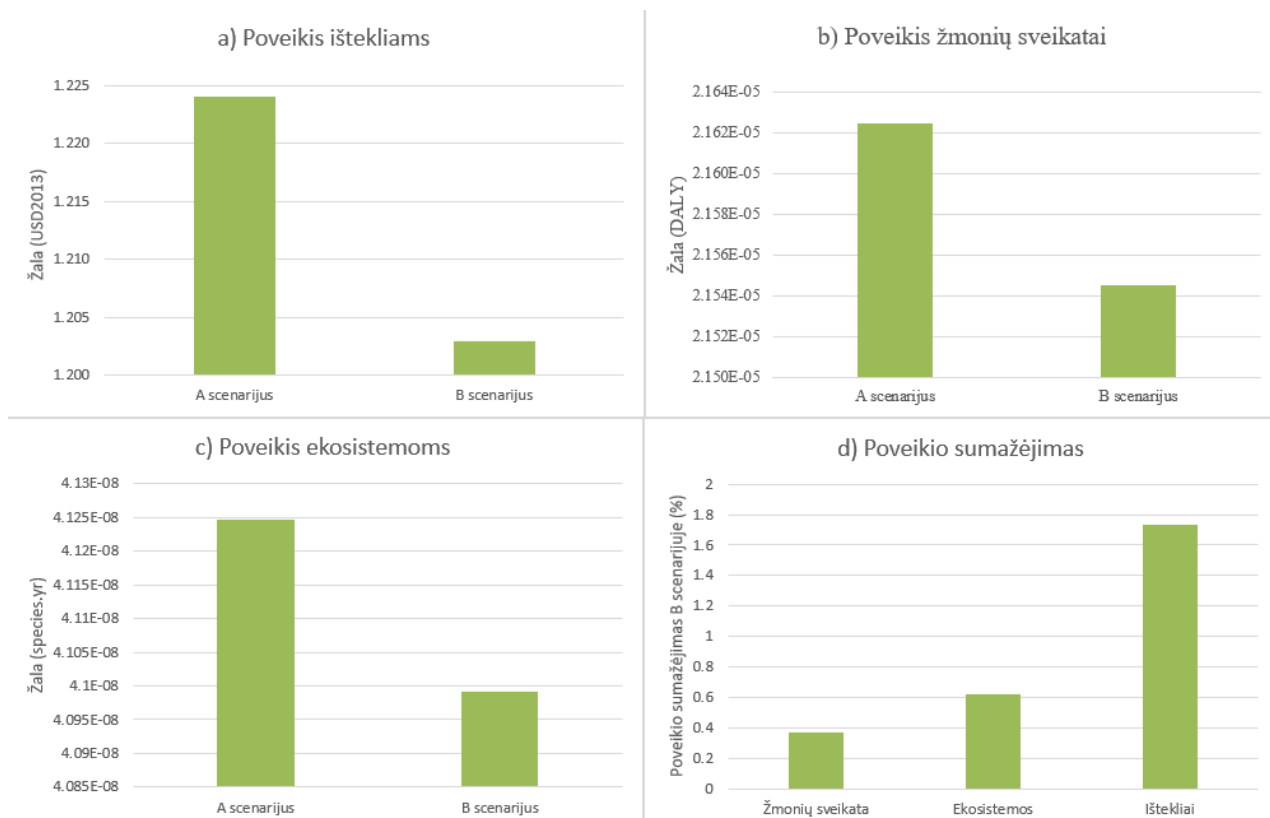
Kita vertus, kai kuriose kategorijose skirtumai buvo nereikšmingi arba beveik nepastebimi, todėl galima teigti, kad perdirbtos tekstilės naudojimas celiuliozės acetato siūlų gamyboje šiame scenarijuje neturėjo esminės įtakos bendram poveikiui aplinkai.

### Galutinio poveikio kategorijų analizė

17 paveiksle pateikti poveikio įvertinimo rezultatai rodo bendrą nagrinėjamų scenarijų poveikį trims pagrindinėms aplinkosaugos sritims: žmonių sveikatai, ekosistemoms ir išteklių naudojimui. Gauti rezultatai atskleidžia, kad visose trijose kategorijose perdirbtos tekstilės scenarijus pasižymi šiek tiek mažesniu poveikiu, lyginant su pirminės žaliavos celiuliozės acetato siūlų scenarijumi.

Didžiausias absoliutus poveikis nustatytas išteklių kategorijoje, kur vertės išreiškiamos pinigine išraiška (USD2013). Tai rodo reikšmingą žaliavų ir energijos sąnaudų įtaką bendram poveikiui. Šioje kategorijoje perdirbtos tekstilės scenarijus leidžia sumažinti poveikį maždaug 1,7 %, kas yra didžiausias santykinis sumažėjimas tarp visų nagrinėtų kategorijų. Žmonių sveikatos kategorijoje, išreikštoje DALY vienetais, taip pat stebimas nedidelis poveikio sumažėjimas (apie 0,4 %), o ekosistemų kategorijoje (species·yr) sumažėjimas siekia apie 0,6 %.

Nors absoliutūs skirtumai tarp scenarijų nėra dideli, nuosekli tendencija visose poveikio kategorijose rodo, kad perdirbtos tekstilės naudojimas celiuliozės acetato siūlų gamyboje gali prisidėti prie bendro aplinkosauginio poveikio mažinimo. Tai galima paaikškinti sumažėjusiu pirminių išteklių poreikiu ir mažesniu žaliavų paruošimo etapo intensyvumu.



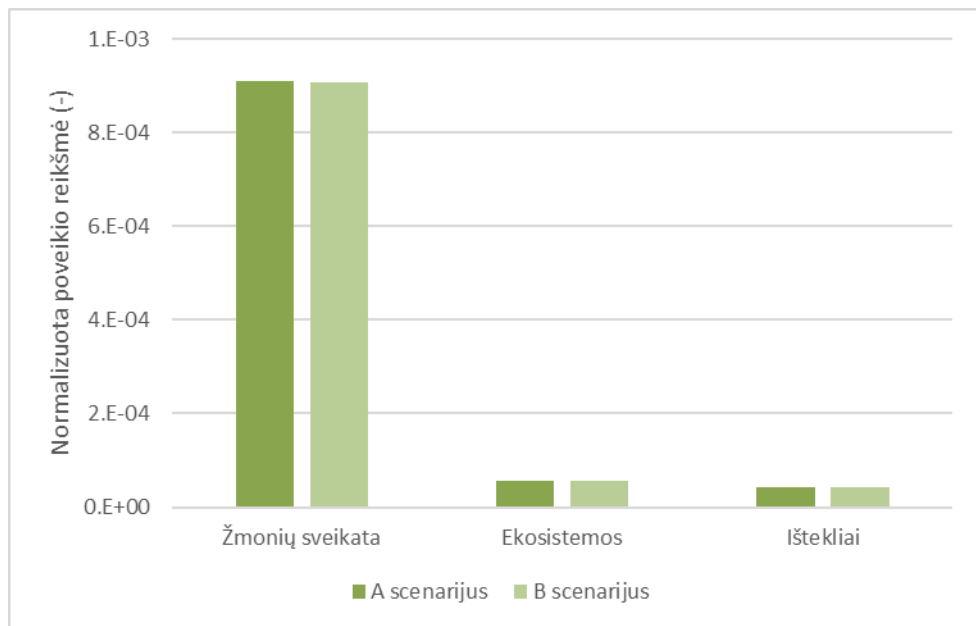
**17 pav.** Galutinio poveikio kategorijų charakterizuotų rezultatų palyginimas tarp A ir B scenarijų: a) poveikis ištekliams (USD2013), b) poveikis žmonių sveikatai (DALY), c) poveikis ekosistemoms (species·yr), d) poveikio sumažėjimas (%).

Apibendrinant galima teigti, kad perdirbtos žaliavos scenarijus yra aplinkosauginiu požiūriu palankesnis, tačiau skirtumai yra santykinai nedideli ir turėtų būti vertinami kartu su kitais būvio ciklo etapais bei neapibrėžtumais. Skaičiavimo rezultatai pateikti 1 priedo 2 lentelėje.

### Normalizacija

Normalizuoti rezultatai parodė panašią tendenciją kaip ir charakterizuoti bei žalos vertinimo rezultatai. Visose nagrinėtose poveikio kategorijose skirtumai tarp A ir B scenarijų buvo nedideli, o bendras poveikio pasiskirstymas tarp žmonių sveikatos, ekosistemų ir išteklių kategorijų išliko panašus. Didžiausias indėlis bendram poveikiui nustatytas žmonių sveikatos kategorijoje, tuo tarpu ekosistemų ir išteklių kategorijose poveikio reikšmės buvo mažesnės.

Nedideli skirtumai tarp scenarijų rodo, kad vien žaliavos kilmės pakeitimas ne visada lemia reikšmingą bendro poveikio sumažėjimą. Tai gali būti siejama su tuo, kad perdirbtos tekstilės paruošimo ir apdorojimo procesai reikalauja papildomų energijos, transportavimo ir cheminių medžiagų sąnaudų. Literatūroje taip pat pabrėžiama, kad perdirbimo procesų integravimas į gamybos grandinę ne visada užtikrina mažesnę poveikį aplinkai, ypač kai procesai yra energetiškai intensyvūs [6, 28].



**18 pav.** A ir B scenarijų normalizuotų galutinio poveikio kategorijų palyginimas.

Svarbus veiksnys, lemiantis gautus rezultatus, yra cheminės medžiagos naudojamos celiuliozės acetato siūlų gamyboje. Ankstesni tyrimai rodo, kad didžiausią poveikį aplinkai gali lemti acetilinimo procese naudojamos cheminės medžiagos, ypač acto anhidridas, kurio gamyba yra energetiškai intensyvi ir sudaro reikšmingą viso būvio ciklo poveikio dalį [41]. Tai paaiškina, kodėl net ir naudojant perdirbtą celiuliozę bendras poveikis išlieka panašus – pagrindinis poveikio šaltinis yra ne tik žaliava, bet ir naudojamos cheminės medžiagos.

### 3.2.2 Scenarijų palyginimas nuo žaliavų iki atliekų tvarkymo

Toliau atliktas A1 scenarijaus, kuriame siūlai po naudojimo nukreipiamas į energinį panaudojimą – deginimą, palyginimas su B1 scenarijumi, kuriame siūlai po naudojimo surenkami ir perdirbami. Palyginus A1 ir B1 scenarijus matyti, kad B1 scenarijuje visose nagrinėtose poveikio kategorijose nustatytos didesnės poveikio reikšmės. Daugelyje kategorijų poveikis buvo daugiau kaip 50 % didesnis nei A1 scenarijuje. Didžiausi skirtumai nustatyti jūrų eutrofikacijos (JE), gėlo vandens ekotoksiškumo (GEk) ir jūros ekotoksiškumo (JS) kategorijose. Tokie rezultatai gali būti siejami su B1 scenarijuje papildomai įtrauktu tekstilės atliekų perdirbimo procesu, kuriam reikalingos papildomos cheminės medžiagos, energijos sąnaudos ir transportavimo etapai. Tuo tarpu A1 scenarijuje atliekos nukreipiamos tiesioginiam deginimui, todėl išvengiama dalies papildomų procesų.

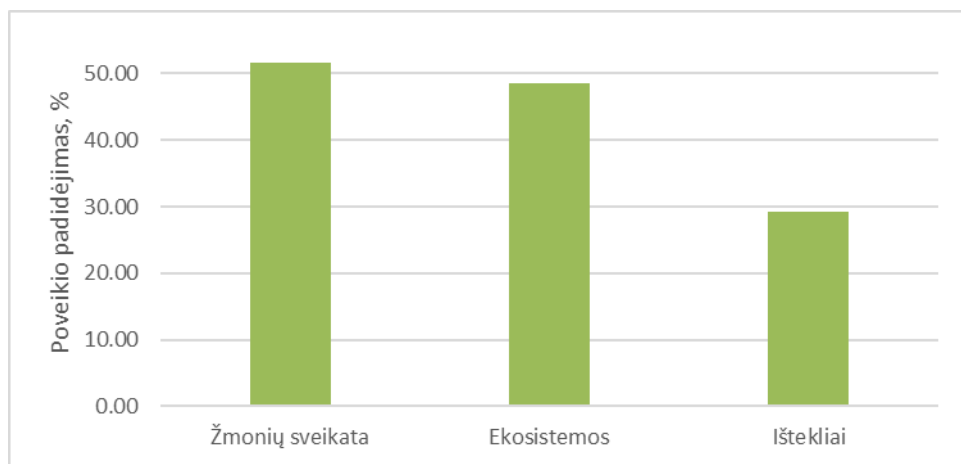
Gauti rezultatai gali būti siejami su tuo, kad tekstilės atliekų perdirbimo procesai nėra visiškai efektyvūs. Remiantis literatūros duomenimis, celiuliozės atgavimo metu, dalis žaliavos prarandama ir tampa atliekomis, kurioms reikalingas papildomas tvarkymas. Dėl to atsiranda papildomi atliekų tvarkymo ir žaliavų kompensavimo procesai, kurie didina bendrą poveikį aplinkai net ir taikant žiedinės ekonomikos principus.



19 pav. A1 ir B1 scenarijų charakterizuotų poveikio kategorijų palyginimas (%).

### Normalizacija

Galutinio poveikio kategorijų analizė parodė, kad B2 scenarijus visose vertintose kategorijose pasižymi didesniu poveikiu nei A1 scenarijus. Normalizacijos rezultatai pateikti 2 priedo 2 lentelėje.



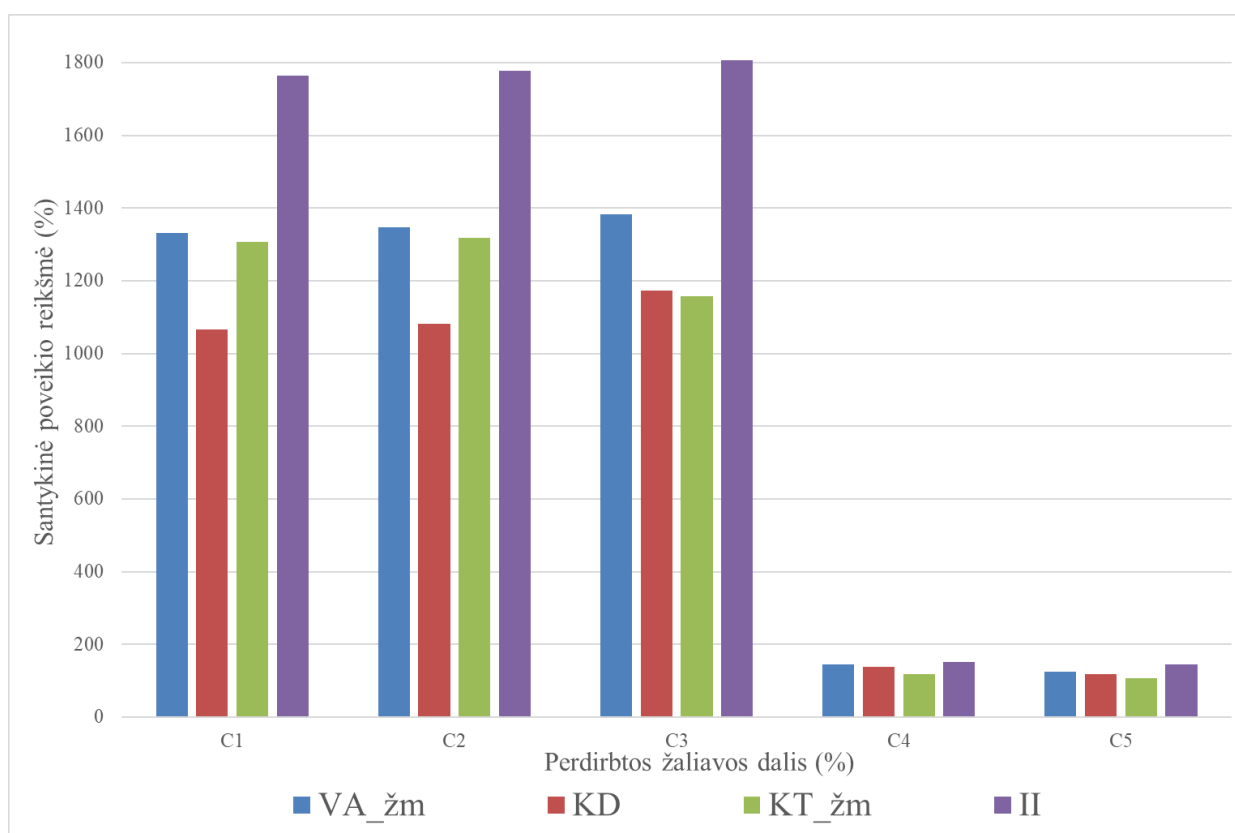
20 pav. Normalizuotų galutinio poveikio kategorijų poveikio padidėjimas B1 scenarijuje, lyginant su A1 scenarijumi (%).

Didžiausias poveikio padidėjimas nustatytas žmonių sveikatos kategorijoje (51,5 %), labai panašus – ekosistemų kategorijoje (48,5 %), o mažiausias – išteklių kategorijoje (29,2 %). Gauti rezultatai rodo, kad papildomi perdirbimo, transportavimo ir cheminio apdorojimo etapai daro didžiausią įtaką žmonių sveikatos ir ekosistemų kategorijoms, tuo tarpu išteklių naudojimo skirtumai išlieka mažesni. Gauti rezultatai pagrindžia literatūroje randamų naujausių BCV rezultatus, kad perdirbimas turi didesnę poveikį aplinkai, dėl papildomų sudėtingų technologinių procesų taikymo bei ne pilno žaliavos atgavimo ir papildomų atliekų susidarymo ir jų sutvarkymo procesų [7, 38].

Kadangi ir literatūroje pabrėžiama, kad BCV rezultatai labai priklauso nuo pasirinktų sistemos ribų ir inventoriaus duomenų, tyrime sistemos ribų išplėtimas suteikė galimybę įvertinti celiuliozės acetato siūlų poveikį aplinkai, modeliuojant uždarą būvio ciklą.

### 3.2.3 Scenarijų palyginimas keičiant perdirbtos tekstilės kiekį žaliavų sudėtyje

Siekiant įvertinti perdirbtos tekstilės kiekio, esančio žaliavose, įtaką celiuliozės acetato siūlų gamybos poveikiui aplinkai, buvo sumodeliuoti scenarijai, kuriuose perdirbtos tekstilės celiuliozės dalis žaliavų sudėtyje palaipsniui didinama nuo 20 % iki 100 %. Papildomai vertintas C5 scenarijus, kuriame žaliavas sudaro 100 % perdirbtos tekstilės celiuliozė, tačiau perdirbimo procese naudojama saulės energija. Rezultatai pateikti santykinė išraiška, kai A1 scenarijus prilygintas 100 % (tačiau grafike A1 scenarijus nepateiktas). Detalūs skaičiavimo rezultatai pateikti 3 priedo 2 lentelėje, o visų poveikio kategorijų charakterizuotų duomenų grafinė išraiška pateikta 3 priedo 1 paveiksle.



**21 pav.** Perdirbtų žaliavų dalies (C1-C5 scenarijuose) įtaka charakterizuotų poveikio kategorijų reikšmėms, kai A1 scenarijus prilygintas 100 %.

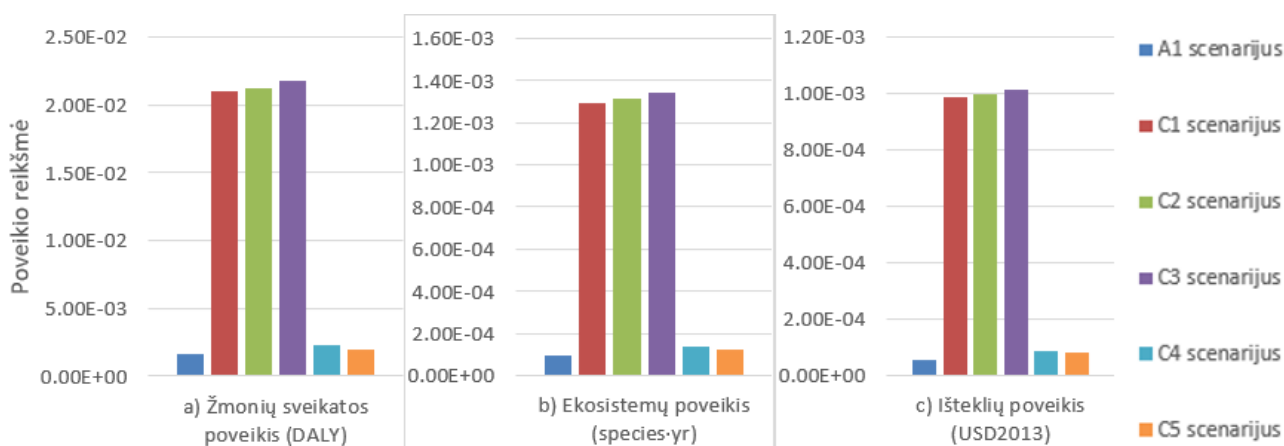
21 paveiksle charakterizuotiems rezultatams pateikti, pasirinktos visuotinio atšilimo, turinčio įtakos žmonių sveikatai, kancerogeninio toksiškumo žmonėms, smulkiųjų kietųjų dalelių susidarymo bei iškastinių išteklių trūkumo poveikio kategorijos. Gauti charakterizuoti rezultatai rodo netiesinę priklausomybę tarp perdirbtos tekstilės kiekio ir poveikio aplinkai. Didžiausios poveikio reikšmės nustatytos scenarijuose, kuriuose perdirbtos celiuliozės dalis sudarė 20–80 %. Šiuose scenarijuose poveikis visuotinio atšilimo, kietųjų dalelių susidarymo ir kancerogeninio toksiškumo žmogui kategorijose daugiau kaip 10 kartų viršijo A1 scenarijaus reikšmes, kurios kaip minėta prilygintos 100 %. Didžiausias poveikis nustatytas iškastinių išteklių trūkumo (II) kategorijoje, kur reikšmės siekė iki 1807 %, o mažiausias – smulkiųjų kietųjų dalelių susidarymo (KD) kategorijoje.

Tuo tarpu 100 % perdirbtos žaliavos scenarijuje (C5), kuriame naudojamos elektros energijos šaltinis yra saulės elektros energija, nustatytas ryškus poveikio sumažėjimas visose vertintose kategorijose (visų poveikio kategorijų rezultatai pateikti 3 priedo 1 paveiksle). Taigi, remiantis gautais rezultatais, galima sakyti, kad papildomai naudojant saulės energiją poveikis sumažėjo dar labiau, ypač žmonių sveikatos ir išteklių išekvojimo kategorijose. Tai rodo, kad reikšmingą įtaką galutiniams rezultatams turi ne tik žaliavos kilmė, bet ir energijos šaltinio pasirinkimas. Literatūroje taip pat nurodoma, kad energijos vartojimo struktūra yra vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių tekstilės gaminių poveikį aplinkai, nes cheminiai ir technologiniai procesai labai imlūs energijai ir prisideda prie ŠESD kiekio didėjimo [7, 43].

Siekiant detaliau įvertinti bendrą poveikio pasiskirstymą tarp pagrindinių vertinimo kategorijų, toliau pateikiama normalizuotų rezultatų analizė žmonių sveikatos, ekosistemų ir išteklių kategorijose.

## Normalizacija

Analizė parodė reikšmingą poveikio padidėjimą dalinio perdirbimo scenarijuose (20–80 % perdirbtos tekstilės celiuliozės), kuris visose kategorijose viršijo 10 kartų, lyginant su A1 scenarijumi. Tačiau galutinio poveikio vertinimo rezultatai rodo, kad bendras poveikis išlieka mažesnis nei būtų galima tikėtis, ypač 100 % perdirbtos žaliavos scenarijuje. Tai rodo, kad didžiausią įtaką rezultatams turi ne vien perdirbtos žaliavos kiekis, bet ir bendras technologinių procesų bei energijos vartojimo efektyvumas.



**22 pav.** Galutinio poveikio kategorijų normalizuotų rezultatų palyginimas skirtinguose perdirbtų žaliavų proporcijų scenarijuose (C1-C5 scenarijuose).

Gauti rezultatai pateikti trijose poveikio kategorijose – žmonių sveikatos, ekosistemų ir išteklių. Siekiant išvengti rezultatų mastelio skirtumų dėl skirtingų vienetų (DALY, species·yr ir USD2013), kiekviena kategorija pateikta atskirai (žr. 22 paveikslas). Rezultatai rodo, kad didėjant perdirbtos celiuliozės kiekiui žaliavose, tendencingai didėja poveikis žmonių sveikatai, ekosistemoms, iš ištekliams, tačiau gamyboje naudojant vien tik antrinę žaliavą, C4 scenarijaus rezultatai rodo iki 10 kartų mažesnę poveikį visoms galutinio poveikio kategorijoms. Gamybos procese naudojant saulės energiją (C5 scenarijus) poveikis dar sumažėja, ypač išteklių ir žmonių sveikatos kategorijose.

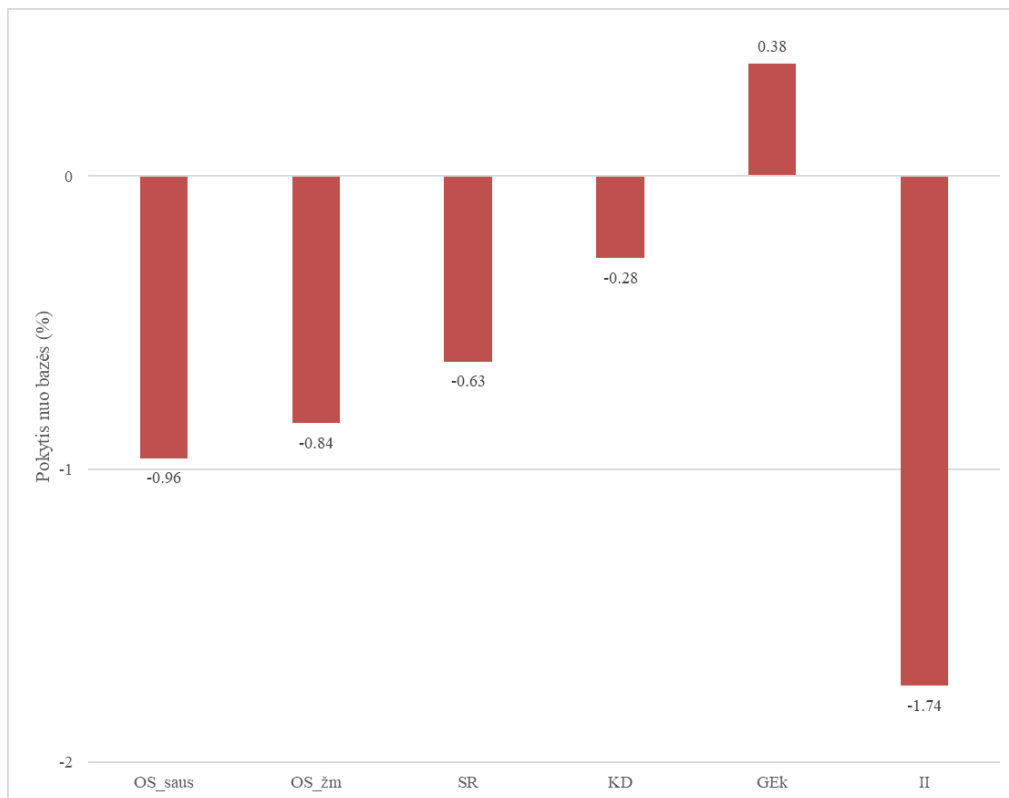
Šis skirtumas tarp scenarijų gali būti siejamas su tuo, kad sistemoje vienu metu vyksta tiek pirminės žaliavos išgavimo, tiek antrinės žaliavos perdirbimo procesai, kurie ir mokslinėje literatūroje yra apibūdinami kaip energijai imlūs procesai. Tokiu atveju padidėja bendras energijos, cheminių medžiagų ir išteklių poreikis, todėl rezultatuose matomas poveikio aplinkai didėjimas, priklausomai

nuo perdirbtos žaliavos kiekio produkte. Ši tendencija sutampa su literatūroje pateikiamomis išvalgomis, kad mišrūs sprendimai arba pereinamieji technologiniai modeliai gali būti mažiau efektyvūs nei pilnai optimizuotos technologinės ir vieną žaliavą naudojančios sistemos [30].

Kaip ir charakterizuotuose rezultatuose nustatyta, taip ir normalizuoti duomenys rodo, kad 100 % perdirbtos celiuliozės scenarijuje (C5) nustatytas reikšmingiausias poveikio sumažėjimas visose vertintose kategorijose. Galima teigti, kad tai parodo, kad visiškas perėjimas prie antrinių žaliavų gali būti efektyvesnis sprendimas nei dalinis jų naudojimas, o papildomai naudojant saulės energiją poveikis dar labiau sumažėja, ypač žmonių sveikatos ir išteklių kategorijose. Todėl energijos šaltinio pasirinkimas turi reikšmingą įtaką galutiniams BVC rezultatams.

### 3.3 Jautrumo analizė

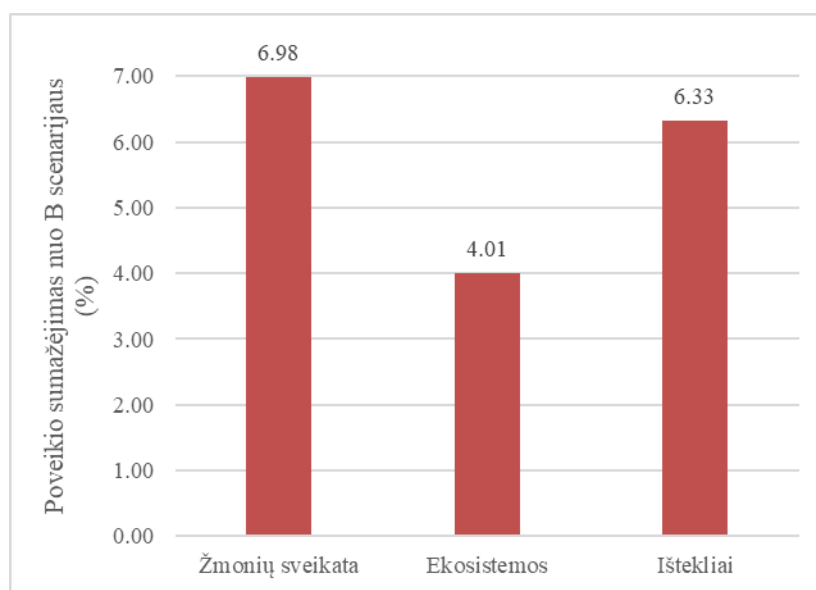
Atsižvelgiant į šiame tyrime gautus BCV rezultatus, jautrumo analizė atlikta B scenarijui (perdirbtos tekstilės celiuliozės acetato siūlų gamybai). B scenarijus pasirinktas todėl, kad jis naudojamas kaip bazinis procesas C1–C5 scenarijuose ir sudaro pagrindą tolesniam perdirbtų žaliavų scenarijų modeliavimui. 4 priedo 1 lentelėje pateikti jautrumo analizės duomenys. Kadangi literatūroje nurodoma, kad didžiausią poveikį celiuliozės acetato gamyboje lemia acto anhidrido naudojimas ir energijos sąnaudos, šiame tyrime B scenarijui acto anhidrido ir elektros energijos poreikis sumažintas po 10 %. Jautrumo analizės rezultatai pateikti 4 priedo 2 lentelėje, kurioje B scenarijus laikomas bazine reikšme, o optimizuotas scenarijus – santykine reikšme bazinio scenarijaus atžvilgiu. Gauti rezultatai pateikti 23 paveiksle, parodant poveikio sumažėjimą pasirinktoms aptarti poveikio kategorijoms.



23 pav. Optimizuoto B scenarijaus poveikio pokytis, lyginant su baziniu B scenarijumi (%).

Jautrumo analizės rezultatai parodė, kad sumažinus acto anhidrido ir elektros energijos poreikį 10 %, daugumoje poveikio kategorijų bendras aplinkosauginis poveikis sumažėjo, tačiau pokyčių mastas skirtingose kategorijose buvo nevienodas. Didžiausias sumažėjimas nustatytas iškastinių išteklių trūkumo (II) kategorijoje (1,74 %), o ozono susidarymo sausumos ekosistemoms (OS\_saus) ir žmonių sveikatai (OS\_žm) kategorijose poveikis sumažėjo beveik iki 1 %. Tuo tarpu gėlo vandens ekotoksiškumo (GEk) kategorijoje nustatytas nedidelis poveikio padidėjimas (0,38 %). Taigi, gauti rezultatai parodė, kad acto anhidrido ir energijos sąnaudų pokyčiai turi įtakos celiuliozės acetato siūlų gamybos poveikio aplinkai rezultatams, todėl šių procesų optimizavimas gali prisidėti prie bendro poveikio mažinimo, nes sumažinamas iškastinių išteklių poreikis.

### Galutinio poveikio kategorijų analizė



**24 pav.** Optimizuoto B scenarijaus galutinio poveikio kategorijų pokytis, lyginant su baziniu B scenarijumi (%).

Optimizuotas B scenarijus sumažino poveikį visose vertintose kategorijose. Didžiausias sumažėjimas nustatytas žmonių sveikatos kategorijoje (6,98 %) bei išteklių naudojimo kategorijoje (6,33 %), o mažiausias – ekosistemų kategorijoje (4,01 %). Jautrumo analizė parodė, kad sumažinus acto anhidrido ir elektros energijos poreikį 10 %, daugumoje poveikio kategorijų nustatytas nedidelis poveikio sumažėjimas, todėl galima teigti, kad poveikio aplinkai rezultatai yra jautrūs cheminių medžiagų ir energijos sąnaudų pokyčiams, todėl technologinių procesų optimizavimas ir efektyvesnis cheminių medžiagų naudojimas gali prisidėti prie bendro poveikio aplinkai mažinimo.

Atsižvelgiant į jautrumo analizės rezultatus, galima teigti, kad modelis išlieka stabus, o gauti rezultatai rodo, kad technologinio proceso poveikį aplinkai lemia ne vienas atskiras parametras, bet kompleksinė įvairių žaliavų, cheminių medžiagų ir energijos sąnaudų sąveika. Todėl 10 % acto anhidrido ir elektros energijos poreikio sumažinimas nepakeitė bendrų būvio ciklo vertinimo rezultatų tendencijų.

## Išvados

1. Mokslinės literatūros analizė parodė, kad celiuliozės acetato siūlų tvarumas priklauso ne vien nuo naudojamos žaliavos kilmės, bet ir nuo gamybos technologinių sprendimų, cheminių medžiagų regeneracijos bei energijos poreikio. Nustatyta, kad uždaro proceso technologijos ir antrinių tekstilės žaliavų panaudojimas gali reikšmingai mažinti poveikį aplinkai bei prisidėti prie žiedinės ekonomikos principų įgyvendinimo tekstilės sektoriuje.
2. Būvio ciklo vertinimui buvo suformuoti celiuliozės acetato siūlų gamybos scenarijai, leidžiantys palyginti pirminių ir perdirbtų žaliavų naudojimo bei atliekų tvarkymo įtaką poveikiui aplinkai. Vertinimas atliktas 1 kg celiuliozės acetato siūlų funkciniam vienetui, o sistemos ribos, pirmu tyrimo etapu, nustatytos įvertinant gamybos procesą „nuo vartų iki vartų“, antru etapu – išplėstos, įvertinant perdirbtų antrinių žaliavų grąžinimą į gamybos procesą. Inventorinė analizė apėmė pagrindinius celiuliozės acetato siūlų gamybos materialinius ir energinius srautus, susijusius su acetilinimo procesu, tirpiklių naudojimu ir energijos sąnaudomis bei celiuliozės atgavimu iš tekstilės atliekų.
3. Charakterizuotų rezultatų analizė parodė, kad vertinant tik celiuliozės acetato siūlų gamybos etapą („nuo vartų iki vartų“), skirtumai tarp pirminių (A) ir antrinių (B) žaliavų scenarijų buvo nedideli – daugumoje poveikio kategorijų pokytis nesiekė 2 %. Normalizuoti rezultatai taip pat parodė labai panašias žmonių sveikatos, ekosistemų ir išteklių kategorijų reikšmes abiem scenarijams, todėl nustatyta, kad pagrindinę įtaką bendram poveikiui aplinkai darė ne žaliavos kilmė, o acetilinimo procese naudojamos cheminės medžiagos ir energijos sąnaudos. Išplėtus sistemos ribas ir įtraukus produkto būvio ciklo pabaigos procesus nustatyta, kad perdirbimo scenarijus (B1) visose vertintose charakterizuoto poveikio kategorijose pasižymėjo didesniu poveikiu nei energinio panaudojimo scenarijus (A1). Normalizuoti rezultatai parodė, kad didžiausias poveikio padidėjimas nustatytas žmonių sveikatos kategorijoje – 51,5 %, ekosistemų kategorijoje – 48,5 %, o išteklių kategorijoje – 29,2 %. Įvertinus gautus rezultatus nustatyta, kad papildomi perdirbimo, transportavimo ir cheminio apdorojimo procesai gali padidinti bendrą poveikį aplinkai, nepaisant antrinių žaliavų naudojimo gamyboje. Be to, šiuo metu taikomi tekstilės atliekų perdirbimo procesai neužtikrina visiško žaliavų atgavimo, todėl susidaro papildomi atliekų srautai ir jų tvarkymas taip pat prisideda prie bendro poveikio aplinkai didėjimo.
4. Vertinant skirtingas perdirbtų žaliavų proporcijas C1–C5 scenarijuose nustatyta netiesinė priklausomybė tarp perdirbtos žaliavos kiekio ir poveikio aplinkai. Charakterizuoti rezultatai parodė, kad didžiausias poveikis nustatytas dalinio perdirbimo scenarijuose (C1–C3), kuriuose naudojama 20–80 % perdirbtos tekstilės žaliavos. Kai kuriose poveikio kategorijose šių scenarijų reikšmės daugiau kaip 10 kartų viršijo A1 scenarijaus rezultatus, o didžiausias poveikis nustatytas iškastinių išteklių trūkumo kategorijoje, kur reikšmės siekė iki 1807 %. Normalizuoti rezultatai taip pat parodė, kad didžiausias poveikis susidarė žmonių sveikatos, ekosistemų ir išteklių kategorijose dalinio perdirbimo scenarijuose, tuo tarpu 100 % perdirbtos žaliavos scenarijus (C4) pasižymėjo ženkliai mažesniu poveikiu, kurio reikšmės daugumoje kategorijų buvo artimos A1 scenarijui. Mažiausias poveikis nustatytas C5 scenarijuje, kuriame naudota 100 % perdirbta celiuliozė ir saulės energija, o visose normalizuoto poveikio kategorijose reikšmės buvo mažesnės nei kituose C scenarijuose. Įvertinus gautus rezultatus nustatyta, kad galutiniams būvio ciklo vertinimo rezultatams reikšmingą įtaką turi ne tik perdirbtos žaliavos kiekis, bet ir energijos šaltinio pasirinkimas, technologinių procesų efektyvumas bei antrinių žaliavų atgavimo išeiga.
5. Jautrumo analizė parodė, kad sumažinus acto anhidrido ir elektros energijos poreikį 10 %, daugumoje poveikio kategorijų bendras poveikis aplinkai sumažėjo ribotai. Didžiausias

sumažėjimas nustatytas iškastinių išteklių trūkumo kategorijoje – 1,74 %, o mažiausias – gėlo vandens ekotoksiškumo kategorijoje, kur nustatytas nedidelis poveikio padidėjimas (0,38 %). Galutinio poveikio kategorijų vertinimas parodė, kad optimizuotas scenarijus žmonių sveikatos kategorijoje poveikį sumažino 6,98 %, ekosistemų – 4,01 %, o išteklių – 6,33 %. Įvertinus gautus rezultatus nustatyta, kad 10 % acto anhidrido ir elektros energijos poreikio sumažinimas nepakeitė bendrų būvio ciklo vertinimo rezultatų tendencijų.

6. Šiuo tyrimu nustatyta, kad celiuliozės acetato siūlų poveikis aplinkai priklauso ne tik nuo naudojamos antrinės žaliavos kiekio, bet ir nuo jos integravimo į gamybos sistemą būdo. Nors antrinių žaliavų naudojimas atitinka žiedinės ekonomikos principus, poveikio aplinkai mažinimo potencialas priklauso nuo perdirbimo technologijų, energijos šaltinių ir papildomų procesų efektyvumo. Nustatyta, kad perdirbtos tekstilės celiuliozės naudojimas kartu su atsinaujinančios energijos taikymu sudaro prielaidas mažinti poveikį aplinkai ir skatinti tvarią tekstilės gamybą.

## Literatūros sąrašas

1. KOSZEWSKA, M. *Circular economy — challenges for the textile and clothing industry*. *Autex Research Journal*, 2018, p. 337–347. Prieiga per: DOI:[10.1515/aut-2018-0023](https://doi.org/10.1515/aut-2018-0023). [žiūrėta 2026-05-24].
2. EUROPEAN COMMISSION. *Communication - EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles COM(2022) 141 final* [interaktyvus]. 2022-03-30. Prieiga per internetą: [https://environment.ec.europa.eu/publications/textiles-strategy\\_en](https://environment.ec.europa.eu/publications/textiles-strategy_en). [žiūrėta 2025-02-21].
3. EUROPEAN UNION. *First circular economy action plan* [interaktyvus]. Prieiga per internetą: [https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/first-circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/first-circular-economy-action-plan_en).
4. WORLD POPULATION REVIEW. *Textile exports by country 2025* [interaktyvus]. 2025. Prieiga per internetą: <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/textile-exports-by-country>. [žiūrėta 2025-03-22].
5. SPINELLI, M. P.; GRIES, T.; AMICARELLI, V.; DAUTZENBERG, N.; BECKER, A. The role of geographical locations in the environmental impact of fibre-to-fibre textile recycling. *Environmental Impact Assessment Review*, 2025. Prieiga per internetą: [doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107755](https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107755). [žiūrėta 2026-05-24].
6. EDIRISINGHE, L. G. L. M.; DE ALWIS, A. A. P.; WIJAYASUNDARA, M. Sustainable circular practices in the textile product life cycle: A comprehensive approach to environmental impact mitigation. *Environmental Challenges*, 2024, p. 100985. Prieiga per internetą: [doi.org/10.1016/j.envc.2024.100985](https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100985) [žiūrėta 2026-05-24].
7. MANIVANNAN, A.C.; PANNEERSELVAN, L.; NACHMUTHU, G.; CONATY, M.; PALANISAMI, T. *Eco-innovative approaches for recycling non-polyester/cotton blended textiles*. *Waste Management Bulletin* 3(9), 2025, p. 255-270. Prieiga per internetą: [10.1016/j.wmb.2025.02.001](https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.02.001). [žiūrėta 2026-05-24].
8. EUROPEAN COMMISSION. *EU strategy for textiles* [interaktyvus]. 2022. Prieiga per internetą: [https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/textiles-ecosystem/strategy-textiles\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/textiles-ecosystem/strategy-textiles_en). [žiūrėta 2026-05-24].
9. WIEGAND, T.; WYNN, M. Sustainability, the Circular Economy and Digitalisation in the German Textile and Clothing Industry. *Sustainability*, 2023. 15(11), 9111. Prieiga per internetą: [doi.org/10.3390/su15119111](https://doi.org/10.3390/su15119111). [žiūrėta 2026-05-24].
10. CHAKRABORTY, R.; AHMAD, F. Economical use of water in cotton knit dyeing industries of Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, 2022. Straipsnio ID: , 131136. [žiūrėta 2026-05-24].
11. ROTH, J.; ZERGER, B.; DE GEETER, D.; GÓMEZ BENAVIDES, J.; ROUDIER, S. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Textiles Industry. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. JRC Science for Policy Report* [interaktyvus]. 2023. Prieiga per internetą: <https://publications.jrc.ec.europa.eu>. [žiūrėta 2026-05-24].
12. HANN, S. *Investigating options for reducing releases in the aquatic environment of microplastics emitted by (but not intentionally added) microplastics*. London: Eunomia Research & Consulting Ltd, 2018. Prieiga per internetą: <https://bmbf-plastik.de/en/publication/investigating-options-reducing-releases-aquatic-environment-microplastics-emitted-not>. [žiūrėta 2026-05-24].
13. REBITZER, G.; EKVAL, T.; FRISCHKNECHT, R.; HUNKELER, D.; NORRIS, G.; et. al. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and

- applications. *Environment International*, 2004, t. 30(5), p. 701–720. Prieiga per internetą: DOI: [10.1016/j.envint.2003.11.005](https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005). [žiūrėta 2026-05-24].
14. DAL, A.; SIMSEK YESIL, E.; OZTURK, E.; KITIS, M. Investigation of water and carbon footprint reductions employing best available techniques in the textile sector. *Journal of Cleaner Production*, 2024. [žiūrėta 2026-05-24].
  15. HASSAN, R.; ACERBI, F.; TERZI, S.; ROSA, P. Enabling the twin transition of the textile industry: A systematic literature review. *Waste Management*, 2025. DOI: [10.1016/j.wasman.2025.02.025](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.02.025). [žiūrėta 2026-05-24].
  16. TEXTILE EXCHANGE. *Preferred Fiber & Materials Market Report 2022* [interaktyvus]. 2022. Prieiga per internetą: <https://textileexchange.org/knowledge-center/reports/materials-market-report-2022/>. [žiūrėta 2026-05-24].
  17. HOUCK, M. M. Ways of identifying textile fibers and materials. In: *Identification of Textile Fibers*, 2009, p. 6–26. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1533/9781845695651.1.6>. [žiūrėta 2026-05-24].
  18. KIM, T.; KIM, D.; PARK, Y. Recent progress in regenerated fibers for “green” textile products. *Journal of Cleaner Production*, 2022. Straipsnio Nr. 134226. Prieiga per internetą: [10.1016/j.jclepro.2022.134226](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134226). [žiūrėta 2026-05-24].
  19. NOVA-INSTITUT GMBH. *Renewable carbon* [interaktyvus]. 2017. Prieiga per internetą: <https://renewable-carbon.eu/news/textile-industry-in-desperate-need-of-sustainable-sources/>. [žiūrėta: 2025-02-22].
  20. BRITANNICA, ENCYCLOPÆDIA. *Cellulose acetate* [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-12-02]. Prieiga per internetą: <https://www.britannica.com/science/cellulose-acetate>.
  21. YADAV, N.; HAKKARAINEN, M. Degradable or not? Cellulose acetate as a model for complicated interplay between structure, environment and degradation. *Chemosphere*, 2021, t. 265, straipsnio Nr. 128731. Prieiga per internetą: DOI: [10.1016/j.chemosphere.2020.128731](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128731). [žiūrėta 2026-05-24].
  22. WAGNER, Worldwide Trade. *Acetate yarn rexea* [interaktyvus]. Rexess. [žiūrėta 2025-12-01]. Prieiga per internetą: <http://www.rexess.com/acetate-yarn.html>.
  23. YE, X.-Y.; SUN, Q.; HUANG, H.-J.; CAO, X.-F.; ZHANG, L. et. al. Unveiling the structural characteristics of acetone-insoluble substances in various cellulose diacetate. *Carbohydrate Polymers*, 2025, t. 360, straipsnio Nr. 123616. Prieiga per internetą: DOI: [10.1016/j.carbpol.2025.123616](https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123616). [žiūrėta 2026-05-24].
  24. CHEMCESS. *Cellulose acetate: Production and uses* [interaktyvus]. 2024-05-08. [žiūrėta 2025-12-01]. Prieiga per internetą: <https://chemcess.com/cellulose-acetate-production-and-uses/>.
  25. PINJARI, A. J.; SAYYED, N. A.; DESHMUKH, D. V. A critical review of manufacturing processes used in regenerated cellulosic fibres: viscose, cellulose acetate, cuprammonium, LiCl/DMAc, ionic liquids, and NMMO based lyocell. *Cellulose*, 2019, t. 26(4). Prieiga per internetą: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10570-019-02318-y>. [žiūrėta 2026-05-24].
  26. O STUDIO. *Acetate yarn* [interaktyvus]. [žiūrėta 2025-12-02]. Prieiga per internetą: [http://acetateyarn.asia.kz/about\\_acetate\\_yarn.html](http://acetateyarn.asia.kz/about_acetate_yarn.html).
  27. ZHANG, S.; ZHANG, F.; SU, J.; HAN, J. Cellulose acetate hierarchical porous coated textile with passive daytime radiative cooling, flexibility and durability. *Progress in Organic Coatings*, 2024, straipsnio Nr. 108772. Prieiga per internetą: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2024.108772>. [žiūrėta 2026-05-24].

28. FOROUGH, F.; REZVANI GHOMI, E.; MORSHEDI DEHAGHI, F.; BORAYEK, R.; RAMAKRISHNA, S. A review on the life cycle assessment of cellulose: From properties to the potential of making it a low carbon material. *Materials*, 2021, t. 14, straipsnis Nr. 714. Prieiga per internetą: doi: 10.3390/ma14040714. [žiūrėta 2026-05-24].
29. EL BOURAKADI, K.; SEMLALI, F.-Z.; HAMMI, M.; EL ACHABY, M. A review on natural cellulose fiber applications: Empowering industry with sustainable solutions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813024065814>. [žiūrėta 2026-05-24].
30. SLEJKO, E. A.; TUAN, A.; SCUOR, N. From waste to value: Characterization of recycled cellulose acetate for sustainable waste management. *Waste Management Bulletin*, 2024, p. 67–73. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.10.001>. [žiūrėta 2026-05-24].
31. LOO, S.-L.; YU, E.; HU, X. Tackling critical challenges in textile circularity: A review on strategies for recycling cellulose and polyester from blended fabrics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, straipsnis Nr. 110482. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110482>. [žiūrėta 2026-05-24].
32. HAMMAR, T.; PENALOZA, D.; HANNING, A.-C.; HAATANEN, N.; PAKKASMAA, J. Life cycle assessment of textile fibre-to-fibre recycling by cellulose carbamate technology. *Journal of Cleaner Production*, 2023, t. 426, straipsnis Nr. 139189. Prieiga per: [10.1016/j.jclepro.2023.139189](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139189). [žiūrėta 2026-05-24].
33. HOSSAIN, A. K. M. N.-U.; SELA, S. K.; NEHAL, K.; HASAN, N.; HOSSAIN, M. I. et. al. Application of green technology to treat fibrous (textile) waste and recycling of used chemicals for reutilization of similar waste. *Cleaner Engineering and Technology*, 2023., straipsnis Nr. 100625. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100625>. [žiūrėta 2026-05-24].
34. HOMEM, N. C.; AMORIM, M. T. P. Synthesis of cellulose acetate using as raw material textile wastes. *Materials Today: Proceedings*, 2020, p. S315–S317. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478532030599X>. [žiūrėta 2026-05-24].
35. ANG, S.; HARITOS, V.; BATCHELOR, W. Cellulose nanofibers from recycled and virgin wood pulp: A comparative study of fiber development. *Carbohydrate Polymers*, 2020, t. 234, straipsnis Nr. 115900. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115900>. [žiūrėta 2026-05-24].
36. SONG, R., FU, L.; LIU, Z.; ZHU, K.; ZHANG, M. et al. Closed-loop recycling for colored cotton textile waste. *Sustainable Materials and Technologies*, 2025, t. 45, straipsnis Nr. e01436. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01436>. [žiūrėta 2026-05-24].
37. LOO, S.-L.; GUNAWAN, P.; HU, X. Critical comparison of cellulose dissolution methods through life cycle assessment. *Environmental Chemical Engineering*, 2025, straipsnis Nr. 11759. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117159>. [žiūrėta 2026-05-24].
38. SHEN, L.; WORRELL, E.; PATEL, M. K. Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, t. 55(3), p. 260–274. Prieiga per: [10.1016/j.resconrec.2010.10.001](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.001). [žiūrėta 2026-05-24].
39. ARUN, C. M.; PANNEERSELVAN, L.; NACHIMUTHU, G.; CONATY, M.; PALANISAMI, T. Eco-innovative approaches for recycling non-polyester/cotton blended textiles. *Waste*

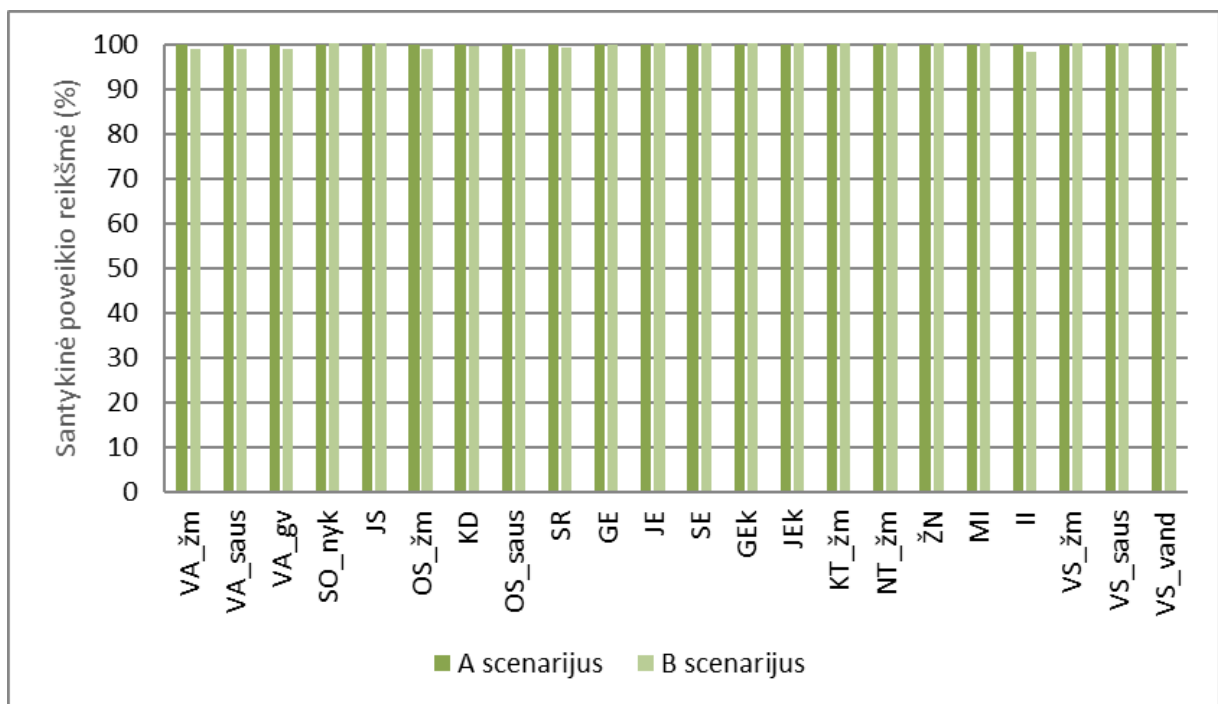
- Management Bulletin*, 2025, t. 3(1), p. 255–270. Prieiga per internetą: [doi.org/10.1016/j.wmb.2025.02.001](https://doi.org/10.1016/j.wmb.2025.02.001). [žiūrėta 2026-05-24].
40. LOO, S. L.; GUNAWAN, P.; HU, X. Critical comparison of cellulose dissolution methods through life cycle analysis. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2025, straipsnio Nr. 117159. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117159>. [žiūrėta 2026-05-24].
41. LIU, Y.; LASK, J.; KUPFER, R.; GUDE, M.; FELDNER, A. A comparative life cycle assessment of a new cellulose-based composite and glass fibre reinforced composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 2023, t. 31(2), p. 745–758. Prieiga per internetą: [10.1007/s10924-023-03059-7](https://doi.org/10.1007/s10924-023-03059-7). [žiūrėta 2026-05-15].
42. RESTA, B.; GAIARDELLI, P.; PINTO, R.; DOTTI, S. Enhancing environmental management in the textile sector: An organisational-life cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 2016, p. 620–632. Prieiga per internetą: [0.1016/j.jclepro.2016.06.135](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.135). [žiūrėta 2026-05-15].
43. ZAMPORI, L.; PANT, R. *Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method – version 3.1*. Luxembourg: European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2023. Prieiga per internetą: [10.2760/424613](https://doi.org/10.2760/424613). [žiūrėta 2026-05-15].
44. LEE, K.-M.; INABA, A. *Life cycle assessment: Best practices of ISO 14040 series*. Suwon, Korea: Center for Ecodesign and LCA (CEL), Ajou University, 2004. Prieiga per internetą: [https://www.apec.org/docs/default-source/Publications/2004/2/Life-Cycle-Assessment-Best-Practices-of-International-Organization-for-Standardization-ISO-14040-Ser/04\\_cti\\_scsc\\_lca\\_rev.pdf](https://www.apec.org/docs/default-source/Publications/2004/2/Life-Cycle-Assessment-Best-Practices-of-International-Organization-for-Standardization-ISO-14040-Ser/04_cti_scsc_lca_rev.pdf). [žiūrėta 2026-05-15].
45. GUINÉE, J. B. Life cycle assessment: Past, present and future. In: *Proceedings of the International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction*. Nantes, France, 2016. Prieiga per: DOI:[10.1021/es101316v](https://doi.org/10.1021/es101316v). [žiūrėta 2026-05-24].
46. AGARWAL, S.; SETHI, S. Carbon footprint analysis of traditional and innovative cellulosic textile fibers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, t. 226, straipsnio Nr. 116208. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116208>. [žiūrėta 2026-05-24].
47. VAISALA TECHNICAL DOCUMENTATION. *Cellulose acetate fiber production – Application Note B212044EN* [interaktyvus]. 2022. [žiūrėta 2025-10-01]. Prieiga per internetą: <https://www.vaisala.com/en/chemical-industry-solutions/chemicals-allied-products/cellulose-acetate-fiber-production>. [žiūrėta 2025-03-20].
48. COSTA, C.; VIANA, A.; SILVA, C.; MARQUES, E. F.; AZOIA, N. G. Recycling of textile wastes, by acid hydrolysis, into new cellulosic raw materials. *Waste Management*, 2022, t. 153, p. 99–109. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X22004251>. [žiūrėta 2026-05-24].
49. RYBACZEWSKA-BŁAŻEJOWSKA, M.; JEZIERSKI, D. Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods: A case study based on the electricity consumption mix in Europe. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2024, t. 29, p. 1799–1817. Prieiga per: [10.1007/s11367-024-02326-6](https://doi.org/10.1007/s11367-024-02326-6). [žiūrėta 2026-05-24].
50. HUIJBREGTS, M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M.; ZIJP, M.; HOLLANDER, A.; VAN ZELM, R. ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, t. 22, p.

- 138–147. Prieiga per: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-016-1246-y>. [žiūrėta 2026-05-24].
51. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*. ISO 14044:2006. Geneva, 2006. Prieiga per: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/38498/17324bfe9ec44e27a2f84e1a8ac3ca26/ISO-14044-2006.pdf>. [žiūrėta 2026-05-24].
52. KÖHLER, A.; WATSON, D.; TRZEPACZ, S.; LÖW, C.; LIU, R.; DANNECK, J.; KONSTANTAS, A.; DONATELLO, S.; FARACA, G. *Circular Economy Perspectives in the EU Textile Sector* [interaktyvus]. 2021. Prieiga per internetą: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC125110>. [žiūrėta 2026-05-24].

## 1 Priedas. A ir B scenarijų charakterizuoti ir normalizuoti duomenys

1 lentelė. A ir B scenarijų palyginimo charakterizuoti duomenys.

Poveikio kategorija	Trumpinys	Vienetai	A scenarijus	%	B scenarijus	%
Visuotinis atšilimas, žmonių sveikata	VA žm	DALY	7.95726E-06	100	7.88789E-06	99.13
Visuotinis atšilimas, sausumos ekosistemos	VA saus	species.yr	2.40164E-08	100	2.3807E-08	99.13
Visuotinis atšilimas, gėlo vandens ekosistemos	VA gv	species.yr	6.55836E-13	100	6.50119E-13	99.13
Stratosferos ozono sluoksnio nykimas	SO nyk	DALY	2.0445E-09	100	2.05839E-09	100.68
Jonizuojančioji spinduliuotė	JS	DALY	4.96409E-09	100	4.97331E-09	100.19
Ozono susidarymas, žmonių sveikata	OS žm	DALY	1.83888E-08	100	1.82339E-08	99.16
Smulkiųjų kietųjų dalelių susidarymas	KD	DALY	9.74405E-06	100	9.71675E-06	99.72
Ozono susidarymas, sausumos ekosistemos	OS saus	species.yr	2.73891E-09	100	2.71254E-09	99.04
Sausumos rūgštėjimas	SR	species.yr	7.10228E-09	100	7.05734E-09	99.37
Gėlo vandens eutrofikacija	GE	species.yr	2.00926E-09	100	2.01169E-09	100.12
Jūrų eutrofikacija	JE	species.yr	3.04681E-13	100	3.05645E-13	100.32
Sausumos ekotoksiškumas	SE	species.yr	1.89095E-10	100	1.89577E-10	100.25
Gėlo vandens ekotoksiškumas	GEk	species.yr	1.42521E-10	100	1.43069E-10	100.38
Jūrų ekotoksiškumas	JEk	species.yr	2.93934E-11	100	2.94997E-11	100.36
Kancerogeninis toksiškumas žmonėms	KT žm	DALY	1.86724E-06	100	1.87585E-06	100.46
Nekancerogeninis toksiškumas žmonėms	NT žm	DALY	1.38182E-06	100	1.38786E-06	100.44
Žemės naudojimas	ŽN	species.yr	1.06271E-09	100	1.06717E-09	100.42
Mineralinių išteklių trūkumas	MI	USD2013	0.003471306	100	0.003486115	100.43
Iškaskolinių išteklių trūkumas	II	USD2013	1.2205962	100	1.199370588	98.26
Vandens suvartojimas, žmonių sveikata	VS žm	DALY	6.49068E-07	100	6.51924E-07	100.44
Vandens suvartojimas, sausumos ekosistema	VS saus	species.yr	3.9542E-09	100	3.97167E-09	100.44
Vandens suvartojimas, vandens ekosistemos	VS vand	species.yr	1.8637E-13	100	1.87198E-13	100.44



1 pav. A ir B scenarijų santykinė poveikio visose kategorijose reikšmė.

2 lentelė. A ir B scenarijų žala.

Poveikio kategorija	Žala	A scenarijus	B scenarijus	%
Žmonių sveikata	DALY	2.16248E-05	2.15455E-05	0.3667
Ekosistemos	species.yr	4.12459E-08	4.10E-08	0.61887
Ištekliai	USD2013	1.224067506	1.202856703	1.73281

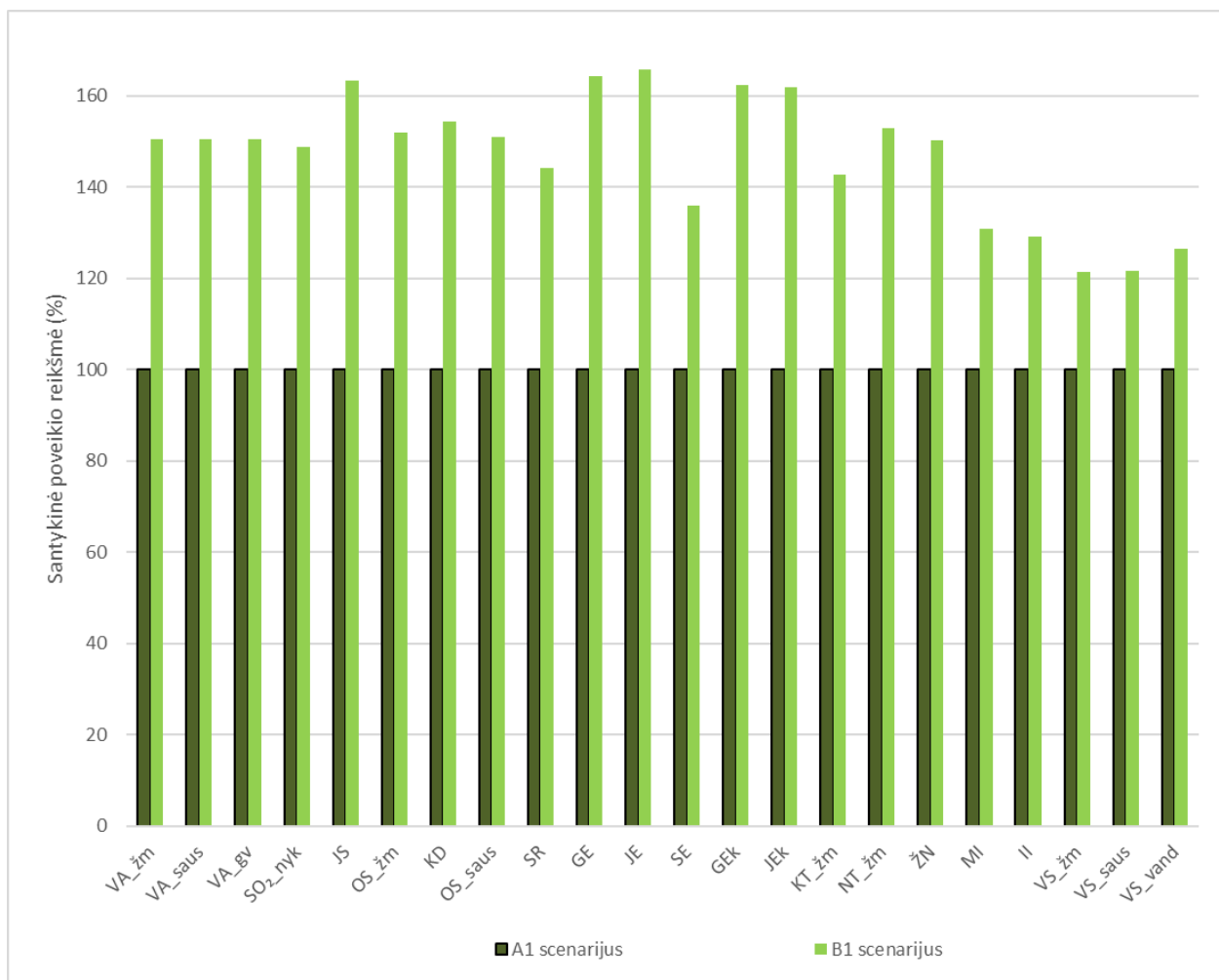
3 lentelė. Normalizuoti duomenys.

Poveikio kategorija	Žala	A scenarijus	B scenarijus	%
Žmonių sveikata	DALY	$9.10 \times 10^{-4}$	$9.07 \times 10^{-4}$	-0.37
Ekosistemos	species.yr	$5.76 \times 10^{-5}$	$5.72 \times 10^{-5}$	-0.62
Ištekliai	USD2013	$4.37 \times 10^{-5}$	$4.37 \times 10^{-5}$	-1.76

## 2 priedas. A1 ir B1 scenarijų charakterizuoti ir normalizuoti duomenys

1 lentelė. A1 ir B1 scenarijų palyginimo charakterizuoti duomenys.

Poveikio kategorija	Trumpinys	Vienetai	A1 scenarijus	%	B2 scenarijus	%
Visuotinis atšilimas, žmonių sveikata	VA žm	DALY	1.39713E-05	100	2.10342E-05	150.55
Visuotinis atšilimas, sausumos ekosistemos	VA saus	species.yr	4.21649E-08	100	6.34797E-08	150.55
Visuotinis atšilimas, gėlo vandens ekosistemos	VA gv	species.yr	1.15154E-12	100	1.7337E-12	150.55
Stratosferos ozono sluoksnio nykimas	SO <sub>2</sub> nyk	DALY	3.48165E-09	100	5.18449E-09	148.91
Jonizuojančioji spinduliuotė	JS	DALY	1.15144E-08	100	1.88216E-08	163.46
Ozono susidarymas, žmonių sveikata	OS žm	DALY	3.10247E-08	100	4.71573E-08	152.00
Smulkiųjų kietųjų dalelių susidarymas	KD	DALY	1.88641E-05	100	2.91334E-05	154.44
Ozono susidarymas, sausumos ekosistemos	OS saus	species.yr	4.54926E-09	100	6.87141E-09	151.04
Sausumos rūgštėjimas	SR	species.yr	1.2303E-08	100	1.77323E-08	144.13
Gėlo vandens eutrofikacija	GE	species.yr	4.12918E-09	100	6.788E-09	164.39
Jūrų eutrofikacija	JE	species.yr	6.7275E-13	100	1.11565E-12	165.83
Sausumos ekotoksiškumas	SE	species.yr	2.61177E-10	100	3.55193E-10	136.00
Gėlo vandens ekotoksiškumas	GEk	species.yr	2.42397E-10	100	3.9338E-10	162.29
Jūrų ekotoksiškumas	JEk	species.yr	5.01472E-11	100	8.11384E-11	161.80
Kancerogeninis toksiškumas žmonėms	KT žm	DALY	2.65829E-06	100	3.79677E-06	142.83
Nekancerogeninis toksiškumas žmonėms	NT žm	DALY	2.17358E-06	100	3.326E-06	153.02
Žemės naudojimas	ŽN	species.yr	1.74642E-09	100	2.62472E-09	150.29
Mineralinių išteklių trūkumas	MI	USD2013	0.004508787	100	0.005898612	130.82
Iškastinių išteklių trūkumas	II	USD2013	1.561198358	100	2.01684771	129.19
Vandens suvartojimas, žmonių sveikata	VS žm	DALY	6.86936E-07	100	8.33235E-07	121.30
Vandens suvartojimas, sausumos ekosistema	VS saus	species.yr	4.19746E-09	100	5.10283E-09	121.57
Vandens suvartojimas, vandens ekosistemos	VS vand	species.yr	2.09575E-13	100	2.65313E-13	126.60



**1 pav.** A1 ir B1 scenarijų charakterizuotų rezultatų palyginimas didžiausio poveikio kategorijose.

**2 lentelė.** A1 ir B2 scenarijų poveikio vertinimo (damage assessment) rezultatų palyginimas (%).

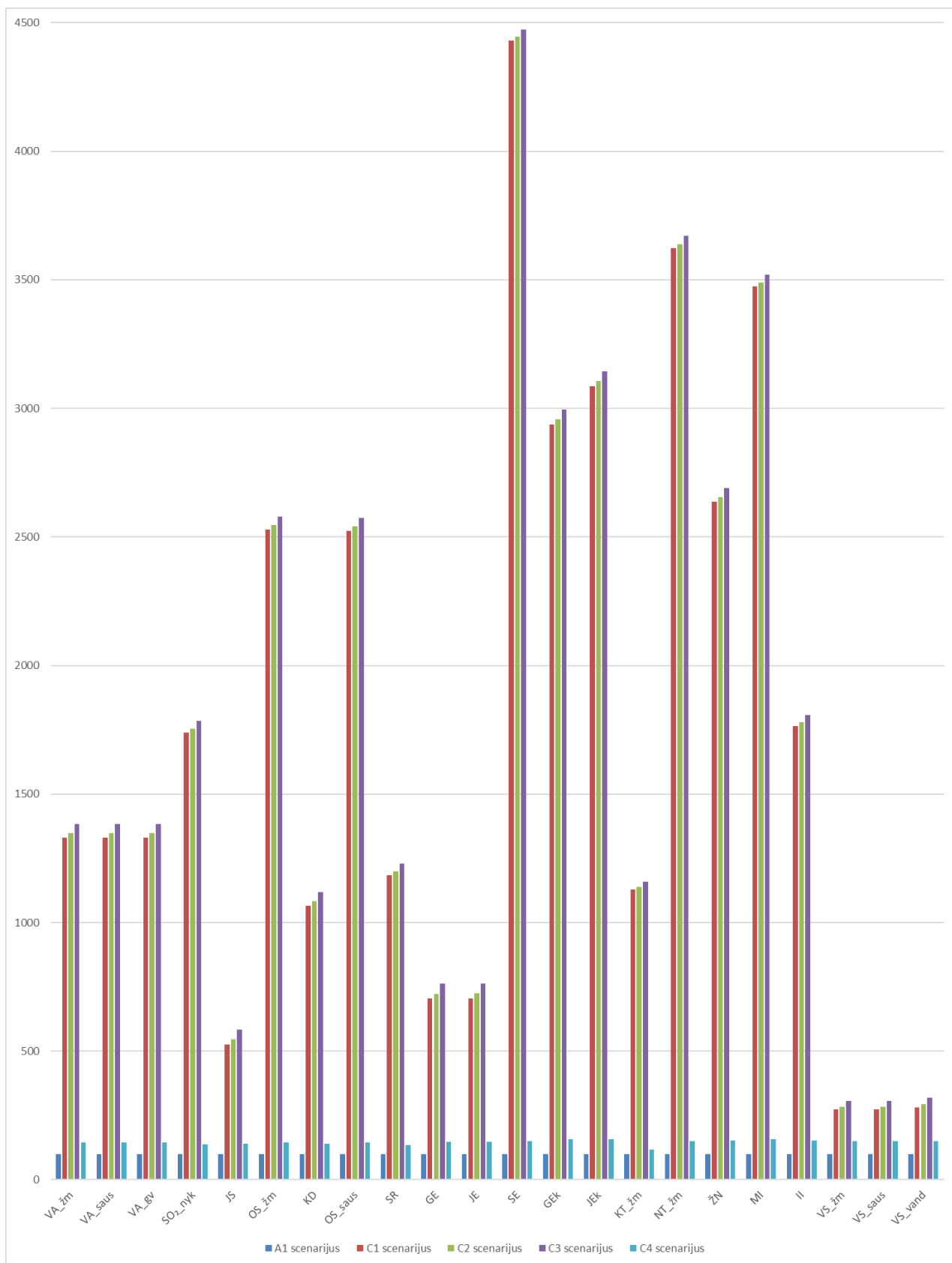
Poveikio kategorija	Žala	A1 scenarijus	B1 scenarijus	%
Žmonių sveikata	DALY	0.00161665	0.00245	51.55
Ekosistemos	species.yr	9.7226E-05	0.00014	48.51
Ištekliai	USD2013	5.5896E-05	7.2E-05	29.19

### 3 priedas. C1–C5 scenarijų charakterizuoti ir normalizuoti duomenys

1 lentelė. A1 ir C scenarijų palyginimo charakterizuoti duomenys ir santykinės reikėmės.

Poveikio kategorija	Trumpinys	A1 scenarijus	%	C1 scenarijus	%	C2 scenarijus	%	C3 scenarijus	%	C4 scenarijus	%	C5 scenarijus + saulė	%
Visuotinis atšilimas, žmonių sveikata	VA žm	1.4E-05	100	1.9E-04	1330.9	1.9E-04	1348.2	1.9E-04	1382.9	2.0E-05	144.4	1.7E-05	124.47
Visuotinis atšilimas, sausumos ekosistemos	VA saus	4.2E-08	100	5.6E-07	1330.6	5.7E-07	1347.9	5.8E-07	1382.6	6.1E-08	144.4	5.2E-08	124.47
Visuotinis atšilimas, gėlo vandens ekosistemos	VA gv	1.2E-12	100	1.5E-11	1331.0	1.6E-11	1348.3	1.6E-11	1383.0	1.7E-12	144.4	1.4E-12	124.46
Stratosferos ozono sluoksnio nykimas	SO <sub>2</sub> nyk	3.5E-09	100	6.1E-08	1738.8	6.1E-08	1754.0	6.2E-08	1784.4	4.8E-09	136.4	4.1E-09	118.33
Jonizuojančioji spinduliuotė	JS	1.2E-08	100	6.1E-08	525.9	6.3E-08	545.3	6.7E-08	584.4	1.6E-08	141.1	1.3E-08	111.97
Ozono susidarymas, žmonių sveikata	OS žm	3.1E-08	100	7.8E-07	2529.0	7.9E-07	2545.6	8.0E-07	2578.8	4.5E-08	143.9	3.9E-08	125.52
Smulkiųjų kietųjų dalelių susidarymas	KD	1.9E-05	100	2.0E-04	1065.5	2.0E-04	1082.9	2.1E-04	1118.0	2.6E-05	139.8	2.2E-05	117.31
Ozono susidarymas, sausumos ekosistemos	OS saus	4.5E-09	100	1.1E-07	2523.6	1.2E-07	2540.1	1.2E-07	2573.2	6.6E-09	144.3	5.8E-09	126.51
Sausumos rūgštėjimas	SR	1.2E-08	100	1.5E-07	1183.7	1.5E-07	1199.2	1.5E-07	1230.2	1.7E-08	135.7	1.5E-08	118.35
Gėlo vandens eutrofikacija	GE	4.1E-09	100	2.9E-08	704.1	3.0E-08	723.6	3.2E-08	762.9	6.1E-09	147.2	5.1E-09	123.21
Jūrų eutrofikacija	JE	6.7E-13	100	4.7E-12	704.3	4.9E-12	724.0	5.1E-12	763.5	9.9E-13	147.3	8.4E-13	124.84
Sausumos ekotoksiškumas	SE	2.6E-10	100	1.2E-08	4429.6	1.2E-08	4444.4	1.2E-08	4474.1	3.9E-10	150.4	4.8E-10	183.43

Poveikio kategorija	Trumpinys	A1 scenarijus	%	C1 scenarijus	%	C2 scenarijus	%	C3 scenarijus	%	C4 scenarijus	%	C5 scenarijus + saulė	%
Gėlo vandens ekotoksiškumas	GEk	2.4E-10	100	7.1E-09	2938.4	7.2E-09	2957.6	7.3E-09	2996.2	3.8E-10	157.7	4.2E-10	172.82
Jūrų ekotoksiškumas	JEk	5.0E-11	100	1.5E-09	3087.2	1.6E-09	3106.3	1.6E-09	3144.7	7.9E-11	157.2	8.6E-11	170.8
Kancerogeninis toksiškumas žmonėms	KT žm	2.7E-06	100	3.0E-05	1129.7	3.0E-05	1139.0	3.1E-05	1157.8	3.1E-06	118.1	2.8E-06	106.21
Nekancerogeninis toksiškumas žmonėms	NT žm	2.2E-06	100	7.9E-05	3622.2	7.9E-05	3638.8	8.0E-05	3672.2	3.3E-06	150.2	3.2E-06	148.69
Žemės naudojimas	ŽN	1.7E-09	100	4.6E-08	2636.6	4.6E-08	2654.4	4.7E-08	2690.4	2.7E-09	152.7	2.4E-09	136.8
Mineralinių išteklių trūkumas	MI	4.5E-03	100	1.6E-01	3473.5	1.6E-01	3488.9	1.6E-01	3519.7	7.1E-03	157.0	7.8E-03	171.92
Iškastinių išteklių trūkumas	II	1.6E+00	100	2.8E+01	1763.4	2.8E+01	1778.2	2.8E+01	1808.0	2.4E+00	152.0	2.2E+00	143.79
Vandens suvartojimas, žmonių sveikata	VS žm	6.9E-07	100	1.9E-06	273.3	2.0E-06	284.6	2.1E-06	307.4	1.0E-06	150.6	1.0E-06	149.02
Vandens suvartojimas, sausumos ekosistema	VS saus	4.2E-09	100	1.1E-08	272.4	1.2E-08	283.8	1.3E-08	306.6	6.3E-09	150.6	6.2E-09	148.87
Vandens suvartojimas, vandens ekosistemos	VS vand	2.1E-13	100	5.9E-13	280.9	6.1E-13	293.2	6.7E-13	317.9	3.1E-13	150.0	3.0E-13	145.23



**1 pav.** A1 ir C scenarijų palyginimas, naudojant charakterizuotų duomenų santykinės reikšmes.

**2 lentelė.** Reikšmės pateiktos santykinė išraiška, kai A1 scenarijus (celiuliozės acetato siūlų deginimas) prilygintas 100 %.

Perdirbtos tekstilės dalis %	Visuotinis atšilimas, žmonių sveikata	Smulkiųjų kietųjų dalelių susidarymas	Kancerogeninis toksiškumas žmonėms	Iškastinių išteklių trūkumas
20	1331	1065	1307	1763
40	1348	1082	1319	1778
80	1382	1172	1157	1807
100	144	139	118	152
100 + Saulė*	124	117	106	144

\*- elektros energija, naudojama procesuose.

**3 lentelė.** A1 ir C scenarijų normalizuoti rezultatai.

Poveikio kategorija	Žala	A1 scenarijus	C1 scenarijus	C2 scenarijus	C3 scenarijus	C4 scenarijus	C5 scenarijus
Žmonių sveikatos poveikis	DALY	1.6E-03	2.1E-02	2.1E-02	2.2E-02	2.3E-03	2.0E-03
Ekosistemų poveikis	species. yr	9.7E-05	1.3E-03	1.3E-03	1.3E-03	1.4E-04	1.2E-04
Išteklių poveikis	USD20 13	5.6E-05	9.9E-04	1.0E-03	1.0E-03	8.5E-05	8.0E-05

#### 4 priedas. Jautrumo analizės charakterizuoti ir normalizuoti duomenys

1 lentelė. A ir B scenarijų bei optimizuoto B scenarijaus charakterizuotų duomenų santykinio palyginimo skaičiavimai.

Kategorija	Trumpinys	A scenarijus	B scenarijus	B scenarijaus pokytis nuo A (%)	B scenarijus + optimizacija	Santykinė reikšmė nuo bazės (%)	Optimizuoto scenarijaus pokytis nuo B (%)
Visuotinis atšilimas, žmonių sveikata	VA_žm	7.96E-06	7.89E-06	-0.9	7.29E-06	92.5	-7.5
Visuotinis atšilimas, sausumos ekosistemos	VA_saus	2.40E-08	2.38E-08	-0.9	2.20E-08	92.5	-7.5
Visuotinis atšilimas, gėlo vandens ekosistemos	VA_gv	6.56E-13	6.50E-13	-0.9	6.01E-13	92.5	-7.5
Stratosferos ozono sluoksnio nykimas	SO <sub>2</sub> _nyk	2.04E-09	2.06E-09	0.7	1.93E-09	93.9	-6.1
Jonizuojančioji spinduliuotė	JS	4.96E-09	4.97E-09	0.2	4.57E-09	91.8	-8.2
Ozono susidarymas, žmonių sveikata	OS_žm	1.84E-08	1.82E-08	-0.8	2.31E-08	126.6	26.6
Smulkiųjų kietųjų dalelių susidarymas	KD	9.74E-06	9.72E-06	-0.3	9.01E-06	92.7	-7.3
Ozono susidarymas, sausumos ekosistemos	OS_saus	2.74E-09	2.71E-09	-1.0	3.92E-09	144.4	44.4
Sausumos rūgštėjimas	SR	7.10E-09	7.06E-09	-0.6	6.59E-09	93.4	-6.6
Gėlo vandens eutrofikacija	GE	2.01E-09	2.01E-09	0.1	1.85E-09	91.8	-8.2
Jūrų eutrofikacija	JE	3.05E-13	3.06E-13	0.3	2.79E-13	91.2	-8.8
Sausumos ekotoksiškumas	SE	1.89E-10	1.90E-10	0.3	1.77E-10	93.1	-6.9
Gėlo vandens ekotoksiškumas	GEk	1.43E-10	1.43E-10	0.4	1.31E-10	91.9	-8.1
Jūrų ekotoksiškumas	JEk	2.94E-11	2.95E-11	0.4	2.72E-11	92.1	-7.9
Kancerogeninis toksiškumas žmonėms	KT_žm	1.87E-06	1.88E-06	0.5	1.81E-06	96.4	-3.6
Nekancerogeninis toksiškumas žmonėms	NT_žm	1.38E-06	1.39E-06	0.4	1.30E-06	93.5	-6.5
Žemės naudojimas	ŽN	1.06E-09	1.07E-09	0.4	9.76E-10	91.5	-8.5
Mineralinių išteklių trūkumas	MI	3.47E-03	3.49E-03	0.4	3.22E-03	92.4	-7.6
Iškastinių išteklių trūkumas	II	1.22E+00	1.20E+00	-1.7	1.12E+00	93.7	-6.3
Vandens suvartojimas, žmonių sveikata	VS_žm	6.49E-07	6.52E-07	0.4	6.02E-07	92.4	-7.6

Kategorija	Trumpinys	A scenarijus	B scenarijus	B scenarijus pokytis nuo A (%)	B scenarijus + optimizacija	Santykinė reikšmė nuo bazės (%)	Optimizuoto scenarijus pokytis nuo B (%)
Vandens suvartojimas, sausumos ekosistema	VS_saus	3.95E-09	3.97E-09	0.4	3.67E-09	92.4	-7.6
Vandens suvartojimas, vandens ekosistemos	VS_vand	1.86E-13	1.87E-13	0.4	1.73E-13	92.3	-7.7

**2 lentelė.** Normalizuoti duomenys.

Poveikio kategorija	Žala	A scenarijus	B scenarijus	B scenarijus + optimizacija	Pokytis nuo B scenarijaus (%)
Žmonių sveikata	DALY	2.2E-05	2.2E-05	2.0E-05	6.98156
Ekosistemos	species.yr	4.1E-08	4.1E-08	3.9E-08	4.0062
Ištekliai	USD2013	1.2E+00	1.2E+00	1.1E+00	6.3282