



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

Domantė Niūniavaitė

**Granito atsijų priedo įtaka modifikuoto cemento skiedinių
savybėms**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. Kęstutis Baltakys

Kaunas, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

**Granito atsijų priedo įtaka modifikuoto cemento skiedinių
savybėms**

Baigiamasis magistro projektas

Studijų programa Chemijos inžinerija (kodas 621H81004)

Vadovas

(parašas) Prof. Kęstutis Baltakys

(data)

Recenzentas

(parašas) Prof. Rimvydas Kaminskas

(data)

Projektą atliko

(parašas) Domantė Niūniavaitė

(data)

Kaunas, 2018

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
CHEMINĖS TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

Tvirtinu:
Cheminės technologijos fakulteto dekanas
Prof. E. Valatka

Suderinta:
Silikatų technologijos katedros vedėjas
Prof. R. Kaminskas
2018-04-11

Įsakymo Nr.ST18-F-02-3, 2018-04-11

Mokslinio-tiriamąjo pobūdžio
MAGISTRO BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentei Domantei Niūniavaitei

1. Projekto tema: Granito atsijų priedo įtaka modifikuoto cemento skiedinių savybėms.
2. Darbo tikslas ištirti granito atsijų priedo kiekio įtaką cemento skiedinių stipruminėms savybėms.
Darbo uždaviniai:
 - 2.1 Ištirti granito atsijų cheminę ir mineralinę sudėtį.
 - 2.2 Sudaryti optimalios sudėties plytelių klijų mišinį ir įvertinti granito atsijų įtaką standartiniams gamybos parametrams.
 - 2.3 Nustatyti granito atsijų priedo kiekio įtaką cemento skiedinių stipruminėms savybėms.
 - 2.4 Ištirti geriausiomis savybėmis pasižyminčių cemento skiedinių hidratacijos produktų mineralinę sudėtį.
3. Projekto sudėtinės dalys:
 - 3.1 Įžanga
 - 3.2 Literatūros apžvalga;
 - 3.3 Medžiagos ir tyrimų metodika;
 - 3.4 Rezultatai ir jų aprašymas;
 - 3.5 Išvados;
 - 3.6 Literatūros sąrašas;

Užduoties išdavimo data 2018-04-11

Užbaigto projekto pateikimo terminas 2018-06-01

Vadovas: Prof. K. Baltakys 2018-05-25

Užduotį gavau, studentas: Domantė Niūniavaite 2018-04-11



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Cheminės Technologijos Fakultetas

(Fakultetas)

Domantė Niūniavaitė

(Studento vardas, pavardė)

Chemijos inžinerija 621H81004

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Granito atsijų priedo įtaka modifikuoto cemento skiedinių savybėms“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 18 m. gegužės 31 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Domantės Niūniavaitės**, baigiamasis projektas tema „Granito atsijų priedo įtaka modifikuoto cemento skiedinių savybėms“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nėra 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 mokėjusi.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Turinys

Santrauka	6
Summary	7
Santrumpos	8
Terminai ir apibrėžimai.....	9
Ižanga.....	10
1. Literatūros apžvalga	12
1.1 Cementinių skiedinių klasifikacija ir jų charakteristikos.....	12
1.2 Cementinių skiedinių gamybai naudojamos žaliavos	14
1.2.1 Rišamosios medžiagos.....	15
1.2.2 Užpildai.....	16
1.2.3 Modifikuojantys priedai	18
1.3 Statybinių atliekų panaudojimas cementinių skiedinių gamyboje.....	21
2. Medžiagos ir tyrimų metodai	23
2.1 Naudotos medžiagos	23
2.2 Tyrimų metodai.....	26
2.2.1 Medžiagų struktūros tyrimų metodai	26
2.2.2 Mišinių tinkamumo tyrimų metodai cemento skiediniams	27
2.2.3 Mišinių tinkamumo tyrimų metodai plytelių klijams	28
3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas	32
3.1 Granito atsijų cheminė ir mineralinė sudėtis	32
3.2 Plytelių klijų mišinio sudėties optimizavimas	34
3.3 Cemento skiedinių cheminės ir mechaninės charakteristikos.....	45
3.4 Rekomendacijos.....	53
3.5 Darbuotojų sauga ir sveikata	55
Išvados	58
Literatūros sąrašas.....	59

Niūniavaitė, Domantė. Granito atsijų priedo įtaka modifikuoto cemento skiedinių savybėms. *Chemijos magistro* baigiamasis darbas / vadovas Prof. Dr. Kęstutis Baltakys; Kauno technologijos universitetas, cheminės technologijos fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: inžineriniai mokslai, chemijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: sausieji statybiniai mišiniai, plytelių klijai, cementinis skiedinys, granito atsijos.

Kaunas, 2018. 62 p.

Santrauka

Tiriamąjį darbą buvo nustatoma naujai į rinką įvedamų metilceliuliozės ir redisperguojančių priedų įtaka eksperimentinių plytelių klijų mišinių standartiniams gamybos parametrams. Plytelių klijų mišiniai buvo sudaryti iš 45–50 % rišamosios medžiagos, 0,35–0,5 % metilceliuliozės priedo, 2–5 % redisperguojančios įmaišos, 0,3 % kalcio formiato priedo ir 0/05 frakcijos smėlio iki 100 % mišinio sudėties. Ištirta, kad naudoti pridai netinka plytelių klijų gamybai, nes mišiniai neatitinka LST EN 12004 standarte nurodytų sklidumo ir slankumo parametrų verčių.

Taip pat darbe buvo nagrinėta granito atsijų įtaka cemento skiedinių stipruminėms savybėms į mišinį įvedant nuo 2 iki 30 % tiriamojo užpildo. Ištirta, kad po 7, 28 ir 96 parų geriausiomis stipruminėmis savybėmis pasižymėjo bandiniai, kurių sudėtyje buvo 12 % granito atsijų ir atitiko LST EN 13813 standarte nurodytą C25 stiprumo klasę.

Niuniavaite, Domante. The influence of granite dust additive on the properties of cement mortar: *Master's thesis in Chemistry.* / supervisor prof. Kestutis Baltakys. The Faculty of Chemical Technology, Kaunas University of Technology.

Research area and field: engineering sciences, Chemical engineering

Key words: dry building mixtures, tile adhesive, cement mortar, granite dust.

Kaunas, 2018. 62 p.

Summary

It was investigated the influence of new materials such as cellulose ether and redispersible polymer powder to experimental tile adhesive standard parameters. There was prepared mixtures from ordinary Portland cement 45–50 %, cellulose ether 0.35–0.5 %, redispersible polymer powder 2–5 %, calcium formate 0.3 % and filler to 100 % dry mixture. It was found that these additives are not recommended to use in cement–based adhesives because the properties of ceramic tile adhesives in standard EN 12004 was not reached.

Also in this work was investigated the granite dust influence to cement–based mortars. It was determined that when the filler was changed in the samples from 2 to 30 %, and with 12 % granite dust the highest strength after 7, 28 and 96 days of hydration was achieved. According to EN 13813 standards samples reached C25 strength class.

Santrumpos

CaF – kalcio formiatas

CM – cementinis skiedinys

DSK – diferencinė skenuojamoji kalorimetrija

MC – metilceliuliozės įmaiša

RDP – redisperguojanti įmaiša

RSDA – rentgeno spinduliuotės difrakcinė analizė

RSFA –rentgeno spinduliuotės fluorescensinė analizė

SM – sausas mišinys

TGA – termogravimetrinė analizė

V – vanduo

V/SM – vandens/sauso mišinio santykis

VTA – vienalaikė terminė analizė

Terminai ir apibrėžimai

Pagrindiniai terminai ir apibrėžimai išdėstyti LST EN standartuose: „Statybinis skiedinys“ (LST EN 1413), „Skiedinio užpildai“ (LST EN 13139), „Betonas“ (LST EN 206), „Plytelių klijai“ (LST EN 12004), „Neorganinės rišamosios medžiagos. Terminai ir apibrėžimai“ (LST EN 1459:1997).

LST EN standartuose vartojami tokie apibrėžimai ir terminai:

- sausas skiedinio mišinys – rišamosios medžiagos, sausų užpildų ir sausų priedų (įmaišų) mišinys;
- statybinis skiedinys – sukietėjęs rišamosios medžiagos tešlos, smulkių tinkamos granulometrijos užpildų ir priedų (įmaišų) mišinys;
- skiedinio mišinys – sukietėjęs rišamosios medžiagos tešlos, smulkių tinkamos granulometrijos užpildų ir priedų (įmaišų) mišinys;
- cemento skiedinys – vienos arba kelių rišamųjų medžiagų, užpildų, vandens ir įmaišų mišinys;
- receptinis klijų/cemento mišinys/skiedinys – iš anksto numatytais santykiais pagamintas mišinys/skiedinys, kurio savybės nustatytos pagal sudedamųjų komponentų santykį (receptinė samprata);
- neorganinės rišamosios medžiagos – mineraliniai milteliai, kuriuos sumaišius su vandeniu, gaunama plastiška, savaime kietėjanti tešla, ilgainiui virstanti kietu dirbtiniu akmeniu;
- tešla – mineralinės rišamosios medžiagos miltelių ir vandens klampus mišinys, įgaunantis plastiškos, slankios, rišlios tešlos pavidalą.
- priedai (įmaišos) – medžiagos, kurios naudojamos mišinio savybėms reguliuoti, modifikuoti ir pagerinti;
- klijai – specialios paskirties mišiniai, pagaminti iš rišamosios medžiagos, smulkaus geros granulometrinės sudėties užpildų, vandenį sulaikančių ir kitų modifikuojamųjų įmaišų, gerai sukimbantys su klijuojamais pagrindais, o sukietėję gana stiprūs;
- užpildai – granulinė medžiaga, naudojama statyboje. Užpildai gali būti natūralūs, sintetiniai arba perdirbti iš statybinių atliekų.

Ižanga

Statybinių ir pramoninių atliekų perdirbimas bei antrinio panaudojimo galimybė statybinių medžiagų gamyboje yra laikomas vienu iš alternatyviausių ir perspektyviausių atliekų tvarkymo būdų. Atliekos, tokios kaip betono skalda, plytos, plytelės, statybinės dulkės, įvairaus stambumo užpildai ir kt., sudaro apie 80–85 % visų statybinių atliekų ir gali būti naudojamos pakartotinai, ypač jeigu pačiose atliekose yra akumuliuotos atliekinės energijos. Statybinių atliekų perdirbimas ne tik mažina užimamos žemės plotus, bet padeda sumažinti gamtinių išteklių suvartojimą. Pakartotinai naudojant statybų pramonei pritaikytas atliekas siekiama jomis pakeisti dabar naudojamas energijai ir medžiagoms imlias technologijas.

Pramonės atliekų panaudojimas statybinių medžiagų gamybai darosi vis aktualesnis, nes tai sudaro realią galimybę taupyti energinius ir gamtinius išteklius, taip pat racionaliai spręsti ekologiškai svarbų klausimą – atliekų utilizavimą. Be to, iš pramonės atliekų galima sukurti naujus statybinius gaminius, kurie pasižymi aukštais techniniais ir ekonominiais rodikliais.

Granitas yra grubus akmuo, plačiai naudojamas kaip įvairių formų statybinė medžiaga, nes pasižymi ilgaamžiškumu, patvarumu, atsparumu braižymui ir karščiui, dėl to plačiai naudojamas vidaus ir lauko apdailai. Granito akmens paruošimo proceso metu susidaro didelis kiekis atliekų, tokių kaip įvairaus dydžio granito skalda, nuopjovos ir dulkės. Statistiniai duomenys rodo, kad skirtingų granito pramonės gamybos stadijų atliekų kiekis siekia apie 30 % visos pasaulinės gamybos, t. y. milijonai tonų granito uolienos atliekų. Dažniausiai tokios atliekos yra kaupiamos atviruose savartynuose, o tai sukelia didelę taršą ir žalą aplinkai. Granito atliekos yra biologiškai neskaidžios, žmogui ar gyvūnui įkvėpus smulkių granito dulkių tai sukeltų rimtas sveikatos problemas. Žinoma, kad granito atlieka naudojama kaip smulkusis užpildas įvairių statybinių skiedinių ir sausųjų mišinių gamyboje, kurie atitinka konkrečius gamybos standartus. Dėl milžiniško atliekų kiekio, pavojaus aplinkai ir puikių charakteristinių savybių granito akmens atliekų panaudojimas cemento skiedinių gamybos pramonėje yra puiki alternatyva sprendžiant atliekų utilizavimo klausimą.

Statybinio skiedinio sudėtis turi būti optimizuota taip, kad vidutinio dydžio dalelių kiekio užtektų užpildyti tarpus tarp stambaus užpildo, o smulkaus užpildo užtektų užpildyti tarpus tarp vidutinio užpildo. Toks mišinio optimizavimas leidžia sumažinti vandens/cemento santykį išlaikant ar net pagerinant cemento skiedinio stiprumą ir ilgaamžiškumą.

Norint išvystyti granito atsijų atliekų panaudojimą cemento skiedinių gamyboje, reikia atlikti nemažai tyrimų parenkant geriausius pradinių žaliavų santykius. Todėl šiame tiriamajame darbe buvo kuriamos naujos optimalios plytelių klijų ir betono mišinių receptūros, vietoje smulkaus ir vidutinio smulkumo užpildo naudojant granito atsijas. Nustatoma priedų (įmaišų) ir

granito atsijų įtaką konkretiems cementinių skiedinių gamybos standartų parametrams, įvertinama ar kinta standartinės stipruminės betono savybės.

Darbo tikslas: ištirti granito atsijų priedo kiekio įtaką cemento skiedinių stipruminėms savybėms.

Darbo uždaviniai:

1. ištirti granito atsijų cheminę ir mineralinę sudėtį;
2. sudaryti optimalios sudėties plytelių klijų mišinį ir įvertinti granito atsijų įtaką standartiniams gamybos parametrams;
3. nustatyti granito atsijų priedo kiekio įtaką cemento skiedinių stipruminėms savybėms;
4. ištirti geriausiomis savybėmis pasižyminčių cemento skiedinių hidratacijos produktų mineralinę sudėtį.

1. Literatūros apžvalga

1.1 Cementinių skiedinių klasifikacija ir jų charakteristikos

Statybinių medžiagų pramonės sektorius, neskaitant energetikos įmonių, yra vienas didžiausių energijos vartotojų Europoje. Šis sektorius sukuria 28 % darbo vietų bei 7 % pramonės ir visos Europos ekonomikos. Dėl milžiniškų energijos sąnaudų, žalingų „šiltnamio efektą“ sukeliančių CO₂ dujų emisijos ir didelio iškastinių išteklių suvartojimo, statybinių medžiagų pramonės sektorius svariai prisideda prie pasaulinio klimato atšilimo, keliančio grėsmę visam pasauliui [1–3].

Mokslininkai aktyviai ieškodo būdų sunaudojamai energijai, iškastinių žaliavų ir išmetamų dujų kiekio ir neigiamam poveikiui mažinti. Keliami nauji strateginiai uždaviniai bei teoriniais ir praktiniais tyrimais pagrįstos prielaidos, didinančios šalies ūkio energinį, ekologinį ir ekonominį naudingumą. Ateityje statyboje ekonomika turėtų būti neatsiejamai susijusi su ekologija, todėl siekiant užtikrinti tvaresnę statybų pramonę, ES nustatė, kad per artimiausią laikotarpį žaliavų sunaudojimas statybų pramonėje turi būti sumažintas 30 %, o išmetamųjų atliekų šiame sektoriuje turi sumažėti 40 % [4–6].

Vienas iš būdų statybinių medžiagų gamybos energiniam naudingumui įvertinti yra medžiagų gamybos ekobalanso sudarymas. Statybų pramonės sektoriuje energija naudojama ruošiant žaliavas, gaminant gaminius ir juos transportuojant. Todėl labai svarbu visuose gamybos etapuose energijos sąnaudas sumažinti iki minimumo. Svarbiausi ekobalanso tikslai yra neigiamo pramonės poveikio aplinkai mažinimas ir energiją tausojančių, analoginės paskirties medžiagų technologijų kūrimas, įgyvendinimas bei atsinaujinančių išteklių naudojimas statybinių medžiagų gamyboje.

Galima išskirti tris statybinių medžiagų gamybos optimizavimo grupes:

1. naujų inžinerinių sprendimų bei technologijų taikymo;
2. naujų rišamųjų medžiagų kūrimo ir panaudojimo;
3. alternatyvaus kuro ir žaliavų panaudojimo gamyboje [2–3, 7–8].

Statybinių ir pramoninių atliekų perdirbimas bei antrinio panaudojimo galimybė statybinių medžiagų gamyboje yra laikomas vienu iš alternatyviausių ir perspektyviausių atliekų tvarkymo būdų. Statybinės ir pramoninės atliekos yra inertiškų ir neinertiškų medžiagų mišinys, susidaręs dėl pastatų statybos, renovacijos, griovimo darbų, kasinėjimų bei kelių tiesimo ir remonto darbų. Inertiškos atliekos, tokios kaip betono skalda, plytos, plytelės, statybinės dulkės, įvairaus stambumo užpildai ir kt., sudaro apie 80–85 % visų statybinių atliekų ir gali būti naudojamos pakartotinai, ypač jeigu pačiose atliekose yra akumuliuotos atliekinės energijos. Neinertiškos

atliekos, tokios kaip metalas, mediena, pakuotės atliekos ir kt. sudaro apie 15–20 % visų statybinių atliekų ir yra perdirbamos arba šalinamos savartynuose. Statybinių atliekų perdirbimas ne tik mažina užimamos žemės plotus, bet padeda sumažinti gamtinių išteklių suvartojimą. Pakartotinai naudojant statybines atliekas galima jomis pakeisti dabar naudojamas energijas ir medžiagas imlias technologijas [5, 9].

Apdailos darbai statybos sektoriuje sudaro apie 34–40 % bendrųjų darbo sąnaudų, todėl šių darbų spartinimas naudojant naujas, geresnės kokybės statybines medžiagas, ypač sausuosius mišinius, yra itin aktualus energiniu ir ekologiniu požiūriais [10]. Tiksliai daugiakomponentė sausų statybinių mišinių sudėtis leidžia pasiekti gerą skiedinio ar betono kokybę. Tokius mišinius patogiau gabenti neribotais atstumais visomis transporto priemonėmis. Juos patogiau sandėliuoti, nes jų naudojimo terminų neriboja rišiklių kietėjimo laikas. Mišinius nesudėtinga paruošti darbo vietose, juos lengva naudoti dideliais kiekiais. Vežami ir laikomi sandėlyje mišiniai neišsibarsto, sutaupoma apie 15–20 % rišamosios medžiagos, nereikia vežti vandens (šlapiame mišinyje jo yra apie 15–20 %) [11].

Sausieji mišiniai skirstomi pagal tris pagrindinius požymius: rišamąją medžiagą; užpildo smulkumą; paskirtį.

Pagal rišamąją medžiagą mišiniai yra skirstomi į:

- cemento;
- cemento ir kalkių;
- gipso;
- anhidritinius;
- polimerinius.

Populiariausiais išlieka cementinio tipo mišiniai, tačiau ieškoma alternatyvių medžiagų, galinčių pakeisti rišamąją medžiagą. Kasmet susidaro didžiuliai kiekiai chemijos pramonės šalutinių produktų ir statybos industrijoje susidarančių atliekų: silicio dioksido mikrodulkių, šlakų, biokuro pelenų ar maltų stiklų, todėl mokslininkai skiria didelį dėmesį šių medžiagų panaudojimui kuriant aukštos kokybės statybinius mišinius ar betoną [3, 7, 10].

Pagal užpildo stambumą (dispersiškumą) sausieji statybiniai mišiniai yra skirstomi į:

- stambiagrūdžius, kai užpildo grūdelių stambumas – iki 2–4 mm;
- smulkiagrūdžius, kai užpildo stambumas siekia iki 0,25 mm.

Užpildas, rišamajai medžiagai sustingus, išlaiko skiedinio tūrį nepakitusį, nes kalkės, cementas ir gipsas kietėdami traukiasi. Įvairaus stambumo užpildai sausajame statybiniame mišinyje sudaro 50–75 % viso mišino, dėl to, siekiant sumažinti natūralių mineralinių uolienu sunaudojimą, jį būtų galima pakeisti tikamai paruoštomis statybinėmis ir pramoninėmis atliekomis.

Pagal paskirtį sausieji statybiniai mišiniai gali būti skirstomi į:

- tinko;
- dekoratyviniai;
- hidroizoliaciniai;
- mūro;
- montavimo;
- klijai;
- glaistai;
- gruntavimo;
- išlyginamieji;
- specialios paskirties [11].

Pastaruoju laikotarpiu Lietuvoje statoma įvairios paskirties sudėtingų objektų. Jų statybai reikia papildomų teorinių tyrimų parenkant tinkamas medžiagas, projektuojant sausųjų statybinių mišinių sudėtis ir kuriant bei pritaikant pažangias ir sparčias statybos technologijas [12].

Viena iš pagrindinių monolitinių konstrukcinių statybinių medžiagų yra betonas. Dėl savo ypatingų savybių naudojamas visame pasaulyje įvairioms civilinių, pramonės ir žemės ūkio pastatų konstrukcijoms. Tai sudėtingos struktūros kompozicinė medžiaga, kurios sudėtingumas pasireiškia tuo, kad ji sudaro skirtingo dydžio dalelės – nuo kelių mikronų dydžio cemento dalelių iki kelių centimetrų dydžio užpildų dalelių [7–13].

1.2 Cementinių skiedinių gamybai naudojamos žaliavos

Cementinių skiedinių (CS) gamybai reikalingos žaliavos ir energijos šaltiniai yra skirstomi į dvi pagrindines grupes:

1. žaliavos, kurios dalyvauja natūraliuose žemės paviršiaus medžiagų apykaitos ir apytakos procesuose ir kurių perdirbimas ir utilizacija nepažeidžia gamtoje nusistovėjusio medžiagų apykaitos ciklo procesų balanso;
2. iš žemės gelmių išgaunamos žaliavos ir kuras, kuriems išgauti ir pirminiam perdirbimui atlikti sunaudota energija ir teršalų išlakos ištiesai įskaičiuojamos į gaminamos statybinės medžiagos ekobalansą. Jeigu pasibaigus tokių medžiagų tiksliniam naudojimui jos nebus tinkamai utilizuotos, perdirbtos ir grąžintos į gamybą, tokios atliekos kaupsis žemės paviršiuje, užimdamos derlingos žemės plotus ir teršdamos aplinką.

Būtent šių atliekinių medžiagų kaupimasis sukelia žemės paviršiuje vykstančių procesų anomalius reiškinius (yra ozono sluoksnis, stiprėja šiltnamio efektas, didėja aplinkos

rūgštingumas, druskėja vandens telkiniai, žemės plotai užimami savartynams ir t. t.). Beatodairiškas, nereguliuojamas tokių žaliavų ir kuro naudojimas darosi pavojingas gyvybės egzistavimui planetoje [1].

CS gamybos technologija ir kokybė tiesiogiai priklauso nuo žaliavų fizikinių ir cheminių charakteristikų. Nukrypimai nuo šių savybių neigiamai veikia pagaminto produkto kokybę, todėl tinkamas žaliavų parinkimas svarbus neprikaištingai kokybei gauti. Pagrindinės žaliavos gaminant produktus yra rišamoji medžiaga, stambūs ir smulkūs užpildai ir įmaišos [11, 13]. Kiekvienas komponentas mišinyje atlieka savitą funkcinę paskirtį. Stambieji užpildai sudaro betono skeletą, smulkieji užpildo tuštumas tarp stambiųjų užpildų dalelių, cementas su vandeniu sudaro hidratacijos produktus, kurie suriša visus užpildus į vieną sistemą – konglomeratą, o pridedami priedai keičia betono savybes [7].

1.2.1 Rišamosios medžiagos

Mineralinėmis rišamosiomis medžiagomis yra vadinamos dirbtiniu būdu gaunamos smulkių miltelių formos medžiagos, kurias sumaišius su vandeniu susidaro plastiška tešla. Joje vykstant fizikiniams – cheminiams procesams tešla sukietėja, tampa stipria akmens mase. Šios medžiagos plačiai naudojamos statyboje: betonų, skiedinių, gelžbetonio plokščių, sijų kolonų, atramų gamyboje ir t. t. Viena svarbiausių mineralinių rišamųjų medžiagų yra portlandcementis [1, 10].

Portlandcementis (CEM I) – tai hidraulinė rišamoji medžiaga, kuri gaunama smulkiai sumalus portlandcemenčio klinkerį su gipso priedu. Tai viena plačiausiai naudojamų rišamųjų medžiagų, kurios panaudojimo sritys: betono, skiedinių, injekcinių skiedinių ir kitų statybinių mišinių ruošimui bei statybos produktų gamybai. Standartas EN 197–1:2011 [13].

Portlandcemenčio klinkeris yra gaunamas išdegus iki sukepimo (1450 °C temperatūroje) smulkiai sumaltą vienalytį žaliavų mišinį, sudarytą iš klinties, molio ir koreguojančiųjų priedų žaliavų mišinio. Degimo metu susidaro didelio baziškumo pagrindiniai cemento klinkerio mineralai: trikalcio silikatas (C_3S) (50–80 %), dikalcio silikatas (C_2S) (2–30 %), trikalcio aluminatas (C_3A) (0–14 %) ir tetrakalcio aliumoferitas (C_4AF) (5–15%) [1, 14, 15].

Cemento gamybos metu sunaudojami didžiuliai kiekiai energijos ir į aplinką išmetama labai dideli CO_2 kiekiai (222 kg CO_2 /t portlandcemenčio), kuris sudaro ~5 % visame pasaulyje išmetamo anglies dioksido kiekio [16, 17]. Dėl to portlandcementis yra brangusia statybinių mišinių žaliava.

Klinkerio kiekį cemente siekiama sumažinti dėl trijų esminių priežasčių:

1. ekologinė nauda dėl mažesnės CO₂ emisijos į atmosferą;
2. ekonominė nauda dėl išlaidų mažinimo;
3. technologinė nauda dėl pagerėjusio cemento, taip pat ir betono savybių [18].

Siekiant sumažinti aplinkos taršą mažinant portlandcemenčio sąnaudas, pastaruoju metu plačiai tiriama galimybė cemento dalį mišinyje mažinti pridodant įvairių užpildų, technogeninių atliekų, pasižyminčių rišamosiomis savybėmis (silicio dioksido mikrodulkių, šlakų, biokuro pelenų ar malto stiklo). Šiems pucolaniniams priedams būdingos rišamosios savybės (panašios į įprasto portlandcemenčio), kai šie priedai dalyvauja reakcijose su laisvomis kalkėmis. Pucolaniniai priedai pagerina mišinių stiprumines savybes ir ilgaamžiškumą [13, 16–20]. Taip pat perdirbtų pramoninių atliekų naudojimas yra vienas iš pagrindinių tvaraus vystymosi principų. Yra atlikta daugybė tyrimų, kaip įvairūs perdirbtų pramoninių atliekų priedai sąlygoja statybinių mišinių savybes ir tinkamumą naudoti [18, 19]. Iširta, kad keičiant klinkerį mineraliniais priedais, tai turi įtakos cemento savybėms: pradiniam ir galutiniam hidratacijos greičiui ir laipsniui, stipriui gniuždant po 1 ir 28 paras, šviežios masės tinkamumui, vandens kiekiui norint pasiekti tinkamą tešlos konsistenciją ir sumaišyto cemento tankiui (pakavimo tankis) [19].

Nustatyta, kad antrinių žaliavų naudojimas leidžia pakeisti 5–40 % gamtinių išteklių pramonės atliekomis. Tokiai gamybai energinių išteklių sunaudojama iki 30 % mažiau, nes pramonės atliekos jau turi pirmiame etape joms suteiktą tam tikrą technologinį būvį [2].

1.2.2 Užpildai

Užpildai yra pagrindinė kietoji fazė statybiniame mišinyje, kuri vėliau sąveikauja su mišinio komponentais, rišamąja medžiaga, imaišomis ir kitais priedais. Tai geros granulometrinės sudėties kvarciniai, karbonatiniai, dolomitiniai smėliai. Kietosios daugiafrakcės fazės granulometrinė sudėtis turi įtakos rišamosios medžiagos sąnaudoms, mišinio reologinėms savybėms, o mišiniui sukietėjus – ir kokybei bei techninėms charakteristikoms [11]. Statybinio skiedinio sudėtis turi būti optimizuota taip, kad vidutinio dydžio dalelių kiekio užtektų užpildyti tarpus tarp stambaus užpildo, o smulkaus užpildo užtektų užpildyti tarpus tarp vidutinio užpildo. Taip sumažinamas sistemos tankis. Toks mišinio optimizavimas leidžia sumažinti vandens/cemento santykį išlaikant ar net pagerinant CS stiprumą ir ilgaamžiškumą [21].

Užpildai su dideliu paviršiaus plotu naudojami CS gamyboje padidinti atsparumą stipriui gniuždant ir sumažinti kapiliarinį susidarymą [4]. Užpildai ne tik daro CS ekonomiškais (užima didelį tūrį betono mišiniuose), bet taip pat užtikrina sukietėjusios tešlos stabilumą ir

ilgaamžiškumą. Užpildai, turintys šiurkštų, kampuotą paviršių, sudaro tvirtesnę mechaninį ryšį su rišamąja medžiaga vykstant cemento hidratacijai, nei užpildai, turintys lygų, apvalų paviršių. Dėl šios priežasties yra sunaudojama mažiau vandens ruošiant CS [4, 19, 22]. Geros kokybės užpildai yra vienas svarbiausių CS komponentų. Skiedinių mišiniams dažniausiai užpildu naudojami smėlis [19, 23].

Smėlis – tai nuosėdinė, beveik visiškai nesucementuota uoliena. Susideda iš 0,05–4 mm skersmens įvairios formos (kampuotų, apzultintų) mineralų grūdelių, daugiausia kvarco, feldšpatų, žėručio. Pagal savo kilmę gali būti fluivioglacijalinės, jūrinės, aliuvinės (upinės) eolinės, ežerinės, ledyninės, aleuritinės ir kitokios kilmės. Smėlis būna balkšvos spalvos (tai priklauso nuo kvarco kiekio), o kitas spalvas lemia priemaišos. Pagal vyraujančių dalelių dydį smėlis būna labai smulkus, smulkus, vidutinis, stambus, labai stambus (suskirstymas priklauso nuo pasirinktos klasifikacijos).

Išsivysčiusiose šalyse, dėl infrastuktūros augimo, pagaminama vis daugiau sausųjų statybinių, mūro ir betono mišinių, dėl to išaugo ir smėlio suvartojimas. Statyboms naudojami liejūs betono mišiniai, o betonas turi atitikti aukštus vandens nepralaidumo, atsparumo šalčiui bei padidinto agresyvumo vandens poveikio reikalavimus. Svarbią reikšmę šių rodiklių užtikrinimui turi užpildų atitiktis keliamiems techniniams reikalavimams [12, 24–27]. Užpildus pakeitus statybinėmis ir pramoninėmis atliekomis galima pagerinti cemento skiedinių eksploatacines charakteristikas, mechaninį atsparumą bei padidinti ilgaamžiškumą [26]. Pastaraisiais metais daug dėmesio skiriama užpildams, pagamintiems iš perdirbtų atliekų, plėtojant beatliekės gamybos koncepciją (angl. *zero waste*) [24, 28]. Daugelis mokslininkų ieško būdų, kaip būtų galima pakeisti mišinių ruošime naudojamą smėlį statybinėmis atliekomis, siekiant sumažinti smėlio sunaudojimą ir sprendžiant statybinių atliekų utilizavimo klausimą [20]. Vienas iš perspektyviausių priedų, naudojamų iš statybos pramonės atliekų, yra granito atlieka.

Granitas yra grubus akmuo, plačiai naudojamas kaip įvairių formų statybinė medžiaga [24]. Tai magminės kilmės uoliena, kuri susiformavo giliai nuo žemės paviršiaus veikiant dideliame slėgiui ir temperatūrai. Granitas vienas iš populiariausių natūralių akmenų, randamas Italijoje, Indijoje, Brazilijoje ir kitose pasaulio šalyse. Šio akmens išskirtinės savybės – ilgaamžiškumas, patvarumas, atsparumas braižymui ir karščiui, bakterijoms, citrinos rūgščiai, kavai, arbatai, vynui ir kitam alkoholiui, dėl to plačiai naudojamas vidaus ir lauko apdailai. Ši kristalinė uoliena pasižymi „taškuota“ struktūra, kurią nulemia dideli kiekiai silicio dioksido (SiO_2), dažniausiai daugiau kaip 70 %, dideli kiekiai kvarco (5–35 %), taip pat galima aptikti lauko špatų bei biotito. Taip pat šioje uolienoje gali būti aptinkami santykinai dideli kiekiai šarmų. Natrio ir kalio oksidų kiekiai dažniausiai svyruoja nuo 5 iki 12 %. Mangano ir kalcio oksido dažniausiai aptinkama mažiau kaip 1 % [29]. Puikios granito fizikinės, mechaninės bei

ilgaamžiškumo savybės leidžia šią uolieną pritaikyti labai plačiose srityse. Dėl didelio tankio (vidutiniškai 2700 kg/m^3) medžiaga pasižymi labai mažu vandens įgėriu ($\leq 0,6 \%$), poringumu ($\leq 4 \%$) bei ypatingai mažu laidumo koeficientu ($< 1,0 \cdot 10^{-6}$), kurie nulemia didelį atsparumą chemiam bei aplinkos poveikiui. Didelis gniuždymo stipris (iki 310 MPa) leidžia šią medžiagą puikiai išnaudoti įvairių mišinių net ir ypatingai stiprių betonų gamyboje [24, 29].

Granito akmuo yra išgaunamas įvairiais pjovimo, spogdinimo ar laužymo metodais iš karjerų ir blokais gabenamas į perdirbimo vietas. Perdirbimo vietose granito uoliena yra apdorojama pramoniniu būdu pjaustant, frezuojant, šlifuojant ir kt. būdais, taip paruošiant naudoti dekoratyviniams tikslams. Granito akmens paruošimo proceso metu susidaro didelis kiekis atliekų, tokių kaip įvairaus dydžio granito skalda, nuopjovos ir dulkės. Statistiniai duomenys rodo, kad skirtingų granito pramonės gamybos stadijų atliekų kiekis siekia apie 30% visos pasaulinės gamybos, t. y. milijonai tonų granito uolienos atliekų. Dažniausiai tokios atliekos yra kaupiamos atviruose savartynuose, o tai sukelia didelę taršą ir žalą aplinkai. Granito atliekos yra biologiškai neskaidžios. Žmogui ar gyvūnui įkvėpus smulkių granito dulkių tai sukeltų rimtas sveikatos problemas.

Dėl milžiniško atliekų kiekio, pavojaus aplinkai ir puikių charakteristinių savybių granito akmens atliekų panaudojimas cementinių skiedinių gamybos pramonėje yra puiki alternatyva sprendžiant atliekų utilizavimo ir didelį smelio kiekio suvartojimo klausimą [24–26].

Pirmieji granito atsijas akyto betono ir keramikos gamyboje panaudojo mokslininkai Beretka ir Taylor [25]. Gauti tyrimų rezultatai parodė, kad skiedinio sudėtyje dalį smulkiosios frakcijos smelio pakeitus granito atsijomis, gaunami stipriai gniuždant atsparesni produktai. Šiuo metu granito atlieka naudojama kaip smulkusis užpildas įvairių CS ir sausųjų mišinių (SM), kurie atitinka konkrečius gamybos standartus (LST EN 13139:2002), gamyboje [25, 30].

Taigi galima daryti išvadą, kad pramonės atliekų panaudojimas statybinių medžiagų gamybai darosi vis aktualesnis, nes tai sudaro realią galimybę taupyti energinius ir gamtinius išteklius, taip pat racionaliai spręsti ekologiškai svarbų klausimą – atliekų utilizavimą. Be to, iš pramonės atliekų galima sukurti naujus statybinius gaminius, kurie pasižymi aukštais techniniais ir ekonominiais rodikliais [2, 21, 31].

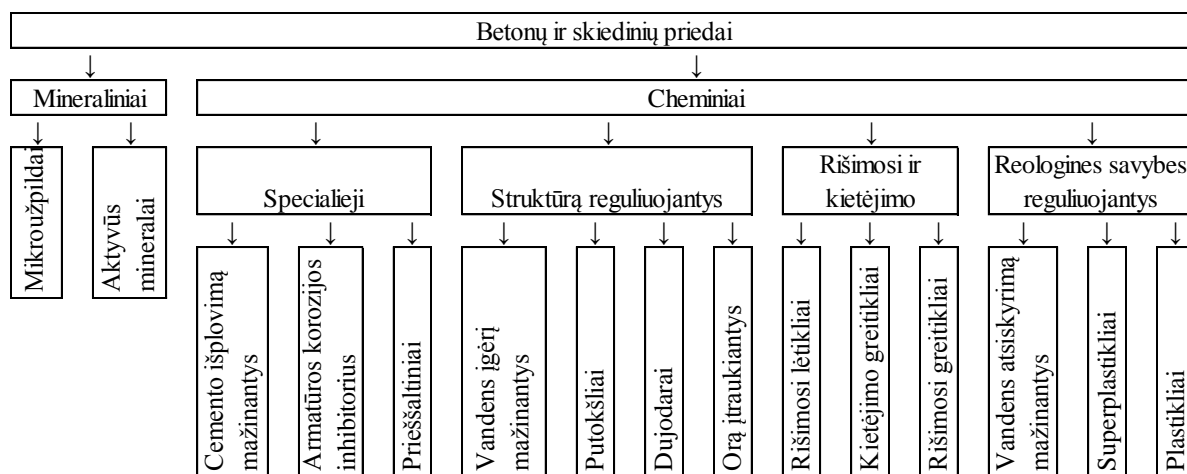
1.2.3 Modifikuojantys priedai

CS savybės gerinamos įvairios paskirties cheminiais priedais (įmaišomis). Modifikuojantys priedai leidžia valdyti technologinius procesus, fizikines ir mechanines bei eksploatacines SM savybes. Mišinių ruošimo metu įmaišos į CS yra dozuojamos nedideliais kiekiais (paprastai iki

5 % nuo rišiklio masės). Dėl riboto rišamosios medžiagos mišinyje tinkamumo, priedai yra naudojami pagerinti CS plastiškumą, paspartinti arba sulėtinti rišimosi greitį, vandens atsiskyrimui ir sluoksniavimuisi sumažinti, taip pat didinti mišinio nelaidumą vandeniui, atsparumą stipriui gniuždant ir lenkiant, šalčiui, aplinkos ir cheminiam poveikiui kt. Įmaišų veiksmingumas priklauso nuo jos gebėjimo pakeisti mišinio ar sukietėjusios medžiagos savybes. Kaip modifikuojantis priedas, įmaišos veikia ir cemento hidrolizę bei hidratacijos procesus, taip pat rišamųjų medžiagų struktūros susidarymą [11–24].

Priedai naudojami CS ir SM gamyboje skirstomos į cheminius ir mineralinius pagal LST EN 934–2:2012 standartą:

1.1 lentelė. Cheminių ir mineralinių priedų klasifikacija (pagal LST EN 934–2:2012) [32]



Pasaulyje pastaruoju metu gaminama daug įvairių įmaišų, skirtų konkrečioms statybinių mišinių variantams: betonams, mūro mišiniams, klijams, SM, akytiems betonams, keramikos dirbiniams ir kt.. Įmaišos suteikia dirbiniams ir konstrukcijoms naujų savybių, iš esmės gerina technologinius procesus ir užtikrina dirbinių ilgaamžiškumą. Vienas svarbiausių įmaišiniams cheminiams priedams keliamų bendrųjų reikalavimų yra vienalytiškumas [33].

Dažniausiai CS ir SM gamyboje naudojami priedai: plastikliai, redisperguojančios, vandens atsiskyrimą mažinančios medžiagos, rišimosi greitikliai ir kt. [27–33].

Plastikliai naudojami kaip vandens kiekį mažinantys ir plastiškumą didinantys priedai cemento pagrindu pagamintiems mišiniams. Naudojant šią įmaišą, nekeičiant konsistencijos galima gerokai sumažinti vandens kiekį (daugiau kaip 12 %) betono mišinyje, arba nekeičiant vandens kiekio, gerokai padidinti betono mišinio slankumą ir sklidumą, arba gauti abu rezultatus kartu. Plastikliai padidina skiedinio mišinių slankumą keletą kartų (6–8), pagerina mechaninį gniuždomąjį stiprį, mišiniai neišsisluoksniuoja. Plastifikuojanti įmaiša veikia 40–50 min,

priklausomai nuo cemento rūšies ir jo kiekio mišinyje. Vėliau pagamintas mišinys praranda savo pirmąslį slankumą, tampa standus, todėl naudojamas ten, kur gamybos technologija leidžia suformuoti gaminius [10, 33, 34].

Vandens atskyrimą mažinančios įmaišos, kurias įdėjus vandens atsiskiria mažiau arba jo visai neatsiskiria. Įmaišos, tokios kaip metilceliuliozė (MC), leidžia mišiniuose sulaikyti vandenį esant 4–40 °C temperatūrai. Šios įmaišos mažina sedimentaciją (stambesnių dalelių nusėdimą), sukietėjusio mišinio susitraukimą, ilgina atvirą naudojimo laiką, didina mišinio sukibimą su pagrindu. Naudojant metilceliuliozės įmaišas cemento pagrindo mišiniuose galima sumažinti vandens/cemento santykį, nesumažinant jų slankumo [10, 33].

Redisperguojamieji (RDP) polimero latekso milteliai ant mineralinių medžiagų sudaro matricos polimerinę standžią arba elastingą plėvelę. Padidėja mišinio dalelių sukibimas, sumažėja akytumas. Tai papildoma rišamoji medžiaga, nekeičianti pagrindinių rišamųjų medžiagų (cemento, gipso) hidratacijos greičio [10]. RDP įmaiša suteikia statybiniam skiediniams elastingumą (susirišusiam mišiniui), lipnumo (šviežiam mišiniui), formuoja polimerinę matricą visame gaminio tūryje mažindama vandens įgertį, tačiau lėtina cemento rišimosi greitį ir veikia kaip papildoma rišamoji medžiaga. Specifinė RDP polimero cheminė sudėtis leidžia įmaišą naudoti net žemose temperatūrose ir užtikrinti gerą rišamosios medžiagos sukibimą su užpildais. Dėl šių savybių RDP plačiai naudojama plytelių kliju, cementinių skiedinių ir sausųjų statybinių mišinių pramonėje [31, 33,].

Į mišinį dedami rišimosi greitikliai skatina cemento rišimąsi ir kietėjimą, didėja pradinis kietėjimo stipris. Įmaiša greitina cemento kietėjimą ir tinka naudoti esant net neigiamai temperatūrai. Rekomenduojama naudoti 2–4 % nuo cemento masės, tačiau nerekomenduojama jo dėti daugiau kaip 0,3–0,7 % sausojo mišinio masės. Dėl greitesnio rišamosios medžiagos kietėjimo, skiedinių gniuždomasis stipris padidėja jau po 6 vanadų kietėjimo. Įdėjus 2 % įmaišos (cemento masės) stipris padidėja 100 %, o įdėjus 4 % (cemento masės) padidėja iki 300 %, lyginant kietėjančio mišinio gniuždomąjį stiprį be įmaišos. Vėliau stiprumo didėjimas sulėtėja ir po dviejų parų kietėjimo yra didesnis atitinkamai 14 % ir 30 %. Priedą rekomenduojama maišyti į CS ar SM gaminamus su paprastu, pucolaniniu ir šlakiniu portlandcemenčiu [10, 33, 35].

Efektyviausias ir paprasčiausias būdas pakeisti CS savybes, pagerinant jo kokybę, yra sukurti technologijas panaudojant cheminius modifikuojančius priedus. Šiuolaikinėje betono gamybos technologijoje cheminiai priedai tampa tokie pat svarbus, kaip ir rišamosios medžiagos, užpildai ir vanduo betono mišinyje. Priedų naudojimas yra efektyviausias būdas gauti kuo geresnės kokybės betoną, nenaudojant labai didelių išlaidų [10, 32, 33].

1.3 Statybinių atliekų panaudojimas cementinių skiedinių gamyboje

CS gamyboje naudojamo stambiojo ir smulkiojo užpildo kilmė gali būti įvairi. Mokslininkai savo darbuose yra išnaginę tokias medžiagas kaip stiklo laužas, aukštakrosnių pelenai, medienos atliekos, susmulkintos klinties ir betono atliekų mišinys, vulkaninių pelenų penza. Atlikus literatūros šaltinių apžvalgą, išskiriamos dvi pagrindinės antrinių žaliavų panaudojimo betonuose kryptys. Pirmą kryptį – mechaniškai, termiškai ir kitaip apdirbtų atliekų panaudojimas keičiant rišančiąją medžiagą – cementą antrinėmis žaliavomis. Antra kryptis – panaudoti apdorotas atliekas kaip dirbtinus užpildus betonui gaminti [36].

M. Tumosa, M. Daukšys ir E. Ivanauskas tyrė granito atsijų, kaip smulkiojo užpildo, įtaką betono mišinio technologinėms savybėms, iš šių mišinių suformuotų skelto paviršiaus betono plytų fizikinėms mechaninėms savybėms ir ilgaamžiškumui. Mokslininkai ištyrė kelių apdailinėms skelto paviršiaus betono plytomis gaminti skirtų betono mišinių sudėtis. Kaip smulkusis užpildas mišiniuose buvo naudotas 0/4 frakcijos smėlis, 0/2 frakcijos granito atsijos ir 50 % 0/4 frakcijos smėlio, pakeisto 0/2 frakcijos granito atsijomis pagal tūrį mišinį [37].

Darbe buvo nustatyta, kad betono bandinių gniuždymo stipris, kai smulkiuoju užpildu naudojamas 0/4 frakcijos smėlis, kurio 50 % 0/4 frakcijos smėlio pakeista 0/2 frakcijos granito atsijomis pagal tūrį, atitinka C40/50 projekcinę betono stiprio klasę. Kai smulkiuoju užpildu naudojamos tik 0/2 frakcijos granito atsijos, betono projekcinė stiprumo klasė neatitinka C40/50. Šiuo atveju naudojant smuklesnį užpildą, tai yra 0/2 frakcijos granito atsijas, reikėjo didinti cemento kiekį, norint užtikrinti reikiamą bandinių gniuždymo stiprį. Tačiau mokslininkų tyrimo tikslas buvo įvertinti granito atsijų įtaką betono savybėms, išlaikant vienodą cemento kiekį esant skirtingoms betono mišinio sudėtims [37].

Taip pat tyrėjai nustatė, kad tinkamai parinkus santykį smulkiajame užpilde tarp smėlio ir įvairios spalvos granito skaldos, galima gauti įvairių atspalvių skeltą betono paviršių ir pagaminti apdailines skelto paviršiaus betono plytas pagal užsakovo pageidavimus [37].

K. Jočio ir kt. darbo tikslas buvo nustatyti modifikuotos ceolitinės atliekos (MCA) įtaką cementinio akmens pagrindinėms savybėms. Mokslininkai savo darbe tyrė portlandcemenčio (CEM I, 52, 5R) ir modifikuoto naftos krekingo katalizatoriaus (ceolito Y) atliekos mišinių stiprumines savybes. Cementiniams mišiniams ruošti buvo parinktas optimalus cemento (arba cemento su ceolitu) ir vandens santykis ($V/K = 0,4$), kuris buvo naudojamas visuose tirtuose bandiniuose. Ceolitinės atliekos priedo kiekiai cementiniuose bandiniuose kito nuo 10 iki 30 %. Taip pat darbe nustatyta malimo įtaką tiriamiems cementiniams mišiniams [31].

Malto portlandcemenčio su MCA stipris gniuždamas po 7 parų mažėja nuo 77 iki 52 MPa. Nenaudojant mechaninio apdorojimo, t. y., malimo, cementinio akmens su 10 % MCA stipris

gniuždant padidėja nuo 67 iki 76 MPa, o su 30 % MCA stipris gniuždant mažėja iki 50 MPa, lyginant su kontroliniu bandiniu. Be to, malant rutuliniu malūnu portlandcementį su MCA, pastebėta, kad temperatūra malūne padidėjo. Tai galima paaiškinti tuo, kad didėjant dalelių savitajam paviršiui prasidėjo portlandcemenčio hidratacijos reakcija. Ceolite esantis vanduo pradėjo reaguoti su portlandcemenčiu ir hidratacijos procesas prasidėjo anksčiau numatyto laiko [31].

Mechaniškai apdorotų, t. y., maltų 20 min, bandinių stipris gniuždant po 7 parų mažėja. Tačiau nemaltų cementinių mišinių stipris gniuždant didėja su 10 % MCA. Be to, malant rutuliniu malūnu portlandcementį su MCA, pastebėta, kad temperatūra malūne padidėjo. Tai reiškia, jog pakito dalelių savitasis paviršius ir hidratacija prasidėjo anksčiau numatyto laiko. Nustatyta, kad 20 min yra per ilga trukmė malti MCA ir portlandcemenčio mišinius. Tikslinga būtų trumpinti mechaninio apdorojimo trukmę [31].

T. Felixkala ir P. Partheeban nagrinėjo betono mišinių savybes, pakeitus dalį cemento pramonėje ir energetikoje gaunamais šalutiniais produktais, tokiais kaip silicio dioksido milteliai, lakieji pelenai, aukštakrosnių šlakai ir plastifikuojančios medžiagos, bei naudojant granito atsijas kaip užpildą. Darbe buvo tiriama betono mišinių mechaninės savybės išlaikant vienodą rišamosios medžiagos kiekį ir keičiant granito atsijų kiekį mišinyje atitinkamai mažinus smėlio kiekį. Bandymų rezultatai aiškiai parodė, kad keičiant smėlį granito atsijomis, mechaninės betono mišinių savybės gerėja. Mokslininkai nustatė, kad pakeitus smėlio kiekį 25 % betono atsijomis, stipris gniuždant padidėja 9 % lyginant su mišiniu, kuriame nėra granito atsijų priedo. Taip pat pagerėja mišinių, kuriuose yra granito atsijų, atsparumas tempimui ir padidėja elastingumo modulis [19].

Apibendrinant literatūros apžvalgą, galima teigti, kad CS mišinių gamyba yra sudėtingas procesas, kurio metu yra suvartojama daug energijos, iškastinių žaliavų ir į aplinką išmetami didžiuliai kiekiai neigiamą poveikį aplinkai turinčių CO₂ dujų. Todėl labai svarbu nustatyti formavimo mišinį sudarančių komponentų įtaką formavimo masės savybėms ir parinkti optimaliausią mišinio sudėtį bei iširti geriausias savybes turintį galutinį produktą.

2. Medžiagos ir tyrimų metodai

2.1 Naudotos medžiagos

Granito atsijos

Darbe naudoti mineraliniai granito milteliai (mikroužpildas) iš UAB „Granitas“ (Kaunas). Frakcija 0–2 mm. Piltinis tankis 1,556 t/m³. Mineralinė ir cheminė sudėtis pateikta 3.1 skyriuje.

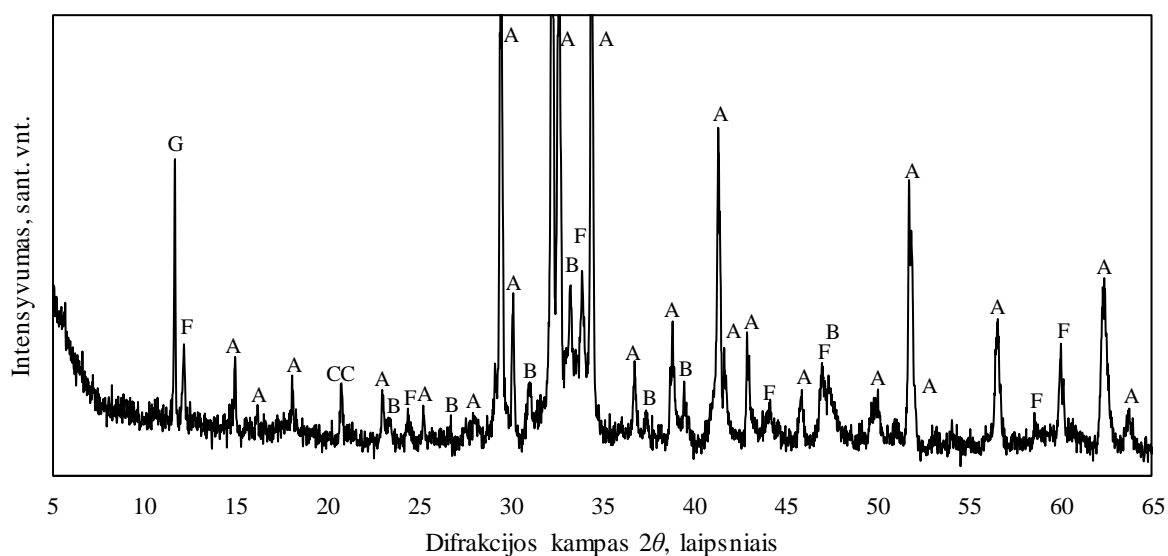
Rišamoji medžiaga

Tyrimams buvo naudotas AB „Akmenės cementas“ (Akmenė) pagamintas portlandcementis CEM I 42,5 N.

2.1 lentelė. Portlandcemenčio CEM I 42,5 N esminės charakteristikos (Akmenės cementas 2018) [38]

Esminės charakteristikos	Eksplotacinės savybės
Įprastiniai cementai	CEM I 42,5 N
Gniuždymo stipris, Mpa: ankstyvasis stipris	≥10,0
standartinis stipris	≥42,5 ≤62,5
Rišimosi pradžia, min	≥60
Tūrio pastovumas, mm	≤10
Kaitmenys, %	≤5,0
Netirpmenys, %	≤5,0
Sulfatų (SO ₃) kiekis, %	≤3,5
Chloridų kiekis, %	≤0,10
Šarmų kiekis, sk Na ₂ O ekv., %	≤0,8

CEM I 42,5 N cemento RSDA kreivėje identifikuoti pagrindiniai klinkerį sudarantys mineralai: alitas – Ca₃SiO₅ (PDF Nr. 00–042–0551, atstumas tarp atominių plokštumų d – 0,303; 0,277; 0,260 nm), belitas – Ca₂SiO₄ (PDF Nr. 04–02–634, d – 0,269; 0,228 nm), braunmileritas – 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ (PDF Nr. 04–011–5940, d – 0,264; 0,194 nm). Taip pat rentgenogramoje aptinkami ir kiti mineralai: gipsas – CaSO₄·2H₂O (PDF Nr. 04–015–4421, d – 0,765 nm), ir kalcitas – CaCO₃ (PDF Nr 00–046–1045, d – 0,303; 0,228; 0,192 nm).



2.1 pav. Cemento RSDA kreivė. Čia: G – gipsas, A – alitas, B – belitas, F – braunmileritas, CC – kalcitas

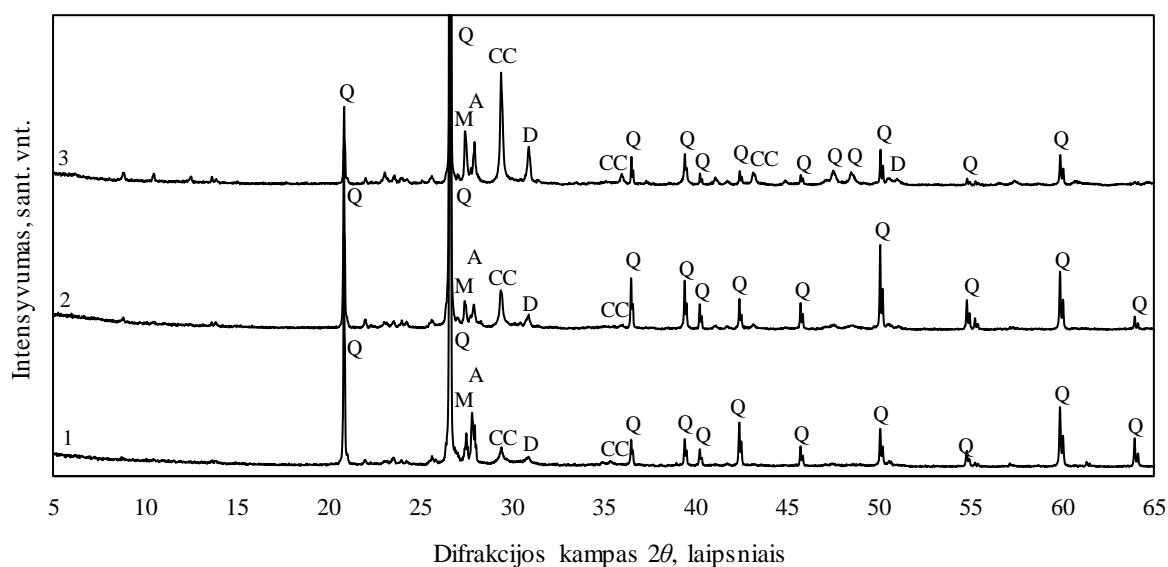
Smėlis

Tyrimams naudotas Giraitės 1 (Varėnos r.) telkinio 0/0,5, 0,5/1 ir 1/4 frakcijų smėlis. Smėlio kokybę reglamentuojantis standartas – LST EN 1273–92 [39].

2.2 lentelė. Smėlio esminės charakteristikos

Esminės charakteristikos	Eksplotacinės savybės
SiO ₂ kiekis, %	87
Molingų dalelių kiekis (∅ < 0,05 mm), %	1,12
R ₂ O ₃ , %	0,93
Kaitmenys, %	2,6
CaO, %	5,18
Drėgmė, %	3,2

Atlikus mišiniuose naudoto visų frakcijų smėlio RSDA kreivėse identifikuojamas silicio dioksidas – SiO₂ (PDF Nr. 00–046–1045, *d* – 0,335; 0,426; 0,245; 0,228; 0,182 nm), mikrolinas – KAlSi₃O₈ (PDF Nr 00–001–0705, *d* – 0,325; 0,385; 0,252 nm), kalcitas, albitas – NaAlSi₂O₈ (PDF Nr 00–009–0466, *d* – 0,405; 0,320; 0,296 nm) ir dolomitas – CaMg(CO₃)₂ (PDF Nr 00–036–0426, *d* – 0,405; 0,320; 0,296 nm).



2.2 pav. Skirtingų smėlio frakcijų RSDA kreivės: 1 – 0/0,5; 2 – 0,5/1; 3 – 1/4. Čia: Q – kvarcas, M – mikrolinas, A – albitas, CC – kalcitas, D – dolomitas

Pastifikuojanti įmaiša

Kaip plastifikuojanti medžiaga buvo pasirinktas „Basf“ (Vokietija) superplastiklis „Melment“. Tai baltos spalvos melamino sulforūgšties ir formaldehido kondensacijos milteliai. Piltinis tankis 450–750 g/l, pH = 9–11,4, dozuojaama 0,2–1,5 % cemento masės, tankis 500–800 kg/m³ [34].

Redisperguojanti įmaiša

Kaip vandens įgerį mažinantis, sukibimą ir lankstumą didinantis priedas, darbe buvo naudota X gamintojo redisperguojanti įmaiša. Tai baltos spalvos vinilacetato akrilo kopolimeras. Tūrinis tankis – 400–600 g/l, pelenų kiekis 12±2 %, pH 6–7.

Vandens atskyrimą mažinanti įmaiša

Kaip vandens atskyrimą mažinanti įmaiša darbe buvo naudota Y gamintojo metilceliuliozės priedas. Tai baltos spalvos milteliai, 2% tirpalo klampa 40,000–50,000 mPa·s.

Rišimosi greitiklis

Kaip cemento kietėjimo greitiklis darbe buvo naudotas kalcio formiato (CaF) įmaiša, kurios esminės charakteristikos ir eksploatacinės savybės pateiktos 2.3 lentelėje.

2.3 lentelė. Kalcio formiato eksplotacinės savybės [35]

Esminės charakteristikos	Eksplotacinės savybės
Grynumas, % (minimalus)	98,0
Kalcio kiekis, % (minimalus)	30,0
Drėgnis, % (maksimalus)	0,5
pH vertė	7,1–7,2
Savitasis tankis, kg/m ³ (20 °C)	2,023
Tūrinias tankis, kg/m ³	900–1000
Įmaišos tankis, kg/m ³	850–1150
Skilimo temperatūra, °C	daugiau nei 400

Kitos medžiagos: vanduo, acetonas.

2.2 Tyrimų metodai

2.2.1 Medžiagų struktūros tyrimų metodai

Vienalaikė terminė analizė (VTA)

VTA atlikta „Netzsch STA 409 PC Luxx“ terminiu analizatoriumi. Naudoti šie parametrai: temperatūros didinimo greitis – 15 °C/min. Temperatūros intervalas – 30–1000 °C, etalonas – tuščias Pt/Rh tiglis, atmosfera krosnyje – oras.

Rentgeno spinduliuotės difrakcinė analizė (RSDA)

RSDA atlikta difraktometru BRUKER AXS D8 ADVANCE. Naudota: spinduliuotė – CuK_α, filtras – Ni, detektoriaus judėjimo žingsnis 0,02 °, intensyvumo matavimo trukmė žingsnyje – 0,5 s, antodinė įtampa U_a = 40 kV, srovės stipris I = 40 mA. Rentgeno difrakcinės analizės matavimų tikslumas 2θ = 0,01 °.

Rentgeno spinduliuotės fluorescensinė analizė (RSFA)

Bandinių cheminė analizė atlikta rentgeno spinduliuotės fluorescensiniu spektrometru Bruker X-ray S8 Tiger WD. Naudotas rodžio (Rh) vamzdelis, antodinė įtampa U_a iki 60 kV, srovės stipris I iki 130 mA. Presuoti bandiniai matuoti helio atmosferoje. Matavimai atlikti naudojant SPECTRA Plus QUANT EXPRESS metodą.

Granulimetrinė sudėtis

Granulimetrinė sudėtis nustatyta sausuoju būdu, naudojant Cilas 1090 LD dalelių dydžių analizatorių intervale nuo 0,01 iki 500 μm , nešiklis – oras.

Piltinio tankio nustatymas

Bandinių piltinis tankis nustatytas automatinio tankio matuokliu Ultrapyc 1200 e. (Quantachrome instruments, JAV). Analizei naudotos helio dujos. Dujų piknometro kalibravimas atliktas naudojant mažą ($7,0699 \text{ cm}^3$) sferą. Analitinėmis svarstyklėmis $0,1 \mu\text{g}$ tikslumu pasverta tiriamoji medžiaga suberiama į 10 cm^3 tūrio bandinio celę, kuri įleidžiama į palyginamąją celę, esančią dujų piknometro viduje. Pasverto bandinio tūris turi sudaryti bent trečdalį viso celės tūrio, bet ne daugiau kaip pusė. Bandinio tankis ir tūris pateikiamas kaip trijų matavimų aritmetinis vidurkis. Tankio matavimo nuokrypis yra lygus $\pm 0,003 \%$

2.2.2 Mišinių tinkamumo tyrimų metodai cemento skiediniams

Cemento skiedinių bandinių paruošimas

CS paruošti buvo naudoti sausi užpildai. Rišamoji medžiaga, visų frakcijų smėlis, granito atsijos ir plastifikuojantis priedas buvo dozuojami pagal masę, vanduo buvo dozuojamas pagal turį. Vandens ir SM santykis V/SM buvo parinktas pagal normaliai tešlos konsistensijai reikalingą vandens kiekį. Vieno formavimo metu sunaudota 2 kg sausųjų medžiagų. Į mišinius buvo įterpiama granito atsijų užpildo koreguojant smulkiausios ir vidutinio smulkumo smėlio frakcijų kiekį. Maišymas atliktas su laboratoriniu plaktuvu Automax (įrenginys skirtas cementinių skiedinių ir gipsinei tešlai išmaišyti iki 5 litrų talpos (standartas LST EN 193–1:2016)) [40, 41]. Sudarytų mišinių sudėtis pateiktos 3.3 skyriuje.

Cemento skiedinių bandinių formavimas

Cemento skiedinių bandiniai formuojami $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ dydžio prizmėse tankinant bandinius laboratorinėje vibracinėje aikštelėje. Kratytuvo stalelio su svirtimis ir pritvirtinta forma suminė masė – $20,0 \pm 0,5 \text{ kg}$, kritimo aukštis – $15 \pm 0,3 \text{ mm}$, kritimo dažnis – 60 krestelėjimų per sekundę [42, 44]. Visi suformuoti bandiniai buvo kietinti 100 % santykinėje oro drėgmėje $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje 24 valandas. Išformuoti bandiniai toliau hidratuoti 7, 28 ir 96 paras vandenyje $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje. Visų bandinių hidratacija stabdoma susmulkintus bandinius užpylus acetonu, po to džiovinant $60 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ temperatūroje 2 h valandas (standartas LST EN 193–1:2016) [40].

Cemento skiedinių bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas

Cemento skiedinių bandinių gniuždomasis stipris buvo nustatytas pagal LST EN 12390-3:2009 standarto reikalavimus [42], hidraulinio presu „FORM + TEST MEGA 10-400-50“. Maksimali apkrova 250 kN, matavimų tikslumas $\pm 0,5\%$, jautrumas 10 kN, apkrovos greitis $0,1 \pm 0,05$ MPa·s. Vidutinė vertė apskaičiuota iš 3 bandinių gniuždomojo stiprio rezultatų.

Cemento skiedinių bandinių gniuždomojo stiprio verčių statistinis įvertinimas

Pagal LST EN 771-3:2011 reikalavimus, bandinių gniuždomojo stiprio rezultatai turi būti įvertinti statistiniais metodais [41, 43].

Pagrindinės gniuždomojo stiprio atitikties įvertinimo statistinės charakteristikos:

- vidutinis gniuždomasis stipris – gaminių gniuždomųjų stiprių aritmetinis vidurkis.

$$f_{cm} = \bar{x} - k \cdot S_x, \quad (2.1)$$

čia: \bar{x} – gniuždomojo stiprio aritmetinis vidurkis, MPa;

k – koeficientas kvantiliui $p = 50\%$, kai vienpusis pasiklivimo lygis 95% (žr. 2.4 lentelėje);

S_x – standartinis nuokrypis MPa.

2.4 lentelė. Koeficiento k vertės, atsižvelgiant į bandinių kiekį (n) [41]

n	3	5	7	10	12	15	20
k	1,69	0,87	0,73	0,57	0,52	0,45	0,39
Pastaba. Tarpiniam bandinių skaičiui taikoma tiesinė interpoliacija							

- bandinių stiprio gniuždant aritmetinis vidukis \bar{x} –:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2.2)$$

čia: $x_1, x_2, x_3, x_4 \dots x_n$ – pavienių bandinių stiprio gniuždant vertės;

n – sugniuždytų bandinių skaičius;

- bandinių stiprio gniuždant standartinis nuokrypis S_x :

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.3)$$

- charakteristinis gniuždomasis stipris – gniuždomasis stipris, atitinkantis gaminių gniuždomąjį stiprį, esant 5 % kvantiliui.

$$f_{ck} = \bar{x} - t_{\alpha n} \cdot S_x, \quad (2.4)$$

čia: f_{ck} – charakteristinis gniuždomasis stipris;

\bar{x} – gniuždomojo stiprio aritmetinis vidurkis, MPa;

$t_{\alpha n}$ – Stjudento koeficiento reikšmė 5 % kvantiliui (žr. 2.5 lentelėje);

S_x – standartinis nuokrypis, MPa.

2.5 lentelė. Stjudento koeficiento vertės, atsižvelgiant į bandinių kiekį (n) [41]

n	3	4	5	6	8	10	12	14	16	18	20
$t_{\alpha n}$	2,920	2,353	2,132	2,015	1,895	1,833	1,796	1,771	1,753	1,740	1,729
Pastaba. Tarpiniam bandinių skaičiui taikoma tiesinė interpoliacija											

- variacijos koeficientas – parodo santykinį bandymų rezultatų stabilumą ir tinka palyginti tiek skirtingų gaminių savybių, tiek tos pačios savybės stabilumą, esant sirtingoms vidutinėms vertėms.

$$V = \frac{S_x}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

Bandinių gniuždomasis stipris nustatomas unifikotu metodu pagal LST EN 772–1 standartą. Apskaičiuojant deklaruojamąsias vertes, numatoma, kad gniuždomojo stiprio bandymo rezultatai pasiskirsto pagal atsitiktinių dydžių normaliojo pasiskirstymo dėsnį, t. y. pavienių gaminių gniuždomojo stiprio verčių skirstinys yra normalus ir simetriškas aritmetinio vidurkio atžvilgiu [41, 43, 44].

Cemento skiedinių bandinių lenkiamojo stiprio nustatymas

Cemento skiedinių bandinių lenkiamasis stipris buvo nustatytas pagal LST EN 12390–5:2009 standarto reikalavimus [45], hidrauliniu presu „FORM + TEST MEGA 10–400–50“.

2.2.3 Mišinių tinkamumo tyrimų metodai plytelių kljams

Plytelių kljū bandinių paruošimas

Plytelių kljū mišiniam paruošti buvo naudoti sausi užpildai. Cementas, 0/0,5 frakcijos smėlis, redisperguojanti įmaiša, kalcio formiatas bei metilceliuliozės priedas buvo dozuojami pagal masę, vanduo buvo dozuojamas pagal turį. Vandens ir SM santykis V/SM buvo parinktas pagal normaliai tešlos konsistensijai reikalingą vandens kiekį. Maišymas atliktas laboratoriniu

plaktuvu Automax. Pagrindiniai intensyvaus maišytuvo parametrai: 140 ± 5 aps./min, 62 ± 5 plan./aps. Tyrimams buvo naudotas minimalus 4 l plytelių klijų sausojo mišinio (LST EN 12004–2:2017). Mišinio sudėtis pateikta 3.4 lentelėje [45].

Plytelių klijų bandinių šviežio skiedinio konsistencijos (sklidumo metodu) nustatymas.

Sklidumo vertė nustatoma pagal šviežio skiedinio bandinio pasklidimo skersmens vidurkį, šviežią skiedinį supilant ant standartinio kratymo stalelio disko į standartinių matmenų formą ir sukrečiant nustatytą skaičių vertikaliais smūgiais, kratymo stalelį pakeliant ir leidžiant jam laisvai kristi iš nustatyto aukščio (LST EN 12004) [45].

Forma (nupjautinio kugio forma, pagaminta iš plieno arba bronzos, $60\pm 0,5$ mm aukščio; formos vidinis skersmuo apačioje $100\pm 0,5$ mm ir $70\pm 0,5$ mm viršuje) padedama kratymo stalelio disko centre ir dviem sluoksniais užpildoma skiediniu, kiekvieną sluoksnį sutankinant mažiausiai 10 karų, paspaudžiant plūktuvu (plūktuvas, sudarytas iš standaus, vandens neįgeriančio strypo, apytikriai 40 mm apskritimo skersmens ir 200 mm ilgio; plūkiamasis paviršius plūktuvo gale turi būti plokščias ir statmenas išilginei plūktuvo ašiai; plūktuvo masė turi būti $0,250\pm 0,015$ kg) ir užtikrinant, kad formos būtų užpildytos vienodai. Užpildymo metu forma viena ranka tvirtai prispaudžiama prie disko. Skiedinio perteklius nubraukiamas išlyginimo peiliu, laisvoji disko zona švariai nuvaloma ir nusausinama, ypač atidžiai nušluostant vandenį aplink formos pagrindą. Po apytikriai 15 s forma lėtai pakeliama vertikalia kryptimi, kratymo stalelis 15 kartų pastoviu dažnumu sukrečiamas apytikriai vieną kartą per sekundę ir leidžiama skiediniui pasklisti ant disko. Skiedinio pasklidimo skersmuo išmatuojamas dviem viena kitai statmenomis kryptimis, naudojant slankmatį, kuriuo galima išmatuoti skersmenį iki 300 mm 1 mm tikslumu [10, 45].

Plytelių klijų bandinių šviežio skiedinio slankumo nustatymas

Slankumo vertė nustatoma pagal šviežio skiedinio trijų bandinių slankumo nuotolio vidurkį (LST EN 12004–2) [46]. Plytelių klijų skiedinio slankumo nustatymas yra atliekamas ant betoninės plokštelės. Prie vieno jos šono spaustukais pritvirtinama plieninė plokštelė. Dantytu glaistikliu (matmenys $6\times 6\times 12$ mm) 60° kampu ant betoninės plokštės tolygiai užtepamas storas klijų sluoksnis taip, kad sutaptų su pritvirtinta plienine plokštele. Ant užteptų klijų sluoksnio uždedamo trys keraminės plytelės (sausos, presuotos, vandens adsorbcija $\leq 0,5$ % masės, neglazūruotos, plokščiu priklijavimo paviršiumi, matmenys $100\times 100\pm 1$ mm, storis 8–10 mm), kurios 30 ± 5 s prislegiamos $50\pm 0,1$ N apkrova. Pašalinus apkrovą išmatuojamas atstumas tarp plieninės plokštelės ir kiekvienos plytelės trijuose taškuose. Atlikus matavimą, betoninė plokštė verčiama į vertikalią padėtį taip, kad priklijuotos plytelės būtų plokštės viršuje ir išlaikoma

20±2 min. Po išlaikymo, plokštė gražinam į horizontalia padėtį. Analogiškai išmatuojamas atstumas tarp plieninės plokštelės ir kiekvienos plytelės trijuose taškuose [45, 46].

3. Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

3.1 Granito atsijų cheminė ir mineralinė sudėtis

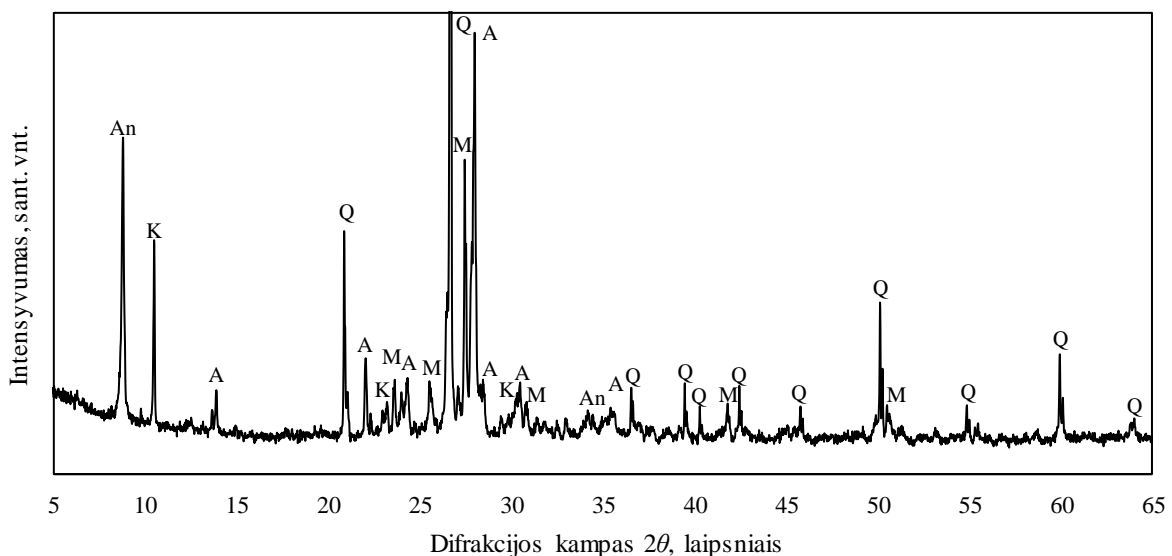
Pirmajame tyrimų etape ištirta tyrimuose naudotų granito atsijų cheminė ir mineralinė sudėtis.

Remiantis RSFA metodu (žr. 3.1 lentelė) nustatyta, kad granito atsijose vyrauja silicio elementas, kuris sudaro 16,6 % medžiagos masės. Taip pat atlikoje nustatyta ir geležies – 5,65 %, aliuminio – 3,64 %, kalio – 3,55 %, kalcio – 2,80 % ir kt. elementų.

3.1 lentelė. Granito dulkių elementinė sudėtis

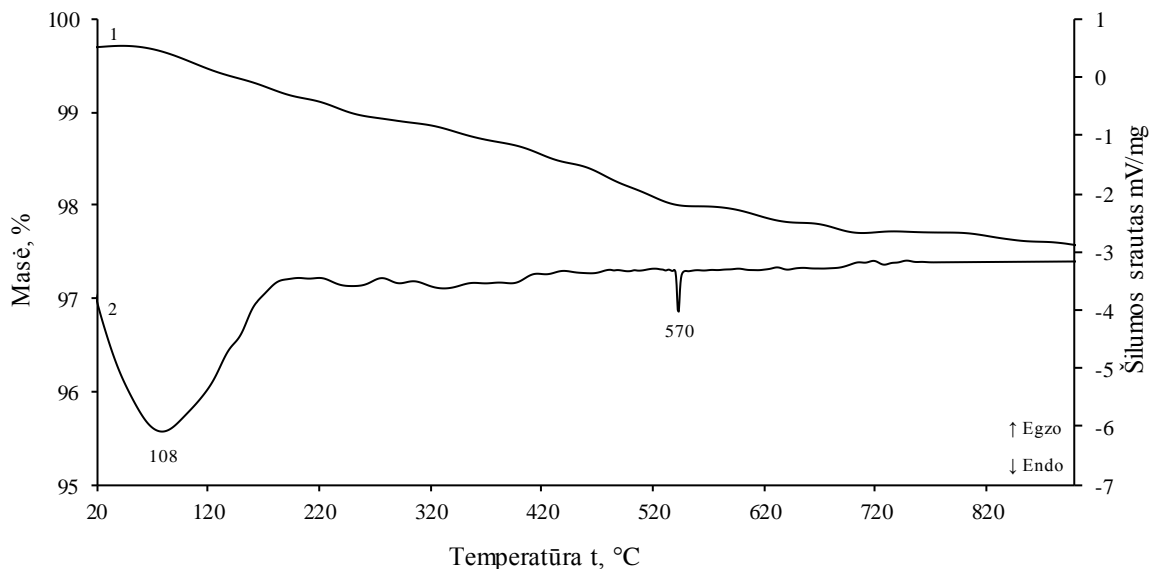
Si	Fe	Al	K	Ca	Ti	Mg	Na	P	Ba
16,6%	5,65%	3,64%	3,55%	2,80%	0,59%	0,47%	0,36%	0,37%	0,22%

Šiuos rezultatus patvirtina ir RSDA (žr. 3.1 pav.), kuri parodė, kad granito atsijose vyrauja silicio komponentą turintis junginys – kvarcas. Granito atsijose taip pat indentifikuotas kordieritas – $(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_2\text{Si}_5\text{O}_{18}$ (PDF Nr. 00–041–1489, $d = 0,845$ nm) kurio cheminėje sudėtyje be silicio komponento yra aliuminio, magnio ir/ar geležies elementų, bei anitas – $\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH,F})_2$ (PDF Nr. 00–042–1489, $d = 1,01; 0,337$ nm). RSDA kreivėje identifikuoti mažo intensyvumo difrakciniai maksimumai, būdingi ir kitiems junginiams: mikrolinas, kalcitas, albitas – $\text{NaAlSi}_2\text{O}_8$ (PDF Nr 00–009–0466, $d = 0,405; 0,320; 0,296$ nm).



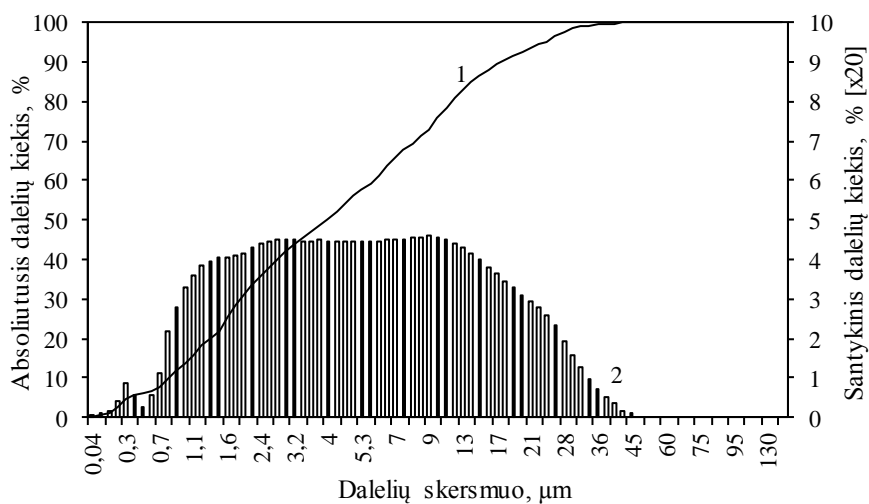
3.1 pav. Granito atsijų RSDA kreivė. Čia: X – anitas, Y – kordieritas, A – albitas, Q – kvarcas, M – mikrolinas, CC – kalcitas

Atlikus vienalaikę terminę analizę, DSK kreivėje (žr. 3.2 pav.) identifikuotas ~108 °C temperatūroje ryškus endoterminis efektas, apibūdinantis kristalizacinio vandens pašalinimą. Kitas endoterminis efektas ~570 °C temperatūroje priklauso kvarco alotropinės atmainos virsmui iš α į β , kuris nėra susijęs su masės pokyčiu, nes TGA kreivėje masės sumažėjimas yra mažesnis nei 0,002 %. Bendri masės nuostoliai 20–920 °C intervale sudaro 2,16 %.



3.2 pav. Granito atsijų TGA (1 kr.) ir DSK (2 kr.) kreivės

Be to, remiantis granito atsijų granulimetrine sudėtimi, nustatyta, kad atliekoje vyrauja dalelės, kurių skersmuo kinta 0,7–17,5 μm intervale.



3.3 pav. Granito atsijų granulimetrinė sudėtis. Čia: 1 – absoliutūs dalelių kiekis, 2 – santykinis dalelių kiekis

3.2 Plytelių klijų mišinio sudėties optimizavimas

Įvertinus granito atsijų cheminę ir mineralinę sudėtį, buvo nuspręsta iširti šios atliekos panaudojimo galimybes plytelių klijų mišinių gamyboje. Dėl to antrajame tyrimų etape buvo gaminamas plytelių klijų mišinys su mažiausiu rišamosios medžiagos ir optimaliausiu priedų kiekiu. Vėliau nustatius optimalią plytelių klijų sudėtį įmaišyta kaip priedas granito atsijų atlieka, koreguojant užpildo kiekį.

Atlikus literatūrinę duomenų analizę ir bendradarbiaujant su UAB „Simpras“ technologais bei KTU universiteto statybos ir architektūros fakulteto mokslininkais, tyrimo objektu buvo pasirinkta plačiai rinkoje naudojamų plytelių klijų receptūra. Siekiant iširti norimų į rinką įvesti modifikuojančių priedų efektyvumą, receptūros procentinė sudėtis keista 2–5% intervale (žr. 3.2 lentelėje). Tikėtina, kad tokios sudėties plytelių klijai pasižymės dideliu elastingumu, sukibimo jėga (tinkami didelių formų plytelių klijavimui, užtikrina atramą, išvengiama susidariusių tuščių ertmių), ilgesniu atviro naudojimo laiku.

3.2 lentelė. Eksperimentinė plytelių klijų mišinio sudėtis

Žaliava	Sudėtis, %
Rišamoji medžiaga	45–50
Smėlis (0/0,5 fr.)	Iki 100
MC	0,35–0,5
RDP	2–5
CaF	0,30

Plytelių klijų gaminių fizikines ir mechanines savybes didžiąja dalimi lemia rišamosios medžiagos ir cheminių modifikuojančių įmaišų kiekis mišinyje (žr. 3.3 lentelėje). Šie mišinio komponentai nulemia susidarančių cementuojančių sistemų sudėtį, kiekį bei gaminio savikainą.

3.3 lentelė. Cementinio skiedinio žaliavų vidutinė rinkos kaina

Žaliava	Vidutinė rinkos kaina €/t, (kainos nuokrypis priklauso nuo tiekėjo)
Rišamoji medžiaga	80±50
Užpildas	10±5
*Redisperguojanti medžiaga	2000±600
Kalcio formiatas	300–500±100
*Metilceliuliozė	5500±1600
Granito atsijos	30±10

*brangiausi mišinio komponentai, turintys didelę įtaką plytelių klijų savikainai

Nustatyta, kad koreguojant metilceliuliozės priedo ir redisperguojančios įmaišos kiekį, galima mažinti rišamosios medžiagos ir koreguoti smulkiojo užpildo kiekius sausajame plytelių klijų mišinyje.

Plytelių klijų receptūra modifikuota trimis etapais:

1. išlaikant mažiausią MC ir RDP kiekį mišinyje, keičiant rišamąją medžiagą užpildu;
2. išlaikant didžiausią MC ir mažiausią RDP kiekį mišinyje, keičiant rišamąją medžiagą užpildu;
3. keičiant RDP kiekį, išlaikant optimaliausią MC ir rišamosios medžiagos kiekį mišinyje.

Išlaikant procentinę mišinio sudėtį koreguojamas užpildo kiekis.

Siekiant nustatyti mažiausio MC priedo kiekio įtaką plytelių klijų gaminių savybėms buvo sudaryti 6 mišiniai. Pradiniuose mišiniuose rišamosios medžiagos kiekis buvo keičiamas nuo 45 iki 50 %, o smėlio kiekis nuo 52,35 iki 47,35 %. MC ir RDP kiekis atitinkamai buvo išlaikomas 0,35 ir 2 % (žr. 3.4 lentelėje).

3.4 lentelė. Plytelių klijų mišinio sudėtis didinant rišamosios medžiagos kiekį, esant mažiausiam MC priedo kiekiui mišinyje

Žaliava	Sudėtis, %					
	C2TE-1*	C2TE-29	C2TE-57	C2TE-85	C2TE-113	C2TE-141
Rišamoji medžiaga	45	46	47	48	49	50
Smėlis	52,35	51,35	50,35	49,35	48,35	47,35
MC	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
RDP	2	2	2	2	2	2
CaF	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

*Mišinio žymėjimas

Vandens ir sausojo mišinio santykis V/SM buvo parinktas pagal normaliai tešlos konsistensijai reikalingą vandens kiekį (žr. 3.5 lentelėje). Vanduo mišinyje buvo dozuojamas pagal sauso mišinio tūrį.

3.5 lentelė. Vandens kiekis procentais plytelių klijų mišinyje pagal mišinio tūrį

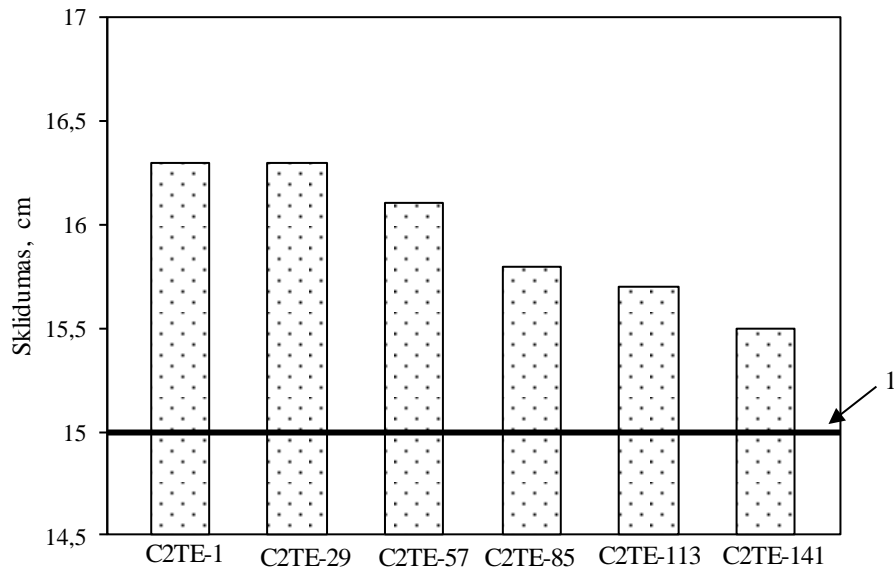
	C2TE-1	C2TE-29	C2TE-57	C2TE-85	C2TE-113	C2TE-141
Vandens kiekis, %	28	28	27	27	26	26

Pagal eksperimentinių plytelių klijų bandinių gniuždomojo stiprio verčių statistinį vertinimą (LST EN 771) nustatytas gaminių gniuždomojo stiprio verčių pasiklivimo lygis (žr. 3.6 lentelėje). Apskaičiuotas visų plytelių klijų mišinių gniuždomojo stiprio aritmetinis vidurkis – 5,59 MPa. Bandinių gniuždomojo stiprio vidutinis standartinis nuokrypis lygus 0,04 MPa. Standartinis nuokrypis parodo, kad pavienės bandinių reikšmės yra gretimos vidurkiui, kuris charakterizuoja duomenų centrą, atžvilgiu. Gniuždomojo stiprio kitimas (variacija), kuri apibūdinama variacijos koeficientu, yra nedidelė, nes apskaičiuota vertė (1,37 %) yra mažesnė nei 10 %. Taip pat apskaičiuoti plytelių klijų bandinių vidutinis (5,57 MPa) ir charakteristinis (5,51 MPa) gniuždomieji stipriai. Rezultatai parodo, kad tokio gniuždomojo stiprio bandiniai, kurių tikimybė suirti, pasiekus apkrovą, neviršija 5 %.

3.6 lentelė. Plytelių klijų bandinių gniuždomojo stiprio statistinis įvertinimas

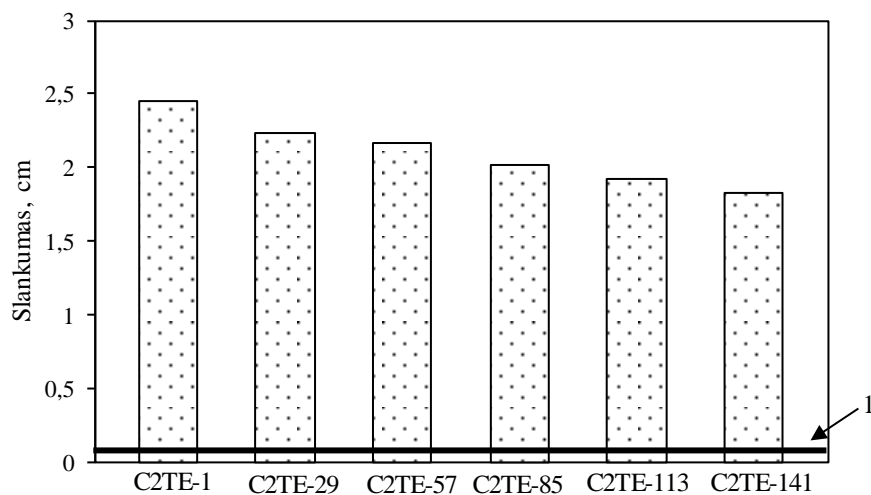
Bandinio Nr.		Matmenys, mm			Stipris lenkiant, kN	Bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas				
		Ilgis	Plotis	Aukštis		Stipris gniuždant x_i , MPa	$(x_i - \bar{x})^2$			
C2TE-1	1	160	40	40	2,45	5,82	0,05			
	2				2,49	5,78	0,03			
	3				2,51	5,98	0,15			
C2TE-29	1				2,68	5,45	0,02			
	2				2,65	5,67	0,01			
	3				2,67	5,49	0,01			
C2TE-57	1				2,57	5,34	0,06			
	2				2,57	5,69	0,01			
	3				2,32	5,34	0,06			
C2TE-85	1				2,48	5,78	0,03			
	2				2,52	5,69	0,01			
	3				2,47	5,58	0,00			
C2TE-113	1				2,48	5,59	0,00			
	2				2,47	5,54	0,00			
	3				2,49	5,67	0,01			
C2TE-141	1				2,46	5,32	0,08			
	2				2,59	5,48	0,01			
	3				2,57	5,48	0,01			
Bandinio vidurkis					2,52	5,59	0,03			
Bandinio gniuždomojo stiprio variacijos koeficientas: V , %							1,37			
Vidutinis standartinis nuokripis: S_x , MPa							0,04			
Plytelių klijų gaminių charakteristinis gniuždomasis stipris: f_{ck} , MPa							5,51			
Plytelių klijų gaminių vidutinis gniuždomasis stipris: f_{cm} , MPa							5,57			

Tęsiant plytelių klijų atitikties parametrų tyrimą, atliktas sklidumo tyrimas. Iš 3.4 paveiksle pateiktų kreivių matyti, kad pradinių plytelių klijų sklidumo rezultatai mažai skiriasi. Optimali plytelių klijų sklidumo vertė yra $15 \pm 0,5$ cm (LST EN 12004). Šį parametą atitinka C2TE-141 plytelių klijų mišinys. Eksperimentinių mišinių slankumo vertė nustatyta 3,3–8,7 % didesnė nei nurodyta standarte (žr. 3.4 pav.).



3.4 pav. Plytelių klijų sklidumas didinant rišamosios medžiagos kiekį, esant mažiausiam MC kiekiui mišinyje. Čia: 1 – rekomenduojama sklidumo vertė pagal LST EN 12004 standartą

Atlikus plytelių klijų slankumo vertinimą, ištirta, kad nei vienas iš pagamintų eksperimentinių mišinių neatitiko LST EN 12004 standarte numatytų reikalavimų (žr. 3.5 pav.). Didžiausia leistina plytelių klijų slankumo vertė yra $\leq 0,5$ mm. Eksperimentinių bandinių sklidumo vertė kito nuo 1,83 iki 2,45 cm.



3.5 pav. Plytelių klijų slankumas didinant rišamosios medžiagos kiekį, esant mažiausiam MC kiekiui mišinyje. Čia: 1 – rekomenduojama slankumo vertė pagal LST EN 12004 standartą

Nustatyta, kad eksperimentinėje plytelių klijų receptūroje didinant rišamosios medžiagos kiekį ir išlaikant minimalų MC priedo kiekį, standartinį sklidumo parametras atitiko tik C2TE–41 mišinys, kurio sudėtyje yra 50 % rišamosios medžiagos. Tačiau nei vienas bandymamas sukurtas mišinys netenkino slankumo parametro vertės reikalavimų. Nustatyta, kad tokia plytelių klijų sudėtis nėra tinkama sausojo mišinio gamybai.

Atsižvelgiant į pirminius tyrimų rezultatus, nuspręsta tolimesniuose tyrimų etapuose iširti, kaip kinta plytelių klijų eksploataciniai parametrai, keičiant rišamosios medžiagos kiekį ir išlaikant didžiausią numatytą MC kiekį eksperimentiniuose mišiniuose, kuriuose rišamosios medžiagos kiekis buvo keičiamas nuo 45 iki 50 %, o užpildo kiekis nuo 52,2 iki 47,2 %. MC ir RDP kiekis atitinkamai buvo išlaikomas 0,5 % ir 2 % (žr. 3.7 lentelė).

3.7 lentelė. Plytelių klijų mišinio sudėtis didinant rišamosios medžiagos kiekį, esant didžiausiam MC priedo kiekiui mišinyje

Žaliava	Sudėtis, %					
	C2TE–4	C2TE–32	C2TE–60	C2TE–88	C2TE–116	C2TE–144
Rišamoji medžiaga	45	46	47	48	49	50
Smėlis	52,2	51,2	50,2	49,2	48,2	47,2
MC	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
RDP	2	2	2	2	2	2
CaF	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Mišiniui paruošti, vanduo dozuojamas pagal sauso mišinio tūrį, V/SM parenkamas normaliai teslos konsistencijai pasiekti (žr. 3.8 lentelėje).

3.8 lentelė. Vandens kiekis procentais plytelių klijų mišinyje pagal mišinio tūrį

	C2TE–1	C2TE–29	C2TE–57	C2TE–85	C2TE–113	C2TE–141
Vandens kiekis, %	26	25	25	24	22	21

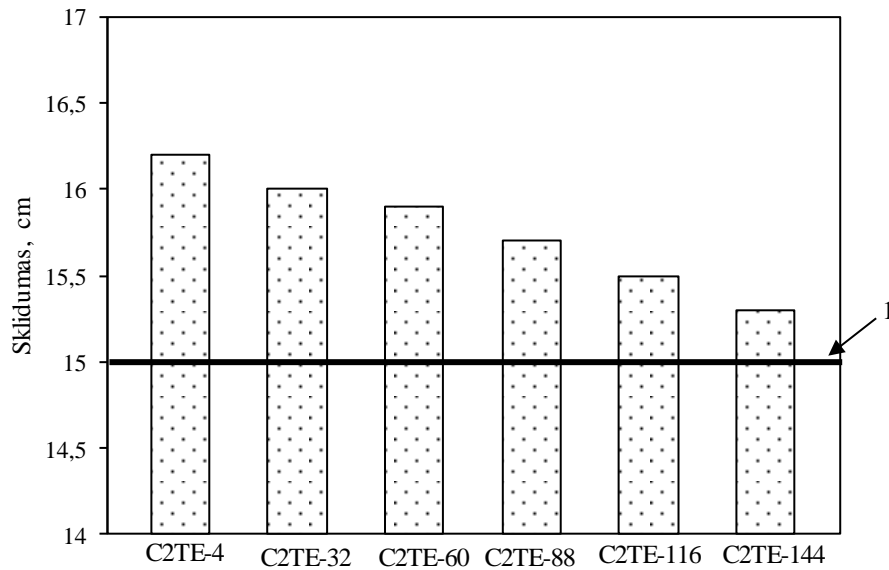
Įvertinti bandinių gniuždomojo stiprio rezultatai parodė, kad mišinyje naudojant didžiausią numatytą MC priedo kiekį, plytelių klijų gniuždomojo stiprio aritmetinis vidurkis yra 6,3 % didesnis, nei naudojant mažiausią MC priedo kiekį mišinyje ir atitinka 5,98 MPa (žr. 3.9 lentelėje). Bandinio gniuždomojo stiprio vidutinis kvadratinis nuokrypis taip pat gaunamas šiek tiek mažesnis (0,03 MPa), tačiau variacijos koeficientas yra didesnis ir atitinka 1,82 %.

Apskaičiuoti plytelių klijų bandinių vidutinis (5,95 MPa) ir charakteristinis (5,91 MPa) gniuždomieji stipriai, kurie atitinkamai gauti 6,39 % ir 6,67 % didesni nei mišiniui ruošti naudojant mažiausią MC priedo kiekį.

3.9 lentelė. Plytelių klijų bandinių gniuždomojo stiprio statistinis įvertinimas

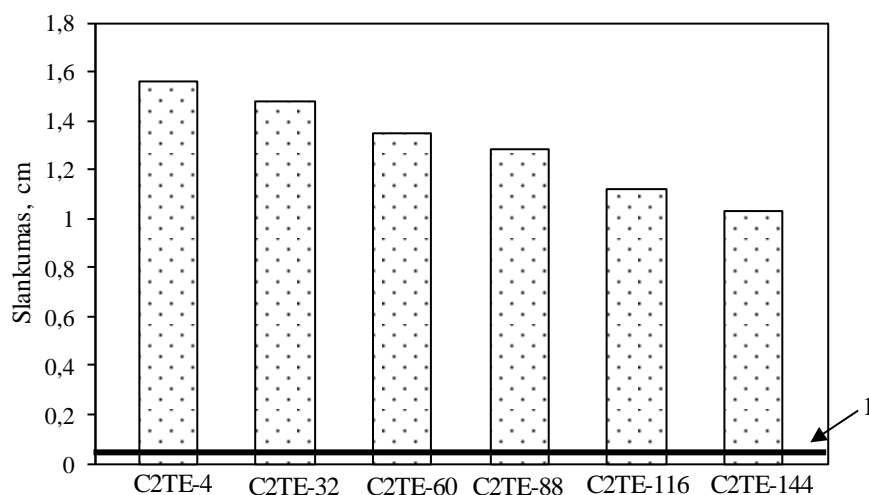
Bandinio Nr.	Matmenys, mm			Stipris lenkiant, kN	Bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas		
	Ilgis	Plotis	Aukštis		Stipris gniuždant x_i , MPa	$(x_i - \bar{x})^2$	
C2TE-4	1	160	40	40	2,58	5,86	0,01
	2				2,67	5,92	0,00
	3				2,64	5,84	0,02
C2TE-32	1				2,78	5,76	0,04
	2				2,87	5,83	0,02
	3				2,67	5,91	0,00
C2TE-60	1				2,77	5,87	0,01
	2				2,75	5,76	0,04
	3				2,83	5,98	0,00
C2TE-88	1				2,81	6,02	0,00
	2				2,86	5,92	0,00
	3				2,87	6,07	0,01
C2TE-116	1				2,87	6,05	0,01
	2				2,89	6,12	0,02
	3				2,92	6,14	0,03
C2TE-144	1	2,98	6,21	0,06			
	2	2,97	6,13	0,03			
	3	3,02	6,07	0,01			
Bandinių vidurkis					2,82	5,98	0,02
Bandinių gniuždomojo stiprio variacijos koeficientas: V , %							1,82
Vidutinis standartinis nuokrypis: S_x , MPa							0,03
Plytelių klijų gaminių charakteristinis gniuždomasis stipris: f_{ck} , MPa							5,91
Plytelių klijų gaminių vidutinis gniuždomasis stipris: f_{cm} , MPa							5,95

Nustatyta mišinio slankumo vertė parodė, kad išlaikant didžiausią MC priedo kiekį mišinyje, į standarte nurodytas vertes patenka C2TE-116 ir C2TE-144 plytelių klijų mišiniai (žr. 3.6 pav.). Likusių eksperimentinių mišinių slankumo vertė nustatyta 4,7–8 % didesnė nei leidžiamos ribinės vertės.



3.6 pav. Plytelių klijų sklidumas didinant rišamosios medžiagos kiekį, esant didžiausiam MC kiekiui mišinyje. Čia: 1 – rekomenduojama sklidumo vertė pagal LST EN 12004 standartą

Pastebėta, kad net išlaikant didžiausią numatytą MC įmaišos kiekį mišinyje, nepasiekiami standarte nurodyti slankumo vertės parametrai (žr. 3.7 pav.). Mišinio C2TE–4, kuriame buvo 45 % rišamosios medžiagos ir 5 % MC priedo, slankumo vertė leistiną normą viršijo 31,2 karto ir buvo lygi 1,56 cm. Tuo tarpu, mišinio C2TE–144, kuriame buvo 50 % rišamosios medžiagos ir 5 % MC priedo, slankumo vertė leistiną standarto normą viršijo 20,6 karto ir buvo lygi 1,03 cm.



3.7 pav. Plytelių klijų slankumas didinant rišamosios medžiagos kiekį, esant didžiausiai MC kiekiui mišinyje. Čia: 1 – rekomenduojama slankumo vertė pagal LST EN 12004 standartą

Taigi, slankumo rezultatai parodo, kad mišinyje didinant rišamosios medžiagos ir MC priedo kieki, tačiau net naudojant didžiausią numatytą žaliavų kiekį, standartinės vertės nėra pasiekiamos ir mišiniai neatitinka keliamų reikalavimų.

Įvertinus eksperimentinių plytelių klijų mišinių sudėtis su mažiausiu ir didžiausiu numatytu MC priedo kiekiu, tirtą RDP priedo įtaką mišiniams su didžiausią MC priedu.

Siekiant nustatyti RDP priedo kiekio įtaką plytelių klijų gaminių savybėms buvo sudaryti 5 mišiniai (žr. 3.10 lentelėje). RDP priedo kiekis formavimo mišiniuose buvo keičiamas nuo 2,5 iki 5 %, rišamosios medžiagos kiekis – nuo 46 iki 50 %, o smėlio kiekis – nuo 46,7 iki 48,2 %. Kitų mišinių komponentų (MC ir CaF) kiekiai buvo nekeičiami.

3.10 lentelė. Plytelių klijų mišinio sudėtis keičiant rišamosios medžiagos kiekį ir išlaikant mažiausią MC kiekį

Žaliava	Sudėtis, %				
	C2TE–148	C2TE–124	C2TE–100	C2TE–76	C2TE–56
Rišamoji medžiaga	50	49	48	47	46
Smėlis	46,7	47,2	47,2	47,7	48,2
MC	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
RDP	2,5	3	4	4,5	5
CaF	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3

Vandens ir rišamosios medžiagos santykis pateiktas 3.11 lentelėje.

3.11 lentelė. Vandens kiekis procentais plytelių klijų mišinyje pagal mišinio tūrį

	C2TE–148	C2TE–124	C2TE–100	C2TE–76	C2TE–56
Vandens kiekis, %	25	25	23	22	22

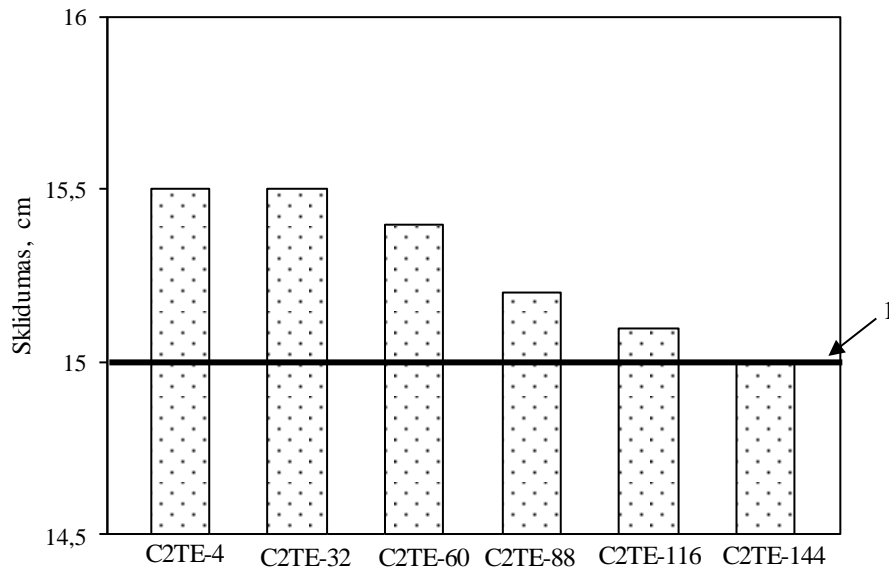
Nustatyta, kad didinant RDP įmaišos kiekį, eksperimentinių plytelių klijų gniuždomojo stiprio aritmetinis vidurkis sumažėjo, lyginant su mišiniais, kuriuose buvo naudotas mažiausias RDP įmaišos kiekis ir buvo lygus 5,22 MPa (žr. 3.12 lentelėje). Bandinio gniuždomojo stiprio vidutinis kvadratinis nuokrypis išliko nepakitęs, kaip ir bandiniuose su didžiausiu MC įmaišos kiekiu. Apskaičiuota, kad variacijos koeficiento vertė sumažėjo ir buvo lygi 1,70 %. Vidutinis (5,27 MPa) ir charakteristinis (5,23 MPa) gniuždomieji stipriai nustatyti ~ 11,5 % mažesni nei

mišinių, kurių sudėtyje išlaikomas pastovus mažiausias RDP priedo kiekis ir didžiausias MC priedo kiekis.

3.12 lentelė. Plytelių klijų bandinių gniuždomojo stiprio statistinis įvertinimas

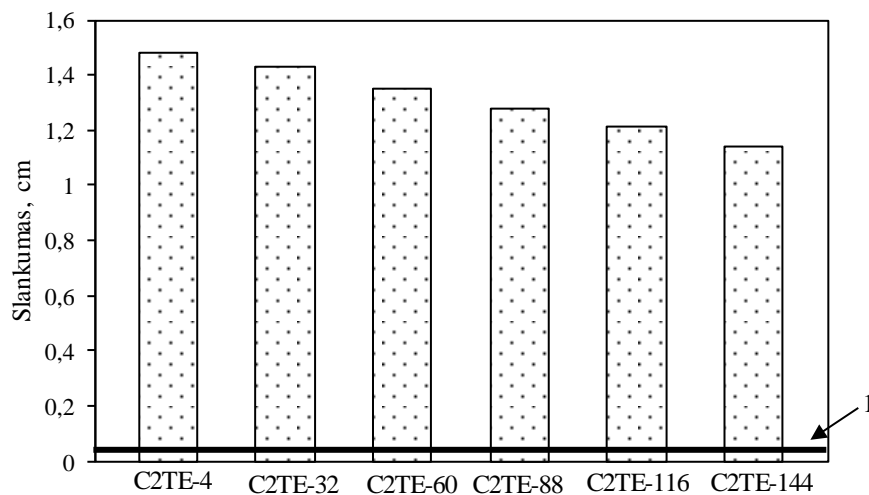
Bandinio Nr.		Matmenys, mm			Stipris lenkiant, kN	Bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas	
		Ilgis	Plotis	Aukštis		Stipris gniuždant x_i , MPa	$(x_i - \bar{x})^2$
C2TE-148	1	160	40	40	2,09	5,45	0,03
	2				2,12	5,47	0,03
	3				2,01	5,52	0,05
C2TE-124	1				2,16	5,39	0,01
	2				2,17	5,39	0,01
	3				2,19	5,34	0,00
C2TE-100	1				2,29	5,32	0,00
	2				2,27	5,27	0,00
	3				2,22	5,28	0,00
C2TE-76	1				2,36	5,25	0,00
	2				2,36	5,22	0,00
	3				2,52	5,25	0,00
C2TE-56	1				2,41	5,16	0,02
	2				2,47	5,07	0,05
	3				2,32	4,98	0,10
Bandinių vidurkis					2,26	5,29	0,02
Bandinių gniuždomojo stiprio variacijos koeficientas: V , %							1,70
Vidutinis standartinis nuokrypis: S_x , MPa							0,03
Plytelių klijų gaminių charakteristinis gniuždomasis stipris: f_{ck} , MPa							5,23
Plytelių klijų gaminių vidutinis gniuždomasis stipris: f_{cm} , MPa							5,27

Pastebėta, kad išlaikant didžiausią MC priedo kiekį, didinant RDP kiekį nuo 2,5 iki 5 %, bei mažinant rišamosios medžiagos kiekį nuo 50 iki 46 %, į standarte nurodytas vertes patenka visi eksperimentiniai plytelių klijų mišiniai (žr. 3.8 pav.).



3.8 pav. Plytelių klijų sklidumas didinant RDP kiekį, mažinant rišamosios medžiagos kiekį, esant didžiausiam MC kiekiui mišinyje. Čia: 1 – rekomenduojama sklidumo vertė pagal LST EN 12004 standartą

Atlikti slankumo tyrimai parodo, kad keičiant RDP priedo kiekį mišinyje, slankumo parametrai plytelių klijams nepasiekia standarte nurodytų verčių (žr. 3.9 pav.). Apskaičiuota, kad mišinių slankumo vertė viršijo LST EN 12004 standarte nurodytas vertes nuo 22,8 iki 29,6 kartų.



3.9 pav. Plytelių klijų slankumas didinant RDP kiekį, mažinant rišamosios medžiagos kiekį, esant didžiausiam MC kiekiui mišinyje. Čia: 1 – rekomenduojama slankumo vertė pagal LST EN 12004 standartą

Apibendrinant galima teigti, jog siekiami į rinką įvesti nauji MC ir RDP priedai yra netinkami plytelių klijų mišinių gamybai, nes paruošti mišiniai neišlaiko pagrindinių LST EN 12004 standarte nurodytų pirminių vertinimo parametrų.

3.3 Cemento skiedinių cheminės ir mechaninės charakteristikos

Cemento gaminių cheminės ir mechaninės savybės didžiąja dalimi lemia hidratacinio apdorojimo metu susidaranti rišamoji medžiaga, kurios cementuojančios savybės priklauso nuo kietinimo parametrų ir nuo formavimo mišinio sudėties (žr. 3.13 lentelėje).

Norint nustatyti granito atsijų atliekos įtaką cementinių skiedinių stipruminėms savybėms kitame tyrimų etape, buvo suformuota 10 bandinių (žr. 3.13 lentelėje), kurių sudėtyje smulčiausia ir vidutinio smulkumo smėlio frakcijos buvo keičiamos granito atsijomis Tiriant minėto priedo kiekio įtaką, formavimo mišiniai buvo ruošiami esant nekintantiems cemento, 1/4 frakcijos smėlio ir plastiklio kiekiams. Granito atsijų kiekis mišinyje buvo didinamas nuo 2 iki 30 %, atitinkamai mažinant 0/0,5 ir 0,5/1 frakcijų smėlio kiekį.

3.13 lentelė. Cemento skiedinių bandinių mišinio sudėtis

Pavadinimas	Cemento skiedinių sudėtis, %					
	Rišamoji medžiaga	Užpildas, frakcijos			Plastiklis	Granito atsijos
		0/0,5	0,5/1	1/4		
GD0	15	20,0	30,0	34,9	0,1	0
GD2		19,0	29,0			2
GD5		17,5	27,5			5
GD7		16,5	26,5			7
GD10		15,0	25,0			10
GD12		14,0	24,0			12
GD15		12,5	22,5			15
GD20		10,0	20,0			20
GD25		7,5	17,5			25
GD30		5,0	15,0			30

Siekiant gauti kuo didesnio tankio ir stiprio bandinius, formavimo masių V/SM santykis buvo imamas minimalus, leidžiantis suformuoti bandinius sutankinant (žr. 3.14 lentelėje).

Bandiniai suformuoti standartinėse formavimo formose, kurių matmenys 40×40×160 mm ir nustatomi jų gniuždymo ir lenkimo stipriai, mineralinė sudėtis.

3.14. lentelė. Vandens kiekis procentais cemento skiedinyje pagal mišinio tūrį

	GD0	GD5	DG7	GD10	GD12	GD15	GD20	GD25	GD30	GD35
Vandens kiekis, %	12	11,5	11,5	12	12	12,5	13,5	14,5	16	17,5

Iš rezultatų, gautų po 7 dienų kietinimo (žr. 3.15 lentelėje) matyti, kad didinant granito atsijų kiekį nuo 2 iki 10 %, cemento skiedinių lenkiamasis stipris padidėja nuo 0,7 iki 1,2 kN, o gniuždomasis stipris – nuo 17,75 iki 20,3 MPa. Didžiausią stiprį gniuždant po 7 parų turėjo GD10 bandiniai (atitinkamai 20,3 MPa), t.y. bandiniai, kurių sudėtyje buvo 10 % granito atsijų. Panašias stiprumines savybes turėjo bandiniai su artimu atsijų kiekiu – GD7 su 7 % užpildo (19,5 MPa), ir GD12 su 12 % užpildo (20,1 MPa). Didinant granito atsijų kiekį virš 12 procentų pastebėta, kad bandinių stipruminės savybės silpnėja – bandinio GD15 su 15 % užpildo stipris 17 MPa, o bandinio GD30 su 30 % užpildo stipris vos 10,9 MPa, taigi sumažėjo daugiau kaip perpus lyginant su stipriausiais bandiniais ir atitinka kontrolinio bandinio GD0, kurio sudėtyje nėra granito atsijų, stiprį gniuždant (10,5 MPa).

3.15 lentelė. Cemento skiedinių bandinių stipriai gniuždant po 7 parų.

Bandinys	Stipris lenkiant		Stipris gniuždant	
	kN	MPa	kN	MPa
GD0	0,7	1,6	16,75	10,5
GD2	1	2,3	28,35	17,75
GD5	1	2,3	29,45	18,4
GD7	1,1	2,6	31,2	19,5
GD10	1,2	2,9	32,45	20,3
GD12	1,2	2,8	32,15	20,1
GD15	1,1	2,5	27,05	16,95
GD20	1,1	2,5	25,65	16
GD25	1	2,3	22,65	14,2
GD30	0,8	2	17,45	10,9

Pagal cemento skiedinių bandinių gniuždomojo stiprio verčių statistinį vertinimą nustatytas gaminių gniuždomojo stiprio verčių pasikliovimo lygis (žr. 3.16 lentelėje). Apskaičiuotas visų

cemento skiedinių bandinių gniuždomojo stiprio aritmetinis vidurkis – 16,5 MPa. Bandinių gniuždomojo stiprio vidutinis standartinis nuokrypis lygus 0,83 MPa. Apskaičiuota gniuždomojo stiprio kitimo vertė siekia vos 0,07 %. Nustatytas bandinių vidutinis (16,12 MPa) ir charakteristinis (15,08 MPa) gniuždomieji stipriai.

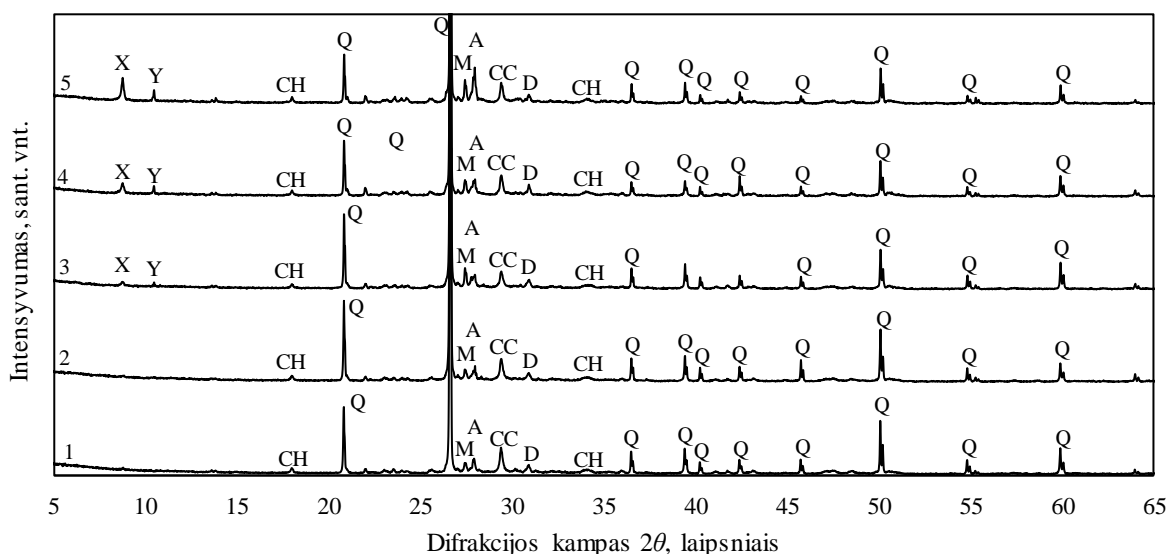
3.16 lentelė. Cemento skiedinių bandinių gniuždomojo stiprio statistinis įvertinimas po 7 parų

Bandinio Nr.		Matmenys, mm			Stipris lenkiant, kN	Bandinių gniuždomojo stiprio nustatymas	
		Ilgis	Plotis	Aukštis		Stipris gniuždant x_i , MPa	$(x_i - \bar{x})^2$
GD0	1	160	40	40	0,7	10,5	36,01
	2				0,7	10,53	35,65
	3				0,8	10,84	32,05
GD2	1				1	17,75	1,56
	2				1	17,8	1,69
	3				1,1	17,6	1,21
GD5	1				0,9	18,4	3,61
	2				1	18,5	4,00
	3				0,9	18,75	5,06
GD7	1				1,1	19,5	8,99
	2				1,1	19,75	10,56
	3				1,1	19,5	8,99
GD10	1				1,1	20,3	14,43
	2				1,2	20,74	17,97
	3				1,3	20,15	13,32
GD12	1				1,2	20,1	12,95
	2				1,2	20,17	13,46
	3				1,1	20,05	12,60
GD15	1				1,1	16,95	0,20
	2				1	16,7	0,04
	3				1	17,2	0,49
GD20	1				1,1	16	0,25
	2				1,2	16,2	0,09
	3				1	16,15	0,12
GD25	1				1	14,2	5,29
	2				1	14	6,26
	3				0,9	14,3	4,84
GD30	1				0,8	10,9	31,37
	2				0,9	10,5	36,01
	3				0,8	11	30,26
Bandinių vidurkis					1,01	16,50	11,64

Bandinių gniuždomojo stiprio variacijos koeficientas: V , %	0,07
Vidutinis standartinis nuokrypis: S_x , MPa	0,83
Plytelių klijų gaminių charakteristinis gniuždomasis stipris: f_{ck} , MPa	15,06
Plytelių klijų gaminių vidutinis gniuždomasis stipris: f_{cm} , MPa	16,12

Pakeitus smulkiausią smėlio frakciją granito atsijomis gniuždomasis stipris mažėja, nes pastarosios yra inertinis mikroužpildas, kuris chemiškai su cementu ir vandeniu nereaguoja ir negali sudaryti papildomų kalcio hidrosilikatų junginių, kas galėtų sąlygoti stiprio padidėjimą.

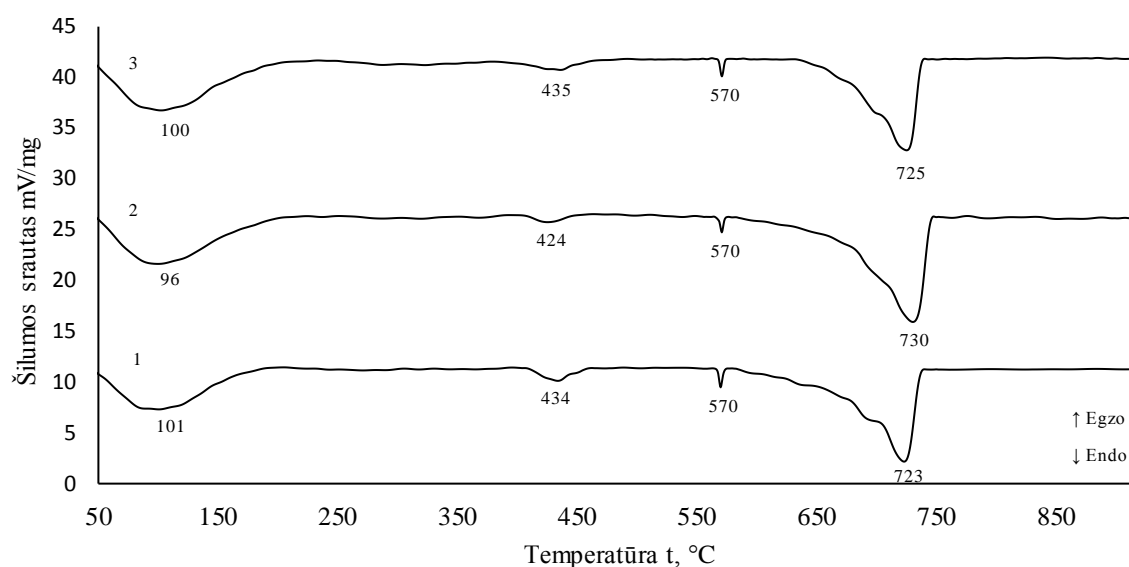
Atlikus RSDA, bandinių rentgenogramose identifikuojamos smailės, kurios būdingos kalcio hidroksidui (portlanditui) (žr. 3.10 pav.; PDF Nr. 00–01–1079, d – 0,494; 0,192; 0,179 nm). Taip pat indentifikuoti ir pradinėse žaliavose esantys mineralai – kvarcas, mikrolinas, albitas, kalcitas, dolomitas. Didinant granito atsijų kiekį cemento skiedinių bandiniuose, RSDA rengenogramoje matomi padidėjusio intensyvumo difrakciniai atspindžiai, būdingi anitui ir kordieritui.



3.10 pav. Cemento skiedinių bandinių po 7 parų hidratacijos vandenyje RSDA kreivės: 1 – GD0; 2 – GD2; 3 – GD10; 4 – GD20. 5 – GD30. Čia X – anitas, Y – kordieritas, CH – portlanditas, Q – kvarcas, M – mikrolinas, A – albitas, CC – kalcitas, D – dolomitas

Atlikus VTA analizę pastebėta, kad cementinių skiedinių bandinių, hidratuotų 7 paras, DSK kreivių pobūdis yra panašus ir matomi 4 intensyvūs endoterminiai efektai (žr. 3.11 pav.). Pirmasis endoterminis efektas 0–100 °C temperatūros intervale yra susijęs su cemento hidratacijos produktų dehidratacija, tuo tarpu, 435–465 °C ir 680–720 °C temperatūros intervaluose esančios endoterminės smailės būdingos portlandito ir kalcito skilimui.

Endoterminis efektas vykstantis ~570 °C temperatūroje priklauso kvarco alotropinės atmainos virsmui iš α į β .



3.11 pav. Cemento skiedinių bandinių po 7 parų hidratacijos vandenyje DSK kreivės:

1 – GD10; 2 – GD12; 3 – GD15

Ilginant hidratacijos laiką, pastebėta, kad visų cemento skiedinių bandinių atsparumas mechaniniai deformacijai padidėjo (žr. 3.17 lentelėje). Didžiausiu stipriu gniuždant po 28 parų pasižymėjo bandiniai, į kurių sudėtį buvo įmaišyta 7–12 % granito atsijų. Remiantis LST EN 13813 standartu, bandiniai atitinka stiprumo klasę C25 [47].

3.17 lentelė. Cemento skiedinių bandinių stipriai gniuždant po 28 parų

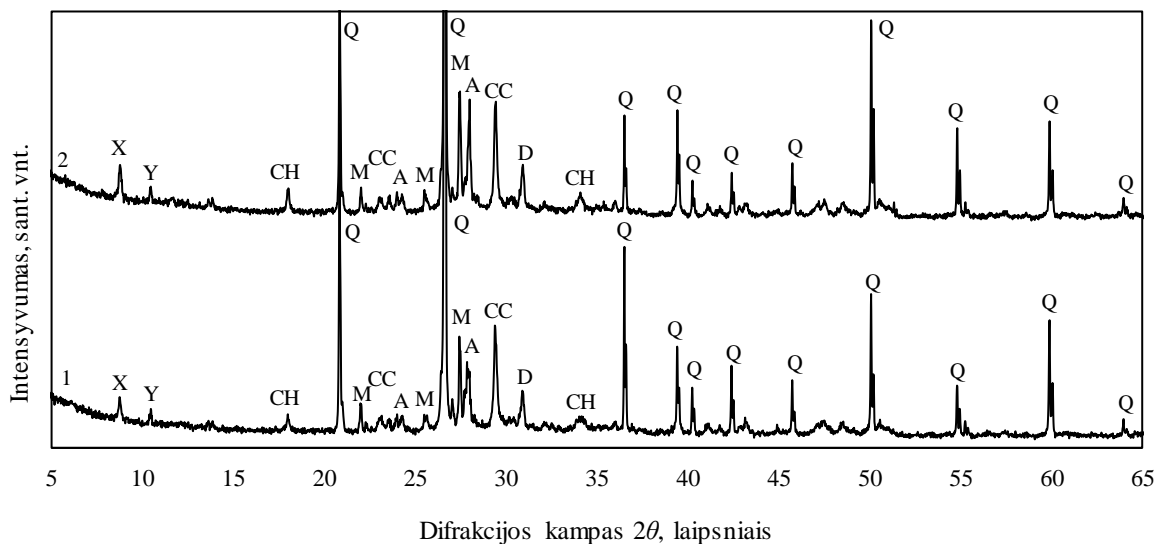
Bandinys	Stipris lenkiant		Stipris gniuždant	
	kN	MPa	kN	MPa
GD0	0,9	2,1	22,05	13,8
GD2	1,2	2,8	35,45	22,15
GD5	1,2	2,9	35,75	22,35
GD7	1,3	3,1	38,7	24,2
GD10	1,2	2,9	38,75	24,25
GD12	1,5	3,5	39,45	24,65
GD15	1,3	3,1	35,55	22,2
GD20	1,3	3,1	32,6	20,4
GD25	1,3	2,9	29,5	18,45
GD30	1,1	2,7	23	14,4

Apskaičiavus bandinių gniuždomojo stiprio rezultatus, nustatyta, kad ilgėjant cemento skiedinių hidratacijai aritmetinis gniuždomojo stiprio vidurkis dalidėja 1,25 karto ir yra lygus 20,7 MPa (žr. 3.18 lentelėje). Gniuždomojo stiprio vidutinis kvadratinis nuokrypis siekia 0,91 MPa. Stebimas nedidelis variacijos koeficiento sumažėjimas (0,06 %). Apskaičiuoti cemento skiedinių vidutinis (20,32 MPa) ir charakteristinis (19,1 MPa) gniuždomieji stipriai, kurie atitinkamai gauti 20,50 % ir 21,17 % didesni lyginant su hidratacija po 7 parų.

3.18 lentelė. Cemento skiedinių bandinių gniuždomojo stiprio statistinis įvertinimas po 28 parų

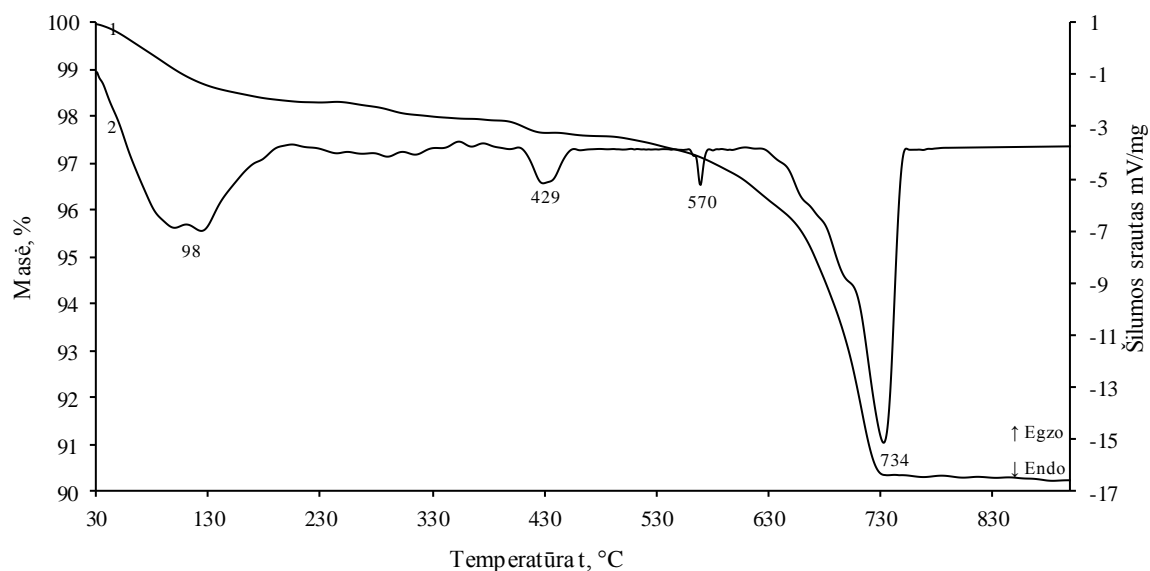
Bandinių gniuždomojo stiprio vidurkis, MPa	20,7
Bandinių gniuždomojo stiprio variacijos koeficientas: V, %	0,06
Vidutinis standartinis nuokrypis: S _x , MPa	0,91
Plytelių klijų gaminių charakteristinis gniuždomasis stipris: f _{ck} , MPa	19,1
Plytelių klijų gaminių vidutinis gniuždomasis stipris: f _{cm} , MPa	20,32

Atliktas geriausiomis stipruminėmis savybėmis pasižyminčio bandinio (GD12) RSDA mineralinės sudėties kitimo hidratacijos metu palyginimas po 7 ir 28 parų (žr. 3.12 pav.). Kaip ir tikėtasi, ilginant hidratacijos trukmę, produktuose 18,2 % padidėja portlanditui būdingos difrakcinių smailių intensyvumas.



3.12 pav. Cemento skiedinių bandinių po 7 ir 28 parų hidratacijos vandenyje RSDA kreivės: 1 – po 7 parų; 2 – po 28 parų. Čia X – anitas, Y – kordieritas, CH – portlanditas, Q – kvarcas, M – mikrolinas, A – albitas, CC – kalcitas, D – dolomitas

RSDA rezultatus patvirtino DSK duomenys (žr. 3.13 pav.). Pastebėta, kad po 28 parų hidroterminio išlaikymo bendri masės nuostoliai sumažėjo 7,35 % ir 30 – 920 °C intervale sudaro 9,74 %.



3.13 pav. GD12 bandinio po 28 parų hidratacijos vandenyje TGA (1 kr.) ir DSK (2 kr.) kreivės

Tęsiant cemento skiedinių bandinių hidratacinį kietinimą vandenyje, po 96 parų gauti stipruminiai rezultatai pateikti 3.19 lentelėje.

3.19 lentelė. Cemento skiedinių bandinių stipriai gniuždant po 96 parų

Bandinys	Stipris lenkiant		Stipris gniuždant	
	kN	MPa	kN	MPa
GD0	0,9	2,2	25,4	15,9
GD2	1,4	3,3	40,2	25,1
GD5	1,5	3,4	43,55	27,25
GD7	1,4	3,4	43,75	27,35
GD10	1,5	3,4	45,1	29,1
GD12	1,6	3,8	47,85	29,9
GD15	1,6	3,7	34,25	24,5
GD20	1,6	3,7	38,6	24,15
GD25	1,4	3,3	34,9	21,85
GD30	1,3	2,9	26	16,25

Nustatyta, kad ilginant cemento skiedinių kietinimą aritmetinis gniuždomojo stiprio vidurkis (37,98 MPa), vidutinis (37,24 MPa) ir charakteristinis (34,88 MPa) gniuždomieji stipriai gauti ~1,8 karto didesni lyginant su kietinimu po 28 parų (žr. 3.18 lentelėje). Tačiau pastebima, kad gniuždomojo stiprio vidutinis kvadratinis nuokrypis padidėjo ir siekia 1,78 MPa.

3.20 lentelė. Cemento skiedinių bandinių gniuždomojo stiprio statistinis įvertinimas po 96 parų

Bandinių gniuždomojo stiprio vidurkis, MPa	37,98
Bandinių gniuždomojo stiprio variacijos koeficientas: V, %	0,03
Vidutinis standartinis nuokrypis: S_x , MPa	1,78
Plytelių klijų gaminių charakteristinis gniuždomasis stipris: f_{ck} , MPa	34,88
Plytelių klijų gaminių vidutinis gniuždomasis stipris: f_{cm} , MPa	37,24

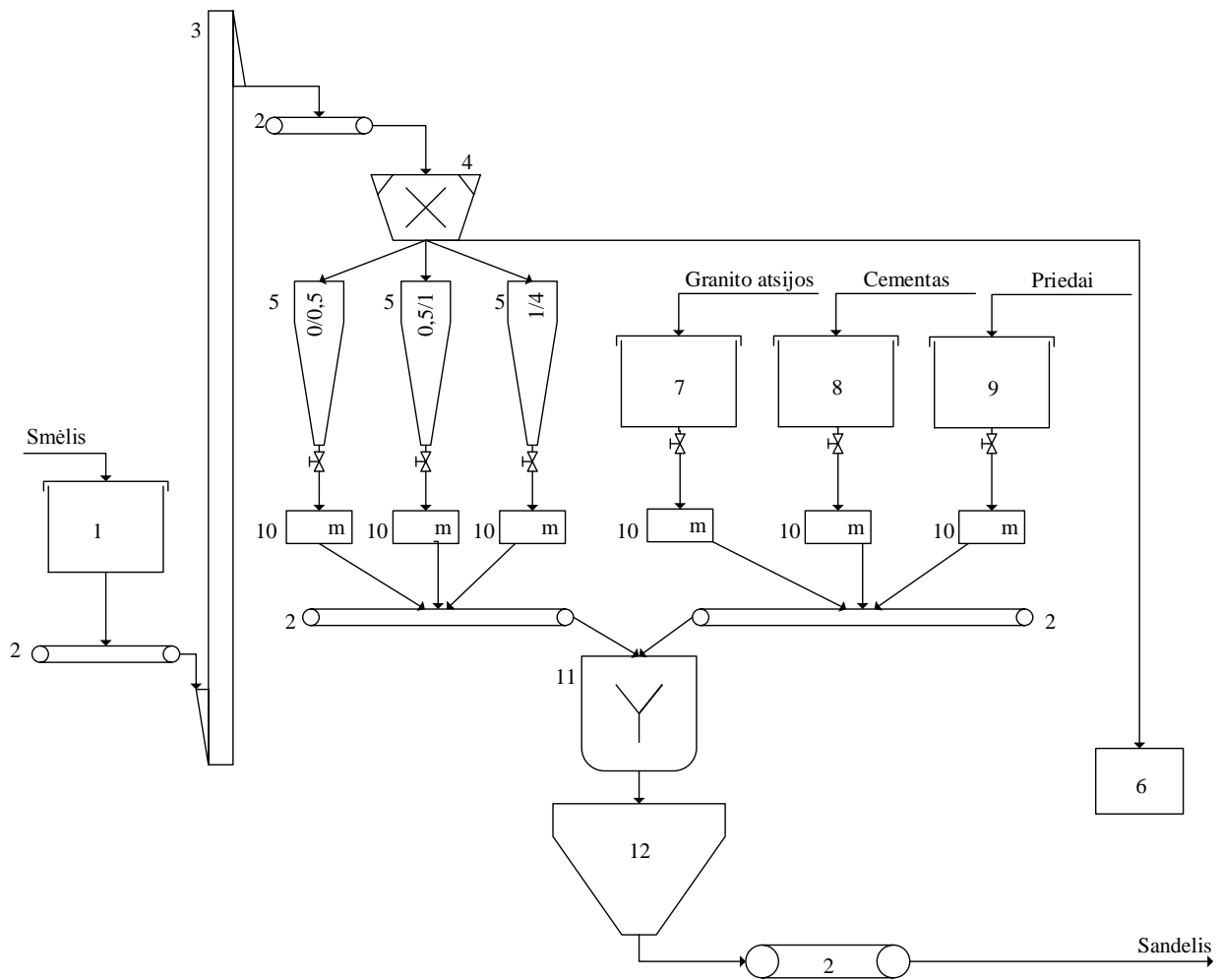
Apibendrinant gautus rezultatus, gali teigti, kad cemento bandinių optimali sudėtis yra: 15 % portlandcemenčio, 14 % 0/0,5 frakcijos, 24 % frakcijos ir 34,9 % frakcijos smėlio, 0,1 % plastifikuojančio priedo bei 12 % granito atsijų, nes minėta tiriamoji medžiaga pasižymi geriausiomis stipruminėmis savybėmis, kurios pagal LST EN 13813 standartą atitinka C25 stiprumo klasę.

3.4 Rekomendacijos

Remiantis eksperimentiniais duomenimis buvo sudaryta cemento mišinių iš portlandcemenčio, granito atsijų, sausųjų užpildų ir modifikuojančio priedo gamybos technologinė schema (žr. 3.14 pav.).

Cementinių mišinių gamyba parinkta pagal tiriamajame darbe nustatytą optimaliausią mišinio sudėtį: 15 % portlandcemenčio (CEM I 42,5 N markės) 14 % 0/0,5 frakcijos, 24 % frakcijos, 34,9 % frakcijos smėlio, 0,1 % plastifikuojančio priedo ir 12 % granito atsijų.

Smėlis iš karjero atvežamas savivartėmis mašinomis ir supilamas į priėmimo bunkerį (1). Iš priėmimo bunkerio smėlis juostiniu transporteriu (2) yra tiekiamas į kaušinių elevatorių (3), kuriuo keliamas ant juostinio transporterio (2) ir transportuojamas į vibracinį smėlio sijotuvą (4). Sijotuve smėlis sijojamas į keturias frakcijas: 0/0,5 mm, 0,5/1 mm, 1/4 mm ir > 4 mm (atliekos). Dėl to gamykloje įrengiami trys smėlio silosai (5) ir vienas netinkamo mišiniams smėlio bunkeris (6). Granito atsijos sunkvežimiais atvežamos į gamyklą ir iškraunamos į granito atsijų laikymo bunkerį (7). Cementas atvežamas autocisternose ir išpučiamas suslėgtu oru į jam skirtą silosą (8). Priedai atvežami gamyklinėse pakuotėse ir supilami į jiems skirtus silosus (9). Iš silosų žaliavos tiekiamos į svorinius dozatorius (10), pasveriamos ir juostiniais transporteriais (2) nukreipiamos į maišytuvą (11). Sumaišytas mišinys išleidžiamas į svėrimo, dozavimo ir fasavimo mašinos bunkerį (12). Fasavimo mašinoje sausieji mišiniai fasuojami į nustatytos talpos popierinius maišus ir juostiniu transporteriu (2) transportuojami į sandėlį. Sandėlyje maišai dedami ant palečių ir vežami į jiems skirtą sandėliavimo vietą.



3.14 pav. Principinė technologinė cemento mišinių gamybos schema: 1 – smėlio priėmimo bunkeris, 2 – juostinis transporteris, 3 – kaušinis elevatorius, 4 –vibracinis smėlio sijotuvus, 5 – smėlio silosas, 6 – smėlio atliekos bunkeris, 7 – granito atsijų priėmimo bunkeris, 8 – cemento priėmimo bunkeris, 9 – priedo priėmimo bunkeris, 10 – svorinis dozatorius, 11 – maišytuvas, 12 – fasavimo mašina

3.5 Darbuotojų sauga ir sveikata

Gaminant cemento skiedinius iš cheminių mišinių (portlandcemenčio, granito atsijų, užpildų ir modifikuojančių įmaišų) darbo aplinkoje susiduriama su kenksmingais ir pavojingais profesinės rizikos veiksniais. Darbo vietoje ir aplinkoje gali pasireikšti fizinių, fizikinių, cheminių ar psichosocialinių veiksnių sukelti pavojai. Kenksmingi veiksniai darbo aplinkoje gali sukelti ligą, kuri gali būti pavojinga darbuotojo gyvybei, o dėl pavojingų veiksnių darbuotojas gali patirti ūmių sveikatos sutrikimų ar netgi numirti.

Profesinės rizikos veiksniai, galintys kelti pavojų profesinei saugai cemento mišinių gamybos linijoje:

- cheminiai veiksniai – dirginančios medžiagos, dulkės.
- fiziniai veiksniai – besisukančios ar judančios mašinų dalys
- fizikiniai veiksniai – patalpų šiluminė aplinka, apšvietimas, triukšmas.
- ergonominiai veiksniai – veiksniai, kurių pagrindą sudaro fizinio darbo krūvis ir įtampa bei darbo vietos pritaikymas darbuotojo galimybėms;
- psichosocialiniai veiksniai – veiksniai, kurie dėl darbo sąlygų, darbo reikalavimų, darbo organizavimo, darbo turinio, įmonės darbuotojų tarpusavio ar darbdavio ir darbuotojo tarpusavio santykių sukelia darbuotojui psichinį stresą [48, 49].


Darbo metu, atliekant tyriamąją dalį, naudotos šios žaliavos: portlandcementis, smėlis, granito atsijos, plastifikuojantys, redisperguojantys ir vandenį sulaikantys priedai. Visi cheminiai mišiniai yra apibūdinami specifinėmis pavojingumo bei atsargumo frazėmis pagal CLP reglamentą. CLP (angl. *classification, labelling and packaging*) – tai reglamentas (EB) Nr. 1272/2008 dėl cheminių medžiagų ir mišinių klasifikavimo, ženklinimo ir pakavimo. Reglamentas yra taikomas visoje Europos Sąjungoje ir galioja nuo 2009 m. sausio 20 d. [50, 51].

Prieš pradėdant dirbti su cheminėmis medžiagomis ar jų mišiniais pirmiausia reikia:

- nustatyti pavojingus cheminius veiksnis,
- įvertinti jų keliamą riziką saugai ir sveikatai,
- numatyti ir įgyvendinti tinkamas prevencines priemones.

Pagal reglamentą (EB) Nr. 1272/2008 (CLP) darbe naudoto portlandcemenčio ženklinimas pateiktas 3.21 lentelėje [51, 52].

3.21 lentelė. Portlandcemenčio pavojingumo ir atsargumo frazės


Pavojingumo frazės	
H315	Dirgina odą
H317	Gali sukelti alerginę odos reakciją
H318	Smarkiai pažeidžia akis
H335	Gali dirginti kvėpavimo takus
Atsargumo frazės	
P102	Laikyti vaikams neprieinamoje vietoje.
P280	Mūvėti apsaugines pirštines/dėvėti apsauginius drabužius/naudoti akių (veido) apsaugos priemones.
P305+P351 +P338+P310	Patekus į akis: Atsargiai plauti vandeniu kelias minutes. Išimti kontaktinius lęšius, jeigu jie yra ir jeigu lengvai galima tai padaryti. Toliau plauti akis. Nedelsiant skambinti į APSINUODIJIMŲ KONTROLĖS IR INFORMACIJOS BIURĄ arba kreiptis į gydytoją
P302+P352 +P333+P313	Patekus ant odos: Plauti dideliu kiekiu muilo ir vandens. Jei sudirginama oda arba ją išberia, kreiptis į gydytoją.
P261+P304 +P340+P312	Stengtis neįkvėpti dulkių/dūmų/dujų/rūko/garų/aerolio. ĮKVĖPUS: Išnešti nukentėjusįjį į gryną orą: jam būtina ramybė ir padėtis, leidžianti laisvai kvėpuoti. Pasijutus blogai, skambinti į APSINUODIJIMŲ KONTROLĖS IR INFORMACIJOS BIURĄ arba kreiptis į gydytoją
P501	Turinį/talpyklą išmesti laikantis vietinių reikalavimų.
Signalinis žodis	Pavojinga
Piktogramos	

Papildoma informacija:

Šlapio cemento, šviežio betono ar skiedinio kontaktas su odą gali sukelti dirginimą, dermatitą ar nudegimus. Gali sugadinti produktus pagamintus iš aliuminio ar kitų netauriųjų metalų [51].

Įvertinus portlandcemenčio pavojingumo klasę darbo metu reikalinga naudoti 3.22 lentelėje pateiktas asmenines apsaugos priemones.

3.22 lentelė. AAP reikalingos dirbant su portlandcemenčiu [51]

Akių/veido apsaugai	Būtina nešioti EN 166 standartą atitinkančius apsauginius akinius ir saugotis, kad sausas ar drėgnas cementas nepatektų į akis.
Odos apsauga	Būtina dėvėti nepralaidžias, atsparias dilimui ir šarmams apsaugines pirštines (pvz.: nitrile mirkytas medvilnines pirštines su CE ženklu) su medvilnės pamušalu, batus, dėvėti drabužius ilgomis rankovėmis. Galima naudoti odos apsauginius kremus, kurie apsaugo odą nuo ilgalaikio kontakto su šlapiu cementu. Ypatingai reikėtų žiūrėti, kad šlapio cemento nepatektų į batus. Siekiant išvengti odos problemų, dėvėti pirštines atsižvelgiant į maksimalų dėvėjimosi laiką. Esant tam tikrom aplinkybėm, kaip pvz.: klojant betoną, reikėtų dėvėti neperšlampamas kelnes ar antkelius.
Kvėpavimo organų apsauga	Jei nuolat kyla grėsmė pakliūti į aplinką, kurioje didelė dulkių koncentracija, didesnė nei galimo poveikio ribinės vertės, būtina naudoti kvėpavimo takų apsaugines priemones, pritaikytas atitinkamam dulkių lygiui ir atitinkančias EN standartus (EN 149, EN 140, EN 14387, EN 1827 ar kt.).
(AAP) Asmeninių apsaugos priemonių ženklavimas	

Pagal (EB) Nr. 1272/2008 reglamentą kitos tyrimuose naudotos žaliavos nėra priskiriamos pavojingų medžiagų kategorijai. Tačiau naudojant šias medžiagas rekomenduojamos kolektyvinės ir asmeninės apsaugos priemonės. Vietose, kur susidaro dulkės, įmontuoti ištraukiamąją ventiliaciją. Akių apsaugai naudoti apsauginius akinius, kvėpavimo organų apsaugai – kvėpavimo takų apsaugines priemones, rankų apsaugai – apsaugines pirštines.

Išvados

1. Nustatyta, kad granito atsijų sudėtyje vyrauja Si (16,6 %), Fe (5,65 %), Al (3,64 %), K (3,55 %), Ca (2,80 %) ir kt. elementai, sudarantys kvarcą, anitą, kordieritą, albitą, mikroliną ir kalcitą.
2. Ištirta, kad metilceliuliozės (iki 0,5 % bendros mišinio masės) ir redisperguojančio (iki 5 % bendros mišinio masės) priedai nėra rekomenduojami naudoti plytelių klijų mišinių gamyboje, nes jie netenkina LST EN 12004 standarte nurodytų sklidumo ($15 \pm 0,5$ cm) ir slankumo ($\leq 0,5$ mm) parametrų verčių.
3. Nustatyta, kad cemento bandinių optimali sudėtis yra: 15 % portlandcemenčio, 14 % 0/0,5 frakcijos, 24 % frakcijos ir 34,9 % frakcijos smėlio, 0,1 % plastifikuojančio priedo bei 12 % granito atsijų, nes minėta tiriamoji medžiaga pasižymi geriausiomis stipruminėmis savybėmis, kurios pagal LST EN 13813 standartą atitinka C25 stiprumo klasę.
4. Ištyrus, kad nustatytos cheminės ir mineralinės sudėties granito atsijas galima naudoti kaip priedą cemento mišiniams gaminti, pasiūlyta cemento skiedinių gamybos principinė technologinė schema.

Literatūros sąrašas

1. Kaminskas A., Kaminskas R. Statybinės medžiagos iš technogeninių žaliavų. Mokslo monografija. Technologija, Kaunas, 2010, 386p.
2. Değirmenci N. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products. Cementitious building materials, 2008, vol 22, p. 1857–1862.
3. Pacheco–Torgal F., Jalali S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres. Construction and Building Materials, 2011, vol 25, p. 575–581.
4. Moon G. D., Oh S., Jung S. H., Choi Y. C. Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. Construction and Building Materials, 2017, vol 135, p 129–136.
5. Kou S. C., Poon C. S., Wan H. W. Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. Construction and Building Materials, 2012, vol 36. p 881–889.
6. Paris J. M , Roessler J. G., Ferraro C. C., DeFord H. D., Townsend T. G. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. Journal of Cleaner Production 2016, vol 121, p 1–18.
7. Prancevičiūtė G., Nagrockienė D. Metalinio kordo atliekos kiekio poveikis betono savybėms. Mokslas – lietuvis ateitis, 2014, vol 6, p. 474–479.
8. Kabir G., Abubakar A. I., El-Nafaty U. A.. Energy audit and conservation opportunities for pyroprocessing unit of a typical dry process cement plant. Energy, 2010, vol. 35, p 1237–1243.
9. Jaillon L., Poon C.S., Chiang Y.H. Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong. Waste Management, 2009, vol 29, p. 309–320.
10. Naujokaitis A. Statybinės medžiagos. Sausieji statybiniai mišiniai. Technika, Vilnius, 2010, 364 p.
11. Žiogas V. A., Juočiūnas S., Žiogas G. Hidrotechninis betonas su vietiniais užpildais ir jo naudojimas monolitiniams statiniams. Statybinės konstrukcijos ir technologijos, 2009, vol 1, p 102–110.
12. Knop Y., Peled A. Packing density modeling of blended cement with limestone having different particle sizes. Construction and Building Materials, 2016, vol 102, p 44–50.
13. Dombrowski J., Kuehn H. Perello M., Scharlemann S. Redispersible polymer powder. Dow Global Technologies LLC. 2017.

14. Van Oss, H.G. Background Facts and Issues Concerning Cement and Cement Data. Open-File Report. US Department of the Interior & USGS. 2005. [interaktyvus] [žiūrėta 2017-04-10]. Prieiga per internetą: <https://pubs.usgs.gov/of/2005/1152/2005-1152.pdf>.
15. Cai, B., Wang, J., He, J., Geng, Y. Evaluating CO₂ Emission Performance in China's Cement Industry: An Enterprise Perspective. *Applied Energy*, 2016, vol. 166. p. 191–200.
16. Supino, S., Malandrino, O., Testa, M., Sica, D. Sustainability in the EU Cement Industry: the Italian and German Experiences. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 112, p. 430–442.
17. Ghoddousi P., Javid A. A. S., Sobhani J. Effects of particle packing density on the stability and rheology of self-consolidating concrete containing mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 53, p 102–109.
18. Pedrajas, C., Rahhal, V., Talero, R. Determination of Characteristic Rheological Parameters in Portland Cement Pastes. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 51, p. 484–491.
19. Felixkala T., Partheeban P. Granite powder concrete. *Indian Journal of Science and Technology*, 2010, vol. 3, p 311–317.
20. Jamkara S.S., Raob C.B.K. Index of Aggregate Particle Shape and Texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. *Cement and Concrete Research*, 2004 vol. 34, p 2021–2027.
21. Patural L., Marchal P., Govin A., Grosseau P., Ruot B., Devès O. Cellulose ethers influence on water retention and consistency in cement-based mortars. *Cement and Concrete Research*, 2011, vol. 41, p. 46–55.
22. Rumšys D., Bačinskas D., Spudulis E. Lengvojo betono, pagaminto naudojant stiklo granuliu užpildą, mechaninių savybių tyrimai. *Statyba, transportas, aviacinės technologijos*, 2017, vol 9, p 500–506.
23. Arulraj G. P., Adin A., Kannan T. S. Granite powder concrete. *IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, 2013, vol.3, p. 193–198.
24. Arulraj G. P., Adin A., Kannan T. S. Granite powder concrete. *IRACST – Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ)*, 2013, vol.3, p. 193–198.
25. Vijayalakshmi M., Sekarb A.S.S., Ganesh G. Strength and durability properties of concrete made with granite industry waste. *Construction and Building Materials*, 2013, vol 46, p. 1–7.
26. Mohamed A. E. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 47, p. 743–752.

27. Li H., Huang F., Cheng G., Xie Y., Tan Y., Li L., Yi Z. Effect of granite dust on mechanical and some durability properties of manufactured sand concrete. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 109, p. 41–46.
28. Li L.G., Kwan A.K.H. Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. *Powder Technology*, 2014, vol. 253, p. 514–521.
29. Ivanauskas E., Grinys A., Vaitkevičius V., Šerelis E., Granitinės skaldos gamybos atliekų panaudojimo betonuose tyrimai. Kauno Technologijos Universitetas, 2013 [interaktyvus] [žiūrėta 2018-02-10]. Prieiga per internetą: <http://milsa.lt/images/files/Galutin%C4%97%20Granito%20ataskaita%20granitmilciai%202013%2006%2019.pdf>.
30. Skiedinio užpildai. Lietuvos standartas LST EN 13139:2002. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003.
31. Jočys K., Geležiūnas V., Taparauskas J., Vaičiukynienė D., Vaitkevičius V. Modifikuotos ceolitinės atliekos įtaka cementinio akmens savybėms *Statyba ir architektūra*, 2013, p 17–21.
32. Betono, statybinio ir injekcinio skiedinio įmaišiniai priedai. 2 dalis. Betono įmaišiniai priedai. Apibrėžtys, reikalavimai, atitiktis, ženklinimas ir etiketavimas. LST EN 934-2:2012 Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2012.
33. Žurauskienė R., Naujokaitis A. P., Mačiulaitis R., Žurauskas R. *Statybinės medžiagos*. Technika, Vilnius, 2012, 540 p.
34. Melment: Superplasticizer for cement and calcium sulphate based construction materials [interaktyvus] [žiūrėta 2018-03-20]. Prieiga per internetą: <http://product-finder.basf.com/group/corporate/product-finder/en/brand/MELMENT>.
35. Kalcio formiatas. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-03-02]. Prieiga per internetą: <http://lt.xutai-powder.com/calcium-formate/calcium-formate-for-construction-or-tile-adhes.html>.
36. Venčkauskas L., Daukšys M. Plastiko tekinimo atliekų įtaka cementinio akmens fizikinėms ir mechaninėms savybėms. *Statyba ir architektūra*, 2013, p 94–101.
37. Tumosa M., Daukšys M., Ivanauskas E. Granito atsijų įtaka apdailinių skelto paviršiaus betono plytų savybėms. *Statyba ir transportas*, 2010, vol 2, p. 43–49.
38. Gaminamo cemento tipai: eksploatacinių savybių deklaracija [interaktyvus] [žiūrėta 2018-05-08]. Prieiga per internetą: file:///C:/Users/daliusl/Downloads/ESD%20CEM%20II%20A_S%2042,5%20N.pdf.

39. Silikatinių ir autoklavinio akytojo betono gaminių smėlis. Techniniai reikalavimai ir bandymų metodai. Lietuvos standartas LST EN 1273-92. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009. 1 p.
40. Cemento bandymų metodai. 1 dalis. Stiprio nustatymas. Lietuvos standartas LST EN 193-1:2016. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2016, 7p.
41. Žvironaitė, J., Leškavičienė V. Silikatinių medžiagų kokybės kontrolė. Vilnius, 2008, 120 p.
42. Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris. Lietuvos standartas LST EN 12390-3:2009. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2009.
43. Mūro gaminių techniniai reikalavimai. 3 dalis. Betoniniai mūro gaminiai (su tankiaisiais ir lengvaisiais užpildais). Lietuvos standartas LST EN 771-3:2011+A1. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015.
44. Mūro gaminių bandymo metodai. 1 dalis. Gniuždymo stiprio nustatymas. Lietuvos standartas LST EN 772-1:2011+A1. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2015.
45. Plytelių klėjai. 2 dalis. Bandymo metodai. Lietuvos standartas LST EN 12004-2:2017. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2017.
46. Plytelių klėjai. Slysmo nustatymas. Lietuvos standartas LST EN 1308:2007. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2007.
47. Grindų išlyginamosios medžiagos ir besiulės grindys. Išlyginamosios medžiagos. Savybės ir reikalavimai. Lietuvos standartas LST EN 13813. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2003.
48. Profesinės rizikos vertinimo nuostatai. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-05-29]. Prieiga per internetą: <https://www.e-tar.lt/portal/lt/legalAct/44670620b4cc11e79e64bac871dbf147>.
49. Rizikos vertinimą reglamentuojantys teisės aktai. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-05-29]. Prieiga per internetą: www.e-tar.lt.
50. Cheminių medžiagų klasifikavimas ir ženklavimas pagal CLP reglamentą. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-05-29]. Prieiga per internetą: <http://chemija.gamta.lt/cms/index?rubricId=2864aa1e-1af5-44d1-a263-a19f17704dea>.
51. Portlandcemenčio saugos duomenų lapas [interaktyvus] [žiūrėta 2018-05-29]. Prieiga per internetą: <http://cementas.lt/lt/cemento-tipai>.
52. Europos parlamento ir tarybos reglamentas (EB) Nr. 1907/2006. [interaktyvus] [žiūrėta 2018-05-29]. Prieiga per internetą: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:396:0001:0850:LT:PDF>.