



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Mikroplastikai nusėdusiose patalpų dulkėse: žmogaus ekspozicijos vertinimas

Baigiamasis magistro projektas

Monika Eimutytė

Projekto autorė

Prof. Violeta Kaunelienė

Vadovė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Mikroplastikai nusėdusiose patalpų dulkėse: žmogaus ekspozicijos vertinimas

Baigiamasis magistro projektas

Aplinkosaugos inžinerija (6211EX003)

Monika Eimutytė

Projekto autorė

Prof. Violeta Kaunelienė

Vadovė

Prof. Dainius Martuzevičius

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Cheminės technologijos fakultetas

Monika Eimutytė

Mikroplastikai nusėdusiose patalpų dulkėse: žmogaus ekspozicijos vertinimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Monika Eimutytė

Patvirtinta elektroniniu būdu

Monika Eimutytė. Mikroplastikai nusėdusiose patalpų dulkėse: žmogaus ekspozicijos vertinimas. Magistro baigiamasis projektas vadovė Prof. Violeta Kaunelienė; Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: mikroplastikas, vidaus patalpų oras, oro tarša, dulkės.

Kaunas, 2026. 60 p.

Santrauka

Mikroplastikai yra plačiai paplitę aplinkos teršalai, aptinkami ne tik vandens telkiniuose ar dirvožemyje, bet ir vidaus aplinkoje. Vidaus patalpų ore bei dulkėse susikaupę mikroplastikai laikomi reikšmingu žmonių ekspozicijos šaltiniu, nes smulkios dalelės gali būti įkvėpiamos. Šio darbo tikslas – nustatyti mikroplastikų koncentraciją KTU Cheminės technologijos fakulteto vidaus aplinkos dulkių mėginiuose, įvertinti jų pasiskirstymą skirtingose patalpose bei palyginti stereomikroskopijos ir fluorescencinės mikroskopijos metodų taikymą mikroplastikų identifikavimui. Darbe atlikta mokslinės literatūros analizė, dulkių mėginių surinkimas bei laboratoriniai tyrimai. Mikroplastikų identifikavimui ir kiekybiniam įvertinimui taikyti stereomikroskopijos ir fluorescencinės mikroskopijos metodai, atlikta statistinė duomenų analizė bei apskaičiuotos galimos žmonių ekspozicijos reikšmės.

Tyrimo metu nustatyta, kad mikroplastikų koncentracijos dulkių mėginiuose svyravo nuo 144 iki 895 MP/g dulkių, o vidutinė koncentracija siekė 472 ± 196 MP/g. Didžiausia mikroplastikų koncentracija nustatyta 038 laboratorijoje, kur vykdomi intensyvūs medžiagų paruošimo darbai. Kai kuriose organinės chemijos ir polimerų laboratorijose taip pat nustatytos didelės mikroplastikų koncentracijos. Auditorijose didžiausia mikroplastikų koncentracija nustatyta rytinėje pastato pusėje, tačiau skirtumas lyginant su koncentracija vakarinėje pusėje esančiose laboratorijose nebuvo statistiškai reikšmingas. Mėginiuose dominavo smulkios mikroplastikų dalelės, o 50–100 μm dydžio intervalas sudarė didžiausią visų aptiktų dalelių dalį (32,8 %). Pluoštiniai mikroplastikai sudarė apie 20 % bendros mikroplastikų koncentracijos. Palyginus stereomikroskopijos ir fluorescencinės mikroskopijos metodais gautus rezultatus nustatyta, kad fluorescencinės mikroskopijos metodu visose tirtose aplinkose buvo nustatytos mažesnės mikroplastikų koncentracijos. Statistinė analizė parodė, kad skirtumai tarp metodų buvo statistiškai reikšmingi tiek auditorijose ($p = 0,002$), tiek laboratorijose ($p < 0,001$), o didesni skirtumai nustatyti laboratorijų mėginiuose. Tarp metodų rezultatų nustatyta labai stipri koreliacija ($R^2 \approx 0,94$).

Įvertinus galimą žmonių ekspoziciją mikroplastikams nustatyta, kad apskaičiuotos EDI reikšmės svyravo nuo 0,0034 iki 0,0365 MP/kg kūno masės per dieną. Gauti rezultatai rodo, kad vidaus aplinkos dulkės gali būti reikšminga mikroplastikų kaupimosi terpė bei potencialus žmonių ekspozicijos mikroplastikams šaltinis.

Monika Eimutytė. Microplastics in Settled Indoor Dust: Assessment of Human Exposure. Master's Final Degree Project supervisor Prof. Violeta Kaunelienė; Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: microplastics, indoor air, air pollution, dust.

Kaunas, 2026. 60 p.

Summary

Microplastics are widespread environmental pollutants found not only in water bodies and soil but also in indoor environments. Microplastics accumulated in indoor air and dust are considered a significant source of human exposure because fine particles can be inhaled. The aim of this study was to determine the concentration of microplastics in indoor dust samples collected at the Faculty of Chemical Technology of Kaunas University of Technology, evaluate their distribution in different rooms, and compare the application of stereomicroscopy and fluorescence microscopy methods for microplastic identification. The study included a review of scientific literature, dust sample collection, and laboratory analyses. Stereomicroscopy and fluorescence microscopy methods were applied for the identification and quantitative assessment of microplastics, while statistical data analysis and calculations of potential human exposure values were also performed.

The study found that microplastic concentrations in dust samples ranged from 144 to 895 MP/g of dust, with an average concentration of 472 ± 196 MP/g. The highest microplastic concentration was detected in Laboratory 038, where intensive material preparation activities are carried out. High concentrations of microplastics were also identified in some organic chemistry and polymer laboratories. In lecture rooms, the highest concentration of microplastics was found on the eastern side of the building; however, the difference compared with concentrations measured in laboratories located on the western side was not statistically significant. Fine microplastic particles predominated in the samples, while particles within the size range of 50–100 μm accounted for the largest proportion of all detected particles (32.8%). Fibrous microplastics constituted approximately 20% of the total microplastic concentration. Comparison of results obtained by stereomicroscopy and fluorescence microscopy showed that lower microplastic concentrations were identified using the fluorescence microscopy method in all investigated environments. Statistical analysis demonstrated that the differences between the methods were statistically significant both in lecture rooms ($p = 0.002$) and laboratories ($p < 0.001$), with larger differences observed in laboratory samples. A very strong correlation between the results of the two methods was determined ($R^2 \approx 0.94$).

Assessment of potential human exposure to microplastics showed that the calculated EDI values ranged from 0.0034 to 0.0365 MP/kg body weight per day. The obtained results indicate that indoor dust may serve as a significant medium for microplastic accumulation and a potential source of human exposure to microplastics.

Turinys

Lentelių sąrašas.....	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas.....	11
Įvadas.....	12
1. Literatūros apžvalga.....	13
1.1. Mikroplastikai.....	13
1.1.1. Mikroplastikų skirstymas	13
1.1.2. Mikroplastikų šaltiniai	13
1.1.3. Mikroplastikų susidarymas.....	15
1.1.4. Mikroplastikų nebiologinė degradacija	16
1.1.5. Mikroplastikų biologinė degradacija	16
1.2. Mikroplastikų savybės	16
1.2.1. Mikroplastikų dydis	16
1.2.2. Mikroplastikų spalvos	17
1.2.3. Mikroplastikų kristališkumas	17
1.2.4. Mikroplastikų tipai ir priedai	17
1.2.5. Mikroplastikų cheminės savybės.....	18
1.2.6. Mikroplastikų toksiškumas žmogui.....	18
1.3. Mikroplastikų pasiskirstymas ore	19
1.3.1. Transportavimo mechanizmai: vėjas, krituliai.	20
1.4. Mikroplastikų migracija ir pernaša patalpose.....	21
1.4.1. Mikroplastikai vidaus aplinkoje	22
1.4.2. Mikroplastikai namų dulkėse	24
1.5. Mėginių paruošimo metodai	25
1.5.1. Mėginių rinkimas.....	25
1.5.2. Organinių priemaišų pašalinimas	26
1.5.3. Neorganinių medžiagų pašalinimas	27
1.6. Mėginių analizė	28
1.6.1. Filtro pasirinkimas	28
1.6.2. Kokybinė analizė	28
1.6.2.1. Ramano spektroskopija.....	28
1.6.2.2. Furjė infraraudonųjų spindulių transformacija (FT–IR).....	29
1.6.3. Kiekybinė analizė	30
1.6.3.1. Stereomikroskopija	30
1.6.3.2. Skenuojanti elektronų mikroskopija (SEM)	30
1.6.3.3. Fluorescencinė mikroskopija	31
1.7. Mikroplastikų valdymas: standartai, direktyvos ir SDG	31
1.7.1. Vienkartinio plastiko direktyva (2019/904/ES).....	31
1.7.2. REACH reglamentas	31
1.7.3. Darnaus vystymosi tikslai.....	32
1.8. Literatūros apibendrinimas	32
2. Metodinė dalis	33
2.2. Tyrimo eiga	33
2.3. Mėginių surinkimas	34

2.4. Mėginių analizė	34
2.5. Organinių medžiagų pašalinimas	35
2.6. Neorganinių medžiagų pašalinimas	35
2.7. Kiekybinė analizė	36
2.7.1. Analizė stereomikroskopu	36
2.7.2. Fluorescencinė analizė	37
2.8. Duomenų analizė	38
2.9. EDI skaičiavimas	39
2.10. Metodikos patikimumo vertinimas	40
3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas	41
3.1. Stereomikroskopinio ir fluorescencinės mikroskopijos metodų palyginimas	41
3.2. Mikroplastikų koncentracija skirtingose patalpose	44
3.3. Mikroplastikų dydis	47
3.4. Pluoštinių mikroplastikų koncentracijos analizė	49
3.5. EDI skaičiavimas	52
Išvados	54
Literatūros sąrašas	55
Publikacijų sąrašas	61

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Mikro/nanoplasto dalelių formos [15]	16
2 lentelė. Polimerų priedai ir toksiškumas [18]	18
3 lentelė. Mikroplastikų pasiskirstymas [24]	21
4 lentelė. Statistinės analizės rezultatai	43
5 lentelė. Mikroplastiko dalelių dydžių pasiskirstymas pagal intervalus.....	48
6 lentelė. Apskaičiuotos EDI reikšmės skirtingų patalpų dulkių mėginiuose.....	52

Paveikslų sąrašas

1 pav. a – antrinio plastiko susidarymas, b – MP klasifikavimas [6].....	13
2 pav. Mikroplastiko šaltiniai [6]	14
3 pav. Plastiko fragmentacija iki mikroplastiko [12]	15
4 pav. Polimerų struktūra [17]	17
5 pav. Mikroplastiko absorbcija žmogaus organizme [20]	19
6 pav. Mikroplastiko pasiskirstymas ore [23]	20
7 pav. Mikroplastikų pasiskirstymą lemiantys veiksniai (SAMP – atmosferoje suspenduoti mikroplastikai) [23]	20
8 pav. Sausasis ir šlapiasis nusodinimas [24].....	21
9 pav. Vidaus patalpų ore esančių plastiko dalelių šaltiniai [28]	23
10 pav. Mikroplastikų koncentracija vidaus patalpų dulkėse ir nusėdančiose dalelėse skirtingose pasaulio šalyse [29]	24
11 pav. Mėginių ėmimo įrenginio schema: (a) manekenas sėdimoje padėtyje, paruoštas mėginių ėmimui; (b) du reguliuojami stūmokliai, prijungti prie variklio, skirti įkvėpimo ir iškvėpimo imitavimui; (c) mėginių ėmimo schemos brėžinys; (d) žmogaus ribinio sluoksnio srauto iliustracija [26].....	25
12 pav. Rameno spektrometro gaunami spektrai [40]	29
13 pav. FT–IR spektru gaunami rezultatai [41]	29
14 pav. Optiniu mikroskopu atliktos analizės rezultatai [42]	30
15 pav. SEM gaunami rezultatai [43]	30
16 pav. Fluorescencinė analizės rezultatai [36]	31
17 pav. Tyrimo eiga	33
18 pav. Mėginių surinkimo įrankiai	34
19 pav. Organinių medžiagų pašalinimo eiga	35
20 pav. Tankio separacija.....	35
21 pav. a) Stereomikroskopas, „Olympus SZ61“ b) Fluorescencinis mikroskopas <i>OPTIKA B–353FL</i>	36
22 pav. Skaičiavimo pavyzdys	37
23 pav. Fluorescencinė analizė	37
24 pav. Okuliarinės mikrometrinės skalės kalibravimas [38]	38
25 pav. Kontrolinių filtrų analizė: a) kontrolinis filtras, analizuotas stereomikroskopijos metodu; b) kontrolinis filtras, analizuotas fluorescencinės mikroskopijos metodu	40
26 pav. Mikroplastiko dalelių identifikavimas fluorescenciniu (a) ir stereomikroskopiniu (b) metodais	41
27 pav. Fluorescencinės mikroskopijos ir stereomikroskopinio metodų rezultatų palyginimas auditorijose	42
28 pav. Fluorescencinės mikroskopijos ir mikroskopinio metodų rezultatų palyginimas laboratorijose	42
29 pav. Mikroplastikų koncentracijos pasiskirstymas laboratorijų ir auditorijų patalpose	44
30 pav. Mikroplastikų koncentracijos pasiskirstymas rytinėje ir vakarinėje pastato pusėse esančiose auditorijose	45
31 pav. Mikroplastikų koncentracijos pasiskirstymas A ir C korpusų laboratorijose.....	45
32 pav. Mikroplastiko dalelių dydžio μm (\log_{10}) pasiskirstymo histograma.....	47
33 pav. Mikroplastiko dalelių dydžio pasiskirstymas laboratorijų ir auditorijų mėginiuose	48

34 pav. Mikroplastiko dalelių vaizdai: a) stereomikroskopiniu metodu ($\times 45$ didinimas) b) fluorescencinės mikroskopijos metodu ($\times 200$ didinimas).....	49
35 pav. Pluoštinių mikroplastikų koncentracijų pasiskirstymas laboratorijose ir auditorijose	49
36 pav. Kiekvieno mėginio bendros mikroplastikų koncentracijos ir pluoštinių mikroplastikų koncentracijos palyginimas	50
37 pav. Pluoštų koncentracijos ir bendros mikroplastikų koncentracijos priklausomybė	50

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

DDT – dichlordifeniltrichlorešanas;

EDI – apskaičiuota paros ekspozicijos dozė;

ES – Europos Sąjunga;

MP – mikroplastikas;

NP – nanoplastikas;

PA – poliamidas;

PAH – policikliniai aromatiniai angliavandeniliai;

PCB – polichlorinti bifenilai;

PES – poliesteris;

Prof. – profesorius;

PUR – poliurešanas;

SDG – darnaus vystymosi tikslai (*Sustainable Development Goals*);

UV – ultravioletiniai spinduliai;

UVA – ilgos bangos ultravioletiniai spinduliai.

Terminai:

Brauno judėjimas – chaotiškas smulkių dalelių judėjimas skystyje arba dujose, kurį sukelia nuolatiniai susidūrimai su aplinkinių molekulių dalelėmis.

Resuspensija – nusėdusių dalelių pakartotinis perėjimas iš nuosėdų ar paviršiaus į aplinkinę terpę (orą arba vandenį).

Įvadas

Polimerinės medžiagos dėl savo mechaninio atsparumo, lankstumo, mažo tankio ir cheminio stabilumo tapo neatsiejama šiuolaikinės visuomenės dalimi. Plastikai plačiai naudojami pakuočių gamyboje, tekstilės pramonėje, statyboje, elektronikoje bei buityje. Pasaulinė plastikų gamyba nuo XX a. vidurio sparčiai augo ir 2022 m. pasiekė apie 400 mln. tonų per metus, o iki 2050 m. prognozuojama, kad ji viršys 1 mlrd. tonų [1]. Spartus plastikinių gaminių vartojimas lėmė reikšmingą plastiko atliekų kiekio didėjimą aplinkoje. Veikiant fizikiniams, cheminiams ir biologiniams procesams plastikai palaipsniui skyla į smulkesnes daleles – mikroplastikus, kurių dydis yra mažesnis nei 5 mm. Tačiau mikroplastikai į aplinką patenka ne tik dėl didesnių plastikinių atliekų irimo. Reikšmingais jų šaltiniais laikomi ir sintetinių tekstilės gaminių pluoštų atsiskyrimas skalbimo bei dėvėjimo metu, taip pat transporto priemonių padangų dėvėjimasis eksploatacijos metu. Mikroplastikai pasiskirsto įvairiose aplinkos terpėse: vandenyje, dirvožemyje bei ore. Pastaraisiais metais vis daugiau dėmesio skiriama ore esančioms mikroplastiko dalelėms, nes jos gali būti pernešamos dideliais atstumais ir kauptis vidaus patalpų dulkėse [2]. Vidaus patalpų aplinka laikoma vienu svarbiausių žmogaus mikroplastikų ekspozicijos šaltinių, kadangi didelė dalis laiko praleidžiama uždaroje erdvėje. Mikroplastikų kiekis patalpų dulkėse gali priklausyti nuo įvairių veiksnių, tokių kaip tekstilės gaminiai, plastikinės medžiagos, ventiliacija ar žmonių aktyvumas, ir paprastai yra ženkliai didesnis nei aplinkos ore. Dėl mažo dydžio mikroplastikai gali būti įkvepiami arba patekti į organizmą kartu su dulkėmis [3]. Nors mikroplastikų tarša vidaus aplinkoje sulaukia vis didesnio mokslininkų dėmesio, duomenų apie jų koncentracijas vidaus patalpų dulkėse vis dar nepakanka. Be to, mikroplastikų identifikavimui ir kiekybiniam nustatymui iki šiol nėra taikoma vieninga analizės metodika, todėl aktualu vertinti skirtingų metodų tinkamumą, jautrumą ir pritaikymo galimybes.

Svarbu paminėti, kad ši problema glaudžiai susijusi su Jungtinių Tautų darnaus vystymosi tikslais: SDG 3 „Gera sveikata ir gerovė“, SDG 11 „Tvarūs miestai ir bendruomenės“ bei SDG 12 „Atsakingas vartojimas ir gamyba“, kurie pabrėžia sveikos gyvenamosios aplinkos svarbą. Todėl mikroplastikų identifikavimas ir kiekybinis vertinimas yra būtinas siekiant nustatyti jų paplitimą ir įvertinti galimą riziką [4].

Šio tyrimo tikslas – įvertinti mikroplastikų paplitimą KTU Cheminės technologijos fakulteto vidaus aplinkoje, analizuojant jų koncentracijas, pagrindines savybes bei galimą žmonių ekspoziciją mikroplastikais.

Uždaviniai:

1. atlikti mokslinės literatūros analizę, siekiant įvertinti mikroplastikų paplitimą patalpų aplinkoje bei parinkti tinkamus jų analizės metodus;
2. atlikti kiekybinę mikroplastikų analizę patalpų dulkių mėginiuose, nustatant bendrą ir pluoštinių mikroplastikų koncentraciją, bei palyginant stereomikroskopijos ir fluorescencinės mikroskopijos analizės metodų rezultatus;
3. įvertinti galimą žmonių ekspoziciją mikroplastikais, apskaičiuojant numatomą paros dalelių suvartojimą (EDI) remiantis nustatytais mikroplastikų koncentracijomis patalpų dulkėse.

1. Literatūros apžvalga

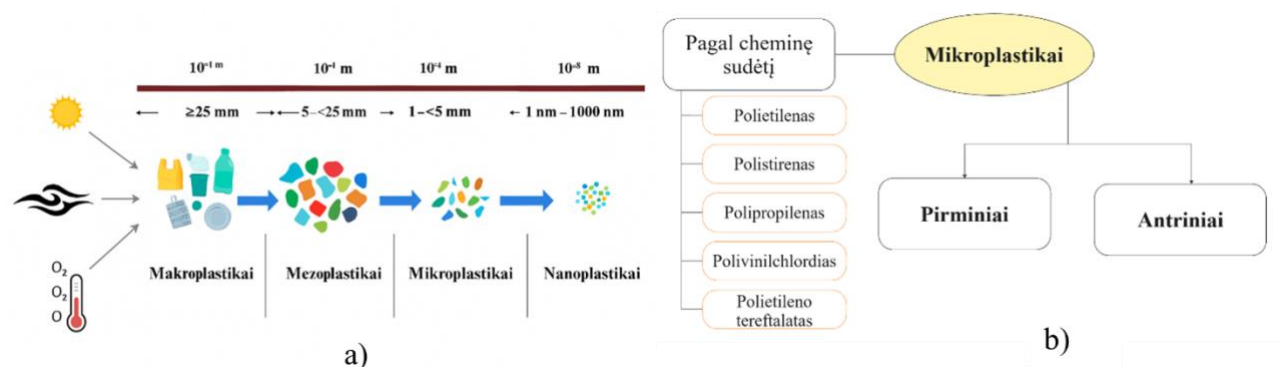
Šiame skyriuje aptariami mikroplastikų susidarymo procesai ir pagrindiniai jų šaltiniai aplinkoje. Nagrinėjamos mikroplastikų fizikinės ir cheminės savybės, jų pernaša bei pasiskirstymas atmosferos ore ir patalpų aplinkoje, taip pat poveikis žmogaus sveikatai. Skyriuje analizuojami mikroplastikų mėginių ėmimo, identifikavimo ir analizės metodai.

1.1. Mikroplastikai

Plastiko tarša pasaulyje laikoma viena aktualiausių aplinkosaugos problemų. Ypatingas dėmesys skiriamas mikroplastikams (MP), kurie dėl mažo dydžio lengvai pasklinda aplinkoje ir gali patekti į įvairias ekosistemas bei kauptis vidaus aplinkos dulkėse. Mikroplastikai apibrėžiami kaip kietos sintetinės organinių polimerų dalelės, kurių dydis yra mažesnis nei 5 mm [5].

1.1.1. Mikroplastikų skirstymas

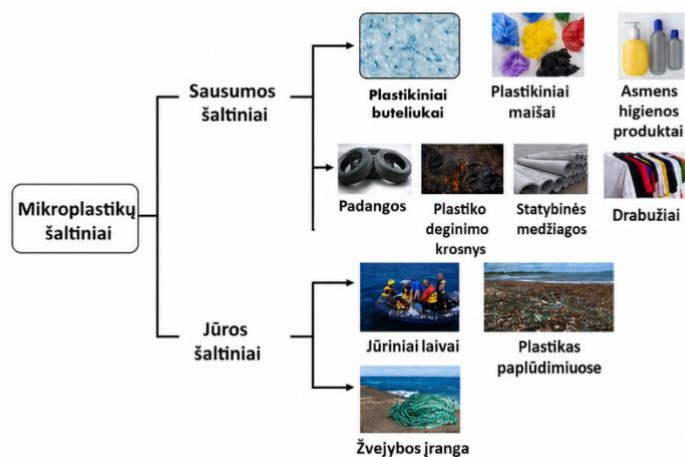
Mikroplastikai yra viena iš naujausių aplinkos teršalų grupių, aptinkamų visame pasaulyje. Dėl didelio patvarumo bei cheminių medžiagų ir priedų, naudojamų plastikų gamyboje, išsiskyrimo jie gali turėti neigiamą poveikį gyviesiems organizmams. Mikroplastikai skirstomi į pirminius ir antrinius. Pirminiai mikroplastikai, tai mažo dydžio dalelės, kurios į aplinką patenka tiesiogiai, pavyzdžiui, mikrogranulės, naudojamos asmens higienos produktuose. Antriniai mikroplastikai susidaro skaidantis makro- ir mezoplastikui dėl fotooksidacinių, mechaninių, cheminių ir (arba) biologinių procesų. Kaip parodyta 1 paveikslo a dalyje, šių procesų metu formuojasi smulkesnės plastiko dalelės, o 1 paveikslo b dalyje pateikiama detalesnė mikroplastikų klasifikacija pagal kilmę ir cheminę sudėtį [6].



1 pav. a – antrinio plastiko susidarymas, b – MP klasifikavimas [6]

1.1.2. Mikroplastikų šaltiniai

Ankstesniame skyriuje buvo išaiškinta, kad mikroplastikai gali būti pirminiai ir antriniai. Pirminiai mikroplastikai apibrėžiami, kaip sąmoningai gaminami mažų matmenų plastiko gaminiai, o antriniai mikroplastikai susidaro yrant didesniems plastikiniams gaminiams. Mikroplastikai aptinkami įvairiose aplinkos terpėse: jūrose, upėse, ežeruose, ore, sąvartynuose, dumble bei nuotekų valymo įrenginiuose. Literatūroje išskiriama daug mikroplastiko šaltinių, tačiau dažniausiai MP šaltiniai skirstomi į sausumos ir vandenyno kilmės šaltinius (2 pav.) [6].



2 pav. Mikroplastiko šaltiniai [6]

Vienas iš pagrindinių antrinio mikroplastiko šaltinių laikoma sintetinė tekstilė. Iš sintetinės tekstilės išsiskiriantis mikroplastikas apibrėžiamas kaip pluoštinis mikroplastikas (pMP). Sintetiniai pluoštai sudaro didelę dalį medžiagų, pagamintų iš sintetinių polimerų: poliesterio (PES), poliakrilo (PAN) ir poliamido (PA). Mokslinėje literatūroje nurodoma, kad mikropluoštai laikomi dominuojančiu mikroplastikų tipu daugelyje aplinkos mėginių, ypač lauko aplinkoje. Tai rodo didelį pluoštinių mikroplastikų paplitimą įvairiose pasaulio ekosistemose [7]. Paviršiniuose vandenyse jų koncentracijos dažniausiai nesiekia 1 dalelės litre, tačiau nuosėdose ir dirvožemyje aptinkami gerokai didesni kiekiai, galintys siekti iki tūkstančio dalelių kilogramui. Ore mikroplastikai aptinkami kritulių ir dulkių pavidalu; apskaičiuota, kad viename m² gali būti aptinkama apie šimtai pMP dalelių. Nustatyta, kad 100 000 gyventojų per metus buitinio skalbimo metu išskiria nuo 50 iki 1180 kg pMP. Nors ketvirtinio valymo metu galima pašalinti iki 95 % mikroplastiko dalelių, likusi 2,5–59 kg MP dalis per metus vis tiek patenka į paviršinius vandenį, dirvožemį. Didelę problemą kelia ne tik mikropluošto sudėtis, bet ir audinio struktūra. Laisvai suverti arba mažesnio tankio audiniai greičiau dėvisi, skyla ir išskiria daugiau dalelių. Dideli pMP kiekiai susidaro skalbimo metu veikiant mechaninių jėgų poveikiui (trintis, sukimasis), aukštai temperatūrai ir skalbikliuose esančių cheminių medžiagų poveikiui bei džiovinimo procesui. Pagrindinis naudojamas pluoštas yra PES, sudarantis apie 60 % pasaulinės tekstilės rinkos. Prognozuojama, kad PES paklausa tekstilės pramonėje ir toliau didės bei iki 2025 metų viršys 60 mln. tonų. Tokie pMP kiekiai rodo, kad ši problema apima visą visuomenę ir išlieka viena aktualiausių aplinkosaugos problemų [8].

Kitas svarbus mikroplastiko šaltinis yra transporto priemonių padangų dėvėjimasis, dažų dalelių irimas bei sąvartynai, kuriuose dėl netinkamo plastiko atliekų tvarkymo į aplinką patenka mikroplastikai. Vienu reikšmingiausių šaltinių laikomos padangų dilimo metu susidaranti dalelės. Tai plastinės kilmės smulkios dalelės, išsiskiriančios transporto priemonėms judant. Didelė problema yra ta, kad šios dalelės gali būti pernešamos oru ir patekti į vidaus aplinką. Tokios dalelės pasižymi netaisyklinga forma, skirtingu tankiu ir chemine sudėtimi. Jos priskiriamos antriniam mikroplastikui [9]. Kitas svarbus šaltinis yra dažai ir dangos. Šios medžiagos yra polimerinės kilmės, todėl laikui bėgant dėl irimo procesų lupasi ir trupa, formuodamos mikrodaleles. Priklausomai nuo dydžio, šios dalelės gali būti priskiriamos mikroplastikams. Dažniausiai mikroplastikai pasižymi plokšteline, amorfine arba agreguota forma [10].

Sąvartynai taip pat laikomi vienu iš pagrindinių mikroplastikų šaltinių dėl netinkamo plastiko atliekų šalinimo. Plastiko atliekas veikia ultravioletinė spinduliuotė, temperatūros svyravimai bei mikroorganizmai, todėl ilgainiui plastikas suyra į mikroplastikus. Šios dalelės gali patekti į dirvožemį, gruntinius vandenius ir atmosferos dulkes. Vienas iš sąvartynuose taikomų atliekų tvarkymo būdų yra deginimas. Deginant plastiką atviroje aplinkoje gali susidaryti mikroplastikai, kurie su oro srautais pasklinda atmosferoje [10].

Kaip jau minėta, pirminis plastikas yra sąmoningai gaminamas ir dedamas į kosmetikos gaminius. Iš kosmetikos gaminių mikrodalelės patenka į nuotekas, o dauguma jų yra per mažos, kad būtų sulaikytos. Dėl to mikroplastikai patenka į vandens telkinius, kenkia ekosistemoms ir kelia pavojų žmogaus sveikatai. Pirminis mikroplastikas vis dar išlieka reikšminga problema, nors Europos Sąjunga riboja kosmetiniuose gaminiuose naudojamų mikrogranulių kiekį [11].

Apžvelgti šaltiniai rodo, kad mikroplastikų formos ir kilmė gali būti labai įvairios, todėl jų poveikis aplinkai ir organizmams taip pat skiriasi.

1.1.3. Mikroplastikų susidarymas

Plastiko atliekos, veikiamos cheminių, biologinių ir aplinkos veiksnių, skaidomos į mikroplastikus, o vėliau į nanoplastikus (NP). Plastikai laikomi organiniais junginiais, sudarytais iš ilgų polimerinių grandinių, kurias daugiausia sudaro anglies ir vandenilio atomai. Dėl savo struktūros plastikams būdingas cheminis atsparumas ir atsparumas biodegradacijai, todėl plastikai aplinkoje gali išlikti ilgą laiką. Plastikuose taip pat gali būti heteroatomų, didinančių jų jautrumą cheminiam skilimui.

Šių medžiagų skilimas priklauso nuo fizikinių savybių, tokių kaip forma, dydis, poringumas, paviršiaus plotas ir kristališkumas. Visi šie procesai lemia polimerų irimą bei mikroplastikų susidarymą. Mikroplastikų susidarymas veikiant aplinkos veiksniams, pavaizduotas 3 paveiksle. Schemoje pateikiami pagrindiniai mikroplastikų susidarymą lemiantys veiksniai: saulės spinduliuotė, šiluminis poveikis, oksidacija ir bioplėvelės susidarymas [12].



3 pav. Plastiko fragmentacija iki mikroplastiko [12]

1.1.4. Mikroplastikų nebiologinė degradacija

Pagrindinis veiksnys, lemiantis mikroplastiko atsiskyrimą yra fotodegradacija. Šis procesas skatina polimerinių grandinių skilimą ir oksidacinius procesus. Oksidacinio proceso metu ant organinio polimero paviršiaus įsiterpia deguonį turinti funkcinė grupė (pvz., ketonai, esteriai, alkoholiai), kurie mažina polimero hidrofobiškumą ir didina jo tirpumą. Kitas svarbus procesas yra hidrolizė. Šio proceso metu vandens molekulės ardo polimerų cheminius ryšius. Hidrolizės procesas efektyviausias jūros vandenyje, nes ten esančios druskos ir nuolatinė drėgmė spartina degradacijos procesą. Nebiologinės degradacijos metu keičiasi polimerų sandara ir mechaninės savybės. Medžiaga tampa daug trapesnė, labiau linkusi suskilti į smulkias daleles, padidėjęs paviršiaus plotas skatina adsorbciją ir mikroorganizmų kolonizaciją [12].

1.1.5. Mikroplastikų biologinė degradacija

Biologinė degradacija vyksta veikiant mikroorganizmams. Įvairios bakterijos, grybai ir pirmuoniai išskiria fermentus, ardančius polimerų struktūrą. Ant plastiko paviršiaus susidaro bioplėvelė, kuri skatina MP agregavimą. Bioplėvelė su teršalais ir aplinkos detalėmis sudaro lipnias struktūras, heteroagregatus. Dar greitesnė biodegradacija vyksta polimeruose, kurie turi heteroatomų, nes šie cheminiai centrai yra jautresni fermentams ir oksidacijai. Atlikti tyrimai rodo, jog polistirenas gali būti suskaidytas iki nanoplastikų per keturias savaites oro sąlygomis [13].

1.2. Mikroplastikų savybės

Medžiagos savybės išskiriamos kaip fizikinės ir cheminės. Mikroplastikų fizikinės savybės apima dalelių dydį, formą bei spalvą. Chemines savybes apibūdina dalelių kristališkumas, struktūra, funkcinės grupės, cheminių priedų ir metalų buvimas. MP fizikinės ir cheminės savybės nusako jų elgseną aplinkoje bei sąveiką su kitomis medžiagomis ir gyvaisiais organizmais [14].

1.2.1. Mikroplastikų dydis

Viena svarbiausių mikroplastikų savybių yra jų dydis, kuris lemia dalelių prasiskverbimą aplinkoje ir organizmuose. Mikroplastikų dydis nustatomas taikant įvairius mėginių ėmimo bei mikroskopinės analizės metodus. Ore aptinkamos dalelės gali siekti 5000 μm . Dažniausiai aptinkamų mikroplastikų dalelių dydis svyruoja nuo 1 μm iki 5 mm. Dėl plataus sintetinių polimerų spektro aplinkoje aptinkama įvairių mikroplastikų formų (1 lentelė). MP įvairovė priklauso nuo pradinės gaminio formos ir paskirties, taip pat nuo skaidymosi procesų bei buvimo aplinkoje trukmės. Tyrimų duomenimis, labiausiai paplitusios mikroplastikų formos yra plaušai ir fragmentai, sudarančios apie 52,7 % nuotekose ir atmosferos nuosėdose aptinkamo mikroplastiko [15].

1 lentelė. Mikro/nanoplasto dalelių formos [15]

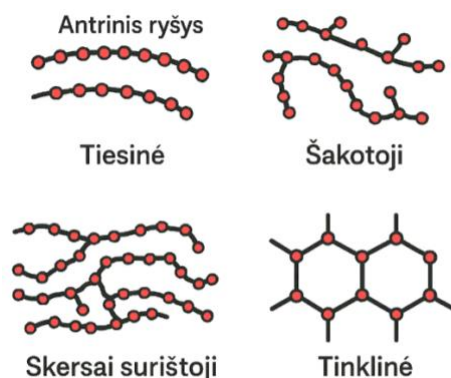
	Forma	Dydis	Apibūdinimas
Mikroplastikas (MP)	Plaušai	1 μm – 5 mm	Ilgos, plonos dalelės
	Fragmentai	1 μm – 5 mm	Neregulios formos
	Granulės	0,5–5 mm	grūdėliai, apvalūs ar ovalūs
	Plėvelės	< 5 mm	Ploni plastiko gabalai
	Putos	1 μm – 5 mm	Porėta, lengva struktūra

1.2.2. Mikroplastikų spalvos

Dalelių spalva taip pat turi įtakos mikroplastikų savybėms, nes jos yra labai įvairios: raudona, mėlyna, geltona, ruda ir kt. Vis dėlto spalva padeda identifikavimo ir apibūdinimo procesuose. Mikroplastikų spalva ir forma turi įtakos hidrofobinių organinių teršalų sorbcijos dinamikai. Aplinkos sąlygos gali lemti dalelių spalvos pokytį. Atlikti tyrimai rodo, kad tamsesnės spalvos PVC, PP, PE dalelės labiau linkusios adsorbuoti teršalų, kaip pavyzdžiui PAH, PCB, DDT. Tamsesnės spalvos MP adsorbuoja didesnės molekulinės masės PAH junginius, o šviesesnės spalvos dalelės linkusios adsorbuoti mažesnės molekulinės masės junginius. Įrodyta, kad spalvą praradę PE mikroplastikai geriau adsorbuoja PCB nei spalvoti. Galima teigti, kad spalva yra vienas iš veiksnių, lemiančių gebėjimą sugerti teršalus [16].

1.2.3. Mikroplastikų kristališkumas

Polimerai skirstomi į kristalines, amorfines ir pusiau kristalines formas. Šis skirstymas priklauso nuo polimerų grandinių išsidėstymo ir susijungimo laipsnio. Kristalinėse srityse molekulės išsidėsčiusios reguliariai ir sudaro tankią struktūrą. 4 paveiksle pateikiamos keturios pagrindinės polimerų struktūros.



4 pav. Polimerų struktūra [17]

Polimero kristalinės sritys yra chemiškai inertiškesnės dėl molekulių tvarkos ir tankumo. Šios sritys yra mažiau palankios hidrofobinėms sąveikoms ir organinių cheminių medžiagų sorbcijai. Tačiau, priešingai, amorfinėse srityse molekulės išsidėsto netvarkingai ir negali sudaryti tankios struktūros, dėl to jos turi didelį paviršiaus aktyvumą ir gali lengviau sąveikauti su hidrofobiniais organiniais junginiais. Šios sąveikos pasireiškia dėl vandenilinių ryšių, *Van der Valso* jėgų ir π - π sąveikų. Kristališkumo laipsnis priklauso nuo polimero izomerijos, kietėjimo ir struktūros. Kuo mažesnis kristališkumo laipsnis, tuo labiau polimeras sugeria teršalus [17].

1.2.4. Mikroplastikų tipai ir priedai

Dalelių toksiškumas priklauso nuo cheminių priedų ir likusių monomerų. Šios medžiagos gali išsiskirti plastiko naudojimo ir irimo metu. Plastiko gamybos metu dažnai pridedama papildomų medžiagų savybėms pagerinti: tirpiklių, katalizatorių, stabilizatorių, dažiklių, plastifikatorių ir biocidų. Į aplinką patekę priedai pasižymi toksiškumu ir gali veikti kaip endokrininę sistemą ardantys junginiai. PVC laikomas vienu pavojingiausių plastikų dėl didelio chloro kiekio ir naudojamų priedų. Daugiau pavyzdžių pateikiama 2 lentelėje.

2 lentelė. Polimerų priedai ir toksiškumas [18]

Polimeras	Priedai	Toksinis poveikis
Polivinilchloridas	Chloro junginiai, plastifikatoriai	Endokrininės sistemos sutrikdymas
Polikarbonatas	Bisfenolis A	Endokrininės sistemos sutrikdymas
Polistirenas	Antipirenai, dažikliai	Kancerogenas, neuroksinis poveikis
Poliakrilonitrilas	Fenoliai, ftalatai	Neurotoksinis poveikis, mutageniškumas
Poliuretantai	Polioliai, izocianatai	Kvėpavimų takų dirginimas

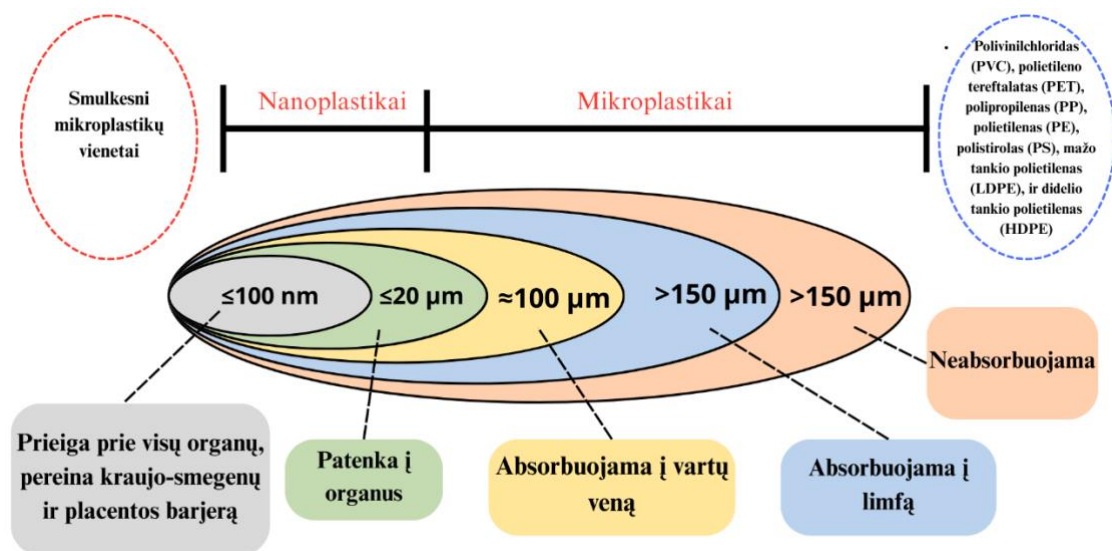
Priedų išsiskyrimas priklauso nuo plastiko struktūros, poringumo bei priedų įterpimo į polimero matricą būdo. Lengviausiai išsiskiria priedai ar dalelės, kurie nėra chemiškai susijungę su polimero matrica. Vertinant mikroplastiko poveikį, svarbu įvertinti jų cheminę sudėtį bei priedus, galinčius išsiskirti į aplinką [18].

1.2.5. Mikroplastikų cheminės savybės

Dėl vykstančių aplinkos procesų plastiko paviršiuje formuojasi naujos funkcinės grupės: karbonilinės ($-C=O$), hidroksilo ($-OH$), karboksilo ($-COOH$). Dėl šių procesų plastiko paviršius pradeda trūkinėti, todėl padidėja paviršiaus plotas ir sudaromos sąlygos antrinio mikroplastiko formavimuisi. Šie pažeidimai pašiausia mikroplastiko dalelių paviršių, todėl jos tampa netaisyklingos formos, o tai padidina jų sorbcines savybes. Dėl paviršiuje atsiradusių deguonies turinčių funkcinių grupių MP tampa chemiškai aktyvesni ir lengviau sąveikauja su mikroorganizmais [14, 17]. Tyrimai su *Daphnia magna* rodo, kad paviršiaus chemija daro įtaką MP pasisavinimui, išsilaikymui organizme ir įsiskverbimui į ląsteles [19]. Nors mokslinėje literatūroje vis dar nėra vieningos nuomonės dėl paviršiaus chemijos pokyčių toksiškumo, dauguma mokslininkų sutaria, kad tai sudaro palankesnes sąlygas biologinei degradacijai.

1.2.6. Mikroplastikų toksiškumas žmogui

Dėl mažo dalelių dydžio mikroplastikai gali patekti į žmogaus organizmą (5 pav.). Šiame paveiksle vaizduojama, kad priklausomai nuo dalelių dydžio plastikai gali patekti į žmogaus limfinę, kraujotakos sistemas bei įvairius organus. Vertinant poveikį ekosistemoms, nustatyta, kad mikroplastikai gali sukelti pokyčius įvairiuose biologinės organizacijos lygmenyse: subląsteliniam, ląsteliniam, individo, populiacijos ir ekosistemos. Poveikis apima oksidacinius pažeidimus, pakitusią genų raišką, ląstelių apoptozę, eritrocitų funkcijų pokyčius, riebalų rūgščių ir kitų medžiagų apykaitos sutrikimus bei energijos atsargų pasiskirstymo pokyčius. Ekosistemose taip pat gali būti stebimi elgsenos pokyčiai, bendrijų sudėties pokyčiais ir ekosistemų funkcionavimo pokyčiai [20].



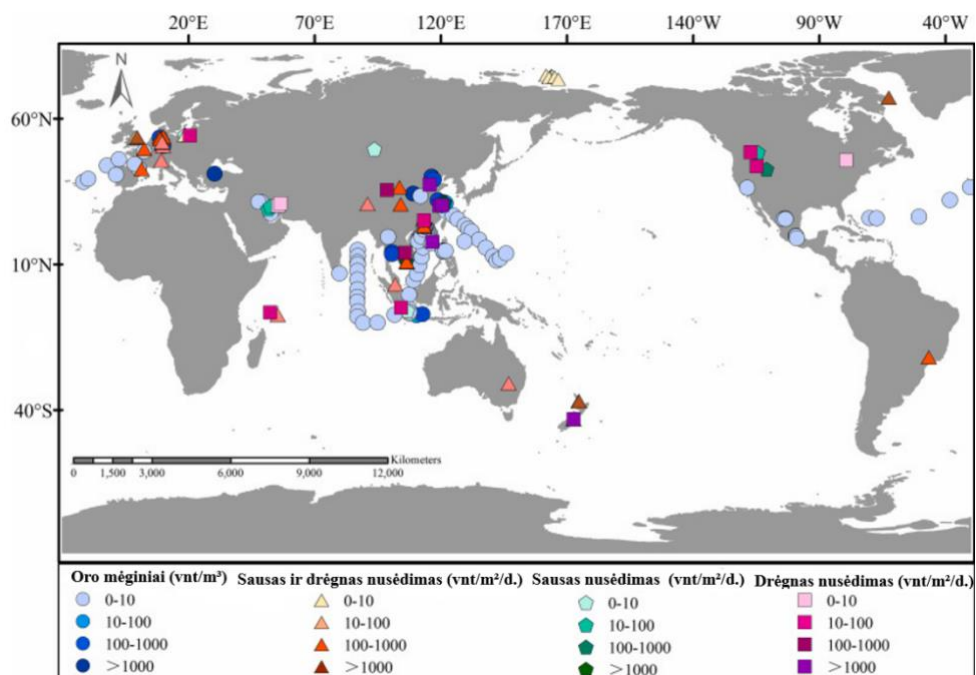
5 pav. Mikroplastiko absorbcija žmogaus organizme [20]

Didelį susirūpinimą kelia nanoplastikai dėl galimo neurotoksinio poveikio žmogaus organizmui. Tyrimai rodo, kad anijoniniai nanoplastikai gali skatinti baltymų, susijusių su Parkinsono liga, agregavimą smegenyse. Šie procesai siejami su nanoplastikų gebėjimu prasiskverbti per kraujo-smegenų barjerą, didinant citokinų gamybą ir oksidacinį stresą smegenų audiniuose [21].

Naudojant įvairius kosmetikos gaminius, tokius kaip šveitikliai, dantų pasta ar rankų dezinfekavimo priemonės, pirminės mikroplastiko dalelės gali patekti į žmogaus organizmą. Toksiškos cheminės medžiagos, tokios kaip polichlorinti bifenilai ar ftalatai, esantys mikroplastikuose ir kituose teršaluose, gali adsorbuotis mikroplastiko paviršiuje ir būti žalingos žmogaus organizmui dėl fizikinių mikroplastiko savybių. Mikroplastikų likučiai dantų pastoje gali būti netyčia praryjami ir kaupis virškinimo sistemoje. Be to, mikroplastikų pasisavinimas gali sukelti chromosomų pokyčius bei didinti nevaisingumo, vėžio ir nutukimo riziką [22].

1.3. Mikroplastikų pasiskirstymas ore

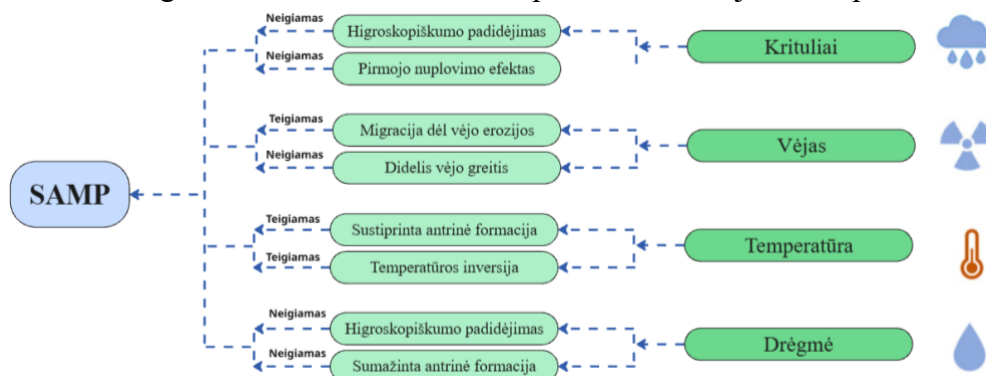
Mikroplastikai aptinkami tiek lauko, tiek vidaus aplinkoje. Tačiau standartizuotų metodikų trūkumas apsunkina duomenų apie MP pasiskirstymą ore palyginimą. Atliktuose tyrimuose nustatyta, kad šios dalelės yra plačiai paplitusios visame pasaulyje, įskaitant ir atokias vietas, tokias kaip Antarktida. Mikroplastikų pernaša ir nusėdimas gali reikšmingai prisidėti prie sausumos bei vandens telkinių taršos. 6 paveiksle pavaizduotas MP pasiskirstymas įvairiuose pasaulio regionuose, įskaitant tankiai apgyvendintas ir izoliuotas teritorijas. Žemėlapyje pateikiama ore suspenduotų dalelių koncentracija bei jų sausasis ir šlapiasis nusėdimas. Tyrimų rezultatai rodo, kad Pietų Azijoje, Europoje ir Šiaurės Amerikoje plastiko dalelių kiekis viršija 1000 vnt./m² per dieną, todėl šiuose regionuose nustatoma didelė atmosferos tarša. Ore sklindantys MP kelia grėsmę žmonių sveikatai, nes gali patekti į kvėpavimo takus [21,22].



6 pav. Mikroplastiko pasiskirstymas ore [23]

1.3.1. Transportavimo mechanizmai: vėjas, krituliai.

Nors šiame tyrime daugiausia dėmesio skiriama mikroplastikams vidaus aplinkoje, svarbu suprasti atmosferoje vykstančius procesus ir mikroplastikų pernašą, nes šie procesai daro įtaką dalelių patekimui į vidaus patalpas. Sausumoje esantys mikroplastikai dėl vėjo gali patekti į atmosferą ir būti pernešami dideliais atstumais. Mikroplastikų pasiskirstymą ore lemia ne tik taršos šaltinio vieta, bet ir meteorologiniai veiksniai, tokie kaip krituliai, vėjas, temperatūra ir drėgmė (7 pav.).



7 pav. Mikroplastikų pasiskirstymą lemiantys veiksniai (SAMP – atmosferoje suspenduoti mikroplastikai) [23]

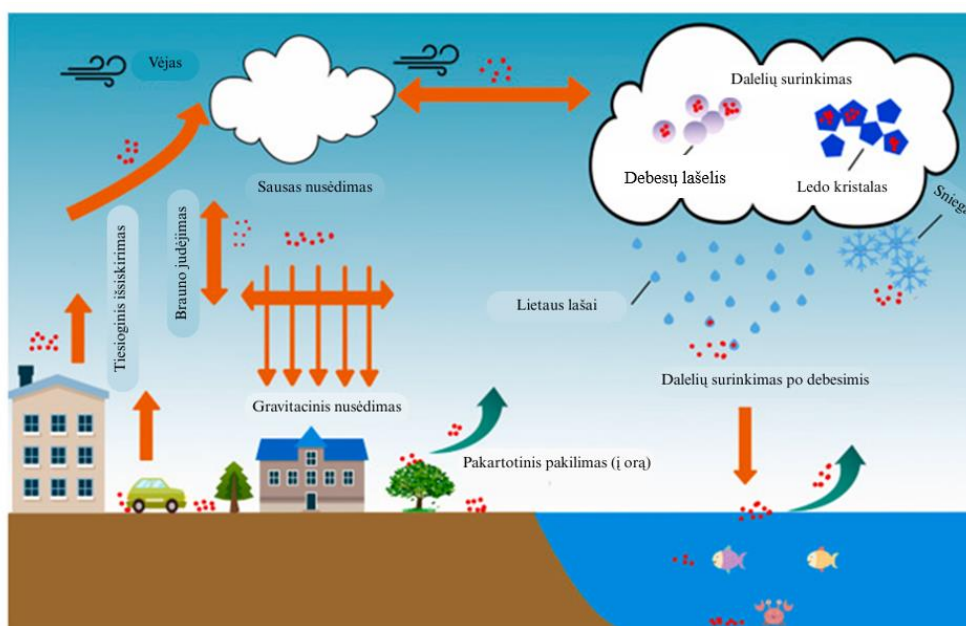
Atmosferoje suspenduotos dalelės pašalinamos šlapiuoju ir sausuoju nusodinimu. Sausasis nusodinimas vyksta tada, kai dalelės dėl sedimentacijos, turbulentinės difuzijos, gravitacijos, Brauno judėjimo, inertinių jėgų ir difuzioforezės nusėda ant žemės paviršiaus. Šis procesas vyksta apatinėje atmosferos dalyje, kur vyrauja oro turbulencija. Sausasis nusodinimas gali būti skirstomas į tris etapus: dalelių nusileidimą iš aukštesnių atmosferos sluoksnių link žemės, judėjimą ribiniame sluoksnyje ir sąveiką su paviršiumi. Dalelių nusėdimas ant paviršiaus priklauso nuo jų dydžio (3 lentelė). Sausasis

nusodinimas priklauso nuo MP fizikinių savybių, o nusėdimo pobūdį lemia meteorologinės bei paviršiaus sąlygos [23].

3 lentelė. Mikroplastikų pasiskirstymas [24]

Dalelių dydis	Mechanizmas	Nusėdimo vieta
>10 μm	Gravitacinis nusėdimas, inercinė jėga	Netoli šaltinio vietos
>1–10 μm	Inercinis nusėdimas, turbulencija, difuzija	Nuo šaltinio pasklinda vidutiniu atstumu
0,1–1 μm	Brauno judėjimas ir inercija	Mažiau nusėda, ilgiausiai išlieka ore
< 1 μm	Brauno difuzija	Patenka į tolimas zonas

Šlapiasis nusodinimas yra vienas pagrindinių būdų, kuriais MP pasiekia žemės paviršių. Pagrindiniai šį procesą lemiantys veiksniai yra debesų formavimasis ir krituliai. Mikroplastikai gali veikti kaip debesų kondensacijos arba ledo branduolių susidarymo centrai bei patekti į vandens lašus susidūrimo ir susiliejimo procesų metu. Šis procesas skirstomas į du pagrindinius etapus: dalelių pašalinimą debesyse bei po debesimis. Debesyse vykstančio pašalinimo metu dalelės įsiterpia į besiformuojančius vandens lašus. Tuo tarpu pašalinimas po debesimis vyksta tada, kai krentantys krituliai surenka ore esančius mikroplastikus, o dalelės prie lašų prilimpa dėl inercinių susidūrimo jėgų. Nors dalelės yra hidrofobinės, veikiant aplinkos veiksniams jos gali įgyti hidrofilinių savybių, todėl gali dalyvauti debesų formavimosi procese ir keisti debesų dinamiką. Abu išvardyti mechanizmai pašalina mikroplastikus iš atmosferos (8 pav.). Šie procesai lemia mikroplastikų pasiskirstymą ir pernašą tarp skirtingų ekosistemų [24].



8 pav. Sausasis ir šlapiasis nusodinimas [24]

1.4. Mikroplastikų migracija ir pernaša patalpose

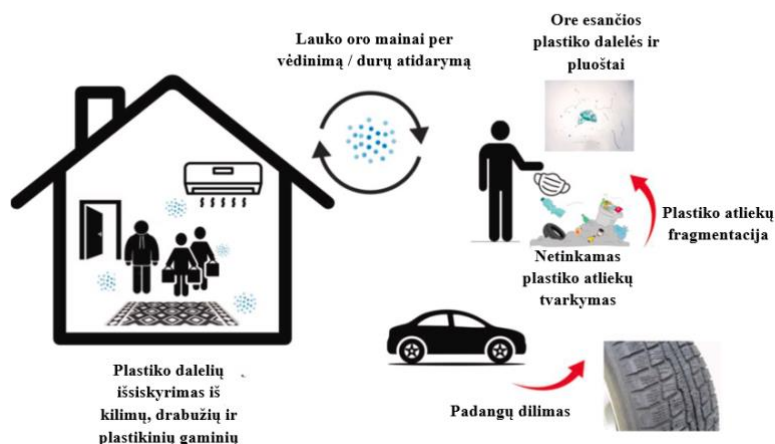
Atmosferoje vykstantys MP pernašos ir nusodinimo procesai, lemia jų patekimą į įvairius aplinkos komponentus, įskaitant dirvožemį, vandens telkinius bei įvairius paviršius. Vidaus aplinkoje MP pasiskirstymas ir pernaša yra sudėtingi ir dinamiški procesai, kuriuos lemia oro srautai, dalelių fizinės savybės bei žmogaus veikla. Skirtingai nei atmosferoje, kur dominuoja meteorologiniai veiksniai,

patalpų aplinkoje mikroplastikų migracija vyksta tarp kelių tarpusavyje susijusių terpių: oro, paviršių ir dulkių. Vienas svarbiausių mechanizmų yra resuspensija (pakartotinis dalelių pakėlimas į orą), kai nusėdusios dalelės dėl mechaninio poveikio, pavyzdžiui, vaikščiojimo, valymo ar oro judėjimo, pakeliamos į orą ir sudaro nuolatinę cirkuliaciją tarp paviršių bei oro. Šis procesas lemia, kad mikroplastikai patalpose retai pasiekia stabilią būseną, o jų koncentracija gali reikšmingai kisti laikui bėgant. Dalelių pernašą taip pat stipriai veikia oro cirkuliacija ir ventiliacijos režimas. Natūrali ar mechaninė ventiliacija gali tiek sumažinti, tiek padidinti MP koncentraciją patalpose, priklausomai nuo to, ar į patalpas patenka užterštas lauko oras [25]. Be to, žmogaus kvėpavimo zona laikoma ypač svarbia mikroplastikų kaupimosi ir poveikio vieta, nes oro srautai aplink kūną transportuoja daleles nuo grindų ir kitų paviršių į kvėpavimo takus. Eksperimentiniai tyrimai rodo, kad mikroplastikai gali būti nuolat įkvėpiami, o jų kiekis priklauso nuo patalpų sąlygų ir veiklos intensyvumo [26].

Svarbų vaidmenį mikroplastikų migracijoje atlieka ir jų fizinės savybės. Mažesnio dydžio dalelės (<10 μm) gali ilgiau išlikti ore dėl mažesnio nusėdimo greičio, o didesnės dalelės greičiau nusėda ant paviršių dėl gravitacijos ir inercinių jėgų. Pluoštiniai mikroplastikai pasižymi didesniu aerodinaminiu stabilumu, todėl gali būti pernešami didesniais atstumais ir ilgiau išlikti ore. Galima teigti, kad MP migracija vidaus aplinkoje yra ciklinis procesas, apimantis nusėdimą, resuspensiją bei pakartotinę pernašą oro srautais. Šis nuolatinis dalelių judėjimas lemia jų kaupimąsi patalpų dulkėse ir kartu didina ilgalaikės žmogaus ekspozicijos riziką, todėl vidaus aplinka laikoma viena svarbiausių mikroplastikų poveikio terpių [27].

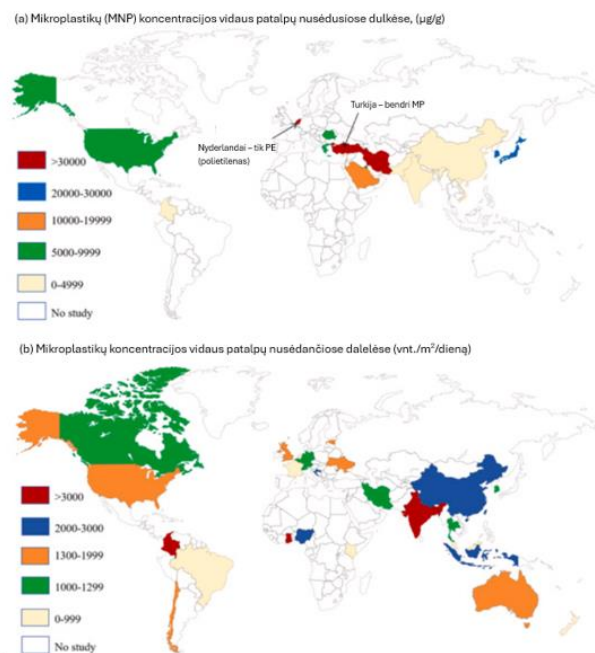
1.4.1. Mikroplastikai vidaus aplinkoje

Atsižvelgiant į mikroplastikų gebėjimą patekti į žmogaus organizmą bei galimą toksinį poveikį, svarbu įvertinti aplinkas, kuriose žmogaus ekspozicija yra didžiausia. Nors dalelės aptinkamos įvairiose ekosistemose, vis daugiau tyrimų rodo, kad reikšminga jų dalis kaupiasi vidaus aplinkoje. Pagrindiniai MP šaltiniai patalpų aplinkoje yra įvairūs sintetiniai ir pusiau sintetiniai gaminiai, naudojami kasdienėje buityje. Prie jų priskiriami sintetiniai tekstilės gaminiai, drabužiai, patalynė, kilimai bei kiti iš sintetinių pluoštų pagaminti produktai. Taip pat reikšmingais MP šaltiniais laikomi statybiniai ir apdailos elementai, tokie kaip sienų ir lubų dažai, polivinilchlorido (PVC) ir poliuretano (PUR) grindų dangos, tapetai, plastikiniai virtuvės reikmenys, higienos priemonės bei elektroninė įranga. Patalpų taršai įtakos turi ir išoriniai šaltiniai, pavyzdžiui, pramonės išmetami teršalai ar transporto sukelta tarša, nes dalelės gali patekti į patalpas per vėdinimo sistemas arba infiltruodamosi su lauko oru (9 pav.) [28].



9 pav. Vidaus patalpų ore esančių plastiko dalelių šaltiniai [28]

Tyrimai rodo, kad mikroplastikų koncentracija patalpų aplinkoje gali labai skirtis, priklausomai nuo žmogaus veiklos intensyvumo, naudojamų buitinių daiktų ir statybinių medžiagų sudėties. Mikroplastikų kiekiai taip pat pasižymi ryškiu geografiniu kintamumu, siejama su urbanizacijos lygiu, aplinkos tarša ir gyvenimo būdo ypatumais. Kaip pavaizduota 10 paveiksle mikroplastikų koncentracijos vidaus aplinkos dulkėse ir nusėdusiose dalelėse skirtinguose pasaulio regionuose labai skiriasi kai kuriuose regionuose nustatomos itin didelės koncentracijos, o kituose jos išlieka santykinai mažos. Tai patvirtina, kad mikroplastikų paplitimas vidaus aplinkoje yra nevienodas ir priklauso nuo daugelio aplinkos bei antropogeninių veiksnių. Patalpų aplinkoje mikroplastikai aptinkami dviejose pagrindinėse formose: kaip suspenduotos dalelės ore ir kaip nusėdusios dalelės ant paviršių. Suspenduotos dalelės yra ore esančios mikroplastikų dalelės, galinčios ilgą laiką išlikti ore, o nusėdusios dalelės kaupiasi ant grindų, baldų bei kitų paviršių ir prisideda prie patalpų dulkių susidarymo. Ore esantys mikroplastikai dažniausiai sudaryti iš fragmentuotų, apvalių arba pluoštinių plastiko dalelių, kurių dydis gali būti labai įvairus [29].

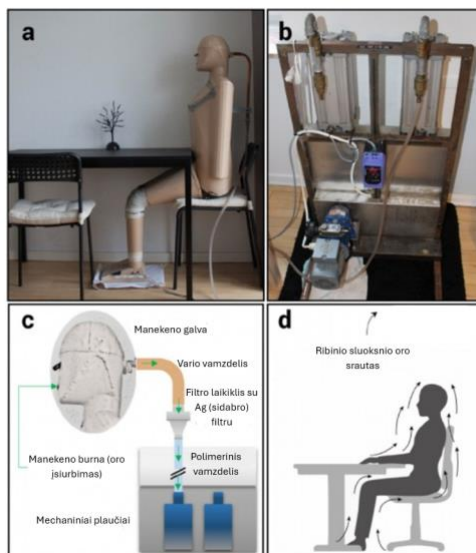


10 pav. Mikroplastikų koncentracija vidaus patalpų dulksėse ir nusėdančiose dalelėse skirtingose pasaulio šalyse [29]

1.4.2. Mikroplastikai namų dulksėse

Namų dulksės laikomos viena iš pagrindinių MP kaupimosi terpių vidaus aplinkoje, nes jose kaupiasi tiek iš oro nusėdusios, tiek iš įvairių buitinių šaltinių išsiskyrusios dalelės. Skirtingai nei ore esančios dalelės, mikroplastikai dulksėse gali kauptis ilgesnį laiką ir būti pakartotinai resuspenduojami dėl žmogaus veiklos, todėl susidaro nuolatinės ekspozicijos sąlygos. Vienas iš tyrimų, kuriame buvo simuliuojama žmogaus ekspozicija naudojant kvėpavimą imituojantį manekėną (11 pav.), parodė, kad mikroplastikų koncentracija gyvenamosiose patalpose svyruoja nuo 1,7 iki 16,2 dalelių/m³. Nustatyta, kad žmogus vidutiniškai per 24 valandas gali įkvėpti iki 272 mikroplastikų dalelių, priklausomai nuo aplinkos sąlygų ir veiklos intensyvumo. Svarbu pastebėti, kad šiame tyrime identifikuotos dalelės siekia net 11 µm dydžio, o tai reiškia, kad jos gali būti įkvėpiamos ir potencialiai pasiekti gilesnes kvėpavimo takų dalis. Be to, nustatyta, kad dalis mikroplastikų yra pakankamai mažo dydžio, todėl jų nusėdimo ir kaupimosi dinamika gali skirtis, didindama biologinio poveikio riziką. Svarbu paminėti, kad namų dulksėse mikroplastikai veikia ne tik kaip fizinės dalelės, bet ir kaip kompleksinės taršos komponentai, pasižymintys cheminiu aktyvumu [26].

Dėl šių savybių namų dulksės tampa ne tik mikroplastikų kaupimosi vieta, bet ir svarbia teršalų pernašos terpe. Mikroplastikai gali būti pakartotinai pakeliami į orą, įkvėpiami arba patekti į organizmą atsitiktinai prarijus užterštas dulkes. MP į žmogaus organizmą gali patekti trimis pagrindiniais keliais: įkvėpus, prarijus arba per kontaktą su oda. Ši terpė išsiskiria tuo, kad mikroplastikai joje gali kauptis, būti pakartotinai resuspenduojami ir nuolat cirkuliuoti vidaus aplinkoje, sudarydami ilgalaikio poveikio prielaidas. Todėl dulksės laikomos reikšminga, tačiau vis dar nepakankamai ištirta mikroplastikų ekspozicijos terpe [30].



11 pav. Mėginių ėmimo įrenginio schema: (a) manekenas sėdimoje padėtyje, paruoštas mėginių ėmimui; (b) du reguliuojami stūmokliai, prijungti prie variklio, skirti įkvėpimo ir iškvėpimo imitavimui; (c) mėginių ėmimo schemas brėžinys; (d) žmogaus ribinio slauksnio srauto iliustracija [26]

1.5. Mėginių paruošimo metodai

MP analizėje vienas svarbiausių etapų yra mėginių paruošimas, nes nuo jo tiesiogiai priklauso analizės tikslumas, patikimumas ir rezultatų palyginamumas. Dėl didelės dalelių įvairovės (skirtingų dydžių, formų ir polimerų tipų) bei skirtingų aplinkos matricų (vandens, oro, dirvožemio) universali mėginių paruošimo metodika nėra taikoma. Mėginių paruošimo procedūros turi būti pritaikytos atsižvelgiant į mėginio pobūdį, sudėtį ir pasirinktą analizės metodą.

Remiantis ISO 24187:2023, mėginių paruošimas apima kelis pagrindinius etapus: fizinį frakcionavimą (pvz., sijojimą ar filtravimą), organinių ir neorganinių priemaišų šalinimą bei mėginio džiovinimą. Tačiau svarbu pažymėti, kad šis standartas skirtas tik geriamajam vandeniui, todėl jis negali būti tiesiogiai taikomas kitoms matricoms, tokioms kaip oras ar dirvožemis. Dėl šios priežasties MP mėginių paruošimo metodologinis pagrindas dažnai grindžiamas kelių šaltinių deriniu: esamais standartais ir moksliniais straipsniais. [31, 32].

1.5.1. Mėginių rinkimas

Remiantis apžvalginiais straipsniais, MP surinkimas iš vidaus dulkių dažniausiai atliekamas taikant aktyviusius bei pasyviuosius mėginių ėmimo metodus. Patalpų aplinkos mėginiai gali būti skirstomi į dvi pagrindines grupes: suspenduotų dalelių mėginius, apimančius ore cirkuliuojančias daleles uždaroje erdvėje, ir nusėdusių dulkių mėginius, t. y. daleles, nusėdusias ant įvairių paviršių.

Aktyvus patalpų oro mėginių ėmimas atliekamas naudojant išorinę įrangą, skirtą oro srautui reguliuoti ir nukreipti per surinkimo terpę. Oro srautas siurbiamas per filtrus ar kitus surinkimo įrenginius, todėl suspenduotos dalelės sulaikomos ir gali būti toliau analizuojamos. Kai kuriuose tyrimuose mėginiai papildomai skirstomi pagal skirtingas dalelių dydžio frakcijas. Taip pat taikomi cikloniniai mėginių surinkėjai, leidžiantys atskirti daleles pagal jų aerodinaminį skersmenį. Be to, šis metodas leidžia efektyviai klasifikuoti daleles pagal dydį dar prieš analizę [30].

Pasyvus patalpų oro mėginių ėmimas grindžiamas natūraliu dalelių nusėdimu be aktyvaus oro srauto generavimo. Šiuo atveju surenkamos nusėdusios dulkės, naudojant įvairius surinkimo indus, tokius kaip Petri lėkštelės, stikliniai indai ar metaliniai konteineriai, kurie paprastai išdėstomi 1,2–1,8 m aukštyje, atitinkančiame žmogaus kvėpavimo zoną. Pasyvūs mėginių surinkėjai dažnai naudojami siekiant įvertinti ilgalaikį mikroplastikų nusėdimą patalpų aplinkoje. Be to, vidaus dulkių surinkimui plačiai naudojami dulkių siurbliai, paviršių valymo metodai bei oro kondicionavimo sistemų filtrai. Šie metodai laikomi praktiškais dėl paprastumo, prieinamumo ir gebėjimo surinkti pakankamą mėginio kiekį tolimesnei analizei [33].

Siekiant išvengti papildomo mėginių užteršimo, mikroplastikų tyrimuose ypatingas dėmesys skiriamas mėginių laikymo ir apdorojimo sąlygoms. Surinkti mėginiai turi būti laikomi induose, pagamintuose iš neplastikinių medžiagų, pavyzdžiui, stiklo ar metalo, siekiant išvengti antrinės taršos plastiko dalelėmis. Plastikiniai indai ir įrankiai gali būti mikroplastikų šaltinis, todėl jų nerekomenduojama naudoti mėginių paruošimo ir analizės proceso metu [31].

1.5.2. Organinių priemaišų pašalinimas

Organinių priemaišų šalinimas yra esminis mikroplastikų mėginių paruošimo etapas, nes aplinkos mėginiuose esanti natūrali organinė medžiaga gali trukdyti dalelių identifikavimui bei lemti klaidingus rezultatus. Todėl šio etapo tikslas yra kuo efektyviau pašalinti biologinę medžiagą, nepažeidžiant pačių mikroplastikų struktūros ir cheminės sudėties. Svarbu pažymėti, jog mikroplastikai nėra suardomi dėl jų cheminės struktūros stabilumo. Be to, MP hidrofobiškumas ir mažas reaktyvumas lemia, kad jie mažiau sąveikauja su oksidatoriais ar šarmais, palyginti su organine medžiaga, kuri yra lengviau oksiduojama ar hidrolizuojama. Remiantis moksliniais tyrimais, organinių priemaišų šalinimui taikomi keturi pagrindiniai metodai: rūgštinis, šarminis, oksidacinis ir fermentinis skaidymas, kurių pasirinkimas priklauso nuo mėginio sudėties ir analizės tikslų [34].

Taikant rūgštinį skaidymą, kai kurie plastikai, pavyzdžiui, nailonas ir polietenas tereftalatas, pasižymi mažu atsparumu rūgštims ir gali būti suskaidomi, ypač esant didelėms rūgščių koncentracijoms ir aukštai temperatūrai. Todėl svarbu parinkti optimalią rūgšties koncentraciją ir temperatūrą, leidžiančią efektyviai pašalinti organinę medžiagą per trumpą laiką, bei kuo mažiau paveiktų MP. Viena iš pagrindinių naudojamų rūgščių yra azoto rūgštis (HNO_3 , 55 %). Mėginiai paprastai kaitinami ne aukštesnėje kaip 60 °C temperatūroje, nes aukštesnė temperatūra gali pažeisti mikroplastikus arba sukelti jų suirimą. Kita naudojama rūgštis yra druskos rūgštis (HCl), tačiau ji laikoma mažiau efektyvia šalinant didelius organinės medžiagos kiekius, nors kai kurie tyrimai parodė, kad naudojant 37 % HCl kambario temperatūroje galima pasiekti daugiau kaip 95 % skaidymo efektyvumą, tačiau kartu buvo stebimas PET lydymasis. Moksliniuose tyrimuose pabrėžiama, kad polimerų atsparumas rūgštiniam skaidymui priklauso nuo kelių veiksnių, tokių kaip rūgšties koncentracija, temperatūra ir organinių medžiagų buvimas mėginyje, kurios gali iš dalies apsaugoti plastiką nuo degradacijos. Kadangi efektyviam skaidymui dažnai reikalingas kaitinimas, tikėtina, kad azoto rūgštis gali paveikti mikroplastikų struktūrinį vientisumą. Todėl rūgštinis skaidymas turi būti taikomas atsargiai bei optimizuotomis sąlygomis, nes jis gali lemti dalinę mikroplastikų degradaciją ir iškreipti jų kiekio įvertinimą mėginiuose [35].

Šarminis metodas yra alternatyva rūgštiniam skaidymui ir pasižymi dideliu efektyvumu ruošiant MP mėginius. Tačiau šis metodas taip pat turi neigiamą poveikį plastikų dalelėms ir gali sukelti jų pažeidimus ar spalvos pokyčius. Kalio hidroksidas (KOH) pasižymi geru organinės medžiagos

skaidymo efektyvumu ir leidžia išlaikyti aukštą mikroplastikų atgavimo lygį. Tyrimai rodo, kad naudojant 10 % KOH tirpalą 60 °C temperatūroje 24 valandas pasiekiamas vienas efektyviausių skaidymo rezultatų. Vertinant šarminio skaidymo efektyvumą, nustatyta, kad kai kurios struktūros, tokios kaip žuvų otolitai, kalmarų snapai, parafinas ir palmių riebalai, išliko nesuskaidyti net po dviejų dienų apdorojimo 1 M KOH tirpalu kambario temperatūroje. Tai rodo, kad kietos struktūros ir riebalai nėra visiškai pašalinami šarminio skaidymo metu. Literatūroje nurodoma, kad rūgštinis ir šarminis skaidymas gali būti taikomi nuosekliai (pvz., NaOH ir HNO₃ derinys), siekiant padidinti biologinės medžiagos pašalinimo efektyvumą bei išlaikyti aukštus mikroplastikų atgavimo rodiklius [36].

Taikant oksidacinį metodą, naudojamas vandenilio peroksidas (H₂O₂). Jis leidžia efektyviai skaidyti organinę medžiagą nesuyrant MP struktūrai. Tyrimai rodo, kad dauguma polimerų (pvz., PVC, PET, PP, PE) yra atsparūs H₂O₂ poveikiui. Tačiau tam tikromis sąlygomis, ypač esant aukštesnei temperatūrai ir ilgesniam veikimo laikui, gali būti stebimas jautresnių polimerų, tokių kaip nailonas, skaidymas. H₂O₂ efektyvumas labai priklauso nuo temperatūros. Aukštesnė temperatūra leidžia žymiai efektyviau pašalinti organines priemaišas per trumpesnę laiką. Dėl šių savybių H₂O₂ laikomas vienu tinkamiausių metodų, užtikrinančių efektyvų organinių medžiagų pašalinimą ir mikroplastikų vientisumo išsaugojimą.

Fermentinio skaidymo metodas laikomas alternatyviu organinių priemaišų šalinimo būdu, pasižyminčiu mažesniu pavojingumu ir mažesne rizika pažeisti mikroplastikus. Šio metodo efektyvumas priklauso nuo mėginyje esančios organinės medžiagos tipo, todėl dažnai pasirenkami skirtingi fermentai ar jų deriniai. Dažniausiai naudojami fermentai, tokie kaip proteinazė K, tripsinas, kolagenazė ar papainas, leidžia pasiekti aukštą skaidymo efektyvumą (70–97 %), nepažeidžiant polimerų. Kai kuriais atvejais fermentinis skaidymas derinamas su vandenilio peroksidu, siekiant pašalinti likusias nesuskaidytas priemaišas. Taip pat gali būti taikomi kompleksiniai deriniai, apimantys kelių fermentų (pvz., proteazės, celiulazės, chitinazės) ir papildomų reagentų naudojimą, užtikrinant labai aukštą skaidymo efektyvumą, tačiau tokie metodai yra ilgesni ir sudėtingesni. Pagrindinis fermentinio skaidymo trūkumas yra didelė kaina, todėl šis metodas dažniau taikomas mažesnio masto tyrimuose arba derinamas su kitais metodais [37].

1.5.3. Neorganinių medžiagų pašalinimas

Neorganinių priemaišų šalinimas mikroplastikų analizėje dažniausiai atliekamas taikant tankio atskyrimo metodą, kuris leidžia atskirti MP nuo mineralinių dalelių pagal jų tankio skirtumus. Šis metodas pagrįstas tuo, kad plastiko dalelių tankis paprastai yra mažesnis nei neorganinių medžiagų, tokių kaip smėlis ar mineralai, todėl jos plūduriuoja tirpale, o sunkesnės dalelės nusėda. Dažniausiai naudojami didelio tankio tirpalai, tokie kaip natrio chloridas (NaCl), cinko chloridas (ZnCl₂) ar natrio jodidas (NaI). Nors NaCl tirpalas yra pigus ir lengvai prieinamas, jo tankis (apie 1,2 g/cm³) leidžia atskirti tik mažesnio tankio polimerus (pvz., PE, PP), todėl efektyvesniam didesnio tankio plastikų atskyrimui naudojami ZnCl₂ ar NaI tirpalai. Tačiau šie reagentai yra brangesni ir toksiški, todėl jų naudojimas reikalauja papildomų saugumo priemonių. Tankio atskyrimas dažnai pakartojamas siekiant padidinti metodo efektyvumą. Šis metodas plačiai taikomas, nes leidžia efektyviai pašalinti neorganines priemaišas ir paruošti mėginį tolesnei analizei, tačiau metodo efektyvumas priklauso nuo pasirinkto tirpalo tankio ir mėginio sudėties [38].

1.6. Mėginių analizė

MP mėginių analizė paprastai susideda iš dviejų pagrindinių etapų: kiekybinės ir kokybinės analizės. Kiekybinės analizės metu nustatomas mikroplastikų kiekis mėginyje t.y. dalelių skaičius, tuo tarpu kokybinė analizė skirta identifikuoti polimerų sudėtį. Abiem analizės etapams itin svarbus yra tinkamas filtrų pasirinkimas, nes būtent ant filtro paviršiaus yra surenkamos filtravimo metu surinktos MP dalelės. Netinkamai parinktas filtras gali lemti dalelių praradimą, analizės netikslumus ar trukdyti tolimesniam identifikavimui. Todėl filtrų savybės, tokios kaip porų dydis, medžiaga ir cheminis atsparumas, turi būti kruopščiai įvertintos [38].

1.6.1. Filtro pasirinkimas

Filtro pasirinkimas yra vienas svarbiausių mėginio paruošimo etapų. Atsižvelgiant į tyrimo tikslą, būtina įvertinti galimą dalelių dydį, pasirinktą analizės metodą bei aplinkos taršos lygį. Mėginių paruošimo ir filtravimo metu gali būti naudojami įvairūs filtrai:

- Stiklo mikrofibras filtras – plačiai naudojamas filtras dėl aukšto sulaikymo efektyvumo bei suderinamumo su spektroskopiniais analizės metodais.
- Sidabro membraniniai filtrai – tinkami mažų dalelių surinkimui. Filtro struktūra yra grublėta, o tai gali apriboti tolimesnį tyrimą optinėje analizėje, ypač FT–IR spektroskopijoje.
- Nitroceliuliozės filtrai – naudojami dėl gero cheminio suderinamumo ir analizės lankstumo, puikiai tinka fluorescencinei analizei.
- Aliuminio oksido (Al_2O_3) filtrai – pasižymi cheminiu ir mechaniniu stabilumu bei mažu foniniu signalu.
- Politetrafluoretileno ir polikarbonato filtrai – naudojami, kai reikalingas mechaninis tvirtumas ir cheminis atsparumas. Šie filtrai naudojami ilgalaikiam oro mėginių filtravimui ir darbiui agresyviomis sąlygomis. Jie taip pat tinkami skirtingiems filtravimo etapams bei gali būti pritaikomi įvairioms analizės technikoms.

Prieš atliekant mėginio analizę labai svarbu pasirinkti tinkamą filtrą, nes filtro savybės glaudžiai susijusios su pasirinkta analizės technika. Filtrų optinės savybės ir foninis signalas turi įtakos mikroplastikų identifikacijai. Tinkamas filtro pasirinkimas yra būtinas siekiant užtikrinti tikslų mikroplastikų kiekybinį įvertinimą [31, 35, 39].

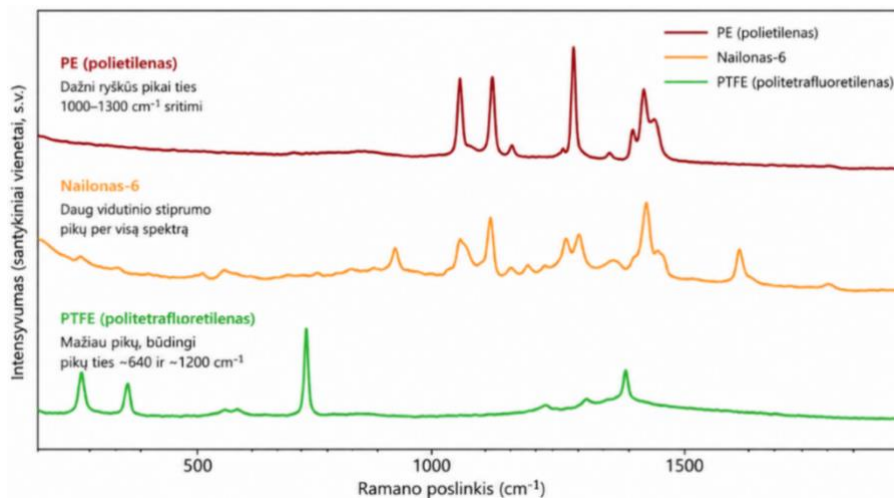
1.6.2. Kokybinė analizė

Ši analizė dažniausiai grindžiama spektroskopiniais metodais, kurių veikimo principas paremtas medžiagų sąveika su elektromagnetine spinduliuote. Remiantis literatūros analize, mikroplastikams identifikuoti dažniausiai taikomi Furjė transformacinės infraraudonosios spektroskopijos (FT–IR) ir Ramano spektroskopijos metodai, leidžiantys nustatyti polimerams būdingus vibracinius signalus ir taip nustatyti jų cheminę struktūrą. Šie metodai pasižymi dideliu tikslumu ir yra plačiai naudojami mikroplastikų tyrimuose [39].

1.6.2.1. Ramano spektroskopija

Šis metodas pagrįstas medžiagos sąveika su lazerio spinduliuote, kuri sąveikauja su molekulių vibraciniais virpesiais ir sukelia šviesos sklaidą skirtingais bangos ilgiais. Skirtingi bangos ilgiai būdingi specifinėms funkcinėms grupėms. Ramano spektras susidaro dėl šviesos sąveikos su molekulių virpesiais, pakitus fotonų energijai. Gautas spektras atspindi medžiagos molekulinę

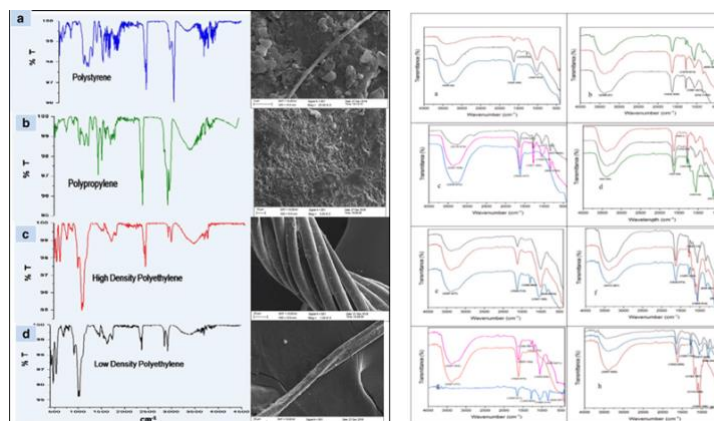
struktūrą. Šis metodas plačiai naudojamas MP identifikuoti, nes kiekvienas polimeras turi unikalų Ramano spektrą. Mažesnėms nei 100 μm dalelėms naudojamas μ -Ramano metodas: Ramano spektroskopijos ir optinio mikroskopo derinys. Šis metodas naudingas atliekant pavienių dalelių analizę mėginyje, nes leidžia atlikti aukštos skiriamosios gebos analizę. Šiuo metodu gaunami spektrai pateikti 12 paveiksle [40].



12 pav. Rameno spektrometro gaunami spektrai [40]

1.6.2.2. Furjė infraraudonųjų spindulių transformacija (FT–IR)

Šis metodas yra vienas iš plačiausiai taikomų mikroplastikų polimerinės sudėties identifikuoti. FT–IR spektroskopija leidžia gauti kiekvieno mėginio infraraudonosios spinduliuotės sugerties spektrą. Kadangi skirtingi mėginiai pasižymi skirtinga chemine sudėtimi, jų spektrai taip pat skiriasi, nes kiekviena dalelė sugeria skirtingus infraraudonosios spinduliuotės dažnius. Metodo esmė yra gautų spektrų palyginimas su mokslinėje literatūroje pateiktais žinomų medžiagų spektrais. Tokiu būdu galima nustatyti mikroplastikus sudarančio polimero tipą bei analizuoti cheminius ryšius, kaip parodyta 13 paveiksle. Spektro smailės atitinka tam tikras molekulinės vibracijas. Naudojant interferometrą, FT–IR sistema vienu metu registruoja visus infraraudonosios spinduliuotės dažnius, o gautos interferogramos vėliau transformuojamos į spektrą taikant Furjė transformaciją. FT–IR spektroskopijoje taikomi keli pagrindiniai matavimo režimai: atspindžio, difuzinio atspindžio, susilpninto bendro atspindžio ir perdavimo [41].



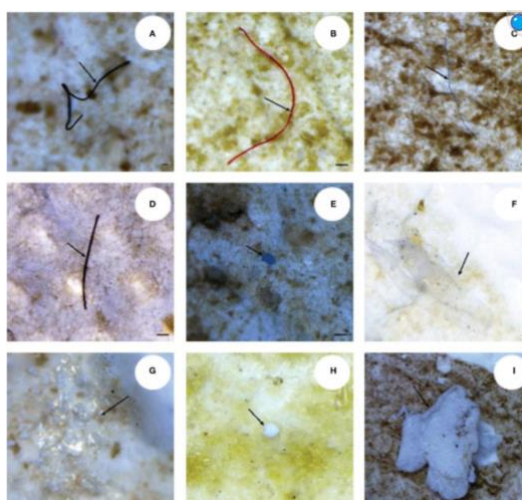
13 pav. FT–IR spektru gaunami rezultatai [41]

1.6.3. Kiekybinė analizė

Kiekybinė mikroplastikų analizė skirta nustatyti dalelių kiekį mėginyje, kuris dažniausiai išreiškiamas dalelių skaičiumi arba jų pasiskirstymu pagal dydį. Šiam tikslui dažniausiai naudojama stereomikroskopija, skenuojanti elektroninė mikroskopija (SEM) bei fluorescencinė analizė [39].

1.6.3.1. Stereomikroskopija

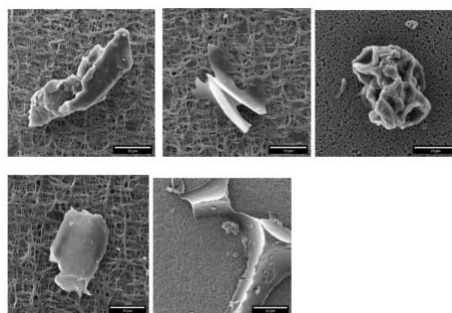
Vienas paprasčiausių MP identifikavimo metodų yra vizualinė analizė, atliekama naudojant stereomikroskopą. Dalelės apibūdinamos pagal dydį, formą ir spalvą. Tačiau šiuo metodu sunku identifikuoti baltas ir skaidrias daleles. Stereomikroskopu gauti analizės rezultatai pateikti 14 paveiksle [42].



14 pav. Optiniu mikroskopu atliktos analizės rezultatai [42]

1.6.3.2. Skenuojanti elektronų mikroskopija (SEM)

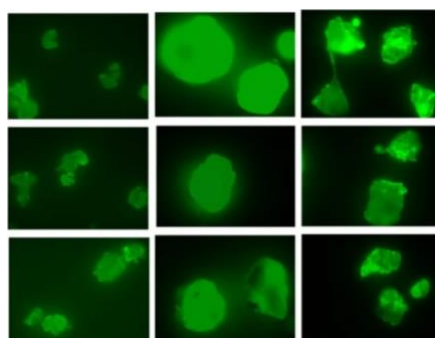
Šis metodas naudojamas mikroplastikų paviršiaus morfologijai analizuoti (15 pav.). SEM veikimo principas pagrįstas aukštos energijos elektronų pluošto sąveika su mėginio paviršiumi, todėl galima gauti didelės raiškos vaizdus, kurių skiriamoji geba gali siekti iki 2 nm esant 20 kV įtampai. SEM leidžia stebėti MP įtrūkimus, griovelius ir kitus paviršiaus pažeidimus. Norint aptikti ant mikroplastiko paviršiaus adsorbuotus cheminius elementus, SEM dažnai derinama su energijos dispersine rentgeno spektroskopija [43].



15 pav. SEM gaunami rezultatai [43]

1.6.3.3. Fluorescencinė mikroskopija

Skirtingai nei optinė mikroskopija, kuri remiasi šviesos atspindžio ir kontrasto skirtumais, fluorescencinė mikroskopija pagrįsta fluorescencijos reiškiniu. Tiriamoji medžiaga sužadinama tam tikro bangos ilgio šviesa, o iš jos sklindanti fluorescencinė emisija naudojama vaizdui formuoti. Vienas dažniausiai taikomų šiuolaikinių metodų yra konfokalinė lazerinė skenuojamoji mikroskopija. Šio metodo metu galima gauti optinius pjūvius ir trimates mėginio rekonstrukcijas. Metodas ypač naudingas tiriant skaidrius ir baltus plastikus, kurie sunkiai pastebimi naudojant optinę mikroskopiją. Tai leidžia padidinti analizės tikslumą ir sumažinti nepastebėtų dalelių skaičių. Tiriant mikroplastikus dažnai naudojami fluorescenciniai dažai, pavyzdžiui, Nile Red, kurie selektyviai jungiasi prie plastiko paviršiaus ir fluorescuoja, kai yra sužadinami UV, mėlyna arba žalia šviesa. Fluorescencinės mikroskopijos metu gautų mikroplastikų vaizdų pavyzdžiai pateikti 16 paveiksle [44].



16 pav. Fluorescencinė analizės rezultatai [36]

1.7. Mikroplastikų valdymas: standartai, direktyvos ir SDG

Didėjantis MP kiekis paskatino įvairių teisės aktų ir direktyvų kūrimą, siekiant reguliuoti jų keliamą riziką. MP aptinkami ore, vandenyje, maiste ir net žmonių bei gyvūnų organizmuose. Europos Sąjunga ėmėsi veiksmų kurdama teisinį pagrindą, skirtą mikroplastikų poveikiui mažinti ir jų sklaidai aplinkoje kontroliuoti. Šie veiksmai taip pat glaudžiai susiję su Jungtinių Tautų Darnaus vystymosi tikslais. Šis baigiamasis projektas prisideda prie darnaus vystymosi tikslų įgyvendinimo, nagrinėdamas mikroplastikų paplitimą aplinkoje, jų analizės metodus ir galimą poveikį aplinkai bei žmogaus sveikatai.

1.7.1. Vienkartinio plastiko direktyva (2019/904/ES)

Šia direktyva siekiama spręsti plačiai paplitusią plastiko taršos problemą. Direktyva draudžia įvairius vienkartinis gaminius, kurie, kaip nustatyta, yra ypač kenksmingi aplinkai, įskaitant stalo įrankius, lėkštes ir šiaudelius, dažnai aptinkamus ES pakrantėse. Pagal šią direktyvą ES šalys įsipareigoja mažinti plastiko naudojimą, taip prisidedamos prie bendro plastiko taršos mažinimo ir užkirsdams kelią mikroplastikų susidarymui aplinkoje. Ši direktyva atspindi aktyvų ES požiūrį į kovą su plastiko tarša. Tačiau siekiant įgyvendinti šiuos tikslus būtinas suinteresuotų šalių bendradarbiavimas, pramonės prisitaikymas ir aktyvus visuomenės informavimas, skatinantis tvaresnius vartojimo įpročius [45].

1.7.2. REACH reglamentas

Mikroplastiko kontrolė Europos Sąjungoje vykdoma pagal REACH reglamentą (cheminių medžiagų registracijos, vertinimo, autorizacijos ir apribojimų sistema). Viena svarbiausių šios reguliavimo

sistemos dalių yra nuolatinis cheminių medžiagų vertinimas ir jų keliamos rizikos kontrolė. Europos Komisija siekia riboti sąmoningai į gaminius pridėdamą mikroplastiką visose ES valstybėse narėse. Ši iniciatyva dera su platesnėmis aplinkosaugos strategijomis, kuriomis siekiama mažinti plastiko taršą ir kurios apima išsamią mikroplastikų keliamos rizikos sveikatai bei aplinkai analizę, taip pat socialinių ir ekonominių aspektų vertinimą. MP tyrimų duomenis analizuoja Europos cheminių medžiagų agentūra (ECHA), kuri rengia dokumentus dėl mikroplastikų rizikos ir jų apibrėžimo pagal REACH, siekiant užtikrinti atitiktį griežtiems registracijos reikalavimams [46].

1.7.3. Darnaus vystymosi tikslai

Darnus vystymasis yra viena svarbiausių šiuolaikinės aplinkos inžinerijos kryptų, nes sprendžiant aplinkosaugines problemas nebeužtenka vertinti tik vieną atskirą taršos šaltinį ar vieną aplinkos komponentą. Būtent todėl moksliniuose darbuose vis dažniau akcentuojamas ryšys su Jungtinių Tautų Darnaus vystymosi tikslais. Apie juos svarbu kalbėti todėl, kad jie leidžia parodyti ne tik siaurą konkretaus tyrimo mokslinę vertę, bet ir platesnę jo reikšmę visuomenei, aplinkos apsaugai bei tvariam vystymuisi. Mikroplastikų tarša šiame kontekste yra ypač svarbi, nes tai viena iš problemų, jungiančių kelis darnaus vystymosi aspektus vienu metu. SDG aptarimas šiame darbe leidžia parodyti, kad MP analizė nėra vien metodinis ar techninis klausimas, o tema, tiesiogiai susijusi su aplinkos kokybe, visuomenės sveikata ir tvaresnės gyvenamosios aplinkos kūrimu.

Šis baigiamasis projektas labiausiai siejasi su SDG 3 „Gera sveikata ir gerovė“, nes viena svarbiausių mikroplastikų tyrimų priežasčių yra galimas poveikis žmogaus sveikatai. Tai ypač aktualu kalbant apie vidaus orą, kadangi žmonės didžiąją laiko dalį praleidžia įvairiose patalpose. Taip pat šis darbas glaudžiai susijęs su SDG 12 „Atsakingas vartojimas ir gamyba“, nes mikroplastikų susidarymas tiesiogiai atspindi netvarų plastiko naudojimą, jo skaidymąsi aplinkoje ir nepakankamai efektyvų atliekų valdymą.

Ne mažiau svarbus yra ryšys su SDG 11 „Darnūs miestai ir bendruomenės“, nes vidaus oro kokybė yra reikšminga tvarios ir sveikos gyvenamosios aplinkos dalis. Miestų aplinkoje žmonių sąlytis su įvairiais teršalais dažnai vyksta ne tik lauke, bet ir patalpų viduje, kur kaupiasi išorės tarša bei vidaus šaltinių išskiriamos dalelės. Tekstilė, baldai, sintetinės medžiagos, buitinė veikla ir ventiliacijos sąlygos lemia reikšmingą mikroplastikų koncentraciją patalpose. Dėl to vidaus oro tyrimai tampa svarbia bendros aplinkos kokybės vertinimo dalimi [47].

Šiame darbe atlikta literatūros analizė padeda geriau suprasti mikroplastikų paplitimą ir jų tyrimo metodus, todėl prisideda prie aplinkosaugos problemų vertinimo darnaus vystymosi kontekste.

1.8. Literatūros apibendrinimas

Šiame skyriuje apžvelgta mikroplastikų taršos problema, jų kilmė, susidarymo mechanizmai bei pasiskirstymas aplinkoje. Išsamiai aptarti mikroplastikų šaltiniai, fizikiniai ir cheminiai procesai, lemiantys dalelių formavimąsi, skaidymąsi ir pernašą aplinkoje. Taip pat aptarta mikroplastikų sąveika su kitais teršalais, gebėjimas adsorbuoti pavojingas medžiagas ir prisidėti prie jų pernašos aplinkoje. Apžvelgti mikroplastikų tyrimų metodai, aptarti jų privalumai ir trūkumai bei išryškinta metodų standartizavimo problema.

2. Metodinė dalis

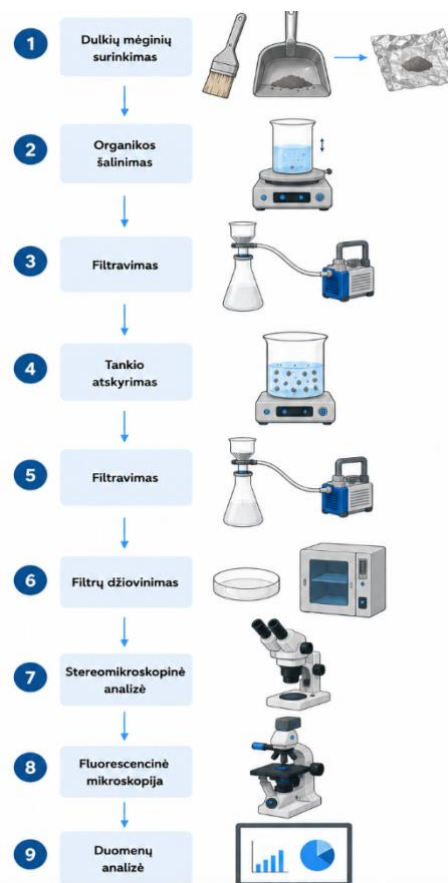
Šioje dalyje aprašytos tyrime naudotos žaliavos, mikroplastikų mėginių surinkimo ir analizės eiga bei taikyti mikroplastiko identifikavimo ir kiekybinio vertinimo metodai.

2.1. Naudotos žaliavos

- Vandenilio peroksidas (CAS Nr. 7722–84–1, „Sigma–Aldrich“, koncentracija 30 %, Vokietija).
- Cinko chloridas (CAS Nr. 7646–85–7, „Sigma–Aldrich“, grynumas ≥ 98 %, Vokietija).
- *Nile Red* dažiklis (CAS Nr. 7385–67–3, „Sigma–Aldrich“, Vokietija).
- Etanolis (CAS Nr. 64–17–5, „Eurochemicals“, grynumas 96 %, Lietuva).
- Polikarbonatiniai „Cyclopore Track Etched Membrane“ filtrai, 3 μm porų dydžio (REF Nr. 7060–2511, „Whatman“, Jungtinė Karalystė).
- Distiliuotas vanduo, paruoštas pagal standartinę laboratorijos metodiką.
- Dulkių mėginiai, surinkti Kauno technologijos universiteto Cheminės technologijos fakulteto auditorijose ir laboratorijose.

2.2. Tyrimo eiga

Norint užtikrinti sistemingą ir patikimą tyrimo atlikimą, parengta tyrimo eiga, apimanti visus pagrindinius etapus, nuo mėginių surinkimo iki duomenų analizės. 17 paveiksle schematiškai parengta tyrimo eiga, iliustruojanti procedūrų seką ir kiekviename etape taikomus metodus. Tyrimo metu itin svarbu užtikrinti, kad nė viename proceso etape į mėginius nepatektų papildomų mikroplastikų.



17 pav. Tyrimo eiga

2.3. Mėginių surinkimas

Dulkių mėginiai buvo renkami Kauno technologijos universiteto Cheminės technologijos fakulteto patalpose (auditorijose ir laboratorijose), siekiant įvertinti mikroplastikų pasiskirstymą vidaus aplinkoje ir palyginti skirtingų patalpų įtaką dalelių kaupimuisi. Iš viso buvo surinkti 24 mėginiai: 14 mėginių paimta laboratorijose, o 10 auditorijose. Mėginiai buvo imami nuo horizontalių, retai valomų ir retai liečiamų paviršių, tokių kaip lentynų viršūs, spintelių paviršiai, laboratorinių stalų paviršiai ir langų palangės. Šie paviršiai buvo pasirinkti todėl, kad jie yra valomi rečiau, todėl ant jų gali kauptis didesnis iš oro nusėdusių dalelių kiekis ir geriau atsispindėti ilgalaikė mikroplastikų akumuliacija.

Mėginių paėmimui buvo taikomas standartizuotas kvadratinio ploto metodas, kai kiekviename paviršiuje buvo pažymėtas 10×10 cm (100 cm^2) dydžio plotas. Pažymėto kvadrato ribose esančios dulkės buvo kruopščiai surenkamos, siekiant užtikrinti visų nusėdusių dalelių surinkimą. Šis metodas leido standartizuoti mėginių ėmimą ir užtikrinti skirtingų mėginių palyginamumą. Tačiau dėl skirtingų tiriamų paviršių dydžio ir formos ne visuose mėginiuose buvo galima taikyti vienodą mėginio ėmimo plotą, todėl mikroplastikų koncentracija buvo vertinama pagal dulkių masę (MP/g). Dulkės buvo renkamos naudojant natūralių šerių šepetėlį ir nerūdijančio plieno mentelę (18 pav.). Natūralių šerių šepetėlis buvo naudojamas siekiant sumažinti galimo mėginių užteršimo mikroplastikais. Priešingai nei sintetiniai šepetėliai, kurie gali išskirti polimerinius pluoštus, natūralūs šeriai nesukelia papildomo plastiko dalelių patekimo į mėginį. Surinktos dulkės buvo atsargiai perkeltos į popierinius maišelius. Kiekvienas mėginys buvo pažymėtas pagal patalpos tipą ir mėginio numerį (pvz., A1 – auditorija, L1 – laboratorija), taip pat buvo registruojama mėginio paėmimo vieta, data ir paviršiaus tipas.



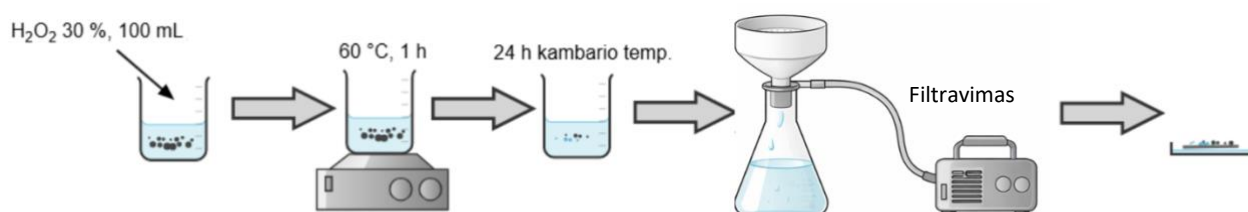
18 pav. Mėginių surinkimo įrankiai

2.4. Mėginių analizė

Po mėginių surinkimo dulkių mėginiai buvo pasveriami analitinėmis svarstyklėmis. Tolimesnėje analizėje buvo atliekamas organinių ir neorganinių medžiagų pašalinimas, taikant atitinkamus cheminio ir fizinio apdorojimo metodus, siekiant atskirti mikroplastikų frakciją. Viso laboratorinio darbo metu buvo laikomasi užteršimo prevencijos principų: vengta plastikinių indų ir įrankių naudojimo, o darbui naudoti stikliniai indai ir metalinės priemonės. Mėginių filtravimui buvo naudojami $3 \mu\text{m}$ porų dydžio polikarbonatiniai *Cyclopore Track Etched Membrane* filtrai, pasižymintys geru optiniu skaidrumu ir tinkami stereomikroskopinei ir fluorescencinei mikroplastikų analizei.

2.5. Organinių medžiagų pašalinimas

Prieš atliekant mikroplastikų analizę, iš dulkių mėginių buvo pašalinamos organinės kilmės priemaišos (pvz., odos fragmentai, tekstilės pluoštai, maisto likučiai), galinčios trukdyti polimerinių dalelių identifikavimui. Iš mokslinėje literatūroje aprašytų organinių medžiagų šalinimo metodų buvo pasirinktas oksidacinis metodas, taikant 30 % vandenilio peroksido (H_2O_2) tirpalą. Remiantis literatūros duomenimis, šis metodas yra vienas efektyviausių organinių medžiagų skaidymo būdų ir daro minimalų poveikį daugumai mikroplastikų polimerų (19 pav.).

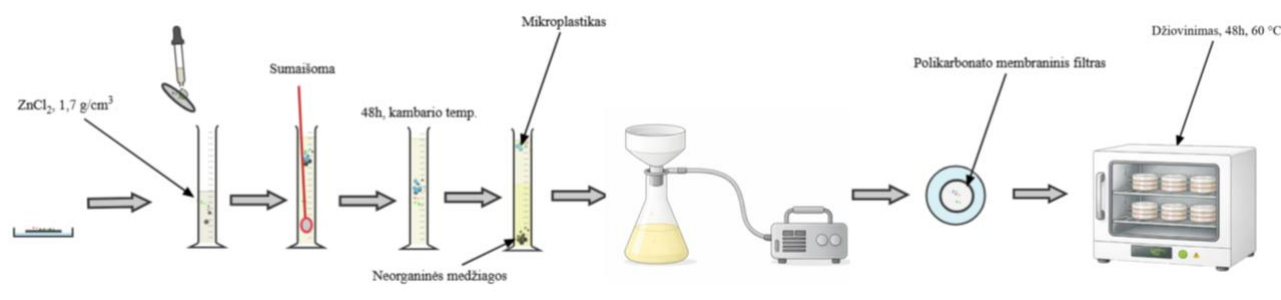


19 pav. Organinių medžiagų pašalinimo eiga

Kiekvienas dulkių mėginys po svėrimo buvo perkeltas į 250 mL talpos stiklines kolbas. Į kiekvieną kolbą buvo įpilta 100 mL H_2O_2 tirpalo, o mėginiai buvo kaitinami 60 °C temperatūroje 1 h. Temperatūra buvo nuolat stebima ir neviršyta, siekiant išvengti vandenilio peroksido skilimo bei galimos plastiko dalelių deformacijos. Reakcijos metu kolbos buvo dengiamos aliuminio folija, siekiant sumažinti išorinės taršos riziką ir palaikyti stabilias proceso sąlygas. Po kaitinimo mėginiai buvo paliekami kambario temperatūros aplinkoje 24 h, siekiant užtikrinti pilną organinių medžiagų oksidaciją. Po oksidacijos mėginiai buvo filtruojami naudojant vakuuminę filtravimo sistemą ir 3 μm porų dydžio polikarbonato membraninį filtrą. Po filtravimo filtrai buvo atsargiai nuimami pincetu ir perkelti į stiklines Petri lėkštes. Lėkštelės buvo uždengiamos, pažymimos mėginio kodu ir laikomos iki tolimesnių analizės etapų [42].

2.6. Neorganinių medžiagų pašalinimas

Po organinių priemaišų oksidacijos, kitas etapas yra neorganinių dalelių pašalinimas (20 pav.).



20 pav. Tankio separacija

Šiame etape buvo naudojamas cinko chlorido ($ZnCl_2$, 1,7 g/cm³) tirpalas, skirtas mikroplastikų frakcijai atskirti nuo neorganinių priemaišų. Tirpalas buvo ruošiamas iš kietosios medžiagos $ZnCl_2$ miltelių, ištirpinant jas distiliuotame vandenyje. Tirpalui paruošti buvo naudojama 1,6 kg $ZnCl_2$, kuris buvo palaipsniui tirpinamas 1,4 L distiliuoto vandens, nuolat maišant, kol susidarė homogeniškas tirpalas. Cinko chloridas yra stipriai higroskopinė ir ėsdinanti medžiaga, todėl tirpalo ruošimo metu buvo laikomasi saugos reikalavimų: naudotos apsauginės pirštinės, laboratorinis chalatas ir

apsauginiai akiniai. Tirpalas buvo ruošiamas stikliniame inde, siekiant išvengiant galimo mėginių užteršimo plastiko dalelėmis. Tokio tankio tirpale plastikinės dalelės iškyla į paviršių, o sunkesnės dalelės (pvz. mineralinės dulkės, smėlio ir metalo oksidai) nusėda į dugną.

Po organinių priemaišų oksidacijos ir filtravimo etapo gautas filtras buvo atsargiai išimtas iš Petri lėkštelės. Filtru paviršius buvo švelniai nuplaunamas cinko chlorido tirpalu, naudojant stiklinę pipetę. Pipetės antgalis buvo judinamas ratu nuo kraštų link centro, kad tirpalas pasiektų visas vietas, kuriose galėjo būti nusėdusių dalelių. Tankio atskyrimas buvo atliekamas stiklinėje cilindrinėje talpoje, siekiant užtikrinti optimalias sąlygas dalelių sluoksniavimuisi ir atskirti mikroplastikų frakciją nuo neorganinių priemaišų. Tirpalas buvo lengvai sumaišomas, kad dalelės tolygiai pasiskirstytų. Tuomet tirpalas buvo paliekamas 48 valandoms, kol susiformavo aiškus dalelių sluoksniavimasis. Susiformavus aiškiam sluoksniavimuisi, viršutinė frakcija buvo atsargiai atskiriama, stengiantis nejudinti indo dugne esančių tankesnių nuosėdų. Surinkta viršutinė frakcija buvo filtruojama tokiu pačiu būdu, kaip po organinės medžiagos šalinimo etapo. Siekiant efektyviau atskirti mikroplastikus nuo neorganinių priemaišų, tankio separacijos etapas buvo kartojamas du kartus. Galiausiai filtras buvo džiovinamas Petri lėkštelėse 40 °C temperatūroje 48 valandas [36].

2.7. Kiekybinė analizė

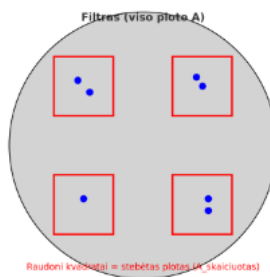
Kiekybinės analizės metu mėginiai buvo tiriami naudojant stereomikroskopą ir fluorescencinį mikroskopą (21 pav.). Analizės metu buvo nustatomas dalelių skaičius, jų dydis bei pasiskirstymas mėginyje. Gauti duomenys leido įvertinti dalelių koncentraciją ir palyginti skirtingus mėginius tarpusavyje.



21 pav. a) Stereomikroskopas, „Olympus SZ61“ b) Fluorescencinis mikroskopas „OPTIKA B-353FL“

2.7.1. Analizė stereomikroskopu

Išdžiovinti filtri, ant kurių buvo sukauptos dalelės, buvo analizuojami stereomikroskopu „Olympus SZ61“ („Evident Scientific“, Japonija), taikant maksimalų $\times 45$ didinimą. Dalelių kiekis buvo nustatomas pasirinktose filtro srityse. Buvo pasirinktos reprezentatyvios filtro sritys ($\frac{1}{4}$ viso filtro ploto, 22 pav.). Šiose srityse esančios dalelės buvo suskaičiuotos, o jų vidutinis kiekis buvo perskaičiuotas į viso filtro ekvivalentą pagal formulę (1) [36]. Esant nedideliame dalelių kiekiui filtre, dalelės buvo papildomai skaičiuojamos visame filtro paviršiuje, siekiant užtikrinti tikslesnį rezultatų įvertinimą.



22 pav. Skaičiavimo pavyzdys

$$N_{\text{viso filtro}} = N_{\text{skė. dalelės}} \cdot \frac{A_{\text{filtro plotas}}}{A_{\text{skė. dalies plotas}}}; \quad (1)$$

čia $N_{\text{viso filtro}}$ – apskaičiuotas bendras dalelių skaičius visame filtre.

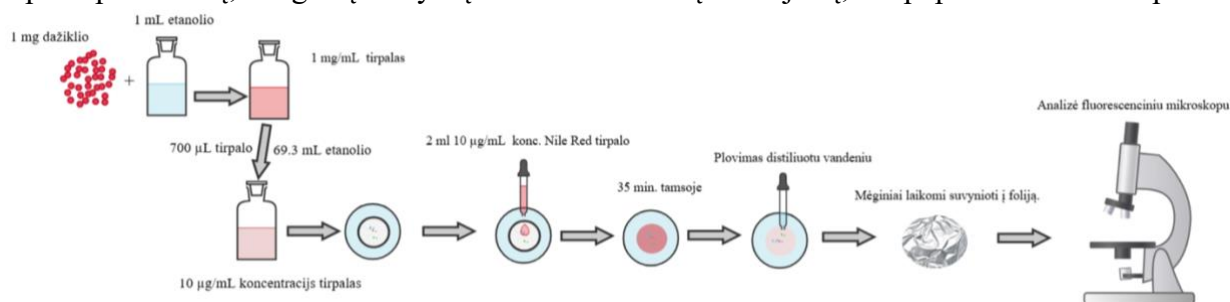
$N_{\text{skė. dalelės}}$ – suskaičiuotų dalelių skaičius tiriamame plote.

$A_{\text{filtro plotas}}$ – viso filtro plotas.

$A_{\text{skė. dalies plotas}}$ – stebėtos filtro dalies plotas.

2.7.2. Fluorescencinė analizė

Fluorescencinė mikroplastikų analizė buvo atliekama taikant *Nile Red* dažymo metodą, plačiai naudojamą hidrofobinių polimerinių dalelių vizualizavimui. Analizės procedūra apėmė dažiklio tirpalo paruošimą, mėginių dažymą ir fluorescencinį stebėjimą, kaip pavaizduota 23 paveiksle.



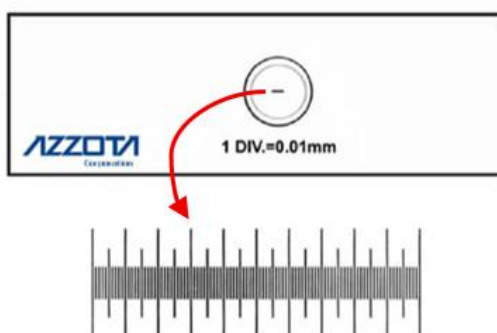
23 pav. Fluorescencinė analizė

Pradiniame etape buvo paruoštas koncentruotas *Nile Red* tirpalas, ištirpinant 1 mg dažiklio 1 mL etanolio ir taip gaunant 1 mg/mL koncentracijos tirpalą. Tirpalas buvo laikomas tamsiame, sandariame buteliuke, siekiant sumažinti fotocheminės degradacijos ir oksidacijos poveikį, kadangi *Nile Red* yra jautrus šviesai. Vėliau, remiantis skiedimo principu iš pagrindinio tirpalo buvo ruošiamas darbinis tirpalas, kurio koncentracija buvo 10 µg/mL. 700 µL koncentruoto tirpalo buvo praskiesta 70 mL etanolio. Tirpalų ruošimui buvo naudojamos kintamo tūrio pipetės, užtikrinančios tikslų tūrio dozavimą. Dažymo procedūros metu ant kiekvieno filtro buvo užlašinama apie 2 mL darbinio *Nile Red* tirpalo, siekiant visiškai padengti filtro paviršių ir užtikrinti maksimalų dažiklio kontaktą su galimomis mikroplastiko dalelėmis. Filtrai buvo laikomi tamsioje, kambario temperatūroje (apie 20–22 °C), 35 minučių laikotarpiui, leidžiant dažikliui difunduoti ir selektyviai adsorbuotis ant hidrofobinių paviršių. Po dažymo perteklinis dažiklis buvo pašalintas vakuuminės filtracijos būdu, naudojant *Biuchnerio* piltuvą. Filtrai buvo plaunami distiliuotu vandeniu, siekiant sumažinti foninę fluorescenciją ir pagerinti signalo ir triukšmo santykį. Džiovinimo metu filtrai buvo apvynioti aliuminio folija, kad būtų išvengta dažiklio išblukimo.

Fluorescencinė analizė buvo atliekama naudojant fluorescencinį mikroskopą „OPTIKA B–353FL“ („OPTIKA S.r.l.“, Italija), mėginius stebint naudojant $\times 10$, $\times 20$ ir $\times 40$ objektyvus, taikant mėlynos šviesos diapazoną (450–490 nm) ir registruojant emisiją žalios spalvos spektre (515–565 nm). Tokios sąlygos leidžia efektyviai identifikuoti mikroplastikų daleles pagal jų fluorescencinį atsaką. Analizės metu buvo vertinamas dalelių buvimas, morfologija ir pasiskirstymas filtro paviršiuje. Visi eksperimentai buvo atliekami laikantis vienodų sąlygų, siekiant užtikrinti duomenų palyginamumą ir metodikos atkuriamumą.

2.8. Duomenų analizė

Duomenų analizės metu buvo vertinamas mikroplastikų dalelių dydis, forma ir bendras kiekis skirtinguose mėginiuose. Dalelių dydis buvo nustatomas analizuojant fluorescencinio mikroskopo vaizdus naudojant programinę įrangą *ImageJ*. Prieš atliekant matavimus buvo atliktas vaizdo mastelio kalibravimas, siekiant nustatyti pikselių ir realių matmenų (μm) santykį. Kalibravimui buvo naudojama mikroskopo kalibravimo liniuotė, pavaizduota 24 paveiksle, turinti žinomo dydžio padalas. Liniuotė buvo fotografuojama tuo pačiu mikroskopo didinimu kaip ir analizuojami mėginiai, o gautas vaizdas įkeltas į *ImageJ* programą. Naudojant „Line Tool“ įrankį buvo pažymėtas žinomas atstumas (vienos padalos ilgis), o funkcija „Set Scale“ nustatytas mastelis, leidžiantis visus tolesnius matavimus išreikšti mikrometrais.



24 pav. Okuliarinės mikrometrinės skalės kalibravimas [38]

Mikroplastikų forma buvo vertinama vizualiai, tačiau analizės metu atskirai buvo vertinamos tik pluoštinės dalelės ir registruojant jų kiekį kiekviename mėginyje. Bendras mikroplastikų dalelių skaičius buvo naudojamas kaip kiekybinis rodiklis mikroplastikų koncentracijai apskaičiuoti pagal 2 formulę [48].

$$C_p = \frac{N}{m}; \quad (2)$$

čia C_p – mikroplastikų koncentracija dulkėse (MP/g);

N – dalelių kiekis;

m – dulkių masė.

Statistinė duomenų analizė buvo atlikta naudojant programas *IBM SPSS Statistics* ir *Microsoft Excel*. Mikroplastikų koncentracija, pluoštų koncentracija ir dalelių dydis buvo vertinami kaip kiekybiniai kintamieji.

Stereomikroskopijos ir fluorescencinės mikroskopijos metodais gautų rezultatų palyginimui prieš statistinę analizę buvo įvertintas duomenų normalumas taikant *Shapiro–Wilko* testą. Normaliai pasiskirsčiusiems duomenims buvo taikytas porinių imčių *t*-testas, pateikiant *t* statistiką ir laisvės laipsnius. Kuo didesnė absoliutinė *t* reikšmė, tuo didesnė tikimybė, kad skirtumas tarp grupių ar matavimų yra statistiškai reikšmingas. Normalumo prielaidos neatitikusiems duomenims taikytas *Wilcoxon signed–rank* testas, pateikiant *W* statistiką. Ši statistika leidžia įvertinti, ar tarp lyginamų matavimų vyrauja nuosekli skirtumų tendencija. Metodų tarpusavio ryšiui įvertinti buvo taikyta tiesinė regresinė analizė. Regresijos modelio tinkamumui įvertinti buvo naudojamas determinacijos koeficientas R^2 .

Mikroplastikų koncentracijų skirtumams tarp auditorijų ir laboratorijų įvertinti buvo taikytas neparametrinis *Mann–Whitney U* testas.

Mikroplastikų dalelių dydžio pasiskirstymas buvo vertinamas grafiškai sudarant histogramą bei analizuojant asimetrijos (*skewness*) ir smailumo (*kurtosis*) rodiklius. Asimetrijos rodiklis buvo naudojamas pasiskirstymo posvyriui įvertinti, parodant, į kurią pusę pasiskirstymas yra labiau pasviręs, o smailumo rodiklis, pasiskirstymo smailumui ir jo nukrypimui nuo normaliojo skirstinio įvertinti. Šie rodikliai buvo naudojami siekiant detaliau apibūdinti dalelių dydžio pasiskirstymo struktūrą.

Ryšiui tarp pluoštinių dalelių koncentracijos ir bendros mikroplastikų koncentracijos įvertinti buvo taikyta *Pearson* koreliacijos analizė bei tiesinė regresinė analizė. *Pearson* koreliacijos koeficientas *r* buvo naudojamas ryšio stiprumui ir kryptčiai nustatyti. Teigiamas *r* reikšmė rodo teigiamą priklausomybę tarp kintamųjų, o kuo *r* reikšmė artimesnė 1, tuo ryšys stipresnis. Tiesinės regresijos modelio tinkamumui įvertinti buvo naudojamas determinacijos koeficientas R^2 , parodantis, kokią dalį vieno kintamojo variacijos paaiškina kitas kintamasis.

Visuose statistiniuose testuose rezultatai buvo laikomi statistiškai reikšmingais, kai *p* reikšmė buvo mažesnė nei 0,05.

Visiems gautiems rezultatams buvo sudarytos vizualizacijos: stulpelinės diagramos, dėžutės tipo diagramos ir sklaidos diagramos, naudojant *Microsoft Excel* programą.

2.9. EDI skaičiavimas

Norint įvertinti poveikį žmogui buvo apskaičiuota dienos suvartojimo dozė (EDI), remiantis JAV Aplinkos apsaugos agentūros (EPA) sukurta metodika. EDI apskaičiuojamas pagal 3 formulę [2]:

$$EDI = \frac{C_p \times f \times IR}{BW} ; \quad (3)$$

čia C_p – mikroplastikų koncentracija dulkėse (MP/g);

f – ekspozicijos frakcija, apskaičiuojama pagal buvimo patalpose laiką;

IR – dulkių įsikovimo ar atsiktinio nurijimo greitis (g/parą);

BW – kūno svoris (kg).

Ekspozicijos frakcija apskaičiuojama kaip žmogaus buvimo tam tikroje aplinkoje laiko ir bendros paros trukmės santykis (4 formulė):

$$f = \frac{t}{24}; \quad (4)$$

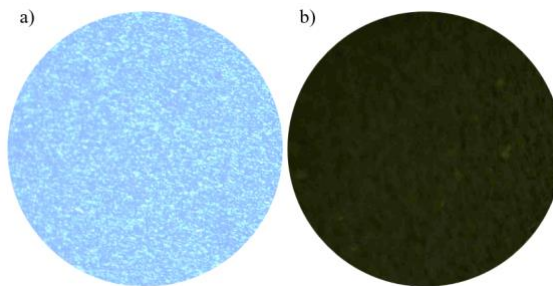
čia t – ekspozicijos trukmė arba buvimo patalpose laikas per parą (val./parą);

24 – bendras valandų skaičius paroje.

Šis modelis leidžia įvertinti galimą mikroplastikų patekimą į žmogaus organizmą per atsitiktinį dulkių nurijimą, atsižvelgiant į ekspozicijos trukmę bei fiziologinius veiksnius. Tokiu būdu galima įvertinti potencialų skirtingų aplinkų poveikį žmogaus sveikatai bei palyginti galimą ekspozicijos lygį [41].

2.10. Metodikos patikimumo vertinimas

Siekiant įvertinti galimą foninę taršą ir metodikos patikimumą, tyrimo metu buvo analizuojami kontroliniai filtrai (tuštieji bandiniai). Kontroliniai filtrai buvo apdorojami tomis pačiomis sąlygomis kaip ir tiriamieji mėginiai, tačiau be dulkių mėginio. Tai leido įvertinti galimą mikroplastikų patekimą iš aplinkos ar laboratorinės įrangos analizės metu.



25 pav. Kontrolinių filtrų analizė: a) kontrolinis filtras, analizuotas stereomikroskopijos metodu; b) kontrolinis filtras, analizuotas fluorescencinės mikroskopijos metodu

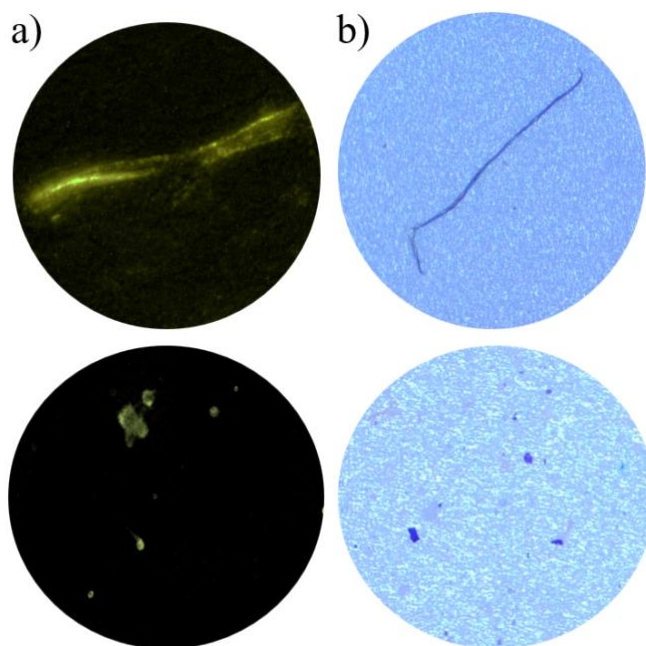
25 paveiksle pateikti kontrolinių filtrų vaizdai rodo, kad analizės metu reikšminga foninė mikroplastikų tarša nebuvo nustatyta. Kontroliniuose filtruose nebuvo identifikuota mikroplastikų dalelių, todėl galima teigti, kad taikyta metodika buvo pakankamai patikima. Taip pat nenustatyta reikšmingos išorinės aplinkos ar laboratorinių procedūrų sukeltos taršos, galėjusios turėti įtakos tyrimo rezultatams.

3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Šiame skyriuje pateikiami mikroplastikų tyrimo rezultatai ir jų aptarimas. Tyrimai buvo atlikti pagal 2 skyriuje aprašytą metodiką. Buvo išanalizuota mikroplastikų koncentracija, dalelių pasiskirstymas pagal formą, dydį bei lyginami skirtingų analizės metodų, fluorescencinės mikroskopijos ir stereomikroskopinės analizės rezultatai.

3.1. Stereomikroskopinio ir fluorescencinės mikroskopijos metodų palyginimas

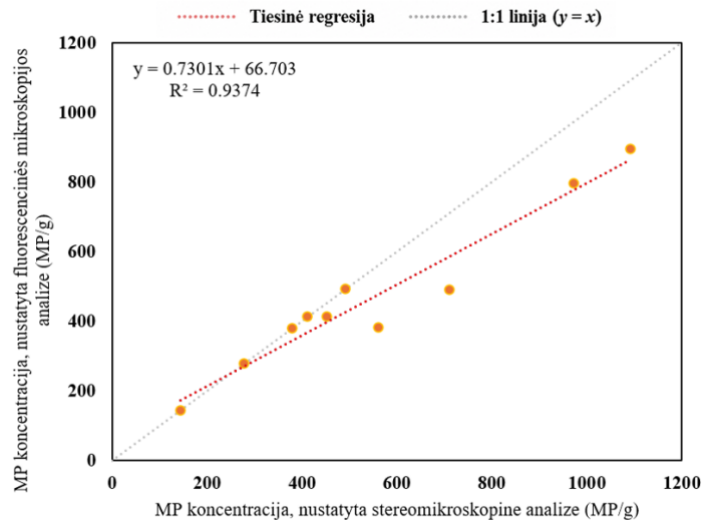
Mikroplastiko dalelių identifikavimui ir kiekybiniam įvertinimui šiame tyrime buvo taikomi stereomikroskopinis ir fluorescencinės mikroskopijos metodai. Fluorescencinės mikroskopijos metu naudotas *Nile Red* dažiklis, kuris, apšviestas mėlynos šviesos diapazone, skleidžia fluorescencinį signalą ir leidžia aiškiau identifikuoti mikroplastiko daleles. Tuo tarpu stereomikroskopiniu metodu buvo identifikuojamos visos vizualiai matomos dalelės, nepriklausomai nuo jų cheminės sudėties. Siekiant vizualiai palyginti šių metodų taikymo skirtumus, 26 paveiksle pateikti mikroplastiko dalelių vaizdai, gauti taikant abu analizės metodus.



26 pav. Mikroplastiko dalelių identifikavimas fluorescenciniu (a) ir stereomikroskopiniu (b) metodais

Atsižvelgiant į metodinius skirtumus, buvo tikėtasi, kad gautos koncentracijos skirsis. Prieš lyginant stereomikroskopinio ir fluorescencinės mikroskopijos metodų rezultatus, *Shapiro–Wilk* testu buvo įvertintas porinių matavimų skirtumų normalumas. Laboratorijos mėginių skirtumų pasiskirstymas statistiškai reikšmingai nesiskyrė nuo normaliojo ($p = 0,059$), todėl šiai duomenų grupei buvo taikytas porinių imčių *t* testas. Tuo tarpu auditorijos mėginių skirtumų pasiskirstymas neatitiko normalumo prielaidos ($p = 0,003$), todėl buvo taikytas *Wilcoxon signed–rank* testas.

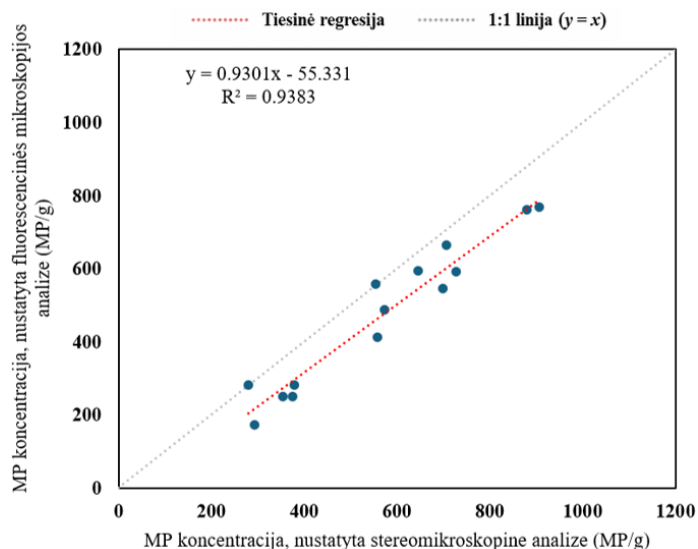
Auditorijų mėginių analizė parodė, kad stereomikroskopiniu metodu nustatyta vidutinė mikroplastikų koncentracija buvo didesnė $549,70 \pm 297,87$ MP/g nei fluorescencinės mikroskopijos metodu nustatyta koncentracija $468,00 \pm 224,51$ MP/g. *Wilcoxon signed–rank* testu rezultatai parodė, kad šis skirtumas buvo statistiškai reikšmingas ($W = 0,0$; $p = 0,002$).



27 pav. Fluorescencinės mikroskopijos ir stereomikroskopinio metodų rezultatų palyginimas auditorijoje

Grafiškai (27 pav.) nustatyta stipri teigiama koreliacija tarp metodų rezultatų ($R^2 = 0,9374$), tačiau duomenų taškai nebuvo idealiai išsidėstę ant 1:1 linijos ($y = x$). Tai parodė, kad metodų rezultatai, nors ir pasižymėjo panašia tendencija, kiekybiškai nesutapo. Kai kurių mėginių taškai buvo išsidėstę žemiau 1:1 linijos, todėl šiais metodais nustatytos mikroplastikų koncentracijos buvo panašios. Vis dėlto dauguma taškų buvo žemiau 1:1 linijos, o tai parodo, kad fluorescencinės mikroskopijos metodu nustatytos mikroplastikų koncentracijos buvo mažesnės nei stereomikroskopiniu metodu nustatytos koncentracijos. Šią tendenciją patvirtino ir regresijos lygties nuolydis, mažesnis už 1 ($y = 0,7301x + 66,703$). Taip pat buvo pastebėta, kad esant mažesnėms koncentracijoms metodų rezultatai sutapo arba skyrėsi nedaug, tačiau koncentracijai didėjant skirtumas tarp metodų ryškėjo.

Laboratorijos mėginių analizė parodė dar aiškesnę tendenciją. Stereomikroskopiniu metodu nustatyta vidutinė mikroplastikų koncentracija buvo didesnė $566,93 \pm 207,10$ MP/g nei fluorescencinės mikroskopijos metodu $471,93 \pm 198,85$ MP/g, o šis skirtumas buvo statistiškai reikšmingas ($t(13) = -6,901$; $p < 0,001$).



28 pav. Fluorescencinės mikroskopijos ir mikroskopinio metodų rezultatų palyginimas laboratorijose

Laboratorių mėginių grafike (28 pav.) nustatyta labai stipri koreliacija tarp metodų ($R^2 = 0,9383$), tačiau duomenų taškai nebuvo idealiai išsidėstę ant 1:1 linijos ($y = x$). Regresijos tiesės nuolydis, mažesnis už 1 ($y = 0,9301x - 55,331$), tai pat parodė tendenciją, kad fluorescencinės mikroskopijos metodu nustatytos mikroplastikų koncentracijos buvo mažesnės nei stereomikroskopiniu metodu nustatytos reikšmės. Nors kai kurių mėginių rezultatai buvo panašūs, dauguma taškų buvo išsidėstę žemiau 1:1 linijos.

Apibendrinant rezultatus, tiek auditorijų, tiek laboratorijų mėginiuose nustatyta nuosekli tendencija, kad stereomikroskopiniu metodu buvo nustatytos didesnės mikroplastikų koncentracijos nei fluorescencinės mikroskopijos metodu nustatytos koncentracijos. Auditorijų mėginiuose vidutinis skirtumas siekė 81,7 MP/g, o laboratorijų mėginiuose 95 MP/g. Apibendrinti statistinės analizės rezultatai pateikti 4 lentelėje. Didesnis skirtumas laboratorijų mėginiuose gali būti susijęs su aukštesnėmis mikroplastikų koncentracijomis, kai metodų jautrumo ir selektyvumo skirtumai tampa labiau išreikšti.

4 lentelė. Statistinės analizės rezultatai

Aplinka	Testo statistika	p reikšmė	Skirtumas (MP/g)
Auditorijos	W = 0.0	0.002	-81.7
Laboratorijos	t(13) = -6,901	< 0.001	-95.0

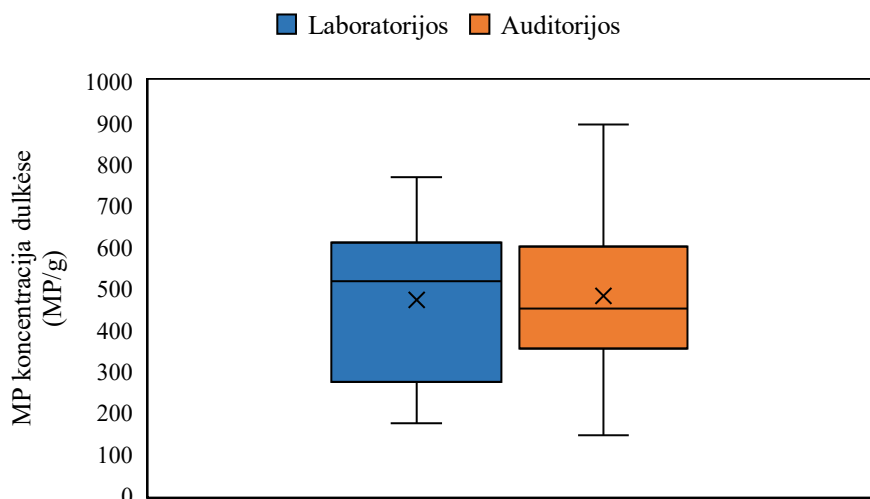
Skirtumas tarp metodų gali būti paaiškinamas metodų veikimo principais. Fluorescencinės mikroskopijos metodas, naudojant *Nile Red* dažiklį, yra selektyvus nes dažiklis jungiasi prie hidrofobinių mikroplastiko dalelių ir, apšviestas mėlynos šviesos diapazone, fluorescuoja, todėl leidžia identifikuoti tik mikroplastiką. Tuo tarpu stereomikroskopinis metodas leidžia suskaičiuoti visas vizualiai matomas daleles, nepriklausomai nuo jų cheminės sudėties, todėl į analizę gali būti įtraukiamos ir ne mikroplastiko kilmės dalelės. Dėl šių priežasčių fluorescencinis metodas pateikia specifiškesnį, tačiau dažnai mažesnį koncentracijos įvertinimą, o stereomikroskopinis metodas gali lemti mikroplastikų kiekio pervertinimą. Todėl atliekant kiekybinę mikroplastiko analizę nerekomenduojama remtis vien tik stereomikroskopiniu metodu, o gauti rezultatai turėtų būti vertinami atsižvelgiant į taikomo metodo ypatumus. Dėl šios priežasties mikroplastikų koncentracijos ir dalelių kiekio skaičiavimai šiame tyrime buvo atlikti remiantis tik fluorescencinės mikroskopijos duomenimis.

Kiti tyrėjai nurodo, kad mikroplastikų koncentracijos, nustatytos stereomikroskopu ir fluorescencine mikroskopija, gali reikšmingai skirtis. Dalis tyrimų rodo didesnes koncentracijas naudojant fluorescencinę mikroskopiją, nes *Nile Red* dažymas leidžia geriau identifikuoti smulkias ir skaidrias mikroplastiko daleles. Pavyzdžiui, viename tyrime, analizuojant vandens mėginius, naudojant fluorescencinės mikroskopijos metodą mikroplastikų koncentracija padidėjo nuo maždaug 200–300 dalelių/L iki 800–1500 dalelių/L. Autoriai nurodė, kad fluorescencinis metodas leido aptikti net kelių mikrometrų dydžio daleles, kurios optiniu būdu buvo nematomos [49].

Tačiau literatūroje pateikiami ir priešingi rezultatai, kai fluorescencinės mikroskopijos metodu nustatomos mažesnės mikroplastikų koncentracijos. Fluorescencinės mikroskopijos rezultatams įtakos gali turėti skirtingas polimerų gebėjimas sąveikauti su *Nile Red* dažikliu. Nustatyta, kad ne visi plastikai vienodai sugeria dažiklį ir fluorescuoja, todėl kai kurių polimerų aptikimo efektyvumas gali būti mažesnis. Taip pat nurodoma, kad skirtingų plastikų fluorescencijos intensyvumas gali skirtis daugiau nei 50 %, o tamsūs ar oksiduoti plastikai gali fluorescuoti labai silpnai arba visai

nefluorescuoti. Vis dėlto mažesnės fluorescencinės mikroskopijos metodu nustatytos koncentracijos nebūtinai reiškia prastesnį dalelių aptikimą, nes stereomikroskopinės analizės metu į skaičiavimus gali būti įtraukiamos ir ne mikroplastiko kilmės dalelės. Todėl metodų rezultatų skirtumai gali būti susiję tiek su fluorescencinio metodo selektyvumu, tiek su skirtingu neplastikinių dalelių įtraukimu į analizę [50].

3.2. Mikroplastikų koncentracija skirtingose patalpose

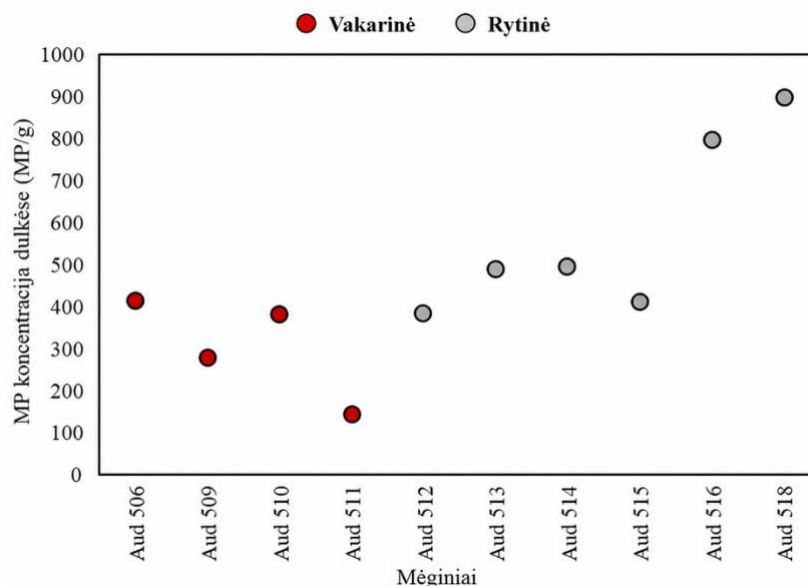


29 pav. Mikroplastikų koncentracijos pasiskirstymas laboratorijų ir auditorijų patalpose

29 paveiksle, pateikti mikroplastikų koncentracijų pasiskirstymo rezultatai laboratorijų ir auditorijų patalpose. Gauti rezultatai parodė, kad laboratorijose mikroplastikų koncentracija svyravo nuo 172 iki 767 MP/g, o auditorijose nuo 144 iki 895 MP/g. Laboratorijose vidutinė mikroplastikų koncentracija siekė $472 \pm 191,6$ MP/g, o mediana 516 MP/g. Auditorijose vidutinė koncentracija buvo šiek tiek didesnė $480 \pm 213,1$ MP/g, tačiau mediana mažesnė 450 MP/g.

Rezultatai parodė, kad abiejų tipų patalpose duomenys pasižymėjo gana didele sklaida, tačiau auditorijose koncentracijų reikšmės pasiskirstė platesniame intervale. Tai gali rodyti didesnę mikroplastikų koncentracijų nevienodumą auditorijose. Laboratorijose stebėta mažesnė sklaida ir tolygesnis rezultatų pasiskirstymas. Bendras visų tirtų patalpų mikroplastikų koncentracijos vidurkis siekė $476 \pm 202,4$ MP/g, o mediana 480 MP/g.

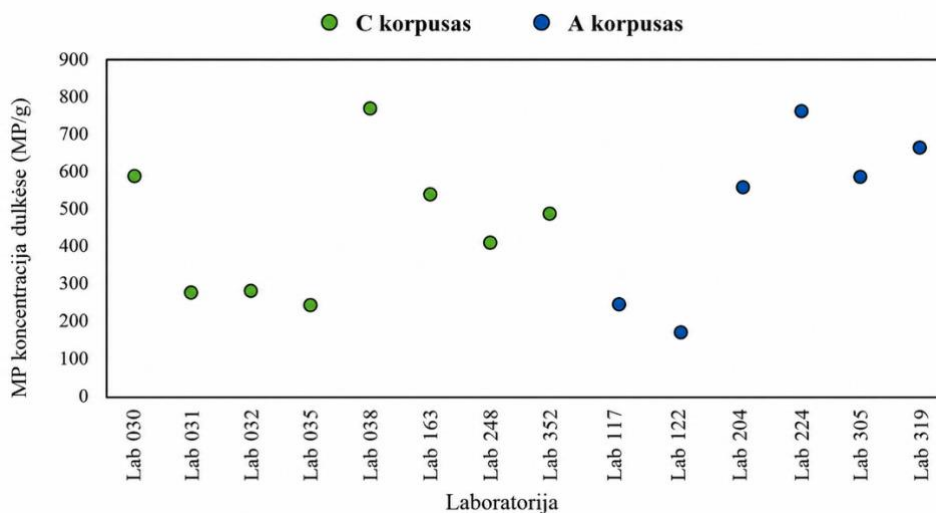
Siekiant nustatyti, ar mikroplastikų koncentracijų skirtumas tarp auditorijų ir laboratorijų yra statistiškai reikšmingas, buvo taikytas neparametrinis *Mann–Whitney U* testas. Gauta p reikšmė ($p = 0,815$) parodė, kad statistiškai reikšmingo skirtumo tarp auditorijų ir laboratorijų mikroplastikų koncentracijų nenustatyta.



30 pav. Mikroplastikų koncentracijos pasiskirstymas rytinėje ir vakarinėje pastato pusėse esančiose auditorijose

Siekiant nustatyti galimas mikroplastikų koncentracijų skirtumų priežastis, buvo vertinama auditorijų padėties skirtingose pastato pusėse įtaka. Remiantis 30 paveiksle pateiktais duomenimis, buvo pastebėta tendencija, kad rytinėje pastato pusėje esančiose auditorijose mikroplastikų koncentracija buvo didesnė nei vakarinėje pusėje esančiose auditorijose. Rytinėje pastato pusėje esančiose auditorijose vidutinė mikroplastikų koncentracija siekė $578 \pm 120,49$ MP/g, o vakarinėje pastato pusėje esančiose auditorijose $303 \pm 214,32$ MP/g.

Pastebėti mikroplastikų koncentracijų skirtumai galėjo būti susiję su skirtinga auditorijų ekspozicija saulės spinduliutei. Literatūroje nurodoma, kad UV spinduliuotė yra vienas svarbiausių polimerinių medžiagų irimo veiksnių, skatinančių plastiko fotooksidaciją ir fragmentaciją į smulkesnes daleles. Nors langų stiklas sulaiko didžiąją dalį ultravioletinės spinduliuotės, dalis UVA spindulių gali prasiskverbti į vidaus patalpas ir prisidėti prie polimerinių medžiagų degradacijos procesų. Dėl šios priežasties intensyviau saulės veikiamose patalpose teoriškai gali susidaryti didesni mikroplastikų kiekiai. Vis dėlto šiame tyrime UV intensyvumas, mikroklimato parametrai ir medžiagų degradacijos procesai nebuvo vertinti, todėl šių veiksnių įtaka negalėjo būti tiesiogiai patvirtinta.



31 pav. Mikroplastikų koncentracijos pasiskirstymas A ir C korpusų laboratorijose

Analizuojant skirtingus fakulteto korpusus, taip pat pastebėti mikroplastikų koncentracijų skirtumai tarp A ir C korpusų.

A korpuse vidutinė mikroplastikų koncentracija buvo didesnė ir siekė $499 \pm 234,8$ MP/g, C korpuse ji buvo mažesnė $452 \pm 181,6$ MP/g. Nors A ir C korpusų mikroplastikų koncentracijų vidurkiai skyrėsi nedaug, tačiau įvertinus duomenų pasiskirstymą grafike (31 pav.) buvo matyti, kad A korpuso laboratorijose didesnė dalis reikšmių pateko į didesnių koncentracijų intervalą. Tai parodė, kad šiame korpuse dažniau buvo fiksuojamos didesnės mikroplastikų koncentracijos, net jei bendras vidurkis nebuvo ženkliai didesnis. Didžiausia pavienė mikroplastikų koncentracija (767 MP/g) buvo nustatyta C korpuse esančioje 038 laboratorijoje, kur yra vykdomi medžiagų paruošimo procesai. Šis rezultatas galėjo būti susijęs su intensyviais mechaniniais ir fizikiniais procesais, kurie skatino dalelių susidarymą. Bendras duomenų pasiskirstymas buvo C korpuse tolygesnis ir labiau centruotas ties vidutinėmis bei mažesnėmis reikšmėmis. Tuo tarpu A korpuse didesnės mikroplastikų koncentracijos galėjo būti susijusios su dažnesniu polimerinių medžiagų naudojimu organinės chemijos laboratorijose. Mažiausia mikroplastikų koncentracija (172 MP/g) buvo nustatyta mikrobiologijos laboratorijoje. Tai gali būti paaiškinama tuo, kad tokiose laboratorijose dirbama laikantis griežtų švaros ir sterilumo reikalavimų, todėl į aplinką patenka mažiau pašalinių dalelių.

Apibendrinant galima teigti, kad mikroplastikų koncentracijų pasiskirstymą lėmė tiek vykdomų procesų pobūdis (mechaninis apdorojimas, darbas su polimerais), tiek laboratorijų kontrolės lygis, A korpuse vyravo didesnės ir labiau kintančios koncentracijos, o C korpuse jos buvo šiek tiek mažesnės, tačiau atskirais atvejais galėjo pasiekti itin aukštas reikšmes.

Šiame tyrime nustatytos mikroplastikų koncentracijų rezultatai buvo palyginti su mokslinėje literatūroje pateikiamais duomenimis apie MP paplitimą įvairiose vidaus aplinkose. Universiteto patalpose Kolumbijoje atlikto tyrimo metu nustatyta, kad mikroplastikų koncentracijos auditorijose svyravo nuo 528 iki 1658 MP/g (vidurkis 1231 MP/g), konferencijų patalpose nuo 131 iki 1962 MP/g (vidurkis 1137 MP/g), o laboratorijose nuo 632 iki 3332 MP/g (vidurkis 2068 MP/g). Tuo tarpu Limos mieste (Peru) atliktame tyrime, kuriame buvo analizuotos 60 gyvenamųjų namų vidaus dulksės, mikroplastikų koncentracijos svyravo nuo 10 iki $33\,900$ MP/g, o vidutinė reikšmė siekė 3000 ± 1980 MP/g. Minėtame tyrime taip pat nustatyta didelė rezultatų sklaida, rodanti reikšmingus skirtumus tarp skirtingų patalpų. Be to, didesnės koncentracijos buvo nustatytos tam tikrose miesto zonose bei aukštesniuose pastatų aukštuose, kas siejama su oro pernaša ir išoriniais taršos šaltiniais [51].

Dar didesnės mikroplastikų koncentracijos nustatytos transporto infrastruktūros objektuose, kuriuose vidutinė koncentracija siekė 4464 ± 482 MP/g ir kelis kartus viršijo šiame tyrime nustatytas reikšmes. Tokie skirtumai dažniausiai aiškinami intensyvesniu žmonių judėjimu, didesniu tekstilės naudojimu bei aktyvesniais dalelių pakėlimo ir persiskirstymo procesais patalpose. Vis dėlto literatūroje pateikiama ir mažesnių koncentracijų reikšmių. Pavyzdžiui, 28 mokyklose Širazo mieste (Iranas) atliktame tyrime nustatyta, kad mikroplastikų koncentracija vidaus dulksėse svyravo nuo $9,8$ iki $634,5$ MP/g, vidutinė reikšmė siekė $195,1 \pm 179,2$ MP/g, o mediana $113,9$ MP/g [52].

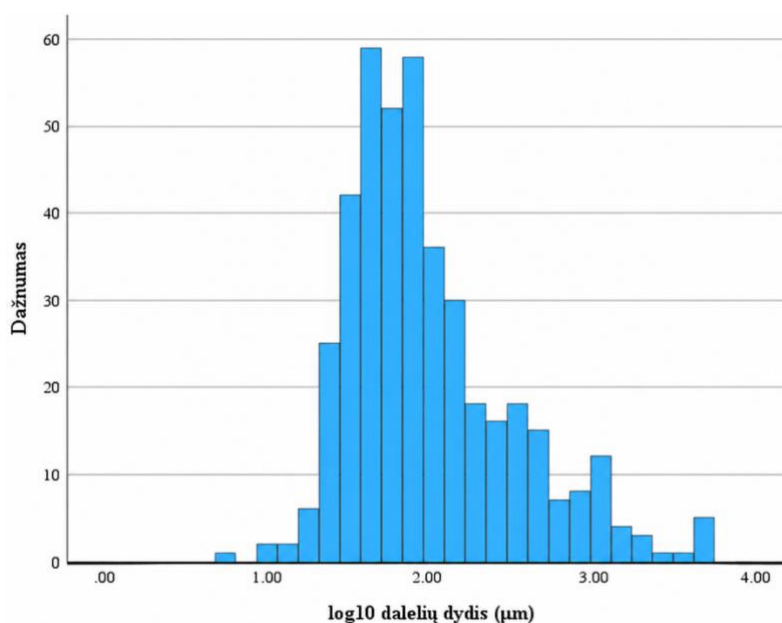
Palyginus skirtingų tyrimų rezultatus galima teigti, kad mikroplastikų koncentracijos vidaus aplinkose pasižymi didele variacija. Šiame tyrime nustatytos reikšmės užima tarpinę padėtį tarp mažesnių koncentracijų, nustatytų mokyklų aplinkoje, ir didesnių koncentracijų, būdingų intensyviai naudojamoms ar su transporto infrastruktūra susijusioms patalpoms. Gauti rezultatai leidžia daryti prielaidą, kad mikroplastikų koncentracijas vidaus aplinkoje pirmiausia lemia patalpų paskirtis,

žmonių aktyvumas bei vidiniai mikroplastikų šaltiniai, tačiau papildomą įtaką gali turėti ir mikroplastikų pernaša iš lauko aplinkos bei netoliese esantys taršos šaltiniai.

3.3. Mikroplastikų dydis

Mikroplastiko dalelių dydžio pasiskirstymas buvo įvertintas remiantis 421 išmatuotų dalelių duomenimis, kurių dydžiai nustatyti naudojant *ImageJ* programinę įrangą. Analizė parodė, kad dalelių dydžiai pasiskirstę itin plačiame intervale nuo 7 μm iki 4999 μm , o vidutinė dalelių dydžio reikšmė siekė 264,32 μm . Nustatytas didelis standartinis nuokrypis (612,89 μm) parodė reikšmingą duomenų sklaidą, būdingą aplinkos mikroplastiko tyrimams. Tokių dydžių įvairumą galima sieti su skirtinga mikroplastiko kilme, fragmentacijos laipsniu bei aplinkos veiksnių poveikiu.

Dėl plataus dydžių intervalo bei ryškios duomenų asimetrijos analizėje taikyta \log_{10} transformacija. Logaritminė transformacija sumažino kraštinių reikšmių (ypač labai didelių dalelių) įtaką, stabilizavo dispersiją ir leido duomenų pasiskirstymą priartinti prie normaliojo skirstinio.



32 pav. Mikroplastiko dalelių dydžio μm (\log_{10}) pasiskirstymo histograma

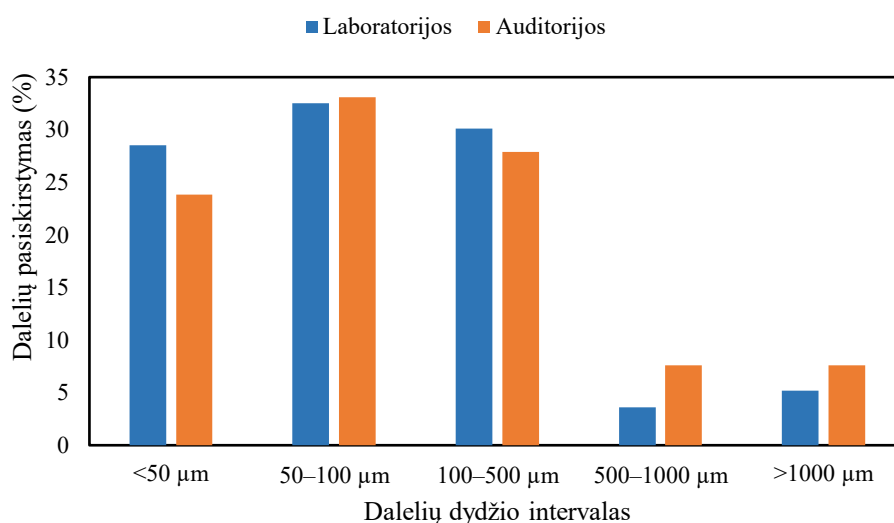
32 paveiksle pateikta logaritmiškai transformuotų duomenų histograma parodė, kad mikroplastiko dalelių dydžių pasiskirstymas tampo labiau koncentruotas ir artimesnis normaliajam (Gauso) skirstiniui. Didžiausias dažnis buvo nustatytas ties $\log_{10} \approx 1,8\text{--}2,0$ reikšme, atitinkančia apie 100 μm dydžio daleles. Tai leidžia teigti, kad tirtuose mėginiuose dominavo smulkios mikroplastiko frakcijos.

Nors pasiskirstymas po transformacijos priartėjo prie normaliojo, histogramoje vis dar buvo matoma neįžymiai teigiama asimetrija, pasiskirstymo uodega išliko nukreipta didesnių reikšmių link. Šią tendenciją patvirtino apskaičiuotas asimetrijos koeficientas (*skewness* = 1,025), kuris parodė, kad didesnės dalelės mėginiuose buvo aptinkamos rečiau, tačiau jų įtaka bendram pasiskirstymui išliko reikšminga. Taip pat buvo nustatytas teigiamas smailumo koeficientas (*kurtosis* = 0,961), rodantis, kad pasiskirstymas buvo smailesnis nei normalusis skirstinys ir pasižymėjo didesne reikmių koncentracija centrinėje dalyje. Tokia pasiskirstymo struktūra yra būdinga aplinkos mikroplastikų mėginiams, kuriuose kartu buvo aptinkamos tiek labai smulkios, tiek pavienės stambesnės dalelės.

Siekiant įvertinti dalelių dydžius buvo atlikta ir pasiskirstymo analizė, kuri pateikta 5 lentelėje, iš kurios galime pastebėti, kad didžiausia dalis mikroplastiko dalelių pateko į 50–100 µm intervalą (32,8 %). Taip pat reikšmingą dalį sudarė <50 µm (26,6 %) ir 100–500 µm (29,2 %) dydžio dalelės. Tuo tarpu didesnių nei 500 µm dalelių dalis buvo santykinai nedidelė, 500–1000 µm intervale jos sudarė 5,2 %, o >1000 µm 6,2 % visų tirtų dalelių. Gauti rezultatai parodė, kad tirtuose mėginiuose vyrauja smulkesnės mikroplastiko dalelės, o didesnių matmenų dalelės aptinkamos rečiau.

5 lentelė. Mikroplastiko dalelių dydžių pasiskirstymas pagal intervalus

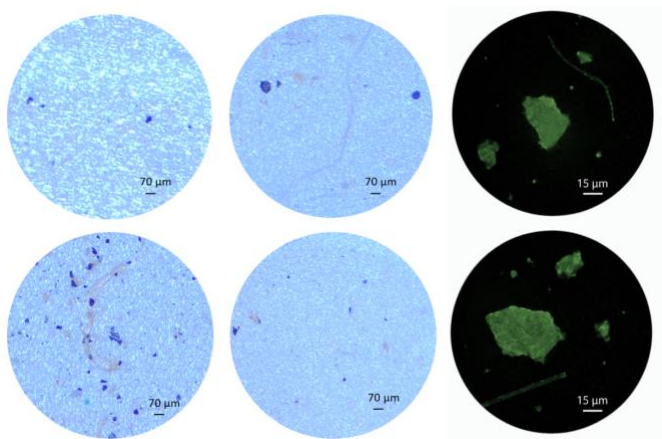
Dalelių dydžio intervalas (µm)	Dažnis	Procentas (%)
<50	112	26,6
50–100	138	32,8
100–500	123	29,2
500–1000	22	5,2
>1000	26	6,2



33 pav. Mikroplastiko dalelių dydžio pasiskirstymas laboratorijų ir auditorijų mėginiuose

Lyginant laboratorijų ir auditorijų mėginius nustatyta, kad abiejose aplinkose dominavo smulkesnės mikroplastiko dalelės, kas ir parodyta 33 paveiksle. Didžiausią dalį tiek laboratorijose, tiek auditorijose sudarė 50–100 µm dydžio dalelės, atitinkamai 32,5 % ir 33,1 %. Laboratorijų mėginiuose dažniau aptiktos <50 µm ir 100–500 µm dydžio dalelės, tuo tarpu auditorijų mėginiuose nustatyta didesnė stambesnių, 500–1000 µm bei >1000 µm dydžio dalelių dalis. Gauti rezultatai parodė, kad abiejose tirtose aplinkose vyravo smulkios mikroplastikų dalelės, tačiau auditorijų mėginiuose nustatyta šiek tiek didesnė stambesnių fragmentų dalis.

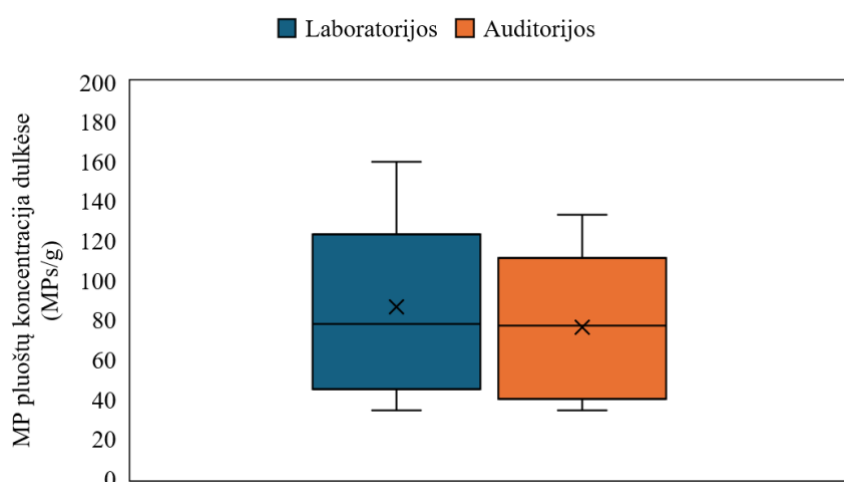
34 paveiksle pateikti reprezentatyvūs mikroplastiko dalelių vaizdai, gauti stereomikroskopiniu ir fluorescencinės mikroskopijos metodais. Analizuotuose vaizduose daugiausia identifikuotos smulkios mikroplastikų dalelės, patenkančios į <50 µm ir 50–100 µm dydžio intervalus.



34 pav. Mikroplastiko dalelių vaizdai: a) stereomikroskopiniu metodu ($\times 45$ didinimas) b) fluorescencinės mikroskopijos metodu ($\times 200$ didinimas)

Panašūs rezultatai pateikiami ir kituose tyrimuose, kuriuose analizuotas mikroplastiko dalelių pasiskirstymas vidaus dulkėse gyvenamosiose bei darbo aplinkose. Nustatyta, kad mikroplastiko dalelių dydžiai dažniausiai svyruoja nuo maždaug 50 iki 2500 μm , o reikšminga jų dalis patenka į 200–1000 μm intervalą. Taip pat nustatyta, kad gyvenamosiose patalpose vidutinis mikroplastiko dalelių dydis siekė $312 \pm 130 \mu\text{m}$, o biurų aplinkoje $526 \pm 328 \mu\text{m}$. Šios reikšmės buvo artimos šiame tyrime nustatytam vidutiniam dalelių dydžiui $264 \pm 613 \mu\text{m}$, todėl galima teigti, kad gauti rezultatai atitinka mokslinėje literatūroje aprašomas vidaus aplinkos mikroplastiko dalelių dydžių pasiskirstymo tendencijas [53]. Kitame tyrime taip pat pabrėžiama, kad vidaus aplinkoje dažniausiai dominuoja smulkesnės mikroplastiko dalelės. Nustatyta, kad vidutinis mikroplastiko dalelių dydis siekė apie 66 μm , o didžioji dalis dalelių patenka į $<100 \mu\text{m}$ intervalą. Šie duomenys patvirtina ir šiame tyrime nustatytą tendenciją, jog smulkesnės mikroplastiko dalelės sudaro didžiausią visų aptiktų dalelių dalį [54].

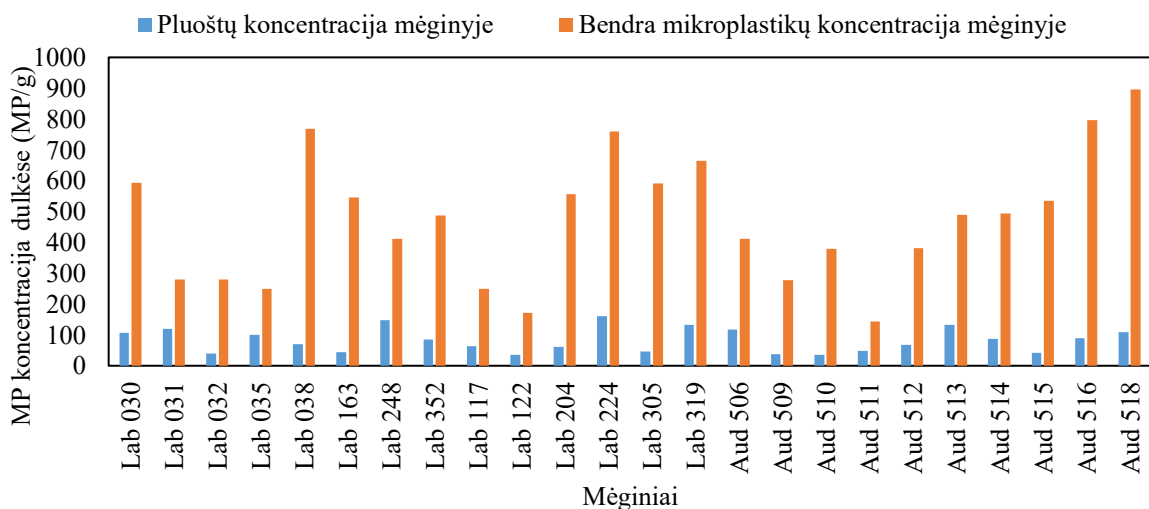
3.4. Pluoštinių mikroplastikų koncentracijos analizė



35 pav. Pluoštinių mikroplastikų koncentracijų pasiskirstymas laboratorijose ir auditorijose

Grafiškai nustatyta (35 pav), kad pluoštinių mikroplastikų koncentracijų medianos laboratorijose ir auditorijose buvo labai panašios, 78 MP/g laboratorijose ir 77 MP/g auditorijose. Nors laboratorijose nustatytas šiek tiek didesnis vidurkis $94 \pm 60 \text{ MP/g}$ nei auditorijose $78 \pm 45 \text{ MP/g}$, didžiausias

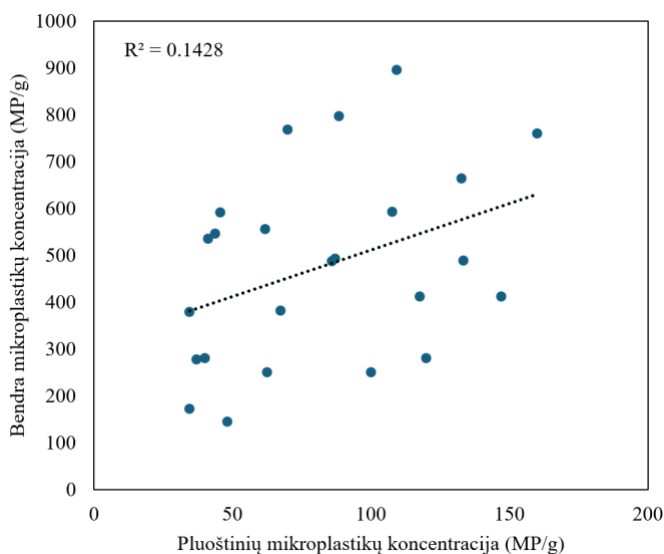
skirtumas pastebėtas reikšmių išsibarstyme. Laboratorijose koncentracijos intervalas siekė 34–160 MP/g, o auditorijose 34–133 MP/g. Tai parodė, kad laboratorijose pluoštinių mikroplastikų koncentracijų variacija buvo didesnė.



36 pav. Kiekvieno mėginio bendros mikroplastikų koncentracijos ir pluoštinių mikroplastikų koncentracijos palyginimas

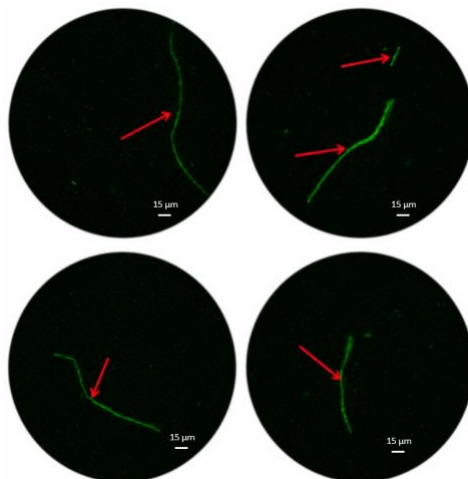
36 paveiksle pateiktas kiekvieno mėginio bendros mikroplastikų koncentracijos ir pluoštinių mikroplastikų koncentracijos palyginimas. Didžiausia pluoštinių mikroplastikų koncentracija buvo nustatyta mėginyje Lab 224 (160 MP/g), o mažiausios mėginyje Aud 509 (37 MP/g).

Siekiant įvertinti ryšį tarp pluoštinių dalelių koncentracijos ir bendros mikroplastikų koncentracijos mėginiuose, pirmiausia buvo įvertintas duomenų normalumas taikant *Shapiro–Wilk* testą. Nustatyta, kad tiek pluoštų koncentracijos, tiek bendros mikroplastikų koncentracijos duomenų pasiskirstymas statistškai reikšmingai nesiskyrė nuo normaliojo skirstinio (atitinkamai $p = 0,080$ ir $p = 0,598$), todėl ryšio stiprumui įvertinti buvo taikyta *Pearson* koreliacijos analizė. Analizė parodė silpną–vidutinę teigiamą priklausomybę tarp pluoštų koncentracijos ir bendros mikroplastikų koncentracijos mėginiuose ($r = 0,378$), tačiau šis ryšys nebuvo statistškai reikšmingas ($p = 0,069$).



37 pav. Pluoštų koncentracijos ir bendros mikroplastikų koncentracijos priklausomybė

Sklaidos diagrama (37 pav.) taip pat parodė, kad didėjant pluoštinių dalelių koncentracijai buvo stebima bendros mikroplastikų koncentracijos didėjimo tendencija, tačiau duomenų taškai išsidėstė gana plačiai. Mažas determinacijos koeficientas ($R^2 = 0,1428$) parodė, kad pluoštų koncentracija paaiškino tik nedidelę bendros mikroplastikų koncentracijos variacijos dalį. Nustačius mikroplastikų pluoštų koncentraciją, papildomai buvo įvertintas ir jų dydis. Nustatyta, kad pluoštų ilgis svyravo nuo 38,5 iki 4442,3 μm , o vidutinė reikšmė siekė $361 \pm 685 \mu\text{m}$. Gauti rezultatai parodė didelę pluoštų dydžių variaciją, mėginiuose aptikti tiek labai smulkūs, tiek kelių milimetrų ilgio pluoštai. Tokia įvairovė gali būti siejama su skirtinga jų kilme bei fragmentacijos laipsniu. 38 paveiksle pateikti fluorescencinės mikroskopijos pluoštų vaizdai. Raudonomis rodyklėmis pažymėtos dalelės, kurių ilgis buvo matuojamas, o mastelio juosta (15 μm) leidžia įvertinti jų dydį.



38 pav. Mikroplastikų pluoštų mikroskopiniai vaizdai ($\times 200$ didinimas)

Kituose tyrimuose mikroplastikų pluoštai dažniausiai įvardijami kaip dominuojanti mikroplastikų forma vidaus aplinkoje. Įvairiuose tyrimuose nustatyta, kad pluoštų dalis gyvenamosiose patalpose, universitetuose, biuruose ir kitose vidaus aplinkose dažnai sudaro daugiau kaip pusę visų aptinkamų mikroplastikų dalelių. Tačiau šiame tyrime nustatyta, kad mikroplastikų pluoštai sudarė apie 20 % visų aptiktų dalelių.

Kinijoje, Hangdžou mieste atliktame tyrime, kuriame buvo analizuojamos gyvenamosios patalpos, biurai, universitetų auditorijos ir viešbučiai, nustatyta, kad mikroplastikų pluoštai buvo dominuojanti forma. Tyrime nustatyta, kad pluoštai sudarė apie 92 % mikroplastikų biuruose, 88 % universitetų auditorijose, 87 % viešbučiuose ir apie 80 % gyvenamosiose patalpose. Tyrimo autoriai nurodė, kad dauguma pluoštų pateko į 100–1000 μm dydžio intervalą, o pagrindiniai jų šaltiniai buvo sintetinė tekstilė, drabužiai ir minkšti baldai [55]. Kolumbijoje, Puerto Colombia universiteto vidaus aplinkos tyrime buvo analizuojamos laboratorijų, auditorijų ir konferencijų salių dulkės. Tyrime nustatyta, kad pluoštinės formos mikroplastikai sudarė 70 % visų aptiktų dalelių. Šiame tyrime nustatyta, kad mikroplastikų pluoštų ilgis svyravo nuo 38,5 iki 4442,3 μm , o vidutinė reikšmė siekė $361 \pm 685 \mu\text{m}$, kas rodo didelę dydžių variaciją [33]. Jungtinėje Karalystėje, Birmingame atliktame tyrime, kuriame buvo analizuojami mikroplastikai gyvenamuosiuose namuose ir darbo vietose, nustatyta, kad pluoštai buvo dominuojanti mikroplastikų forma. Gyvenamuosiuose namuose pluoštai sudarė 66 % visų aptiktų mikroplastikų, o darbo vietose 63 %. Tyrime taip pat nustatyta, kad ore vyravo smulkesnės 10–25 μm dydžio dalelės, o nusėdusiose dulkėse dažniau aptikti didesni 50–100 μm dydžio pluoštai

[56]. Ispanijoje, Madrido universiteto auditorijose ir bibliotekose atliktame tyrime nustatyta, kad pluoštai buvo dominuojanti mikroplastikų forma ir sudarė 70 % visų aptiktų dalelių. Dauguma mikropluoštų buvo mažesni nei 500 μm [57].

Lyginant su literatūroje pateiktais duomenimis, šiame tyrime nustatyta mažesnė mikroplastikų pluoštų dalis, tačiau jų dydžių intervalas buvo panašus į kituose tyrimuose nustatytas reikšmes. Gauti skirtumai galėjo būti susiję su patalpų paskirtimi, žmonių aktyvumu, tekstilinių paviršių kiekiu bei skirtingais mikroplastikų surinkimo ir analizės metodais

3.5. EDI skaičiavimas

Tiriamųjų patalpų dulkių mėginiuose nustatytos mikroplastikų koncentracijos buvo panaudotos siekiant įvertinti galimą žmonių sąlytį su mikroplastiku per netyčinį patalpų dulkių prarijimą. EDI (angl. *Estimated Daily Intake*) reikšmės buvo apskaičiuotos įvertinant mikroplastikų koncentraciją dulkėse, ekspozicijos trukmę, įkvėpimo rodiklį bei kūno masę.

Laboratorijų mėginiams buvo taikyta 4 valandų per parą ekspozicijos trukmė, todėl ekspozicijos frakcija sudarė:

$$f = \frac{4}{24} = 0,16667.$$

Auditorijų mėginiams buvo taikyta 2 valandų per parą ekspozicijos trukmė, todėl ekspozicijos frakcija sudarė:

$$f = \frac{2}{24} = 0,08333.$$

Skaičiavimuose naudotas įkvėpimo rodiklis IR = 0,02 g/parą, o kūno masė visais atvejais laikyta 70 kg. Kaip pavyzdys pateikiamas Lab 030 mėginio EDI apskaičiavimas:

$$EDI = \frac{592 \cdot 0,02 \cdot 0,16667}{70} = 0,0282 \frac{\text{MP}}{\text{kg}} \text{ kūno masės per dieną.}$$

EDI skaičiavimo rezultatai pateikti 6 lentelėje. Nustatyta, kad laboratorijų mėginiuose EDI reikšmės buvo didesnės nei auditorijų mėginiuose, nes laboratorijoms taikyta ilgesnė ekspozicijos trukmė. Laboratorijų mėginiuose didžiausia EDI reikšmė buvo nustatyta Lab 038 mėginyje ir siekė 0,0365 MP/kg kūno masės per dieną, o mažiausia Lab 122 mėginyje, kur nustatyta 0,0082 MP/kg kūno masės per dieną. Auditorijų mėginiuose didžiausia EDI reikšmė nustatyta Aud 518 mėginyje 0,0213 MP/kg kūno masės per dieną, o mažiausia Aud 511 mėginyje 0,0034 MP/kg kūno masės per dieną. Apskaičiuotų EDI reikšmių bendras vidurkis sudarė $0,0177 \pm 0,0097$ MP/kg kūno masės per dieną.

6 lentelė. Apskaičiuotos EDI reikšmės skirtingų patalpų dulkių mėginiuose

Mėginys	Koncentracija dulkėse (MP/g);	EDI	Praleidimo laikas, val.	f	BW, kg	IR
Lab 030	592	0,0282	4	0,16667	70	0,02
Lab 031	280	0,0133				0,02
Lab 032	280	0,0133				0,02
Lab 035	250	0,0119				0,02
Lab 038	767	0,0365				0,02

Mėginys	Koncentracija dulkėse (MP/g);	EDI	Praleidimo laikas, val.	f	BW, kg	IR
Lab 163	546	0,0260	4			0,02
Lab 248	412	0,0196				0,02
Lab 352	487	0,0232				0,02
Lab 117	250	0,0119				0,02
Lab 122	172	0,0082				0,02
Lab 204	556	0,0265				0,02
Lab 224	760	0,0362				0,02
Lab 305	591	0,0281				0,02
Lab 319	664	0,0316				0,02
Aud 506	412	0,0098				2
Aud 509	278	0,0066	0,02			
Aud 510	379	0,0090	0,02			
Aud 511	144	0,0034	0,02			
Aud 512	382	0,0091	0,02			
Aud 513	489	0,0116	0,02			
Aud 514	493	0,0117	0,02			
Aud 515	412	0,0098	0,02			
Aud 516	796	0,0190	0,02			
Aud 518	895	0,0213	0,02			

Šio tyrimo metu apskaičiuotos EDI reikšmės svyravo nuo 0,0034 iki 0,0365 MP/kg kūno masės per dieną.

Viename tyrime, atliktame Kinijoje, Tiandzino miesto universitetų auditorijose, biuruose ir gyvenamosiose patalpose, buvo nustatyta, kad universiteto studentų EDI reikšmės siekė 0,22 MP/kg kūno masės per dieną. Tyrimo autoriai pabrėžė, kad mikroplastikų ekspozicija labai priklauso nuo patalpų tipo, žmonių aktyvumo bei dulkių kaupimosi intensyvumo [48]. Kitame tyrime, atliktame Pietų Korėjoje, Seulo universitetų laboratorijose, auditorijose ir konferencijų patalpose, nustatyta, kad didesnės mikroplastikų koncentracijos dažniausiai buvo aptinkamos intensyviau naudojamose vidaus erdvėse. Tyrime apskaičiuotos EDI reikšmės siekė vidutiniškai 0,47 MP/kg kūno masės per dieną [58]. Tyrime, atliktame Italijoje, Romos gyvenamosiose patalpose, kuriame buvo vertinamas mikroplastikų kiekis nusėdusiose vidaus dulkėse, nustatyta, kad tipinė suaugusiųjų ekspozicija siekė apie 0,80 MP/kg kūno masės per dieną, o mažų vaikų apie 2,94 MP/kg kūno masės per dieną. Tyrimo autoriai pažymėjo, kad vidaus dulkės yra vienas svarbiausių mikroplastikų poveikio šaltinių dėl nuolatinio žmonių kontakto su uždaru patalpų aplinka [59]. Dar viename Turkijoje, Stambulo mieste, atliktame vidaus patalpų tyrime apskaičiuota paros ekspozicija sudarė apie 0,49 MP/kg kūno masės per dieną. [60].

Apibendrinant galima teigti, kad šiame tyrime nustatytos EDI reikšmės buvo mažesnės nei daugelyje literatūroje pateikiamų rezultatų. Vis dėl to gauti duomenys sutapo su kitų autorių išvadomis, jog universitetų auditorijos, laboratorijos, biurai bei gyvenamosios patalpos yra reikšmingas mikroplastikų ekspozicijos šaltinis žmogui.

Išvados

1. Atlikta mokslinės literatūros analizė parodė, kad mikroplastikai yra plačiai aptinkami vidaus aplinkoje ir dažnai kaupiasi dulkėse. Vidaus dulkės laikomos viena pagrindinių mikroplastikų akumuliacijos terpių bei svarbiu galimos žmogaus ekspozicijos šaltiniu. Remiantis literatūros duomenimis, mikroplastikų kiekybiniam nustatymui dažniausiai taikomi stereomikroskopijos ir fluorescencinės mikroskopijos metodai.
2. Išanalizavus KTU Cheminės technologijos fakultete surinktus dulkių mėginius nustatyta, kad mikroplastikų koncentracija svyravo nuo 144 iki 895 MP/g dulkių, o vidurkis siekė 472 ± 196 MP/g. Didžiausios koncentracijos nustatytos organinės chemijos ir polimerų laboratorijose, o maksimali vertė užfiksuota C korpuso 038 laboratorijoje, kur vykdomi intensyvūs medžiagų paruošimo darbai. Mėginiuose vyravo smulkios 50–100 μm dalelės, sudariusios 32,8 % visų aptiktų mikroplastikų, o pluoštiniai mikroplastikai sudarė apie 20 %. Fluorescencinės mikroskopijos metodu nustatytos mažesnės koncentracijos nei stereomikroskopijos metodu; šie skirtumai buvo statistiškai reikšmingi auditorijų ir laboratorijų mėginiuose. Palyginti su kitų šalių tyrimais, šiame darbe nustatytos koncentracijos buvo santykinai mažesnės, o dalelių dydžių pasiskirstymas atitiko bendras tendencijas, nors pluoštų dalis buvo mažesnė nei dažniausiai nurodoma literatūroje.
3. Įvertinus galimą žmonių ekspoziciją mikroplastikams nustatyta, kad apskaičiuotos EDI reikšmės svyravo nuo 0,0034 iki 0,0365 MP/kg kūno masės per dieną. Kadangi šiuo metu nėra nustatytų sveikata pagrįstų referentinių ar toleruotinių mikroplastikų dozių, gauti rezultatai vertintini lyginamuoju aspektu. Lyginant su literatūroje pateikiamomis vidaus dulkių ekspozicijos reikšmėmis, šiame tyrime nustatytos EDI vertės buvo mažesnės už literatūroje nurodomą reikšmių intervalą.

Literatūros sąrašas

1. OECD. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options [interaktyvus]. *Global Plastics Outlook*. 2022 [žiūrėta 2026-02-14.] Prieiga per internetą: <https://doi:10.1787/de747aef-en>.
2. AGEEL, Hassan, Khalid, HARRAD, Stuart, ABDALLAH, Mohamed Abou-Elwafa. Microplastics in settled indoor dust: Implications for human exposure. *Emerging Contaminants* [interaktyvus]. 2025, t. 11, nr. 3, p. 100506 [žiūrėta 2026-02-14]. ISSN 2405-6650. Prieiga per: doi:10.1016/j.emcon.2025.100506.
3. CERCEO, Elizabeth. The climate crisis in clinical practice: Addressing air pollution, heat, and microplastics. *European Journal of Internal Medicine* [interaktyvus]. 2025, t. 139, p. 106435 [žiūrėta 2026-02-17]. ISSN 0953-6205. Prieiga per: doi:10.1016/j.ejim.2025.07.031.
4. UNITED NATIONS. *THE 17 GOALS, Sustainable Development* [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2026-02-15]. Prieiga per internetą: <https://sdgs.un.org/goals>.
5. WANG, Yung-Li, LIN, Yen-Chung, LIU, Wen-Chih, LEE, Yu-Hsuan, HUI-WEN, Chiu. Air pollution and its impacts on health: Focus on microplastics and nanoplastics. *Ecotoxicology and Environmental Safety* [interaktyvus]. 2025, t. 299, p. 118402 [žiūrėta 2026-02-17]. ISSN 0147-6513. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118402.
6. OSMAN, Ahmed I., HOSNY, Mohamed, ELTAWEL, Abdelazeem S., OMAR, Sara, ELGARAHY, Ahmed ir kiti. Microplastic sources, formation, toxicity and remediation: a review. *Environmental Chemistry Letters* [interaktyvus]. 2023, t. 21, nr. 4, p. 2129–2169 [žiūrėta 2026-02-17]. ISSN 1610-3661. Prieiga per: doi:10.1007/s10311-023-01593-3.
7. AN, Li-hui, LIU, Qing, DENG, Yixiang, WU, Wennan. Sources of Microplastic in the Environment. *Handbook of Environmental Chemistry* [interaktyvus]. 2020, t. 95, p. 143–159 [žiūrėta 2026-01-14]. ISSN 1867-979X. Prieiga per: doi:10.1007/698_2020_449.
8. YANG, Tingting, LUO, Jian ir NOWACK, Bernd. Characterization of Nanoplastics, Fibrils, and Microplastics Released during Washing and Abrasion of Polyester Textiles. *Environmental Science & Technology* [interaktyvus]. 2021, t. 55, nr. 23, p. 15873–15881 [žiūrėta 2026-02-14]. ISSN 0013-936X. Prieiga per: doi:10.1021/acs.est.1c04826
9. ONYEDIBE, Victor, KAKAR, Fazal L., OKOYE, Francis, ELBESHBISHY, Elsayed, HAMZA, Rania ir kiti. Sources and occurrence of microplastics and nanoplastics in the environment. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. [interaktyvus]. 2023, p. 33–58 [žiūrėta 2026-02-14]. ISBN 978-0-323-99908-3. Prieiga per: doi:10.1016/b978-0-323-99908-3.00019-1.
10. MAGED, Ali. Potential sources of microplastics in the environment. *Remediation Technologies for Microplastics in Aquatic Environments* [interaktyvus]. 2026, p. 35–69 [žiūrėta 2026-04-17]. Prieiga per: doi.org/10.1016/B978-0-443-33829-8.00008-7.
11. KUMAR, J. Aravind, RENITA, A. Annam, SATHISH, Jacob, Ashwin, BIN, Bai, SHI, Jinwen ir kiti. Microplastics in the environment: Sources, impacts, degradation strategies and energy recovery options—A rigorous review. *Process Safety and Environmental Protection* [interaktyvus]. 2026, p. 104323 [žiūrėta 2026-03-17]. Prieiga per: doi:10.1016/j.psep.2026.104323.
12. ZHANG, Kai, HAMIDIAN, Amir, Hossein, TUBIC Aleksandra, ZHANG, Yu, FANG, James ir kiti. Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review. *Environmental Pollution* [interaktyvus]. 2021, t. 274, p. 116554 [žiūrėta 2026-03-14]. ISSN 0269-7491. Prieiga per: doi:10.1016/j.envpol.2021.116554.

13. PONDALA, Sandeep ir BOTSA, Siva M. Physical, thermal, chemical and biological approaches for plastics degradation—A review. *Cleaner Chemical Engineering* [interaktyvus]. 2025, t. 11, p. 100162 [žiūrėta 2026-02-14]. ISSN 2772-3958. Prieiga per: doi:10.1016/j.clce.2025.100162.
14. CHOUCHENE, Khaoula, DA COSTA, Joao P., CHAMKHA, Mohamed, KSIBI, Mohamed ir SAYADI, Sami. Effects of microplastics' physical and chemical properties on aquatic organisms: State-of-the-art and future research trends. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* [interaktyvus]. 2023, t. 166, p. 117192 [žiūrėta 2026-03-01]. ISSN 0165-9936. Prieiga per: doi:10.1016/j.trac.2023.117192.
15. KIRAN, B. R., KOPPERI, Harsha ir VENKATA MOHAN, S. Micro/nano-plastics occurrence, identification, risk analysis and mitigation: challenges and perspectives. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* [interaktyvus]. 2022, t. 21, nr. 1, p. 169–203 [žiūrėta 2026-03-01]. ISSN 1569-1705. Prieiga per: doi:10.1007/s11157-021-09609-6.
16. PRAJAPATI, Anjali, NARAYAN VAIDYA, Anil ir KUMAR, A. R. Microplastic properties and their interaction with hydrophobic organic contaminants: a review. *Environmental Science and Pollution Research* [interaktyvus]. 2022, t. 29, nr. 33, p. 49490–49512 [žiūrėta 2026-02-14]. ISSN 0944-1344. Prieiga per: doi:10.1007/s11356-022-20723-y.
17. CASAGRANDE, Chiara, VERONES, Francesca, SOBRAL, Paula ir MARTINHO, Graça. Physical properties of microplastics affecting the aquatic biota: A review. *Environmental Advances* [interaktyvus]. 2024, t. 17, p. 100566 [žiūrėta 2026-05-17]. Prieiga per: doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100566.
18. HAHLADAKIS, John N., VELIS, Costas A., WEBER, Roland, IACOVIDOU, Eleni, PURNEL, Phill ir kiti. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials* [interaktyvus]. 2018, t. 344, p. 179–199 [žiūrėta 2026-03-24]. ISSN 0304-3894. Prieiga per: doi:10.1016/j.jhazmat.2017.10.014.
19. FESWICK, Amanda, GRIFFITT, R. J., SIEBEIN, Karen ir BARBER, D. S. Uptake, retention and internalization of quantum dots in *Daphnia* is influenced by particle surface functionalization. *Aquatic Toxicology* [interaktyvus]. 2013, t. 130–131, p. 210–218 [žiūrėta 2026-02-14]. ISSN 0166-445X. Prieiga per: doi:10.1016/j.aquatox.2013.01.002.
20. KUMAR, Manish. Current research trends on micro- and nano-plastics as an emerging threat to global environment: A review. *Journal of Hazardous Materials* [interaktyvus]. 2021, t. 409, p. 124967 [žiūrėta 2026-02-24]. ISSN 0304-3894. Prieiga per: doi:10.1016/j.jhazmat.2020.124967.
21. LIU, Shuo, HE, Yifan, YIN, Jun, ZHU, Qian, JIANG, Guibin ir kiti. Neurotoxicities induced by micro/nanoplastics: A review focusing on the risks of neurological diseases. *Journal of Hazardous Materials* [interaktyvus]. 2024, t. 469, p. 134054 [žiūrėta 2026-03-04]. ISSN 0304-3894. Prieiga per: doi:10.1016/j.jhazmat.2024.134054.
22. NGUYEN, Linh H. A concept for the biotechnological minimizing of emerging plastics, micro- and nano-plastics pollutants from the environment: A review. *Environmental Research* [interaktyvus]. 2023, t. 216, p. 114342 [žiūrėta 2026-02-18]. ISSN 0013-9351. Prieiga per: doi:10.1016/j.envres.2022.114342.
23. LIU, Ying, NIE, Zhen, MENG, Yu, LIU, Guannani, CHEN, Yu ir kiti. Influence of meteorological conditions on atmospheric microplastic transport and deposition. *Environmental Research* [interaktyvus]. 2025, t. 265, p. 120460 [žiūrėta 2026-05-12]. ISSN 0013-9351. Prieiga per: doi:10.1016/j.envres.2024.120460.

24. YANG, Shuai, BRASSEUR, Guy, WALTERS, Sarah, LICHTIG, Peter. Global atmospheric distribution of microplastics with evidence of low oceanic emissions. *npj Climate and Atmospheric Science* [interaktyvus]. 2025, t. 8, nr. 1, p. 1–10 [žiūrėta 2026-05-12]. ISSN 2397-3722. Prieiga per: doi:10.1038/s41612-025-00914-3.
25. SALTHAMMER, Tunga. Microplastics and their Additives in the Indoor Environment. *Angewandte Chemie* [interaktyvus]. 2022, t. 134, nr. 32 [žiūrėta 2026-04-24]. ISSN 0044-8249. Prieiga per: doi:10.1002/ange.202205713.
26. VIANELLO, Andrea, JENSEN, Rasmus L., LIU, Li ir VOLLERTSEN, Jes. Simulating human exposure to indoor airborne microplastics using a Breathing Thermal Manikin. *Scientific Reports* [interaktyvus]. 2019, t. 9, nr. 1 [žiūrėta 2026-05-07.]. ISSN 2045-2322. Prieiga per: doi:10.1038/s41598-019-45054-w.
27. LIU, Kai, WANG, Xin, FANG, Ting, XU, Peng. Source and potential risk assessment of suspended atmospheric microplastics in Shanghai. *Science of The Total Environment* [interaktyvus]. 2019, t. 675, p. 462–471 [žiūrėta 2026-02-29]. ISSN 0048-9697. Prieiga per: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.04.110.
28. MEHTA, Nidhi, KOZIELSKA, Beata, LUNAGARIA, Jay ir LADVA, K. D. Characterization and exposure assessment of indoor microplastics in hospital indoor settled dust: First insides from India. *Building and Environment* [interaktyvus]. 2025, t. 279, p. 113065 [žiūrėta 2026-04-30]. ISSN 0360-1323. Prieiga per: doi:10.1016/j.buildenv.2025.113065.
29. LIU, Wei. Microplastics and nanoplastics in indoor environments: Current knowledge and future research. *Journal of Building Engineering* [interaktyvus]. 2025, t. 114, p. 114242 [žiūrėta 2026-02-14]. ISSN 2352-7102. Prieiga per: doi:10.1016/j.jobbe.2025.114242.
30. PRATA, Joana C., CASTRO, Joana L., DA COSTA, João P., DUARTE, Armando C., ROCHA-SANTOS, Teresa ir kiti. The importance of contamination control in airborne fibers and microplastic sampling: Experiences from indoor and outdoor air sampling in Aveiro, Portugal. *Marine Pollution Bulletin* [interaktyvus]. 2020, t. 159, p. 111522 [žiūrėta 2026-04-14]. ISSN 0025-326X. Prieiga per: doi:10.1016/j.marpolbul.2020.111522.
31. COWGER, Woodrow. Critical Review of Processing and Classification Techniques for Images and Spectra in Microplastic Research. *Applied Spectroscopy* [interaktyvus]. 2020, t. 74, nr. 9, p. 989–1010 [žiūrėta 2026-03-21]. ISSN 0003-7028. Prieiga per: doi:10.1177/0003702820929064.
32. ČAPLA, Ján, ZAJÁC, Peter, ČURLEJ, Jozef, FIKSELOVÁ, Martina, HLEBA, Lukas. REFERENCE MATERIALS FOR MICROPLASTICS: KEY TO STANDARDIZATION AND VALIDATION OF METHODS IN FOOD AND THE ENVIRONMENT. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences* [interaktyvus]. 2026, p. e13092 [žiūrėta 2026-03-24]. ISSN 1338-5178. Prieiga per: doi:10.55251/JMBFS.13092.
33. AVILÉS VALERA, María G., ARANA RENGIFO, Víctor A. ir GRANDE-TOVAR, Carlos D. Microplastics in settled dust from university indoor environments: Puerto Colombia, Colombia. *Environmental Science: Atmospheres* [interaktyvus]. 2025, t. 5, nr. 3, p. 332–347 [žiūrėta 2026-04-14]. ISSN 2634-3606. Prieiga per: doi:10.55251/jmbfs.13092.doi:10.1039/d4ea00139g.
34. BOTTONE, Alessandra, BOILY, Jean-François, SHCHUKAREV, Andrey, ANDERSSON, Patrik ir KLAMINDER, Jonatan. Sodium hypochlorite as an oxidizing agent for removal of soil organic matter before microplastics analyses. *Journal of Environmental Quality* [interaktyvus]. 2022, t. 51, nr. 1, p. 112–122 [žiūrėta 2026-04-30]. ISSN 0047-2425. Prieiga per: doi:10.1002/jeq2.20321.
35. PRATA, Joana C., DA COSTA, João P., DUARTE, Armando C. ir ROCHA-SANTOS, Teresa. Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review. *TrAC*

- Trends in Analytical Chemistry* [interaktyvus]. 2019, t. 110, p. 150–159 [žiūrėta 2026-03-04]. ISSN 0165-9936. Prieiga per: doi:10.1016/j.trac.2018.10.029.
36. MARIANO, Stefania, TACCONI, Sara, FIDALEO, Marco, ROSSI, Marco, DINI, Luciana. Micro and Nanoplastics Identification: Classic Methods and Innovative Detection Techniques. *Frontiers in Toxicology* [interaktyvus]. 2021, t. 3, p. 636640 [žiūrėta 2026-04-24]. ISSN 2673-3080. Prieiga per: doi:10.3389/ftox.2021.636640.
37. RAFIQ, Ayesha ir XU, Jian L. Microplastics in waste management systems: A review of analytical methods, challenges and prospects. *Waste Management* [interaktyvus]. 2023, t. 171, p. 54–70 [žiūrėta 2026-04-14]. ISSN 0956-053X. Prieiga per: doi:10.1016/j.wasman.2023.08.015.
38. CHEN, Guangyi, FU, Zhiyong, YANG, Hui ir WANG, Jun. An overview of analytical methods for detecting microplastics in the atmosphere. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* [interaktyvus]. 2020, t. 130, p. 115981 [žiūrėta 2026-03-12]. ISSN 0165-9936. Prieiga per: doi:10.1016/j.trac.2020.115981.
39. COWGER, Woodrow. Critical Review of Processing and Classification Techniques for Images and Spectra in Microplastic Research. *Applied Spectroscopy* [interaktyvus]. 2020, t. 74, nr. 9, p. 989–1010 [žiūrėta 2026-02-12]. ISSN 0003-7028. Prieiga per: doi:10.1177/0003702820929064.
40. ARAUJO, C. F., NOLASCO, M. M., RIBEIRO, A. M. P. ir RIBEIRO-CLARO, P. J. A. Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water Research* [interaktyvus]. 2018, t. 142, p. 426–440 [žiūrėta 2026-03-23]. ISSN 0043-1354. Prieiga per: doi:10.1016/j.watres.2018.05.060.
41. Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) method for microplastics identification. *Solen* [interaktyvus]. N.d. [žiūrėta 2025-03-14]. Prieiga per internetą: <https://solenvn.com/en/fourier-transform-infrared-spectroscopy-ftir-method-for-microplastics-identification/>.
42. HAN, Inhye, LEE, Changho, BELCHEZ, Christopher, SHIPPER, Adam G., CHANMI, Lee. Microplastics in Urban Ambient Air: A Rapid Review of Active Sampling and Analytical Methods for Human Risk Assessment. *Environments* [interaktyvus]. 2024, t. 11, nr. 11, p. 256 [žiūrėta 2026-03-24]. ISSN 2076-3298. Prieiga per: doi:10.3390/environments11110256.
43. LUO, Xi, WANG, Zhaoqing, YANG, Ling, GAO, Tanguang, ZHANG, Yulan. A review of analytical methods and models used in atmospheric microplastic research. *Science of The Total Environment* [interaktyvus]. 2022, t. 828, p. 154487 [žiūrėta 2026-03-24]. ISSN 0048-9697. Prieiga per: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.154487.
44. TONG, Hao, JIANG, Qi, ZHONG, Xin ir HU, Xiaowei. Rhodamine B dye staining for visualizing microplastics in laboratory-based studies. *Environmental Science and Pollution Research* [interaktyvus]. 2021, t. 28, nr. 4, p. 4209–4215 [žiūrėta 2026-03-24]. ISSN 0944-1344. Prieiga per: doi:10.1007/s11356-020-10801-4.
45. EUROPOS PARLAMENTO IR TARYBOS DIREKTYVA (ES) 2019/904 dėl tam tikrų plastikinių gaminių poveikio aplinkai mažinimo. *EUR-Lex* [interaktyvus]. 2019. [žiūrėta 2026-04-24]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/?uri=celex%3A32019L0904>
46. KENTIN, Elif. Restricting microplastics in the European Union: Process and criteria under REACH. *The European Physical Journal Plus* [interaktyvus]. 2018, t. 133, nr. 10, p. 1–12 [žiūrėta 2026-04-24]. ISSN 2190-5444. Prieiga per: doi:10.1140/epjp/i2018-12228-2.
47. OLABI, Aed G., OBAIDEEN, Khaled, ELSAID, Khaled, WILBERFORCE, Tabbi, SAYED, Enas Taha ir kiti. Assessment of the pre-combustion carbon capture contribution into sustainable development goals SDGs using novel indicators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

- [interaktyvus]. 2022, t. 153, p. 111710 [žiūrėta 2026-02-14]. ISSN 1364-0321. Prieiga per: doi: 10.1016/j.rser.2021.111710.
48. ZHU, Jing, ZHANG, Xin, LIAO, Kai, WU, Peng ir JIN, Hong. Microplastics in dust from different indoor environments. *Science of The Total Environment* [interaktyvus]. 2022, t. 833, p. 155256 [žiūrėta 2026-04-29]. ISSN 0048-9697. Prieiga per: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155256.
49. MAES, Thomas, JESSOP, Rachel, WELLNER, Nicole, HAUPT, Karsten ir MAYES, Adam G. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red. *Scientific Reports* [interaktyvus]. 2017, t. 7, nr. 1, p. 44501 [žiūrėta 2026-04-12]. ISSN 2045-2322. Prieiga per: doi:10.1038/srep44501.
50. SHIM, Won Joon, SONG, Young Kyoung, HONG, Seong Hwan ir JANG, Min. Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining. *Marine Pollution Bulletin* [interaktyvus]. 2016, t. 113, nr. 1–2, p. 469–476 [žiūrėta 2026-05-12]. ISSN 0025-326X. Prieiga per: doi:10.1016/j.marpolbul.2016.10.049.
51. MEHDI, Zarei, WANG, Jing ir KOZIELSKA, Behnam. Assessment of Indoor Microplastics in Settled Dust at a High-Traffic Transit Building: Characterization, Abundance, Polymer Profiling, and Ingestion Exposure. *Journal of Environmental Sciences* [interaktyvus]. 2026 [žiūrėta 2026-05-12]. ISSN 1001-0742. Prieiga per: doi:10.1016/j.jes.2026.04.007.
52. MOHAMMAD, Nematollahi, FATEMEH, Zarei, BEHNAM, Keshavarzi, MEHDI, Zarei, MOORE, Farid ir kiti. Microplastic occurrence in settled indoor dust in schools. *Science of The Total Environment* [interaktyvus]. 2022, t. 807, p. 150984 [žiūrėta 2026-02-14]. ISSN 0048-9697. Prieiga per: doi:10.1016/j.scitotenv.2021.150984.
53. ZHU, Jing, ZHANG, Xin, LIAO, Kai, WU, Peng, JIN, Hangbiao ir kiti. Microplastics in dust from different indoor environments. *Science of The Total Environment* [interaktyvus]. 2022, t. 833 [žiūrėta 2026-05-14]. ISSN 0048-9697. Prieiga per: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.155256.
54. ZHAI, Xiaoyan, ZHENG, Hui, XU, Yan, ZHAO, Rui, WANG, Wei ir GUO, Hong. Characterization and quantification of microplastics in indoor environments. *Heliyon* [interaktyvus]. 2023, t. 9, nr. 5, p. e15901 [žiūrėta 2026-05-14]. ISSN 2405-8440. Prieiga per: doi:10.1016/j.heliyon.2023.e15901.
55. ZHANG, Qian, ZHAO, Yu, DU, Fei, CAI, Hong, WANG, Guojun ir SHI, Huan. Microplastic Fallout in Different Indoor Environments. *Environmental Science & Technology* [interaktyvus]. 2020, t. 54, nr. 11, p. 6530–6539 [žiūrėta 2026-05-14]. ISSN 0013-936X. Prieiga per: doi:10.1021/acs.est.0c00087.
56. JENNER, Louise C., ROTCHELL, Jeanette M., BENNETT, Robert T., COWEN, Matthew, TENTZERIS, Vasileios ir kiti. Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of The Total Environment* [interaktyvus]. 2022, t. 831, p. 154907 [žiūrėta 2026-05-16]. ISSN 0048-9697. Prieiga per: doi:10.1016/j.scitotenv.2022.154907.
57. BHAT, Mansoor Ahmad, GEDIK, Kadir, GAGA, Eftade O. *Characterization of Indoor Airborne Microplastics in a University Campus*. 10th International Symposium on Atmospheric Sciences [interaktyvus]. Istanbul, 2022 [žiūrėta 2026-02-14]. Prieiga per internetą: https://www.researchgate.net/publication/364488906_Characterization_of_Indoor_Airborne_Microplastics_in_a_University_Campus
58. KIM, In-Soon, CHAE, Dong Hyun, KIM, Seong Kyu, CHOI, Seung Byung. Factors Influencing the Spatial Variation of Microplastics on High-Tidal Coastal Beaches in Korea. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* [interaktyvus]. 2015, t. 69, nr. 3 [žiūrėta 2026-05-16]. ISSN 0090-4341. Prieiga per: doi:10.1007/s00244-015-0155-6.

59. SHARIFI, Soltani, NEDA, Taylor, MARK Patrick, WILSON, Scott Paton. International quantification of microplastics in indoor dust: prevalence, exposure and risk assessment. *Environmental Pollution* [interaktyvus]. 2022, t. 312 [žiūrėta 2026-05-17]. ISSN 0269-7491. Prieiga per: doi:10.1016/j.envpol.2022.119957.
60. SAYGIN, Hasan, BAYSAL, Asli, TARAKCI ZORA, Sevilay, TILKILI, Batuhan. Characterization and an exposure risk assessment of microplastics in settled house floor dust in Istanbul, Turkey. *Environmental Science and Pollution Research International* [interaktyvus]. 2023, t. 30, nr. 57, p. 121030–121049 [žiūrėta 2026-05-17]. ISSN 0944-1344. Prieiga per: doi:10.1007/s11356-023-30543-3.

Publikacijų sąrašas

MOKSLINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ SKELBIMAS KONFERENCIJOSE

1. Eimutytė, Monika; Kaunelienė, Violeta. Determination of the Quantity and Properties of Microplastics in Settled Indoor Dust // Chemija ir cheminė technologija 2026: studentų mokslinės konferencijos pranešimų medžiaga, Kaunas, 2026 m. gegužės 22 d. / Kauno technologijos universitetas, Cheminės technologijos fakultetas, Kaunas.