



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

**Komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų įtakos  
cementinių gaminių ilgaamžiškumo savybėms tyrimai**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Goda Kananavičiūtė**

Projekto autorė

**Doc. dr. Ernestas Ivanauskas**

Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

# **Komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų įtakos cementinių gaminių ilgaamžiškumo savybėms tyrimai**

Baigiamasis magistro projektas

6211EX008 Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Goda Kananavičiūtė**

Projekto autorė

**Doc. dr. Ernestas Ivanauskas**

Vadovas

**Doc. dr. Algirdas Augonis**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**

Statybos ir architektūros fakultetas

Goda Kananavičiūtė

## **Komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų įtakos cementinių gaminių ilgaamžiškumo savybėms tyrimai**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Godos Kananavičiūtės, baigiamasis projektas tema „Komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų įtakos cementinių gaminių ilgaamžiškumo savybėms tyrimai“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

Goda Kananavičiūtė

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

**Magistro baigiamojo projekto užduotis**

Studijų programa: 6211EX008 Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija

Baigiamojo projekto tema (lietuvių k.):

Cementinių statybos produktų, mažinančių miestų aplinkos taršą, tyrimai

Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: 2020 m. lapkričio 30 d. Nr. V25-09-18

(lietuvių k.):

Komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų įtakos cementinių gaminių ilgaamžiškumo savybėms tyrimai

(anglų k.):

Investigations of the Influence of Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ashes on the Durability Properties of Cement Products

Pradiniai duomenys darbui (pagal poreikį):

**Tikslas:**

Baigiamojo projekto dalys:

	Atlikti
Įvadas	X
Literatūros apžvalga	X
Metodologija	X
Eksperimentiniai tyrimai	X
Analitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Skaitiniai tyrimai	<input type="checkbox"/>
Ekonominė dalis	<input type="checkbox"/>
Išvados	X

Kita informacija (pagal poreikį), susitikimų su vadovu savaitės diena (-os) bei laikas:

Konsultaciniai susitikimai pirmadieniais arba penktadieniais 8:00–10:00 val. arba 17:00–19:00 val.

**Vadovas:**

(indėlis 100 %)

Doc. dr. Ernestas Ivanauskas

*pareigos, vardas, pavardė*

parašas

**Konsultantas:**

(indėlis \_\_\_\_\_ %)

pareigos, vardas, pavardė

parašas

**Konsultantas:**

(indėlis \_\_\_\_\_ %)

pareigos, vardas, pavardė

parašas

**Studentas:**

Goda Kananavičiūtė

*vardas, pavardė*

parašas

Kananavičiūtė, Goda. Komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų įtakos cementinių gaminių ilgaamžiškumo savybėms tyrimai. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Ernestas Ivanauskas; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): inžinerijos mokslai, Statybos inžinerija (E05).

Reikšminiai žodžiai: dugno pelenai, komunalinės atliekos, betono užpildai, smėlis, cementiniai gaminiai.

Kaunas, 2021. 50 p.

### **Santrauka**

Baigiamajame magistro projekte tiriama komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų įtaka cementinių gaminių ilgaamžiškumo savybėms.

Teorinėje dalyje apžvelgiamos kietųjų komunalinių ir medienos atliekų deginimo metu gautų dugno pelenų panaudojimo galimybės, pelenų cheminė sudėtis, jų kiekio betono mišinyje įtaka bandinių fizikinėms bei mechaninėms savybėms.

Bandymų metu pakeitus dalį smulkią užpildo - smėlio, nevalytai komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenais, tiriamos betono bandinių mechaninės (gniuždomasis stipris), fizikinės (gaminių poringumas, vandens įgėris, atsparumas šalčiui) ir aplinkos poveikio korozijai savybės. Taip pat tiriamas vandenyje netirpių medžiagų išplovimas iš sukietėjusių betono gaminių.

Atlikus bandymus ir įvertinus gautus rezultatus matyti, kad nevalytų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenai gali būti naudojami gaminant cementinius statybos produktus. Optimaliausias dugno pelenų kiekis betono mišinyje – 10 proc. Dugno pelenai padidino betono atsparumą gniuždymui, o uždarytų porų kiekis pagerino atsparumo šalčiui savybes. Betonai su 10 proc. dugno pelenų taip pat pasižymėjo mažu chloridų jonų laidumu. Nevalytų komunalinių atliekų dugno pelenų cheminių junginių koncentracija išplovimo metu neviršija ribinių verčių, todėl dugno pelenai gali būti saugiai naudojami cementinių statybos produktų gamyboje, taip sumažinant daromą žalą aplinkosaugai, taupant energiją bei natūralius gamtos išteklius.

Darbo struktūra - 19 lentelių, 26 paveikslėliai, 48 literatūros šaltiniai.

Kananavičiūtė, Goda. Investigations of the Influence of Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ashes on the Durability Properties of Cement Products. Master's Final Degree Project / supervisor doc. dr. Ernestas Ivanauskas; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Engineering Sciences, Civil Engineering (E05).

Keywords: bottom ash, municipal solid waste, concrete aggregates, sand, cement products.

Kaunas, 2021. 50 p.

### **Summary**

The main purpose of this master's final project is to investigate the influence of municipal solid waste incinerator bottom ash on the durability properties of cement products.

In the theoretical part, the possibilities of using municipal solid waste and wood waste incinerator bottom ash are reviewed. Also, the chemical composition of bottom ashes and their influence on the physical and mechanical properties of samples are analyzed.

Mechanical (compressive strength), physical (porosity, water absorption, freezing resistance), and environmental corrosion properties of concrete are investigated after replacing part of the fine aggregate (sand) with unwashed municipal solid waste incineration bottom ash. Leaching toxicity from hardened concrete products is also investigated.

Tests have shown that unwashed municipal solid waste incinerator bottom ash can be used in manufacturing cement products. The optimal amount of bottom ash in the concrete mix is 10 percent. Bottom ash increased compressive strength and improved the freezing as well as chloride resistance properties of the concrete. The concentration of chemical compounds of unwashed municipal solid waste bottom ash during leaching does not exceed the limit values, therefore the bottom ash can be safely used in the production of cement products, therefore reducing the damage to the environment, saving energy and natural resources.

Work structure - 19 tables, 26 figures, 48 references.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>10</b>
<b>1. Literatūros apžvalga .....</b>	<b>12</b>
1.1. Betonai ir jo gamyba .....	12
1.2. Ekologinės problemos statybos sektoriuje .....	12
1.3. Atliekų tvarkymo problemos .....	13
1.4. Antrinių žaliavų ir degimo produktų panaudojimo galimybės.....	13
1.5. Komunalinių atliekų dugno peleniai .....	14
1.5.1. Komunalinių atliekų deginimas.....	14
1.5.2. Komunalinių atliekų dugno pelenų panaudojimas .....	17
1.5.3. Komunalinių atliekų dugno pelenų savybės.....	18
1.5.4. Betono su komunalinių atliekų dugno pelenais savybės .....	18
1.6. Medienos dugno pelenai.....	21
1.6.1. Taršos kontrolė ir panaudojimo galimybės .....	21
1.6.2. Betono su medienos dugno pelenais savybės.....	22
1.7. Literatūros analizės apibendrinimas .....	22
<b>2. Tyrimų metodai .....</b>	<b>24</b>
2.1. Užpildų granulometrinės sudėties nustatymas .....	24
2.2. Betono mišinio slankumo nustatymas .....	25
2.3. Oro kiekio betono mišinyje nustatymas .....	26
2.4. Vandenyje netirpių medžiagų kiekio betone ir dugno pelenuose nustatymas.....	28
2.5. Gniuždymo stiprio nustatymas .....	29
2.6. Chlorido jonų prasiskverbimo gylio nustatymas.....	30
2.7. Vandens įgeriamumo nustatymas.....	32
2.8. Vandens įsiskverbimo gylio nustatymas .....	35
2.9. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu metodu .....	36
<b>3. Tyrimų rezultatai ir jų apibendrinimas .....</b>	<b>38</b>
3.1. Užpildų granulometrinės sudėties nustatymas .....	39
3.2. Betono mišinio slankumo nustatymas .....	40
3.3. Oro kiekio betono mišinyje nustatymas .....	40
3.4. Vandenyje netirpių medžiagų kiekio betone ir dugno pelenuose nustatymas.....	41
3.5. Gniuždymo stiprio nustatymas .....	41
3.6. Chlorido jonų prasiskverbimo gylio nustatymas.....	42
3.7. Vandens įgeriamumo nustatymas.....	43
3.8. Vandens įsiskverbimo gylio nustatymas .....	45
3.9. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu metodu .....	46
<b>Išvados .....</b>	<b>47</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>48</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>51</b>
1 priedas. Užpildų granulometrinė sudėtis .....	51
2 priedas. Gniuždymo stiprio nustatymas .....	53
3 priedas. Vandens įgeriamumo nustatymas .....	54
4 priedas. Vandens įsiskverbimo gylio nustatymas.....	55

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Išplovimo ribinės vertės, kai pelenai ir šlakas gali būti naudojami civilinėje ir statybos inžinerijoje .....	16
<b>2 lentelė.</b> Metalų kiekis šlakuose .....	17
<b>3 lentelė.</b> Bandinių gniuždomieji stipriai .....	18
<b>4 lentelė.</b> Betono su komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenais savybės.....	19
<b>5 lentelė.</b> Betono su komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenais savybės.....	20
<b>6 lentelė.</b> Betono mišinio slankumo klasės .....	25
<b>7 lentelė.</b> Nevalytų komunalinių atliekų dugno pelenų cheminė sudėtis .....	38
<b>8 lentelė.</b> Betono mišinio slankumo nustatymo rezultatai .....	40
<b>9 lentelė.</b> Oro kiekio betono mišinyje nustatymo rezultatai.....	40
<b>10 lentelė.</b> Vandenyje netirpių medžiagų kiekio betone nustatymo rezultatai.....	41
<b>11 lentelė.</b> Vandenyje netirpių medžiagų kiekio dugno pelenuose nustatymo rezultatai .....	41
<b>12 lentelė.</b> Chlorido jonų prasiskverbimo gylio nustatymo rezultatai .....	43
<b>13 lentelė.</b> Betono atsparumo šalčiui po 100, 150 ir 200 ciklų bandymo rezultatai .....	46
<b>14 lentelė.</b> Smėlio fr. 0/4 granulimetrinės sudėties tyrimo duomenys .....	51
<b>15 lentelė.</b> Pelenų fr. 0/4 granulimetrinės sudėties tyrimo duomenys .....	51
<b>16 lentelė.</b> Skaldos fr. 0/32 granulimetrinės sudėties tyrimo duomenys.....	52
<b>17 lentelė.</b> Betono bandinių stiprio gniuždant po 1, 7, 28 ir 90 parų nustatymo rezultatai .....	53
<b>18 lentelė.</b> Betono poringumo nustatymas pagal vandens įgeriamumo kinetiką.....	54
<b>19 lentelė.</b> Vandens įsiskverbimo gylio bandymo rezultatai .....	55



## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Betono žiedinės ekonomikos modelis (angl. <i>Life cycle</i> ) .....	13
<b>2 pav.</b> 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 ekonomizeris; 5 – garo turbina su generatoriumi; 6 – garo ir vandens šilumokaičiai; 7 – deaeratorius; 8 – dūminių dujų valymo įrenginiai; 9 – FGC dūminių dujų kondensatorius; 10 – dūmtraukis .....	15
<b>3 pav.</b> Betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo komunalinių atliekų dugno pelenų kiekio betone .....	21
<b>4 pav.</b> Granulimetrinės sudėties nustatymo įranga: a) sietų kratytuvas ir sietai, b) svarstyklės .....	24
<b>5 pav.</b> Betono mišinio slankumo nustatymo įranga: kūgio forma, pagrindo plokštė, tankinimo strypas, piltuvas, kempinė .....	25
<b>6 pav.</b> Betono mišinio slankumo matavimas .....	26
<b>7 pav.</b> Slėgio matavimo prietaisai.....	27
<b>8 pav.</b> Bandomos medžiagos filtravimas .....	28
<b>9 pav.</b> Hidraulinis presas Controls “PILOT4” .....	29
<b>10 pav.</b> Chlorido jonų prasiskverbimo gylio bandymas: a) Elektros srovės šaltinis Voolcraft VLP-2043, b) sujungti bandiniai .....	30
<b>11 pav.</b> Chloridų penetracijos hidrotechniniame betone bandymo schema.....	31
<b>12 pav.</b> Bandiniai pamerkti į vandenį .....	32
<b>13 pav.</b> Konglomerato atsparumo šalčiui priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus <i>Kš</i> .....	35
<b>14 pav.</b> Vandens įsiskverbimo į betoną gylio nustatymo bandymų stendas (a) su slėgio įranga (b) .....	35
<b>15 pav.</b> Vandens įsiskverbimo į betoną bandymo prietaisų schema.....	36
<b>16 pav.</b> Bandymuose naudotų dugno pelenų mikrostruktūra.....	38
<b>17 pav.</b> Smėlio fr. 0/4 ir dugno pelenų fr. 0/4 granulimetrinių sudėčių palyginimo grafikas.....	39
<b>18 pav.</b> Skaldos fr. 0/32 granulimetrinės sudėties grafikas.....	39
<b>19 pav.</b> Gniuždomojo stiprio po 1, 7, 28 ir 90 parų diagrama .....	42
<b>20 pav.</b> Sugniuždyti betono bandiniai.....	42
<b>21 pav.</b> Chloridų įsiskverbimo gylio nustatymo bandiniai su 0 proc. ir 10 proc. dugno pelenų .....	43
<b>22 pav.</b> Betono poringumo rodiklių priklausomybės nuo pelenų kiekio betone diagrama.....	44
<b>23 pav.</b> Betono poringumo priklausomybės nuo pelenų kiekio betone diagrama .....	44
<b>24 pav.</b> Maksimalus vandens įsiskverbimo gylis betone .....	45
<b>25 pav.</b> Vandens įsiskverbimo gylio nustatymo bandiniai.....	45
<b>26 pav.</b> Atsparumo šalčiui tyrimo bandiniai po a) 100; b) 150 ir c) 200 užšaldymo / atšildymo ciklų .....	46

## Įvadas

Dėl augančios populiacijos, ekonomikos ir vartojimo kasmet pasaulyje susidaro milijardai tonų kietųjų atliekų. Kietosios komunalinės atliekos dažniausiai šalinamos sąvartynuose arba deginimo būdu. Lyginant su šalinimu sąvartynuose, atliekų deginimas sumažina atliekų kiekį 90 proc., o masę – 70 proc., tuo pačiu suteikdamas galimybę proceso metu išgauti elektros energiją [1]. Dėl šių priežasčių tai laikoma ekonomiškiausiu atliekų apdorojimo būdu. Kita vertus, kietųjų atliekų deginimo proceso metu yra išgaunamos liekanos, kurias daugiausia sudaro dviejų rūšių pelenai – dugno ir lakieji. Šiems pelenams utilizuoti yra reikalingos brangios, specialiai paruoštos bei ekologiškai apmokestinamos sąvartynų vietos. Visi šie veiksniai veda link idėjos, ieškoti švarių, uždaro ciklo atliekų šalinimo procesų. Jų dėka, kietųjų atliekų likučiai būtų naudingai panaudoti dar kartą, o neekonomiškas ir neekologiškas sąvartynų naudojimas būtų maksimaliai apribotas.

Siekiant spręsti minėtas aplinkosaugos problemas bei vystyti žiedinės ekonomikos modelį, vienas iš būdų yra atliekas kaip antrinę žaliavą panaudoti statybos pramonėje - cementiniuose statybos produktuose. Betonai yra pagrindinė statybos inžinerijos medžiaga, naudojama daugelyje statinių. Betonui gaminti naudojama: cementas, smulkusis užpildas, stambusis užpildas, mineraliniai priedai, cheminiai priedai bei vanduo. Cementas yra kone svarbiausia sudedamoji medžiaga, dėl savo pagrindinės paskirties ir savybės surišti užpildus. Per metus pagaminama milijardai tonų cemento, o cemento gamyklos pasaulyje išmeta apie 4–5 proc. visų šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Taip pat betono gamybai naudojamo smulkiojo užpildo – smėlio gavyba vis labiau naikina kraštovaizdį ir gamtos ekosistemą. Todėl siekiama sumažinti šių neatsinaujinančių išteklių naudojimą ir ieškoma alternatyvų, kuo pakeisti cementą ir natūraliuosius užpildus betono mišiniuose.

Atsižvelgiant į deginimo krosnies dugno pelenų savybes, ši medžiaga gali būti naudojama pakeičiant dalį cemento arba užpildo gaminant betono mišinius. Šių antrinių žaliavų panaudojimas cementiniuose statybos produktuose ne tik leistų sumažinti daromą žalą aplinkosaugai, bet ir taupyti energiją bei natūralius gamtos išteklius. Vertinant ekologiniu aspektu, šios žaliavos antrinis panaudojimas galimas be didesnių apribojimų. Vis dėlto daugelis įmonių atstovų bei šios srities ekspertų į deginamų atliekų dugno pelenų antrinį panaudojimą žvelgia skeptiškai ir dar tik pradeda tai plėtoti. Iki šiol yra dar daug neatsakytų klausimų dėl komunalinių atliekų dugno pelenų cheminių elementų įtakos betono mechaninėms bei fizikinėms savybėms. Taip pat nėra aiškios ilgaamžiškumo ir atsparumo aplinkos veiksniams tendencijos.

Šiame darbe apžvelgiamos kietųjų komunalinių ir medienos atliekų deginimo metu gautų dugno pelenų panaudojimo galimybės, pelenų cheminė sudėtis, jų kiekio betono mišinyje įtaka bandinių fizikinėms bei mechaninėms savybėms. Pakeitus dalį smulkiojo užpildo nevalytais komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenais, tiriamos betono bandinių mechaninės, fizikinės ir aplinkos poveikio korozijai savybės.

**Tikslas:** ištirti antrinių žaliavų utilizavimo galimybes cementinių gaminių gamyboje, įvertinant jų įtaką fizikinėms (gaminių poringumui, vandens įgėriui, atsparumui šalčiui), mechaninėms (gniuždomajam stipriui) savybėms ir aplinkos poveikio korozijai (chloridų įsiskverbimo gyliui).

### Uždaviniai:

- susipažinti su ekologinėmis problemomis ir jų sprendimo būdais gaminant cementinius statybos produktus;

- atlikti literatūros analizę apie įvairių antrinių žaliavų ir deginimo produktų – pelenų, panaudojimo galimybes cementiniuose statybos produktuose;
- nustatyti pasirinktų antrinių žaliavų optimaliausius įmaišymo kiekius, keičiant jomis dalį natūralių užpildų, kartu įvertinant jų įtaką tiek mišinio, tiek sukietėjusio betono fizikinėms – mechaninėms savybėms;
- atlikti galimų išsiplovimo junginių koncentracijos tyrimus iš sukietėjusių betono gaminių;
- nustatyti pasirinktų antrinių žaliavų įtaką betono poringumui, atsparumui šalčiui ir chloridų įsiskverbimui.

## **1. Literatūros apžvalga**

### **1.1. Betonas ir jo gamyba**

Betonas yra statybinė medžiaga, susidedanti iš cementinės (rišamosios) medžiagos, vandens, specialių priedų, smulkaus bei stambaus užpildų. Betonas naudojamas labai plačioje statinių grupėje, nuo didžiulių krantinių iki sudėtingų pastatų; lyginant su kitomis metalo, keramikos ar polimerinėmis statybos medžiagomis, betonas yra pigesnis, turi geras atsparumo ir ilgaamžiškumo savybes. Metinis betono sunaudojimas pasaulyje yra 6,5 milijardai tonų, ir tai jį daro antra labiausiai žmonių naudojama medžiaga po vandens [2].

Betono užpildai yra mineraliniai grūdėliai, sudarantys neaktyvią betono mišinio dalį. Kadangi užpildai yra surišami su cemento tešla į monolitinį darinį, betonas įgauna didesnę matmenų stabilumą bei ilgaamžiškumą lyginant su gryna cemento tešla. Didesnės nei 4,8 mm dalelės yra laikomos stambiu užpildu, o mažesnės nei 4,8 mm dalelės – smulkiu užpildu [2]. Užpildai gaunami natūraliu arba dirbtiniu būdu. Dažniausiai naudojami natūralūs užpildai, paprastai yra gaunami iš smėlio ar žvyro. Dirbtiniai užpildai dažniausiai yra gaunami iš atliekų, likusių po gamybinių procesų. Teritorijose, kuriose reta natūralių užpildų, įvairios surūšiuotos statybos atliekos, gali būti panaudotos kaip užpildai, įskaitant ir perdirbtą betoną, jei jis yra susmulkinamas.

Svarbiausia betono sudedamoji dalis yra cementas, kuris sąveikauja kaip jungiamoji medžiaga. Dauguma betono savybių priklauso nuo cemento. Dažniausiai aptinkama cemento rūšis yra portlandcementis, kurio 93–97 proc. sudaro klinkeris. Klinkeris susidaro kaitinant pradinę žaliavą – klintis aukštoje temperatūroje cemento krosnyje. Degimo metu kalcio karbonatas suardomas ir susidaro CaO bei CO<sub>2</sub> produktai, t.y. vyksta kalcinavimas [3]. Šis procesas ypač svarbus šiltnamio efekto dujų susidarymo metu – anglies ryšys mineraluose yra paverčiamas CO<sub>2</sub> [4]. Gautas kalcio oksidas kartu su moliu, silicio oksidu, aliuminio oksidu ir geležies oksidu deginami krosnyje aukštoje temperatūroje (apie 1 450 °C) [2], taip gaunant klinkerį. Vėliau klinkeris sutrinamas ar sumalamas kartu su gipsu ir kitomis sudedamosiomis dalimis, taip gaunant cementą. Kalcinavimas įprastai išskiria daugiau kaip 50 proc. visos CO<sub>2</sub> emisijos iš cemento produkcijos, o didžioji dalis likusios emisijos išskiriama dėl žaliavų deginimo krosnyje [3]. Manoma, kad pagaminus vieną toną cemento, išmetama apie 0,8 tonos CO<sub>2</sub>. Gamtosaugine prasme šis procesas svarbus dar ir dėl to, kad be anglies dioksido aplinka yra teršiama dar ir kitais toksiškais junginiais, tokiais kaip SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ir kt.

### **1.2. Ekologinės problemos statybos sektoriuje**

Atsinaujinančios energijos rodiklių gerinimas tapo ypač svarbus statybos sektoriuje, kuris lemia didelį energijos suvartojimą ir aplinkai daromą žalą, ypač dėl gamtos iškasenų suvartojimo, netinkamo atliekų utilizavimo bei šiltnamio efekto dujų išskyrimo. Statybos sektorius yra pagrindinė natūralių iškasenų išsekimo priežastis ir vienas didžiausių atliekų šaltinių. Negana to, natūralių iškasenų mažėjimas kartu sukelia ir kitas aplinkosaugines problemas, kurios privalo būti rimtai svarstomos, pavyzdžiui kraštovaizdžio niokojimas, ekosistemų mažėjimas, žala žmonių sveikatai bei grunto, vandens ir oro teršimas gamybos atliekomis ir statybinių medžiagų likučiais.

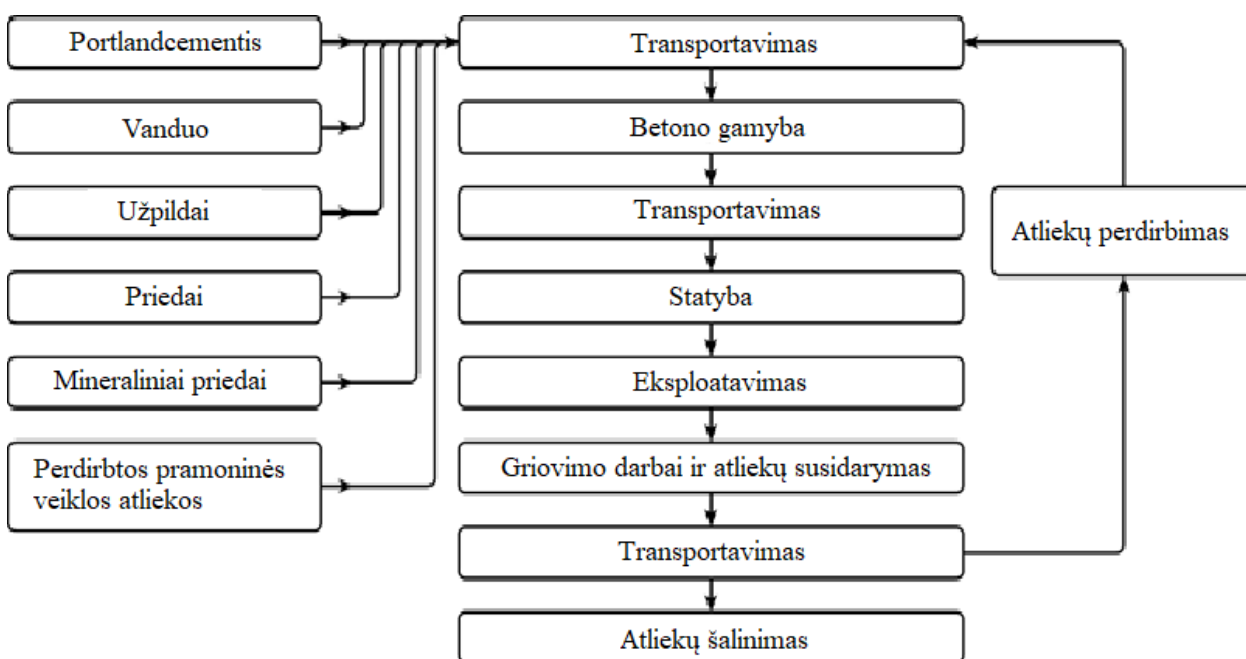
### 1.3. Atliekų tvarkymo problemos

Kita ekologinė problema yra vis auganti ekonomika ir didėjantis susidaranti atliekų kiekis. Per metus pasaulyje susidaro apie 2,1 milijardo tonų kietųjų atliekų ir manoma, kad iki 2025 metų šis skaičius pakils iki 3,4 milijardo [1]. Tiek susidariusių atliekų kiekis, tiek kiekvienos šalies priimta atliekų tvarkymo strategija labai priklauso nuo jos vystymosi indekso. Pasaulyje apie 19 proc. kietųjų atliekų yra perdirbama, o 11 proc. – sudeginama [5]. Nors perdirbimas yra tinkamiausias atliekų tvarkymo variantas, efektyviau, kai atliekos, kurių negalima perdirbti dėl ekonominių priežasčių, yra sudeginamos ir gaminama energija. Vien Lietuvoje sąvartynuose yra apie 400 tonų atliekų, kurias tikimasi sudeginti atliekų deginimo jėgainėse šilumos gamybai. Centralizuotas kietųjų atliekų deginimas yra plačiai taikoma praktika siekiant išvengti sanitarinių problemų ir sumažinti atliekų kiekį. Atliekų kiekis sumažėja 90 proc., be to, tai padeda iš atliekų išgauti daugiau metalų. Po deginimo liekanos rūšiuojamos kaip deginimo krosnies dugno pelenai ir lakieji pelenai.

Pastebėtina, kad per metus iš maždaug 450 deginimo įrenginių Europoje susidaro apie 16 milijonų tonų deginimo krosnies dugno pelenų [5]. Dugno pelenai sudaro daugiau kaip 90 proc. susidariusių nuosėdų, todėl jų naudojimas yra labai svarbus žiedinei ekonomikai pasiekti. Kai kuriose šalyse dugno pelenai yra ir apdorojami, ir naudojami nedidelėms reikmėms, pvz.: kaip užpildo medžiaga tiesiant kelius, statant pylimus ir kt. Kita vertus, daugelyje regionų jie dažniausiai lieka nenaudojami ir tiesiog patenka į sąvartynus.

### 1.4. Antrinių žaliavų ir degimo produktų panaudojimo galimybės

Pastaruoju laikotarpiu tiek Lietuvoje, tiek ir pasaulyje sparčiai plėtojamas produkcijos žiedinės ekonomikos modelis (angl. *Life cycle*) [2]. Šiuo modeliu siekiama maksimaliai sumažinti atliekų švaistymą ir yra ypač skatinamas atliekų perdirbimas į žaliavas, kurios būtų panaudojamos antrą kartą kuo įvairesniuose pramonės sektoriuose (žr. 1 pav.).



1 pav. Betono žiedinės ekonomikos modelis (angl. *Life cycle*) [2]

Betonas yra žiedinės ekonomikos modelio pavyzdys. Jo sudėtis gali būti koreguojama, norint panaudoti atliekas gamybos pradžioje, o ciklo pabaigoje betono likučiai gali būti panaudoti kaip pradinė žaliava cemento arba užpildų gamybai naujuose betono mišiniuose [2]. Tikslesniam pavyzdžiui įvardinti, C. Chenas [4] savo darbe, spręsdamas iškasenų išsekimo problemas, įvertino tokių atliekų panaudojimą kaip aukštakrosnių šlakai arba lakieji pelenai. Šios atliekos naudojamos kaip priedai į betono produkciją, pakeičiantys portlandcementį ir suteikiantys galimybę taupyti neatsinaujinančius, natūralius priedus, išvengiant jų išsekimo.

Aukštakrosnių cementas yra cemento rūšis, pagaminta iš malto portlandcemenčio ir sutrinto šlako iš aukštakrosnių. Šis cementas skiriasi nuo originalaus portlandcemenčio savo lėtesniu stiprio augimu kietėjimo stadijoje ir padidintu atsparumu vandeniui. Paprastai naudojamas surenkamiems sustiprintiems gelžbetonio statiniams arba hidraulinėms inžinerinėms sistemoms.

Lakieji pelenai gaunami deginant kurą (pavyzdžiui, anglį) ir elektrostatiu filtru surenkant mažasias pelenų daleles iš išmetamųjų dujų. Pelenai sutankina betono struktūrą, tai padaro ją atsparesniu aplinkos poveikio veiksniams. Lakieji pelenai gaunami kaip antrinis produktas iš elektrinių jėgainių ir tuo pačiu gali būti laikomi kaip dar kartą panaudojama pradinė žaliava. Tokie pelenai gali būti plačiai naudojami kaip betono užpildas ar rišiklis, portlandcemenčio pakaitalas, pradinė žaliava plytomis ir asfaltui.

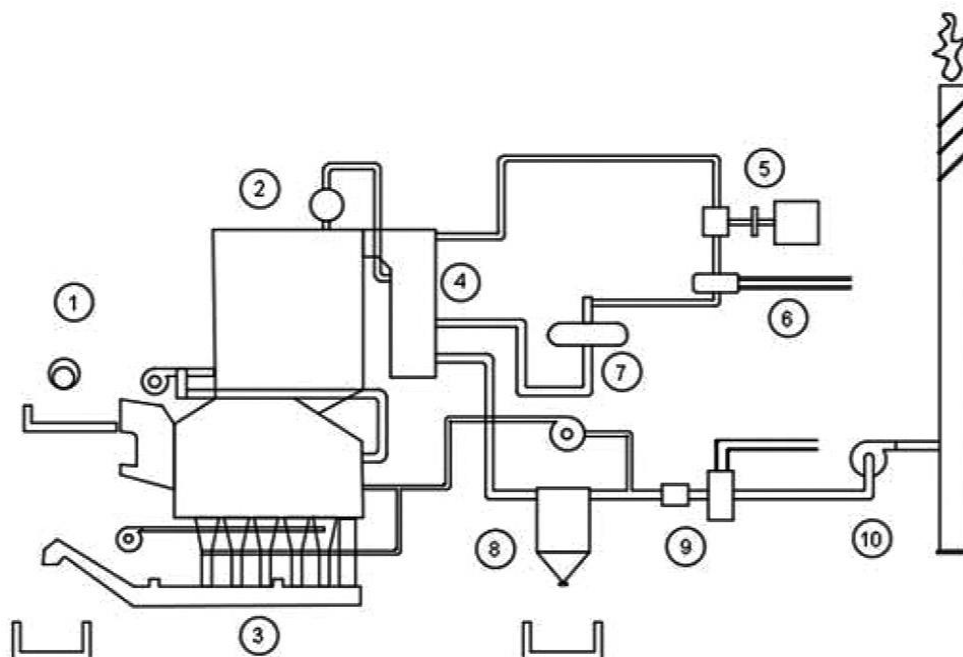
Dėl lakiųjų pelenų ar aukštakrosnių šlako kaip antrinių produktų panaudojimo, susijusios aplinkosauginės problemos yra stipriai sumažėjusios. Cemento gamyboje, ypač kalcinavimo procese, sunaudojama šiluminė energija mažėja naudojant kuo daugiau antrinių žaliavų. Kai į klinkerio produkciją yra pridedami antrinių žaliavų priedai, energijos suvartojimas bei žala aplinkosaugai stipriai mažinama.

## **1.5. Komunalinių atliekų dugno peleniai**

### **1.5.1. Komunalinių atliekų deginimas**

Viena iš kryptių plėtojant antrinių žaliavų panaudojimo tendencijas – komunalinių atliekų deginimo metu susidarantių šlakų (dugno pelenų) antrinis naudojimas betono mišiniuose. Komunalines atliekas sudaro organinės ir neorganinės atliekos. Organinėms atliekoms priskiriamos maisto atliekos, popierius, kartonas, plastikas, guma, mediena ir t.t. Neorganines atliekas sudaro juodieji ir spalvotieji metalai, stiklo, molio, porceliano duženos ir šiukšlės – purvas. Pirmiausia komunalinės atliekos yra rūšiuojamos: atskiriamas popierius, stiklas ir plastmasė, nes šios atliekos gali būti perdirbamos. Likusios atliekos gabenamos deginti.

Lietuvoje komunalinės atliekos sudaro apie 25 proc. visų atliekų. Viena tokių biokuro ir atliekų deginimo jėgainių yra UAB „Fortum Klaipėda“, kurioje atliekoms deginti naudojama ardyninė pakura (žr. 2 pav.).



**2 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 ekonomaizeris; 5 – garo turbina su generatoriumi; 6 – garo ir vandens šilumokaičiai; 7 – deaeratorius; 8 – dūminių dujų valymo įrenginiai; 9 – FGC dūminių dujų kondensatorius; 10 – dūmtraukis [6]

Deginant komunalines atliekas susidaro pavojingi ir nepavojingi pelenai. Pakuroje ant ardyno ir katilo dugne (žr. 2 pav. Nr. 3) susikaupia nepavojingi pelenai – dar vadinami dugno pelenais. Jie sudaro apie 85 proc. visų sudegusių pelenų. Deginimo katilo kamine (žr. 2 pav. Nr. 10) dūmų valymo metu susidaro pavojingos medžiagos – lakieji pelenai, sudarantys 15 proc. visų pelenų. Deginimo metu komunalinių atliekų masė sumažėja 70 proc., o tūris – 90 proc. Atliekos deginamos 850–1 100 °C temperatūroje. Tokių medžiagų kaip aluminis, alavas ir cinkas lydymosi temperatūra žemesnė nei 1 000°C, o virimo temperatūra aukštesnė nei 1 000 °C, todėl jos iš dalies išsilydo ir išlieka šlakuose. Dėl šios priežasties dugno pelenus būtina apdirbti prieš antrinį jų panaudojimą [6].

Po apdorojimo pelenai ir šlakas, atitinkantys „Atliekų deginimo įrenginiuose ir bendro atliekų deginimo įrenginiuose susidariusių pelenų ir šlako tvarkymo reikalavimai“ [7] įsakyme nustatytus reikalavimus, gali būti panaudojami civilinės ir statybų inžinerijos statiniams kaip statybinė medžiaga, statybinės medžiagos papildas arba pakaitalas, vadovaujantis nustatytais reikalavimais arba naudojami sąvartynų rekultivacijai [7].

Civilinėje ir statybos inžinerijoje leidžiama panaudoti pelenus ir šlaką, kai metalų likutis juose sudaro ne daugiau kaip 5 proc. pelenų ar šlako svorio, bendros organinės anglies kiekis pelenuose ir šlake ne didesnis kaip 3 proc. pelenų ir šlako svorio, iškaitinimo nuostolis ne didesnis kaip 6 proc., o išplovimo rodikliai neviršija 1 lentelėje nurodytų verčių. Viršijantys 1 lentelėje nurodytas vertes pelenai ir šlakas turi būti tvarkomi kaip atliekos [7].

**1 lentelė.** Išplovimo ribinės vertės, kai pelenai ir šlakas gali būti naudojami civilinėje ir statybos inžinerijoje [7]

Parametras	Matavimo vienetas	Vertė
Spalva	-	Įvertinama mėginiui apibūdinti
Drumstumas	-	Įvertinama mėginiui apibūdinti
Kvapas	-	Įvertinama mėginiui apibūdinti
pH	vnt.	7-13
Elektros laidumas	μS/cm	6000
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

2013 metų atliktų tyrimų duomenimis, į Klaipėdos regiono nepavojingųjų atliekų sąvartyną pristatytuose pelenuose vidutiniškai randama apie 8 proc. juodųjų metalų, apie 2 proc. aliuminio, iki 1 proc. vario. 2 lentelėje palyginimui pateikti suvestiniai neapdorotų šlakų duomenys iš įvairių literatūros šaltinių [8], [9], [10], [11], [12] ir Klaipėdos regiono nepavojingųjų atliekų sąvartyno. Metalų kiekiai šlakuose skiriasi, tai priklauso nuo tose šalyse atliekų rūšiavimo pobūdžio, žmonių vartojimo įpročių ir panašiai [6].



**2 lentelė.** Metalų kiekis šlakuose [8], [9], [10], [11], [12]

Neapdoroti šlakai							
Metalas	Vienetai	KHKW 1		Vokietija 2	Hamburg 3	Austrija 4	KRATC Lietuva
		Kt. Zurich	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

### 1.5.2. Komunalinių atliekų dugno pelenų panaudojimas

Olandija yra vienintelė šalis, kuri yra reglamentavusi pelenų kaip betono užpildų naudojimo reikalavimus. Remiantis rekomendacijomis, pelenų naudojimas betono gamyboje numatytas darniajame standarte EN 206-1 [13]. Dugno pelenus pagal reikalavimus leidžiama naudoti betonams, kurių gniuždomojo stiprio klasė nuo C12/15 iki C30/37, visose aplinkos agresyvumo klasėse, išskyrus vidutinio ir didelio cheminio agresyvumo klasėse (XA2 ir XA3). Pelenų panaudojimas nearmuotame betone, atsižvelgiant į aplinkos klasę, yra neribojamas [6].

Rekomendacijos pelenų savybėms ir sudėčiai [6]:

- 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.

Komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenai yra panašūs į pucolanus ir gali būti naudojami kaip dalinis cemento pakaitalas betono mišiniuose. Pelenai taip pat gali būti perdirbami į granules ir naudojami kaip lengvi betono užpildai [14].

Kietųjų komunalinių atliekų pelenai aukštoje temperatūroje (daugiau 1 300 °C) gali būti paverčiami į medžiagą, panašią į stiklą. Šis procesas vadinamas stiklinimu. Stiklinimo metu aukšta temperatūra sunaikina organinius teršalus, tokius kaip dioksinais, tuo tarpu garinami sunkieji metalai yra atskiriami nuo produkto. Stiklintų lakiųjų pelenų panaudojimo sritys gali būti tokios: kelio dangos medžiagos; krantinėms; dalinis smėlio pakeitimas betone; monolitiniuose pakrančių apsaugos blokuose; gaminant statybines ir dekoratyvines medžiagas, tokias kaip vandeniui laidūs blokai, keraminės plytelės, grindinio trinkelės bei dekoratyviniai akmenys sodams [15].

Pastaruoju metu komunalinių atliekų pelenus pradėta taikyti pakeičiant smėlį ir (arba) cementą mišiniuose, skirtuose kelių ir sąvartynų pagrindams įrengti. Kita vertus, aplinkos problemos, susijusios su šiuo naudojimu, yra gruntinio ir požeminio vandens užteršimas medžiagomis, išplaunamomis iš įrengto pagrindo [15].

### 1.5.3. Komunalinių atliekų dugno pelenų savybės

Komunalinių atliekų pelenai yra pilkšva arba juoda, amorfinė, panaši į stiklą medžiaga, kurioje yra didelis kiekis toksiškų metalų, tokių kaip švinas ir kadmio bei organinių junginių (tokių kaip dioksina). Komunalinių atliekų pelenų pobūdis ir kokybė labai priklauso nuo atliekų pobūdžio, degimo įrenginio tipo ir oro taršos kontrolės įtaiso pobūdžio.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto mokslininkų atlikti tyrimai parodė, kad pelenai betone gali pakeisti natūraliuosius užpildus – smėlį arba žvyrą. Pagrindiniai komunalinių atliekų pelenų elementai yra silicio dioksidas, kalcis ir geležis. Tačiau dugno pelenų cheminė sudėtis gali daryti įtaką betono elgsenai ir jo ilgaamžiškumui. Aliuminis, šarmai, silicio junginiai ir chloridai reaguodami su rišamųjų medžiagų cheminiais elementais sudaro junginius, kurie gali neigiamai veikti betoną. Norint paruošti dugno pelenus antriniam panaudojimui, kai kuriuos iš jų reikia tinkamai apdirbti. Pelenų sudėtis priklausomai nuo atliekų rūšies ir deginimo technologijos gali skirtis [6].

### 1.5.4. Betono su komunalinių atliekų dugno pelenais savybės

Vilniaus Gedimino technikos universiteto mokslininkai ištyrė apdorotų komunalinių atliekų dugno pelenų panaudojimą betone, dalį smėlio užpildo (0–4mm frakcijos) pakeičiant dugno pelenais (0–8mm frakcijos). 3 lentelėje pateikti rezultatai rodo, kad pakeitus 10 proc. ir 25 proc. smėlio svorio dugno pelenais, mechaninės betono savybės po 7, 28 ir 90 parų beveik nepakito, o pakeitus 50 proc. smėlio svorio, betono gniuždomasis stipris nežymiai sumažėjo, palyginus su etaloniniu betonu. Tačiau šie pakitimai nėra esminiai ir tyrimas atskleidė teigiamas dugno pelenų panaudojimo betone perspektyvas [6].

**3 lentelė.** Bandinių gniuždomieji stipriai [6]

Bandinys	Gniuždomasis stipris po 7 parų, MPa	Gniuždomasis stipris po 28 parų, MPa	Gniuždomasis stipris po 90 parų, MPa
0%	65,8	71,5	76,2
10%	66,1	73,6	75,4
25%	64,1	71,0	72,5
50%	57,4	65,2	68,7

M. Bertolini ištyrė 30 proc. portlandcemenčio svorio pakeitimą apdorotais komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenais ir jų įtaką betono gniuždomajam stiprumui. Šis tyrimas parodė, kad betonai su drėgnai maltais komunalinių atliekų dugno pelenais po 28 kietėjimo dienų pasiekė didesnę gniuždomąją stiprį – 64,5 MPa, palyginti su betonu, pagamintu tik iš portlandcemenčio – 63,5 MPa (žr. 4 lentelę). Betono su sausai maltais dugno pelenais mišinyje katodinės aliuminio korozijos reakcijos metu išsiskiria vandenilis ir mišinyje susidaro dujų burbuliukai. Tai lėmė mažą betono gniuždomąją stiprį – tik 20,1 MPa po 28 kietėjimo dienų. Malant dugno pelenus drėgnuojau

būdu, vandenilio dujos išsiskiria malimo metu, todėl gaminant betono mišinį jame nesusidaro dujų burbuliukai. Taip pat pastebėta, kad betonai su drėgnai maltais dugno pelenais pasižymi mažu chlorido jonų prasiskverbimu [16].

**4 lentelė.** Betono su komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenais savybės [16]

Bandinys	Slankumas, mm	Betono mišinio tankis, kg/m <sup>3</sup>	Suketėjusio betono tankis po 28 parų, kg/m <sup>3</sup>	Betono gniuždomasis stipris po 28 parų, MPa
100% cemento	60	2450	2440	63,5
30% sausai maltų dugno pelenų	110	2400	2260	20,1
30% drėgnai maltų dugno pelenų	0	2500	2530	64,5

C. J. Lynn'as apžvelgė galimybę apdorotus komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenus panaudoti kaip smulkių ir stambių užpildų pakaitalą. Pastebėta, kad palankesni rezultatai buvo gauti naudojant pelenus kaip stambų užpildą, nors palyginus su etaloniniu betonu slankumas ir stiprumas šiek tiek sumažėjo. Duomenys rodo, kad komunalinių atliekų dugno pelenus būtina apdirbti, kad būtų sumažintas stiprumo praradimas ir išvengta neigiamo patvarumo poveikio, kurį sukelia metalo aliuminio išsiplėtimas ir padidėjęs jautrumas chloridams bei sulfatams [17]. Betono susitraukimas džiūstant ir vandens absorbcija padidėjo dėl didesnio vandens įgeriamumo, susijusio su komunalinių atliekų dugno pelenų poringumu, tačiau iš kitos pusės tai lėmė didesnes atsparumo šalčiui savybes [18].

Apžvelgus tyrimus, C. J. Lynn'as nustatė, kad komunalinių atliekų deginimo pelenus naudojant kaip smulkių užpildų pakaitalą, dėl didesnio akytumo ir absorbcijos, betono gniuždymo stipris ir tamprumo modulis sumažėjo. Rezultatai parodė, kad komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenai yra tinkamesni tik kaip dalinis smėlio pakaitalas [17].

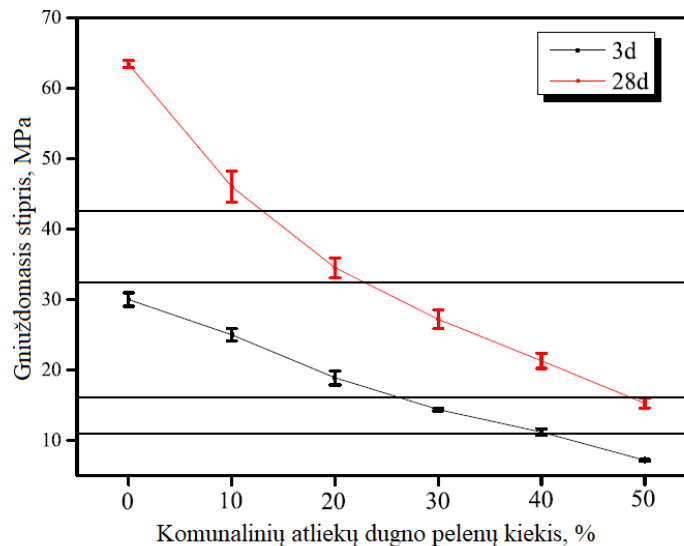
T. Zhangas atliko eksperimentinį tyrimą, siekiant įvertinti betono mišinių, kuriuose 30 proc., 50 proc. ir 70 proc. stambaus užpildo svorio buvo pakeista kietųjų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenais (0–4mm frakcijos), savybes. Rezultatai parodė, kad dugno pelenai turėjo įtakos betono mišinio mechaninėms savybėms: padidėjo mišinio vandens absorbcija, todėl sumažėjo mišinio slankumas ir padidėjo mišinio tankis. Taip pat iširta, kad dugno pelenai sumažino betono gniuždomąjį stiprį ir tamprumo modulį. Betono su neapdirbtais dugno pelenais (30 proc., 50 proc. ir 70 proc.) gniuždomasis stipris buvo mažesnis už etaloninio betono gniuždomąjį stiprį net 69 proc., tačiau naudojant apdirbtus dugno pelenus šis skirtumas sumažėjo (žr. 5 lentelę). Pakeitus iki 50 proc. stambaus užpildo svorio dugno pelenais, betono gniuždomasis stipris atitinka keliamus reikalavimus ir gali būti naudojamas statyboje [19].

**5 lentelė.** Betono su komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenais savybės [19]

Bandinys	V/C	Cementas, kg/m <sup>3</sup>	Vanduo, kg/m <sup>3</sup>	Tankis, kg/m <sup>3</sup>	Dugno pelenai, %	Kietėjimas, min	Gniuždomasis stipris, MPa				
							Po 7 parų	Po 14 parų	Po 14 parų	Po 28 parų	Po 60 parų
R <sub>1</sub>	0,45	320	175	1,850	0	23	28,2	31,1	36	40,7	41,8
A <sub>13</sub>	0,45	320	203,7	2,030	30	21	23,6	28,3	35,6	40,9	42,1
A <sub>15</sub>	0,45	320	223	2,180	50	18	20,7	26,9	35,1	37,3	39,6
A <sub>17</sub>	0,45	320	242	2,230	70	11	18,2	24,3	31	36,5	38,6
R <sub>2</sub>	0,51	320	175	1,910	0	25	24,3	30,4	36,7	40,4	41,8
A <sub>23</sub>	0,51	320	206	2,070	30	22	22	26,9	35,8	40,7	42,3
A <sub>25</sub>	0,51	320	224,8	2,170	50	18	19,7	24,3	32,9	39,6	41,2
A <sub>27</sub>	0,51	320	228,1	2,220	70	12	12,5	20,2	28	34,3	36,7
B <sub>23</sub>	0,51	320	205,7	2,070	30	22	19,4	22,5	27,6	32,8	33,9
B <sub>25</sub>	0,51	320	225	2,171	50	19	17,1	19,8	25,4	32	34,3
B <sub>27</sub>	0,51	320	242	2,218	70	14	10,8	14,5	19	26,1	28,5
R <sub>3</sub>	0,55	320	175	1,950	0	28	16,2	23,3	29,9	35,5	37,1
A <sub>33</sub>	0,55	320	209	2,060	30	22	15,6	20,3	22,7	24,5	25,4
A <sub>35</sub>	0,55	320	231,6	2,130	50	15	14,3	19,1	21,8	24	24,7
A <sub>37</sub>	0,55	320	240	2,210	70	9	12,2	17,4	18,3	18,7	19,1

Taigi T. Zhangas padarė išvadas, kad komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenai pasižymi geresnėmis savybėmis kai yra prieš naudojimą apdirbami, o didžiausias dugno pelenų kiekis betone neturėtų viršyti 50 proc. užpildo masės.

Z. Yangas taip pat ištyrė apdirbtų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų įtaką betonui, pakeičiant 10–50 proc. cemento masės dugno pelenais betono mišinyje. Atlikus bandymą pastebėta, kad betono mechaninė savybė palaipsniui prastėja didėjant komunalinių atliekų dugno pelenų kiekiui (žr. 3 pav.). Betonas su 10 proc. dugno pelenų pasiekė 42,5 klasę, o betonas su 20 proc. dugno pelenų pasiekė 32,5 klasę ir atitiko Kinijos standarto keliamus reikalavimus [20].



**3 pav.** Betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo komunalinių atliekų dugno pelenų kiekio betone [20]

Rezultatai rodo, kad siekiant užtikrinti mechaninį betono stiprumą, pagal Kinijos nacionalinį standartą GB 175-2007, maksimalus apdirbtų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų kiekis neturi viršyti 20 proc. cemento masės. Taigi, apdirbti komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenai gali būti sėkmingai perdirbami ir naudojami kaip papildoma medžiaga statybinėse betono konstrukcijose, tuo pat metu gaunant didelę ekonominę ir aplinkosauginę naudą.

## 1.6. Medienos dugno pelenai

Elektrinėse, kuriose kūrenamas biokuras (medienos granulės, miško mediena), degimo proceso metu susidaro pelenai, kuriuos taip pat galima panaudoti kaip antrinę žaliavą. Medienos pelenai – tai likučiai, susidarantys deginant medieną ir medienos gaminius (skiedras, pjuvenų dulkes, žievę ir kt.). Tai neorganinės ir organinės liekanos, likusios deginant medieną arba nebalintą medienos pluoštą. Deginant kietmedį paprastai gaunama daugiau pelenų nei deginant minkštuosius medžius, o iš žievės ir lapų išgaunama daugiau pelenų nei iš vidinės sumedėjusios medžio dalies. Vidutiniškai deginant medieną susidaro apie 6–10 proc. pelenų.

### 1.6.1. Taršos kontrolė ir panaudojimo galimybės

Medienos dugno pelenai yra naudojami kaip dalinis cemento pakaitalas, turintis bent jau panašius rezultatus kaip akmens anglių lakieji pelenai, tradiciškiausia pucolaninė medžiaga, atsižvelgiant į betono patvarumą ir kokybę. Todėl naudojant medienos dugno pelenus pramoniniame betono gamybos lygmenyje galima išspręsti kai kuriuos klausimus, pavyzdžiui, energijos ir žaliavų suvartojimo sumažėjimą, susijusį su cemento gamyba. Be to, galima naudoti tvaresnį medienos pelenų tvarkymo variantą [21]. Maždaug 70 proc. susidarančių medienos pelenų yra vežama į sąvartyną; 20 proc. panaudojama kaip dirvožemio priedas, o likę 10 proc. naudojami įvairiems tikslams, įskaitant statybines medžiagas, utilizavimą ir taršos kontrolę [22]. Medienos pelenai yra naudojami kaip kalkių arba cemento krosnies dulkių pakaitalas kietinant pavojingas atliekas. Jie taip pat naudojami kvapų ir pavojingų bei nepavojingų atliekų pH kontrolei. Medienos pelenai buvo pridedami prie komposto kaip spalvos ir kvapo kontrolės priemonė. Nustatyta, kad medžio pelenai išfiltruoja kai kuriuos vandens teršalus [23].

## **1.6.2. Betono su medienos dugno pelenais savybės**

Nėra atlikta daug tyrimų, susijusių su medžio pelenų, kaip statybinės medžiagos, panaudojimu, ypač cemento pagrindu pagamintose medžiagose. Dėl didelio anglies kiekio medžio pelenuose, jie naudojami tik mažo ir vidutinio stiprumo betono medžiagoms. Europoje medienos pelenai taip pat buvo naudojami kaip žaliava gaminant portlandcementį. Tyrėjas T. R. Naikas ištyrė, kad medžio pelenai gali būti panaudoti kaip pucolaninių mineralų priedas ir aktyvatorius cemento pagrindu pagamintose medžiagose. Jis taip pat nurodė, kad medžio pelenai gali būti naudojami daugelyje kitų medžiagų, įskaitant mažo ir vidutinio stiprumo betoną, mūrinius gaminius, ritininiu būdu sutankintą betono dangą, kelio dangos medžiagas bei sumaišytus cementus [24].

Medienos pelenų sudėtis gali būti labai įvairi, priklausomai nuo geografinės vietos ir pramonės procesų. Medienos pelenus sudaro silicis, kalcis, magnis, kalis, fosforas, manganas, geležis, cinkas, natriis ir boras. Kadangi pelenuose yra daug įvairių elementų, reikia išmatuoti jų filtraciją – ar betono su dugno pelenais eksploatacijos metu neišsiskirs kenksmingos medžiagos.

Medienos dugno pelenai gali pakeisti dalį cemento betono gamyboje, kaip pucolaninė medžiaga. Jie betonui gali suteikti įvairių savybių, nes šiems pelenams turi įtakos proceso veiksniai, tokie kaip degimo technologija, sąlygos bei vieta, iš kurios jie yra surinkti. Medžio pelenai savo sudėtyje turi daugiau įvairovės bei neorganinių medžiagų kiekio, nei anglies lakieji pelenai [25].

Medienos dugno pelenų panaudojimas daro įtaką betono darbingumui, nes padidėja reikiamo vandens kiekis norint pagaminti tinkamos konsistencijos betono tešlą, priešingai nei gaminant betoną su akmens anglies lakiaisiais pelenais [26]. Konsistencijai įtakos turi ir pelenų dalelių dydis bei pakeisto cemento dalis. Naudojant didelį kalcio kiekį turinčius medienos pelenus padidėja vandens poreikis mišiniui paruošti, norint išlaikyti tokią pačią mišinio konsistenciją. Be to, pradėjus naudoti medienos dugno pelenus, šviežio betono mišinio kietėjimo laikas sulėtėja. Dėl medienos dugno pelenų įdėjimo į betoną atsiranda efektyvumo ir konsistencijos pokyčių, kurie daro įtaką betono reologinėms savybėms.

E. R. Teixeira atliko betono su medienos dugno pelenais mechaninio stiprumo tyrimą, kuris parodė, kad šis parametras priklauso nuo cemento procentinės dalies pakeitimo bei kietėjimo trukmės. Apskritai, medžio pelenų pridėjimas sumažina gniuždymo stiprį, tačiau padeda pasiekti ir teigiamų rezultatų. Kalbant apie ilgaamžiškumą, nors kai kurie tyrėjai pastebėjo chloridų prasiskverbimo padidėjimą, tačiau daugelyje atvejų pastebėtas šio parametro sumažėjimas, kai buvo panaudojami medienos dugno pelenai. Šio parametro sumažėjimas pastebėtas, medienos dugno pelenus maišant su kita pucolanine medžiaga kaip cemento pakaitalu, ir tokiu atveju šių medžiagų sinergetinis poveikis buvo geresnis nei tada, kai naudojami tik medžio pelenai [21].

S. Sahoo tyrimų metu pastebėjo, kad statybiniuose mišiniuose panaudojus nedidelį kiekį medienos dugno pelenų, šie tampa labiau atsparūs karbonizacijai ir šarminei korozijai. Taigi medienos dugno pelenai gali būti sėkmingai perdirbami ir naudojami kaip medžiaga betono gamyboje, tuo pat metu sumažinant CO<sub>2</sub> išsiskyrimą į aplinką ir sprendžiant atliekų tvarkymo problemą [27].

## **1.7. Literatūros analizės apibendrinimas**

Pasaulyje ir ypač Lietuvoje vis labiau plėtojant ekologiškai inovatyvius sprendimus, įvairiose pramonės šakose stengiamasi pritaikyti atliekų kaip antrinės žaliavos panaudojimo modelius.

Pastarųjų modelių pritaikymas išspręstų tokias ekologines problemas kaip natūralių išteklių mažėjimas, šiltnamio efekto didėjimas, atliekų tvarkymo problemas bei energijos tausojimas pasauliniu mastu. Vienas iš potencialiausių tokio modelio pritaikymo pavyzdžių – perdirbtų atliekų panaudojimas gaminant cementinius statybos produktus. Nors ši kryptis praktikoje dar tik pradeda vystyti, mokslinėje literatūroje vis dažniau ieškoma ir tiriama, kaip pritaikyti kuo įvairesnių atliekų panaudojimą cemento produktų gamyboje. Anot literatūros šaltinių, šiuo metu labiausiai verti dėmesio yra įvairūs pramoniniai atliekų bei biokuro deginimo produktai (pelenai) bei įvairūs šlakai, susidarantys kaip atlieka metalo industrijoje. Pritaikant šioje srityje dugno pelenus, įmanoma betono mišiniuose ne tik jais pakeisti dalį cemento, bet ir panaudoti juos kaip smulkiuosius arba stambiuosius betono užpildus, taip mažinant į aplinką patenkančio anglies dioksido kiekį, taupant energiją bei natūraliuosius gamtos išteklius.

Atlikus mokslinės literatūros analizę, galima pastebėti tam tikrą teigiamą šių priedų poveikį betono mechaninėms bei cheminėms savybėms – betono su komunalinių atliekų dugno pelenais gniuždomasis stipris kinta minimaliai, padidėja betono atsparumas šalčiui, taip pat padidėja betono su medienos dugno pelenais mišinių atsparumas karbonizacijos sukeliama korozijai.

Deja, bet mokslinėje literatūroje matomas informacijos nepakankamumas apie tyrimus, kurių metu būtų ištirta dugno pelenų įtaka betono poringumui, vandens įsiskverbimo gyliui bei šalčio ciklų atsparumui. Taip pat matomi prieštaringi duomenys tiriant chloridų įsiskverbimo gylį. Visa tai tik pabrėžia šio baigiamojo projekto tyrimo apimties aktualumą bei reikšmingumą.

## 2. Tyrimų metodai

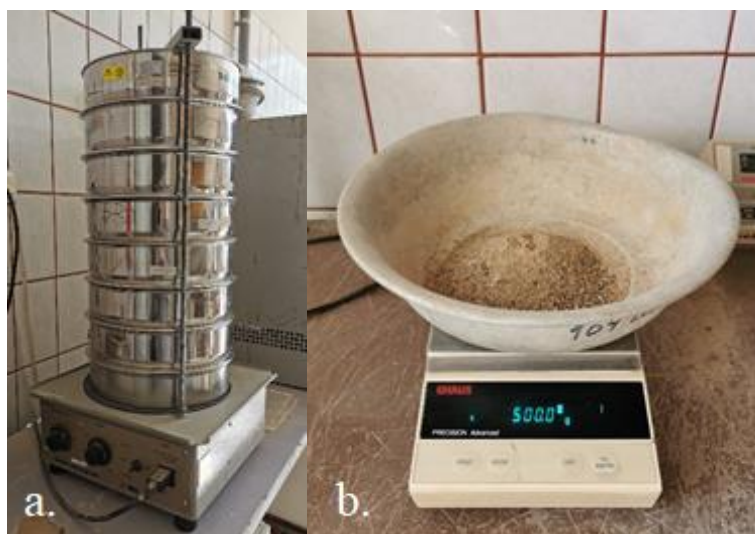
### 2.1. Užpildų granulimetrinės sudėties nustatymas

Granulimetrinė sudėtis nustatoma pagal LST EN 933-1:2012 „Užpildų geometrinių savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas“ [28] standartą. Tyrimo metu nustatyta stambaus užpildo – dolomito skaldos bei smulkių užpildų – smėlio ir dugno pelenų granulimetrinė sudėtis.

#### Tyrimui naudojama įranga:

- sietų kratytuvas;
- sietai, sietų dugnai ir dangčiai;
- svarstyklės, kuriomis galima pasverti bandinio masę  $\pm 0,1$  proc. tikslumu;
- indai;
- šepetėliai.

Smulkią užpildo granulimetrinei sudėčiai nustatyti buvo naudojami standartiniai 0,063, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2 ir 4 mm sietai. Stambiojo užpildo granulimetrinei sudėčiai nustatyti buvo naudojami standartiniai 1, 2, 4, 8, 11,2, 16, 22,4 ir 31,5 mm sietai. Sietai parenkami pagal LST EN 12620:2003+ A1:2008 „Betono užpildai“ [29] standartą.



4 pav. Granulimetrinės sudėties nustatymo įranga: a) sietų kratytuvas ir sietai, b) svarstyklės

#### Bandymo metodika

Reikalingas tiriamos medžiagos kiekis 300–500 g. Sietai sujungiami vienas su kitu eilės tvarka, nuo rečiausio iki tankiausio, uždedamas dugnas, supilama tiriamą medžiagą ir uždedamas dangtis. Sietų rinkinys tvirtinamas prie kratytuvo ir viskas vibruojama. Sietai po vieną nuimami, pradedant nuo viršutinio, rečiausio sieto. Sietą pridengus dangčiu, šiek tiek sijojama rankomis, o nubyrėjusi medžiaga pilama į kitą iš eilės einantį sietą. Siete likusi medžiaga sveriamą ir rezultatai užrašomi. Taip sveriamos medžiagos liekanos nuo kiekvieno sieto iš eilės.



## 2.2. Betono mišinio slankumo nustatymas

Betono mišinio slankumas nustatomas pagal LST EN 12350-2:2009 „Šviežio betono bandymas. 2 dalis. Slankumo bandymas“ [30] standartą. Pagal slankumą mišiniai skirstomi į klases (žr. 6 lentelę):

6 lentelė. Betono mišinio slankumo klasės [30]

Mišinys	Klasė	Kūgio nuoslūgis, mm
Plastiškasis	S1	10...40
Slankusis	S2	50...90
Sklidusis	S3	100...150
Takusis	S4	160...210
	S5	≥ 220
Išmatuotas nuoslūgis apvalinamas 10 mm tikslumu		

### Bandymui naudojama įranga:

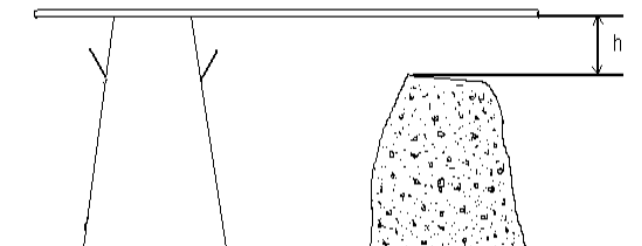
- metalinė forma bandiniui suformuoti – tuščiaviduris nupjautas kūgis, kurio vidiniai matmenys: apačios skersmuo –  $(200 \pm 2)$  mm; viršaus skersmuo –  $(100 \pm 2)$  mm; aukštis –  $(300 \pm 2)$  mm;
- plieninis, tiesus, apskrito skerspjūvio ( $d=16 \pm 1$  mm), suapvalintais galais tankinimo strypas;
- piltuvas;
- liniuotė;
- pagrindo plokštė;
- mentelė;
- drėgnas audinys ar kempinė.



5 pav. Betono mišinio slankumo nustatymo įranga: kūgio forma, pagrindo plokštė, tankinimo strypas, piltuvas, kempinė

## Bandymo metodika

Kūgio forma, piltuvėlis ir pagrindo plokštė sudrėkinami, forma pastatoma ant pagrindo ir prispaudžiama kojomis arba rankomis. Forma pildoma trimis sluoksniais, vieno sluoksnio storis apytiksliai turi būti lygus vienam trečdaliui formos aukščio. Kiekvienas sluoksnis tankinamas sutankinimo strypu, 25 dūriais, tolygiai paskirstant po visą sluoksnio plotą. Apatinis sluoksnis tankinamas šiek tiek pakreiptais dūriais. Antras ir trečias sluoksniai, tankinami taip pat 25 dūriais, tolygiai, smeigiant tik iki žemiau esančio sutankinto sluoksnio. Viršutinis betono sluoksnis sulyginamas su formos kraštu. Nuo bandinio forma nutraukiama atsargiai ją keliant vertikalia kryptimi [30].



6 pav. Betono mišinio slankumo matavimas

Betono mišinio slankumas nustatomas liniuote matuojant aukščių skirtumą tarp kūgio formos viršaus ir nuslinkusio betono mišinio aukščiausio taško. Betono mišinio slankumas užrašomas 10 mm tikslumu [30].

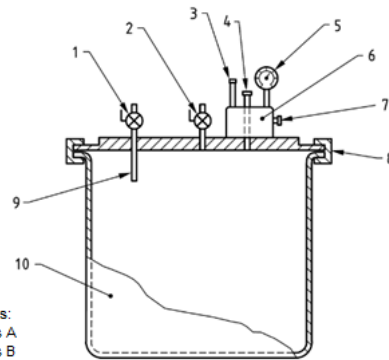
### 2.3. Oro kiekio betono mišinyje nustatymas

Oro kiekis betono mišinyje nustatomas pagal LST EN 12350-7:2009 „Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai“ [31] standartą.

Bandymui naudojama įranga:

- slėgio matavimo prietaisas (žr. 7 pav. Nr. 10) – cilindro formos, su briaunomis, plieninis arba iš kitokio metalo, nereaguojančio su cementine tešla, glotnaus paviršiaus, nepraleidžiantis vandens, tūris ne mažesnis 5 l, pritaikytas 0,2 MPa darbiniam slėgiui, o skersmens ir aukščio santykis ne mažesnis nei 0,75 bet ne didesnis už 1,25;
- prietaiso dangtis – su briaunomis, plieninis arba iš kitokio metalo, nereaguojančio su cementine tešla, glotnaus paviršiaus, nepraleidžiantis vandens, su prispaudimo mechanizmais, užtikrinančiais sandarumą;
- prie indo pritvirtintas manometras (žr. 7 pav. Nr. 5) – kalibruotas, rodantis oro kiekį nuo 0 proc. iki mažiausiai 8 proc., geriausia iki 10 proc. Skalės gradacija skirtingoms skalės zonoms turi būti 0,1 proc. zonai (0–3) proc., 0,2 zonai (3–6) proc. ir 0,5 proc. zonai (6–10) proc.;
- dangtyje įmontuotos oro pompos (žr. 7 pav. Nr. 3);
- vibravimo staliukas, kurio vibravimo dažnis  $\approx 40$  Hz (2 400 virpesių per minutę) arba giluminis vibratorius, kurio dažnis  $\approx 120$  Hz (7 200 virpesių per minutę);
- plieninis, tiesus, apskrito skerspjūvio ( $d=16 \pm 1$  mm), apie 600 mm ilgio, suapvalintais galais tankinimo strypas;

- plieninis, tiesus, kvadratinio skerspjūvio (apie 25 mm x 25 mm), apie 380 mm ilgio, tankinimo strypas;
- mentelė;
- guminė kriaušė, tinkama įšvirkšti vandenį į indą per ventili A arba B;
- medinis minkšto paviršiaus plaktukas, kurio masė 250 g.



- Žymėjimas:  
 1. Ventilis A  
 2. Ventilis B  
 3. Pompa  
 4. Pagrindinis oro ventilis  
 5. Manometras  
 6. Oro kamera  
 7. Oro išleidimo ventilis  
 8. Prispaudimo mechanizmas  
 9. Prailgintas kalibravimo vamzdelis  
 10. Indas

7 pav. Slėgio matavimo prietaisas [31]

### Bandymo metodika

Indo vidus sudrėkinamas, betonas dedamas mentele, trimis, apytiksliai vienodo aukščio sluoksniais, pašalinant kuo daugiau ertmėse esančio oro. Indas turi būti užpildomas iki viršaus be didelio medžiagos pertekliaus, jei reikia, nedidelis medžiagos kiekis gali būti pridodamas ir sutankinamas, tačiau be pertekliaus pašalinimo. Betono mišinys tankinamas tol kol mišinio paviršiuje nebeatsiranda dideli oro burbulai, paviršius tampa lygus ir blizgus. Kiekvienas sluoksnis tankinamas vienu iš pasirinktų būdų [31]:

- rankiniu būdu su sutankinimo strypu, 25 dūriais, tolygiai paskirstant po visą sluoksnio plotą. Tankinant apatinį sluoksnį, strypas neturi stipriai atsitrenkti į indo dugną, o tankinant antrąjį ir trečiąjį sluoksnius strypas neturi gylyai įsmigti į žemiau esančius sluoksnius;
- mechaniniu būdu – ant vibravimo staliuko stipriai pritvirtinus arba stipriai laikant indą, vibruoti tol kol mišinys visiškai sutankėja, vengiant pervibravimo;
- mechaniniu būdu – sutankinama su giluminiu vibratoriumi, laikant vertikaliai, neliečiant indo sienelių, kad nesugadinti matavimo indo. Vibruoti tol kol mišinys visiškai sutankėja, vengiant pervibravimo.

Tankinama taip, kad betono mišinys neišsisluoksniuotų ir neatsiskirtų vanduo. Po kiekvieno sluoksnio sutankinimo susidariusios tuštumos pašalinamos beldžiant mediniu plaktuku į matavimo indo šonus.

Indo ir dangčio kraštai nuvalomi, dangtis sandariai uždaromas ir prispaudžiamas su prispaudimo mechanizmais. Pagrindinis oro ventilis uždaromas, A ir B ventiliai atidaromi. Gumine kriaušė vanduo pilamas į ventili A arba B, kol vanduo pradeda tekėti pro kitą ventili. Abu ventiliai uždaromi. Pumpuojamas oras į oro kamerą, kol manometro rodyklė pasiekia pradinio slėgio žymę.

Po kelių sekundžių suspaustas oras atvėsta iki aplinkos temperatūros, išleidžiant arba pumpuojant orą, manometro rodyklė nustatoma ant pradinio slėgio žymės. Atidaromas pagrindinis oro ventilis, nuskaityta manometro vertė, rodanti oro kiekį  $A_1$ . Atidaromi A ir B ventiliai, kad sumažėtų slėgis inde, tada nuimamas dangtis [31].

Oro kiekis betono mišinyje, esančiame inde, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$A_c = A_1 - G \quad (2.3.1)$$

čia:  $A_c$  – oro kiekis bandytame ėminyje (oro kiekis užrašomas suapvalintas 0,1 proc. tikslumu);

$A_1$  – tariamas oro kiekis bandytame ėminyje;

$G$  – užpildų pataisos koeficientas,  $G=0$ .

#### 2.4. Vandenyje netirpių medžiagų kiekio betone ir dugno pelenuose nustatymas

Vandenyje netirpių medžiagų kiekis betone ir komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenuose nustatomas pagal LST EN 12457-2:2003 „Atliekų apibūdinimas. Išplovimas. Iš grūdėtų atliekų išplautų medžiagų ir dumblo sudėties atitikties tyrimas. 2 dalis. Vienpakopis partijos (tyrinio) tyrimas, kai skysčio ir kietosios medžiagos santykis 10 l/kg ir dalelių dydis mažesnis kaip 4 mm (dydį mažinant arba nemažinant)“ [32] standartą.

##### Bandymui naudojama įranga:

- smulkintuvas;
- sietas (akies dydis - 4 mm);
- svarstyklės, kuriomis galima pasverti bandinio masę  $\pm 0,01$  g tikslumu;
- vibravimo prietaisas;
- magnetai;
- indeliai mėginiams;
- stiklinė menzūra ir piltuvėlis;
- popieriniai filtrai;
- distiliuotas vanduo, kurio  $\text{pH} < 7,5$ , o elektros laidumas  $< 0,5$  mS/m.



8 pav. Bandomos medžiagos filtravimas

## Bandymo metodika

Sukietėję betono bandiniai susmulkinami smulkintuvu ir gauta medžiaga sijojama per 4 mm sietą. Į indelį dedama 10 g sauso mėginio masės, įpilama 100 ml distiliuoto vandens (santykiu 10 l/kg) ir įdedamas magnetas. Bandinių indeliai sandariai uždaromi, statomi ant vibravimo prietaiso ir maišomi  $24 \pm 0,5$  h. Baigusi maišyti mėginiai paliekamas nusistovėti  $15 \pm 5$  min. Pilant distiliuotą vandenį medžiaga filtruojama per membraninį  $0,45\mu\text{m}$  retumo filtrą (žr. 8 pav.).

Sunkiųjų metalų koncentracija vandenyje nustatoma laboratorijoje pagal LST EN ISO 11885:2009 „Vandens kokybė. Atrinktų elementų nustatymas optinės emisinės spektrometrijos metodu, taikant induktyviai susietą plazmą (ICP-OES)“ [33] standartą.

### 2.5. Gniuždymo stiprio nustatymas

Betono gniuždymo stipris nustatomas pagal LST EN 12390-3:2009 „Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris“ [34] standartą.

#### Bandymui naudojama įranga:

- hidraulinis presas Controls “PILOT4” (žr. 9 pav.), atitinkantis EN 12390-4 standartą [35].



9 pav. Hidraulinis presas Controls “PILOT4”

Kubo formos (100 x 100 x 100 mm) bandiniai turi atitikti EN 12350-1 [36], EN 12390-1 [37], EN 12390-2 [38] arba EN 12504-1 [39] reikalavimus.

## Bandymo metodika

Nuo bandinio pašalinama perteklinė drėgmė, laisvi grūduliai ir pašalinės medžiagos. Taip pat švariai nuvalomas bandymo mašinos atraminiai paviršiai. Kubiniai bandiniai padedami taip, kad apkrova veiktų statmenai formavimo kryptčiai.

Parentamas pastovus apkrovos didinimo greitis -  $0,2-1,0 \text{ MPa/s}$  ( $\text{N/mm}^2\cdot\text{s}$ ).

Bandinys gniuždomas hidrauliniu presu iki suirimo, fiksuojama gniuždomoji jėga  $F$  (kN).

Stipris gniuždant  $f_c$  yra apskaičiuojamas pagal lygtį:

$$f_c = \beta \cdot \frac{F}{A}, N/mm^2 \quad (2.5.1)$$

čia:  $F$ - ardančioji gniuždymo jėga (N);

$A$  - bandinio skerspjūvio plotas, kurį veikė gniuždymo jėga ( $mm^2$ );

$\beta$  - koeficientas, įvertinantis bandinių dydį, kai bandinio kubo kraštinė 100mm,  $\beta = 0,95$ .

## 2.6. Chlorido jonų prasiskverbimo gylio nustatymas

Chlorido jonų prasiskverbimo gylis betone nustatomas pagal NT BUILD 492 [40] metodiką.

**Bandymui naudojama įranga:**

- elektros srovės šaltinis Voolcraft VLP-2043 (žr. 10 pav.);
- katodinis tirpalas nacl (900 g distiliuoto vandens ir 100 g NaCl);
- anodinis tirpalas (12 g NaOH vienam litrui distiliuoto vandens);
- sidabro nitratas ( $AgNO_3$ );
- guminis cilindro formos įdėklas;
- nerūdijančio plieno anodas ir katodas;
- plastikinis indas;
- atrama bandiniui.



**10 pav.** Chlorido jonų prasiskverbimo gylio bandymas: a) Elektros srovės šaltinis Voolcraft VLP-2043, b) sujungti bandiniai

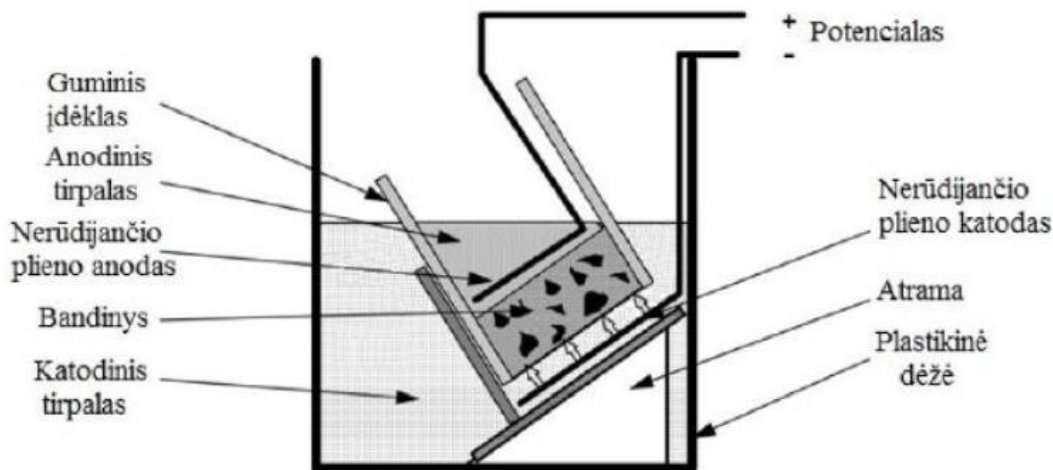
### Bandymo metodika

Iš suformuotų 100 mm skersmens cilindro formos bandinių išpjaunami nauji 50 mm aukščio bandiniai ir laikomi vandenyje iki bandymo pradžios. Remiantis L. Tang'o ir L. O. Nilsson'o



metodu, bandymo metu elektros srovės potencialas skatina chloridų difuziją, kurios dėka galima nustatyti chlorido jonų migraciją betono kapiliarais [41].

Į plastikinį indą supilamas katodinis tirpalas. Bandinys sandariai įtvirtinamas į guminio įdėklo apačią ir užpilamas anodiniu tirpalu. Nerūdijančio plieno katodas tvirtinamas prie bandinio apačios, o nerūdijančio plieno anodas prie bandinio viršaus. Bandinys dedamas ant atramos ir šiek tiek pakreipus statomas į plastikinį indą su katodiniu tirpalu (kaip pavaizduota bandinio sujungimo schemoje 11 pav.). Prie katodu prijungiami teigiamas ir neigiamas potencialai.



11 pav. Chloridų penetracijos hidrotechniniame betone bandymo schema [40]

Elektros prietaise Voolcraft nustatoma 30 V įtampa ir gaunamas 80–90 mA srovės stiprumas. Taip bandiniai laikomi 24 h. Po 24 h išjungus prietaisą bandiniai išimami ir hidraulinio presu perskeliama pusiau, išilgai chloridų judėjimų krypties.

Perskelti bandiniai apipurškiami sidabro nitratu, kuris reaguoja su chloru ir išryškina balkšvus chloridų jonų pėdsakus. Išmatuojamas chloridų įgėrio gylis betone.

Chlorido jonų koeficientas apskaičiuojama pagal formulę:

$$D_{nssm} = \frac{0,0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot \left( x_d - 0,0238 \cdot \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}} \right), 10^{-12} m/s^2 \quad (2.6.1)$$

čia:  $U$  – įtampa, V;

$T$  – anodinio tirpalo, pradinės ir galutinės temperatūros vidurkis, °C;

$L$  – bandinio storis, mm;

$x_d$  – chloridų įsiskverbimo gylis betone, mm;

$t$  – bandymo trukmė, h.

## 2.7. Vandens įgeriamumo nustatymas

Betono vandens įgeriamumas nustatomas pagal LST 1428.18:1997 „Betonas. Bandymo metodai. Vandens įgeriamumo nustatymas“ [42] standartą ir vandens įgėrio kinetikos tyrimų metodiką GOST 12730.4-78 [43].

### Bandymui naudojama įranga:

- džiovinimo kamera;
- svarstyklės, kuriomis galima pasverti bandinio masę  $\pm 0,1$  proc. tikslumu;
- vandens vonelė.



12 pav. Bandiniai pamerkti į vandenį

### Bandymo metodika

Kubo formos (100 x 100 x 100 mm) bandiniai suskaldomi į 4 dalis. Džiovinimo kameroje bandiniai džiovinami 105 °C temperatūroje, iki pastovios masės. Tuomet bandiniai išimami iš kameros, atvėsunami iki kambario temperatūros ir pasveriami. Bandiniai panardinami į vandens vonelę ir mirkomi, ištraukiant ir sveriant bandinius po 15 minučių, 60 minučių, 24 valandų ir 48 valandų mirkimo. Po 48 valandų bandiniai sveriami vandenyje.

Vandens įgėris pagal masę apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_p = \frac{m_{48} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.7.1)$$

čia:  $m_{48}$  – bandinio masė po 48 val. mirkymo, g;

$m_s$  – sauso bandinio masė, g;

Tankis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$T = \frac{m_s}{m_{48} - m_v} \cdot 1000, \text{kg/m}^3 \quad (2.7.2)$$



čia:  $m_{48}$  – bandinio masė po 48 val. mirkymo, g;

$m_s$  – sauso bandinio masė, g;

$m_v$  – bandinio masė vandenyje po 48 val. mirkymo, g.

Vandens įgėris pagal tūrį apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_{p(t)} = \frac{W_p \cdot T}{1000}, \% \quad (2.7.3)$$

čia:  $W_p$  - vandens įgėris pagal masę;

$T$  – tankis,  $\text{kg/m}^3$ .

Vandens įgėris po 15 min apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_1 = \frac{m_{15} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.7.4)$$

čia:  $m_{15}$  – bandinio masė po 15 min mirkymo, g;

$m_s$  – sauso bandinio masė, g;

Vandens įgėris po 60 min apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_2 = \frac{m_{60} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.7.5)$$

čia:  $m_{60}$  – bandinio masė po 60 min mirkymo, g;

$m_s$  – sauso bandinio masė, g;

Vandens įgėris po 24 val. apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_3 = \frac{m_{24} - m_s}{m_s} \cdot 100, \% \quad (2.7.6)$$

čia:  $m_{24}$  - bandinio masė po 24 val. mirkymo, g;

$m_s$  – sauso bandinio masė, g;

Santykiai:

$$W_{1(s)} = \frac{W_1}{W_p}, \% \quad (2.7.7)$$

čia:  $W_1$  - vandens įgėris po 15 min;

$W_p$  - vandens įgėris pagal masę.

$$W_{2(s)} = \frac{W_2}{W_p}, \% \quad (2.7.8)$$

čia:  $W_2$  - vandens įgėris po 60 min;

$W_p$  - vandens įgėris pagal masę.

Vidutinių porų dydžių rodiklis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \left(\frac{1}{\alpha}\right) \quad (2.7.9)$$

Porų pasiskirstymo pagal dydį rodiklis –  $\alpha$  ir pagalbinis rodiklis –  $\lambda_1$  parenkami iš GOST 12730.4-78 [43] monogramos.

Bendras betono poringumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$P_p = \left(1 - \left(\frac{T}{2690}\right)\right) \cdot 100, \% \quad (2.7.10)$$

čia:  $T$  – tankis,  $\text{kg/m}^3$ .

Atviras betono poringumas:

$$P_a = W_{p(t)}, \% \quad (2.7.11)$$

čia:  $W_{p(t)}$  – vandens įgėris pagal tūrį, %.

Uždaras betono poringumas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$P_u = P_p - P_a, \% \quad (2.7.12)$$

čia:  $P_p$  – bendras betono poringumas, %;

$P_a$  – atviras betono poringumas, %.

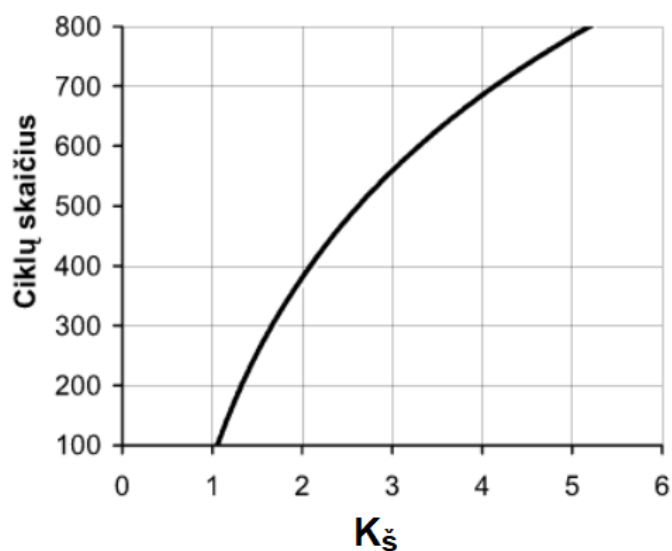
Betono atsparumas šalčiui gali būti prognozuojamas pagal GOST 12730.4-78 [43] metodikoje nurodyta atsparumo šalčiui kriterijų  $K_{\text{š}}$ , kuris yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$K_{\text{š}} = \frac{P_p}{0,09 \cdot P_a}, \% \quad (2.7.13)$$

čia:  $P_u$  – uždaras betono poringumas, %;

$P_a$  – atviras betono poringumas, %.

Prognozuojamas betono atsparumas šalčiui yra nustatomas iš Konglomerato atsparumo šalčiui priklausomybės nuo atsparumo šalčiui kriterijaus  $K_{\text{š}}$  (žr. 13 pav.) [44].



13 pav. Konglomerato atsparumo šalčiui priklausomybė nuo atsparumo šalčiui kriterijaus  $K_s$  [44]

## 2.8. Vandens įsiskverbimo gylio nustatymas

Vandens įsiskverbimo gylis veikiant slėgiui nustatomas pagal LST EN 12390-8:2019 „Sukietėjusio betono bandymai. 8 dalis. Vandens įsiskverbimo gylis veikiant slėgiui“ [45] standartą. Tyrime naudojami 150 mm aukščio bandiniai, po 28 parų kietėjimo.

### Tyrimui naudojama įranga:

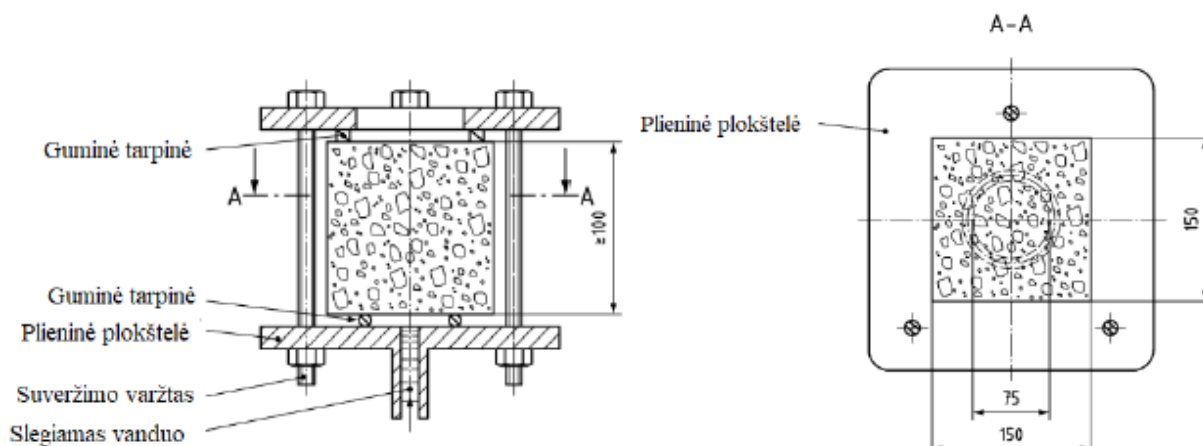
- bandymų stendas (žr. 14 pav. a);
- įranga slėgiui sudaryti (žr. 14 pav. b);
- hidraulinis presas;
- metalinis šepetys;
- liniuotė.



14 pav. Vandens įsiskverbimo į betoną gylio nustatymo bandymų stendas (a) su slėgio įranga (b)

## Bandymo metodika

Pirmiausia bandinio paviršius pašiaušiamas metaliniu šepėčiu. Po to bandinys įstatomas į bandymo stendą (kaip pavaizduota 15 pav.) ir veikiamas vandens  $500 \pm 50$  kPa slėgiu iš apačios  $72 \pm 2$  valandas. Bandymo metu stebima, ar dėl sukkelto spaudimo nesimato vandens ant bandinio paviršiaus. Jei pastebimas vandens tekėjimas, rezultatai laikomi galiojančiais ir yra fiksuojami. Po 72 valandų bandinys išimamas iš bandymo stendo, nuo paviršiaus nušluostomas vandens perteklius ir bandinys hidraulinio presu perskeliamas pusiau išilgai vandens skverbimosi kryptimi. Bandinio paviršiui šiek tiek pradžiuvus ir išryškėjus vandens įsiskverbimo sričiai, liniuote išmatuojamas maksimalus vandens prasiskverbimo gylis bandinyje.



15 pav. Vandens įsiskverbimo į betoną bandymo prietaisų schema [45]

## 2.9. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu metodu

Betono atsparumas šalčiui nustatomas tūriniu metodu pagal LST 1428-17:2016 „Betonas. Bandymo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu“ [46] standartą.

### Tyrimui naudojama įranga:

- šaldymo kamera KHC-2 N10032, kurioje palaikoma  $-18 \pm 2$  °C temperatūra ir vyksta oro konvekcija;
- vonia su vandeniu;
- hidraulinis presas;
- svarstyklės, kuriomis galima pasverti bandinio masę  $\pm 0,1$  proc. tikslumu;
- slankmatis.

Tyrimui naudojami 100 x 100 x 100 mm kubo formos bandiniai, po 28 parų kietėjimo, pagaminti pagal LST EN 12390-2 [47] standartą.

## Bandymo metodika

Atliekamas bandymas: bandiniai išmatuojami, pasveriami, pamerkami į vonią su vandeniu ir laikomi šaldymo kameroje,  $-18 \pm 2$  °C temperatūroje numatytą užšaldymo ir atšildymo ciklų skaičių. Bandiniai ištraukiami po numatytų ciklų skaičiaus, išmatuojami, pasveriami ir gniuždomi hidraulinio presu. Jeigu bandinių serijos vidutinis gniuždomasis stipris yra toks pat arba ne mažesnis 5 proc. nei kontrolinių bandinių gniuždomasis stipris, laikoma, kad betonas išlaikė betono

atsparumo šalčiui bandymą. Jei gniuždymasis stipris mažesnis, bandymas baigiamas, o betonas laikomas neatitinkančiu reikalingo atsparumo šalčiui markės [46].

### 3. Tyrimų rezultatai ir jų apibendrinimas

Betono mišinys susideda iš cementinės (rišamosios) medžiagos, vandens, superplastiklio, smulkaus bei stambaus užpildų. Šiame tiriamajame darbe dalis smulkaus užpildo (smėlio) yra pakeičiama nevalytais komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenais. Dugno pelenai yra akyti, pilkšvos spalvos medžiaga. Dugno pelenai tiriamajame darbe buvo naudoti neapdirbti ir susmulkinti iki 0–4 mm frakcijos. Buvo gaminami keturių rūšių betono mišiniai: su 0 proc., 10 proc., 20 proc. ir 30 proc. dugno pelenų.

Betono mišinį sudaro:

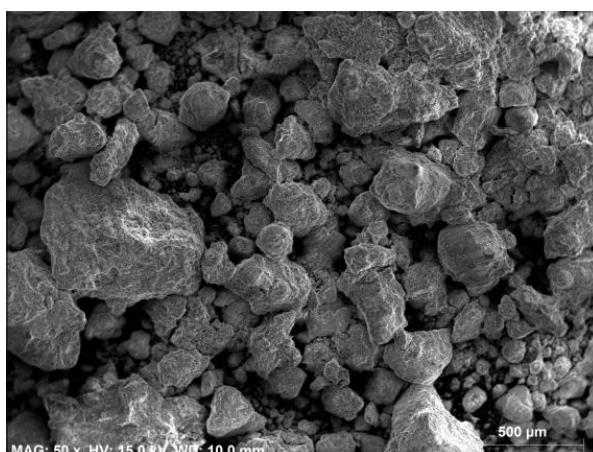
- cementas (CEM I 42,5 R) 350 kg/m<sup>3</sup>;
- stambus užpildas – dolomito skalda (fr. 4–16 mm) 1000 kg/m<sup>3</sup>;
- smulkus užpildas – smėlis (fr. 0–4 mm) 850 kg/m<sup>3</sup>;
- smulkus užpildas – nevalytų komunalinių atliekų dugno pelenai (fr. 0–4 mm) (10 proc., 20 proc. ir 30 proc. smėlio svorio);
- vanduo 165 kg/m<sup>3</sup>;
- superplastiklis 0,8 proc. 2,8 kg/m<sup>3</sup>.

Nevalytus komunalinių atliekų dugno pelenus sudaro mineralai, stiklas, metalai, keramika, ir organinės liekanos. Bandymuose naudotų dugno pelenų cheminė sudėtis buvo iširta laboratorijoje naudojant skenuojantį elektroninį mikroskopą (SEM). Analizuojant rentgeno spindulių energijos dispersijos spektrus (EDS) buvo nustatyti dugno pelenų cheminiai elementai. Rezultatai pateikiami 7 lentelėje:

**7 lentelė.** Nevalytų komunalinių atliekų dugno pelenų cheminė sudėtis

Cheminis elementas	C	O <sub>2</sub>	Ca	S	Si	Al	Mg	Na	Cl	Fe	Ti	P	K	Zn
Koncentracija, %	3,70	45,07	25,60	2,57	4,49	2,08	1,36	0,46	0,36	4,27	0,80	0,21	0,28	5,08

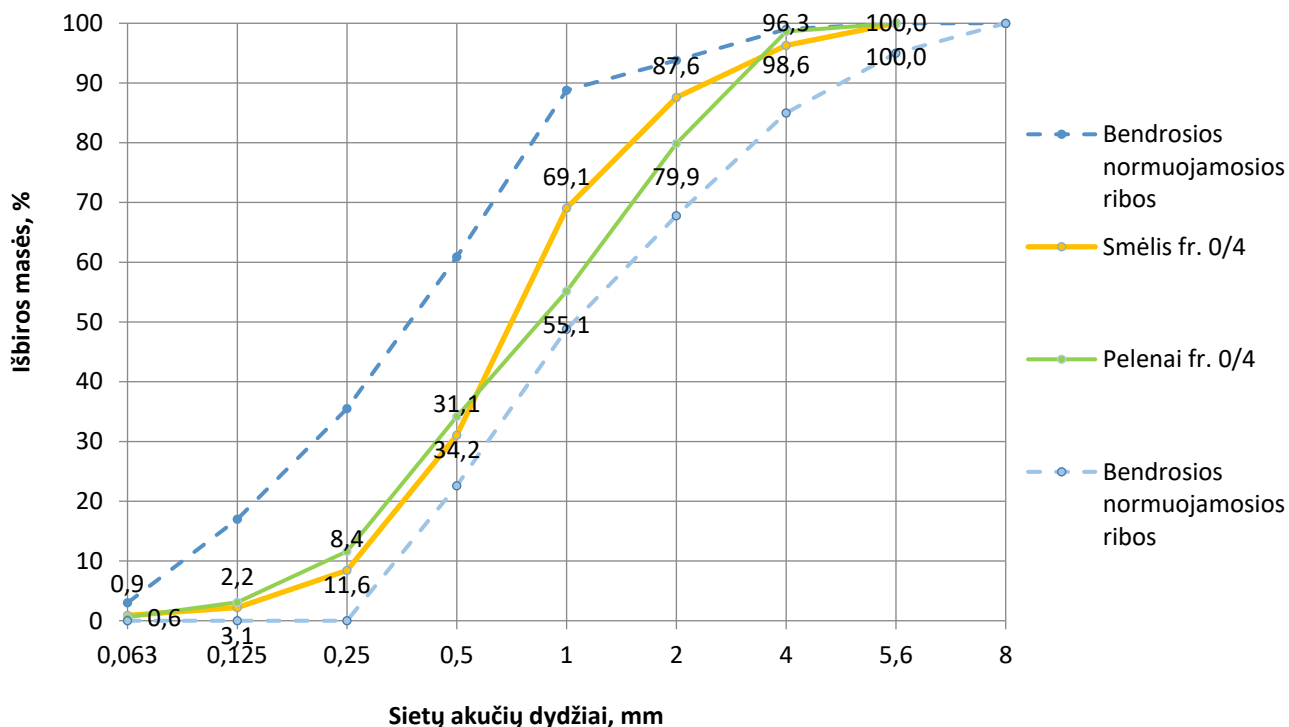
Nevalytuose komunalinių atliekų dugno pelenuose buvo aptikta aliuminio (Al) ir sunkiųjų metalų, tokių kaip geležis (Fe), cinkas (Zn) ir titanas (Ti). Metalų ir šarmų kiekis dugno pelenuose neviršija darniojo standarto EN 206-1 [13] rekomendacijose nurodytų ribinių verčių, todėl dugno pelenai gali būti naudojami kaip smulkus betono užpildas.



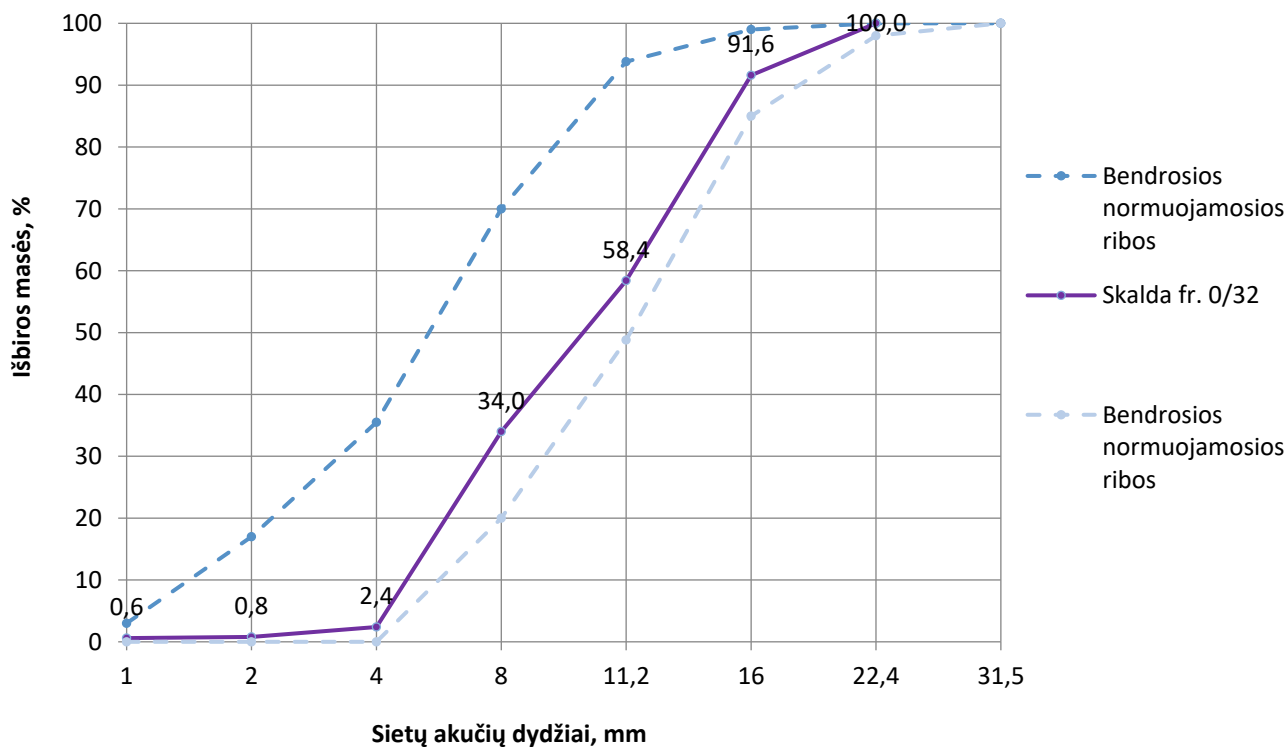
**16 pav.** Bandymuose naudotų dugno pelenų mikrostruktūra

### 3.1. Užpildų granulimetrinės sudėties nustatymas

Granulimetrinės sudėties nustatymo rezultatai pateikiami 17–18 pav. ir 1 priedo 14–16 lentelėse:



17 pav. Smėlio fr. 0/4 ir dugno pelenų fr. 0/4 granulimetrinių sudėčių palyginimo grafikas



18 pav. Skaldos fr. 0/32 granulimetrinės sudėties grafikas

Betono užpildų granulimetrinė sudėtis atitinka LST EN 12620:2003+A1:2008 „Betono užpildai“ [29] standarto reikalavimus ir telpa į bendrąsias normuojamąsias ribas.

### 3.2. Betono mišinio slankumo nustatymas

Atlikus betono mišinio slankumo bandymą, gauti rezultatai pateikiami 8 lentelėje:

**8 lentelė.** Betono mišinio slankumo nustatymo rezultatai

Mišinys	Kūgio nuoslūgis, mm	Klasė
0%	150	S3
10%	110	S3
20%	50	S2
30%	18	S1

Iš rezultatų matyti, kad nevalytų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenai sumažino betono mišinio slankumą: kuo didesnis dugno pelenų kiekis betone, tuo mažesnis betono mišinio nuoslūgis. Taip yra dėl to, kad dugno pelenų dalelės yra akytos ir grubaus paviršiaus, todėl absorbuoja daugiau vandens palyginus su smėlio dalelėmis. Taip pat betono mišinio slankumui įtaką daro netaisyklinga dugno pelenų dalelių forma, kuri padidina trintį tarp dalelių, priešingai nei apvali smėlio dalelių forma.

Betono mišinys be nevalytų komunalinių atliekų dugno pelenų ir betono mišinys su 10 proc. dugno pelenų yra priskiriami S3 slankumo klasei ir yra pusiau skystos konsistencijos. Betono mišinys su 20 proc. dugno pelenų yra priskiriamas S2 slankumo klasei ir yra plastiškos konsistencijos. Betono mišinys su 30 proc. dugno pelenų yra priskiriamas S1 slankumo klasei ir yra gana standžios konsistencijos.

### 3.3. Oro kiekio betono mišinyje nustatymas

Maišant betoną mišinyje susidaro oro poros. Oro kiekis betono mišinyje neigiamai veikia sukietėjusio betono stiprumą, tačiau pagerina betono atsparumą šalčiui. Betono mišinyje oro kiekiui esant didesniai nei 3 proc., tikėtina kad betonas bus atsparus šalčiui, tačiau didesnis oro kiekis sumažina sukietėjusio betono stiprumą [42].

Atlikus oro kiekio betono mišinyje bandymą pagal anksčiau nurodytą metodiką gauti rezultatai pateikiami 9 lentelėje:

**9 lentelė.** Oro kiekio betono mišinyje nustatymo rezultatai

Mišinys	Slankumas, mm	Indo tūris, l	Indo masė, kg	Indo masė su bandiniu, kg	Bandinio masė, kg	Tankis, kg/m <sup>3</sup>	Oro kiekis, %
0%	150	8	3,95	22,99	19,04	2381	3,0
10%	110	8	3,95	22,64	18,69	2336	4,1
20%	50	8	3,95	23,04	19,09	2386	2,9
30%	18	8	3,95	22,91	18,96	2370	2,7

Iš rezultatų matyti, kad didžiausias oro kiekis gautas betono mišinyje su 10 proc. dugno pelenų – 4,1 proc., tai 1,1 proc. daugiau nei kontroliniame betone. Taip pat matoma, kad didėjant dugno pelenų kiekiui betono mišinyje, mažėja oro kiekis – tačiau betono mišiniuose su 20 proc. ir 30 proc. dugno pelenų oro kiekis yra mažesnis nei kontroliniame betone. Taigi, tikėtina, kad sukietėjęs



betonas su 10 proc. dugno pelenų pasieks didžiausią atsparumą šalčiui, o mažiausią atsparumą šalčiui pasieks betonas su 30 proc. dugno pelenų.

### 3.4. Vandenyje netirpių medžiagų kiekio betone ir dugno pelenuose nustatymas

Atlikus vandenyje netirpių medžiagų kiekio betone ir dugno pelenuose bandymą pagal aukščiau nurodytą metodiką, vandens mėginiai buvo ištirti laboratorijoje, rezultatai pateikiami 10 ir 11 lentelėse:

**10 lentelė.** Vandenyje netirpių medžiagų kiekio betone nustatymo rezultatai

Cheminiai elementai / junginiai	0%	10%	20%	30%
Bendras fosforas (P) mg/l	0,02	0,01	0,01	0,01
Sulfatai (SO <sub>4</sub> ) mg/l	4,11	5,85	6,76	4,51
Chloridai (Cl) mg/l	83,43	74,10	74,10	55,00
Cinkas (Zn) mg/l	0,02	0,03	0,03	0,02
Geležis (Fe) mg/l	0,07	0,05	0,05	0,07

Vandenyje netirpių medžiagų kiekiai betone neviršija ribinių verčių, nurodytų LST EN 206:2013+A1:2017 „Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis“ [48] standarte. Visų keturių rūšių betonas pagal didžiausią leidžiamą chloridų kiekį betone, gali būti priskiriamas Cl 1,00 chloridų kiekio klasei, o pagal cheminį agresyvumą betonas gali būti naudojamas XA1 aplinkos poveikių klasėje.

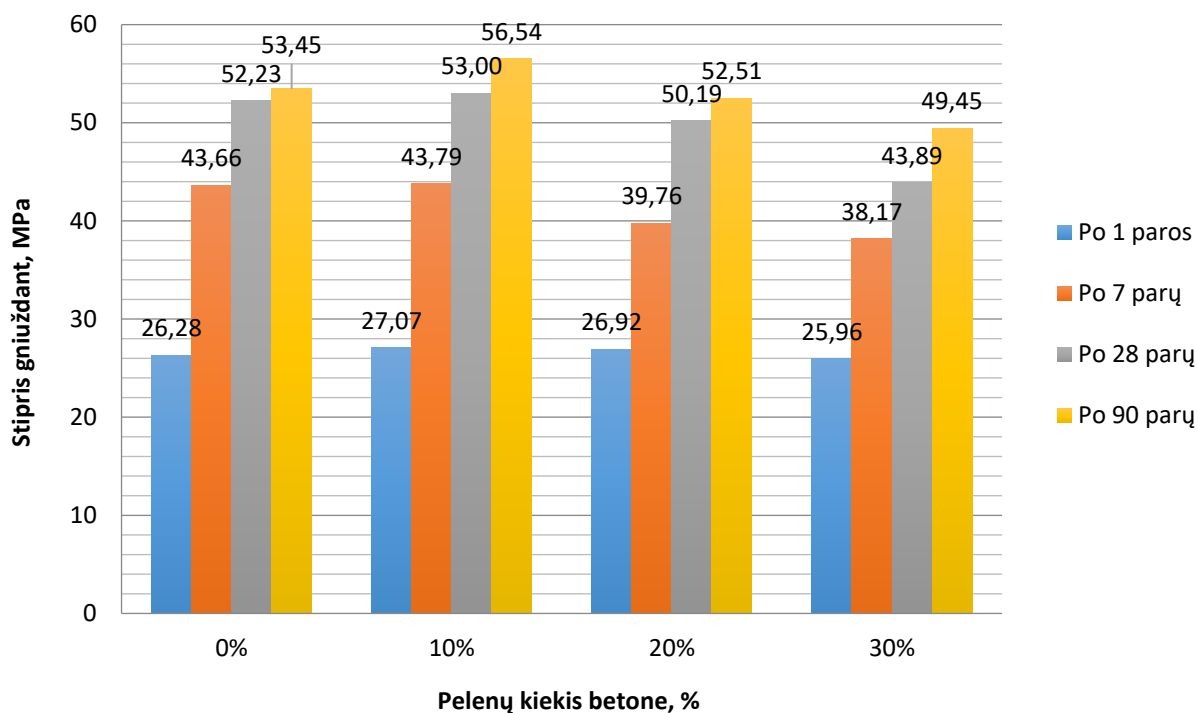
**11 lentelė.** Vandenyje netirpių medžiagų kiekio dugno pelenuose nustatymo rezultatai

Cheminiai elementai / junginiai	Kiekis, mg/l	Ribinė vertė, mg/l
Bendras fosforas (P)	2,33	-
Sulfatai (SO <sub>4</sub> )	3,39	<2000
Chloridai (Cl)	218,36	<1000
Cinkas (Zn)	0,06	<0,3
Geležis (Fe)	0,15	-

Vandenyje netirpių medžiagų kiekiai dugno pelenuose neviršija išplovimo ribinių verčių, nurodytų „Atliekų deginimo įrenginiuose ir bendro atliekų deginimo įrenginiuose susidariusių pelenų ir šlako tvarkymo reikalavimai“ [7] įsakyme, todėl dugno pelenai gali būti naudojami civilinėje ir statybos inžinerijoje.

### 3.5. Gniuždymo stiprio nustatymas

Suformuoti betono bandiniai (100 x 100 x 100 mm) buvo panardinami ir kietinami 20 ± 1 °C temperatūros vandens vonioje. Betono stipris gniuždant buvo bandomas po 1, 7, 28 ir 90 parų kietinimo. Bandiniai buvo bandomi drėgni. Gauti rezultatai apteikiami 19 pav. ir 2 priedo 17 lentelėje:



19 pav. Gniuždomojo stiprio po 1, 7, 28 ir 90 parų diagrama



20 pav. Sugniuždyti betono bandiniai

Taigi iš diagramos matyti, kad betonas su 10 proc. dugno pelenų pasiekia didžiausią gniuždomąjį stiprį: po 1 paros kietėjimo betonas su 10 proc. dugno pelenų pasiekė 3 proc. didesnį gniuždomąjį stiprį nei kontrolinių bandinių betonas, po 7 parų kietėjimo – 0,3 proc. didesnį gniuždomąjį stiprį, po 28 parų kietėjimo – 1,5 proc. didesnį gniuždomąjį stiprį, o po 90 parų kietėjimo – net 5,8 proc. didesnį gniuždomąjį stiprį. Visgi, didesnis nei 10 proc. nevalytų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų kiekis mažina betono gniuždomąjį stiprį.

### 3.6. Chlorido jonų prasiskverbimo gylio nustatymas

Chloridų įsiskverbimas gali sukelti betone esančio plieno (armatūros) koroziją, kurios metu susidaro rūdys. Dėl rūdžių padidėja plieno tūris ir betone susidaro tempimo įtempiai, dėl kurių betonas gali imti trūkinėti.

Atlikus bandymą buvo išmatuotas chloridų jonų prasiskverbimo gylis betone ir apskaičiuotas difuzijos koeficientas. Kuo mažesnis koeficientas – tuo mažesnis chloridų jonų pralaidumas. Bandymo rezultatai pateikti 12 lentelėje:

**12 lentelė.** Chlorido jonų prasiskverbimo gylio nustatymo rezultatai

Bandinys	Bandinio aukštis h, mm	Chloridų įsigėrimas $x_d$ , mm	Bandymo laikas, h	Chloridų difuzijos koeficientas $D_{nssm}$ , ( $10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s)
0%	51,6	21,9	24	11,51
10%	51,4	22,4	24	11,73
20%	50,2	20,7	20	12,70
30%	54,2	25,8	20	17,12

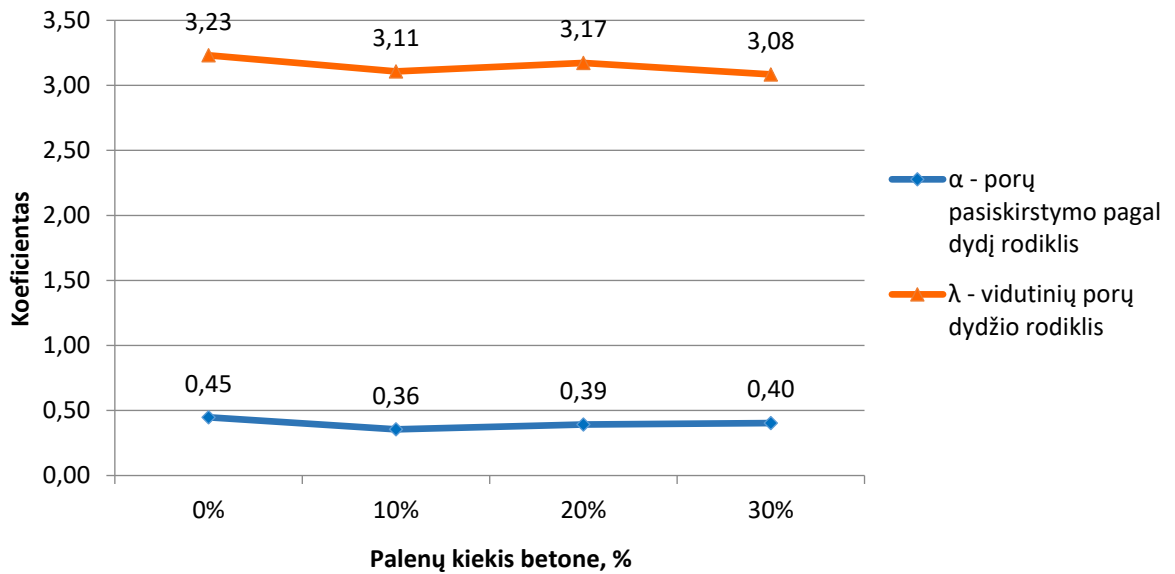


**21 pav.** Chloridų įsiskverbimo gylio nustatymo bandiniai su 0 proc. ir 10 proc. dugno pelenų

Rezultatai rodo, kad nevalytų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenai padidina chloridų jonų skvarbą betone: kuo didesnis dugno pelenų kiekis betone, tuo didesnis chloridų difuzijos koeficientas. Betonas be nevalytų komunalinių atliekų dugno pelenų pasižymėjo mažiausiu chloridų jonų pralaidumu. Tačiau betonai su 10 proc. dugno pelenų pasižymi panašiu chloridų jonų pralaidumu kaip kontrolinių bandinių betonai.

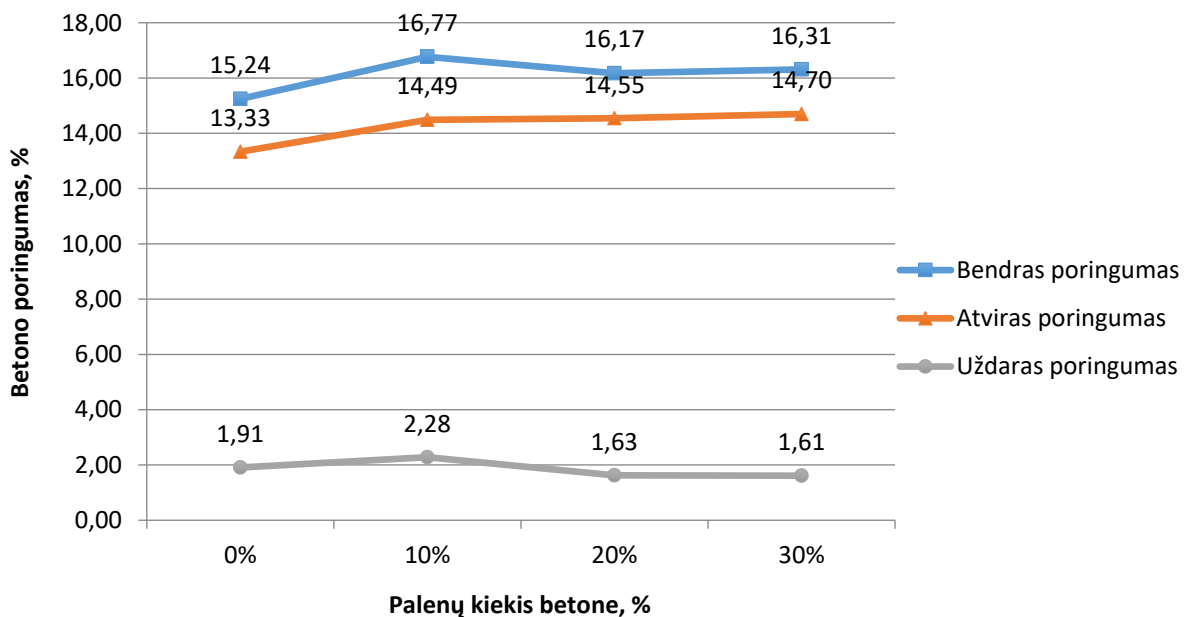
### 3.7. Vandens įgeriamumo nustatymas

Keturių skirtingų sudėčių bandiniai buvo mirkomi vandenyje 15 min, 60 min, 24 h ir 48 h. Nustatant kiekvieno bandinio vandens įgėrį apskaičiuojamas bandinių betono tankis, bendrasis, atvirasis ir uždarasis poringumas, nustatomas prognozuojamas betono atsparumas šalčiui, parenkami porų dydį apibūdinantys rodikliai. Gauti rezultatai pateikiami 22-23 pav. ir 3 priedo 18 lentelėje:



22 pav. Betono poringumo rodiklių priklausomybės nuo pelenų kiekio betone diagrama

Iš diagramos (žr. 22 pav.) matyti kad vidutinių porų dydžio rodiklis  $\lambda$  visuose betono bandiniuose yra gana panašus, svyruoja nuo 3,08 iki 3,23 bei yra didesnis už 1,50, taigi, visų bandinių betono poros yra stambios, kas turi neigiamos įtakos betono atsparumui šalčiui. Porų pasiskirstymo pagal dydį rodiklis  $\alpha$  kinta nuo 0,36 iki 0,45, taigi, visų bandinių stambios poros yra gana vienodo dydžio.



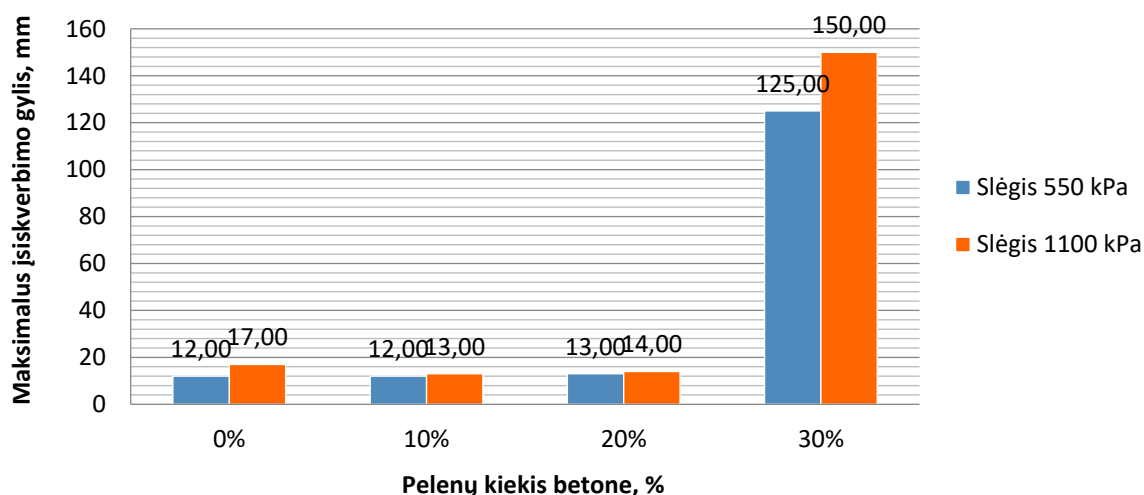
23 pav. Betono poringumo priklausomybės nuo pelenų kiekio betone diagrama

Iš 23 pav. diagramos matyti, kad didžiausias bendrasis ir uždarusis poringumas yra betono bandinių su 10 proc. dugno pelenų: bendrasis poringumas didesnis – 10 proc., o uždarusis poringumas didesnis – 8,7 proc. už kontrolinių bandinių betono poringumus. Uždarusis poringumas didina bandinių atsparumą šalčiui. Didžiausias atvirasis poringumas yra bandinių su 30 proc. dugno pelenų, 10,3 proc. didesnis už kontrolinių bandinių betono atvirąjį poringumą. Atvirasis poringumas mažina bandinių atsparumą šalčiui, taigi kaip matyti iš 3 priedo 18 lentelės, mažiausias

prognozuojamas atsparumas šalčiui yra betono su 30 proc. dugno pelenų. Prognozuojama, kad kontrolinis betonas atlaikys 279 šalčio ciklus, betonas su 10 proc. dugno pelenų – 324, betonas su 20 proc. dugno – 184, o betonas su 30 proc. dugno pelenų – 161 šalčio ciklus.

### 3.8. Vandens įsiskverbimo gylio nustatymas

Vandens įsiskverbimo gylio bandymas buvo atliktas su 150 mm aukščio bandiniais po 28 parų kietinimo. Visi bandiniai buvo bandomi 72 valandas, viena dalis bandinių iš apačios buvo veikiami vandens 550 kPa slėgiu, kita dalis buvo veikiami 1100 kPa slėgiu. Rezultatai pateikiami 24 pav. ir 4 priedo 19 lentelėje:



24 pav. Maksimalus vandens įsiskverbimo gylis betone



25 pav. Vandens įsiskverbimo gylio nustatymo bandiniai

Iš gautų tyrimo rezultatų matyti, kad betonas su 10 proc. nevalytų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų, pasižymėjo geriausiu nelaidumu vandeniui, jo laidumas vandeniui esant 550 MPa slėgiui buvo toks pat kaip kontrolinių bandinių betono, o esant 1100 MPa slėgiui jo laidumas vandeniui buvo 23 proc. mažesnis nei kontrolinių bandinių betono. Taip pat geromis nelaidumo vandeniui savybėmis pasižymėjo betonas su 20 proc. dugno pelenų, jo laidumas vandeniui esant 1100 MPa slėgiui buvo 18 proc. mažesnis nei kontrolinių bandinių betono. Tačiau betonas su 30 proc. dugno pelenų buvo laidžiausias vandeniui ir vandens įsiskverbimo gylio esant 550 MPa slėgiui siekė beveik visą bandinio aukštį, o esant 1100 MPa slėgiui vanduo prasiskverbė kiaurai betono bandinio. Taigi, galima teigti, kad optimaliausias dugno pelenų kiekis betone, siekiant pagerinti betono nelaidumą vandeniui, yra 10 proc.



### 3.9. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu metodu

Buvo atliktas atsparumo šalčiui nustatymo tūriniu metodu bandymas, kurio metu buvo nustatomas keturių skirtingų sudėčių betono atsparumas šalčiui. Tiriama, kiek betono bandiniai atlaikys užšaldymo ir atšildymo ciklą be didesnio irimo požymių. Bandiniai buvo laikomi šaldymo kameroje 100, 150 ir 200 užšaldymo / atšildymo ciklų. Rezultatai pateikti 13 lentelėje:

**13 lentelė.** Betono atsparumo šalčiui po 100, 150 ir 200 ciklų bandymo rezultatai

Bandinys	Kontroliniai bandiniai		Po 100 užšaldymo ciklų			Po 150 užšaldymo ciklų			Po 200 užšaldymo ciklų		
	Vidut. gniužd. jėga, kN	Vidut. gniužd. stipris, Mpa	Vidut. gniužd. jėga, kN	Vidut. gniužd. stipris, Mpa	Stiprio palyg. %	Vidut. gniužd. jėga, kN	Vidut. gniužd. stipris, Mpa	Stiprio palyg. %	Vidut. gniužd. jėga, kN	Vidut. gniužd. stipris, Mpa	Stiprio palyg. %
0%	564,20	53,25	596,20	56,08	5,31	590,45	55,15	3,57	585,25	55,10	3,46
10%	553,35	52,28	579,25	54,62	4,47	569,70	53,45	2,25	594,25	56,03	7,18
20%	536,55	50,42	561,20	52,59	4,31	550,90	51,61	2,38	575,25	54,40	7,91
30%	466,15	43,63	470,75	44,28	1,49	460,30	42,95	-1,55	475,45	44,72	2,50



**26 pav.** Atsparumo šalčiui tyrimo bandiniai po a) 100; b) 150 ir c) 200 užšaldymo / atšildymo ciklų

Visi bandiniai išlaikė atsparumo šalčiui bandymą – vidutinis gniuždomasis stipris nesumažėjo daugiau nei 5 proc. už kontrolinių bandinių gniuždomąjį stiprį. Iš rezultatų matyti, kad daugumos bandinių po atsparumo šalčiui bandymo vidutinis gniuždomasis stipris padidėjo. Taip yra todėl, kad bandiniai bandymo metu toliau kietėjo net ir veikiami užšaldymo / atšildymo ciklų. Palyginus bandinių gniuždomąjį stiprį, matome, kad po 200 šalčio ciklų didžiausią gniuždomąjį stiprį pasiekė bandiniai su 10 proc. ir 20 proc. dugno pelenų. Galime teigti, kad visų keturių rūšių betonas atitinka F200 atsparumo šalčiui markę ir gali būti naudojamas XF3 aplinkos poveikių klasėje.

## Išvados

1. Atlikus gniuždomojo stiprio bandymus po 1, 7, 28 ir 90 parų kietėjimo nustatyta, kad betonai su 10 proc. dugno pelenų pasiekia didžiausią gniuždomąjį stiprį: po 1 paros kietėjimo betonai pasiekė 3 proc. didesnį gniuždomąjį stiprį nei kontrolinių bandinių betonai, po 7 parų kietėjimo – 0,3 proc. didesnį gniuždomąjį stiprį, po 28 parų kietėjimo – 1,5 proc. didesnį gniuždomąjį stiprį, o po 90 parų kietėjimo – net 5,8 proc. didesnį gniuždomąjį stiprį. Didesnis nei 10 proc. nevalytų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenų kiekis, mažina betono gniuždomąjį stiprį.
2. Atlikus vandenyje netirpių medžiagų bandymą, nustatyta, kad vandenyje netirpių medžiagų kiekiai betone ir pelenuose neviršija ribinių verčių, todėl dugno pelenai gali būti naudojami civilinėje ir statybos inžinerijoje. Visų keturių rūšių betonai, pagal didžiausią leidžiamą chloridų kiekį betone, gali būti priskiriamas Cl 1,00 chloridų kiekio klasei, o pagal cheminę agresyvumą betonai gali būti naudojami XA1 aplinkos poveikių klasėje.
3. Chlorido jonų prasiskverbimo gylio bandymas parodė, kad nevalytų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenai padidina chloridų jonų skvarbą betone. Tačiau betonai su 10 proc. dugno pelenų pasižymėjo tokiu pat mažu laidumu chloridų jonams kaip ir kontrolinių bandinių betonai.
4. Vandens įgeriamumo bandymo metu nustatyta, kad didžiausi bendrasis ir uždarasis poringumai yra betono bandinių su 10 proc. dugno pelenų: bendrasis poringumas didesnis – 10 proc., o uždarasis poringumas didesnis – 8,7 proc. už kontrolinių bandinių betono poringumus. Uždarasis poringumas didina bandinių atsparumą šalčiui. Didžiausias atvirasis poringumas yra bandinių su 30 proc. dugno pelenų, net 10,3 proc. didesnis už kontrolinių bandinių betono atvirąjį poringumą. Atvirasis poringumas mažina bandinių atsparumą šalčiui, taigi tikėtina, kad betonai su 30 proc. dugno pelenų pasiekia mažiausią atsparumą šalčiui. Taip pat buvo nustatytas prognozuojamas betono atsparumas šalčiui: prognozuojama, kad kontrolinis betonai atlaikys 279 šalčio ciklus, betonai su 10 proc. dugno pelenų – 324, betonai su 20 proc. dugno – 184, o betonai su 30 proc. dugno pelenų – 161 šalčio ciklus.
5. Atlikus vandens įsiskverbimo gylio nustatymo bandymą, iš apačios veikiant bandinius vandeniui 550 kPa ir 1100 kPa slėgiu, betonai su 10 ir 20 proc. dugno pelenų pasižymėjo tokiu pat nelaidumu vandeniui kaip ir kontrolinis betonai. Tačiau betonai su 30 proc. dugno pelenų buvo laidžiausias vandeniui – net 90 proc. laidesnis nei kontrolinis betonai. Taigi, galima teigti, kad optimaliausias dugno pelenų kiekis betone, siekiant pagerinti betono nelaidumą vandeniui, yra 10 proc.
6. Visi bandiniai atlaikė atsparumo šalčiui bandymą ir atlaikė 200 šalčio ciklą. Didžiausią gniuždomąjį stiprį pasiekė betonai su 10 proc. ir 20 proc. dugno pelenų. Dėl didelio atvirojo poringumo betonai su 30 proc. dugno pelenų pasiekė mažiausią gniuždomąjį stiprį. Visų keturių rūšių betonai pasiekė F200 atsparumo šalčiui markę ir gali būti naudojami XF3 aplinkos poveikių klasėje.
7. Atlikus bandymus ir įvertinus gautus rezultatus, galima teigti, kad nevalytų komunalinių atliekų deginimo krosnies dugno pelenai gali būti naudojami gaminant cementinius statybos produktus pakeičiant dalį smulkaus užpildo. Rezultatai rodo, kad optimaliausias dugno pelenų kiekis betono mišinyje – 10 proc., o dugno pelenai gali būti saugiai naudojami cementinių statybos produktų gamyboje taip sumažinant daromą žalą aplinkosaugai, taupant energiją bei natūralius gamtos išteklius.

## Literatūros sąrašas

1. JOSEPH, Aneeta Mary, Ruben SNELLINGS, Peter NIELSEN, Stijn MATTHYS, Nele DE BELIE. *Pre-treatment and utilisation of municipal solid waste incineration bottom ashes towards a circular economy*. Construction and Building Materials, volume 260, 2020 m. spalio 10 d.
2. VIEIRA, Darli Rodrigues, João Luiz CALMON, Felipe Zanellato COELHO. *Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review*. Construction and Building Materials, volume 124, 2016 m., p. 656-666.
3. FEIZ, Roozbeh, Jonas AMMENBERG, Leenard BAAS, Mats EKLUND, Anton HELGSTRAND, Richard MARSHALL. *Improving the CO<sub>2</sub> performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry*. Journal of Cleaner Production, volume 98, 2015 m., p. 272-281
4. CHEN, C., G. HABERT, Y. BOUZIDI, A. JULLIEN, A. VENTURA. *LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: an application to mineral additions in concrete*. Conservation and Recycling, volume 54, 2010 m., p. 1231-1240.
5. ASHRAF, Muhammad Shoab, Zaid GHOLEH, Yixin SHAO. *Production of eco-cement exclusively from municipal solid waste incineration residues*. Resources, Conservation and Recycling, Volume 149, 2019 m., p. 332-342.
6. PUNDINITĖ-BARSTEIGIENĖ, M., D. BAČINSKAS, E. SPUDULIS, D. RUMŠYS. *Šlakų, susidarantių deginant komunalines atliekas, naudojimas betono mišiniuose*. Statyba, transportas, aviacinės technologijos, Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva, 2017 m., p. 524-530.
7. LIETUVOS RESPUBLIKOS APLINKOS MINISTERIJA. *Dėl atliekų deginimo įrenginiuose ir bendro atliekų deginimo įrenginiuose susidariusių pelenų ir šlako tvarkymo reikalavimų patvirtinimo* [interaktyvus]. 2016 m. lapkričio 25 d., Nr. D1-805. TAR, 2016-11-29, Nr. 27667 [žiūrėta 2020-06-10]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/22144ac0b2ec11e6a3e9de0fc8d85cd8?jfwid=-wd7z8693c>
8. AWEL, A., L. Morf. *Qualitätsentwicklung konventionell ausgetragener Schlacke*. Baudirektion des Kantons Zürich, 2009 m.
9. *Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen*. Umweltbundesamt. Deutsches Umweltbundesamt, 2010 m.
10. ZWAHR, H. *Stand der Aufbereitungstechnik und Untersuchungsverfahren von MVA Schlacke*. Hanseatischer Schlackenkantor. 2006 m.
11. MOSTBAUER, P. *Entsorgungstechnik MVA Rostasche*. Institut für Abfallwirtschaft Wien, 2010 m.
12. *Lietuvos agrarinių ir miškų mokslo centro filialo, agrocheminių tyrimų laboratorijos, analitinio skyriaus atliktų tyrimų duomenys*. CSD INŽINIERIAI, UAB užsakymu, 2013 m.
13. LST 1974:2012 „LST EN 206-1 taikymo taisyklės ir papildomieji nacionaliniai reikalavimai“. Lietuvos standartizacijos departamentas, Vilnius, 2012 m.
14. SHI, Dezhi, Pan WANG, Xiaoyi XU. *Effect of source-classified collection of municipal solid waste on heavy metals and pozzolanic properties of incineration residues*. International Journal of Environmental Research, volume 12, 2018 m., p. 661–670.



15. SIDDIQUE, Rafat. *Use of municipal solid waste ash in concrete*. Resources, Conservation and Recycling, 2010 m., p. 83–91.
16. BERTOLINI, L., M. CARSANA, D. CASSAGO, A. CURZIO, M. COLLEPARDI. *Municipal solid waste incinerator ashes as mineral additions in concrete*. Cement and Concrete Research, 2004 m.
17. LYNN, Ciaran J., Ravindra K. Dhir OBE. *Municipal incinerated bottom ash characteristics and potential for use as aggregate in concrete*. Construction and Building Materials, volume 127, 2016 m., p. 504-517.
18. KEPPERT, M., PAVLIK, Z., CERNY, R., REITERMAN, P. *Properties of concrete with municipal solid waste incinerator bottom ash*. IACSIT Coimbatore Conferences IPCSIT, 2012 m.
19. ZHANG, T., ZHAO, Z. *Optimal Use of MSWI Bottom Ash in Concrete*. International Journal of Concrete Structures and Materials, volume 8, 2014 m., p. 173-182.
20. YANG, Z., JI, R., LIU, L., WANG, X., ZHANG, Z. *Recycling of municipal solid waste incineration by-product for cement composites preparation*. Construction and Building Materials, volume 162, 2018 m. p. 794–801.
21. TEIXEIRA, E. R., A. CAMOES, F. G. BRANCO. *Valorisation of wood fly ash on concrete*. Resources, Conservation & Recycling, 2019 m., p. 292-310.
22. SIDDIQUE, R. *Utilization of wood ash in concrete manufacturing*. Resources, Conservation and Recycling, 2012 m., p. 27– 33.
23. OVIEDO-OCAÑA, E. R., L. F. MARMOLEJO-REBELLON, P. TORRES-LOZADA. *Evaluation of the addition of wood ash to control the ph of substrates in municipal biowaste composting*. Ingenieria, Investigacion y Tecnologia, 2014 m., p. 469-478.
24. NAIK, T.R., R.N. KRAUS, R. SIDDIQUE. *CLSM containing mixtures of coal ash and a new Pozzolan material*. ACI Materials Journal, 2003 m..
25. LESSARD, J., A. OMRAN, A. TAGNIT-HAMOU, R.GAGNE. *Feasibility of using biomass fly and bottom ashes to produce RCC and PCC*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017 m., p. 1–12.
26. BARATHAN, S., B. GOBINATH. *Evaluation of wood ash as a partial replacement to cement*. International Journal of Science, Engineering and Technology, 2013 m., p. 2009–2013 m.
27. SAHOO, S., B. B. DAS, S. MUSTAKIM. *Acid, alkali, and chloride resistance of concrete composed of low-carbonated fly ash*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017 m., p. 1–12.
28. LST EN 933-1:2012 *Užpildų geometrinųjų savybių nustatymo metodai. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas*.
29. LST EN 12620:2003+A1:2008 *Betono užpildai*.
30. LST EN 12350-2:2009 *Šviežio betono bandymas. 2 dalis. Slankumo bandymas*.
31. LST EN 12350-7:2009 *Betono mišinio bandymai. 7 dalis. Oro kiekis. Slėginiai metodai*.
32. LST EN 12457-2:2003. *Atliekų apibūdinimas. Išplovimas. Iš grūdėtų atliekų išplautų medžiagų ir dumblo sudėties atitikties tyrimas. 2 dalis. Vienpakopis partijos (tyrinio) tyrimas, kai skysčio ir kietosios medžiagos santykis 10 l/kg ir dalelių dydis mažesnis kaip 4 mm (dydį mažinant arba nemažinant)*.

33. LST EN ISO 11885:2009 *Vandens kokybė. Atrinktų elementų nustatymas optinės emisinės spektrometrijos metodu, taikant induktyviai susietą plazmą (ICP-OES).*
34. LST EN 12390-3:2009 *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris.*
35. EN 12390-4:2019 *Testing hardened concrete. Part 4: compressive strength - Specification for testing machines.*
36. EN 12350-1:2019 *Testing fresh concrete. Part 1: Sampling and common apparatus.*
37. EN 12390-1 *Testing hardened concrete. Part 1. Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds.*
38. EN 12390-2:2019 *Testing hardened concrete. Part 2: Making and curing specimens for strength tests.*
39. EN 12504-1:2019 *Testing concrete in structures. Part 1: Cored specimens - Taking, examining and testing in compression.*
40. NT BUILD 492. *Concrete, mortar and cement-based repair materials: chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, 1999 m.
41. Tang, L., Nilsson, L. O., Basheer, M. *Resistance of Concrete to Chloride Ingress– Testing and modelling*, 2012 m.
42. LST 1428.18:1997 *Betonas. Bandymo metodai. Vandens įgeriamumo nustatymas.*
43. ГОСТ 12730.4-78. *БЕТОНЫ. Методы определения показателен пористости.* СССР, 1980 m.
44. Skripkiūnas G. *Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės.* Vadovėlis. Kaunas, Vitea Litera, 2007 m.
45. LST EN 12390-8:2019 *Sukietėjusio betono bandymai. 8 dalis. Vandens įsiskverbimo gylis veikiant slėgiui.*
46. LST 1428-17:2016 *Betonas. Bandymo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu.*
47. LST EN 12390-2:2009 *Sukietėjusio betono bandymai. 2 dalis. Bandinių pagaminimas ir kietinimas stipriui nustatyti.*
48. LST EN 206:2013+A1:2017 *Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis.*

## Priedai

### 1 priedas. Užpildų granulimetrinė sudėtis

**14 lentelė.** Smėlio fr. 0/4 granulimetrinės sudėties tyrimo duomenys

Visa išdžiovintos bandomosios dalos masė:			$M_1$ , g	500,0
Sietų akelių dydis, mm	Liekanos masė $R_i$ , g	Liekanos dalis $(R_i/M_1) \times 100$ , %	Suminė liekana, %	Išbira pro sietą, % $100 - (R_i - M_{1i} \times 100)$
4 (D)	18,5	3,7	3,7	96,3
2	43,6	8,7	12,4	87,6
1	92,6	18,5	30,9	69,1
0,500	190,0	38,0	68,9	31,1
0,250	113,2	22,6	91,6	8,4
0,125	31,2	6,2	97,8	2,2
0,063	6,3	1,3	99,1	0,9
Medžiagos kiekis ant rinkinio dugno P (0)	2,6	0,5	99,6	0,4
<b>2. Smulkiųjų dalelių kiekis, %</b>			<b>0,52</b>	
<b><math>\Sigma R_i + P</math>:</b>			498,0	
<b>Sijojimo nuostoliai, %</b>			<b>0,40</b>	<b>&lt;1</b>
<b>Smulkumo modulis:</b>			<b>3,05</b>	

**15 lentelė.** Pelenų fr. 0/4 granulimetrinės sudėties tyrimo duomenys

Visa išdžiovintos bandomosios dalos masė:			$M_1$ , g	500,0
Sietų akelių dydis, mm	Liekanos masė $R_i$ , g	Liekanos dalis $(R_i/M_1) \times 100$ , %	Suminė liekana, %	Išbira pro sietą, % $100 - (R_i - M_{1i} \times 100)$
4 (D)	6,90	1,4	1,4	98,6
2	93,80	18,8	20,1	79,9
1	123,60	24,7	44,9	55,1
0,500	104,90	21,0	65,8	34,2
0,250	112,70	22,5	88,4	11,6
0,125	42,40	8,5	96,9	3,1
0,063	12,90	2,6	99,4	0,6
Medžiagos kiekis ant rinkinio dugno P (0)	1,70	0,3	99,8	0,2
<b>2. Smulkiųjų dalelių kiekis, %</b>			<b>0,34</b>	
<b><math>\Sigma R_i + P</math>:</b>			498,9	
<b>Sijojimo nuostoliai, %</b>			<b>0,22</b>	<b>&lt;1</b>
<b>Smulkumo modulis:</b>			<b>3,17</b>	

**16 lentelė.** Skaldos fr. 0/32 granulimetrinės sudėties tyrimo duomenys

Visa išdžiovintos bandomosios dalos masė:			M <sub>i</sub> , g	500,0
Sietų akelių dydis, mm	Liekanos masė R <sub>i</sub> , g	Liekanos dalis (R <sub>i</sub> /M <sub>i</sub> )x100, %	Suminė liekana,%	Išbira pro sietą, % 100-(R <sub>i</sub> -M <sub>i</sub> x100)
31,5	0	0,0	0,0	100,0
22,4	0,00	0,0	0,0	100,0
16	42,00	8,4	8,4	91,6
11,2	166,00	33,2	41,6	58,4
8	122,00	24,4	66,0	34,0
4	158,00	31,6	97,6	2,4
2	8,00	1,6	99,2	0,8
1	1,00	0,2	99,4	0,6
Medžiagos kiekis ant rinkinio dugno P (0)	0,20	0,0	99,4	0,6
<b>2. Smulkiųjų dalelių kiekis, %</b>			0,04	
<b>ΣR<sub>i</sub> + P:</b>			497,2	
<b>Sijojimo nuostoliai, %</b>			0,56	<1

## 2 priedas. Gniuždymo stiprio nustatymas

17 lentelė. Betono bandinių stiprio gniuždant po 1, 7, 28 ir 90 parų nustatymo rezultatai

Bandinys	Tankis $\rho_n = m/V$ , kg/m <sup>3</sup>	Ardančioji gniuždymo jėga F, kN	Stipris gniuždant $f_{ct} = \beta \cdot F/A$ , Mpa (N/mm <sup>2</sup> )	Stiprio gniuždant vidurkis, MPa
<b>Po 1 paros</b>				
0%	2323,2	282,9	26,48	26,28
0%	2335,2	280,1	26,09	
10%	2323,3	292,2	27,65	27,07
10%	2277,9	285,9	26,49	
20%	2395,2	290,5	27,54	26,92
20%	2466,1	271,8	26,29	
30%	2461,5	263,3	25,83	25,96
30%	2464,6	267,2	26,08	
<b>Po 7 parų</b>				
0%	2374,4	468,4	43,58	43,66
0%	2389,6	470,5	43,73	
10%	2337,7	471,1	43,88	43,79
10%	2330,6	469,3	43,71	
20%	2375,4	415,6	39,29	39,76
20%	2364,9	426,4	40,23	
30%	2331,3	405,2	37,85	38,17
30%	2373,9	407,7	38,50	
<b>Po 28 parų</b>				
0%	2345,4	572	53,01	52,23
0%	2375,4	556,4	51,46	
10%	2359,1	550,7	52,47	53,00
10%	2365,0	556,0	53,52	
20%	2391,4	528,9	49,60	50,19
20%	2389,2	544,2	50,78	
30%	2342,6	468,2	44,04	43,89
30%	2359,4	464,1	43,74	
<b>Po 90 parų</b>				
0%	2344,7	564,1	53,06	53,45
0%	2438,5	577,6	53,85	
10%	2381,5	586,8	55,58	56,54
10%	2355,0	602,8	57,50	
20%	2386,6	575,8	53,57	52,51
20%	2385,3	553,0	51,45	
30%	2355,4	523,1	49,25	49,45
30%	2361,9	527,3	49,65	

### 3 priedas. Vandens įgeriamumo nustatymas

18 lentelė. Betono poringumo nustatymas pagal vandens įgeriamumo kinetiką

Bandinys	Bandinio masė, g						W <sub>p</sub> , %	Tankis, kg/m <sup>3</sup>	W <sub>p(t)</sub> , %	W <sub>1</sub> , %	W <sub>2</sub> , %	W <sub>3</sub> , %	W <sub>1(s)</sub> arba W <sub>1</sub> /W <sub>p</sub> %	W <sub>2(s)</sub> arba W <sub>2</sub> /W <sub>p</sub> %	Poringumo rodikliai			Bendras poringumas	Atviras poringumas	Uždaras poringumas	Atsaprūmo šaltiniui kriterijus	Prognozuojamas atsaprūmas šaltiniui, ciklais
	Sauso	Po 15 min	Po 60 min	Po 24h	Po 48h	Vandenyje									Po 48 h	Sauso bandinio	Pagal tūrį					
0%	273,5	282,0	285,9	288,5	288,80	169,70	5,58	2296,73	12,81	3,09	4,52	5,47	0,55	0,81	1,67	0,53	3,15	14,62	12,81	1,81	1,57	278,00
0%	482,2	497,1	502,4	509,7	510,40	299,20	5,85	2283,08	13,36	3,09	4,19	5,71	0,53	0,72	1,27	0,38	3,34	15,13	13,36	1,77	1,47	248,00
0%	658,6	679	687,3	695,6	695,80	408,10	5,64	2289,29	12,92	3,09	4,35	5,61	0,55	0,77	1,48	0,44	3,36	14,90	12,92	1,98	1,70	300,00
0%	617,8	638,1	646,6	656,3	656,90	382,40	6,33	2250,64	14,24	3,29	4,66	6,23	0,52	0,74	1,35	0,44	3,07	16,33	14,24	2,09	1,63	291,00
<b>Vidurkiai:</b>							<b>5,85</b>	<b>2279,93</b>	<b>13,33</b>	<b>3,14</b>	<b>4,43</b>	<b>5,75</b>	<b>0,54</b>	<b>0,76</b>	<b>1,44</b>	<b>0,45</b>	<b>3,23</b>	<b>15,24</b>	<b>13,33</b>	<b>1,91</b>	<b>1,59</b>	<b>279,25</b>
10%	492,0	507,7	513,6	523,2	523,70	304,20	6,45	2241,28	14,46	3,20	4,40	6,35	0,50	0,68	1,15	0,36	3,19	16,68	14,46	2,22	1,71	315,00
10%	635,4	655,1	661	675,2	676,30	393,10	6,43	2243,79	14,43	3,09	4,02	6,26	0,48	0,63	0,99	0,31	3,19	16,59	14,43	2,16	1,66	298,00
10%	424,1	437,7	442,9	450,2	450,50	262,10	6,22	2251,23	14,00	3,20	4,43	6,15	0,51	0,71	1,24	0,40	3,10	16,31	14,00	2,32	1,84	348,00
10%	638,6	659	666,3	681,4	681,90	394,20	6,79	2219,57	15,06	3,20	4,34	6,71	0,47	0,64	1,03	0,35	2,94	17,49	15,06	2,43	1,79	335,00
<b>Vidurkiai:</b>							<b>6,47</b>	<b>2238,97</b>	<b>14,49</b>	<b>3,17</b>	<b>4,30</b>	<b>6,36</b>	<b>0,49</b>	<b>0,66</b>	<b>1,10</b>	<b>0,36</b>	<b>3,11</b>	<b>16,77</b>	<b>14,49</b>	<b>2,28</b>	<b>1,75</b>	<b>324,00</b>
20%	787,9	816,2	825,8	843,9	844,70	488,20	7,21	2210,09	15,93	3,59	4,81	7,11	0,50	0,67	1,12	0,34	3,29	17,84	15,93	1,91	1,33	205,00
20%	417,2	430,5	436,3	442,1	442,20	259,20	6,00	2279,53	13,69	3,20	4,59	5,98	0,53	0,76	1,43	0,45	3,18	15,26	13,69	1,57	1,28	235,00
20%	436,7	450,7	456,3	463,4	464,10	271,70	6,27	2269,90	14,23	3,20	4,48	6,11	0,51	0,72	1,27	0,42	3,02	15,62	14,23	1,39	1,09	115,00
20%	613,9	633,5	640,3	652,2	652,80	381,20	6,34	2260,17	14,34	3,20	4,31	6,25	0,50	0,68	1,15	0,36	3,19	15,98	14,34	1,64	1,27	183,00
<b>Vidurkiai:</b>							<b>6,46</b>	<b>2254,92</b>	<b>14,55</b>	<b>3,30</b>	<b>4,55</b>	<b>6,36</b>	<b>0,51</b>	<b>0,71</b>	<b>1,24</b>	<b>0,39</b>	<b>3,17</b>	<b>16,17</b>	<b>14,55</b>	<b>1,63</b>	<b>1,24</b>	<b>184,50</b>
30%	724,0	747,2	756,3	774,7	775,50	449,60	7,11	2221,65	15,79	3,20	4,46	7,00	0,45	0,63	0,99	0,37	2,68	17,41	15,79	1,62	1,14	126,00
30%	526,7	544,2	551,2	560,6	561,30	327,10	6,56	2249,06	14,76	3,32	4,65	6,43	0,51	0,71	1,24	0,40	3,10	16,39	14,76	1,63	1,23	168,00
30%	458,2	473,4	479,5	484,6	485,40	284,70	5,93	2283,13	13,54	3,31	4,64	5,76	0,56	0,78	1,53	0,44	3,48	15,13	13,54	1,58	1,30	190,00
<b>Vidurkiai:</b>							<b>6,53</b>	<b>2251,28</b>	<b>14,70</b>	<b>3,28</b>	<b>4,58</b>	<b>6,39</b>	<b>0,50</b>	<b>0,71</b>	<b>1,25</b>	<b>0,40</b>	<b>3,08</b>	<b>16,31</b>	<b>14,70</b>	<b>1,61</b>	<b>1,22</b>	<b>161,33</b>

#### 4 priedas. Vandens įsiskverbimo gylio nustatymas

19 lentelė. Vandens įsiskverbimo gylio bandymo rezultatai

Bandinys	Maksimalus įsiskverbimo gylis, mm	
	Slėgis 550 kPa	Slėgis 1100 kPa
0%	12,00	17,00
10%	12,00	13,00
20%	13,00	14,00
30%	125,00	150,00