

## ŠLAKŲ, SUSIDARANČIŲ DEGINANT KOMUNALINES ATLIEKAS, NAUDOJIMAS BETONO MIŠINIUOSE

Milda PUNDINAITĖ-BARSTEIGIENĖ<sup>1</sup>, Darius BAČINSKAS<sup>2</sup>,  
Edmundas SPUDULIS<sup>3</sup>, Deividas RUMŠYS<sup>4</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

*El. paštas: <sup>1</sup>milda.pundinaite-barsteigiene@vgtu.lt; <sup>2</sup>darius.bacinskas@vgtu.lt;*

*<sup>3</sup>edmundas.spudulis@vgtu.lt; <sup>4</sup>deividas.rumsys@vgtu.lt*

**Santrauka.** Pastaraisiais metais visame pasaulyje plėtojant žiedinės ekonomikos koncepciją ir siekiant iki minimumo sumažinti utilizuojamų atliekų kiekį, ypač skatinamas atliekų atnaujinimas ir atnaujintų medžiagų kaip žaliavų antrinis naudojimas įvairiose pramonės šakose, kartu tausojant natūralius gamtos išteklius. Viena iš krypčių plėtojant šias tendencijas – deginant komunalines atliekas susidarančių šlakų (dugno pelenų) antrinis naudojimas betono mišiniuose. Straipsnyje trumpai apžvelgiamos deginant komunalines atliekas susidarančių šlakų naudojimo betono mišiniams galimybės. Pateikiama trumpa pasaulinės patirties šioje srityje apžvalga. Apibendrintai aprašytas atliekų deginimo Lietuvoje technologinis procesas ir susidarančių pelenų cheminė sudėtis. Pateikiami Vilniaus Gedimino technikos universitete atliktų betono mišinių su dugno pelenais preliminarinių bandymų rezultatai. Atlikti tyrimai atskleidė, kad, tinkamai parinkus apdirbtų dugno pelenų kiekį, jie gali būti naudojami kaip smulkiojo užpildo pakaitalas betono mišiniuose. Gauti pirminiai rezultatai duoda impulsą toliau tirti antrinių žaliavų naudojimui betono mišiniams srityje.

**Reikšminiai žodžiai:** komunalinės atliekos, deginimas, betono mišiniai, dugno pelenai, gniuždomasis stipris.

### Įvadas

Pasaulyje per metus surenkama maždaug 1,24 mlrd. tonų komunalinių atliekų. Didžiąją šių atliekų dalį sukaupia JAV, Kinija ir Japonija. Sukaupiamas atliekų kiekis proporcingas bendrojo šalies vidaus produkto dydžiui. Šiuo metu vidutiniškai vienam gyventojui tenka 500 kg komunalinių atliekų per metus. Didžiausias atliekų kiekis tenka JAV – 730 kg/gyv./per metus. Atliekų kiekiai valstybėse skiriasi nuo jų išsivystymo lygio. Kuo šalis turtingesnė ir labiau išsivysčiusi, tuo įvairių pakuočių atliekų, palyginti su maisto ir organinėmis atliekomis, joje susidaro daugiau. Popierius ir kartonas gali sudaryti apie 50 % viso komunalinių atliekų kiekio, toliau eina stiklas, plastikas ir metalai.

Ekonominio bendradarbiavimo ir plėtros organizacijos (EBPO) duomenimis, Europos Sąjungoje (27 valstybėse) per metus susidaro beveik 255 mln. tonų komunalinių atliekų, t. y. vidutiniškai 517 kg/gyv./per metus. Planuojama, kad iki 2020 m. šis skaičius padidės iki 680 kg/gyv./per metus. Daugiausia atliekų sukaupia Danija – 800 kg/gyv./per metus. Lietuvoje komunalinės atliekos sudaro apie 25 % visų Lietuvoje susidarančių atliekų. Valstybinės atliekų apskaitos duomenimis, 2011 m. Lietuvoje surinkta apie

1,37 mln. t komunalinių atliekų. Taigi vidutiniškai vienam gyventojui tenka 448 kg atliekų per metus.

Europos Sąjungos šalyse efektyviomis socialiniu-ekonominiu požiūriu laikytinos tokios atliekų tvarkymo sistemos, kurių ištekliai nukreipti antrinėms žaliavoms tvarkyti ir nuolatinei tvarkymo plėtrai organizuoti. Griežtėjant atliekų tvarkymo nuostatomis, jau daugelį metų kai kuriose šalyse komunalinės atliekos deginamos. Šis procesas leidžia iki 70 % sumažinti komunalinių atliekų masę bei iki 90 % sumažinti atliekų tūrį (Del Valle-Zermeño *et al.* 2013). Europoje šiuo metu sėkmingai veikia daugiau kaip 400 modernių atliekų deginimo gamyklų, o Lietuvoje vis dar apie 60 % atliekų yra šalinama sąvartynuose. Tačiau iki 2030 m. šis kiekis turi būti sumažintas iki 10 %, ir vienas iš efektyvių būdų šiam tikslui pasiekti – atliekų rūšiavimas ir deginimas.

2013 m. savo veiklą pradėjo UAB „Fortum Klaipėda“ atliekų kogeneracinė jėgainė, kol kas vienintelė komunalinių atliekų deginimo gamykla Lietuvoje. Kasmet joje bendrai sudeginama apie 240 tūkst. tonų atliekų ir biokuro. Deginimo procese susidaro apie 40 tūkst. tonų antrinių deginimo produktų per metus, kurie šiuo laikotarpiu visi arba

dalį jų sutartiniais pagrindais pristatomi į Klaipėdos regiono nepavojingųjų atliekų sąvartyną. Lietuvos Respublikos atliekų tvarkymo plane numatyta, kad tokio tipo ir panašaus pajėgumo jėgainės netolimoje ateityje turi atsirasti Vilniuje ir Kaune. Planuojama, kad Vilniaus ir Kauno jėgainės bus pastatytos ir pradės vykdyti atliekų deginimo veiklą iki 2020 m. Tad 2020 m. susidarančių antrinių deginimo produktų kiekis turėtų siekti apie 120 tūkst. t per metus. Siekiant iki minimumo sumažinti utilizuojamų atliekų kiekį sąvartynuose, ypač skatinamas atliekų atnaujinimas ir atnaujintų medžiagų kaip žaliavų antrinis naudojimas įvairiose pramonės šakose, kartu tausojant natūralius gamtos išteklius (Van der Wegen *et al.* 2013).

Straipsnyje trumpai apžvelgiamos deginant komunalines atliekas susidarančių šlakų naudojimo betono mišiniam galimybės. Pateikiama trumpa pasaulinės patirties šioje srityje apžvalga. Apibendrintai aprašytas atliekų deginimo Lietuvoje technologinis procesas bei susidarančių pelenų cheminė sudėtis. Pateikiami Vilniaus Gedimino technikos universitete atliktų betono mišinių su dugno pelenais preliminarinių bandymų rezultatai.

### **Šlakų naudojimo statybos pramonės sektoriuje pasaulinė patirtis**

Stebint pasaulines tendencijas, galima išskirti deginant pagrindines atliekas susidarančių antrinių produktų naudojimo sritis (Del Valle-Zermeño *et al.* 2013): a) kelių ir sąvartynų pagrindams įrengti; b) kaip priedas statybinių medžiagų (betono, cemento ir kt.) gamybai; c) požeminėms šalinimo vietoms stiprinti. Žiūrint į ilgametės dugno pelenų antrinio naudojimo perspektyvas pasaulio mastu pastebimos aiškios tendencijos – didžioji dalis pelenų naudojama tiesiant automobilių kelius ir įrengiant pylimus (taip pat ir sąvartynus) (Siong, Cheong 2004). Vis dėlto pastarąjį dešimtmetį siekiant išplėsti pelenų galimo naudojimo sritis statybos sektoriuje įvairiose šalyse nemažai dėmesio skirta pelenų kaip smulkiojo ir/arba stambiojo užpildo naudojimui betonuose.

Betonas – viena populiariausių pasaulyje medžiagų, naudojamų statybos sektoriuje. Lyginant su kitomis tradicinėmis statybinėmis medžiagomis (plienas, mediena, plastikas, aliuminis) betono gamybos apimtis yra dvigubai didesnė nei kitų tradicinių medžiagų kartu sudėjus. Prognozuojama, kad iki 2050 m. betono gamybos apimtis gali siekti ~28 mlrd. t per metus. Lietuvos statistikos departamento duomenimis, 2014 m. Lietuvoje vien prekinio betono mišinių pagaminta ir parduota apie ~2,3 mln. tonų, arba ~1 mln. m<sup>3</sup> (Lietuvos statistikos departamentas 2015). Šis kiekis neapima betono, kuris panaudotas betono

ir armuotojo betono gaminių (blokų, plokščių, sijų ir kt.) gamybai. Tikėtina, kad, įvertinus visus betono gamybos mastus, pagaminamo betono kiekiai yra gerokai didesni. Priklausomai nuo klasės 1 m<sup>3</sup> betono mišinio gamybai vidutiniškai reikalinga po ~1 t stambaus (pvz., skalda) ir smulkaus (pvz., smėlio) užpildo. Taigi per metus prekinio betono mišinio gamybai Lietuvoje sunaudojama po 1 mln. t tiek stambiojo, tiek smulkiojo užpildo.

Per pastaruosius dešimtmečius betono ir jo konstrukcijų tyrimų srityje išryškėjo dvi tendencijos. Statybos sektoriuje diegiant inovatyvius inžinerinius sprendinius ir technologijas, stengiamasi iš esmės pagerinti pagrindines betono fizikines, mechanines ir technologines savybes. Kaip pavyzdį galima paminėti lengvąjį, stiprųjį ir ypač stiprų, savaime sutankėjantį betoną. Šių betonų atsiradimas ne tik praplėtė šios medžiagos taikymo sritis, bet savo populiarumu dar labiau padidino atotrūkį nuo kitų statybinių medžiagų. Antroji tendencija – antrinių žaliavų utilizavimas betono mišiniuose. Betono mišinių gamybai jau daugelį metų naudojami lakieji pelenai, kurie susidaro įvairių pramonės šakų gamybos procesų metu. Galima paminėti ir patį betoną, kurį tinkamai perdirbtą galima pakartotinai naudoti kaip tradicinio smulkiojo ir stambiojo užpildų pakaitalą.

Įvairūs tyrimai parodė, kad dugno pelenai betono mišiniuose gali pakeisti tradicinius užpildus – smėlį ir žvyrą, tačiau būtina atsižvelgti į pelenų cheminę sudėtį, turinčią įtakos betono elgsenai ir iš jo pagamintų elementų ilgaamžiškumui. Vertinant pelenų antrinio panaudojimo galimybes aplinkosaugos aspektu, pažymima, kad tinkamai apdirbti pelenai gali būti naudojami betono mišiniuose be didesnių apribojimų (Van der Wegen *et al.* 2013). Šaltinyje (Final report 2014) konstatuojama, kad, utilizavus pelenus, betono mišiniuose dėl betono struktūroje vykstančių cheminių procesų susidaro chemiškai stabilūs ir netirpūs junginiai, apribojantys pavojingųjų medžiagų išplovimą į aplinką.

Pasaulyje plačiai tyrinėjamos deginant komunalines atliekas susidarančių dugno pelenų sudėtis, jų priklausomybė nuo deginimo technologijos ir komunalinio atliekų srauto sudėties. Daugiausia tiriamųjų darbų apie pelenų naudojimo galimybes šiuo metu atliekama Švedijoje, Olandijoje, Vokietijoje, JAV, Danijoje. Labiausiai pažengusi šalis dugno pelenų apdorojimo srityje yra Olandija. Ji yra vienintelė, kurioje reglamentuoti (CUR recommendation 116 2012) dugno pelenų kaip užpildo betono mišiniuose naudojimo reikalavimai. Betono užpildai atitinka darnųjų Europos standartų EN sistemoje reglamentuotus reikalavimus užpildams. Detalesnę informaciją apie produktus galima rasti šaltiniuose (HEROS 2013; Heros, Inaschco 2011). Remiantis rekomendacijomis (CUR recommendation

116 2012), šlakų naudojimas betono gamyboje numatytas darniajame standarte EN 206-1 (Lietuvos standartizacijos departamentas 2012). Minėtose rekomendacijose nurodytas užpildų iš šlakų naudojimas armuotajam ir nearmuotajam betonui. Gairės draudžia tokius užpildus naudoti įtemptojo gelžbetonio konstrukcijoms. Kitais atvejais leidžiama pelenų (šlakų) užpildais pakeisti dalį smėlio arba žvyro: a) iki 20 % tūrio armuotajam betonui; b) iki 50 % tūrio nearmuotajam betonui.

Pelenus leidžiama naudoti betonams, kurių gniuždomojo stiprio klasė yra nuo C12/15 iki C30/37. Pagal rekomendacijas leidžiama pelenus naudoti armuotajame betone visose aplinkos klasėse, išskyrus XA2 (vidutinio cheminio agresyvumo aplinka), XA3 (didelio cheminio agresyvumo aplinka). Eksploatuojant elementus XD (chloridų, bet ne jūros vandens sukelta korozija) ir XS (jūros vandens sukeliama korozija) klasių aplinkoje betono mišiniams gaminti būtina naudoti CEMIII/B arba CEM II/B-V klasės cementus. Nearmuotojo betono elementams pelenų naudojimas, atsižvelgiant į aplinkos klases, nėra ribojamas. Rekomendacijose keliami ir papildomi reikalavimai pelenų savybėms ir sudėčiai:

- tankis: gelžbetoniniuose elementuose – smulkusis užpildas >2100 kg/m<sup>3</sup>; smulkusis užpildas >2100 kg/m<sup>3</sup>; stambusis užpildas >2200 kg/m<sup>3</sup>;

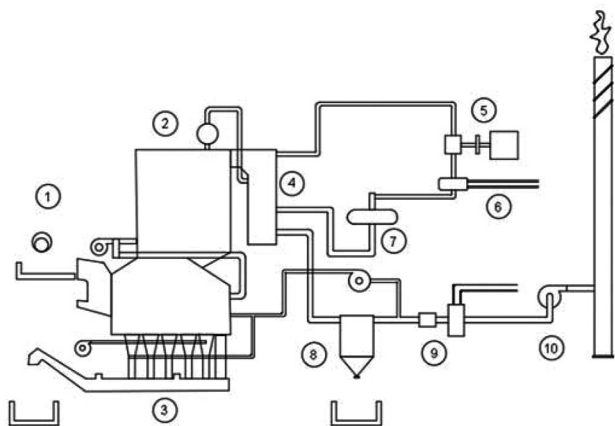
- betoniniuose elementuose – smulkusis/stambusis užpildas >2000 kg/m<sup>3</sup>;
- metalo (Al+Zn) kiekis ≤1 % m/m;
- sulfatų (SO<sub>3</sub>) kiekis ≤0,8 % m/m;
- šarmų kiekis ≤0,2 % m/m Na<sub>2</sub>O ekvivalento;
- svorio nuostoliai kaitinant ≤5,0 % m/m;
- poveikis kietėjimui ≤120 min.

Pastaraisiais metais pasaulinėje mokslinėje periodinėje spaudoje paskelbta nemažai publikacijų, susijusių su pelenų naudojimu betono mišiniams gaminti. Galima paminėti Van der Wegen *et al.* (2013), Aggarwal, Sliddique (2014), Zhang, Zhao (2014), Kuo *et al.* (2013), Lam *et al.* (2010), Bertolinia *et al.* (2004) darbus. Išskirtini Zhang, Zhao (2014), Collepari *et al.* (2015) darbai, kuriuose papildomai aukšta temperatūra paveikti dugno pelenai panaudoti inovatyvaus lengvojo ir savaime sutankėjančio betono mišinių gamybai. Vis dėlto daugelis šios srities ekspertų ir užsienio įmonių atstovų pažymi, kad dugno pelenų naudojimas betono gamybai visame pasaulyje yra tik pradedamas plėtoti.

### Atliekų deginimas Lietuvoje

Remiantis Klaipėdos regiono atliekų tvarkymo centro (KRATC) duomenimis, 2013 m. į Klaipėdos regiono komunalinių atliekų surinkimo sistemą pateko 248 tūkst. t komunalinių atliekų, iš kurių 84 tūkst. tonų atiduota deginti. Deginant komunalines atliekas susidaro pavojingi ir nepavojingi pelenai. Pelenų sudėtis priklauso nuo deginimo technologijos ir deginamų atliekų rūšies. UAB „Fortum Klaipėda“ atliekų deginimo jėgainėje naudojama ardyninė prakura. Deginant komunalines atliekas ardyninėje prakuroje ant ardyno ir katilo dugne susidarę pelenai (1 pav. poz. Nr. 3) yra nepavojingi pelenai, kurie vadinami dugno pelenais arba šlakais. Šie pelenai sudaro iki 85 % susidarančių visų pelenų kiekio. Dūmų valymo procese ir katilo kamine (1 pav. poz. Nr. 10) susidaro pavojingosios atliekos, kuriose yra didelis kiekis pavojingųjų cheminių medžiagų – lakiųjų pelenų. Lakiieji pelenai sudaro iki 15 % bendro pelenų kiekio.

Komunalinės atliekos sudarytos iš organinių ir neorganinių komponentų. Organines atliekas sudaro maisto atliekos, visų rūšių popierius, kartonas, visų rūšių plastikai, tekstilė, guma, oda, mediena ir t. t. Neorganines atliekas sudaro stiklas, molinių ir porcelianinių indų duženos, juodieji ir spalvotieji metalai ir šiukšlės – purvas. Atliekos ardyninėje prakuroje yra deginamos 850–1100 °C temperatūroje. Vidutinė deginimo temperatūra yra apie 1000 °C. Naudojant šią deginimo technologiją, nereikia specialiai paruošti atliekų. Deginant atliekas dugno pelenai (šlakai) daugiausia susidaro iš neorganinių deginimo produktų dalies,



1 pav. Termofikacinės atliekų deginimo gamyklos („Fortum Klaipėda“) technologinės schemos išilginis pjūvis (Aplinkos apsaugos agentūra 2014): 1 – kuro tiekimo sistema; 2 – garo katilo agregatas; 3 – dugno pelenų (šlako) tvarkymo sistema; 4 – garo katilo ekonomizaizeris; 5 – garo turbina su generatoriumi; 6 – garo ir vandens šilumokaičiai; 7 – deaeratorius; 8 – dūminių dujų valymo įrenginiai; 9 – FGC dūminių dujų kondensatorius; 10 – dūmtraukis

Fig. 1. Longitudinal section of technology scheme of combined heat and power plant (“Fortum Klaipėda”) (Aplinkos apsaugos agentūra 2014): 1 – fuel supply system; 2 – steam boiler; 3 – bottom ash treatment system; 4 – economizer of steam boiler; 5 – steam turbine with generator; 6 – steam and water heat exchangers; 7 – deaerator; 8 – cleaning equipment of flue gas; 9 – FGC flue gas condenser; 10 – chimney

1 lentelė. Metalų kiekis šlakuose

Table 1. Metal content in bottom ash

Neapdoroti šlakai							
Metalas	Vienetai	KHKW 1		Vokietija 2	Hamburg 3	Austrija 4	KRATC Lietuva
		Kt. Zürich	KVA Thurgau				Klaipėda
Geležis	[g/kg TS]	58–82	60–78	90–130	Nėra duomenų	30–100	Apie 77
Aliuminis	[g/kg TS]	54–100	51–64	20–60	Nėra duomenų	30–56	Apie 22
Varis	[g/kg TS]	5,0–17,6	6,3–8,7	0,6–7,5	6,3–9,9	0,5–8,5	Apie 0,8
Cinkas	[g/kg TS]	3,0–8,6	4,0–5,4	1,0–6,4	3,4–6,3	Nėra duomenų	Apie 1,0
Švinas	[g/kg TS]	1,2–3,9	1,5–3,2	0,2–4,7	1,2–2,6	0,3–4,5	Apie 0,17

kurių garavimo temperatūra yra aukštesnė nei 1000 °C. Medžiagos, kurių lydymosi temperatūra yra didesnė nei maksimali temperatūra krosnyje (t. y. įvairūs mineralai, stiklas, keramika, geležis, plieno lydiniai, nikelis ir varis), iš dalies oksiduojasi, tačiau kitaip nepakinta. Medžiagos, kurių lydymosi temperatūra yra žemesnė nei 1000 °C ir virimo temperatūra aukštesnė nei 1000 °C, ypač aliuminis, alavas ir cinkas, iš dalies išsilydo. Šios medžiagos išlieka šlakuose, tačiau pasikeitusiu pavidalu. Dėl šios priežasties prieš antrinį naudojimą dugno pelenus būtina papildomai apdoroti.

Neparuošti pelenai, gauti sudeginus atliekas, sudaro nevienalytę medžiagą, kuri sudaryta iš pelenų, išsilydusių ir ne iki galo išsilydusių deginimo produktų bei iš medžiagų, kurios deginamos liko nepakitusios dėl nepakankamos degimo temperatūros, t. y. metalo laužas (geležis, spalvotieji ir sunkieji metalai), stiklas, keramikos nuolaužos ir mažos statybinių atliekų – betono, plytų, akmenų – dalelės. 2013 metų atliktų tyrimų duomenimis, į Klaipėdos regiono nepavojingųjų atliekų sąvartyną pristatytuose pelenuose vidutiniškai randama apie 8 % juodųjų metalų, apie 2 % aliuminio, iki 1 % vario. 1 lentelėje palyginimui pateikti suvestiniai neapdorotų šlakų duomenys iš įvairių literatūros šaltinių (Morf 2009; Deutsches Umweltbundesamt 2010; Zwahr 2006; Mostbauer 2010; Lietuvos agrarinių ir miškų... 2013) ir Klaipėdos regiono nepavojingųjų atliekų sąvartyno. Metalų kiekiai šlakuose skiriasi, tai priklauso nuo tose šalyse atliekų rūšiavimo pobūdžio, žmonių vartojimo įpročių ir pan.

Naudojant pelenus kaip betono užpildą reikia įvertinti ir tai, kad dugno pelenų sudėtyje yra cheminių elementų, kurie, reaguodami su rišamųjų medžiagų (pvz., cemento) cheminiais elementais, sudaro junginius, turinčius neigiamą įtaką betono ilgaamžiškumui. Vienas tokių veiksnių – cemento tešlos elementų reakcija su aliuminiu. Cheminių procesų metu susidaro aliuminio hidroksidas, aliuminatai ir vandenilis. Esant pakankamam vandens kiekiui, minėti cheminiai procesai gali vykti ilgą laiką. Ypač pavojingi

intensyvūs cheminiai procesai arti elementų paviršiaus (paviršių, kurie nuolat veikiami drėgmės). Šie procesai gali lemti paviršių atsiluoksniavimą, kuris ypač pavojingas gelžbetoniniuose elementuose, nes paviršiniai sluoksniai atlieka apsauginę armatūros funkciją.

Antroji problema ta, kad dėl šarmų ir silicio junginių cheminės reakcijos susidaro silicio dioksidas, lemiantis betono šarminę koroziją. Silicio oksido formavimasis būdingas tiek atvirame ore, tiek viduje eksploatuojamiems elementams. Didelis dugno pelenų užpildų poringumas kartu su papildomų tuštumų atsiradimu sudaro sąlygas formuotis ne tik silicio oksidui, bet ir aliuminio hidroksidui. Šie aspektai lemia tai, kad vienos svarbiausių priemonių, siekiant padidinti betono mišinių ilgaamžiškumą, yra aliuminio ir silicio junginių kiekio pelenuose mažinimas.

Ne mažiau svarbus ir chloridų kiekis pelenuose. Siekiant panaudoti pelenus gelžbetoniniuose elementuose, chloridų kiekį būtina sumažinti, siekiant užtikrinti armatūros korozijos prevenciją. Tai lemia, kad prieš antrinį naudojimą dugno pelenai turi būti papildomai apdirbti taikant mechaninio, cheminio, biologinio ar terminio apdirbimo technologijas.

2017 m. sausio 1 d. įsigaliojusiu Lietuvos Respublikos aplinkos apsaugos ministro įsakymu dėl atliekų deginimo įrenginiuose ir bendrojo atliekų deginimo įrenginiuose susidariusių pelenų ir šlako tvarkymo reikalavimų patvirtinimo, po apdorojimo pelenai ir šlakas, atitinkantys nustatytus reikalavimus, gali būti panaudojami civilinės ir statybų inžinerijos statiniams (pavyzdžiui, keliams tiesti ir rekonstruoti, pastatų pamatams ir pan.) kaip statybinė medžiaga, statybinės medžiagos papildas arba pakaitalas, vadovaujantis Lietuvos Respublikos statybos įstatyme, Lietuvos Respublikos kelių įstatyme, atitinkamuose statybos ir kelių techniniuose reglamentuose nustatytais reikalavimais, arba naudojami sąvartynų rekultivacijai (Lietuvos Respublikos aplinkos ministro ... 2016). Šlakų išplovimo vertės pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. Išplovimo ribinės vertės, kai pelenai ir šlakas gali būti naudojami civilinėje ir statybos inžinerijoje (Lietuvos Respublikos aplinkos ministro ... 2016)  
Table 2. Limit leaching values of MSWI BA in civil and construction engineering (Lietuvos Respublikos aplinkos ministro ... 2016)

Parametras	Matavimo vienetas	Vertė
Ištirpusi organinė anglis	µg/l	Įvertinama mėginiui apibūdinti
Arsenas	µg/l	Mėginiui apibūdinti
Švinas	µg/l	50
Kadmis	µg/l	3
Chromas ges.	µg/l	200
Varis	µg/l	150
Nikelis	µg/l	40
Gyvsidabris	µg/l	1
Cinkas	µg/l	300
Chloridai	mg/l	1000
Sulfatai	mg/l	2000
Cianidai (l. fr.)	mg/l	0,020

### Lietuvoje atlikti eksperimentiniai tyrimai

Vilniaus Gedimino technikos universitete atlikti preliminarius dugno pelenų naudojimo betono konstrukcijoms tyrimai. Tyrimams taikyti UAB „Fortum Klaipėda“ termofikacinėje jėgainėje deginant komunalines atliekas susidarę dugno pelenai. Pelenai išvalyti vienoje iš Olandijos įmonių. Bandymai vykdyti keliais etapais. Pirmajame etape atlikti betono mišinių su skirtingais pelenų kiekiais (10 %, 25 %, 50 %) mechaninių ir fizikinių savybių tyrimai. Bandinių mišiniams gauti buvo naudojamas Akmenės cementas CEM I 52,5 R, Gariūnų smėlis (0–4 mm frakcijos) ir dugno pelenai (0–8 mm frakcijos). Aprašomame eksperimente pagaminti keturių skirtingų rūšių bandiniai: P\_0 etaloninis bandinys pagamintas iš cemento, smėlio, žvyro ir vandens; P\_(A-10) bandinys, kurio 10 % smėlio svorio pakeista apdorotais dugno pelenais; P\_(A-25) bandinys, kurio 25 % smėlio svorio pakeista apdorotais dugno pelenais; P\_(A-50) bandinys, kurio 50 % smėlio svorio pakeista apdorotais dugno pelenais. Iš gautų mišinių suformuoti kubeliai, kurių nominalieji matmenys – 70×70×70 mm, ir prizmės – 40×40×160 mm. Eksperimento metu nustatyti gniuždomieji betono mišinių stipriai (3 lentelė).

Iš 3 lentelėje eksperimento pateiktų duomenų matyti, kad pakeičiant 10 % ir 25 % smėlio svorio apdorotais dugno pelenais – mechaninės betono charakteristikos lyginant su etaloniniu betono bandiniu P\_0 po 7, 28 ir 90 parų beveik nesikeičia, o pakeitus 50 % smėlio svorio dugno pelenais, tiek po 7 ir tiek po 90 parų gniuždomasis stipris šiek tiek

3 lentelė. Bandinių gniuždomieji stipriai  
Table 3. Compressive strength of concrete elements

Bandinys	Gniuždomasis stipris po 7 parų, MPa	Gniuždomasis stipris po 28 parų, MPa	Gniuždomasis stipris po 90 parų, MPa
$P_0$	65.8	71.5	76.2
$P_{A-10}$	66.1	73.6	75.4
$P_{A-25}$	64.1	71.0	72.5
$P_{A-50}$	57.4	65.2	68.7

pablogėja, tačiau šie skirtumai nėra esminiai. Šie tyrimai atskleidžia teigiamas dugno pelenų naudojimo betono mišiniams perspektyvas. Ateityje būtina atlikti detalius betono mišinių ne tik mechaninių savybių, bet ir ilgaamžiškumo (šalčio atsparumo, vandens įgeriamumo, atsparumo druskoms ir kt.) tyrimus. Be to, būtina statistiškai įvertinti galimus dugno pelenų cheminių sudėčių kitimo laikui einant tendencijas. Papildomai būtina atlikti armuotojo betono elementų tyrimus, pagrindinį dėmesį kreipiant į galimą armatūros korozijos vystymąsi.

### Išvados

Pastaraisiais metais visame pasaulyje plėtojant žiedinės ekonomikos koncepciją ir siekiant iki minimumo sumažinti utilizuojamų atliekų kiekį, ypač skatinamas atliekų atnaujinimas ir atnaujintų medžiagų kaip žaliavų antrinis naudojimas įvairiose pramonės šakose, kartu tausojant natūralius gamtos išteklius.

Ankstesni tyrimai parodė, kad dugno pelenai betono mišiniuose gali pakeisti tradicinius užpildus – smėlį ir žvyrą, tačiau būtina atsižvelgti į pelenų cheminę sudėtį, turinčią įtakos betono elgsenai ir iš jo pagamintų elementų ilgaamžiškumui.

Naudojant pelenus kaip betono užpildą, būtina įvertinti dugno pelenų sudėtyje esančių cheminių elementų įtaką betono mišinių savybėms. Šie elementai, reaguodami su rišamųjų medžiagų (pvz., cemento) cheminiais elementais, sudaro junginius, turinčius neigiamą įtaką betono ilgaamžiškumui. Šiuo požiūriu galima išskirti cemento tešlos elementų reakciją su aliuminiu, šarmais, silicio junginiais, chloridais. Šie aspektai lemia tai, kad vienos iš svarbiausių priemonių, siekiant padidinti betono mišinių ilgaamžiškumą, yra minėtų elementų ar junginių kiekio pelenuose mažinimas, t. y. prieš antrinį naudojimą dugno pelenai turi būti papildomai apdirbti, taikant cheminio, biologinio bei terminio apdirbimo technologijas.

Mechaninėmis, cheminėmis arba terminėmis priemonėmis tinkamai paruošti pelenai gali būti naudojami tiek armuotajam, tiek ir nearmuotajam betonui. Pasaulinė patirtis rodo, kad šlakais galima pakeisti apie 20–30 % tradicinio stambiojo ir smulkiojo užpildo, betoną naudojant laikančiosioms armuotosioms konstrukcijoms bei iki 50 % nearmuotojo betono elementams.

Vertinant pelenų antrinio naudojimo galimybes aplinkosaugos aspektu, pažymima, kad tinkamai apdirbti pelenai gali būti naudojami betono mišiniuose be didesnių apribojimų.

VGTU atlikti preliminarūs tyrimai patvirtino pasaulinėje praktikoje gautus rezultatus, atskleidžiančius deginant komunalines atliekas susidarančių šlakų naudojimo betono mišiniams galimybes.

Atlikti tyrimai atskleidžia teigiamas dugno pelenų naudojimo betono mišiniams perspektyvas. Pakeičiant 10 % ir 25 % smėlio svorio apdorotais dugno pelenais, betono gniuždomasis stipris, lyginant su etaloniniu tradicinio betono bandiniu, po 7, 28 ir 90 parų beveik nesikeičia, o, pakeitus 50 % smėlio svorio dugno pelenais, tiek po 7, tiek po 90 parų gniuždomasis stipris šiek tiek pablogėja, tačiau šie skirtumai nėra esminiai.

Ateityje būtina atlikti detalius betono mišinių ne tik mechaninių savybių, bet ir ilgaamžiškumo (šalčio atsparumo, vandens įgeriamumo, atsparumo druskoms ir kt.) tyrimus. Be to, būtina statistiškai įvertinti galimus dugno pelenų cheminių sudėčių kitimo laikui einant tendencijas. Papildomai būtina atlikti armuotojo betono elementų tyrimus, pagrindinį dėmesį kreipiant į galimą armatūros korozijos vystymąsi.

## Padėka

Straipsnio autoriai išreiškia didelę padėką Lietuvos mokslo tarybai už finansinę paramą vykdant mokslininkų grupių projektą (sutarties Nr. MIP-093/2015). Už techninę pagalbą atliekant tyrimus autoriai dėkoja mgr. Darjušui Guščo.

## Literatūra

- Aplinkos apsaugos agentūra. 2014. *Pakeistas Taršos integruotos prevencijos ir kontrolės leidimas*. Aplinkos apsaugos agentūros Taršos prevencijos ir leidimų departamento Klaipėdos skyrius. Klaipėda.
- Aggarwal, Y.; Siddique, R. 2014. Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates, *Construction and Building Materials* 54: 210–223.
- Bertolinia, L.; Carsanaa, M.; Cassagoa, D.; Quadrio Curziob, A.; Collepardi, M. 2004. MSWI ashes as mineral additions in concrete, in *Cement and Concrete Research*, 1899–1906.

- Collepardi, S.; Borsoi, A.; Collepardi, M.; Curzi, A. Q. 2015. *Self compacting light-weight concretes with ground bottom ash from municipal solid waste incinerators (MSWI)*. ACI Special publication SP-305–29: 29.1–29.10.
- CUR recommendation 116. 2012. Processed municipal incinerator bottom ash as an aggregate for concrete. CUR-NET, Gouda, Netherlands.
- Del Valle-Zermeño, R.; Formosa, J.; Chimenos, J. M.; Martknez, M.; Fernñandez, A. I. 2013. Aggregate material formulated with MSWI bottom ash and APC fly ash for use as secondary building material, *Waste Management*: 621–627.
- Deutsches Umweltbundesamt. 2010. Verbesserung der umwelt-relevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen. Umweltbundesamt.
- Final report. 2014. *Evaluating the use of waste-to-energy bottom ash as road construction materials* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. balandžio mėn. 19 d.]. Prieiga per internetą: [http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed\\_Proj/Summary\\_SMO/FDOT-BDK78-977-20-rpt.pdf](http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_SMO/FDOT-BDK78-977-20-rpt.pdf)
- HEROS. 2013. *Incinerator bottom ash IBC building material*. Technical data. Heros Skuiskil B.V.
- Heros, Inashco. 2011. *Incinerator bottom ash aggregate 0/11* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. balandžio 14 d.]. Provisional product specification sheet. Prieiga per internetą: [http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed\\_Proj/Summary\\_SMO/FDOT-BDK78-977-20-rpt.pdf](http://www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_SMO/FDOT-BDK78-977-20-rpt.pdf)
- Kuo, W. T.; Liu, Ch. Ch.; Su, D. S. 2013. Use of washed municipal solid waste incinerator bottom ash in pervious concrete, *Cement and Concrete Composites* 37: 328–335. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.001>
- Lam, Ch. H. K.; Ip, A. W. M.; Barford, J. P.; McKay, G. 2010. Use of incineration MSW ash: a review, *Sustainability* 2: 1943–1968. <https://doi.org/10.3390/su2071943>
- Lietuvos agrarinių ir miškų mokslo centro filialo, agrocheminių tyrimų laboratorijos, analitinio skyriaus atliktų tyrimų duomenys. 2013. CSD INŽINIERIAI, UAB užsakymu.
- Lietuvos Respublikos aplinkos ministro 2016 m. lapkričio 25 d. įsakymas Nr. D1-805 „Dėl atliekų deginimo įrenginiuose ir bendro atliekų deginimo įrenginiuose susidariusių pelenų ir šlako tvarkymo reikalavimų patvirtinimo“. TAR, 2016-11-29, Nr. 27667.
- Lietuvos statistikos departamentas. 2015. *Gaminių gamyba 2014*. Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. 2012. LST EN 206-1 taikymo taisyklės ir papildomieji nacionaliniai reikalavimai. Vilnius.
- Morf, L. 2009. *Qualitätsentwicklung konventionell ausgetragener Schlacke*. Baudirektion des Kantons Zürich AWEL.
- Mostbauer, P. 2010. *Entsorgungstechnik MVA Rostasche*. Institut für Abfallwirtschaft Wien.
- Siong, G. K.; Cheong, C. P. 2004. *Incineration bottom ash as raw materials for concrete products*. Nanyang Technical University Singapore, 1–5.
- Van der Wegen, G.; Hofstra, U.; Speerstra, J. 2013. Upgraded MSWI bottom ash as aggregate in concrete, *Waste and Biomass Valorization* 4: 737–743. <https://doi.org/10.1007/s12649-013-9255-6>

Zhang, T.; Zhao, Z. 2014. Optimal use of MSWI bottom ash in concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials* 8(2): 173–182.  
<https://doi.org/10.1007/s40069-014-0073-4>

Zwahr, H. 2006. *Stand der Aufbereitungstechnik und Untersuchungsverfahren von MVA Schlacke*. Hanseatischer Schlackenkontor.

## **MSWI BOTTOM ASH UTILIZATION IN CONCRETE MIXES**

**M. Pundinaitė-Barsteigienė, D. Bačinskas,  
E. Spudulis, D. Rumšys**

### **Abstract**

In recent years, along with the global development of the Circular Economy concept and in order to minimise the quantity of waste disposed, waste recovery and reuse of recovered materi-

als as raw materials in various industries while preserving the natural resources is strongly encouraged. One of the strands in development of these trends is the reuse of slag (bottom ash) produced from municipal waste incineration in concrete mixes. The article gives a brief overview of the possibilities for the use of slag produced during the municipal waste incineration for the formation of concrete mixes. A brief overview of global experience in this area has been provided. The technological process of waste incineration in Lithuania and the chemical composition of the resulting ash have been described in general terms. The results of preliminary tests of concrete mixes with bottom ash performed at Vilnius Gediminas Technical University have been presented. The tests performed show that a properly selected content of bottom ash can be used as a substitute for fine aggregates in concrete mixes. The initial results give impetus to further research in the field of application of secondary raw materials for concrete mixes

**Keywords:** municipal waste, incineration, concrete mixes, bottom ash, compressive strength.