

## ELEKTRONIKOS PLOKŠČIŲ PELENŲ TYRIMAI IR JŲ PAVOJINGUMO VERTINIMAS

Rasa VOLUNGEVIČIENĖ<sup>1</sup>, Violeta BOLUTIENĖ<sup>2</sup>, Kęstutis BUINEVIČIUS<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Vilniaus Gedimino technikos universitetas, <sup>3</sup>Kauno technologijos universitetas

El. paštas: <sup>1</sup>[rvolungeviciene@gmail.com](mailto:rvolungeviciene@gmail.com); <sup>2</sup>[violeta.bolutiene@vgtu.lt](mailto:violeta.bolutiene@vgtu.lt); <sup>3</sup>[kestutis.buinevicius@ktu.lt](mailto:kestutis.buinevicius@ktu.lt)

**Santrauka.** Nebenaudojamoje elektroninėje įrangoje esančių montažinių plokščių (elektronikos plokščių) perdirbimas yra itin kompliktuotas procesas, nes jos sudarytos iš daugybės kompleksinių komponentų – pavojingųjų ir nepavojingųjų medžiagų rinkinių. Pirolizė ir deginimas – šiuo metu vienos efektyviausių elektronikos plokščių apdorojimo technologijų ekonominiu ir aplinkosaugos požiūriu. Gauti elektronikos plokščių pelenai toliau naudojami vertingoms medžiagoms išgauti. Išgavus vertingas medžiagas, susiduriama su likusių pelenų naudojimo problema. Tik žinant susidariusių pelenų kokybines ir kiekybines charakteristikas galima parinkti efektyvias pelenų tvarkymo technologijas. Šiame darbe analizuojami televizorių ir kitų namų ūkių prietaisų elektronikos plokščių pelenai, kurie gauti elektronikos plokštes deginant trijose skirtingose temperatūrose: 400 °C, 500 °C ir 600 °C. Įvertinama, kiek pavojingi elektronikos plokščių pelenai. Šiame darbe taip pat atliekamas geležies, mangano, švino, chromo, vario ir cinko išplovimo iš pelenų eksperimentas, siekiant nustatyti galimą metalų išplovimą šalinant pelenus sąvartynuose arba jiems patekus į aplinką įvykus avarijoms.

**Reikšminiai žodžiai:** elektronikos plokštės, elektronikos plokščių pelenai, atliekų deginimas, sunkiųjų metalų išplovimas.

### Įvadas

Atliekų susidarymas ir tvarkymas – viena svarbiausių aplinkosaugos problemų, ypač aktuali mūsų šimtmečiuje. Atliekų atsiranda jau kiekvieno produkto gamybos pradžioje su neperdirbtomis žaliavomis ir vėliau susidaro kiekvienoje šio proceso pakopoje, kol neperdirbta žaliava pavirsta vartojimo preke. Prekės, kurias įsigyjame, po kurio laiko tampa atliekomis.

Elektronikos prekės neveikia amžinai, o jei veikia ilgiau nei numatyta, galiausiai norima jas pakeisti dėl technologijų pažangos ar senėjimo. Kiekvienais metais pasaulyje pagaminama 300 milijonų kompiuterių ir milijardas mobiliųjų telefonų, kiekvienas jų turi vidutiniškai nuo 3–5 metų trunkantį naudojimo ciklą (Frankel 2011). Šių atliekų kiekiai kasmet sparčiai auga ir padidėja maždaug po 5 % (Cui, Forsberg 2003). Taigi visi šie milijardai prietaisų kasmet turi būti kur nors pašalinami.

Elektronikos atliekos gali neigiamai paveikti aplinką ir žmogaus sveikatą, jei jos nėra tinkamai tvarkomos. Šių atliekų šalinimas sąvartynuose sudaro sąlygas užteršti dirvožemį, paviršinius ir gruntinius vandenius. Netinkamas elektronikos atliekų tvarkymas kelia pavojų žmonių sveikatai bei aplinkai, be to, didėja toksiškų medžiagų patekimo į žmogaus organizmą bei aplinkos komponentus

tikimybė. Nepaisant to, šių atliekų šalinimas sąvartynuose vis dar yra pigiausias atliekų tvarkymo būdas (Tange, Drohmann 2005).

Šalinti elektronikos atliekas yra labai neracionalu, nes naujas medžiagas pagaminti ir išgauti yra daug brangiau nei jas išgauti iš atliekų. Atlikti tyrimai rodo, kad išgavus iš atliekų metalus galima sutaupyti energijos: aliuminį – 95 %, varį – 85 %, šviną – 65 %, cinką – 60 %.

Išgauti metalus iš nenaudojamos elektronikos įrangos labai svarbu, nes, dabartiniais duomenimis, metalų naudojimo pramonėje apimtis labai didėja, o ilgainiui jų galime pritrūkti. Pavyzdžiui, platinos (Pt), švino (Pb) ir rodžio (Rh), išgautų iš rūdų, vien automobilių katalizatorių gamyboje naudojama daugiau kaip 50 % (Hagelūken, Meskers 2010).

Elektronikos prietaisai gali būti perdirbami tiek ardan rankomis, tiek taikant mechaninius, cheminius ir terminius metodus. Šių technologijų tikslas – racionaliai suderinti ekonominius ir aplinkosaugos aspektus.

Išsamesnei analizei buvo pasirinktos elektros prietaisų montažinės plokštės (elektronikos plokštės).

Elektronikos plokštės – tai įrangos dalis, kuri palaiko elektros jungtis tarp atskirų komponentų. Jų yra daugely-

je gaminių: mobiliuosiuose telefonuose, kompiuteriuose, televizoriuose, spausdintuvuose. Plokštės sudaro daugybę komponentų (Techradar components 2013).

Nebenaudojamų elektronikos plokščių perdirbimas – itin komplikotas procesas, nes jos sudarytos iš daugybės kompleksinių komponentų – pavojingųjų ir nepavojingųjų medžiagų rinkinių. Vidutinė elektronikos plokščių sudėtis: 40 % jos svorio sudaro metalai, 30 % – plastikas ir 30 % – keramika (Cui, Forsberg 2003). Tikri elektriniai ar elektroniniai komponentai tesudaro tik 3 % produkto svorio.

Elektronikos plokštėse aptinkama šių metalų: vario, geležies, aliuminio, alavo, taip pat retųjų metalų, tokių kaip tantalas, galio ir kt., tauriųjų metalų – aukso, sidabro ir paladžio. Varis sudaro apie 10–20 %, švinas – 1–5 %, nikelis – 1–3 % elektronikos plokštės svorio. Taurieji metalai – auksas, sidabras, platina ir paladis – sudaro 0,3–0,4 % (Allsopp *et al.* 2006). Dėl šių elektronikos dalių savitumo įprastos elektroninės įrangos perdirbimo technologijos neduoda reikiamo rezultato.

Užsienio mokslininkų atlikti eksperimentai įrodo, kad elektronikos plokščių atliekoms tvarkyti tinkamiausi yra terminiai metodai. Pirolizė – viena efektyviausių technologijų ekonominiu ir aplinkosaugos požiūriu (Sohaili *et al.* 2012). Metalai po pirolizės tampa labiau sukonzentruoti, trapesni ir ne tokie pavojingi (Sun *et al.* 2011). Deginimas ir pirolizė gali būti efektyvios technologijos, jei bus skiriama pakankamai dėmesio pavojingų emisijų mažinimui (Molto *et al.* 2008). Elektronikos plokščių terminio apdorojimo metodai – mažai tyrinėta sritis, nėra atlikta išsamių pelenų kiekybinių ir kokybinių charakteristikų tyrimų.

Taikant terminius apdorojimo metodus elektronikos plokščių atliekoms tvarkyti, atsitikus avarijai iškyla pelenų patekimo į aplinką rizika. Prieš įdiegiant minėtą atliekų tvarkymo technologiją, būtina įvertinti susidarysiančių pelenų pavojingumą, siekiant kuo daugiau sumažinti dirvožemio užteršimo riziką.

Gauti pelenai puikiai tinka toliau apdoroti ir vertinoms medžiagoms išskirti (Hall, Williams 2007).

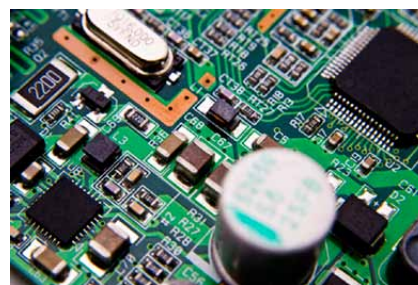
Išgavus iš elektronikos plokščių vertinguosius metalus, susiduriama su likusių pelenų naudojimo problema. Tik žinant likusių pelenų kokybines ir kiekybines charakteristikas galima parinkti efektyviausius pelenų tolesnio tvarkymo metodus.

Šio tyrimo tikslas – nustatyti deginant elektronikos plokščių atliekas susidarantių pelenų pavojingumą.

## Metodika

Eksperimentui pasirinktos televizorių ir kitų namų ūkio prietaisų elektronikos plokštės (1 pav.).

Elektronikos plokščių atliekos skirstomos į du tipus. Šis skirstymas pagrįstas skirtinga elektronikos plokščių chemine sudėtimi. Televizorių ir kitų buitinių prietaisų elektronikos plokščių pagrindą sudaro laminuotos fenolio dervos, o mobiliųjų telefonų plokščių pagrindą – stiklo pluoštas. Mobiliųjų telefonų plokštės, lyginant su televizorių ir kitų prietaisų plokštėmis, turi daugiau tauriųjų metalų (Hall, Williams 2007).



1 pav. Elektronikos plokštė (ThomasNet 2013)

Fig. 1. Printed circuit board

Televizorių ir kitų namų ūkio prietaisų elektronikos plokštės specialiu peiliniu malūnu susmulkintos iki 10 mm dydžio (2 pav.). Tyrimui buvo suformuota dešimt bandinių, kurie buvo deginti 400 °C, 500 °C ir 600 °C temperatūrose. Šios temperatūros pasirinktos, nes daugelis užsienio mokslininkų tyrimų patvirtina, kad, vertinant metalų išgavimo efektyvumą ir ekonominius aspektus, racionaliausia elektronikos plokščių apdorojimo temperatūra yra 450–600 °C.



2 pav. Smulkintos elektronikos plokštės prieš deginimą

Fig. 2. Shredded PCB before combustion

Atrinkti bandiniai sunumeruoti ir pasverti. Bandiniai buvo sudėti į porcelianinius tiglius. Eksperimentui atlikti naudojama laboratorinė elektrinė krosnis SNOL 30/1100, skirta įvairių medžiagų bandiniams tirti kaitinant, taip pat tinka keramikos ir akmens masės gaminiams deginti (3 pav.). Tiglis naudojamas kartu su dangteliu, kad būtų sukurtos artimos pirolizei sąlygos. Kiekvienoje temperatūroje buvo deginama po 300 g bandinių.

Bandiniai buvo įdėti į neįkaitintą krosnį ir kaitinami, kol pasiekiami maksimali nustatyta temperatūra. Joje bandiniai laikomi 30 min. Pasibaigus deginimo laikui krosnis išjungžiama, bandiniai paliekami 2 val. atvėsti.



3 pav. Elektrinė laboratorinė krosnis SNOL 30/1100, kurioje buvo deginami bandiniai

Fig. 3. Electric laboratory furnace SNOL 30/1100

Atvėšę iki kambario temperatūros bandiniai (4 pav.) buvo sveriami elektroninėmis svarstyklėmis (tikslumas  $\pm 2$  g). Surašomi bandinių svoriai po eksperimento, deginimo temperatūra, jos kilimo greitis.

Gauti pelenai laboratoriniu malūnu susmulkinti iki miltų.



4 pav. Elektronikos plokščių bandiniai po deginimo

Fig. 4. PCB after combustion

Toliau buvo atlikta gautų pelenų rentgeno fluorescencinė analizė, siekiant nustatyti pelenuose esančius metalus ir jų kieki. Rentgeno fluorescencinei analizei atlikti naudojamas NITON XRF rentgeno fluorescencinis spektrometras. Matavimai buvo atkartinami šešis kartus, išvedant vidutinę reikšmę. Atliktas tyrimas parodė metalų kieki procentais nuo visų metalų kiekio, esančio sausuose pelenuose. Tyrimui buvo imti skirtingose temperatūrose gauti pelenai, kad vėliau būtų galima nustatyti metalų išplovimo dalį (procentais) nuo pradinio metalų kiekio sausuose pelenuose.

Vėliau atliktas antrasis tyrimas – metalų išplovimo iš pelenų testas. Tyrimas buvo atliktas norint išsiaiškinti, kuri metalų dalis galėtų patekti į dirvožemį, pelenam patekus į aplinką arba juos šalinant sąvartyne.

Išplovimo testo metu imituojamos sąlygos, kurios būtų tapatinamos su tomis, kurios vyksta šalinant pelenus sąvartyne. Išplovimo testas atliktas vadovaujantis Europos standartu EN 12457-3: 2002.

Tyrimui pasirinktas dvipakopis išplovimo testas. Analizei pasirinkti šeši sunkieji metalai: geležis, manganas, švinas, chromas, varis ir cinkas.

Tyrimui buvo naudojami tie patys pelenų mėginiai, sumalti į miltus, kurie buvo išanalizuoti rentgeno fluorescenciniu spektrometru. Atrinkta po tris pelenų, gautų 400 °C, 500 °C, 600 °C temperatūrose, mėginius pirmai ir antrai išplovimo pakopoms.

Išplovimo tyrimas atliktas  $20 \pm 5$  °C kambario temperatūroje. Šiame tyrime išplaunantysis skystis – distiliuotas vanduo.

Pirmoje išplovimo pakopoje į 200 ml butelius buvo įdėti pelenai, kurių visuminė masė  $0,05 \pm 0,005$  kg sausosios masės.

Per pirmąją ekstrakciją pripilta išplaunančiojo skysčio, nustačius skysčio ir kietosios medžiagos santykį (L/S) =  $2$  l/kg  $\pm 2$  %. Uždaryti buteliai įdėti į maišymo įrenginį ir kratomi  $6 \pm 0,5$  h (5 pav.).



5 pav. Laboratorinis mėginių kratytuvas

Fig. 5. Laboratory samples spreader

Suspenduotos dalelės nusėda per  $15 \pm 5$  min. Pirmasis eliuatas perfiltruotas per  $0,45$   $\mu$ m filtrą. Išmatuotas pirmosios išplovimo pakopos filtruoto eliuato tūris, elektrinis laidis, temperatūra, pH, kurie vėliau panaudoti išplautų metalų kiekiui skaičiuoti. Gauti eliuatai buvo supilti į 100 ml kolbas.

Atliekant antrąją išplovimo pakopą, po filtravimo likusios kietosios dalys buvo sudėtos kartu su panaudotais filtrais į 0,4 l talpos butelius. Įpilta išplaunančiojo skysčio, nustatant skysčio ir kietosios medžiagos santykį (L/S) =  $10$  l/kg  $\pm 2$  %. Užtikrinama, kad kietoji medžiaga ir skystis gerai susimaišytų. Uždaryti buteliai įdėti į maišymo įrenginį (5 pav.). Kratymo trukmė –  $18 \pm 0,5$  h

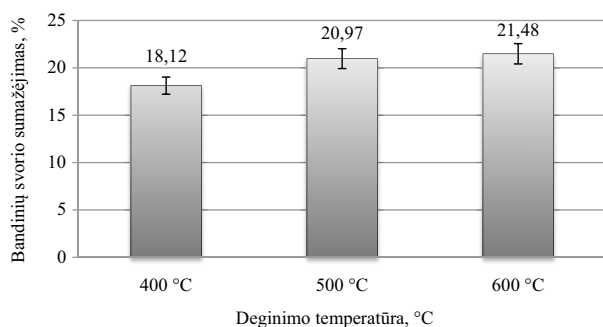
(dalelių nusėdimas –  $15 \pm 5$  min.). Eliuatai buvo filtruojami per  $0,45 \mu\text{m}$  filtrą. Išmatuoti tie patys parametrai kaip ir pirmosios pakopos metu.

Atlikta pirmosios ir antrosios išplovimo pakopų eliuatų atominė absorbcinė spektrinė analizė, kurios metu nustatyta kaupiamoji metalų koncentracija eliuatuose,  $\text{mg/l}$ . Galutiniai rezultatai buvo išreikšti kaip išplautų metalų kiekio ir viso mėginio kiekio santykis, išreikštas  $\text{mg/kg}$  sausosios medžiagos.

Duomenų statistinis apdorojimas atliktas taikant *MS Office Excel* programos paketą.

## Rezultatai ir jų analizė

Atlikus elektronikos plokščių deginimo mufelinėje krosnyje eksperimentą buvo nustatyta, kad elektronikos plokščių bandinių svoris sumažėjo. Iš 6 pav. matyti, kad, didinant bandinių degimo temperatūrą, pelenų kiekis mažėja, atliekos mažiau sukepa ir skystieji degimo produktai išdega. Bandinių svoriai  $400^\circ\text{C}$  temperatūroje sumažėjo  $18,12\%$ , o  $500^\circ\text{C}$  ir  $600^\circ\text{C}$  temperatūrose atitinkamai –  $0,97\%$  ir  $21,48\%$ .



6 pav. Bandinių svorio sumažėjimas po deginimo, %  
Fig. 6. Weight loss after incineration, %

Iš gautų eksperimento rezultatų galima daryti išvadą, kad temperatūra turi įtakos kietosios bandinio masės kitimui, atitinkamai skystosios ir dujinės. Temperatūrai didėjant kietoji bandinių masė mažėja, nes terminio skaidymo metu išsiskiria dujinė fazė. Apibūdinant pelenų savybes  $400^\circ\text{C}$  temperatūroje, vizualiai matyti, kad pelenų spalva tamsesnė, jie apnešti derva, o  $500^\circ\text{C}$  ir  $600^\circ\text{C}$  temperatūroje pelenai šviesesni.

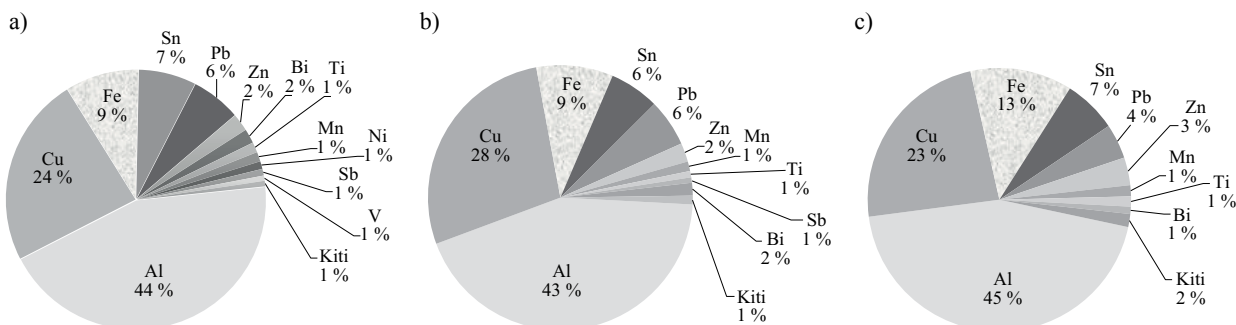
Po deginimo mufelinėje krosnyje gauti elektronikos plokščių pelenai buvo ištirti rentgeno spindulių fluorescenciniu spektrometru. Metalų kiekis gautas procentais nuo viso aptiktų bandinyje metalų kiekio.

Gauti rentgeno fluorescencinės spektroskopijos analizės rezultatai parodė, kad bandiniai deginti buvo paimti labai panašūs. Visuose pelenų bandiniuose didžiausių metalų dalį sudarė aliuminis ir varis. Nustatytas jų kiekis pelenuose  $68\text{--}71\%$  visų metalų masės (7 pav.).

Be vario ir aliuminio, elektronikos plokščių pelenuose nustatyta geležies  $9\text{--}13\%$ , švino  $4\text{--}6\%$ , alavo  $6\text{--}7\%$ , cinko  $2\text{--}3\%$ , bismuto  $1\text{--}2\%$ , titano  $1\%$ , mangano  $1\%$ , stibio  $1\%$ , nikelio ir vanadžio iki  $1\%$  (7 pav.). Kitų metalų, tokių kaip taurieji metalai, chromas, molibdenas, kobaltas, niobis, kadmis, rasti tik pėdsakai.

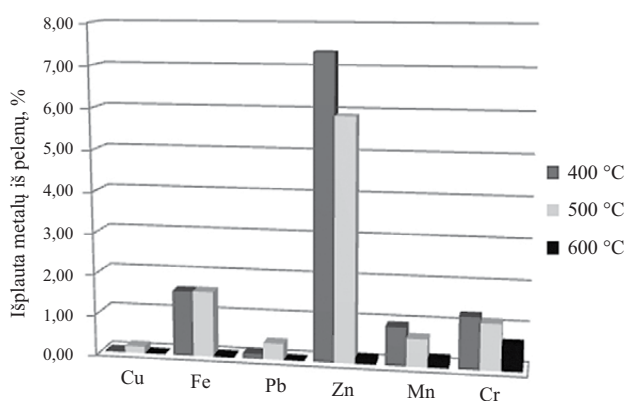
Rentgeno fluorescencinės spektroskopijos būdu nustatyti metalai elektronikos plokščių pelenuose parodė sausuose pelenuose esantį metalų kiekį.

Kalbant apie atliekų šalinimą sąvartyne, svarbu tai, kad teršalai kartu su filtratu gali pasišalinti iš sąvartyno ir užteršti dirvožemį ir požeminį vandenį. Rizikos vertinimas turėtų būti daugiau paremtas išplovimo savybėmis nei pačių atliekų savybėmis. Dėl išvardytų priežasčių buvo atliktas elektronikos plokščių pelenų, kurie buvo gauti trijose skirtingose temperatūrose, išplovimo testas, vadovaujantis aprašyta metodika.



7 pav. Metalų kiekis elektronikos plokščių pelenuose (% nuo visų aptiktų metalų masės), gautų esant skirtingai maksimaliai deginimo temperatūrai: a –  $400^\circ\text{C}$ ; b –  $500^\circ\text{C}$ ; c –  $600^\circ\text{C}$

Fig. 7. Metal content of PCB's ash (% of all detected metal mass) obtained at different maximum combustion temperature: a –  $400^\circ\text{C}$ ; b –  $500^\circ\text{C}$ ; c –  $600^\circ\text{C}$



8 pav. Metalų išplovimo testo rezultatai, %  
Fig. 8. Results of metal leaching test, %

Gauti išplovimo testo rezultatai parodė, kad iš analizuotų šešių metalų daugiausia išsiplovė cinko, geležies ir chromo (8 pav.), nors sausuose pelenuose iš šių metalų buvo rasta daugiausia vario. Tai galėjo įvykti dėl skirtingų metalų cheminių būsenų pelenuose ir jų išplovimo savybių.

Lyginant metalų kiekius (mg/kg), kurie buvo pelenuose prieš išplovimo testą su po jų išplovimo, nustatyta, kad vidutiniškai išsiplovė 1,2 % metalų nuo pirminio bendro jų kiekio pelenuose. Tyrimas parodė, kad iš pelenų gautų deginant elektronikos plokštes 600 °C temperatūroje, išsiplovė mažiausiai metalų, o žemesnėse temperatūrose nustatyti didesni metalų išplovimo rezultatai (8 pav.). Tai įvyko dėl to, kad 400–500 °C temperatūrose apdorjami metalai dar išlieka judrios jonų būsenos, o 600 °C temperatūroje metalai suformuoja stabilius oksidus.

Vadovaujantis atliekų tvarkymo taisyklėse (taisyklėse) pateiktomis sąvokomis pelenai laikomi atliekomis. Atliekos laikomos pavojingosiomis tada, kai atitinka taisyklėse nurodytus pavojingumo kriterijus ir savybes.

Tyrimo metu nustatyta, kad elektronikos plokščių pelenai turi toksiškų ir kenksmingųjų medžiagų. Pelenai laikomi pavojingais, jei turi:

- vieną arba kelias medžiagas, kurios klasifikuojamos kaip toksiškos, kai bendroji koncentracija  $\geq 3\%$  (Lietuvos Respublikos... 2011);
- vieną arba kelias medžiagas, kurios klasifikuojamos kaip kenksmingosios, kai bendroji koncentracija  $\geq 25\%$  (Lietuvos Respublikos... 2011).

Eksperimento metu gautuose elektronikos plokščių pelenuose nustatyta 0,06 % medžiagų, kurios klasifikuojamos kaip toksiškos, ir 12,64 % medžiagų, kurios klasifikuojamos kaip kenksmingosios (1 lentelė). Kadangi toksiškų ir kenksmingųjų medžiagų koncentracijos neviršija nurodytų taisyklėse ribinių reikšmių, pelenai turi būti laikomi nepavojingomis atliekomis.

Tyrimų rezultatai parodė, kad elektronikos plokščių pelenai gali būti toliau tvarkomi šalyje vadovaujantis nepavojingųjų atliekų tvarkymo reikalavimais. Esant būtinybei toliau tvarkyti pelenai gali būti vežami į kitų valstybių atliekų tvarkymo įrenginius, vadovaujantis Europos parlamento ir tarybos reglamento (EB) Nr. 1013/2006 18 straipsnio reikalavimais.

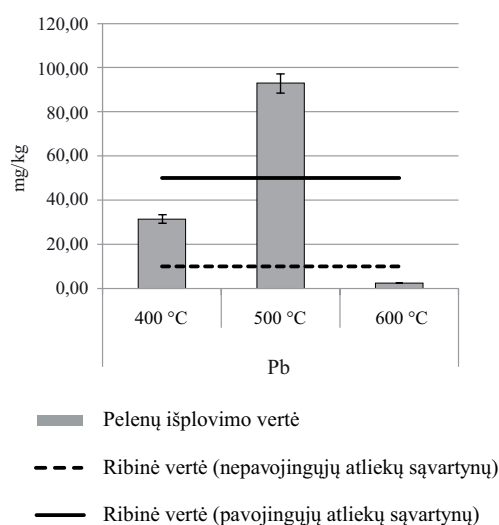
1 lentelė. Pelenų pavojingumo vertinimo rezultatai  
Table 1. Ash hazard assessment

Pavojingumo kriterijus	Pavojingųjų medžiagų koncentracija pelenuose, %			
	400 °C	500 °C	600 °C	Vidurkis
Toksiškos medžiagos (Cr, Cd)	0,11	0,05	0,03	0,06
Kenksmingosios medžiagos (Pb, Cu, Mn)	12,43	13,86	11,65	12,64

Pelenus galima šalinti atliekų sąvartynuose tik tuomet, jei jie atitinka priėmimo į sąvartynus kriterijus, nustatytus ES Atliekų sąvartynų direktyvoje (1999/31/EB) ir Tarybos 2002 m. gruodžio 19 d. sprendime (2003/33/EB).

Tyrimo metu gautos elektronikos plokščių pelenų išplovimo vertės palygintos su priėmimo į sąvartynus ribinėmis išplovimo vertėmis.

Analizuojant švino išplovimą, matyti, kad pelenuose, gautuose 400 °C temperatūroje, švinas viršija nepavojingų atliekų sąvartynų kriterijus, o pelenai, gauti 500 °C temperatūroje, viršija nepavojingųjų ir pavojingųjų atliekų sąvartynų priėmimo kriterijus (9 pav.).

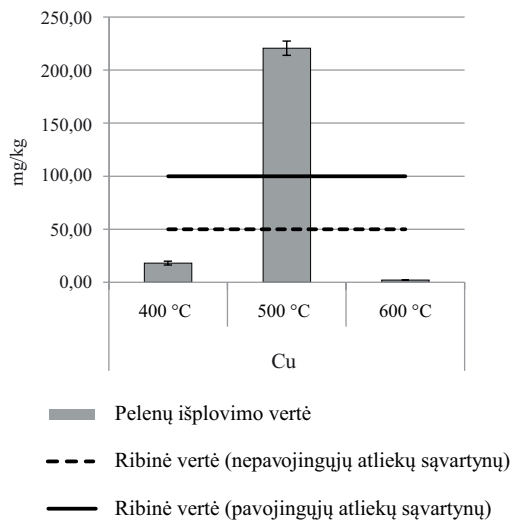


9 pav. Švino išplovimo iš pelenų palyginimas su priėmimo į sąvartynus ribinėmis vertėmis

Fig. 9. Comparison of lead leaching results with the landfills limit values

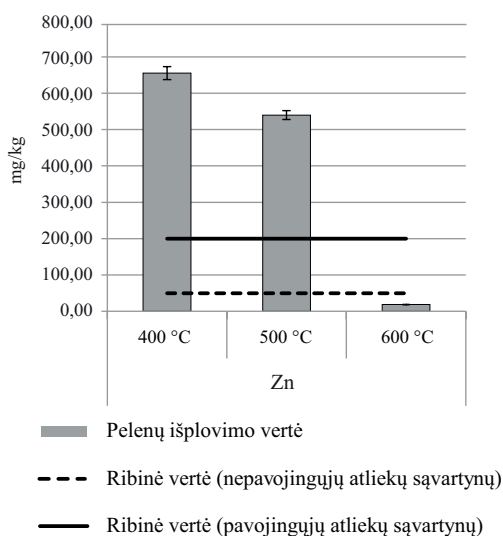
Analizuojant vario išplovimą, gaunama, kad pelenuose, gautuose esant 400 °C ir 600 °C temperatūrai, išplaunamo vario kiekis neviršija ribinių verčių, tačiau pelenuose, gautuose 500 °C temperatūroje, išplaunamo vario vertės viršija ribines priėmimo į nepavojingųjų ir pavojingųjų atliekų sąvartynus vertes (10 pav.).

Analizuojant cinko išplovimą, tik pelenu, gautu 600 °C temperatūroje, išplovimo vertė neviršija ribinės, tačiau žemesnėse temperatūrose gauti pelenai viršija abi ribines išplovimo vertes (11 pav.).



10 pav. Vario išplovimo iš pelenu palyginimas su priėmimo į sąvartynus ribinėmis vertėmis

Fig. 10. Comparison of copper leaching results with the landfills limit values



11 pav. Cinko išplovimo iš pelenu palyginimas su priėmimo į sąvartynus ribinėmis vertėmis

Fig. 11. Comparison of zinc leaching results with the landfills limit values

Kitų analizuotųjų metalų – geležies, chromo ir mangano – išplovimo vertės neviršijo leidžiamųjų priėmimo į atliekų sąvartynus išplovimo verčių.

Gauti rezultatai rodo, kad švino, vario ir cinko išplovimo vertės (mg/kg) viršija ribines priėmimo į sąvartyną išplovimo vertes.

## Išvados

1. Deginimo temperatūra ne vien tiesiogiai lemia gautų pelenu svorį, bet ir pakeičia jų savybes. Tyrimai parodė, kad kuo didesnė temperatūra, tuo labiau sumažėja sudegintų elektronikos plokščių svoris, t. y. sudegintų atliekų kietoji fazė.
2. Elektronikos plokščių pelenuose didžiausią metalų dalį sudaro varis ir aliuminis. Nustatytas jų kiekis pelenuose – 68–71 % nuo visų metalų masės. Be vario ir aliuminio, elektronikos plokščių pelenuose nustatyta: geležies – 9–13 %, švino – 4–6 %, alavo – 6–7 %, cinko – 2–3 %, bismuto – 1–2 %, titano – 1 %, mangano – 1 %, stibio – 1 %, nikelio ir vanadžio – iki 1 % visų metalų masės. Kitų metalų, tokių kaip taurieji metalai, chromas, molibdenas, kobaltas, niobis, kadmio, rasta tik pėdsakų.
3. Tyrimai parodė, kad aukščiausioje – 600 °C – temperatūroje dėl susidariusių stabilų metalų oksidų, metalų išplaunama buvo mažiausiai.
4. Nustatyta, kad pavojingųjų medžiagų koncentracija pelenuose neviršija ribinių verčių, pagal kurias vertinama, kad atliekos laikomos pavojingosiomis. Elektronikos plokščių pelenai gali būti tvarkomi vadovaujantis nepavojingųjų atliekų tvarkymo reikalavimais.
5. Vadovaujantis atliekų priėmimo į sąvartynus kriterijais, birūs elektronikos plokščių pelenai negali būti šalinami sąvartynuose, nes išplaunamo švino, vario ir cinko vertės viršija leidžiamąsias išplovimo vertes. Prieš šalinant pelenai turi būti stabilizuojami mažinant juose pavojingųjų komponentų tirpumą ir išplovimo riziką.

## Literatūra

- 1999/31/EB. Tarybos direktyva 1999 m. balandžio 26 d. Nr. 1999/31/EB dėl atliekų sąvartynų [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT-EN/TXT/?qid=1411973859961&uri=CELEX:01999L0031-20111213&from=LT>
- 2003/33/EB. Tarybos sprendimas 2002 m. gruodžio 19 d. Nr. 2003/33/EB [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003D0033&rid=2>
- Allsopp, M., et al. 2006. *Environmental and human health concerns in the processing of electrical and electronic waste* [interaktyvus]. Technical Note 4, Greenpeace Research

- Laboratories, Department of Biological sciences, University of Exeter, Exeter [žiūrėta 2012 m. gruodžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.greenpeace.to/publications/wastetreatment-may2006-final.pdf>
- Cui, J.; Forssberg, E. 2003. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review, *Journal of Hazardous Materials* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. lapkričio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12758010>
- EN 12457-3:2002. *Atliekų apibūdinimas. Išplovimas. Iš grūdėtų atliekų išplautų medžiagų ir dumblo sudėties atitiktis tyrimas. 3 dalis. Dvipakopis partijos (tyrinio) tyrimas, kai skysčio ir kietosios medžiagos, kurios sudėtyje yra labai kietų medžiagų, santykis 2 l/kg ir 8 l/kg ir dalelių dydis mažesnis kaip 4 mm (dydį mažinant arba nemažinant)*. 32 p.
- EB 1013/2006. *Europos parlamento ir tarybos reglamentas (EB) 2006 m. birželio 14 d. Nr. 1013/2006 dėl atliekų vežimo* [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. kovo 16 d.]. Prieiga per internetą: <http://atliekos.gamta.lt/files/Reglamentas%201013-2006%20LT%20konsoliduotas1378296175840.pdf>
- Frankel, K. 2011. *Recycling electronics – what happens to it?* [interaktyvus], [žiūrėta 2014 m. sausio 24 d.]. Prieiga per internetą: <http://greenblizzard.com/carbon-footprint/2011/01/31/what-happens-to-recycled-electronics/#sthash.rbPGc5Wt.dpuf>
- Hagelūken, Ch.; Meskers, E. M. 2010. *Complex life cycles of precious and special metals* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. gruodžio 12 d.]. Prieiga per internetą: [http://www.docstoc.com/docs/159981439/Complex-Life-Cycles-of-Precious-and-Special-Metals-Umicore#14118186863242&{"message":"iframeReady","iframeID":"5so3to0slmq0"}](http://www.docstoc.com/docs/159981439/Complex-Life-Cycles-of-Precious-and-Special-Metals-Umicore#14118186863242&{)
- Hall, W. J.; Williams, P. T. 2007. *Processing waste printed circuit boards for material recovery* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. gruodžio 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/51753.pdf>
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2011 m. gegužės 3 d. įsakymas Nr. D1-368 „Dėl Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 1999 m. liepos 14 d. įsakymo Nr. 217 „Dėl Atliekų tvarkymo taisyklių patvirtinimo“ pakeitimo“, *Valstybės žinios* 57–2721.
- Molto, J., et al. 2008. Pyrolysis and combustion of electronic wastes, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. lapkričio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/11929/1/articulo%20residuos%20electronicos.pdf>
- Tange, L.; Drohmann, D. 2005. *Waste electrical and electronic equipment plastics with brominated flame retardants from legislation to separate treatment thermal processes* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. lapkričio 21 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ebfrip.org/uploads/Press/documents/sdarticle.pdf>
- Techradar components. 2013. *How motherboards are made: a miracle of modern electronics* [interaktyvus], [žiūrėta 2013 m. gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.techradar.com/news/computing-components/motherboards/how-motherboards-are-made-a-miracle-of-modern-electronics-709366>
- ThomasNet. 2013. *Additive processing for printed circuit boards* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. lapkričio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.thomasnet.com/articles/automation-electronics/processing-printed-circuit-boards>
- Sohaili, J.; Muniyandi, S. K.; Mohamad, S. S. 2012. *A review on printed circuit boards waste recycling technologies and reuse of recovered nonmetallic materials* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. gruodžio 12 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ijser.org/researchpaper%5CA-Review-on-Printed-Circuit-Boards-Waste-Recycling-Technologies.pdf>
- Sun, J., et al. 2011. *Recycling of waste printed circuit boards by microwave-induced pyrolysis and featured mechanical processing* [interaktyvus], [žiūrėta 2012 m. lapkričio 21 d.]. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie2013407>

## RESEARCH ON TOXICITY EVALUATION OF WASTE INCINERATION RESIDUES OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

R. Volungevičienė, V. Bolutienė, K. Buinevičius

### Abstract

Recycling waste printed circuit boards (PCB) is an extremely complicated process, because PCBs consist of a number of complex components – hazardous and non-hazardous materials sets.

Pyrolysis and combustion are currently the most effective treatment technologies for waste printed circuit boards. Pyrolysis can be used for thermally decomposing PCBs allowing for the simultaneous recovery of valuable materials. Following the extraction of valuable materials, the problem of residual ash utilization is encountered. Determining the qualitative and quantitative characteristics of incineration residue helps with choosing effective ash management technologies. This paper analyzes PCB ash generated at three different temperatures of 400 °C, 500 °C and 600 °C. Ash residues have been analysed to determine the quantity and type of metals present. Furthermore, the experiment of leaching heavy metals from ash has been described.

**Keywords:** waste printed circuit boards, incineration residue of PCB, bottom ash, leaching heavy metals.