



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Dominykas Dargevičius

**TERMINIO LAIDŲ IZOLIACINĖS MEDŽIAGOS PAŠALINIMO
METODO TYRIMAI**

**STUDY OF THE METHOD OF THERMAL STRIPPING OF
CABLES INSULATION**

Baigiamasis magistro darbas

Mechanikos inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX047

Mechaninių sistemų projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

(Parašas)

doc. dr. Irmantas Gedzevičius
(Vardas, pavardė)

(Data)

Dominykas Dargevičius

**TERMINIO LAIDŲ IZOLIACINĖS MEDŽIAGOS PAŠALINIMO
METODO TYRIMAI**

**STUDY OF THE METHOD OF THERMAL STRIPPING OF
CABLES INSULATION**

Baigiamasis magistro darbas

Mechaniko inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX047

Mechaninių sistemų projektavimo ir gamybos specializacija

Mechanikos inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

prof. dr. Vadim Mokšin

(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

Angelika Petretienė

(Pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2025

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

MECHANIKOS FAKULTETAS

MECHANIKOS IR MEDŽIAGŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Studijų kryptis: Mechanikos inžinerija

Studijų programa: Mechanikos inžinerija , valstybinis kodas 6211EX047

Specializacija: Mechaninių sistemų projektavimas ir gamyba

TVIRTINU

Katedros vedėjas

Irmantas Gedzevičius

2025-04-13

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

Nr. MSGfm-23–6324

Vilnius

Studentas (-ė): Dominykas Dargevičius

Baigiamojo darbo tema: Terminio laidų izoliacinės medžiagos pašalinimo metodo tyrimai

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas pagal numatytą studijų kalendorinį grafiką.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Uždaviniai tikslui pasiekti: Įvadas, Mokslinės literatūros analizė, Skaitmeninių tyrimų objektas ir metodika, 3D ir skaitmeninis modelis, Skaitmeninių tyrimų rezultatai bei jų palyginimas su eksperimento rezultatais, Išvados ir rekomendacijos, Literatūros sąrašas

Vadovas profesorius Vadim Mokšin

Vilnius, 2025

<table border="1"> <tr><td>Vilniaus Gedimino technikos universitetas</td></tr> <tr><td>Mechanikos fakultetas</td></tr> <tr><td>Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra</td></tr> </table>		Vilniaus Gedimino technikos universitetas	Mechanikos fakultetas	Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Egz. sk.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Data-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Egz. sk.		Data-.....-.....	
Vilniaus Gedimino technikos universitetas												
Mechanikos fakultetas												
Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedra												
ISBN	ISSN											
Egz. sk.												
Data-.....-.....												
Antrosios pakopos studijų Mechanikos inžinerijos programos magistro baigiamasis darbas 4												
Pavadinimas		Terminio laidų izoliacinės medžiagos pašalinimo metodo tyrimai										
Autorius		Dominykas Dargevičius										
Vadovas		Vadim Mokšin										
		Kalba: lietuvių										
Anotacija Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamas terminis laidų izoliacinės medžiagos pašalinimo metodas. Pagrindinis tyrimo tikslas – sukurti eksperimentinę įrangą ir skaitmeninį modelį laidų izoliacijai šalinti, kai laidas praleidžiamas tarp dviejų besisukančių būgnų, vienam iš jų esant kaitinamam. Siekiama įvertinti metodo efektyvumą taikant įvairias izoliacines medžiagas (PVC, PE, PTFE), temperatūras ir judėjimo greičius. Darbo struktūrą sudaro įvadas, keturi pagrindiniai skyriai bei išvados ir rekomendacijos. Pirmajame pateikiama išsami mokslinės literatūros analizė, susijusi su laidų perdirbimo poveikiu aplinkai ir izoliacijos šalinimo metodais. Antrajame skyriuje aprašoma eksperimentinio tyrimo metodika ir tyrimų stendas. Trečiajame pristatomas skaitmeninis COMSOL modelis, o ketvirtajame skyriuje pateikiami tyrimų rezultatai ir atliekamas eksperimentinių bei skaitmeninių duomenų palyginimas. Tyrimas atskleidė, kad siūlomas termiškai grindžiamas izoliacijos šalinimo metodas gali būti efektyvus sprendimas tiek perdirbimo, tiek aplinkosauginiu požiūriu. Tyrimo metu sukurta įranga ir skaitmeninis modelis leidžia optimizuoti proceso parametrus ir prisidėti prie inovatyvių laidų perdirbimo sprendimų kūrimo.												
Prasminiai žodžiai: Terminis šalinimas, laidų izoliacija, COMSOL modeliavimas, perdirbimas, izoliacinės medžiagos PVC, PE, PTFE, eksperimentinis stendas, skaitmeninis modelis, energijos efektyvumas.												

<table border="1"> <tr> <td>Vilnius Gediminas Technical University</td> </tr> <tr> <td>Faculty of Mechanics</td> </tr> <tr> <td>Department of Mechanical and Material Engineering</td> </tr> </table>		Vilnius Gediminas Technical University	Faculty of Mechanics	Department of Mechanical and Material Engineering	<table border="1"> <tr> <td>ISBN</td> <td>ISSN</td> </tr> <tr> <td>Copies No.</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Date-.....-.....</td> <td></td> </tr> </table>		ISBN	ISSN	Copies No.		Date-.....-.....	
Vilnius Gediminas Technical University												
Faculty of Mechanics												
Department of Mechanical and Material Engineering												
ISBN	ISSN											
Copies No.												
Date-.....-.....												
Master Degree Studies Mechanical Engineering study programme Master Graduation Thesis 4												
Title		Study of the Method of Thermal Stripping of Cables Insulation										
Author		Dominykas Dargevičius										
Academic supervisor		Vadim Mokšin										
		Thesis language: Lithuanian										
Annotation The final master's thesis examines the thermal method for removing wire insulation material. The main goal of the study is to develop experimental equipment and a digital model for insulation removal, in which the wire passes between two rotating drums, one of which is heated. The aim is to evaluate the effectiveness of the method when applied to different insulation materials (PVC, PE, PTFE), various temperatures, and movement speeds. The structure of the thesis consists of an introduction, four main chapters, and conclusions with recommendations. The first chapter provides a comprehensive review of scientific literature related to the environmental impact of wire recycling and insulation removal methods. The second chapter describes the experimental methodology and the testing setup. The third chapter presents the digital COMSOL model, while the fourth chapter contains the research results and a comparison between experimental and digital data. The study revealed that the proposed thermally based insulation removal method can be an effective solution both from a recycling and environmental perspective. The developed equipment and digital model enable optimization of process parameters and contribute to the development of innovative wire recycling solutions.												
Keywords: Thermal removal, wire insulation, COMSOL modeling, recycling, insulation materials PVC, PE, PTFE, experimental setup, digital model, energy efficiency.												

Turinys

ĮVADAS.....	12
1. MOKSLINĖS LITERATŪROS APŽVALGA.....	17
1.1. Poveikis aplinkai.....	17
1.2. Metalo atkūrimo efektyvumas	17
1.3. Nužievinimo metodų efektyvumo apžvalga	19
1.4. Apibendrinimas.....	37
2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA IR STENDAS.....	38
2.1. Tyrimų stendas	38
2.2. Bandymo ruošinai	43
2.3. Tyrimų medžiagos.....	44
2.4. Eksperimentinių tyrimų metodika.....	45
3. SKAITMENINIO TYRIMO METODIKA	47
4. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ.....	50
4.1. Eksperimentinių tyrimų rezultatai.....	50
4.2. Skaitmeninių tyrimų rezultatai.....	56
4.3. Tyrimo patikimumas ir rezultatų validacija	63
IŠVADOS.....	66
REKOMENDACIJOS	67
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	68

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Grūdelių dydžio pasiskirstymas ir Al bei PE-X masės dalis atliekų frakcijoje (Bedeković ir Trbović 2020)	30
2 lentelė. Elektrostatinio atskyrimo 1–2 mm klasės rezultatai (Bedeković ir Trbović, 2020)	32
3 lentelė. Eksperimentinė matrica ir sijojimo atskyrimo rezultatai (trijų bandymų vidurkis)(Pita ir Castilho, 2018).....	34
4 lentelė. Eksperimentinė matrica ir vibruojančio stalo atskyrimo rezultatai (trijų bandymų vidurkis) (Pita ir Castilho, 2018)	34
5 lentelė. Laidų žievės pašalinimo greitis, naudojant skirtingas temperatūras.....	42
6 lentelė. COMSOL aplinkoje naudojamų medžiagų savybės	47

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. EEA susidarymo rodiklių geografinis pasiskirstymas 2017 m. (Mihai ir kt., 2019)	18
2 pav. Metalų chloridų susidarymo termodinaminės savybės (Kameda ir kt., 2013)	20
3 pav. Metalų chloridų garų slėgis esant skirtingoms temperatūroms: (1) $AlCl_3$, (2) $FeCl_3$, (3) $SnCl_2$, (4) $ZnCl_2$, (5) $PbCl_2$, (6) $FeCl_2$, (7) $MgCl_2$, and (8) $CuCl$. (Kameda ir kt., 2013)	20
4 pav. Metalų atgavimo rodikliai esant skirtingoms temperatūroms HCl turinčioje atmosferoje (Kameda ir kt., 2013)	21
5 pav. Metalų atgavimo rodikliai esant skirtingoms temperatūroms azoto atmosferoje (Kameda ir kt., 2013)	21
6 pav. PVC dangos padengimas organiniu tirpikliu (Xu ir kt., 2019)	22
7 pav. Tyrimo pateiktos tirpiklių HSP ir RED vertės: a) 3D HSP diagrama, b) 2D HSP diagrama ir c) tirpiklių RED vertės. 1 – cikloheksanona, 2 – ciklopentanona, 3 – dichlormetanas, 4 – nitrobenzenas, 5 – acetonas, 6 – etilacetatas, 7 – dimetilsulfoksidas, 8-1-4 -dioksanas, 9 – toluenas, 10 – pksilenas, 11 – dietileris, 12 – heksanas, 13 – metanolis, 14 – etilenglikolis, 15 - vanduo. HSP vertės ir sferos spindulys ($R_0 = 8,0$) gaunami iš HSPiP. (Xu ir kt., 2019)	22
8 pav. Atskirtų vario, PVC ir neatskirtų elektros kabelių, 40 min. maišant penkiuose organiniuose tirpikliuose, fotografiniai vaizdai. (Xu ir kt., 2019)	23
9 pav. Atskyrimo Efektyvumas (a) R_{sep} , (b) plastifikatorius Y_{ext} ir (c) elektros kabelių plastifikatorius Y_{rec} , kai maišomi įvairiuose tirpikliuose kaip maišymo laiko funkcijos. (Xu ir kt., 2019)	23
10 pav. Skirtingo ilgio elektrinių kabelių atskyrimo greitis acetone kaip maišymo laiko funkcijos (Xu ir kt., 2019)	23
11 pav. Elektros kabelių, atskirtų maišant acetone, fotografiniai vaizdai: a) visiškai atskirti 3 cm kabeliai, b) 71 % atskirti 5 cm kabeliai ir c) 48 cm atskirti 8 cm kabeliai ir c) 48 % atskirti 8 cm kabeliai (Xu ir kt., 2019)	24
12 pav. Atskyrimo mišiniais tirpikliais mechanizmo schema (Xu ir kt., 2019)	24
13 pav. Elektros kabelių R_{sep} ir Y_{ext} vertės kaip DCM tūrio funkcijos, kai maišoma 100 ml vandens (Xu ir kt., 2019)	24
14 pav. Elektros kabelių R_{sep} ir Y_{ext} vertės kaip maišymo funkcijos: a) sukimosi greitis, b) maišymo trukmė. (Xu ir kt., 2019)	25
15 pav. Dalelių trajektorijos, kurias keletą akimirų vizualizuoja didelės spartos kamera (Photron APX-RS). I) besisukantis įžemintas elektrodas; (II) Aukštos įtampos elektrodas; (1) Aliuminio dalelė, kuri veikia (b); (2) Aliuminio dalelė be smūgio; (3) Vario dalelių plotas. (Salama ir kt., 2018)	26
16 pav. Eksperimentinės dalelių trajektorijos, gautos naudojant didelės spartos kamerą Photron APX-RS, jei metalinė gaudyklė pritvirtinta prie S plokštės aukštos įtampos elektrodo (Salama ir kt., 2018)	27
17 pav. Eksperimentinės dalelių trajektorijos, gautos naudojant didelės spartos kamerą Photron APX-RS (Salama ir kt., 2018)	27
18 pav. Eksperimentinės dalelių trajektorijos, gautos naudojant didelės spartos kamerą Photron APX-RS, jei plastikinė gaudyklė pritvirtinta prie S plokštės aukštos įtampos elektrodo (Salama ir kt., 2018)	28

19 pav. Dalelių pasiskirstymas 15 kolektoriaus skyrių, kad būtų galima atskirti 5% aliuminio / 95% vario mišinį, naudojant optimalias sąlygas, numatytas atliekant skaitmeninį modeliavimą (Salama ir kt., 2018).....	28
20 pav. Dalelių pasiskirstymas 15 kolektoriaus skyrių, kad būtų galima atskirti 5% aliuminio / 95% vario mišinį, naudojant optimalias sąlygas, numatytas atliekant skaitmeninį modeliavimą, ir papildomą metalinę gaudyklę (Salama ir kt., 2018)	29
21 pav. Elektrinio lauko apskaičiavimas įžeminto ritininio elektrodo paviršiuje standartinei elektrodo konfigūracijai ir esant metalinei gaudyklei (Salama ir kt., 2018).....	29
22 pav. Mėginys bandymui su 1-2 mm grūdeliais (Bedeković ir Trbović, 2020).....	30
23 pav. HT-150 elektrostatinio separatoriaus schema: 1) nuimamas pašarų bunkeris; 2) vibratoriaus tiektuvas; 3) šildytuvas; 4) ritinys; 5) elektrovariklis; 6) variklio greičio reguliatorius; 7) šepetėlis; 8) elektrokodas; 9) maitinimo šaltinis; 10) įtampos reguliatorius; 11) skirstytuvai; 12, 13, 14) nuimami padėklai (Bedeković ir Trbović, 2020).....	31
24 pav. Atskyrimo produktų analizė (Bedeković ir Trbović, 2020)	31
25 pav. Koncentrato grynumo regresijos plokštumos bandyme Nr. 17Pav. 4a: Veleno greitis = 70 m/minPav. 4b: Įtampa = 25 kVPav. 4c: Padalytuvo padėtis = 131,83° (Bedeković ir Trbović, 2020)	32
26 pav. Veikimo kintamųjų ir jų sąveikos įtakos koncentrato rūšiai (a) ir regeneracijai (b) įvertinimas (Bedeković ir Trbović, 2020).....	32
27 pav. Stalo pasvirimo kampo ir plovimo vandens srauto sąveikos poveikis vario atkūrimui (a, c) ir plastiko atkūrimui (b, d). (Pita ir Castilho, 2018).....	35
28 pav. Vario atkūrimas ir koncentracija surinktame produkte bei plastiko atkūrimas ir koncentracija putose priklausomai nuo MIBC koncentracijos (Pita ir Castilho, 2018)	36
29 pav. Plastiko atkūrimas ir koncentracija putose, vario atkūrimas ir koncentracija surinktame produkte bei atskyrimo efektyvumas priklausomai nuo natrio sulfido (a) ir meso-2,3-dimerkaptosukcininės rūgšties (b) koncentracijos (Pita ir Castilho, 2018)	36
30 pav. Laidų izoliacijos pašalinimo mašinos bendras vaizdas: 1 – dažnio keitiklis; 2 – motoreduktorius; 3 - kaitinamas būgnas; 4 – kaitinimo elementas; 5 – skaitmeninis temperatūros valdiklis; 6 – nekaitinamas būgnas, 7 – mechaninis tarpo reguliatorius, 8 – įjungimo ir išjungimo mygtukai	39
31 pav. PVC ruošiniai.....	43
32 pav. PE ruošiniai.....	43
33 pav. PTFE ruošiniai	44
34 pav. COMSOL MULTIPHYSIC modelis.....	47
35 pav. COMSOL MULTIPHYSIC naudoti moduliai	48
36 pav. PVC izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 150°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s.....	50
37 pav. PVC izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 200°C, kairėje greitis 0,05 m/s, dešinėje greitis 0,1 m/s.....	51
38 pav. PVC izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 250°C, kairėje greitis 0,05 m/s, dešinėje greitis 0,1 m/s.....	51
39 pav. PE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 250°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s.....	52

40 pav. PVC izoliacinės medžiagos pašalinimo eksperimento rezultatai vaizduojami grafiškai.	52
41 pav. PE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 200°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s.....	53
42 pav. PE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 250°C, kairėje greitis 0,05 m/s, dešinėje greitis 0,1 m/s.....	53
43 pav. PE izoliacinės medžiagos pašalinimo eksperimento rezultatai vaizduojami grafiškai....	54
44 pav. PTFE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 150°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s.....	54
45 pav. PTFE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 200°C, kairėje greitis 0,05 m/s, dešinėje greitis 0,1 m/s.....	55
46 pav. PTFE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 250°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s.....	55
47 pav. PTFE izoliacinės medžiagos pašalinimo eksperimento rezultatai vaizduojami grafiškai	56
48 pav. PVC izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta <i>Python</i> programa pagal eksportuotus <i>COMSOL</i> temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 150 °C.....	57
49 pav. PVC izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta <i>Python</i> programa pagal eksportuotus <i>COMSOL</i> temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 200 °C.....	57
50 pav. PVC izoliacinės medžiagos pašalinimo <i>COMSOL</i> modeliavimo rezultatai vaizduojami grafiškai.....	58
51 pav. PVC izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta <i>Python</i> programa pagal eksportuotus <i>COMSOL</i> temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 250 °C.....	58
52 pav. PE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta <i>Python</i> programa pagal eksportuotus <i>COMSOL</i> temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 150 °C.....	59
53 pav. PE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta <i>Python</i> programa pagal eksportuotus <i>COMSOL</i> temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 200 °C.....	59
54 pav. PE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta <i>Python</i> programa pagal eksportuotus <i>COMSOL</i> temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 250 °C.....	60
55 pav. PE izoliacinės medžiagos pašalinimo <i>COMSOL</i> modeliavimo rezultatai vaizduojami grafiškai.....	60
56 pav. PTFE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta <i>Python</i> programa pagal eksportuotus <i>COMSOL</i> temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 150 °C.....	61
57 pav. PTFE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta <i>Python</i> programa pagal eksportuotus <i>COMSOL</i> temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 200 °C.....	61
58 pav. PTFE izoliacinės medžiagos pašalinimo <i>COMSOL</i> modeliavimo rezultatai vaizduojami grafiškai.....	62

59 pav. PTFE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 250 °C..... 62

IVADAS

Mūsų vis labiau besivystančiame ir skaitmeniniame pasaulyje elektros kabeliai atlieka lemiamą vaidmenį namų, biurų ir pramonės įrenginių energijos tiekimui. Laidų žievės pašalinimo procesas šiomis dienomis yra labai technologizuotas ir automatizuotas, siekiant užtikrinti efektyvumą, tikslumą ir saugumą. Šis procesas yra svarbus elektros ir elektronikos pramonės šakose, nes jis leidžia pašalinti laidų apsauginį sluoksnį, kad būtų galima perdirbti ir naudoti pakartotinai.

Pagrindines šiuolaikines laidų žievės pašalinimo technologijas apima automatizuotos žievės lupimo mašinos, kurios leidžia greitai ir tiksliai atskirti žievę be žmogaus dalyvavimo. Jos naudojamos pramonėje, kur reikalingas kabelių atliekų perdirbimas.

Automatizuotas laidų žievės pašalinimas užtikrina, kad kiekvienas laidas būtų visiškai nuluptas. Šis procesas gerokai padidina darbo efektyvumą, nes mašinos gali pašalinti žievę dideliems laidų kiekiams per trumpą laiką, sumažinant darbo jėgos poreikį. Automatizuotas procesas mažina klaidų tikimybę ir užtikrina aukštesnę kokybę. Mažina darbuotojų sąlyčio su aštriais įrankiais ir elektriniais komponentais riziką, todėl darbo aplinka tampa saugesnė. Automatizuoti žievės pašalinimo įrenginiai leidžia tiksliai valdyti nuimamos izoliacijos ilgį, todėl sumažėja medžiagos švaistymas. Modernūs žievės lupimo įrenginiai dažnai yra programuojami ir gali būti greitai pritaikyti skirtingiems laidų tipams ir dydžiams, todėl galima greitai prisitaikyti prie įvairių gamybos reikalavimų.

Nors automatizuotos mašinos yra plačiai naudojamos, rankiniai įrankiai vis dar naudojami mažesniuose projektuose arba ten, kur reikalingas individualus dėmesys. Tai apima įvairias replės ir peilius, skirtus žievės pašalinimui, tačiau rankiniu būdu atliekant laidų žievės lupimą gali kilti klaidų, ypač dirbant su smulkiais ar sudėtingais komponentais.

Nors laidų žievės pašalinimo sritis yra nuolat tobulinama ir siekiama išgauti dar didesnę proceso efektyvumą, negalima užmiršti ir dar vienos srities, kuri kelia nemenką susirūpinimą šioje srityje, tai atliekos, likusios atlikus žievės pašalinimo procesą.

Kabelių atliekų perdirbimas yra svarbi ir nuolat didėjanti, aplinkosaugai labai didelę reikšmę turinti sritis, nes visame pasaulyje didėja elektroninių atliekų kiekis. Kabelių ir kitų elektroninių

komponentų perdirbimas yra labai svarbus siekiant sumažinti netinkamo šalinimo poveikį aplinkai ir atgauti vertingas medžiagas pakartotiniam naudojimui.

Neproporcingas elektros kabelių atliekų šalinimas sukelia net keletą aplinkosauginių pavojų. Kabeliai dažnai yra pagaminti su kenksmingomis medžiagomis, tokiomis kaip švinas ir užsidegimo slopinimo medžiagos, kurios gali pasiekti dirvožemį ir vandenį, jei jų atliekos nėra tinkamai tvarkomos. Be to, atsisakyti kabelių kiekiai prisideda prie globalios elektroninės atliekų (e.-atliekų) krizės, prisidedančios prie taršos ir gamtos išteklių išnaudojimo.

Nepaisant šių dienų kabelių žievės pašalinimo srityje atliekamų darbų ir idėjų kūrimo procese padarytos pažangos – iššūkiai išlieka. Yra apimamas poreikis tobulinti ir greitinti procesą, perdirbimo infrastruktūrą, didinti naudotojų švietimą ir kurti inovatyvias technologijas, skirtas sudėtingų laidų žievės pašalinimo procesui greitinti.

Tyrimo objektas: terminis laidų izoliacinės medžiagos pašalinimo metodas.

Tyrimo tikslas: naudojant reikiamus komponentus sukurti eksperimentui reikalingą įrangą, su kuria galima atlikti žievės pašalinimo procesą, kai laidas praleidžiamas tarp dviejų besisukančių būgnų, kai vienas iš jų kaitinamas, o kitas yra kambario temperatūros, sukurti kompiuterinį modelį ir atlikti tuos pačius procesus, kaip ir eksperimentiniame tyrime bei palyginti gautus rezultatus.

Tyrimo uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros apžvalgą.
2. Sukurti eksperimentui atlikti reikalingą stendą.
3. Nustatyti optimalius proceso parametrus: temperatūrą, greitį ir pan.
4. Sukurti 3D skaitmeninį modelį.
5. Palyginti gautus eksperimentinio ir skaitmeninio tyrimo rezultatus tarpusavyje.

Problematika: šalinant kabelių izoliacines medžiagas, gali kilti įvairių problemų. Šios problemos priklauso nuo izoliacinės medžiagos tipo, senumo bei kitų veiksnių. Ypač sudėtinga, kai kabeliai yra seni, o izoliacija praradusi savo struktūrą ar prilipusi prie laidininkų. Tradiciniai šalinimo būdai, tokie kaip deginimas ar smulkinimas, ne visada yra tinkami – jie gali būti pavojingi aplinkai, nes šiluminis šalinimo metodas išskiria kenksmingus dūmus ar garus. Taip pat gali kilti pavojų sveikatai ar aplinkai, jei naudojama elektros energija ar kiti šaltiniai. Didelė problema kyla

ir dėl atliekų, susidarančių kabelius eksploatuojant, demontuojant ar keičiant įrangą. Šios atliekos dažnai būna mišrios, sudarytos iš įvairių medžiagų – plastiko, gumos, metalo. Perdirbti švarias, vientisas medžiagas yra nesudėtinga, tačiau kompozitinių medžiagų atskyrimas kelia iššūkių. Vertingiausia kabelio dalis dažniausiai yra spalvotasis metalas, pavyzdžiui, varis. Kita dalis – izoliacinė medžiaga, tokia kaip polietilenas – gali būti sėkmingai granuliuojama ir pakartotinai naudojama plastiko liejimo procesuose. Tačiau norint, kad izoliacinės medžiagos būtų efektyviai pašalintos ir perdirbtos, būtina ieškoti naujų, inovatyvių technologinių sprendimų. Vienas iš galimų būdų – terminis žievės pašalinimo metodas, kai kabelis praleidžiamas tarp dviejų besisukančių būgnų. Vienas jų yra kaitinamas, kitas – lieka kambario temperatūros. Tokie metodai gali užtikrinti efektyvesnę izoliacijos pašalinimą, sumažinti aplinkos taršą ir padidinti perdirbimo kokybę.

Temos naujumas: šios temos naujumas ir inovatyvumas slypi ne tik pačioje laidų žievės pašalinimo problematikoje, bet ir pasirinktoje technologijoje – terminio tarp dviejų dviejų besisukančių būgnų, kai vienas iš jų yra kaitinamas žievės pašalinimo įrenginyje, kuris gali efektyviai ir greitai pašalinti žievę reikiamam laidui. Tyrimas gali atverti naujas perspektyvas laidų žievės pašalinimo srityje, jo pagreitinime bei laidų kokybės išsaugojimo srityje.

Temos aktualumas: terminio laidų izoliacinės medžiagos pašalinimo metodai yra svarbūs elektros ir elektronikos srityse, kai reikia remontuoti ar keisti laidus su pažeista izoliacija, laidų perdirbimo srityje ir panašiai. Tai gali būti atliekama keliais būdais, priklausomai nuo pažeidimo tipo, izoliacinės medžiagos rūšies ir kitų faktorių. Terminis laidų žievės pašalinimo metodas remiasi šiais punktais:

- **Saugumas** – senos arba pažeistos izoliacinės medžiagos gali kelti pavojų tiek operatoriams, tiek aplinkai. Jų pašalinimas padeda užtikrinti saugų elektros, šilumos ar dujotiekių laidų veikimą.
- **Efektyvumas** – naujos ir efektyvesnės izoliacinės medžiagos gali pagerinti laidų veikimą ir sumažinti energijos nuostolius.
- **Aplinkosauga** – senos izoliacinės medžiagos gali turėti neigiamą poveikį aplinkai. Jų pašalinimas ir pakeitimas aplinkosaugos atžvilgiu gali būti naudingas.

- **Reguliavimas** – daug šalių turi reguliavimo reikalavimus, kurie gali reikalauti izoliacinės medžiagos pašalinimo ir pakeitimo tam, kad sistema atitiktų saugumo ir techninius standartus.
- **Energijos taupymas** – pašalinus senas izoliacines medžiagas ir naudojant efektyvesnes alternatyvas, galima sutaupyti energijos ir sumažinti energijos sąnaudas.

Praktinė vertė: sukurto įrenginio praktinė vertė pasireiškia tuo, kad jis gali būti naudojamas įvairiose srityse, kur reikia efektyviai ir saugiai pašalinti laidų izoliaciją. Šis įrenginys gali būti pritaikytas:

- **Elektros ir elektronikos remonto srityse**, kuriose būtina pakeisti arba atnaujinti laidus su pažeista izoliacija.
- **Laidų perdirbimo pramonėse**, kuriose itin svarbu greitai atskirti laidininką nuo izoliacinės medžiagos, nepažeidžiant paties metalo.
- **Atliekų tvarkymo bei rūšiavimo sektoriuje**, kai tvarkomi seni arba mišrios sudėties kabeliai.

Terminis laidų pašalinimo metodas praktinės vertės turi šiuose punktuose:

- **Patobulinti perdirbimo procesai** – tyrimas gali padėti patobulinti vielos izoliacijos perdirbimo metodus, kurie maksimaliai padidina metalo atgavimą ir kokybę. Taip perdirbimas taptų efektyvesnis ir ekonomiškai perspektyvesnis, sumažėtų atliekų ir padidėtų perdirbtų metalų pasiūla rinkoje.
- **Nauda aplinkai** – įvertinus ir optimizuojant su terminiu šalinimu susijusį poveikį aplinkai, tyrimas galėtų padėti sumažinti kenksmingų teršalų išmetimą ir energijos suvartojimą. Tai prisideda prie tvaresnės pramonės praktikos ir dera su pasaulinėmis pastangomis sumažinti aplinkos pėdsakus.
- **Ekonominė nauda** – pažangių terminio šalinimo metodų sąnaudų dinamikos ir ekonominės naudos supratimas gali padėti perdirbimo įmonėms padidinti pelningumą. Tai labai svarbu norint pagrįsti investicijas į naujas technologijas ir perdirbimo pajėgumų plėtrą.

- **Technologinės naujovės** – pabrėžus esamas technologines spragas ir galimas naujoves, galima paskatinti tolesnius terminio šalinimo technologijų tyrimus ir plėtrą. Tai gali paskatinti naujų patentų, naujų įmonių steigimo galimybių ir pažangos susijusiose srityse.
- **Mokymosi ir mokymo galimybės** – mokslinių tyrimų rezultatų sklaida akademiniiais ir pramonės kanalais gali padėti ugdyti naujos kartos inžinierius ir aplinkosaugos mokslininkus, suteikiant jiems žinių, leidžiančių toliau tobulinti perdirbimo procesus.

1. MOKSLINĖS LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Poveikis aplinkai

Laidų atliekos, susijusios su elektros ir elektronikos įranga, yra viena iš sparčiausiai augančių atliekų grupių pasaulyje. Šios atliekos yra ypač problematiškos dėl jų sudėtyje esančių toksiškų medžiagų, kurios gali sukelti žalingą poveikį aplinkai ir žmogaus sveikatai.

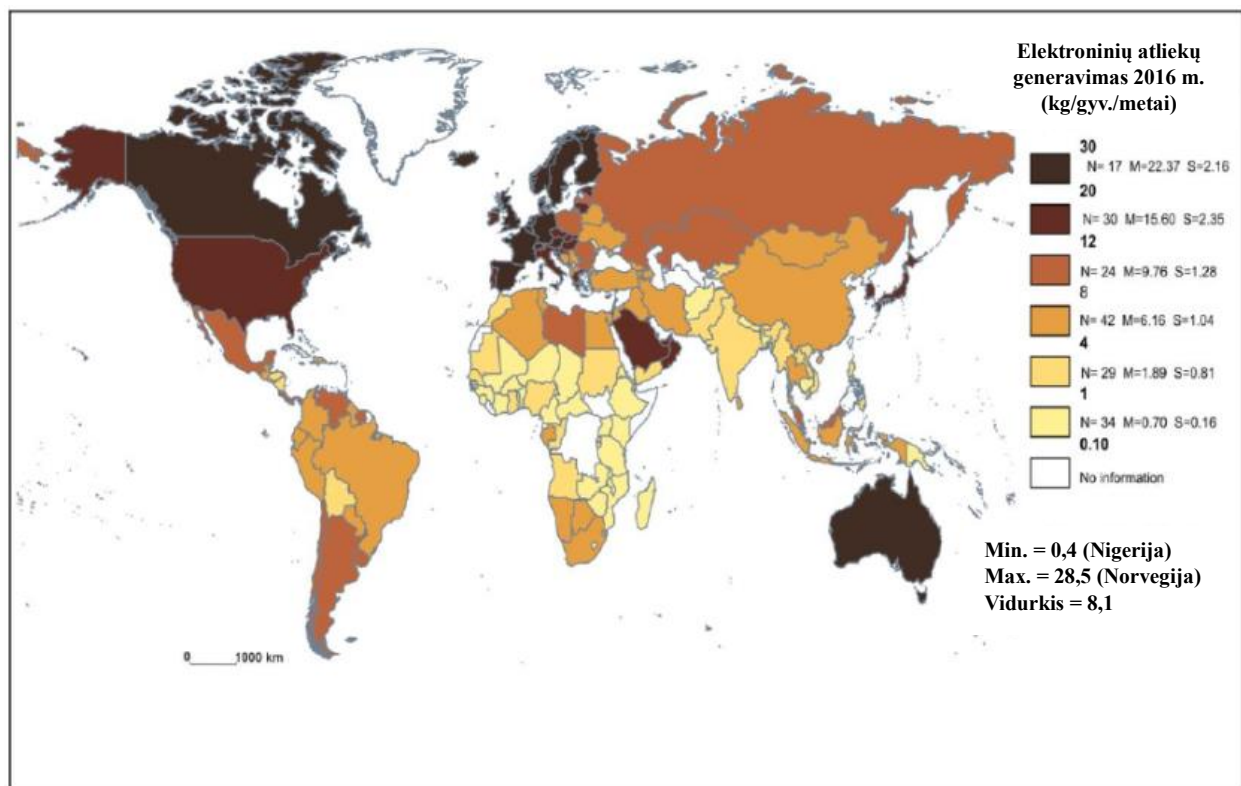
Laidų atliekos dažniausiai susideda iš vario, aliuminio, plieno ir plastiko. Tačiau jose taip pat yra ir toksiškų medžiagų, tokių kaip švinas, kadmis, ugniai atsparūs komponentai. Sunkieji metalai iš laidų atliekų, patekę į dirvožemį, gali būti absorbuojami augalų, o tai sukels grėsmę vietiniams gyvūnams ir žmonėms, vartojantiems šiuos augalus. Tai sukuria ilgalaikę ekosistemos teršimo grandinę. Jei laidų atliekos netinkamai tvarkomos, toksiškos medžiagos gali patekti į gruntinius vandenis ar paviršinius vandens telkinius per lietaus vandenį, teršdamos vandens ekosistemas ir keldamos pavojų vandens organizmams. Neteisingai tvarkant ar deginant laidų atliekas gali išsiskirti pavojingi dūmai, kurie kenkia tiek aplinkai, tiek žmogaus sveikatai. Sveikatos problemos gali kilti dėl tiesioginio kontakto su toksiškomis medžiagomis, įkvėpus užteršto oro ar suvartojus užteršto vandens ir maisto (Kumar ir Singh, 2002).

Efektyvus laidų atliekų tvarkymas apima jų rinkimą, saugojimą, transportavimą, perdirbimą ir utilizavimą. Perdirbimas yra ypač svarbus, nes leidžia išgauti vertingus išteklius ir mažina neigiamą poveikį aplinkai.

Norint užtikrinti aplinkos apsaugą ir sveikatos saugumą, būtinas tinkamas laidų atliekų tvarkymas. Perdirbimas ir atsakingas atliekų šalinimas gali žymiai sumažinti šių atliekų keliamą grėsmę, tam yra reikalingi tinkami laidų žievės pašalinimo procesai.

1.2. Metalų atkūrimo efektyvumas

Laidų atkūrimas, arba perdirbimas, yra svarbus elektros ir elektronikos atliekų (EEA) tvarkymo aspektas, prisidedantis prie atliekų mažinimo ir gamtos išteklių tausojimo. Kad tai yra didžiulė problema matoma ir žemiau esančiame paveikslėlyje (žr. 1 pav.), kuris jau 2017 metais atspindi didžiulį perdirbimo proceso reikalingumą, nes pasaulyje yra labai dideli kiekiai elektronikos bei laidų atliekų (Mihai ir kt., 2019).



1 pav. EEA susidarymo rodiklių geografinis pasiskirstymas 2017 m. (Mihai ir kt., 2019)

Atkūrimo procesas apima kelis etapus: pradedant nuo rūšiavimo ir šalinimo, per mechaniską apdorojimą, iki galutinio metalų perdirbimo. Šis procesas prasideda nuo rūšiavimo, kurio metu laidai yra atskiriami nuo kitų elektronikos atliekų. Toliau einantis mechaninis apdorojimas atskiria varį ir kitus metalus nuo izoliacinių medžiagų, pavyzdžiui, plastiko. Galutinis žingsnis yra metalų rūšiavimas ir perdirbimas, iš kurio gaunami antriniai žaliaviniai metalai (ResearchGate, 2019).

Efektyvumo vertinimas priklauso nuo to, kiek vertingų medžiagų pavyksta išgauti iš pradinio atliekų kiekio. Vario perdirbimas yra ypač svarbus dėl jo vertės ir plataus naudojimo pramonėje. Efektyvumas taip pat yra tiesiogiai susijęs su naudojamomis technologijomis ir procesų kokybe, kurie užtikrina minimalų šalutinių atliekų kiekį.

Iššūkiai yra susiję su įvairių plastikų ir metalų atskyrimo sudėtingumu, kuris gali žymiai sumažinti perdirbto produkto kokybę. Taip pat senesnių laidų apdorojimas gali būti problematiškas dėl toksiškų medžiagų, pavyzdžiui, PVC, kurios reikalauja papildomų saugumo priemonių (ResearchGate, 2019).

Technologinės inovacijos gali padėti pagerinti atkūrimo efektyvumą. Modernios švarios technologijos, pažangūs rūšiavimo metodai ir spektroskopinės analizės technikos padeda tiksliau atskirti metalus ir nešvarumus, tokiu būdu padidinant gautų antrinių žaliavų kokybę ir kiekį.

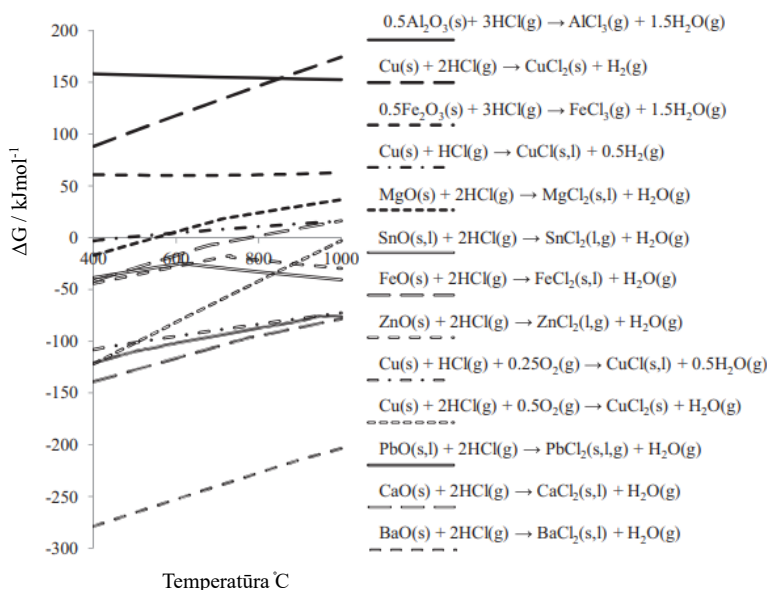
Politikos ir reguliavimo poveikis taip pat vaidina svarbų vaidmenį. Vyriausybės reglamentavimas, pavyzdžiui, ES elektros ir elektronikos atliekų direktyva (WEEE), skatina perdirbimą ir mažina aplinkos taršą, nustatant griežtus atliekų tvarkymo standartus ir skirdama subsidijas ekologiškų technologijų plėtrai (ResearchGate, 2019).

Šie aspektai parodo, kad laidų atkūrimas yra ne tik būtinas aplinkosauginis veiksmas, bet ir ekonomiškai naudinga veikla, leidžianti efektyviai panaudoti išteklius ir mažinti aplinkos taršą.

1.3. Nužievinimo metodų efektyvumo apžvalga

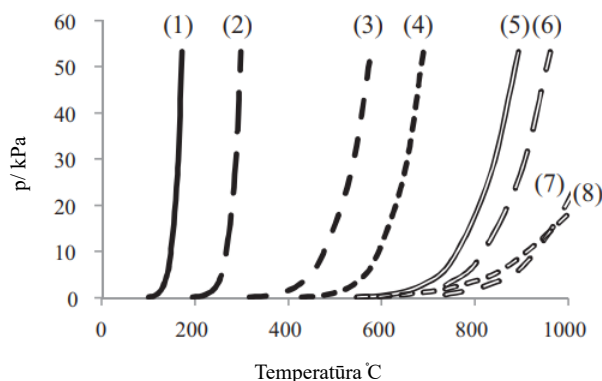
Viename iš nagrinėtų tyrimų Kameda ir kt.(2013) analizuoja metalų atgavimą iš laidų laužo pasitelkiant chlorido volatilizacijos metodą. Jame aptariama metalų, tokių kaip varis, švinas, alavas ir cinkas, atgavimas iš PVC laidų laužo naudojant chlorido volatilizacijos procesą. Tyrimo metu buvo naudojamas polivinilchloridas (PVC), kuris degradacijos metu išskiria vandenilio chloridą (HCl), padedantį susidaryti metalų chloridams, kurie vėliau volatilizuojami. Eksperimentams buvo naudojamas kvarcinis stiklo kolonos reaktorius, kuriame laidų laužas buvo kaitinamas iki norimos temperatūros azoto ar oro atmosferoje. Eksperimentų metu buvo tiriama metalų atgavimas esant skirtingoms temperatūroms (500–900 °C) ir HCl koncentracijai atmosferoje.

Termodinamikos sąlygos: metalų chloridų susidarymo termodinamika buvo pagrindinė sėkmingo metalų atgavimo sąlyga. Cu, Pb, Sn, Zn ir Fe chloridai buvo formuojami ir volatilizuojami esant tinkamoms sąlygoms (žr. 2 pav.).



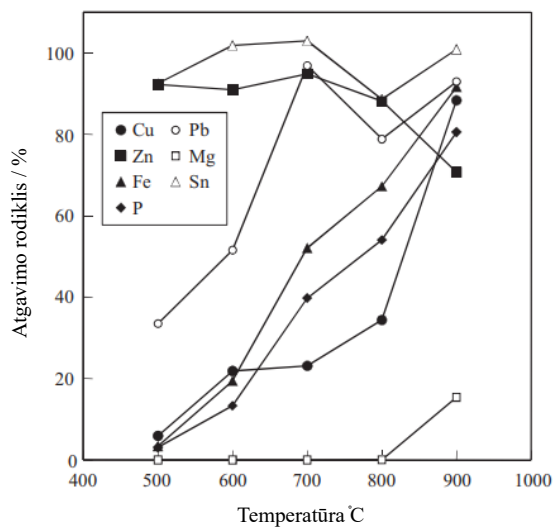
2 pav. Metalo chloridų susidarymo termodinaminės savybės (Kameda ir kt., 2013)

Eksperimentiniai duomenys: rezultatai parodė, kad esant azoto atmosferai, buvo pasiekti maksimalūs atgavimo rodikliai: Pb (44 %), Sn (36 %), Zn (30 %) ir Fe (4 %) ties 900 °C. Cu buvo atgavimas tik esant aukštai HCl koncentracijai.

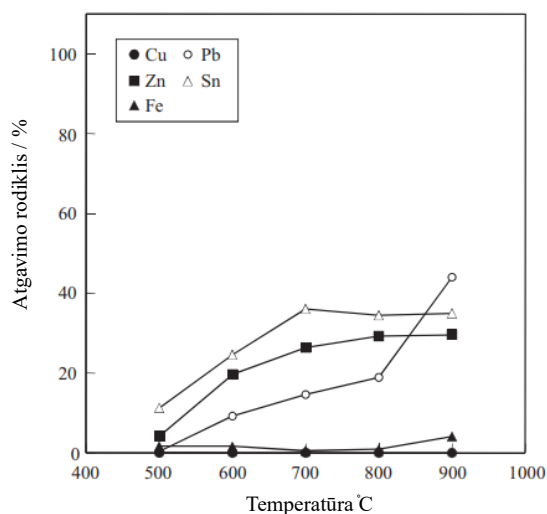


3 pav. Metalo chloridų garų slėgis esant skirtingoms temperatūroms: (1) AlCl_3 , (2) FeCl_3 , (3) SnCl_2 , (4) ZnCl_2 , (5) PbCl_2 , (6) FeCl_2 , (7) MgCl_2 , and (8) CuCl . (Kameda ir kt., 2013)

Atgavimo efektyvumas: oro atmosferoje metalų atgavimo rodikliai padidėjo dėl oksidacijos procesų, kurie skatino Cu chlorido susidarymą. HCl atmosferoje daugiau nei 70% Cu, Zn, Fe, Pb ir Sn buvo atgauta ties 900 °C (žr. 3 pav.).



4 pav. Metalų atgavimo rodikliai esant skirtingoms temperatūroms azoto atmosferoje (Kameda ir kt., 2013)



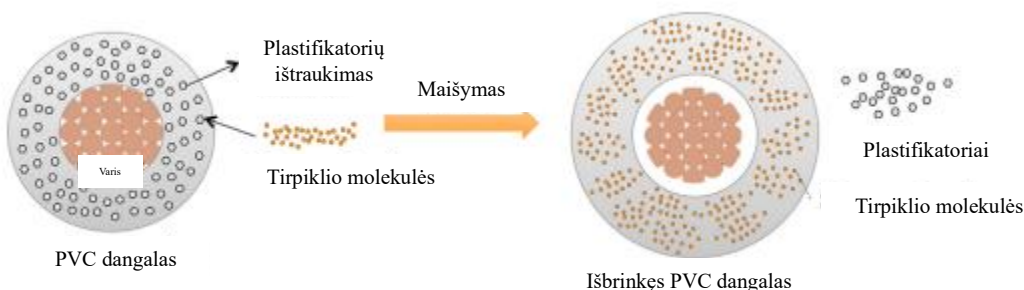
5 pav. Metalų atgavimo rodikliai esant skirtingoms temperatūroms HCl turinčioje atmosferoje (Kameda ir kt., 2013)

PVC chlorido volatilizacijos procesas gali būti veiksmingai naudojamas metalams iš laidų laužo atskirti. Esant tinkamai temperatūros programai, galima atgauti Sn ir Zn ties 500 °C, Pb, Fe ir kai kuriuos Cu ties 700 °C, o Cu kartu su kai kuriomis Mg – ties 900 °C. Procesas reikalauja tinkamo dujų apdorojimo dėl susidarantių pavojingų teršalų.

Xu ir kt.(2013) tyrime nagrinėjamas naujas elektros kabelių atliekų, ypač plono skersmens, perdirbimo metodas, kuris kelia didelius aplinkosaugos ir išteklių perdirbimo iššūkius. Metodas apjungia polivinilchlorido (PVC) brinkimą ir centrifuginį atskyrimą, siekiant atgauti aukštos

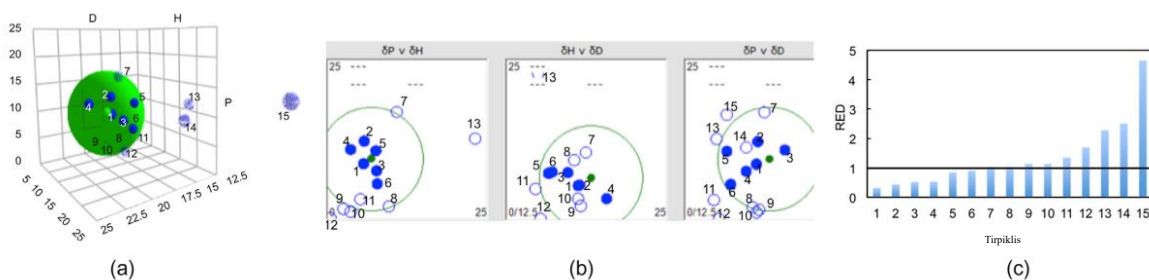
kokybės varį ir PVC. Eksperimente buvo naudoti komerciniai elektriniai kabeliai, sudaryti iš 63% vario ir 37% PVC. Buvo išbandyti įvairūs organiniai tirpikliai PVC brinkimo gebėjimui nustatyti. Kabeliai buvo panardinti į skirtingus organinius tirpiklius ir matuojamas brinkimo greitis (R_{swel}). Atskyrimas buvo atliekamas maišant kabelius viename organiniame tirpiklyje arba mišinyje iš organinio tirpiklio ir vandens. Matuoti atskyrimo greitis (R_{sep}) ir plastifikatoriaus ekstrahavimo išeiga (Y_{ext}). Gauti rezultatai apima brinkimo elgesį, atskyrimo efektyvumą, kabelių ilgio įtaką atskyrimo efektyvumui, mišrias tirpiklių sistemas.

Brinkimo elgesys: tokie tirpikliai, kaip dichlormetanas (DCM), acetonas ir etilo acetatas parodė aukštas vertes, rodančias gerą brinkimo gebėjimą (žr. 6 pav.).

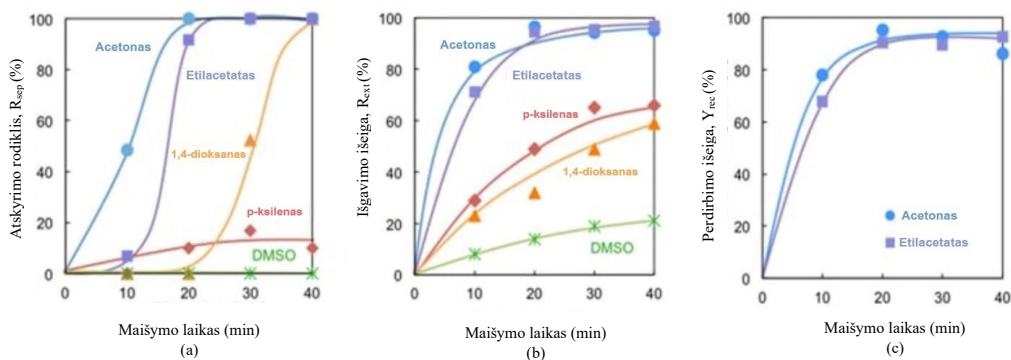


6 pav. PVC dangos padengimas organiniu tirpikliu (Xu ir kt., 2019)

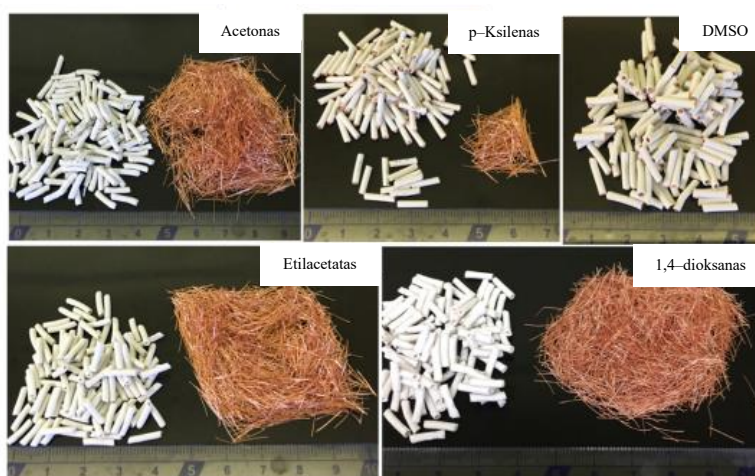
Atskyrimo efektyvumas: acetonas ir etilo acetatas, parodė aukštą atskyrimo efektyvumą, pasiekiant 100% vario ir PVC atskyrimą (žr. 7 pav.).



7 pav. Tyrime pateiktos tirpiklių HSP ir RED vertės: a) 3D HSP diagrama, b) 2D HSP diagrama ir c) tirpiklių RED vertės. 1 – cikloheksanoną, 2 – ciklopentanonas, 3 – dichlormetanas, 4 – nitrobenzenas, 5 – acetonas, 6 – etilacetatas, 7 – dimetilsulfoksidas, 8-1-4 -dioksanas, 9 – toluenas, 10 – pksilenas, 11 – dietileteris, 12 – heksanas, 13 – metanolis, 14 – etilenglikolis, 15 - vanduo. HSP vertės ir sferos spindulys ($R_0 = 8,0$) gaunami iš HSPiP. (Xu ir kt., 2019)

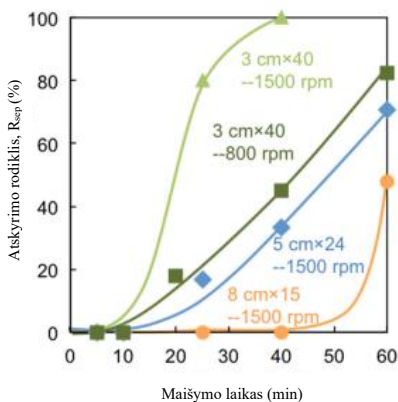


9 pav. Atskyrimo Efektyvumas (a) R_{sep} , (b) plastifikatorius Yext ir (c) elektros kabelių plastifikatorius Yrec, kai maišomi įvairiuose tirpikliuose kaip maišymo laiko funkcijos. (Xu ir kt., 2019)



8 pav. Atskirtų vario, PVC ir neatskirtų elektros kabelių, 40 min. maišant penkiuose organiniuose tirpikliuose, fotografiniai vaizdai. (Xu ir kt., 2019)

Kabelių ilgio įtaka atskyrimo efektyvumui: naudojant acetoną ir etilo acetatą plastifikatoriaus atkūrimo išeiga buvo aukšta, (žr. 10 pav.).

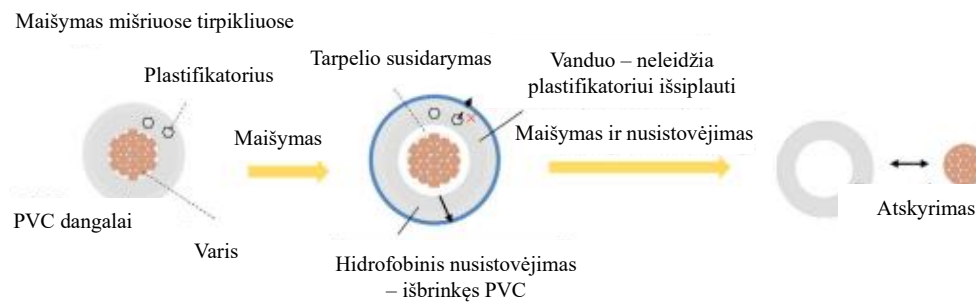


10 pav. Skirtingo ilgio elektrinių kabelių atskyrimo greitis acetone kaip maišymo laiko funkcijos (Xu ir kt., 2019)

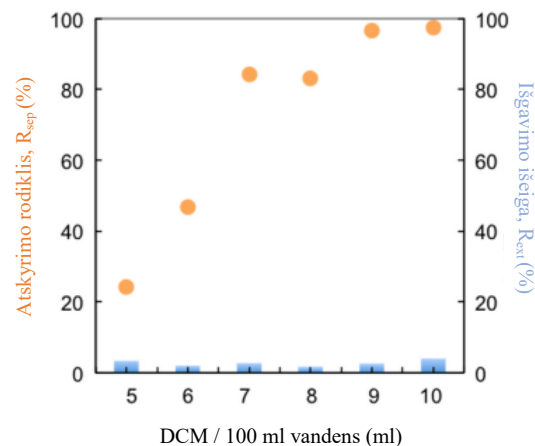


11 pav. Elektros kabelių, atskirtų maišant acetone, fotografiniai vaizdai: a) visiškai atskirti 3 cm kabeliai, b) 71 % atskirti 5 cm kabeliai ir c) 48 cm atskirti 8 cm kabeliai ir c) 48 % atskirti 8 cm kabeliai (Xu ir kt., 2019)

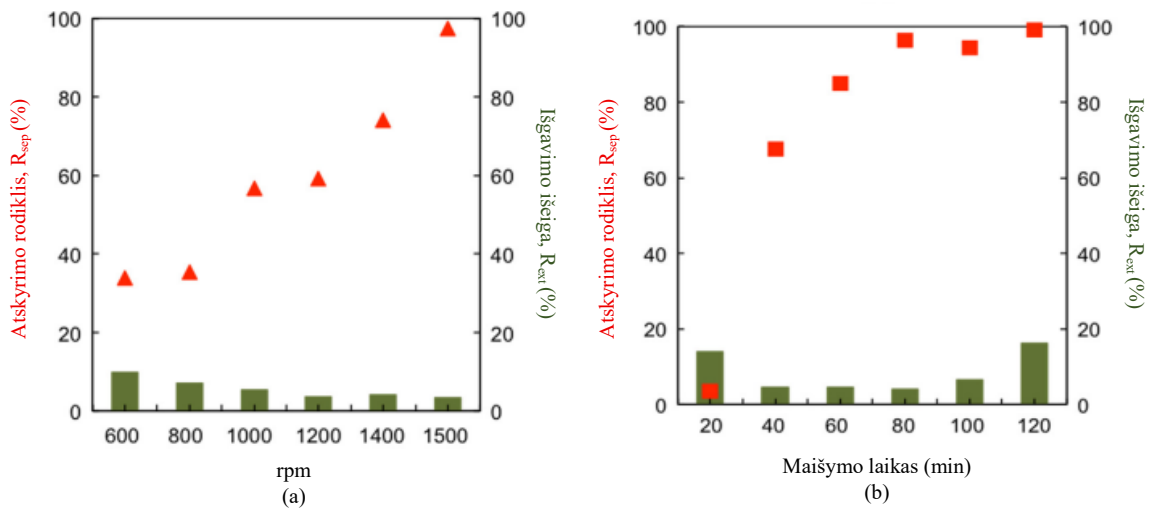
Mišrios tirpiklių sistemos: mišinys iš butilo acetato ir vandens buvo efektyvus atskiriant varį ir plastifikatorių dengtą PVC su minimaliu plastifikatoriaus ekstrahavimu (žr. 12 pav.).



12 pav. Atskyrimo mišriais tirpikliais mechanizmo schema (Xu ir kt., 2019)



13 pav. Elektros kabelių R_{sep} ir R_{ext} vertės kaip DCM tūrio funkcijos, kai maišoma 100 ml vandens (Xu ir kt., 2019)



14 pav. Elektros kabelių R_{sep} ir R_{ext} vertės kaip maišymo funkcijos: a) sukimosi greitis, b) maišymo trukmė. (Xu ir kt., 2019)

PVC brinkimo ir centrifuginio atskyrimo kombinacija suteikia efektyvų ir ekologišką metodą perdirbti plonus atliekų elektrinius kabelius. Metodas sėkmingai atgauna aukštos kokybės varį ir PVC, kurie gali būti pakartotinai naudojami įvairiose srityse. Tyrimas pabrėžia tinkamų tirpiklių pasirinkimo svarbą, siekiant maksimaliai padidinti atkūrimo efektyvumą ir sumažinti aplinkos poveikį.

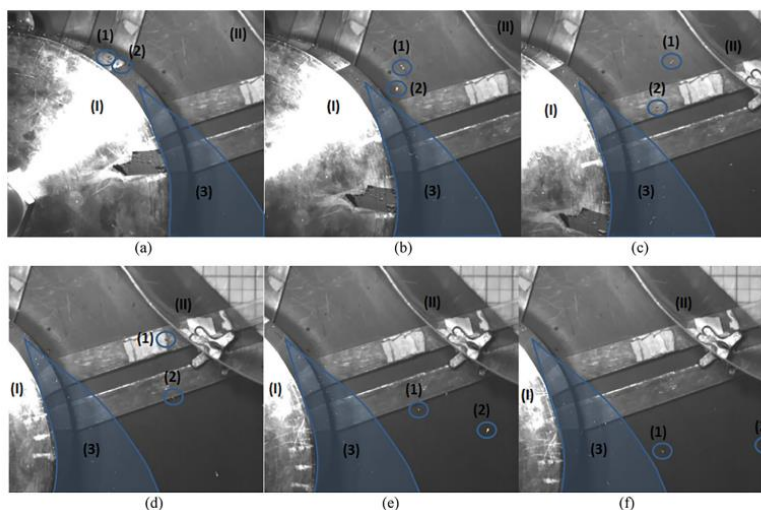
Salama ir kt.(2018) tyrime analizuojamas metodas, kuris yra skirtas efektyviam vario ir aliuminio atgavimui iš elektros laidų atliekų. Didėjant elektros ir elektroninės įrangos atliekų (WEEE) kiekiui, būtina kurti efektyvius perdirbimo procesus, kad būtų galima atgauti vertingus metalus, tokius kaip varis ir aliuminis. Šio tyrimo tikslas buvo ištirti volo tipo elektrostatinio separatoriaus naudojimą atskiram vario ir aliuminio atgavimui iš atliekų elektros laidų. Tyrimo metu buvo naudojamas granuliuotas mišinys, kurio sudėtyje buvo 95% vario (alavuoto ir nealavuoto) ir 5% aliuminio, gautas iš smulkintų atliekų elektros laidų. Atskyrimo eksperimentai buvo atlikti naudojant laboratorinį volo tipo elektrostatinį separatorių su atvirkštinio S formos aukštos įtampos elektrodu. Eksperimentinėje sąrankoje taip pat buvo naudojama aukštos spartos kamera dalelių trajektorijoms vizualizuoti ir analizuoti.

Skaitmeniniai modeliai buvo naudojami optimalios elektrostatinio separatoriaus veikimo sąlygoms numatyti. Dalelių trajektorijos buvo modeliuotos atsižvelgiant į elektrines, gravitacines

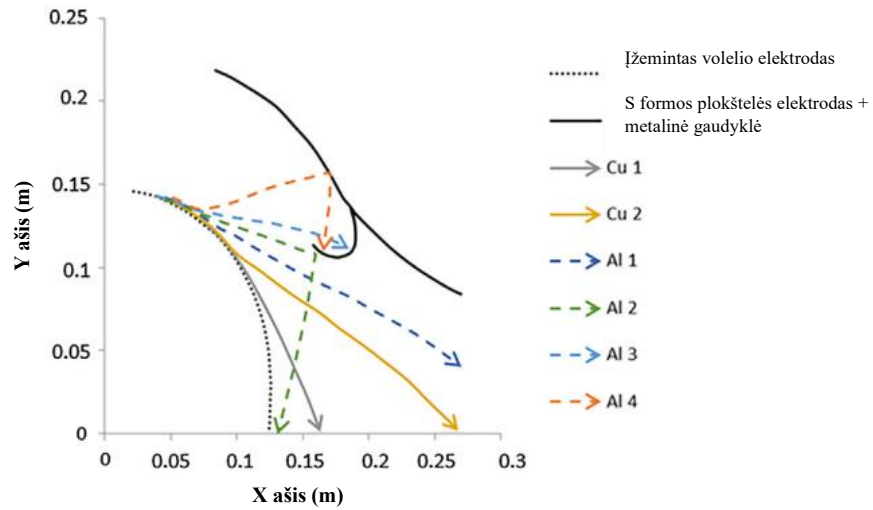
ir centrifuginės jėgas, veikiančias daleles. Skaičiavimai siekė nustatyti geriausią konfigūraciją, kad būtų maksimaliai padidintas vario ir aliuminio dalelių atskyrimo efektyvumas.

Skaitmeninės simuliacijos parodė, kad optimalios atskyrimo sąlygos buvo pasiektos esant - 20 kV aukštai įtampai, 30° elektrodų nuolydžio kampui ir 100 mm atstumui tarp aukštos įtampos elektrodo ir volo elektrodo. Šios sąlygos buvo patvirtintos eksperimentiškai, ir rezultatai parodė patenkinamą aliuminio ir vario dalelių atskyrimą. Norint pagerinti atskyrimo efektyvumą, prie aukštos įtampos elektrodo buvo pritvirtinta metalinė gaudyklė. Gaudyklė palengvino aliuminio dalelių surinkimą, tačiau taip pat sukėlė elektrinio lauko iškraipymą, dėl kurio sumažėjo vario atgavimas. Siekiant to išvengti, buvo išbandyta plastikinė gaudyklė, kuri nepakeitė elektrinio lauko. Plastikinė gaudyklė pagerino vario grynumą iki 99,3% ir pasiekė geresnius atgavimo rodiklius, palyginti su metaline gaudykle.

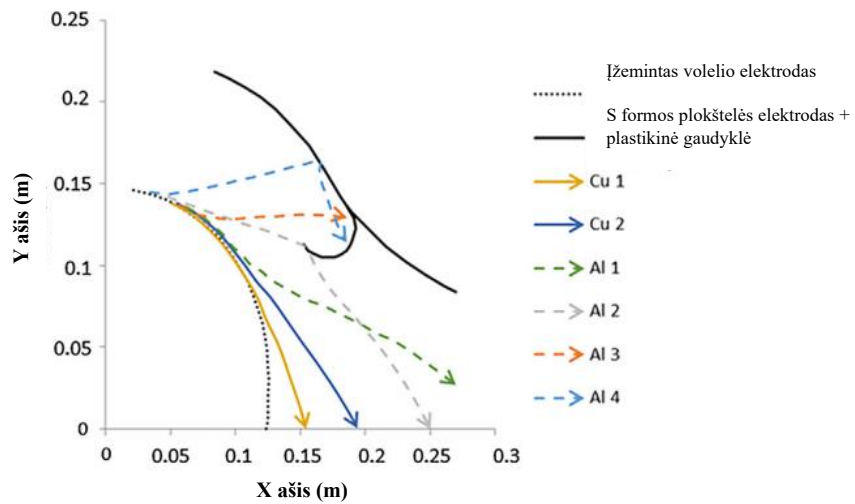
Dalelių trajektorijos: aukštos spartos kamera vizualizacijos ir skaitmeninės simuliacijos pateikė detalias vario ir aliuminio dalelių trajektorijas esant skirtingoms konfigūracijoms. Trajektorijos pabrėžė skirtumus tarp sferinių vario dalelių ir plokščių aliuminio dalelių elgsenos (žr. 15 pav.).



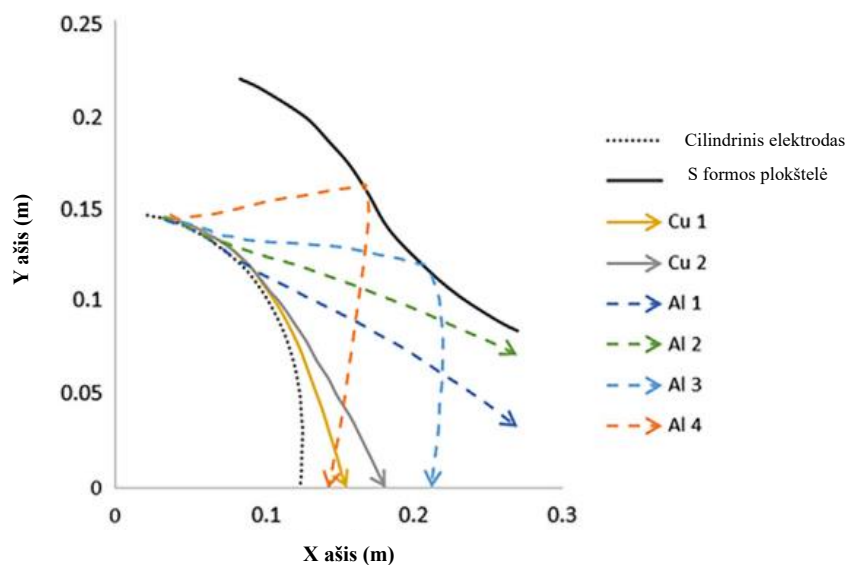
15 pav. Dalelių trajektorijos, kurias keletą akimirkų vizualizuoja didelės spartos kamera (Photron APX-RS). I) besisukantis įžemintas elektrodas; II) Aukštos įtampos elektrodas; (1) Aliuminio dalelė, kuri veikia (b); (2) Aliuminio dalelė be smūgio; (3) Vario dalelių plotas. (Salama ir kt., 2018)



16 pav. Eksperimentinės dalelių trajektorijos, gautos naudojant didelės spartos kamerą Photron APX-RS, jei metalinė gaudyklė pritvirtinta prie S plokštės aukštos įtampos elektrodo (Salama ir kt, 2018)

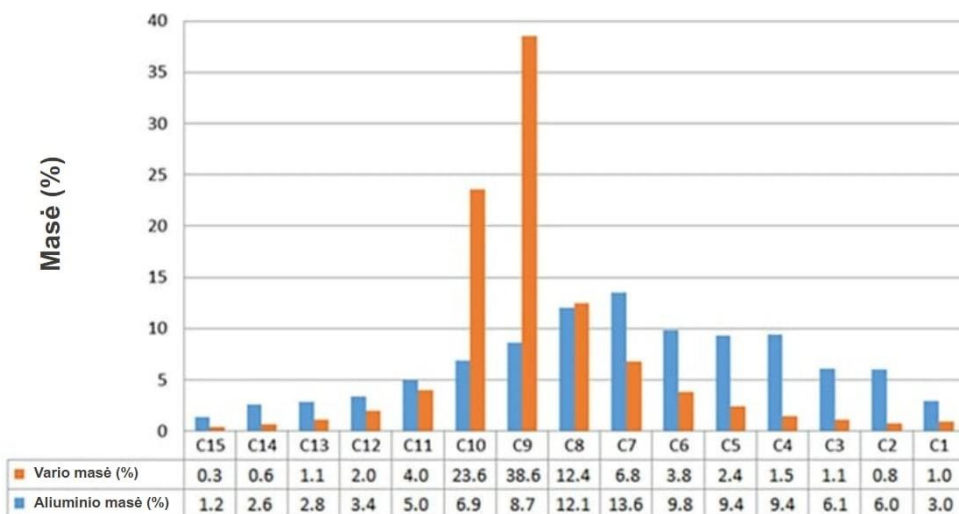


17 pav. Eksperimentinės dalelių trajektorijos, gautos naudojant didelės spartos kamerą Photron APX-RS (Salama ir kt., 2018)

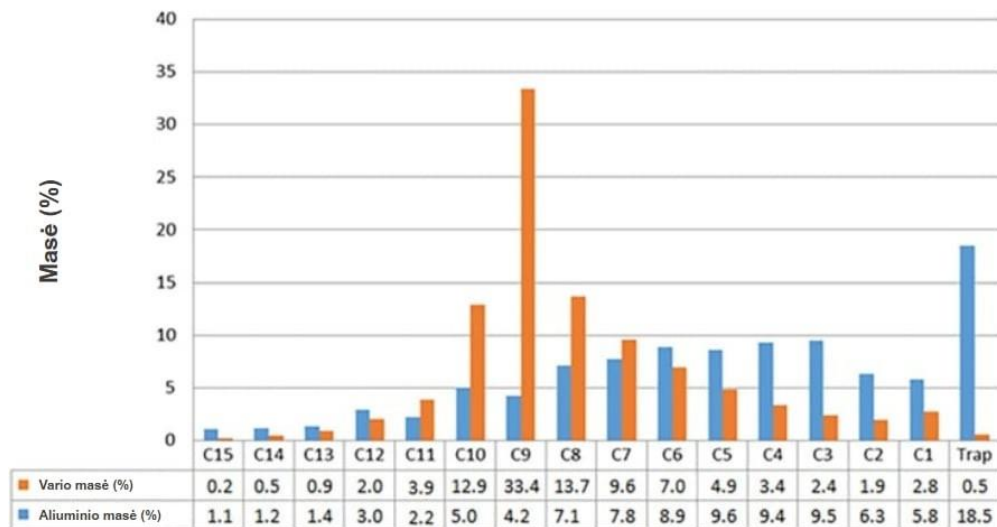


18 pav. Eksperimentinės dalelių trajektorijos, gautos naudojant didelės spartos kamerą Photron APX-RS, jei plastikinė gaudyklė pritvirtinta prie S plokštės aukštos įtampos elektrodo (Salama ir kt., 2018)

Atgautų dalelių masės pasiskirstymas: varinių ir aliumininių dalelių masės pasiskirstymas surinkimo skyriuose buvo nubrėžtas siekiant parodyti atskyrimo efektyvumą. Grafikai parodė, kad dauguma aliuminio dalelių buvo surinktos konkrečiuose skyriuose, o vario dalelės buvo koncentruotos kituose (žr. 19 pav.).

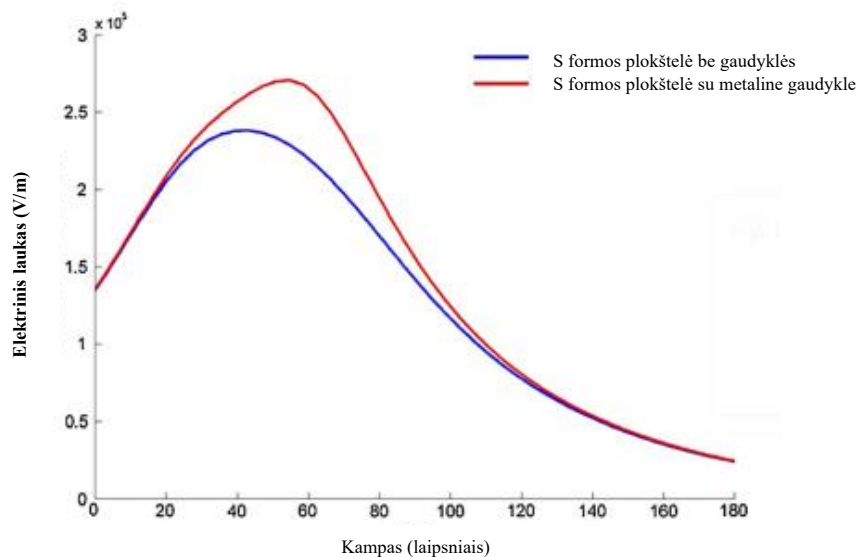


19 pav. Dalelių pasiskirstymas 15 kolektoriaus skyrių, kad būtų galima atskirti 5% aliuminio / 95% vario mišinį, naudojant optimalias sąlygas, numatytas atliekant skaitmeninį modeliavimą (Salama ir kt., 2018)



20 pav. Dalelių pasiskirstymas 15 kolektoriaus skyrių, kad būtų galima atskirti 5% aliuminio / 95% vario mišinį, naudojant optimalias sąlygas, numatytas atliekant skaitmeninį modeliavimą, ir papildomą metalinę gaudyklę (Salama ir kt., 2018)

Elektrinio lauko skaičiavimas: elektrinio lauko pasiskirstymas su ir be metalinės gaudyklės buvo apskaičiuotas siekiant suprasti jos poveikį dalelių trajektorijoms. Grafikas pavaizdavo elektrinio lauko intensyvumą metalinės gaudyklės buvimo atveju (žr. 21 pav.).



21 pav. Elektrinio lauko apskaičiavimas įžeminto ritininio elektrodo paviršiuje standartinei elektrodo konfigūracijai ir esant metalinei gaudyklei (Salama ir kt., 2018)

Tyrimas sėkmingai parodė volo tipo elektrostatinio separatoriaus potencialą atskirti varį ir aliuminį iš atliekų elektros laidų. Naudojant plastikinę gaudyklę buvo pasiekta geresnių rezultatų nei naudojant metalinę gaudyklę, pasiekiant aukštesnį vario grynumą ir atgavimo rodiklius. Skaitmeninės simuliacijos gerai sutapo su eksperimentiniais stebėjimais, suteikdamos patikimą modelį elektrostatinio atskyrimo proceso optimizavimui.

Bedeković ir Trbovic (2020) tyrime nagrinėjama elektrostatinio atskyrimo galimybė atgauti aliuminį iš likučių, likusių po elektrinių kabelių perdirbimo. Pagrindinės išvados rodo, kad galima gauti koncentratą su 97,86% aliuminio masės dalimi ir 91,20% atgavimu. Svarbiausias parametras, turintis įtakos atskyrimo efektyvumui, buvo separatoriaus padalytuvo padėtis. Likučiai iš aliuminio kabelių perdirbimo buvo paimti iš gamyklos Oguline, Kroatijoje. Likučiai buvo rankiniu būdu rūšiuojami, pjaustomi ir atskiriami į sunkiąsias (metalingas) ir lengvasias (polimerines) dalis. Bandymams buvo naudojamas HT-150 elektrostatinis separatorius. Buvo tiriami tokie kintamieji kaip veleno greitis, įtampa ir padalytuvo padėtis. Bandymams buvo naudojamas 40 gramų mėginio dydis, o grūdelių dydis daugiausia buvo nuo 1 iki 2 mm (žr. 22 pav.). Rezultatai apima grūdelio dydžio pasiskirstymą, elektrostatinio atskyrimo efektyvumą, optimalias sąlygas, kintamųjų reikšmingumą.



22 pav. Mėginys bandymui su 1-2 mm grūdeliais (Bedeković ir Trbović, 2020)

Grūdelių dydžio pasiskirstymas: 1 lentelėje matoma, kad likučiuose buvo reikšminga aliuminio dalis mažesniuose grūdeliuose (<2 mm).

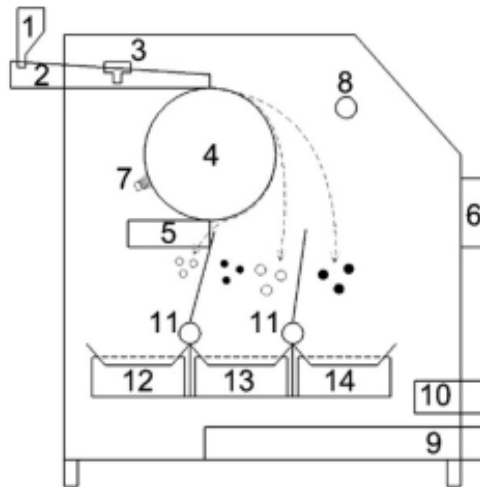
1 lentelė. Grūdelių dydžio pasiskirstymas ir Al bei PE-X masės dalis atliekų frakcijoje (Bedeković ir Trbović 2020)

Grūdelių dydis (mm)	Masės dalis (%)	Al (%)	PE-X (%)
>4	2,7	3,2	96,8
3,15-4	9,8	1,0	99,0
2-3,15	38,7	7,2	92,8

1 lentelės pabaiga

1-2	45,7	62,8	37,3
0,5-1	2,5	66,7	33,3
<0,5	0,6	76,5	23,5

Elektrostatinio atskyrimo efektyvumas: didžiausias aliuminio atgavimas buvo pasiektas tam tikromis veleno greičio, įtampos ir padalytuvo padėties nustatymų sąlygomis. Koncentrato grynumas labai priklausė nuo šių parametrų (žr. 23 pav.).



23 pav. HT-150 elektrostatinio separatoriaus schema: 1) nuimamas pašarų bunkeris; 2) vibratoriaus tiek tuvas; 3) šildytuvas; 4) ritinys; 5) elektrovariklis; 6) variklio greičio reguliatorius; 7) šepetėlis; 8) elektrokodas; 9) maitinimo šaltinis; 10) įtampos reguliatorius; 11) skirstytuvai; 12, 13, 14) nuimami padėklai (Bedeković ir Trbović, 2020)

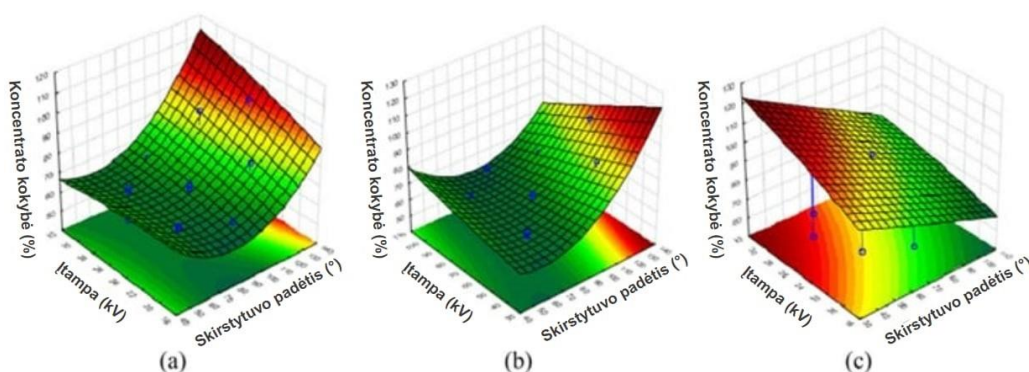


24 pav. Atskyrimo produktų analizė (Bedeković ir Trbović, 2020)

2 lentelė. Elektrostatinio atskyrimo 1–2 mm klasės rezultatai (Bedeković ir Trbović, 2020)

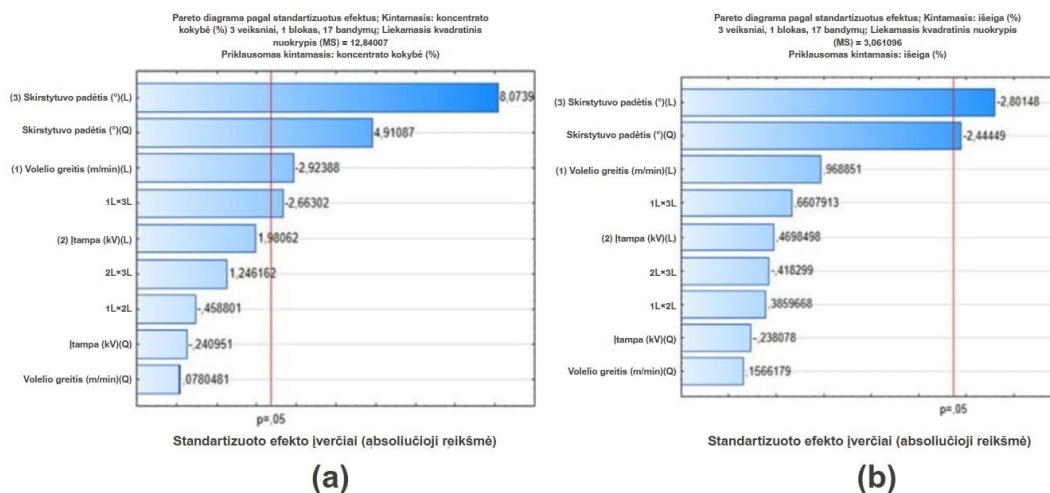
Bandymo Nr.	Veleno greitis	Įtampa	Padalytuvo padėtis	Grynumas (%)	Atgavimas (%)
1	-1,0000	-1,00000	-1,00000	63,83	96,64
2	-1,0000	1,00000	1,00000	88,97	97,09
...					
16	0,00000	0,00000	1,67332	97,86	91,20

Optimalios sąlygos: optimalios sąlygos didžiausiam grynumui ir atgavimui buvo vidutinis veleno greitis ir įtampa su didesniu padalytuvo pakreipimu (žr. 25 pav.).



25 pav. Koncentrato grynumo regresijos plokštumos bandyme Nr. 17Pav. a: Veleno greitis = 70 m/minPav. b: Įtampa = 25 kVPav. c: Padalytuvo padėtis = 131,83° (Bedeković ir Trbović, 2020)

Kintamųjų reikšmingumas: padalytuvo padėtis buvo svarbiausias veiksnys, turintis įtakos grynumui ir atgavimui, po to sekė veleno greitis ir jo sąveika su padalytuvo padėtimi (žr. 26 pav.).



26 pav. Veikimo kintamųjų ir jų sąveikos įtakos koncentrato rūšiai (a) ir regeneracijai (b) įvertinimas (Bedeković ir Trbović, 2020)

Elektrostatinis atskyrimas yra veiksmingas būdas atgauti aliuminį iš elektrinių kabelių perdirbimo likučių. Tyrimas pabrėžia optimalios veikimo sąlygų svarbą, siekiant didelio atgavimo ir aliuminio grynumo rodiklių. Tyrimas pateikia įžvalgas apie optimalias darbo sąlygas, siekiant maksimalaus atgavimo ir aliuminio grynumo. Ateityje galėtų būti tiriamas didesnių grūdelių dydžių atskyrimas ir palyginimas su gravitaciniu koncentravimo metodu.

Be elektrostatinių metodų, laidų atliekoms perdirbti taikomi ir kiti fizikiniai bei mineralų apdorojimo principai pagrįsti metodai. Pita ir Castilho (2018) tyrime analizuojami vario ir plastiko atskyrimo būdai. Šio tyrimo tikslas buvo atskirti varį nuo plastiko elektros kabelių atliekose, naudojant mineralų apdorojimo technikas, tokias kaip sijojimas, vibruojančio stalo ir putų flotacija. Tyrimas parodė, kad sijojimas ir vibruojantis stalas yra veiksmingi metodai, pasiekiantys apie 97% vario atkūrimą su panašia koncentracija. Putų flotacija pasiekė mažesnę efektyvumą dėl hidrofobinio plastiko ir vario pobūdžio, reikalaujančio naudoti depresantus.

Tyrimo buvo naudojamos granuliuotos elektros kabelių atliekos su visiškai išlaisvintomis vario ir plastiko dalelėmis. Vario viela turėjo $8,84 \text{ g/cm}^3$ tankį, o plastikas – $1,34 \text{ g/cm}^3$ tankį. Dalelės buvo padalintos į septynias dydžio frakcijas analizei.

Apdorojimo technikos:

- **Sijojimas.** Eksperimentai atlikti naudojant „Denver“ laboratorinį sieta, su trimis skirtingais vandens srauto greičiais (2, 3 ir 4 l/min). Sijojimas pasirodė efektyvus, atskiriant varį nuo plastiko, remiantis tankio skirtumais.
- **Vibruojantis stalas.** Eksperimentai atlikti naudojant „Wilfley“ laboratorinį stalą, keičiant stalo pasvirimo kampą ir plovimo vandens srauto greitį. Atskyrimo efektyvumas buvo veikiamas šių parametrų.
- **Putų flotacija.** Eksperimentai atlikti naudojant „Denver“ flotacinę ląstelę, su vario depresantais (natrio sulfidą ir meso dimerkaptosukcininę rūgštį) sumažinant vario natūralų plūdrumą. Tyrimo buvo keičiama šių depresantų ir putoklio reagento (MIBC) koncentracija.

- **Sijojimas** (žr. 3 lentelę):
 - Vandens srauto greičio poveikis: vario atkūrimas buvo didžiausias mažiausiu vandens srauto greičiu (2 L/min), o plastiko atkūrimas buvo didžiausias didžiausiu vandens srauto greičiu (4 L/min).
 - Atskyrimo efektyvumas: geriausias efektyvumas (95,5%) buvo pasiektas tarpinio srauto greičiu (3 L/min).

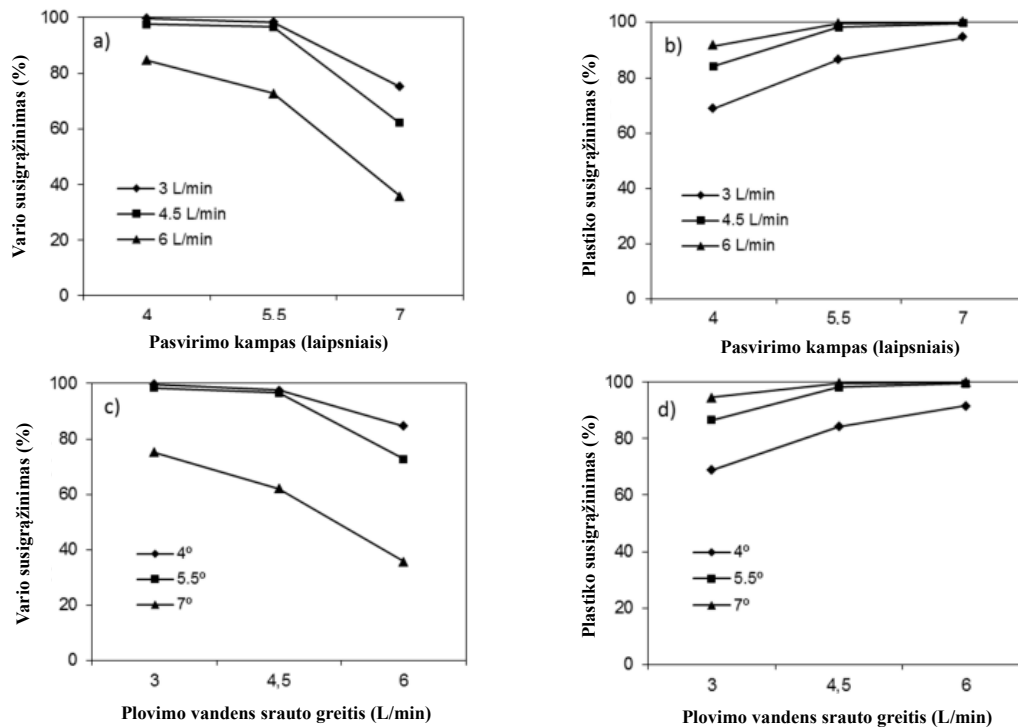
3 lentelė. Eksperimentinė matrica ir sijojimo atskyrimo rezultatai (trijų bandymų vidurkis)(Pita ir Castilho, 2018)

Vandens srauto greitis (L/min)	Vario atkūrimas (%)	Vario koncentracija (%)	Plastiko atkūrimas (%)	Plastiko koncentracija (%)	Atskyrimo efektyvumas (%)
2	98,4	91,6	93,8	98,8	92,2
3	97,8	96,7	97,7	98,5	95,5
4	94,6	97,8	98,5	96,4	93,1

- **Vibruojantis** (žr. 4 lentelę):
 - Parametrų įtaka: geriausi rezultatai buvo pasiekti su tarpinio stalo pasvirimo kampų (5,5°) ir plovimo vandens srauto greičiu (4,5 L/min), pasiekiant 96,6% vario atkūrimą ir 97% koncentraciją.
 - Sąveikos efektai: vario atkūrimas buvo jautresnis plovimo vandens srauto greičio pokyčiams esant didesniems stalo pasvirimo kampams.

4 lentelė. Eksperimentinė matrica ir vibruojančio stalo atskyrimo rezultatai (trijų bandymų vidurkis) (Pita ir Castilho, 2018)

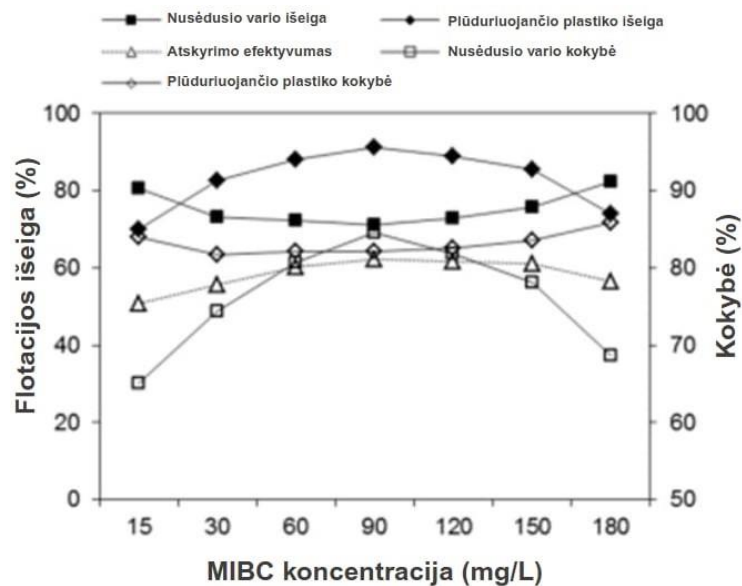
1 Pasvirimo kampas (°)	Plovimo vandens srautas	Vario atkūrimas (%)	Vario koncentracija (%)	Plastiko atkūrimas (%)	Plastiko koncentracija (%)	Atskyrimo efektyvumas (%)
4	3	99,7	68,8	68,8	99,7	68,6
4	4,5	97,7	81,0	84,2	98,1	81,9
4	6	84,8	87,4	91,6	89,7	76,4
5,5	3	98,5	83,5	86,6	98,8	85,1
5,5	4,5	96,6	97,4	98,2	97,7	94,8
5,5	6	72,8	99,1	99,6	84,2	72,4
7	3	75,2	90,5	94,5	84,7	69,7
7	4,5	62,1	99,4	99,8	79,8	62,9
7	6	35,7	100,0	100,0	69,3	35,7



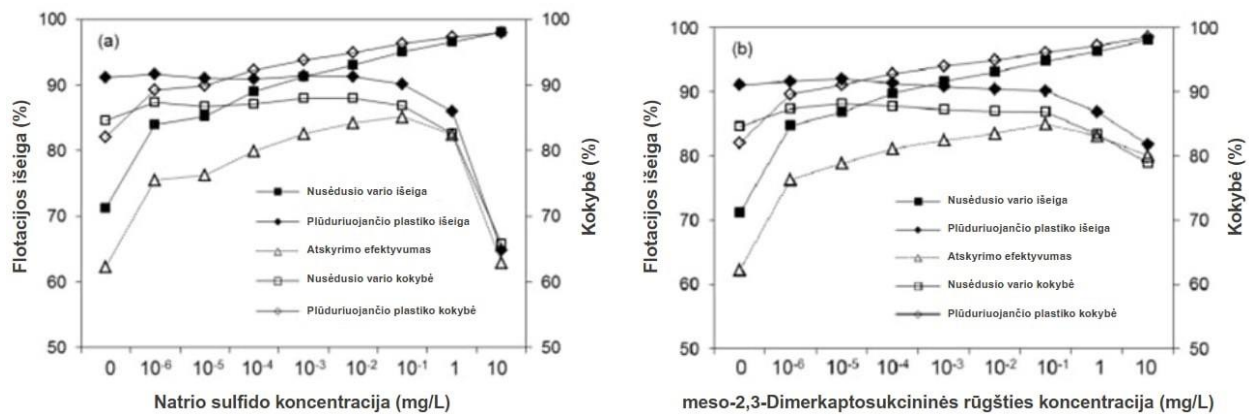
27 pav. Stalo pasvirimo kampo ir plovimo vandens srauto sąveikos poveikis vario atkūrimui (a, c) ir plastiko atkūrimui (b, d). (Pita ir Castilho, 2018)

• Putų flotacija:

- Putoklio koncentracijos poveikis: optimali vario koncentracija (84,6%) ir atkūrimas (71,2%) buvo pasiekti su tarpine putoklio koncentracija (90 mg/l) (žr. 28 pav.).
- Depresantų poveikis: geriausi rezultatai buvo pasiekti su 10^{-1} mg/l natrio sulfido ir meso-2,3-dimerkaptosukcininės rūgšties koncentracijomis, pasiekiant apie 95% vario atkūrimą ir 85% atskyri
- mo efektyvumą (žr. 29 pav.).



28 pav. Vario atkūrimas ir koncentracija surinktame produkte bei plastiko atkūrimas ir koncentracija putose priklausomai nuo MIBC koncentracijos (Pita ir Castilho, 2018)



29 pav. Plastiko atkūrimas ir koncentracija putose, vario atkūrimas ir koncentracija surinktame produkte bei atskyrimo efektyvumas priklausomai nuo natrio sulfido (a) ir meso-2,3-dimerkaptosukcininės rūgšties (b) koncentracijos (Pita ir Castilho, 2018)

Sijojimas ir vibruojantis stalas yra labai veiksmingi vario atskyrimui nuo plastiko elektros kabelių atliekose, su apie 95% siekiančiu efektyvumu. Putų flotacija, nors ir mažiau efektyvi, gali būti pagerinta naudojant tinkamus depresantus. Tyrėjai siūlo tęsti tyrimus naudojant flotacinius stulpelius, siekiant pagerinti stambių dalelių atskyrimo efektyvumą.

1.4. Apibendrinimas

Elektrinių kabelių atliekų perdirbimo metodų analizė parodė, kad izoliacijos pašalinimui ir metalų (ypač vario ir aliuminio) atskyrimui taikomi įvairūs technologiniai sprendimai tokie, kaip terminio apdorojimo, chlorido volatilizacijos, elektrostatinio separavimo, brinkimo, centrifuginio bei mineralų perdirbimo pagrindu veikiančios technologijos. Literatūroje aprašytų tyrimų rezultatai rodo, jog šių metodų efektyvumas priklauso nuo naudojamų medžiagų fizinių ir cheminių savybių, technologinių parametrų (temperatūros, įtampos, reagentų koncentracijos ir pan.) ir atskyrimo proceso konfigūracijos.

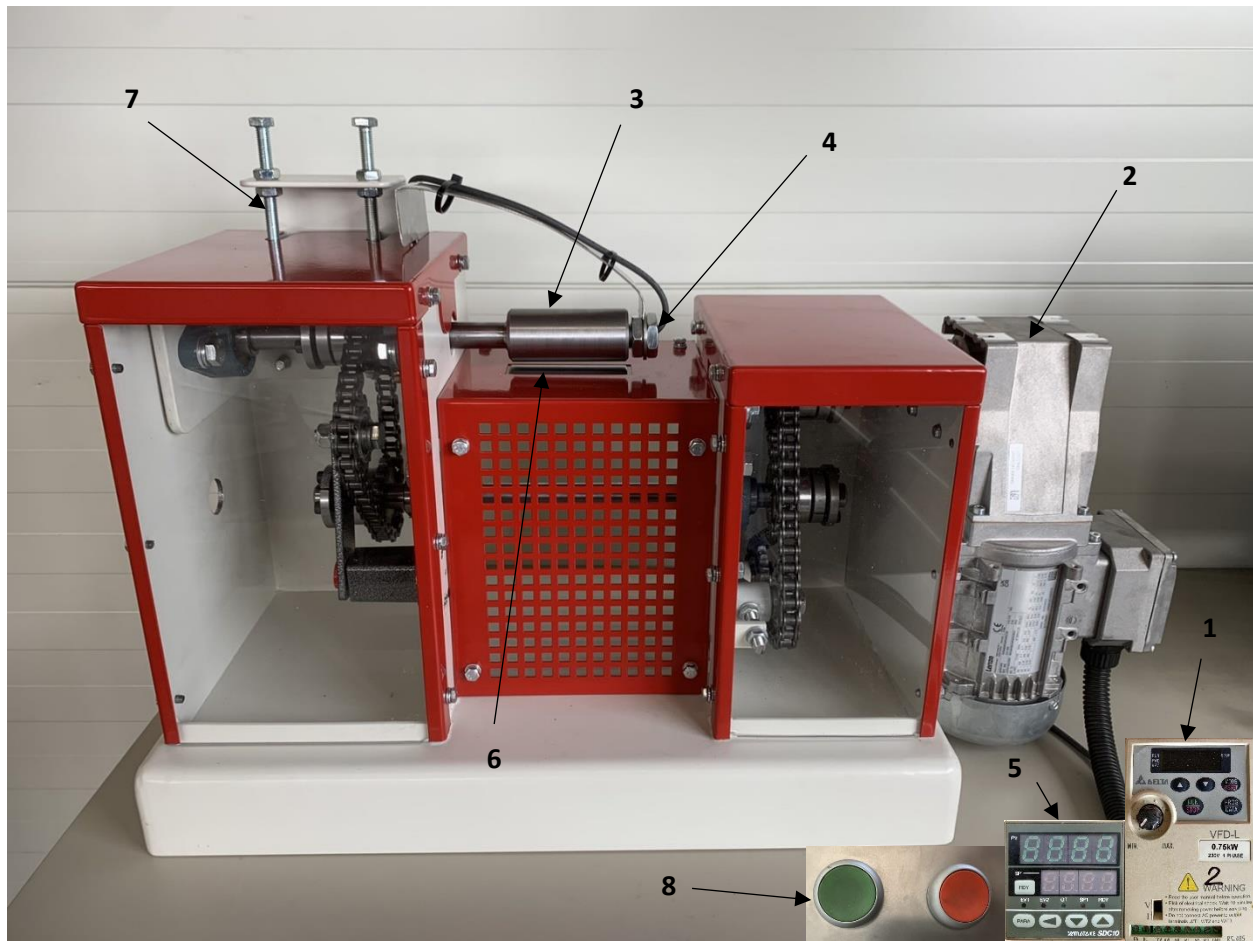
Atlikta apžvalga pagrindžia šio darbo aktualumą ir tyrimo kryptį – egzistuoja aiškus poreikis sukurti efektyvią ir aplinkai saugią laidų izoliacijos šalinimo sistemą, kuri būtų pritaikyta eksperimentiniam bei skaitmeniniam vertinimui. Įžvalgos iš nagrinėtų tyrimų leidžia pagrįsti pasirinkto žievės pašalinimo metodo sprendinius, eksperimentinio stendo konstrukciją bei parametrų parinkimą. Taip pat jos padeda formuluoti tyrimo metodiką, apimančią tiek praktinį eksperimentavimą, tiek 3D modeliavimo analizę, siekiant palyginti gautus rezultatus ir įvertinti proceso efektyvumą ir jo tikslumą.

2. EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ METODIKA IR STENDAS

2.1. Tyrimų stendas

Tyrimų stendas pateiktas 30 pav. – jis sudarytas iš toliau pateiktų komponentų:

1. **Dažnio keitiklis** – prietaisas, naudojamas elektros variklių sukimosi greičiui reguliuoti, keičiant tiekiamos elektros srovės dažnį. Tai leidžia efektyviau valdyti variklių darbą, taupyti energiją ir pritaikyti variklių veikimą prie specifinių poreikių.
2. **Motoreduktorius** – mechaninis įrenginys, kuris jungia elektrinį variklį su pavarų dėže. Jo tikslas yra sumažinti variklio apskukų skaičių ir padidinti sukimo momentą. Tai leidžia efektyviai perduoti galią ir valdyti judesį įvairiuose pramoniniuose ir buitiniuose prietaisuose, pavyzdžiui, konvejeriuose, liftuose ir automatinėse duryse.
3. **Kaitinamas būgnas** – viršutinėje mašinos dalyje ir atlieka pagrindinį vaidmenį šalinant izoliaciją nuo laido. Jo paviršius įkaista iki nustatytos temperatūros, kuri reguliuojama skaitmeniniu temperatūros reguliatoriumi. Kaitra suminkština arba dalinai ištirpdo izoliacinę medžiagą, taip paruošdama ją nuėmimui. Kaitinamas būgnas taip pat sukasi ir kartu su nekaitinamuoju būgnu traukia laidą per apdirbimo zoną. Tikslus šio būgno temperatūros ir greičio valdymas leidžia apdoroti skirtingo tipo laidus, išlaikant aukštą darbo kokybę ir išvengiant pažeidimų.
4. **Kaitinimo elementas** – suteikia būtiną šiluminę energiją kaitinamam būgnui. Jis užtikrina, kad kaitinamas būgnas pasiektų ir palaikytų nuolatinę ir optimalią temperatūrą izoliacijos nuėmimo procesui.
5. **Skaitmeninis temperatūros valdiklis** – prietaisas, naudojamas temperatūrai reguliuoti tam tikroje aplinkoje ar sistemoje. Jis stebi esamą temperatūrą per jutiklį ir lygina ją su nustatyta norima verte.
6. **Nekaitinamas būgnas** – įrengtas apatinėje mašinos dalyje ir dirba kartu su kaitinamuoju būgnu. Nors jis neturi šildymo funkcijos, jo mechaninis vaidmuo yra itin svarbus – būgnas padeda tiksliai traukti laidą ir išlaikyti jį stabilų proceso metu. Jis užtikrina pastovų laido įtempimą, nukreipimą bei padeda išvengti slydimo ar iškrypimų, kurie galėtų lemti netolygų izoliacijos nuėmimą ar laido pažeidimą. Nekaitinamas būgnas su kaitinamuoju sudaro darbo porą, kurios sinchronizuotas sukimosi judėjimas užtikrina tolygų ir efektyvų procesą.



30 pav. Laidų izoliacijos pašalinimo mašinos bendras vaizdas: 1 – dažnio keitiklis;
2 – motoreduktorius; 3 - kaitinamas būgnas; 4 – kaitinimo elementas; 5 –
skaitmeninis temperatūros valdiklis; 6 – nekaitinamas būgnas, 7 – mechaninis tarpo
reguliatorius, 8 – įjungimo ir išjungimo mygtukai

Tyrimų stendas veikia per kelis žingsnius, kad efektyviai pašalintų izoliaciją nuo laidų:

1. Velenas 3 yra kaitinamas kaitikliu 4, o jo temperatūra tiksliai reguliuojama skaitmeniniu temperatūros valdikliu 5. Kaitinimo tikslas – suminkštinti ar ištirpdyti laidą dengiančią izoliaciją, kad ją būtų lengviau pašalinti.
2. Laidas tiekiamas tarp dviejų velenų – kaitinamo 3 ir nekaitinamo 6. Abu velenai sinchroniškai sukami motoreduktoriaus 2, traukdami laidą per tarpą tarp jų. Sukimosi greitis reguliuojamas potenciomtru esančiu dažnio keitiklyje 1, kuris leidžia pritaikyti greitį pagal apdorojamo laido tipą ir izoliacijos storį.
3. Atstumas tarp velenų reguliuojamas mechaniniu būdu – rankiniu reguliatoriumi 7. Pasiekus reikiamą tarpą, velenų padėtis užfiksuojama, taip užtikrinant pastovų spaudimą ir tikslumą viso proceso metu.

4. Kai laidas juda tarp velenų, izoliacija suminkštėja nuo kaitinimo ir dėl mechaninio slėgio yra atskiriama nuo metalo šerdies. Procesas yra efektyvus ir pritaikomas įvairaus tipo laidams.
5. Įrenginys paleidžiamas įjungimo ir išjungimo mygtukais 8.

Siekiant įvertinti sukonstruoto stendo veikimo efektyvumą bei atskirų parametrų – ypač šiluminio poveikio ir laido judėjimo greičio įtaką izoliacinių medžiagų elgsenai, buvo atliktas eksperimentinis tyrimas. Eksperimentinio tyrimo metu laidų judėjimo greičiai buvo parinkti siekiant tiksliai įvertinti izoliacinių medžiagų elgseną esant skirtingo intensyvumo šiluminiam poveikiui. Tyrimui buvo pasirinkti du linijiniai kabelio traukimo greičiai – 0,1 m/s ir 0,05 m/s, kurie atitinka vidutinius ir mažus izoliacijos judėjimo greičius realiose technologinėse sąlygose. Šie greičiai parinkti atsižvelgiant į reikšmingą kontaktinio laiko įtaką šilumos perdavimui ir deformacijai: mažesnis greitis reiškia ilgesnį kabelio kontaktą su kaitinamu volu, todėl leidžia geriau įvertinti izoliacijos minkštėjimo bei lydymosi ribas. Tokie parametrai taip pat yra praktiškai įgyvendinami per dažnio keitiklį, atitinkamai nustatant variklio sukimosi dažnį ir leidžiant tiksliai valdyti šiluminio poveikio intensyvumą.

Skaičiavimo duomenys

- Variklio apsisukimų skaičius: $\eta_{\text{reduktoriaus}} = 1390 \text{ aps./min.}$
- Reduktoriaus perdavimo skaičius: $i = 10.$
- Veleno skersmuo: $d = 40 \text{ mm.}$
- Veleno spindulys: $r = 0,02 \text{ m.}$
- Variklio nominalus dažnis: $f_{\text{variklio}} = 50 \text{ Hz.}$
- Reikalingi greičiai: $v_1 = 0,1 \text{ m/s}$ ir $v_2 = 0,05 \text{ m/s.}$

Skaičiavimas

Reduktoriaus išėjimo greitis:

$$\eta_{\text{išėjimo}} = \frac{\eta_{\text{reduktoriaus}}}{i} \quad (1)$$

Čia: $\eta_{\text{išėjimo}}$ – reduktoriaus išėjimo greitis; $\eta_{\text{reduktoriaus}}$ – variklio apsisukimų skaičius; i – perdavimo skaičius;

$$\eta_{išėjimo} = \frac{1390}{10} = 139 \text{ aps./min}$$

Veleno paviršiaus apskritimo ilgis:

$$C = \pi \cdot d \quad (2)$$

Čia: C – veleno paviršiaus apskritimo ilgis, m; d – veleno skersmuo, m;

$$C = 3,14 \cdot 0,04 = 0,1257 \text{ m/s}$$

Kabelio linijinis greitis apskaičiuojamas remiantis veleno paviršiaus judėjimu, laikant, kad tarp kabelio ir veleno nėra slydimo. Kadangi veleno paviršius juda apskritiminės trajektorijos greičiu, linijinis greitis v tiesiogiai priklauso nuo veleno apsisukimų skaičiaus per minutę n ir jo apskritimo ilgio C , kuris išreiškiamas kaip $C = \pi \cdot d$, todėl gauname (Budynas ir Ragulskis, 2004):

$$v = \frac{n \cdot C}{60} \quad (3)$$

Čia: v – laidų judėjimo greitis, m/s; n – veleno apsisukimų skaičius per minutę, aps./min.;

Išsireiškiame n :

$$n = \frac{v \cdot 60}{C} \quad (4)$$

Reikalingi veleno apsisukimai:

Kai $v_1 = 0,1 \text{ m/s}$:

$$n_1 = \frac{0,1 \cdot 60}{0,1257} = 47,75 \text{ aps./min.}$$

Kai $v_2 = 0,05 \text{ m/s}$:

$$n_2 = \frac{0,05 \cdot 60}{0,1257} = 23,87 \text{ aps./min.}$$

Reikalingo dažnio nustatymas:

Kadangi 139 aps./min atitinka variklio 50 Hz, iš to susidaroma proporcija:

(5)

$$f = \frac{n}{n_{\text{išėjimo}}} \cdot f_{\text{variklio}}$$

Čia: f – reikalingas variklio dažnis, Hz; n – reikalingas variklio apsisukimų skaičius, aps./min;

Kai $n_1 = 47,75$ aps./min:

$$f_1 = \frac{47,75}{139} \cdot 50 = 17,17 \text{ Hz}$$

Kai $n_2 = 23,87$ aps./min:

$$f_1 = \frac{23,87}{139} \cdot 50 = 8,59 \text{ Hz}$$

Eksperimento duomenys

5 lentelė. Laidų žievės pašalinimo greitis, naudojant skirtingas temperatūras

Izoliacijos Tipas	Temperatūra	Gretis
PVC	150°C	0,1 m/s
PVC	150°C	0,05 m/s
PVC	200°C	0,1 m/s
PVC	200°C	0,05 m/s
PVC	250°C	0,1 m/s
PVC	250°C	0,05 m/s
PE	150°C	0,1 m/s
PE	150°C	0,05 m/s
PE	200°C	0,1 m/s
PE	200°C	0,05 m/s
PE	250°C	0,1 m/s
PE	250°C	0,05 m/s
PTFE	150°C	0,1 m/s
PTFE	150°C	0,05 m/s
PTFE	200°C	0,1 m/s
PTFE	200°C	0,05 m/s
PTFE	250°C	0,1 m/s
PTFE	250°C	0,05 m/s

2.2. Bandymo ruošiniai

Eksperimento metu buvo naudoti polivinilchlorido (PVC) izoliacija dengti laidų ruošiniai. Kiekvieno ruošinio ilgis siekė 500 mm, o bendras skersmuo – 3 mm, iš kurių 1 mm sudarė izoliacijos sluoksnis. Šie laidai pasižymi minkšta ir termiškai lengvai veikiama danga, todėl ypač tinkami šiluminiam nužievinimo procesui tirti (žiūrėti 31 pav.).



31 pav. PVC ruošiniai

Polietileno (PE) izoliacija dengti laidų ruošiniai taip pat buvo paruošti 500 mm ilgio. Bendras laido skersmuo sudarė 3 mm, iš jų 1 mm – izoliacinės medžiagos storis. PE izoliacija pasižymi didesniu atsparumu šilumai nei PVC, todėl svarbu vertinti jos elgseną kaitinant ir veikiant mechaniniu slėgiu (žr. 32 pav.).



32 pav. PE ruošiniai

Eksperimente naudoti ir politetrafluoretileno (PTFE) izoliacija dengti laidai, kurių kiekvienas buvo 500 mm ilgio, 3 mm bendro skersmens, o izoliacijos storis siekė 1 mm. PTFE yra viena iš termiškai ir chemiškai atspariausių izoliacinių medžiagų, todėl šie ruošiniai buvo pasirinkti tam, kad įvertinti proceso veiksmingumą esant sudėtingesnėms eksploataavimo sąlygoms (žr. 33 pav.).



33 pav. PTFE ruošiniai

2.3. Tyrimų medžiagos

Laidų izoliacijos terminio šalinimo kokybė ir efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo naudojamos izoliacinės medžiagos savybių. Tokie veiksniai, kaip šiluminis laidumas, lydymosi temperatūra, plėtimosi koeficientas, cheminis stabilumas ir atsparumas mechaniniam poveikiui lemia ne tik šalinimo proceso parametrus, bet ir jo saugumą bei poveikį aplinkai. Objektų medžiagų tinkamumo įvertinimas reikalauja kompleksiškos jų savybių analizės, apimančios ne tik šiluminį elgesį, bet ir poveikį aplinkai bei technologinį suderinamumą.

Norint suprasti, kaip skirtingos izoliacinės medžiagos reaguoja į terminį poveikį, būtina įvertinti jų fizines bei šiluminės savybes. 5 lentelėje apibendrinti pagrindiniai parametrai – tankis, šiluminis laidumas, šiluminio plėtimosi koeficientas ir lydymosi temperatūra – kurie lemia medžiagos elgseną kaitinimo metu. Papildomai nurodytas degumo lygis padeda įvertinti šių medžiagų tinkamumą terminio šalinimo technologijose, atsižvelgiant į saugos aspektus.

6 lentelė. Izoliacinių medžiagų fizinės ir šiluminės savybės

Savybė	Medžiaga		
	PVC	PE	PTFE
Tankis, kg/m^3	1400	950	2200
Šiluminis laidumas, $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$	0,19	0,35	0,25
Šiluminio plėtimosi koef., $1/\text{K}$	80×10^{-6}	200×10^{-6}	120×10^{-6}
Lydymosi temperatūra, $^{\circ}\text{C}$	~200	~200	>250
Atsparumas temperatūrai	Žemas	Vidutinis	Labai aukštas
Degumo lygis	Aukštas	Vidutinis	Labai mažas (nedegus)

Technologiniam sprendimui priimti ne mažiau svarbūs yra ir medžiagų eksploataciniai ypatumai. 6 lentelėje pateikti kriterijai, tokie, kaip naudojimo dažnumas, reakcija į mechaninį veikimą, įrankių dėvėjimas, šiluminis jautrumas bei reikalaujama kontrolės kokybė - padeda įvertinti kiekvienos medžiagos pritaikomumą ilgalaikiam naudojimui, proceso stabilumui ir ekonominiam efektyvumui.

7 lentelė. Technologinis pritaikomumas

Aspektas	Medžiaga		
	PVC	PE	PTFE
Naudojimo dažnumas	Labai dažnai	Dažnai	Retai
Reakcija į mechaninį veikimą	Minkštėja greitai	Vidutinis elastingumas	Kieta, inertiška
Šiluminis jautrumas	Aukštas	Vidutinis	Mažas

Taigi, atlikta analizė parodė, kad skirtingos izoliacinės medžiagos pasižymi aiškiai išreikštais fiziniais, šiluminiais, aplinkosauginiais ir technologiniais skirtumais. PVC reaguoja greičiausiai, bet turi aukštą perdegimo ir taršos riziką, PE pasižymi vidutiniu stabilumu ir efektyvumu tik esant aukštesnei temperatūrai, o PTFE išlieka mechaniškai atspari net esant intensyviam šiluminiam poveikiui. Šie rezultatai leidžia nuosekliai įvertinti medžiagų elgseną laidų izoliacijos terminio šalinimo procese ir pagrįsti tolimesnius tyrimo sprendimus bei modeliavimo parametrų pasirinkimą.

2.4. Eksperimentinių tyrimų metodika

Eksperimento eiga

Paruošimas (30 min):

1. Surinkti ir patikrinti visą įrangą.
2. Paruošti laidų mėginius: kiekvieno tipo izoliacinės medžiagos ilgis – 0,5 metro.
3. Užtikrinti, kad darbo vieta yra švari ir saugi.

Bandymo procedūra:

1. Laido įtempimas ir įvedimas į mašiną (5 min):
 - Laido įtempimo ir įvedimo tarp velenų taropelio nustatymas ir suregulavimas.
2. Kaitinimo proceso nustatymas (5 min):
 - Kaitinimo elemento ir kaitinamo veleno temperatūros nustatymas (pvz., 150°C pradiniam bandymui).

3. Kaitinimas ir izoliacijos nuėmimas (10 min):

- Nustatyti dažnį, kad atitiktų reikalingą sukimosi greitį (pvz. 0,1 m/s).
- Įjungti elektros variklį ir pradėkite kaitinimą.

4. Temperatūros ir laiko nustatymas (10 min):

- Pakartoti 3 žingsnį su skirtingomis temperatūromis (pvz., 150°C, 200°C, 250°C) ir keisti sukimosi greitį.

5. Kokybės kontrolė (10 min):

- Patikrinti pašalintos izoliacijos kokybę.
- Vertinti, ar laidininko šerdis nepažeista, ar izoliacija visiškai pašalinta.

Eksperimento duomenų analizė (30 min):

1. Surinkti visus eksperimentinius duomenis.
2. Sudaryti temperatūros, greičio ir deformacijos gylio santykio grafiką.
3. Palyginti efektyvumą esant skirtingoms temperatūroms.

Ataskaita (30 min):

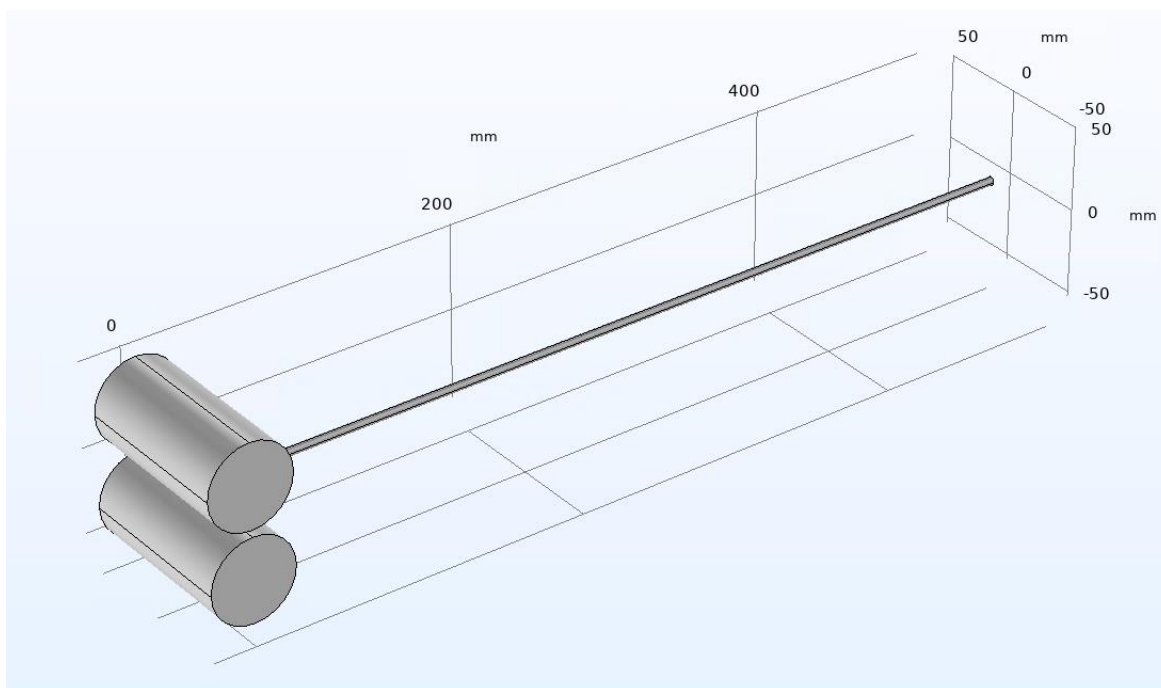
1. Apibendrinti eksperimentinius rezultatus.
2. Pateikti išvadas apie optimalią temperatūrą ir laiką izoliacijos pašalinimui.

3. SKAITMENINIO TYRIMO METODIKA

Modelis buvo sukurtas *COMSOL Multiphysics* aplinkoje, siekiant imituoti laidą su izoliacija, judantį tarp dviejų volų. Vienas volas yra kambario temperatūros, o kitas – kaitinamas iki tam tikros nustatytos temperatūros.

Geometrija

- Laido ilgis: 500 mm.
- Volų skersmuo: 40 mm.
- Izoliacijos storis: 3 mm.



34 pav. COMSOL MULTIPHYSIC modelis

Medžiagų savybės

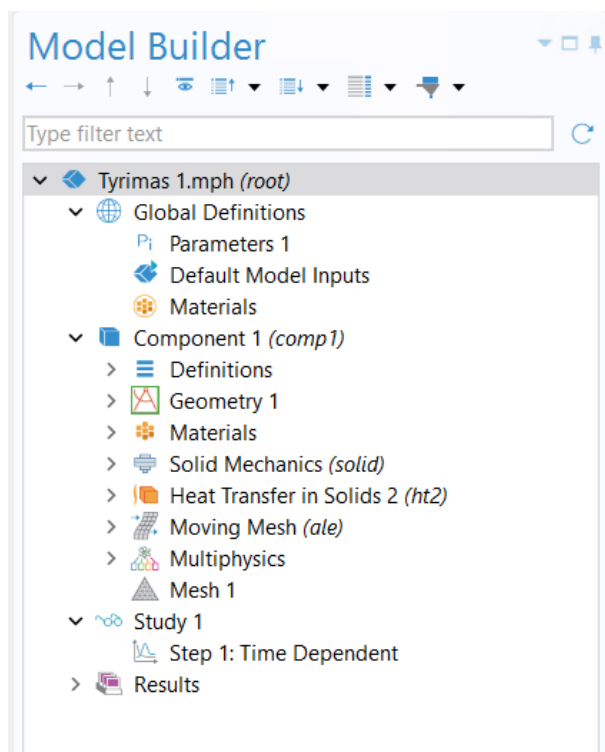
6 lentelė. COMSOL aplinkoje naudojamų medžiagų savybės

Savybė	Medžiaga		
	PVC	PE	PTFE
Tankis, kg/m ³	1400	950	2200

6 lentelės pabaiga

Šiluminis laidumas, W/(m·K)	0,19	0,35	0,25
Šiluminio plėtimosi koeficientas, 1/K	80×10^{-6}	200×10^{-6}	120×10^{-6}
Lydymosi temperatūra, °C	200	200	>250

Naudoti moduliai



35 pav. COMSOL MULTIPHYSIC naudoti moduliai

1. **Heat Transfer in Solids** – naudojama modeliuoti šilumos perdavimą iš kaitinamo volo į laidą ir izoliaciją.
2. **Moving Mesh (ALE)** – užtikrinamas tinkamas laido judėjimas tarp volų.
3. **Solid Mechanics** – analizuojamos įtampos ir deformacijos izoliacijoje dėl šiluminio poveikio.
4. **Time-Dependent** – naudojamas modeliuoti dinaminį šilumos poveikį ir laido judėjimą per volus, atsižvelgiant į kaitinimo temperatūrą bei kontaktinį laiką, taip pat padeda įvertinti,

kaip kintanti volo temperatūra ir laiko parametrai veikia šilumos sklaidą bei izoliacijos pašalinimo procesą.

Kontaktinio laiko skaičiavimas COMSOL modeliui

Laiko nustatymas Time-Dependent moduliui:

$$t = \frac{L}{v} \quad (6)$$

Čia: t – laikas, s; L – kabelio ilgis, m; v – kabelio judėjimo greitis, m/s;

Kai $v_1 = 0,1$ m/s:

$$t_1 = \frac{0,5}{0,1} = 5 \text{ s}$$

Kai $v_2 = 0,05$ m/s:

$$t_1 = \frac{0,5}{0,05} = 10 \text{ s}$$

4. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

4.1. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Šio eksperimento tikslas buvo įvertinti terminio metodo efektyvumą pašalinant izoliaciją nuo laidų, naudojant laidų izoliacijos nuėmimo mašiną. Eksperimente buvo naudojami laidai su skirtingų tipų izoliacinėmis medžiagomis: PVC, PE ir PTFE. Buvo atlikti keli bandymai, keičiant kaitinamo veleno temperatūrą ir velenų sukimo greitį. Temperatūros nustatymai buvo 150°C, 200°C ir 250°C. Kiekvieno temperatūros nustatymo metu buvo keičiamas greitis, reikalingas pašalinti 0,5 metro izoliacijos nuo laidų. Pašalinus izoliaciją buvo vertinama temperatūros ir greičio įtaka.

Bandymas su PVC atliktas esant 150 °C temperatūrai



36 pav. PVC izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 150°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s

Eksperimentas parodė, kad 150 °C temperatūra buvo per žema efektyviam PVC izoliacijos pašalinimui. Esant 0,1 m/s greičiui, šiluminis poveikis buvo per trumpas – izoliacija liko nepažeista, paviršius išliko šiurkštus, be reikšmingos deformacijos. Sumažinus greitį iki 0,05 m/s, matomas aiškesnis paviršiaus minkštėjimas, tačiau visišką izoliacijos pašalinimą nebuvo pasiektas. Ši temperatūra laikytina ribine – naudotina tik kaip pirminis šildymo etapas.

Bandymas su PVC atliktas esant 200 °C temperatūrai



37 pav. PVC izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 200°C, kairėje greitis 0,05 m/s, dešinėje greitis 0,1 m/s

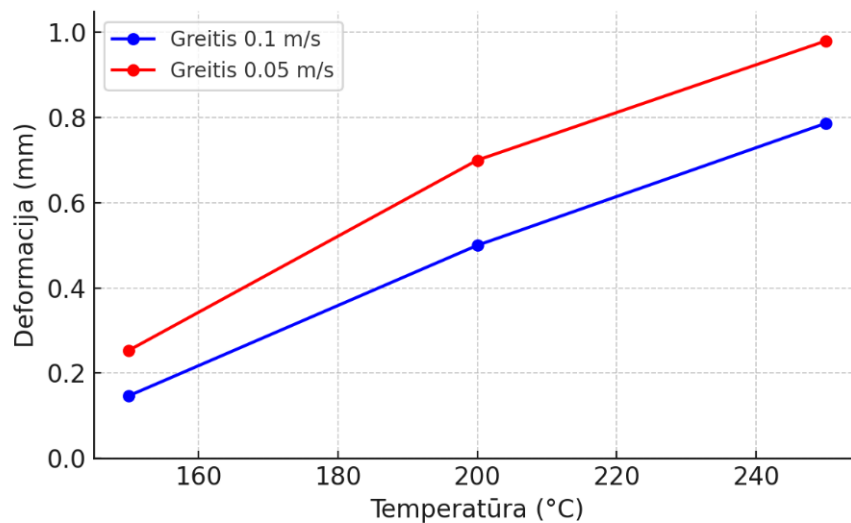
Padidinus temperatūrą iki 200 °C, PVC izoliacija pradėjo reaguoti daug aktyviau. Esant 0,1 m/s greičiui, paviršius akivaizdžiai minkštėjo, tačiau izoliacija dar nebuvo pašalinta visiškai. Esant mažesniai greičiui – 0,05 m/s – gautas optimalus rezultatas: izoliacinė medžiaga deformuojasi tolygiai, paviršius glotnus ir be liekanų. Tai parodė, kad 200 °C yra tinkama temperatūra PVC pašalinimui su minimaliu terminiu pažeidimu, tačiau reikia dar lėtesnio greičio.

Bandymas su PVC atliktas esant 250 °C temperatūrai



38 pav. PVC izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 250°C, kairėje greitis 0,05 m/s, dešinėje greitis 0,1 m/s

Eksperimentuojant su 250 °C temperatūra, pašalinimas tapo labai greitas, tačiau atsirado šalutinių efektų. Esant 0,1 m/s greičiui, paviršiuje matomi perdegimai, burbuliavimas, tamsėjantys plotai. Esant 0,05 m/s, izoliacija visiškai išsilydė, bet paviršius tapo lipnus, išsiskyrė intensyvūs dūmai. Nors pašalinimas labai efektyvus, ši temperatūra gali būti per didelė, jei neįrengta tinkama ventiliacija.



40 pav. PVC izoliacinės medžiagos pašalinimo eksperimento rezultatai vaizduojami grafiškai

Bandymas su PE atliktas esant 150 °C temperatūrai



39 pav. PE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 250°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s

Tyrimo rezultatai parodė, kad 150 °C temperatūra nepakankama efektyviam PE izoliacijos šalinimui. Nei esant 0,1 m/s, nei kai yra 0,05 m/s greičio nebuvo pasiekta reikšminga deformacija. Paviršius išliko standus ir nepakitęs, tik esant mažesniai greičiui fiksuotas minimalus paviršiaus minkštėjimas. Ši temperatūra laikytina netinkama PE atveju.

Bandymas su PE atliktas esant 200 °C temperatūrai



41 pav. PE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 200°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s

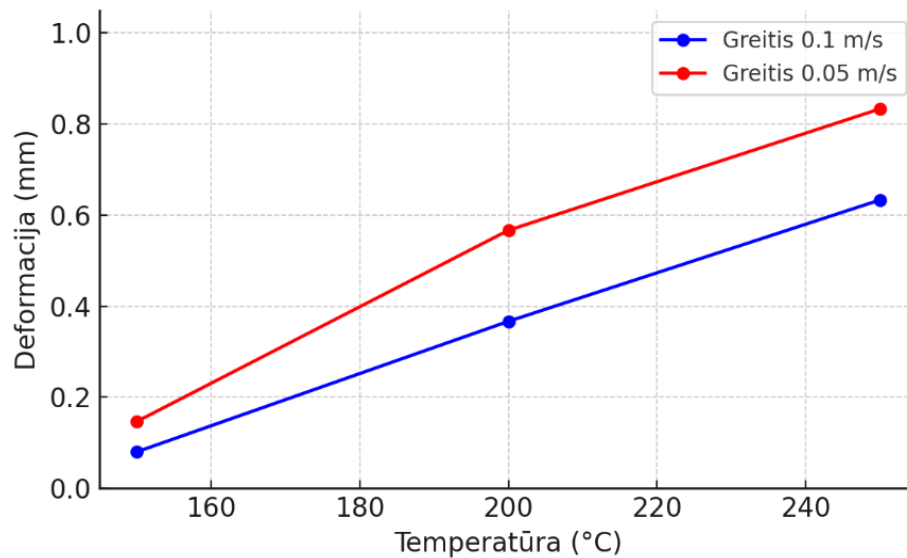
200 °C temperatūroje PE pradėjo reaguoti geriau. Esant 0,1 m/s greičiui, atsirado pradinis paviršiaus minkštėjimas, tačiau izoliacija dar neišsilydė pakankamai. Esant 0,05 m/s greičiui, deformacija tapo ryškesnė – paviršius tapo plastiškas, pašalinimas efektyvesnis. Ši temperatūra gali būti tinkama, jei padidinamas kontakto laikas.

Bandymas su PE atliktas esant 250 °C temperatūrai



42 pav. PE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 250°C, kairėje greitis 0,05 m/s, dešinėje greitis 0,1 m/s

Optimalus PE izoliacijos pašalinimas fiksuotas 250 °C temperatūroje. Esant 0,1 m/s greičiui, izoliacija deformavosi, bet dėl trumpo kontakto laiko kai kuriose vietose išliko neišsilydėjusi. Esant 0,05 m/s greičiui, pašalinimas vyko tolygiai – paviršius glotnus, be likučių, pašalinimas sėkmingas ir estetiškas. Ši temperatūra, kartu su lėtu greičiu, yra ideali PE atveju.



43 pav. PE izoliacinės medžiagos pašalinimo eksperimento rezultatai vaizduojami grafiškai

Bandymas su PTFE atliktas esant 150 °C temperatūrai



44 pav. PTFE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 150°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s

150 °C temperatūra, nepriklausomai nuo greičio, PTFE medžiagai buvo visiškai neefektyvi. Nei esant 0,1 m/s, nei 0,05 m/s greičiui nepastebėta jokių paviršiaus pokyčių. Izoliacija išliko visiškai nepažeista, kas tik patvirtina aukštą PTFE šiluminį atsparumą

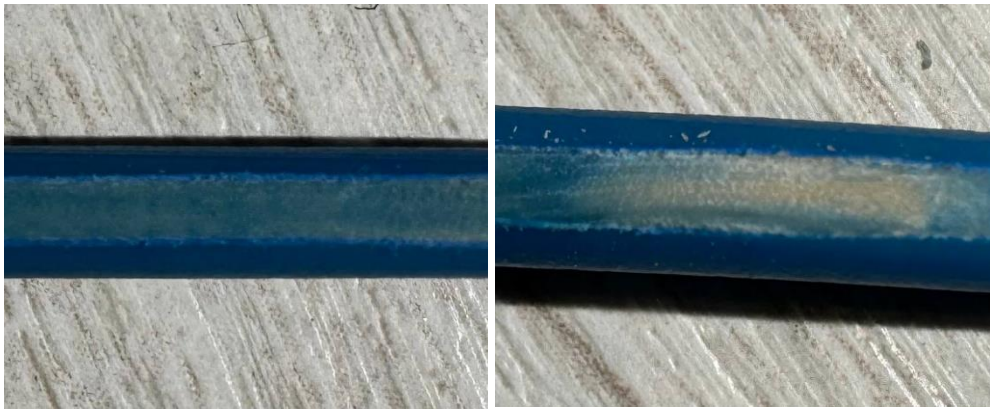
Bandymas su PTFE atliktas esant 200 °C temperatūrai



45 pav. PTFE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 200°C, kairėje greitis 0,05 m/s, dešinėje greitis 0,1 m/s

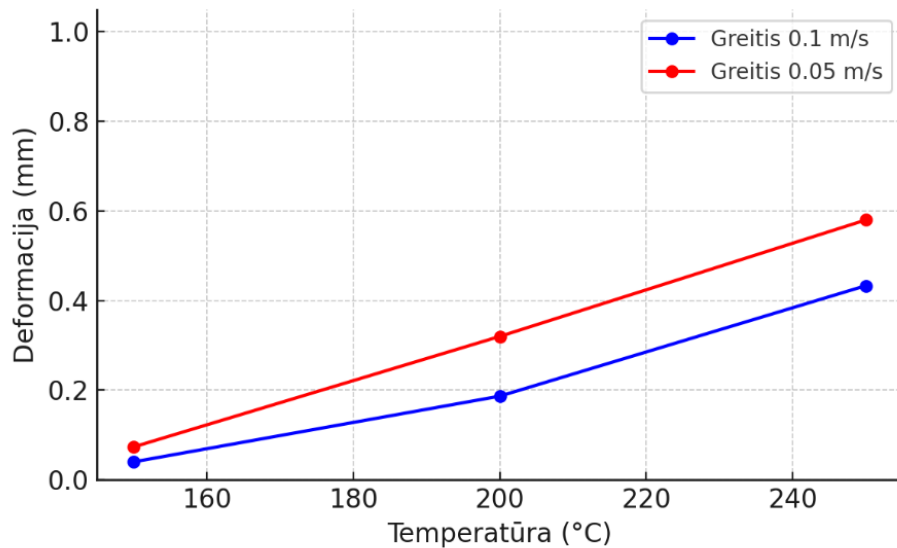
Esant 200 °C, šiluminis poveikis tapo labiau pastebimas. Kai yra 0,1 m/s greitis, fiksuotas nedidelis paviršiaus minkštėjimas, tačiau nepakankamas izoliacijai pašalinti. Esant 0,05 m/s greičiui, deformacija didesnė – paviršius kiek labiau keitėsi, bet izoliacijai pašalinti dar nepakako. Ši temperatūra laikytina ribine PTFE apdorojimui.

Bandymas su PTFE atliktas esant 250 °C temperatūrai



46 pav. PTFE izoliacinė medžiaga, kaitinamo veleno temperatūra 250°C, kairėje greitis 0,1 m/s, dešinėje greitis 0,05 m/s

Aukščiausia temperatūra (250 °C) davė geriausius rezultatus PTFE atveju. Esant 0,1 m/s greičiui, matoma paviršiaus deformacija, tačiau dėl trumpo kontakto izoliacija dar neišsilydo visiškai. Esant 0,05 m/s greičiui pasiektas geriausias rezultatas – paviršius aiškiai deformuotas, izoliacija pradeda atsiskirti, bet vidinė jos dalis vis dar išlieka kieta. Tai rodo, kad PTFE pašalinimui reikalingas dar intensyvesnis šiluminis režimas ar ilgesnis laiko intervalas.



47 pav. PTFE izoliacinės medžiagos pašalinimo eksperimento rezultatai vaizduojami grafiškai

Taigi, eksperimentiniai rezultatai parodė aiškų izoliacinių medžiagų elgsenos skirtumą terminio šalinimo metu. PVC reaguoja greičiausiai – jau esant 200 °C ir lėtam greičiui pasiekiamas efektyvus pašalinimas, tačiau esant 250 °C atsiranda perdegimo rizika. PE reikalauja aukštesnės temperatūros ir ilgesnio kontakto, o optimalus rezultatas pasiekiamas, kai yra 250 °C ir 0,05 m/s greičiis. PTFE, kaip ir tikėtasi, išlieka stabiliausia – reikšmingas pašalinimas nepasiekiamas net ir esant didžiausiam temperatūros režimui, todėl ši medžiaga pasirodė mažiausiai jautri šiluminiams poveikiui.

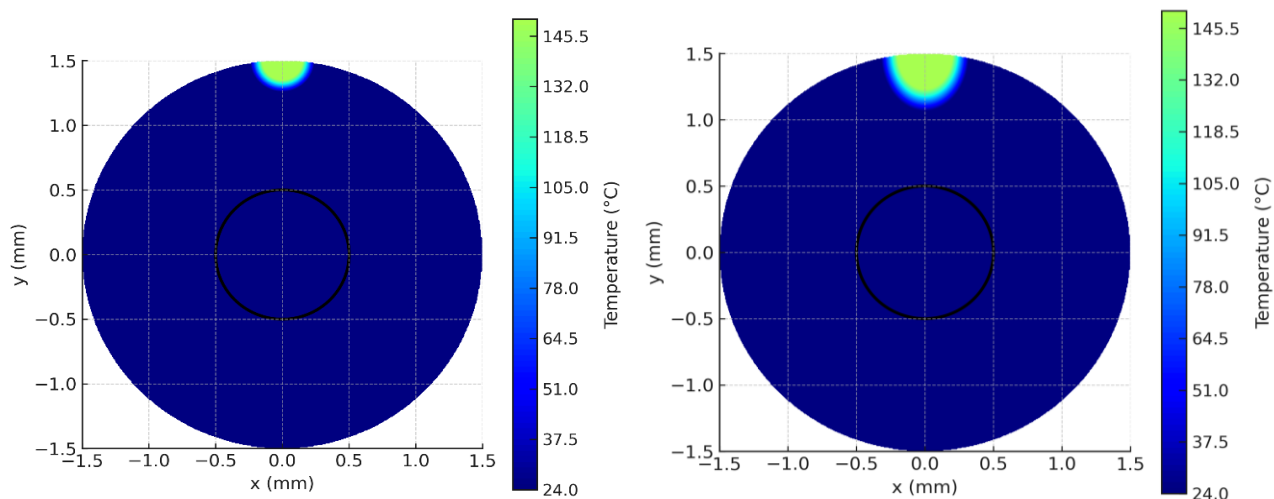
4.2. Skaitmeninių tyrimų rezultatai

Šilumos sklaidos modeliavimas parodė, kad medžiagų temperatūros pasiskirstymas priklauso nuo volo temperatūros, izoliacinės medžiagos šilumos laidumo, tirpimo temperatūros ir kontakto laiko. Toliau aptariami rezultatai kiekvienai medžiagai, esant trimis volo temperatūroms ir nurodytiems kontaktavimo laikams.

PVC

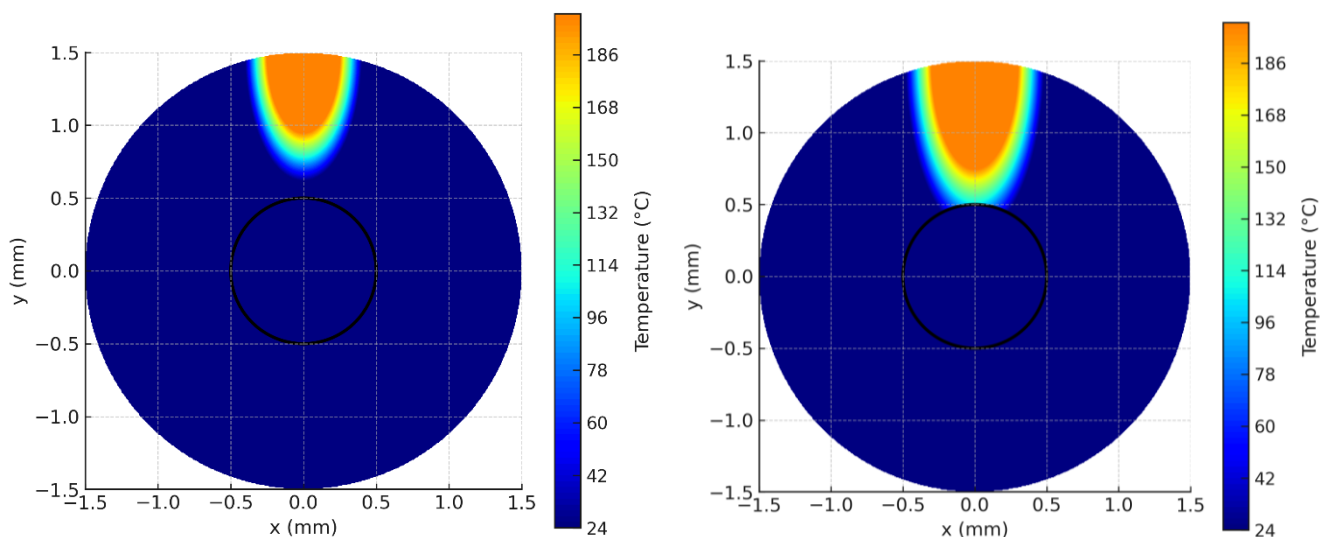
PVC yra termoplastinė medžiaga, kurios tirpimo temperatūra yra apie 200 °C. Šiluminio plėtimosi koeficientas yra vidutinio lygio, todėl ji gana sparčiai deformuojasi aukštesnėje temperatūroje.

Esant 150 °C temperatūrai ir 0,1 m/s greičiui, PVC deformacija yra nedidelė – apie 0,15 mm, o izoliacija išlaiko savo formą be reikšmingų pažeidimų. Tačiau sumažinus greitį iki 0,05 m/s, deformacija ir įkaitimo gylis padidėja iki 0,27 mm, nes ilgesnis kontaktas su kaitinamu paviršiumi leidžia daugiau šilumos patekti į izoliaciją (žr. 48 pav.).



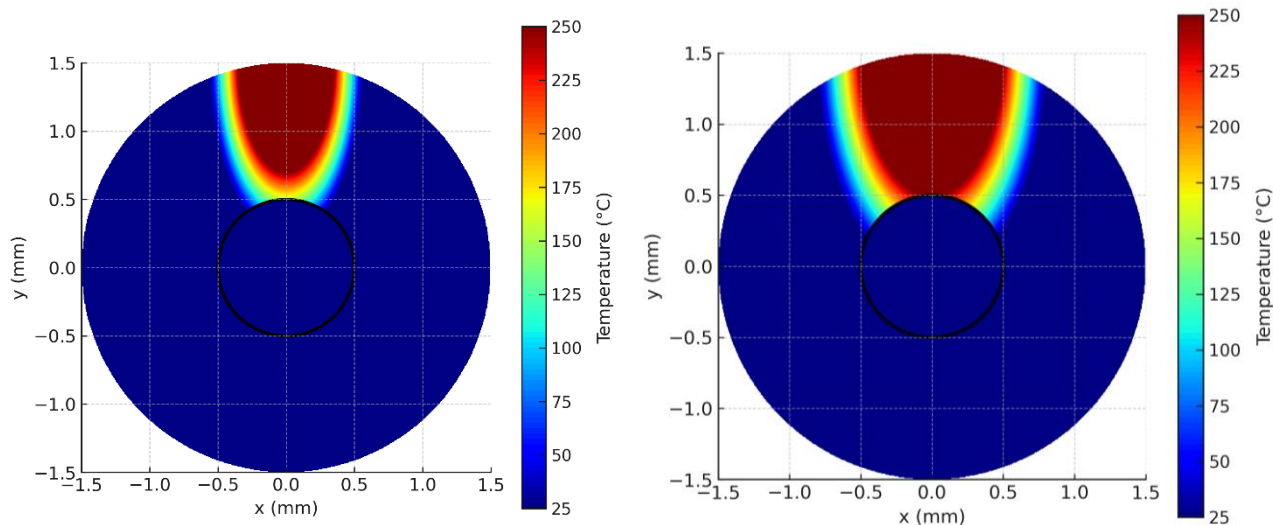
48 pav. PVC izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 150 °C.

Pakėlus temperatūrą iki 200 °C, deformacija gerokai išauga. Esant greičiui 0,1 m/s, izoliacija deformuojasi apie 0,55 mm, paviršius pastebimai suminkštėja. Tuo tarpu 0,05 m/s greičiu deformacija padidėja iki 0,75 mm, o paviršiuje galima stebėti plyšius ir lipnumą, nes pagal savo fizikines savybes medžiaga pradeda lydytis (žr. 49 pav.).

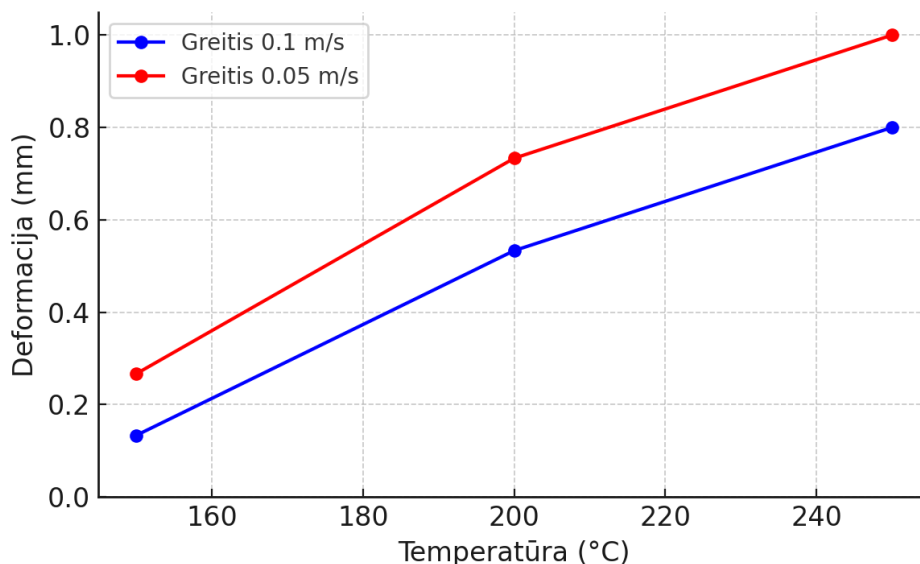


49 pav. PVC izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 200 °C

Esant 250 °C temperatūrai deformacijos skirtumai dar labiau išryškėja. 0,1 m/s greičiu deformacija siekia 0,80 mm, o esant 0,05 m/s – net 1,00 mm, todėl izoliacija tampa itin minkšta ir gali būti lengvai pašalinta, bet kartu padidėja rizika pažeisti patį laidininką (žr. 50 pav.).



50 pav. PVC izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 250 °C

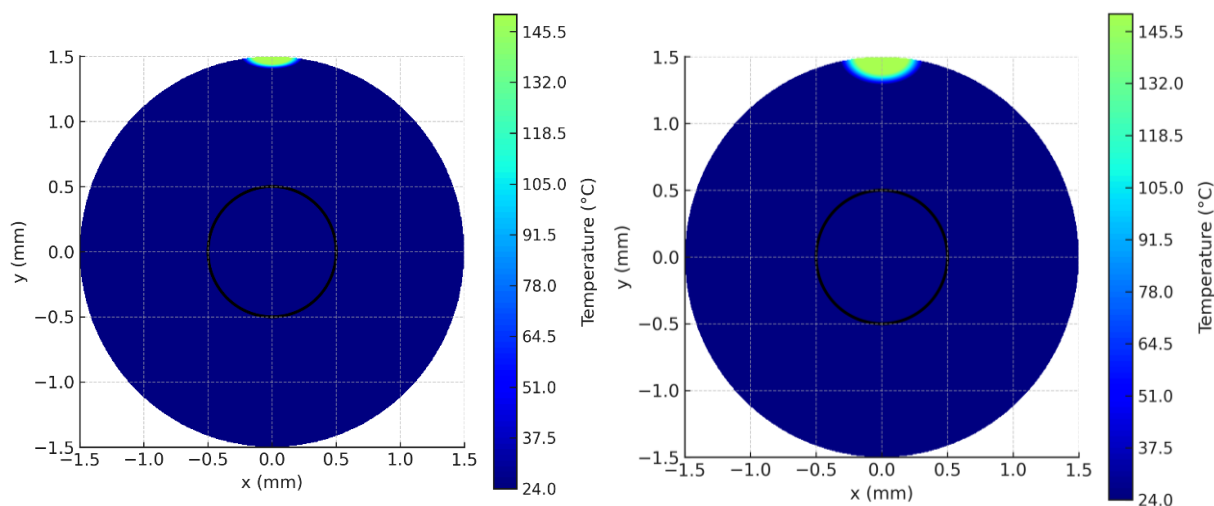


51 pav. PVC izoliacinės medžiagos pašalinimo *COMSOL* modeliavimo rezultatai vaizduojami grafiškai

PE

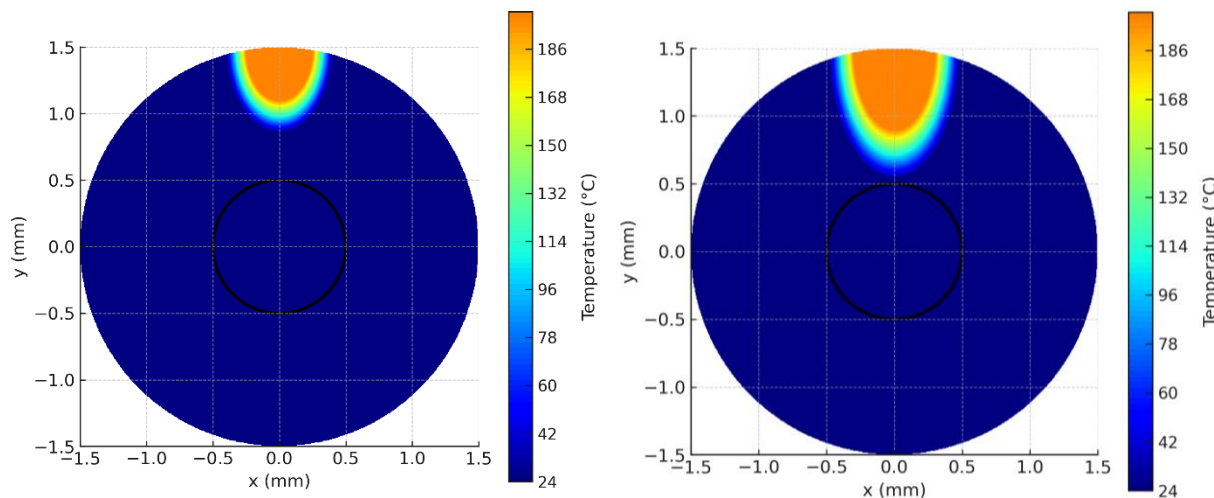
PE yra dar viena termoplastinė medžiaga, tačiau jos šiluminio plėtimosi koeficientas yra aukštas. Ji pradeda minkštėti apie 200°C, tačiau išlaiko šiek tiek didesnę atsparumą šilumai nei PVC.

Esant $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir $0,1\text{ m/s}$ greičiui, PE deformacija yra labai minimali – tik apie $0,06\text{ mm}$, o izoliacijos forma išlieka stabili. Sumažinus greitį iki $0,05\text{ m/s}$, deformacija padidėja iki $0,13\text{ mm}$, tačiau medžiaga vis dar išlaiko tvirtumą ir nėra pastebima ryškių šiluminių pažeidimų (žr. 52 pav.).



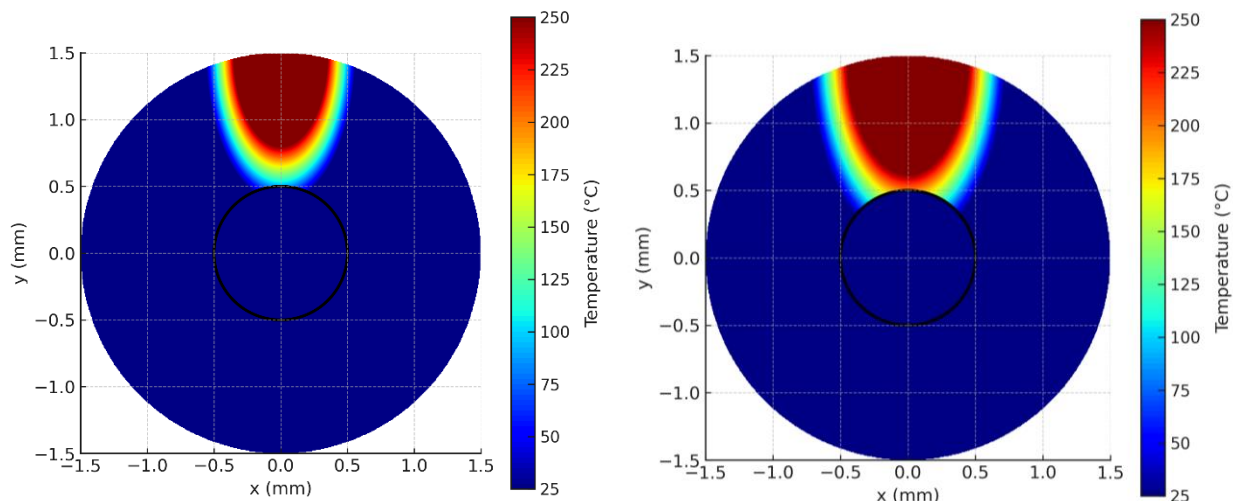
52 pav. PE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas $0,1\text{ m/s}$ greičiu, dešinėje $0,05\text{ m/s}$ greičiu, esant $150\text{ }^{\circ}\text{C}$

Kai temperatūra pakyla iki $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, PE deformacija esant $0,1\text{ m/s}$ siekia apie $0,40\text{ mm}$, o pagal fizines savybes gali būti pastebimas paviršiaus minkštėjimas. Lėtesniu greičiu ($0,05\text{ m/s}$) deformacija padidėja iki $0,60\text{ mm}$, o izoliacijos struktūra tampa gerokai mažiau atspari mechaniniam poveikiui (žr. 53 pav.).

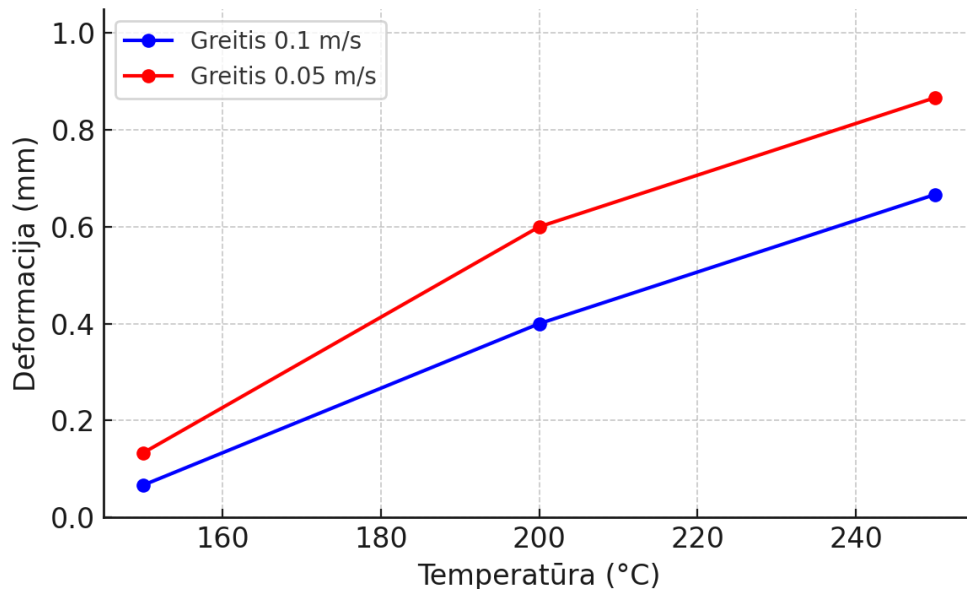


53 pav. PE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas $0,1\text{ m/s}$ greičiu, dešinėje $0,05\text{ m/s}$ greičiu, esant $200\text{ }^{\circ}\text{C}$

250 °C temperatūroje deformacija dar labiau didėja ir 0,1 m/s greičiu pasiekama 0,70 mm, o sumažinus greitį iki 0,05 m/s – net 0,88 mm. Tai rodo, kad PE pradeda aktyviai lydėtis, tačiau lyginant su PVC, išlaiko kiek stabilesnę elgesį esant intensyviam šildymui (žr. 54 pav.).



54 pav. PE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 250 °C

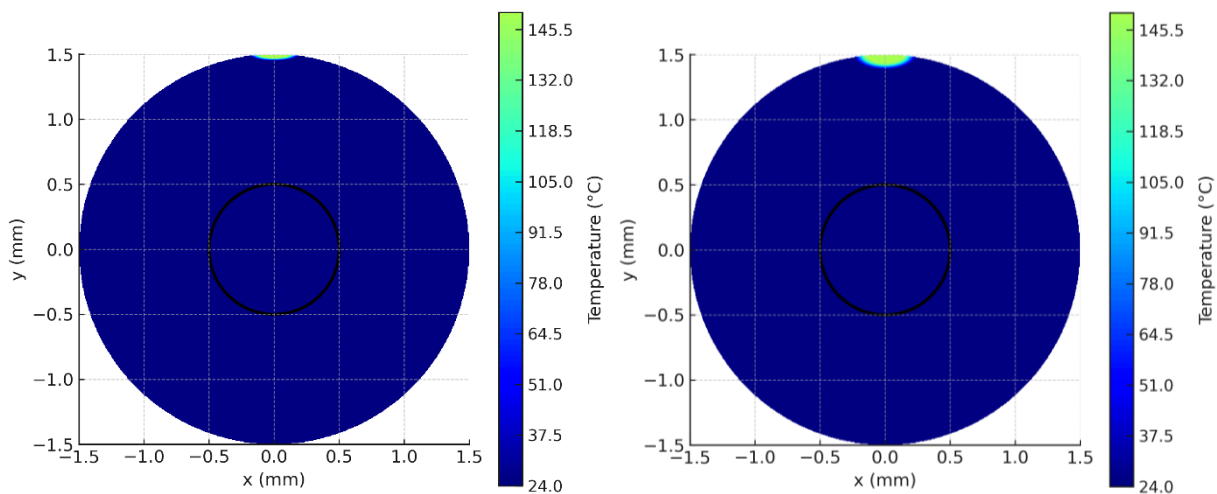


55 pav. PE izoliacinės medžiagos pašalinimo *COMSOL* modeliavimo rezultatai vaizduojami grafiškai

PTFE

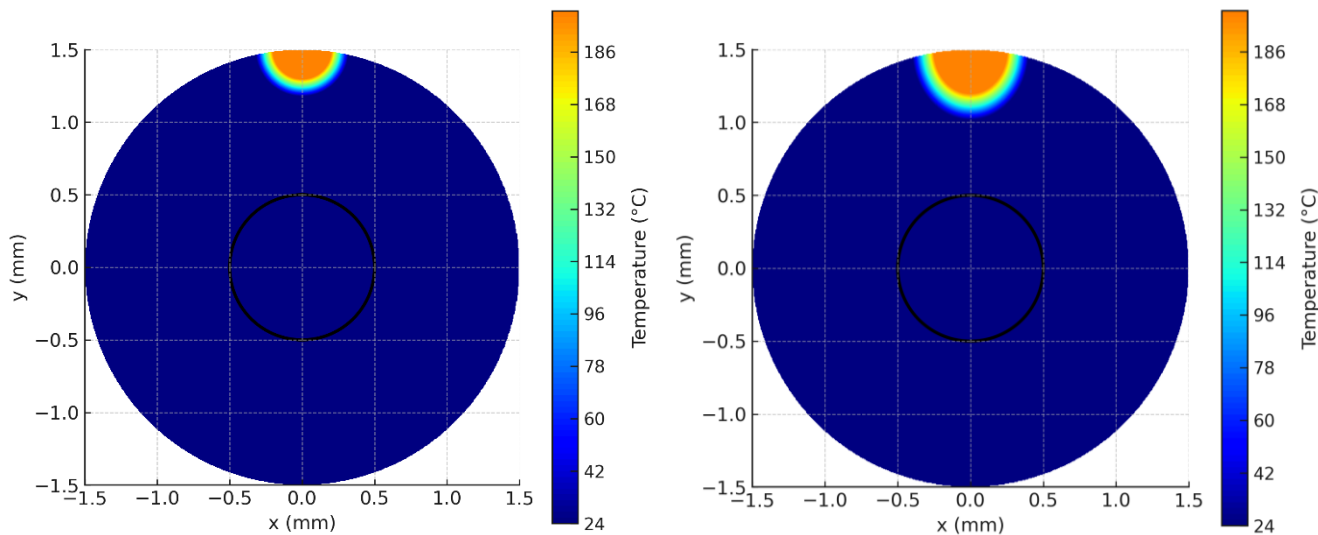
PTFE yra termoplastinė medžiaga, žinoma dėl didelio atsparumo temperatūrai. Tirpimo temperatūra viršija 250°C, todėl ji reikalauja ilgesnio šilumos poveikio laiko.

Esant 150 °C temperatūrai, PTFE deformacija, kai yra 0,1 m/s greitis yra vos 0,03 mm – beveik nepastebima. Sumažinus greitį iki 0,05 m/s, deformacija šiek tiek išauga iki 0,07 mm, tačiau šis pokytis vis dar yra minimalus ir medžiaga tikrai išlieka mechaniškai stabili (žr. 56 pav.).



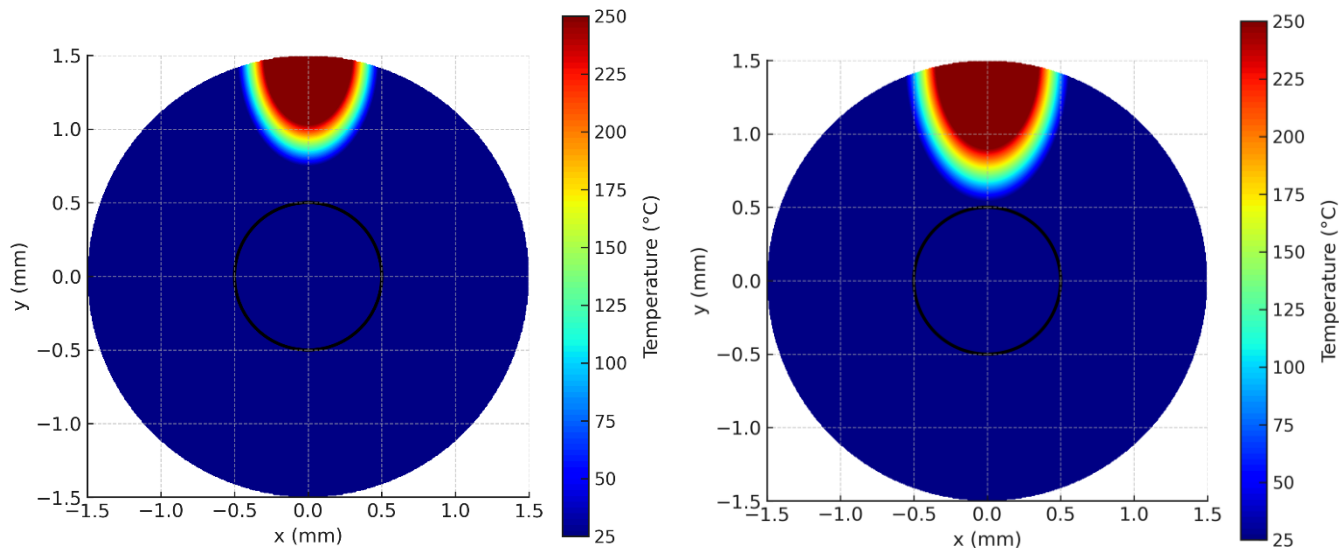
56 pav. PTFE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 150 °C

Pakėlus temperatūrą iki 200 °C, deformacija padidėja, 0,1 m/s greičiu ji siekia 0,20 mm, o esant 0,05 m/s – apie 0,30 mm. Tai rodo, kad paviršius pradeda reaguoti į šilumą, bet vidinė struktūra vis dar išlieka tvirta (žr. 57 pav.).

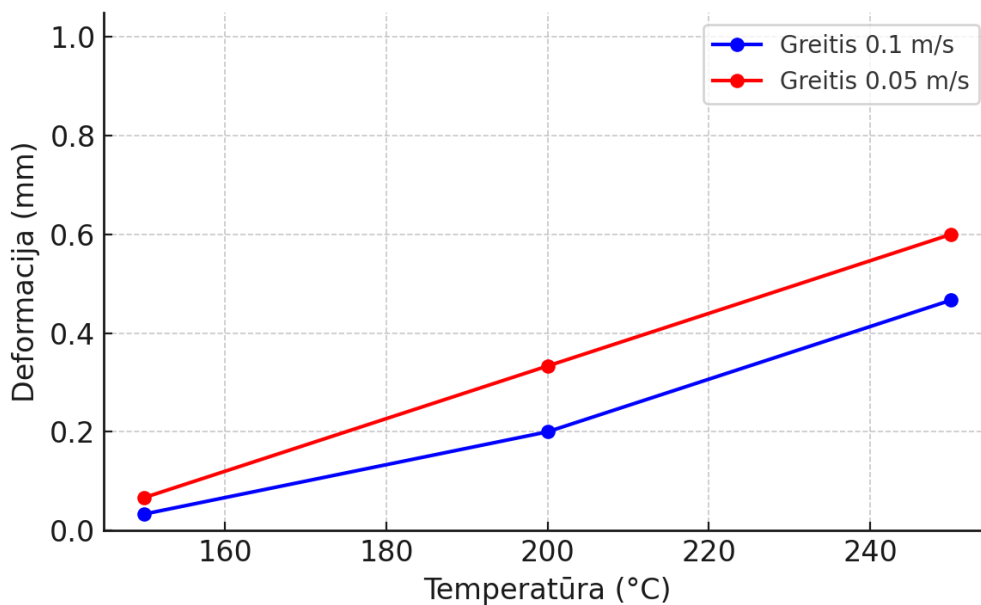


57 pav. PTFE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 200 °C

Esant 250 °C pastebimas didžiausias poveikis, 0,1 m/s greičiu deformacija siekia 0,47 mm, o lėtesniu greičiu – 0,60 mm. (žr. 58 pav.) Tai leidžia daryti išvadą, kad net ir esant tokioms sąlygoms, PTFE išlieka labai atspari, o jos deformacija nedidelė palyginti su PVC ar PE.



59 pav. PTFE izoliacinės medžiagos vizualizacija sukurta *Python* programa pagal eksportuotus *COMSOL* temperatūros duomenis. Kairėje esantis grafikas 0,1 m/s greičiu, dešinėje 0,05 m/s greičiu, esant 250 °C



58 pav. PTFE izoliacinės medžiagos pašalinimo *COMSOL* modeliavimo rezultatai vaizduojami grafiškai

Taigi, *COMSOL Multiphysics* modeliavimo rezultatai patvirtino eksperimentinių tyrimų tendencijas ir suteikė kiekybinių duomenų apie temperatūrų pasiskirstymą bei deformacijos mastą.

PVC modelyje deformavosi greičiausiai, o esant 250 °C buvo aiškiai stebimas išsilydymas. PE taip pat parodė progresyvią deformaciją didėjant temperatūrai ir mažėjant greičiui, tačiau išlaikė didesnę stabilumą nei PVC. PTFE modelyje išsiskyrė labai lėta šilumos sklaida ir minimali deformacija net 250 °C temperatūroje, tai atitiko eksperimentinį stebėjimą. Modeliavimas pasitarnavo kaip patikimas įrankis medžiagų elgsenai prognozuoti esant skirtingoms sąlygoms.

4.3. Tyrimo patikimumas ir rezultatų validacija

Šiame darbe siekta kompleksiskai įvertinti laidų izoliacijos šalinimo proceso efektyvumą, taikant tiek eksperimentinį, tiek skaitmeninį analizės metodą. Pritaikius dvi tyrimo strategijas – realius fizinius bandymus ir skaitmeninį modeliavimą *COMSOL Multiphysics* aplinkoje – buvo sudarytos prielaidos ne tik tiesioginiam rezultatų palyginimui, bet ir gilesniam procesų supratimui, leidžiančiam prognozuoti izoliacinių medžiagų elgseną įvairiomis technologinėmis sąlygomis.

Eksperimentinio tyrimo esmė ir rezultatai

Eksperimentinis tyrimas buvo atliekamas naudojant specializuotą laidų izoliacijos šalinimo įrangą, kuri imituoja realias darbo sąlygas: kaitinamas viršutinis volas, nekaitinamas apatinis volas, reguliuojamas kontaktinis atstumas, temperatūra bei padavimo greitis. Bandymuose naudotos trys skirtingos izoliacinės medžiagos – PVC, PE ir PTFE, kurių kiekviena pasižymi savitomis šiluminėmis savybėmis ir atsparumu temperatūrai. Kiekviena medžiaga buvo testuota esant trim temperatūroms (150 °C, 200 °C, 250 °C) ir dviem tiekimo greičiams (0,1 m/s ir 0,05 m/s), siekiant išsiaiškinti, kaip šie parametrai veikia izoliacijos deformaciją bei pašalinimo efektyvumą.

Gauti rezultatai parodė aiškias tendencijas:

PVC buvo lengviausiai deformuojama ir pašalinama medžiaga, ypač esant didesnei temperatūrai ir ilgesniam kontaktui (0,05 m/s greitis). 250 °C temperatūroje izoliacija visiškai ištirpo, tačiau fiksuoti perdegimai ir paviršiaus lipnumas rodo būtinybę tiksliai kontroliuoti šiluminį poveikį.

PE pasirodė kaip labiau stabili medžiaga – efektyvus pašalinimas pasiektas tik esant 250 °C ir lėtam greičiui. Esant žemesnėms temperatūroms, deformacija buvo paviršinė ir fragmentiška.

PTFE, kaip tikėtasi, parodė itin aukštą atsparumą – net esant 250 °C, tik esant lėtam – tiekimui, fiksuota paviršiaus deformacija, tačiau izoliacijos pašalinimas buvo tik dalinis.

Skaitmeninio modeliavimo metodika ir privalumai

Modeliavimas buvo atliktas naudojant *COMSOL Multiphysics* programinę aplinką, kuri leido detaliai simuliuoti laidą, judantį tarp dviejų volų. Kaitinimo efektas buvo taikomas tik vienam volui, o judėjimas modeliuotas naudojant ALE (Arbitrary Lagrangian–Eulerian) tinklėlį. Naudoti moduliai „Heat Transfer in Solids“, „Solid Mechanics“ ir „Time-Dependent“ užtikrino, kad būtų tiksliai apskaičiuota šilumos sklaida, įtempiai ir deformacijos izoliacijoje, atsižvelgiant į medžiagos fizines savybes (šiluminį laidumą, plėtimosi koeficientą, tankį ir lydymosi temperatūrą).

Modeliavimas leido matyti ne tik paviršiaus deformaciją, bet ir temperatūrų pasiskirstymą izoliacijos storyje. Tai svarbu, nes eksperimentuose galimas tik vizualinis vertinimas, o modeliavimo metu fiksuotos tikslios reikšmės, pavyzdžiui, kad esant 150 °C volo temperatūrai PVC viduje temperatūra siekia vos ~135 °C – nepakankamai pašalinimui. Tokios įžvalgos leidžia tiksliau paaiškinti, kodėl tam tikrose sąlygose šalinimas neįvyko.

Eksperimentinių ir skaitmeninių rezultatų palyginimas

Lyginant abu tyrimo metodus, galima teigti, kad rezultatai tarpusavyje sutampa, o tam tikrais atvejais vienas metodas papildė kito rezultatus:

- PVC: tiek eksperimentiškai, tiek modeliavimo metu aiškiai matomas spartus šiluminis atsakas – deformacijos prasideda jau esant 200 °C, o kai yra 250 °C, ypač lėtu greičiu, fiksuotas visiškas izoliacijos ištirpimas. Modeliavimas tiksliai atkartojė eksperimentinius stebėjimus, įskaitant paviršiaus minkštėjimą, lipnumą ir išskiriamų garų tikimybę.
- PE: eksperimentuose efektyvus pašalinimas pasiektas tik esant 250 °C, tai visiškai atitiko modelio prognozes. Lyginant su PVC, deformacija buvo mažesnė, tačiau pastovesnė, o modeliavimo rezultatai parodė gerą temperatūros sklaidą ir vienodą deformacijos zoną, ypač esant lėtam greičiui.
- PTFE: abi metodikos aiškiai patvirtino, kad ši medžiaga pasižymi labai dideliu šiluminiu atsparumu. Net esant 250 °C fiksuota tik dalinė deformacija, o izoliacijos šalinimas nebuvo

pilnas. Tai rodo, kad modelis adekvačiai įvertino PTFE inertišką reakciją ir šiluminio poveikio ribotumą.

Kokybinis patikimumas ir modeliavimo nauda

Skaitmeninio modeliavimo taikymas šiame tyrime suteikė galimybę ne tik patvirtinti eksperimentiškai stebėtus reiškinius, bet ir atlikti papildomą analizę tais atvejais, kai tiesioginis matavimas neįmanomas (pvz., vidinės temperatūros ar deformacijos kitimas gylyje). Toks metodas itin naudingas pramonėje, kur būtina išvengti atliekų, sumažinti šalinimo trukmę ir optimizuoti procesus dar prieš praktinį diegimą.

Tyrimas parodė, kad skaitmeninis modelis gali būti sėkmingai taikomas kaip projektavimo, testavimo ir procesų kontrolės priemonė, padedanti sumažinti medžiagų sąnaudas, įrangos dėvėjimą ir aplinkos taršą. Tuo tarpu eksperimentinis metodas išlieka būtinas galutinei validacijai ir vizualiniam rezultatų įvertinimui.

IŠVADOS

1. Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad laidų judėjimo greitis turi tiesioginę įtaką šilumos įsiskverbimui į izoliaciją – kuo mažesnis greitis, tuo ilgesnis kontaktinis laikas ir didesnė paviršiaus deformacija. Tai ypač ryškiai pasireiškė atliekant bandymus su PVC ir PE izoliacija. Esant 0,05 m/s greičiui ir 250 °C temperatūrai, šios medžiagos parodė aiškius šiluminės deformacijos požymius, leidžiančius efektyviai pašalinti izoliaciją.
2. Skaitmeninis modeliavimas patvirtino šias tendencijas – deformacijos vertės ir temperatūrų pasiskirstymas buvo nuoseklūs su eksperimentiniais rezultatais. COMSOL modelis leido vizualizuoti vidinę šilumos sklaidą ir paviršiaus poslinkius, to neįmanoma tiksliai įvertinti eksperimentu. Tai leido geriau suprasti, kodėl kai kurios medžiagos, pavyzdžiui, PTFE, nebuvo veiksmingai pašalinamos net ir esant aukščiausiai temperatūrai – jų šiluminis laidumas mažas, o lydymosi temperatūra itin aukšta.
3. PVC pasirodė esanti šilumai jautriausia medžiaga – jau esant 200 °C pradeda minkštėti, o kai 250 °C ir mažas greitis, deformuojasi iki visiško ištirpimo. Tai leidžia efektyviai ją šalinti, tačiau būtina kruopšti temperatūros kontrolė siekiant išvengti perdegimo. PE taip pat tinkama šiluminiam šalinimui, tačiau reikalauja didesnės šilumos energijos ir ilgesnio poveikio laiko. Tuo tarpu PTFE pasirodė esanti itin atspari šilumai – net ir esant didžiausiems parametrams jos pašalinimas liko negalutinis, o deformacija nežymi.
4. Tyrimas parodė, kad skaitmeninis modeliavimas gali būti efektyviai taikomas tiek procesams optimizuoti, tiek medžiagų elgsenai prognozuoti, ypač kai eksperimentavimas ribotas dėl saugumo ar laiko sąnaudų. Taikant skaitmeninius modelius galima sumažinti bandymų skaičių, geriau parinkti parametrus ir iš anksto įvertinti rizikas.

REKOMENDACIJOS

1. Rekomenduojama skaitmeninį modeliavimą (pvz., *COMSOL Multiphysics*) taikyti ne tik tyrimams, bet ir kaip pradinį etapą technologinių sprendimų projektavime. Modeliuojant šilumos sklaidą ir deformacijas dar prieš eksperimentus, galima sumažinti bandymų skaičių, optimizuoti parametrus ir sumažinti medžiagų sąnaudas.
2. Norint užtikrinti proceso stabilumą ir pašalinti medžiagos perdegimo riziką (ypač dirbant su termiškai jautriomis medžiagomis, tokiomis kaip PVC), rekomenduojama įdiegti automatizuotas temperatūros ir greičio valdymo sistemas su realaus laiko grįžtamojo ryšio kontrole.
3. Atliekant terminį izoliacijos šalinimą, būtina iš anksto įvertinti galimų emisijų pobūdį ir mastą. Dirbant su chloro turinčiomis medžiagomis, tokiomis kaip PVC, rekomenduojama naudoti vietinį ištraukimą ir filtravimo sistemas, kad būtų užtikrintas atitikimas aplinkosaugos normoms ir darbuotojų saugai.
4. Siekiant išplėsti tyrimo taikymo sritį ir įvertinti naujos kartos polimerų elgseną, rekomenduojama papildyti analizę kitomis izoliacinėmis medžiagomis, kurios pasižymi geresniu atsparumu šilumai, mažesniu toksiškumu ir didesniu mechaniniu stabilumu.
5. Tolesniems tyrimams siūloma plėsti eksperimentinės įrangos funkcionalumą – įdiegti paviršiaus temperatūros ir deformacijos stebėsenos jutiklius bei automatizuotą duomenų registravimą. Tai leistų realiuoju laiku fiksuoti medžiagos atsaką į šiluminį poveikį ir tikslinti skaitmeninio modelio parametrus.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste management*, 29(10), 2625–2643. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X09002190>
- AWC Allied wire & cable (2022) *Types of Insulation Materials for Wire and Cable*. Prieiga per internet: <https://www.awcwire.com/customersupport/techinfo/insulation-materials>
- Bedeković, G., & Trbović, R. (2020). Electrostatic separation of aluminium from residue of electric cables recycling process. *Waste management*, 108, 21–27. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X20301963>
- Beyler, C. L., & Hirschler, M. M. (2002). Thermal decomposition of polymers. *SFPE handbook of fire protection engineering*, 2(7), 111–131. https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Hirschler-2/publication/285460561_Thermal_decomposition_of_polymers/links/5e69a0b9299bfb1b9f7ce2dfe/Thermal-decomposition-of-polymers.pdf
- Budynas, K., & Ragulskis, M. (2004). *Mašinų elementai. II dalis*. Kaunas: Technologija.
- CLOOM (2023). *5 Common Types of Wire Insulation for Wiring Harnesses Manufacturing*. <https://www.wiringo.com/wiring-harnesses.html>
- Ellis, D. A., Martin, J. W., De Silva, A. O., Mabury, S. A., Hurley, M. D., Sulbaek Andersen, M. P., Wallington, T. J. (2004). Degradation of fluorotelomer alcohols: a likely atmospheric source of perfluorinated carboxylic acids. *Environmental science & technology*, 38(12), 3316–3321. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es049860w>
- ENVIRONMENTAL ENGINEERING (2011). *Method of removal of the plastic insulator from waste cables by passing them between two rotating rolls that have different surface temperatures*. http://dspace.vgtu.lt/bitstream/1/888/1/228_232_Moksin_others.pdf
- Fuel (2022) *Co-carbonization of a mixture of waste insulation electric cables (WIEC) and lignocellulosic waste, for the removal of chlorine: Biochar properties and their behaviors?* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122007918>

- Galko, G., & Sajdak, M. (2022). Trends for the thermal degradation of polymeric materials: Analysis of available techniques, issues, and opportunities. *Applied Sciences*, 12(18), 9138. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/18/9138>
- Hseblog (2023). *What Is Electrical Insulation? Types, Purpose & Importance*. <https://www.hseblog.com/the-importance-of-and-types-of-electrical-insulation/>
- Kameda, T., Fukushima, S., Grause, G., Yoshioka, T. (2013). Metal recovery from wire scrap via a chloride volatilization process: Poly (vinyl chloride) derived chlorine as volatilization agent. *Thermochimica Acta*, 562, 65–69. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040603113001469>
- Kumar, R., & Singh, R. K. (2002). *Recovery of hydrocarbon liquid from waste high density polyethylene by thermal pyrolysis*. In 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (pp. 143–147). <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/667955>
- Mihai, F. C., Gnoni, M. G., Meidiana, C., Ezeah, C., Elia, V. (2019). Waste electrical and electronic equipment (WEEE): flows, quantities, and management—a global scenario. In *Electronic waste management and treatment technology* (pp. 1–34). Butterworth-Heinemann. https://www.researchgate.net/publication/331682988_Waste_Electrical_and_Electronic_Equipment_WEEE_Flows_Quantities_and_Management-A_Global_Scenario
- Pita, F., Castilho, A. (2018). Separation of copper from electric cable waste based on mineral processing methods: A case study. *Minerals*, 8(11), 517. <https://www.mdpi.com/2075-163X/8/11/517>
- ResearchGate (2013). *Recycling production cable waste - Environmental and economic implications*. https://www.researchgate.net/publication/257536507_Recycling_production_cable_waste_-_Environmental_and_economic_implications
- Saiyed, H. N. (2006). Hydrogen sulfide: Human health aspects, concise international chemical assessment document No. 53. *Indian Journal of Medical Research*, 123(1), <https://www.proquest.com/openview/0fcc0b3a8d77bcc99a1a9be56f60ddab/1?cbl=37533&pg-origsite=gscholar>
- Salama, A., Richard, G., Medles, K., Zeghloul, T., Dascalescu, L. (2018). Distinct recovery of copper and aluminum from waste electric wires using a roll-type electrostatic separator. *Waste*

Management, 76,

207–216.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X18301788>

SPRINGER LINK (2021). *Mechanical Analysis and Strength Checking of Current Collector*.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10338-020-00213-9>

Vidyadhar Ari. (2016) *A Review of Technology of Metal Recovery from Electronic Waste?*

https://www.researchgate.net/publication/304614936_A_Review_of_Technology_of_Metal_Recovery_from_Electronic_Waste

Xu, J., Kumagai, S., Kameda, T., Saito, Y., Takahashi, K., Hayashi, H., Yoshioka, T. (2019). Separation of copper and polyvinyl chloride from thin waste electric cables: A combined PVC-swelling and centrifugal approach. *Waste Management*, 89, 27–36.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19301813>