



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Edvinas Strautininkas

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. Loreta Kelpšienė

PANEVĖŽYS, 2017

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Baigiamasis magistro projektas
Statyba (621J80001)

Vadovas

(parašas) Doc. Loreta Kelpšienė
(data)

Recenzentas

(parašas) Doc. dr. Saulius Sušinskas
(data)

Projektą atliko

(parašas) Edvinas Strautininkas
(data)

PANEVĖŽYS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Edvinas Strautininkas

(Studento vardas, pavardė)

Statyba (621J80001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Mineralinių priedų poveikis betono savybėms“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Edvino Strautininko**, baigiamasis projektas tema „mineralinių priedų poveikis betonui“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Turinys

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	2
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	3
TERMINAI IR APIBRĖŽTYS	4
ĮVADAS.....	5
1. LITERATŪROS APŽVALGA	6
1.1 Cemento tipai	8
1.2 Užpildai.....	17
1.3. Plastifikuojantys priedai ir jų poveikis betonui	19
1.4. Cheminių priedų rūšys.....	20
2. METODINĖ DALIS.....	25
2.1 Naudotos medžiagos	25
2.2. Betono bandinių formavimas.....	27
2.3. Betono savybių nustatymo metodika	28
3. EKSPERIMENTINĖ DALIS	31
3.1. Betono tankio tyrimo rezultatų analizė.....	31
3.2. Betono gniuždymo stiprio tyrimo rezultatų analizė.....	33
3.3. Bandinių įmirkio normaliosiomis sąlygomis nustatymas	36
3.4. Ultragarso impulso sklidimo greičio tyrimo rezultatų analizė.....	38
4. IŠVADOS	41
5. LITERATŪRA.....	42

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Gniuždymo presas.....	29
2 pav. Tankio priklausomybė nuo plastifikuojančio priedo kiekio cemente CEM II/A-LL 42,5N..	32
3 pav. Tankio priklausomybė nuo cemento tipo esant vienodam plastifikuojančio priedo kiekiui..	33
4 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai naudojant cementą CEM II/A-LL 42,5N po 7 kietėjimo parų.	34
5 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai naudojant cementą CEM I 42,5N po 7 kietėjimo parų.....	34
6 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai naudojant abu cementus, po 7 kietėjimo parų.....	35
7 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai naudojant abu cementus, po 28 kietėjimo parų.....	35
8 pav. Įmirkio rezultatai naudojant cementą CEM II/A-LL 42,5N su skirtingais kiekiais plastifikuojančio priedo.....	36
9 pav. Įmirkio rezultatai naudojant cementą CEM I 42,5N su skirtingais kiekiais plastifikuojančio priedo.....	37
10 pav. Įmirkio rezultatai naudojant cementus CEM II/A-LL 42,5N ir CEM I 42,5N su skirtingais kiekiais plastifikuojančio priedo.....	38
11 pav. Ultragarso impulso sklaidimo greitis klintiniu portlandcemenčiu ir paprastuoju cementu po 7 kietėjimo parų.....	39
12 pav. Ultragarso impulso sklaidimo greitis klintiniu portlandcemenčiu ir paprastuoju cementu po 28 kietėjimo parų.....	40

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Mechaniniai ir fizikiniai cemento reikalavimai, išreikšti charakteristinėmis vertėmis.....	8
2 lentelė. Betono sudėčių ir savybių apribojimai.....	15
3 lentelė. 1m ³ paruošti reikalingas žaliavų kiekis.....	31

TERMINAI IR APIBRĖŽTYS

Betonas – medžiaga, gauta sumaišius rišamąją medžiagą, stambiuosius ir smulkiuosius užpildus bei vandenį, pridėjus priedų bei įmaišų arba jų nepridėjus, betono reikiamos savybės susiformuoja, kai jis kietėja.

Cementas – tam tikros cheminės sudėties neorganinių medžiagų milteliai, kurie su vandeniu sudaro ilgainiui sukietėjančią tešlą.

Portlandcementis – tai hidraulinė rišamoji medžiaga, kurios sudėtyje vyrauja kalcio silikatai.

Cemento tešla – cemento ir vandens klampus mišinys.

Cemento akmuo – sukietėjusi cemento tešla.

Vandens – cemento santykis – cemento tešlos vandens ir cemento masių santykis mišinyje.

Užpildas – biri mineralinė ar organinė medžiaga, sudaranti neaktyvią betono ar skiedinio dalį.

Gamtinis užpildas – mineralinės kilmės užpildas, kuris gaunamas tik mechaninio perdirbimo būdu.

Dirbtinis užpildas – užpildas, kuris gaunamas mineralinę žaliavą gamybos procese paveikus termiškai ar modifikavus kitaip.

Antrinis užpildas – užpildas, pagamintas iš anksčiau statyboje jau naudotų medžiagų jas perdirbant.

Užpildo stambumas – užpildo charakteristika, apibūdinama apatinio sieto (d) ir viršutinio sieto (D) akelių matmenimis.

Stambus užpildas – užpildas, kurio stambiosios dalelės D ne mažesnės kaip 4 mm ir d ne mažesnis kaip 2 mm.

Smulkus užpildas – tai biri natūrali arba dirbtinė akmens medžiaga sudaryta iš 0 – 4 mm frakcijos dydžio dalelių.

Mikroužpildas – užpildas, kurio didžioji dalis išbyra per 0,063 mm akelių sietą. Dalelių matmenys yra 0,005 – 0,063 mm ribose, savitasis paviršius didesnis kaip 100 m²/kg.

Stambesniosios dalelės – užpildo dalis, kuri lieka ant rečiausiojo sieto, apibrėžiančio užpildo stambumą.

Smulkesniosios dalelės – užpildo dalis, kuri išbyra per tankiausiąjį sietą, apibūdinantį užpildo stambumą.

Granulimetrinė sudėtis – dalelių pagal stambumą pasiskirstymas išreikštas išbirų per nustatytą sietų skaičių masės %.

Gniuždymo stipris – tai medžiaga, kuri suyra veikiamą gniuždymo apkrovos, stiprumo riba, išreikšta sugniuždžiusios jėgos ir gniuždomo ploto santykiu.

IVADAS

Betonas – medžiaga, gauta sumaišius rišamąją medžiagą, stambiuosius ir smulkiuosius užpildus ir vandenį, pridėjus priedų – arba be jų, reikiamų savybių įgyjanti kietėdama.

Darbe analizuojamos plačiai statyboje taikomos medžiagos: portlandcementis, stambus ir smulkus užpildai, vanduo ir plastifikuojantis priedas, pateikiamos pagrindinės betono žaliavų savybės. Betono mišinio gamyboje yra naudojami dviejų tipų cementai, tai CEM I 42,5 N ir CEM II/A-LL 42,5 N tipo cementai. Taip pat betono mišinio gamyboje naudojami užpildai – 4/16 mm frakcijos žvirgždas ir 0/4 mm frakcijos smėlis, superplastiklis sintetinio polikarboksilato polimero pagrindu ir vanduo.

Norint iširti cemento tipo ir plastifikuojančio priedo įtaką betono savybėms, buvo išnagrinėta mokslinė literatūra, atlikti bandymai. Gauti bandymų duomenys buvo apdoroti Microsoft Excel programa, pagrindžiant pagrindinių betono savybių priklausomybę nuo betoną sudarančių komponentų. Šiam tikslui atliekami betono gniuždymo stiprio, tankio, įmirkio, ultragarso impulso sklidimo greičio tyrimai ir nustatomas ryšys tarp darbe naudojamo cemento tipo ir plastifikuojančio priedo kiekio. Gautų rezultatų duomenys pateikiami grafikų pavidalu. Pateikiamos priklausomybės nuo plastifikuojančio priedo kiekio cemento naudojant klintinį portlandcementį. Taip pat grafiškai atvaizduoti abiejų cemento tipų, t.y. klintinio ir įprastinio cemento priklausomybės esant vienodam plastifikuojančio priedo kiekiui.

Baigiamojo magistro darbo tikslas iširti betono savybes ir nustatyti plastifikuojančio priedo kiekį gerinantį sukietėjusio betono savybes, parinkti optimalią betono mišinio sudėtį, suformuoti bandinius pagal parinktą betono mišinio sudėtį, iširti bandinių savybes pagal pateiktą metodinę medžiagą, išanalizuoti baigiamojo darbo temą atitinkančią literatūrą.

Pagrindiniai darbo uždaviniai yra:

- Nustatyti plastifikuojančio priedo kiekio įtaką betono tankiui, įmirkiui, gniuždymo stipriui ir ultragarso sklidimo greičiui.
- Ištyrus betono savybes, pateikti rezultatus, parinkti optimalią betono sudėtį.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Betonas yra universali ir patikima statybinė medžiaga, sudaryta iš rišamosios medžiagos akmenų, įvairių rūšių, skirtingo didumo ir formos grūdelių užpildų, plastifikuojančių priedų, vandens.

Betonas – tai viena iš seniausių statyboje naudojamų medžiagų. Įvairios paskirties pastatams, konstrukcijoms bei dirbiniams betonas naudojamas nuo XVII a. vidurio, kai buvo išrastas portlandcementis. Betonas, kaip patikima statybinė medžiaga, dėl savo ypatingų savybių naudojamas visame pasaulyje įvairioms civilinių, pramonės ir žemės ūkio pastatų konstrukcijoms. Betono gamyba susijusi su nemažomis energijos sąnaudomis, energija naudojama ruošiant žaliavas, gaminant rišamąsias medžiagas, gaminius ir juos transportuojant. Todėl labai svarbu visuose gamybos etapuose energijos sąnaudas sumažinti iki minimumo. Daugelis mokslininkų J. Maliuga (1895), N. Žitkevičius (1912), D. Abramsas (1918) tyrė betono stiprumo priklausomybę nuo vandens ir cemento santykio.

Mokslininkai daug dėmesio skiria betono mišinio medžiagų savybių tyrinėjimui, tobulinimui ir praktiniam taikymui. Šiuo metu yra sukurta daug vertingų mokslinio tyrimo darbų, sėkmingai taikomų projektuojant pastatų ir statinių statybą, gaminant betono konstrukcijas.

Norint gauti gerų savybių betoną į mišinį dedami įvairūs priedai, kurie pagreitina kietėjimą, padidina stiprumą, pralaidumą vandeniui ir atsparumą šalčiui. Parinkus tinkamą priedo kiekį, norima linkme galima keisti betono reologines savybes. Tai rodo, kad betonas yra viena iš universaliausių statybinių medžiagų, kuriai galima suteikti pačių įvairiausių savybių: gana stipriai keisti stiprumą, reologines savybes, tankį ir kt. (Deltuva 1982; Jarunavičius 2007).

Laikoma, kad pagrindinis klinties priedo poveikis cemento savybėms yra fizinio pobūdžio. Sumaltos kartu su klinkeriu klinties dalelės yra labai smulkios, t. y. žymiai smulkesnės nei cemento (klinkerio) dalelės. Nepaisant didelio smulkumo jos neturi aglomeravimosi savybių, todėl tolygiai pasiskirsto cimente. Užsienio mokslininkų (Allahverdi, Salem 2010; Bonavetti *et al.* 2003; Nehdi 2003) darbuose teigiama, kad sumalto klinkerio dalelės, klinties dalelės veikia kaip tepalas ir užtikrina tolygesnį cementuojančių dalelių pasiskirstymą bei tolygesnę ir tankesnę kietėjančio cementinio karkaso struktūrą, ypač esant mažesniems V/C santykiams. Tyrėjai (Allahverdi, Salem 2010) ištyrė, kad klinties priedas turi dispergavimo savybių ir pagerina aglomeruotis linkusių ir sunkiai išmaišomų priedų, tokių kaip silicio dioksido dulkės, sklaidą cementinėje matricoje.

Tyrimais (Yahia *et al.* 2005) buvo įrodyta, kad klinties priedas, turintis mažesnę tankį nei klinkeris, didina tešlos išeigą esant vienodam V/C santykiui ir gerina betono slankumą bei užpildų

pasiskirstymą. Tačiau kiti mokslininkai (Petit, Wirquin 2010) nustatė, kad didelio smulkumo klinties priedas didina cemento tešlos klampą, taigi ir reikalingą vandens ir cemento santykį (V/C), tai turi įtakos betonų ilgaamžiškumo savybėms, tokioms kaip atsparumas šalčiui, cheminiam aplinkos poveikiui ir pan. Mokslininkai (Bonavetti *et al.* 2003; Nedhi *et al.* 1996; Voglis *et al.* 2005) nustatė, kad klinties priedas didina arba neturi įtakos ankstyvajam stipriui, tačiau sumažina stiprį vėlesniais kietėjimo laikotarpiais. Ankstyvasis kietėjimo laikotarpis - tai kietėjimas po dviejų parų, o vėlyvasis - po septynių ir daugiau parų. M. Nedhi (Nedhi *et al.* 1996) teigia, kad klinties priedas turi ir cheminį poveikį, labai smulkios jos dalelės tarnauja kaip kalcio hidroksido kristalizacijos centrai ir skatina C₃S hidrataciją, o reakcijoje su C₃A susidaro karboaliuminatai.

S. Tsivilis ir kiti mokslininkai (Tsivilis *et al.* 1999) ištyrė, kad klinties priedas cemento klinkeryje mažina vandens sąnaudas normalaus tirštumo cemento tešlai paruošti. Jie nustatė, kad 15 % cemento klinkerio pakeitus klintimis, vandens sąnaudos sumažėja 2 % lyginant su pradiniu klinkeriu, o didinant kiekį iki 35 % – sąnaudos sumažėja 3 %.

Taip pat S. Tsivilis ir kt. (Tsivilis *et al.* 1999) nustatė, jog stiprumo savybėms klintis turi dvejopą įtaką. Didelis jos kiekis (35 %) betono gniuždymo stiprį po 28 parų sumažina gana ženkliai apie 40 %, lyginant su pradiniu cemento klinkeriu, o nedidelis kiekis (5 %) nežymiai padidina betono gniuždymo stiprį apie 5 %. Nustatyta, kad 5–10 % klinkerio pakeitus klintimis, gniuždymo stipris po 2 ir 7 parų gaunamas didesnis, negu pradinių bandinių, be klinties priedų.

Rusų mokslininkas Kalašnikovas (Калашников 2006) tyrė plastifikuojančio priedo C-3 panaudojimą betonuose. Buvo tiriamas toks plastifikuojančio priedo kiekis, kad jo pridėjus būtų gautas betono mišinys, kuriame būtų kuo mažiau vandens ir būtų pasiektas didesnės stipruminės savybės ir tankis. Nustatyta, kad panaudojus plastifikuojančio priedo vandens ir cemento galima sumažinti iki 20%, todėl galima reguliuoti betono savybes. Pridėjus plastifikuojančio priedo C-3, betono mišinio slankumas padidėja nuo 2–4 cm iki 20 cm, nekeičiant vandens kiekio mišinyje.

Mokslininkas Vovkas (Вовк 2006) tyrė betonų priedus šiuolaikinėje statyboje. Jo tyrimų rezultatai rodo, kad paprasčiausias ir efektyviausias būdas pakeisti betono mišinio savybes ir pagerinti kokybę yra cheminių priedų naudojimas. Jie tampa tokie pat svarbūs, kaip ir rišamosios medžiagos, užpildai, vanduo betono mišinyje. Priedų naudojimas yra efektyviausias būdas gauti geresnės kokybės betoną. Didelis stipris, vandens pralaidumas, atsparumas šalčiui ir betono ilgaamžiškumas, šios savybės yra gaunamos naudojant betono mišiniuose šiuolaikinius priedus.

Pagal J. G. Marčiukaitį (Marčiukaitis 2007), kietėjant betono mišiniui, keičiasi jo tankis ir poringumas, nes atsiranda porų, tuštumų kapiliarų, kuriuos palieka išgaravusi laisvojo vandens dalis. Kitas ypač svarbus procesas – cementinio akmens traukimasis, vykstantis dėl vandens ryšio

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

su cementu jo hidratacijos metu ir cemento tešlos formų kitimo. Laisvasis vanduo, išgaruodamas sukelia didžiausią betono susitraukimo deformacijų dalį.

1.1 Cemento tipai

Pagal standartą (LST EN 197-1 2011), cementas - tai tam tikros cheminės sudėties neorganinių medžiagų milteliai, kurie su vandeniu sudaro ilgainiui sukietėjančią tešlą. Skiriami penki cementų tipai:

1. CEM I – portlandcementis;
2. CEM II – sudėtinis portlandcementis;
3. CEM III – šlakinis cementas;
4. CEM IV – pucolaninis cementas;
5. CEM V – sudėtinis cementas.

Standartinės cemento stiprumo klasės yra trys: 32.5, 42.5, 52.5. Šios klasės nustatomos bandant bandinių stiprį gniuždant po 28 parų kietėjimo. Remiantis standartu (LST EN 197-1 2011), cemento ankstyvasis stiprumas apibūdinamas gniuždymo stipriu, nustatomu po 2 arba 7 parų. Pagal ankstyvąjį stiprumą kiekviena stiprumo klasė yra skiriama į dvi ankstyvojo stiprumo klases. Tai įprastinio ankstyvojo stiprumo klasė, kuri žymima raide N, ir didelio ankstyvojo stiprumo klasė, kuri žymima raide R.

Betono mišinio gamybai naudojamam cementui yra keliami tam tikri cheminiai reikalavimai, kurie nurodyti 1 lentelėje. Yra nustatomi kaitmenys, netirpmenys, sulfatų (SO_3) kiekis, chloridai, pucolaniškumas.

1 lentelė. Mechaniniai ir fizikiniai cemento reikalavimai, išreikšti charakteristinėmis vertėmis (LST EN 197-1: 2011)

Gniuždymo stipris, MPa				Rišimosi pradžia, min.	Tūrio pastovumas, mm	
Stiprumo klasė	Ankstyvasis		Standartinis, 28 paros			
	2 paros	7 paros				
32,5 N	-	≥ 16	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10	-				
42,5 N	≥ 10	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	≥ 60	
42,5 R	≥ 20	-				
52,5 N	≥ 20	-	$\geq 52,5$	-	≥ 45	
52,5 R	≥ 30	-				

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Daugumoje literatūros šaltinių autoriai portlandcemenčio apibrėžimą pateikia panašiai. Pagal LST EN 197-1 2011 standartą, portlandcemenčiu vadinama hidraulinė rišamoji medžiaga, kurios sudėtyje vyrauja kalcio silikatai (70-80 %). Portlandcementis gaunamas sumalus klinkerį ir tam tikrą kiekį gipso. Gipso dedama tiek, kad portlandcementyje būtų ne mažiau kaip 1,0 – 1,5 ir ne daugiau kaip 3,5-4,0 % SO_3 . Portlandcemenčio tankis yra 3,05 – 3,15 g/cm^3 . Jo piltinis tankis priklauso nuo sutankinimo, nes nesutankinto cemento piltinis tankis yra 1,10 g/cm^3 , vidutiniškai sutankinto – 1,30 g/cm^3 , labia sutankinto – 1,60 g/cm^3 . Pagal aktyvių mineralinių bei kitų priedų kiekį ir jų pobūdį, portlandcementis skirstomas:

1. Portlandcementį (jame aktyvių priedų visai nėra);
2. Portlandcementį su mineraliniais priedais (jame būna iki 20% aktyvių mineralinių priedų);
3. Plėtrujį portlandcementį;
4. Hidrofobinį portlandcementį;
5. Polimerinį portlandcementį;
6. Greitai kietėjantį portlandcementį;
7. Baltąjį arba spalvotąjį portlandcementį;
8. Sulfatams atsparų portlandcementį;
9. Kelių portlandcementį;
10. Tamponavimo portlandcementį;
11. Šlakinį portlandcementį (jame būna daugiau kaip 20% granuliuotų šlakų);
12. Pucolaninį portlandcementį (jame būna daugiau kaip 20% aktyvių mineralinių priedų).

Remiantis daugumos mokslininkų tyrimais (Боробьев 1979, Balandis *et al.* 1995, Naujokaitis 2003, Montvila 2003) cemento žaliavos degamos tol, kol išsilydo ir įgyja klinkerio pavidalą, kuris yra pagrindinė cemento sudedamoji dalis. Pagrindinį portlandcemenčio komponentą – klinkerį, sudaro CaO , SiO_2 , Al_2O_3 ir Fe_2O_3 oksidai. Šie oksidai sudaro apie 95 – 97 % klinkerio masės. Be to, klinkeryje yra ir kitų oksidų: MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 , Cr_2O_3 , SO_3 .

Pagal stiprumą portlandcementis skirstomas į tris klases: 32.5 MPa, 42.5 MPa ir 52.5 MPa. Taip pat portlandcemenčiai pagal priedų kiekį skirstomi ir žymini taip CEM I – tai portlandcementis tik su 5 % priedų, CEM II – tai sudėtinis portlandcementis su 6 – 20 % arba iki 35 % priedų. CEM III – tai šlakinis portlandcementis su 35 – 65 % priedų, CEM IV – pucolaninis portlandcementis su 11 – 55 % priedų, CEM V – sudėtinis cementas, turintis 18 – 50 % šlako priedų ir 18 – 50 % priedų. Su daugiau klinkerio portlandcementis jungiasi ir kietėja greičiau ir 90 % stipri pasiekia po trijų

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

parų kietėjimo. Portlandcementis pradeda jungtis ne anksčiau kaip po 45 min., o baigia ne vėliau kaip po 12 valandų. Portlandcemenčio kietėjimui ypač svarbi yra aplinkos temperatūra. Krintant temperatūrai portlandcementis kietėja lėčiau, esant nuliui laipsnių nekietėja, o kylant aplinkos temperatūrai, jis kietėja sparčiau. Paprastas, normaliai sukietėjęs portlandcementis yra atsparus šalčiui.

Portlandcementis – pagrindinė ore ir vandenyje kietėjanti rišamoji medžiaga, gaunama iš klintinių uolienų ir molio tam tikros sudėties mišinio, išdegus jį iki sukepimo ir sumalus su priedais. Iš dalies žaliavų mišinį galima pakeisti aukštakrosnių šlakais, nefelininiu šlamu, opoka, tačiau žaliavų sudėtyje po degimo privalo būti tam tikras kiekis pagrindinių metalų oksidų: ~62 – 67 % CaO , ~20 – 25 % SiO_2 , ~4 – 8 % Al_2O_3 , ~2 – 5 % Fe_2O_3 . Be šių oksidų, dar cemente būna ir kenksmingųjų priemaišų: SO_3 , MgO , Na_2O , K_2O . Pagrindiniai gamybos procesai yra žaliavų paruošimas šlapiuoju arba sausuoju būdu, degimas iki sukepimo ir klinkerio malimas su priedais. Gaminant šlapiuoju būdu žaliavos yra trupinamos, malamos ir sumaišomos su dideliu vandeniu (42 – 45 %) kiekiu. Paruošta vienalytė masė vadinama šlamu. Sausuoju būdu – žaliavos smulkinamos, sumaišomos, o iš miltelių gaminamos granulės. Gaminant sausuoju būdu sunaudojama apie 1,5 – 2 kartus mažiau kuro. Paruoštas žaliavų mišinys degamas sukamosiose krosnyse apytikriai 1500 °C temperatūroje. Tuo metu žaliavoje vyksta daug fizikinių bei cheminių procesų. Išdegtos sukepusios žaliavos vadinamos klinkeriu. Tai žalsvai pilki amorfinio stiklo grūdėliai (10 – 40 mm). Degimo - sukepimo metu susidarę klinkerio junginiai vadinami mineralais. Svarbiausieji mineralai yra trikalbio silikatas $3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S - alitas), dikalcio silikatas $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S - belitas), trikalčio aliumnatas $3CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A), tetrakalcio aliumoferitas $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (C_4AF). Klinkeris vadinamas *alitinu*, kai jame alito yra daugiau nei 55 %, o belito mažiau nei 20 %; *belitinu*, kai alito yra mažiau nei 40 %, o belito daugiau nei 40 %; *normalusis* klinkeris kai 40 – 55 % yra alito ir 20 - 40 % belito, tačiau visais trim atvejais $C_3A + C_4AF$ yra 20 – 25 % (masės); *aliuminatniu*, kai C_3A daugiau kaip 10 %, o C_4AF mažiau nei 15 %; *aliumoferitiniu* - C_3A mažiau nei 10 %, o C_4AF daugiau nei 15 %, bendram silikatų kiekiui esant 75 %. Nuo trikalciosilikato (C_3S) kiekio priklauso portlandcemento stiprumas, kietėjimo greitis, išskiriamos šilumos kiekis (840 – 910 kJ/kg) kietėjant. Dikalcio silikatas (C_2S) kietėja lėčiau, tačiau palankiomis sąlygomis jo stiprumas tolygiai didėja keletą metų, dikalcio silikatas tampa labai stiprus bei turi teigiamos įtakos portlandcemenčiui kietėjant, kietėjant išskiria nedaug šilumos (200 – 250 kJ/kg). Trikalčio aliumnatas (C_3A) yra aktyviausias mineralas, daugiausia išskiria šilumos, labai greitai rišasi ir kietėja, bet yra mažesnio stiprio. Tetrakalcio feritas kietėdamas išskiria apie 400 kJ/kg šilumos, esti

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

didesnio stiprio nei C_2S ir C_3A . Didžiausio stiprumo yra portlandcementis, kuriame daugiau trikalčio silikato ir trikalčio aliumnato, o mažesnio – alito ir belito mišinys bei alito mišinys su tetrakalcio feritu (C_4AF). Padidinus C_3A kiekį portlandcemente iki 15 % stiprumas padidėja tik kietėjimo pradžioje. Portlandcemenčio, kuriame iki 10 % trikalčio aliuminato, stiprumas labiausiai padidėja mišinyje su C_3S , nors vien C_3A stiprumas didėja lėtai. Portlandcementis pradeda rištis ne anksčiau kaip po 45 min., o baigia – ne vėliau kaip po 10 val. Cementinio akmens stiprumas sparčiai didėja pirmąsias 2 – 7 paras ir didėja ilgai – ištikus mėnesius ir metus. Stiprumo didėjimo intensyvumas priklauso nuo cemento mineraloginės sudėties, nuo jo dalelių smulkumo, bei kietėjimo sąlygų – drėgmės kiekio ir aplinkos temperatūros. Portlandcemenčiui kietėti palankiausia yra drėgna aplinka (95 – 100 % santykinio drėgno); ilgą laiką kietėdamas vandenyje jis darosi stipresnis negu kietėdamas ore.

Cemento standartinis stiprumas yra apibūdinamas gniuždymo stipriu, nustatytu po 28 parų kietėjimo standartinėmis sąlygomis pagal EN 196 – 1 reikalavimus. Pagal standartinį stiprumą cementas skirstomas į tris klases: 32,5 klasė, 42,5 klasė ir 52,5 klasė. Cemento stiprumą galima nustatyti po 2 ir 7 parų kietėjimo, tai vadinamoji ankstyvojo stiprumo klasė, ji esti dvejopa – įprastinio (žymima raide N), ir didelio ankstyvojo stiprumo (žymima raide R). Tikrinamos ir kitos cemento savybės: plėtra (tūrio pastovumas), kaitinimo nuostoliai, ne tirpmenys, sulfatų ir chloridų kiekiai, pucolaniškumas ir sudėtis.

Portlandcemenčio kietėjimo greitis taip pat priklauso ir nuo aplinkos temperatūros. 0 – 8 °C temperatūroje jis 2 – 3 kartus mažesnis negu 20 °C temperatūroje. Todėl žemesnėje temperatūroje kietėjantiems betonams portlandcementis gaminamas dedant daugiau C_3A . Neigiamoje temperatūroje vandeniui virtus ledu, cementai be specialių priedų nekietėja. Dabar taikomi du hidroterminio betono apdorojimo būdai: šutinimas 80 – 95 °C temperatūroje ir autoklavinis apdorojimas 174 – 195 °C temperatūroje (slėgis 0,8 – 1,2 MPa). Sočiųjų garų aplinkoje šutinami betono gaminiai, kietėdami 8 – 16 val., įgauna ~70 % klasės stiprumo. Kietinant autoklave, po 8 – 12 val. gaunamo cementinio akmens stiprumas siekia klasei būdingą stiprumą.

Betoną šutinant padidėja C_3S , C_4AF ir C_3A hidratacijos sparta, o C_2S dar nehidratuoja. Hidratacijos metu susidaro labiau kristalizavęsi ir būdingesnių bazės savybių kalcio hidrosilikatai (C-S-H). Į portlandcementį rišimosi spartai reguliuoti visada dedama iki 5 % gipso, kuris hidratacijos metu reaguoja su C_3A . Susidarantis kompleksinis junginys vadinamas trisulfohidroaluminatu arba etringitu. Rišimąsi lėtinantis gipso priedo poveikis aiškinamas tuo, kad virš hidratuojamų C_3A dalelių susidaro etringito junginio plėvelė, trukdanti vandeniui patekti į

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

gilesnius C_3A sluoksnius. Po tam tikro laiko vandens slėgis šią plėvelę suardo, ir reaguoja gilesni C_3A sluoksniai. Procesas vyksta cikliška, tad ir cemento rišimasis pradžioje sulėtėja. Šūtinant susidaręs etringitas persikristalizuoja į monosulfohidroaluminatą. Kietinant autoklaviniu būdu, kai temperatūra pakyla iki $> 100\text{ }^\circ\text{C}$ monosulfohidroaluminatas suyra, ir Al bei SO_4 jonai pereina į gelio sudėtį. Šiuo būdu gauti cemento mineralų hidratai esti iš daugiau kristalų, tuo paaiškinamas didesnis cementinio akmens stiprumas.

Pagal standartinius tyrimo duomenis cemento mechaninių, fizikinių ir cheminių savybių charakteristinės vertės įvertinamos statistiniais metodais, laikant, kad tyrimo rezultatų skirstinys yra normalusis. Procentinė ne atitikties norma, kuria pagrįsta nustatytoji charakteristinė vertė, yra 5 %.

Nagrinėjamų literatūros šaltinių autorių teigimu (Горчаков, Баженов 1986, Воробьев 1979, Deltuva *et al.* 1982, Naujokaitis 2003, Naujokaitis 2007, Montvila 2003) kiekvienas portlandcementis skiriasi savo savybėmis bei paskirtimi. Greitai kietėjantis portlandcementis (CEM I 42,5 R) gaminamas dedant 5 % kietėjimo greitį reguliuojančių priedų. Šis portlandcementis gaminamas dviejų klasių: 42,5 R ir 52,5 R. Tris paras kietėjęs jis pasiekia ne mažesnę 50 % klasės stiprį. Plačiai naudojamas statybinių mišinių gamyboje.

Hidrofobinis portlandcementis yra paprastas portlandcementis su vandens nepraleidžiančiais priedais. Sukietėjęs cemento akmuo mažiau praleidžia vandens, yra atsparesnis šalčiui, cikliškam sudrėkimui ir išdžiūvimui. Šis portlandcementis naudojamas pastatų apdailai, tinko mišinio skiediniams, nes jame mažiau kristalizuojasi druskos.

Baltasis portlandcementis gaminamas iš grynų klinčių, marmuro ir grynų molių. Į jį dedama mažiau priedų. Kietėdamas baltasis portlandcementis mažai susitraukia. Gaminamas 42,5 stiprumo klasės. Naudojamas dekoratyviniams tinko ir mūro šlapiems mišiniams gaminti.

Sulfatams atsparus portlandcementis yra specialios klinkerio sudėties, gaminamas 32,5 stiprumo klasės. Šis portlandcementis atsparus užšalimui ir atšilimui bei sudrėkimui ir išdžiūvimui. Naudojamas konstrukcijoms, kurias veikia druskų prisotintas vanduo.

Pucolaninis portlandcementis – tai paprasto cemento klinkerio ir gamtinių priedų mišinys, kuris sumaišytas su vandeniu greitai kietėja ne tik ore, bet ir vandenyje bei drėgnoje aplinkoje. Stiprumo klasės 32,5 arba 42,5. Esant teigiamai neaukštai temperatūrai, kietėja lėtai. Atsparumas šalčiui yra mažesnis už paprasto portlandcemenčio atsparumą šalčiui. Šis portlandcementis atsparesnis gėlame ir mineralizuotame vandenyje.

Šlakiniai portlandcemenčiai gaunami smulkiai sumalus paprasto cemento klinkerį ir granuliuotus aukštakrosnių šlakus. Šlakinių priedų dedama 35 – 60 %. Šis portlandcementis kietėja

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

lėčiau nei paprastas portlandcementis. Atsparus gėlam ir sulfatiniam vandeniui, tačiau ne toks atsparus geriamam vandeniui.

Aliuminatinis portlandcementis yra atskira portlandcemenčio grupė, gaminama iš kitokių žaliavų. Šis portlandcementis labai greitai kietėja ir labai greitai didėja jo stipris, jau po 6 valandų jis įgyja 20 MPa stiprį, po paros - 42 MPa stiprį, o po 28 parų portlandcemenčio stipris siekia 60 MPa. Kietėdamas išskiria gana daug šilumos, todėl aliuminatinis portlandcementis labai gerai tinka darbams žiemą. Sukietėjęs portlandcementis yra labai tankus, atsparus karščiui, šalčiui, vandeniui, sulfatams ir sieros dioksido (SO_2) prisotintam vandeniui.

Didžiosios Britanijos mokslininkų nuomone (Malthotra, Metha1996), portlandcementis yra teršianti aplinką statybinė medžiaga, nes jo gamyba sukuria didelius išmetamųjų dujų kiekius, sukeldamas šiltnamio efektą, jai taip pat reiki daug natūralių išteklių ir energijos. Cemento pramonei yra pritaikytos griežtesnės aplinkos apsaugos taisyklės, ypač pramonės atliekų utilizacijai.

Remiantis daugelio mokslininkų tyrimų duomenimis (Zhang *et al.*2008, Huet *al.*2001, Bellmann, Stark 2009), cheminių medžiagų aktyvacija paprastai taikoma norint pagerinti ankstyvųjų cementų stiprumą, o tai dažniausiai padidina kainą.

Betono tūris neišvengiamai keičiasi, nuo labai ankstyvo amžiaus pereinančios į ilgalaikę elgseną. Taigi, betono struktūros yra pažeidžiamos savaiminių įtempių ar susitraukimo įtrūkių, kurie gali netik sukelti rimtų struktūrinių defektų, bet gali sumažinti eksploataavimo galimybę, trukmę ir betono estetiškumą.

Remiantis literatūros šaltiniais (Turcy 2004, Hannant *et al.*1999), betono įtrūkių gali atsirasti skirtingomis sąlygomis ir susitraukimas atsiranda taikant įvairius mechanizmus. Mokslininkų teigimu (Radoce1994, Wittmann 1976, Radocea 1998, Barcelo *et al.* 2001, Krontöfet *al.*1995), per pirmąsias kelias valandas betonas vis dar yra pusiau skystos arba plastiškos būsenos, iš čia kilusi sąvoka plastiškasis susitraukimas. Šiame etape cementinės medžiagos pereina per neigiamus tūrinius svyravimus, dėl to cheminių medžiagų kilmė turi įtakos cemento hidratacijai.

Autorių kolektyvo (Zhanget *al.*2008, Achternboschet *al.*2005) nuomone portlandcemenčio klinkeris yra gaminamas deginant didelėje temperatūroje, žaliavos miltai susideda daugiausiai iš klinčių ir molio. Pastaraisiais metais buvo pastebėta, kad cemente padaugėjo sunkiųjų metalų. Mikroelementai gali būti gauti iš žaliavų ir kuro. Kuras yra dviejų tipų: iškastinio kuro (akmens anglis, naftos koksas) ir antrinis kuras (padangų, alyvų atliekos). Mikroelementų klinkeryje ir vėliau portlandcementyje buvimas gali turėti reikšmingų pasekmių. Pasak daugumos užsienio autorių (Kakali 1995, Murat, Sorrentino 1996, Katyalet *al.* 1999, Stephanet *al.*1999, Andradeet *al.*2003, Katyalet *al.*2000, Kolovoset *al.*2005), visų pirma, klinkerizacijos metu mikroelementai gali sukelti fazės stabilumo pokyčius. Iš tiesų, keletas tyrimų parodė, kad mikroelementai gali būti įtraukti į

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

klinkerio fazes. Antras autorių išskiriamas teiginys yra tas, kad cemento hidratacijos metu mikroelementai yra išleidžiami į porų tirpalą, turintį pagrindinį pH, kuris vėliau reaguoja. Jie gali būti absorbuojami į kai kuriuos hidratus, pavyzdžiui, kalcio silikato hidrato gelis (C-S-H), arba formuojasi į naujus junginius, tokius kaip hidroksidai. Kiti mokslininkai pažymi (Tashiro *et al.* 1979, Poon *et al.* 1986, Cullinane *et al.* 1987, Ortego *et al.* 1989, Bhatt *et al.* 1996, Stephan *et al.* 1999, Olmo *et al.* 2001), kad gali atsirasti kelios pasekmės dėl techninių cemento savybių, pavyzdžiui, nustatymo kartotinumai ir gniuždymo stipris. Be to, turi būti apsvarstytas poveikis aplinkai tokių cemento pastų, kurių sudėtyje yra mikroelementų. Iš tiesų, atsižvelgiant į cemento pastos mikroelementų imobilizavimo pobūdį, jų išplovimo kinetika bus labai skirtinga.

Kaip teigia Naujokaitis (Naujokaitis 2007) aplinkos poveikio klasė pagal betono atsparumą šalčiui, pasireiškiant užšalimo ir atšilimo poveikiams, parenkama atsižvelgiant į klimatinės betoninių konstrukcijų eksploatavimo sąlygas. Atsparumas užšalimo ir atšilimo poveikiui ypač svarbus tiems dirbiniams ir konstrukcijoms, kurie nuolat mirksta vandenyje arba didelis vandens su leda tirpinančiomis medžiagomis ar jūros vandens įmirkis. 2 lentelėje pateikti mažiausi reikalavimai ir apribojimai, kuriais turėtų pasižymėti betonas, panaudotas eksploatuojamoje konstrukcijoje. Iš šios lentelės matome, kad kuo šaldymo ir atitirpinimo poveikis didesnis, tuo konstrukcijos betonui reikalingas mažesnis vandens/cemento santykis, aukštesnė betono stiprio klasė, didesnis cemento kiekis 1 m³ betono. Agresyviausioje aplinkoje esantis betonas (aplinkos poveikio klasė XF4) turi atlaikyti 300 užšalimo ir atitirpinimo ciklų, o ne tokioje agresyvioje aplinkoje (aplinkos poveikio klasė XF1) – tris kartus mažiau. Vadinasi, labai svarbu įvertinti betoninių konstrukcijų eksploatavimo sąlygas, dėl kurių betonas gali suirti. Tam, kad tai neįvyktų, betono gamyboje reikia taikyti šio standarto nustatytus minimalius sudėčių ir savybių reikalavimus.

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

2 lentelė. Betono sudėčių ir savybių apribojimai

		Šaldymo ir atšildymo poveikis			
Žymenys		XF1	XF2	XF3	XF4
Didžiausias v/c		0,55	0,55	0,50	0,45
Mažiausia stiprio klasė		C30/37	C25/30	C30/37	C30/37
Mažiausias cemento kiekis, kg/m ³		300	300	320	340
Min. oro kiekis	D≥32 mm	-	3,5 ^a	3,5 ^a	3,5 ^a
	D≥16mm	-	4,0 ^a	4,0 ^a	4,0 ^a
	D≥8mm	-	5,0 ^a	5,0 ^a	5,0 ^a
Mažiausias atsparumas šalčiui LST1428.17		F100	F150	F200	F300
Kiti reikalavimai		Užpildai F ₁ arba MS ₁₈ pagal LST 12620 su reikamu šalčiui atsparumu			

2 lentelės tęsinys.

<p>Aplinkos aprašymas. Pasikartojančių eksploataavimo aplinkos klasių informaciniai pavyzdžiai</p>	<p>Vidutinis vandens įmirkis be ledo tirpinimo medžiagos. Vertikalūs betono paviršiai, veikiami lietaus ir šalčio.</p>	<p>Vid. vandens įmirkis su ledo tirpinimo medžiaga. Kelių konstr. vertikalūs bet pav, kuriuos veikia šaltis ir ledą tirpinančios druskos. Betoniniai statybiniai elementai jūros vandens purslų zonoje.</p>	<p>Aukštas vandens įmirkis be ledo tirpinimo medžiagos. Horizontalūs betono paviršiai, veikiami ir šalčio ir lietaus. Statybiniai elementai kintamoje gėlo vandens zonoje (tiltų atramos, pabėgiai) .</p>	<p>Aukštas vandens įmirkis su ledo tirpinančiomis medžiagomis arba jūros vandeniui, veikiami šalčio ir lietaus. Keliai ir gatvės atitirpinimo ir purškimo zonoje. Vandens valymo įrengimų apžiūros aikštelės. Statybos elementų kintamoje jūros vandens zonoje.</p>
--	--	---	---	---

a) Kai betone nėra įtraukto oro, betono savybės turi būti nustatomos remiantis patvirtintais bandymo metodais ir palyginamos su betonu, kurio atsparumas šalčiui dėl atitinkamos aplinkos poveikio klasės yra įrodytas.

Apie netinkamą atsparioms šalčiui konstrukcijoms portlandcementį rašo V.Žiogas, A.Štuopys, A.Navickas bei Mulleris su kolegomis. Tačiau jie nepakankamą betono atsparumą šalčiui sieja su kalcio hidroksido išsiskyrimu šaldymo metu. Tai paaiškina santykinai didesnis šio hidroksido tirpumas žemoje temperatūroje. Todėl šalčiui atspariam betonui gauti siūlo naudoti mažai alito (C3S) turintį portlandcementį. Nors, mūsų nuomone, padidėjęs laisvų kalkių išsiskyrimas iš cikliškai šaldomo betono yra antrinis požymis, rodantis, kad betonas jau pradėjo irti,

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

kad jo struktūroje susiformuoja nauji paviršiai (plyšiai), kur hidratuojasi ir kalcio hidroksidą išskiria iki tol nesureagavusios cemento dalelės.

Aptardamas portlandcemenčio (klinkerio) sumalimo smulkumo įtaką betono atsparumui šalčiui, A.Gumuliauskas teigia, kad labai smulkaus cemento (ypač papildomai permalto) taikymas betono kietėjimo pagreitinimui yra ginčytinas, nes gaunamas pradinis efektas gali atsiliiepti betono ilgaamžiškumui, kadangi išsemiamą betono ilgalaikio kietėjimo potencialą, - nebelieka „klinkerio fondo“, reikalingo armatūrą apsaugančiai aplinkai palaikyti (Gumuliauskas 1988). Tačiau S.Sarkar ir K.Rose su bendradarbiais teigia, kad smulkesnis portlandcementis gali padidinti betono atsparumą paviršiniam aižėjimui. Tai siejama su kapiliarinių porų skersmens sumažėjimu cementiniame akmenyje iš smulkiau sumalto portlandcemenčio, sumažėjusia tikimybe, kad greičiau kietėjantis cementinis akmuo bus pažeistas korozinių reiškinių ar susitraukimo deformacijų, sumažėjusiu vandens ir cemento santykiu bei vandens atsiskyrimu iš sukлото betono (Sarkar 1990; Rose 1989).

Stambiųjų ir smulkiųjų betono užpildų įtaka jo atsparumui šalčiui ir ledą tirpdančioms druskoms dažniausiai nagrinėjama dviem aspektais: betono fizikinių savybių ir struktūros (vandens poringumo parametru) pokyčių ir betono mechaninių tampriųjų – plastinių savybių modifikavimo požiūriu.

1.2 Užpildai

Betonų gamyboje užpildai sudaro apie 85 % betonų masės. Tai gamtinės uolienos arba dirbtinės medžiagos.

Dažniausiai užpildų gaunama iš gamtinių uolienu, kurios specialiai išžvalgomos, iškasamos ir perdirbamos: išvalomos, trupinamos, rūšiuojamos ir tiekiamos betonų ir kitų statybos produktų gamintojams. Užpildai gali būti susidarę gamtoje dūlėjant gamtinėms uolienoms – tai smėlis, žvyras. Jų grūdėliai būna įvairios formos: apskriti, plokšti ir pailgi, paviršius – nuzulintas, nugalvintas. Žvyras skirstomas į stambiagrūdį ir smulkiagrūdį. Stambūs uolienu gabalai yra trupinami ir sijojami – taip gaunama skalda. Grūdėlių paviršius yra šiurkštus, forma panaši į kubo, nors dažnai būna ir netaisyklingos formos. Tinkamiausi mineraliniams užpildams gaminti yra granito, sianito, diabazo, diorito, gabro, porfyru, liparito, andezito, trachito, tankiųjų klinčių, dolomito ir kitų uolienos. Gali būti naudojamos ir mineralinės pramonės atliekos.

Apie užpildų tinkamumą betonams sprendžiama pagal užpildų savybes, kurias galima suskirstyti į tris grupes:

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

1. fizikinės ir mechaninės savybės bei struktūra – stiprumas, tankis, akytumas, vandens įgeriamumas, skalumas, atsparumas šalčiui, atsparumas agresyviai aplinkai ir kt.;
2. granulimetrinės charakteristikos – stambumas, granulimetrinė sudėtis, dalelių forma, šiurkštumas ir kt.;
3. švarumas, įvertinamas pagal priemaišų kieki.

T.Powersas savo klasikiniuose darbuose rašė, kad užpilduose esančių porų tūris gali būti iki 0,3% visų betono porų tūrio. Aptardamas užpildų vaidmenį betone, V.Ramačandranas ir kiti pažymi, kad poros juose gali būti tokio dydžio, kad į jas įtrauktas vanduo greitai užšals ir taps betono irimo priežastimi. Todėl didelio skersmens porų (>600Å) tokiuose užpilduose neturėtų būti. Cituojami autoriai daro išvadą, kad tūrio padidėjimas dėl vandens užšalimo turi būti neutralizuotas užpildo tampriosiomis deformacijomis arba sumažinamas iš porėtų užpildų išstumiant vandenį. Tačiau bandymai, kuriuose naudoti tokie porėti užpildai, pavyzdžiui, diatomitai, pūstasis perlitas buvo nesėkmingi, nes jie sukeldavo šarminę betono koroziją (Powers 1953; Ramačandranas 1979).

Kiti autoriai pritaria T.Powerso nuomonei. R.Černis su kolegomis mano, kad betono užpildų kokybė lemia šaldomame betone susidarančio slėgio dydį ir drėgmės difuzijos jame greitį. Jų nuomone, cementinis akmuo šiems rodikliams įtakos beveik neturi. Pasak šių autorių, tankūs kvarcitiniai užpildai yra žymiai pranašesni už poringas karbonatines uolienas. Tačiau apie poringus betono užpildus atsiliepiama ir nuosaikiau. Pavyzdžiui, moldavų specialistai atsparų šalčiui betoną gaudavo ir su poringais karbonatiniais užpildais, keramzitu. Jų tyrimuose betonas su klinties užpildais buvo toks pat atsparus šalčiui, kaip ir su granitine skalda (mišinyje esant santykiui V/C = 0,34-0,44). A.Akimovas su kolegomis tai aiškina geresne kalkakmenio bei cementinio akmens kontaktinės zonos struktūra. Jie teigia, kad poringas užpildas betono mišinyje adsorbuoja ir įgeria „sedimentacinę drėgmę“, dėl kurios kontaktinėje zonoje ir nesusidaro poros. Su granitu, kvarcitu ar kitokiu tankiu užpildu taip neatsitinka.

Ekonominiu požiūriu labai racionalų pasiūlymą pateikė G.Skripkiūnas ir A. Gumuliauskas, tyrę smėlingojo betono savybes. Jie dalį stambių užpildų siūlė keisti smėliu, įrodydami, kad, nenaudojant orą įtraukiančių priedų, galima gauti atsparų šalčiui smėlingąjį betoną (Skripkiūnas 1993, Gumuliauskas 1998).

Vėliau tai patvirtino ir tyrimai, atlikti G.Skripkiūno ir V.Vaitkevičiaus. G.Skripkiūnas siekė optimizuoti betono makrostruktūrą, atsižvelgdamas į jo technologines ir eksploatacines savybes bei į Lietuvos žaliavų išteklius. G.Skripkiūnas nustatė, kad betonui su mažesne stambaus užpildo koncentracija negu įprastiniame stambiagrūdžiame betone, būdingas didesnis uždaras poringumas

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

(dėl didėjančio užpildų savitojo paviršiaus), didesnis atsparumas šalčiui ir vandens nepralaidumas, geresnės kitos technologinės, mechaninės ir eksploatacinės savybės. Tokio betono atsparumas šalčiui padidėja dėl mažėjančio užpildo ir cementinio akmens temperatūrinių deformacijų skirtumo, defektų santykinio tūrio sumažėjimo ir daugiausia - dėl betono porų struktūros pokyčio. Pasak šio autoriaus, gamybiniai bandymai, atlikti gelžbetoninių konstrukcijų gamyklose, parodė, kad betonai su sumažinta stambaus užpildo koncentracija iki 0,31 (800 kg/m³) gali būti naudojami betoninėms ir gelžbetoninėms konstrukcijoms gaminti be cemento poreikvojimo (Skripkiūnas, Vaitkevičius 1996).

Superplastifikatoriai dažnai naudojami betono gamybos technologijoje siekiant pagerinti skiedinio ir betono sistemų tinkamumą reikalaujančioms programoms. Betonų papildymu superplastifikatoriais siekiama dviejų tikslų: pirma, superplastifikatorių papildymas leidžia kontroliuoti srautų savybes ir, antra, superplastifikatoriai leidžia sumažinti vandens ir cemento santykį, tuo pat metu išlaikant tinkamumą siekiant pasiekti aukštą stiprumą ir ilgaamžiškumą. Cemento – vandens sistemų savybės priklauso nuo įvairių cheminių ir fizinių parametrų. Cemento - vandens sistema yra labai jautri, kai į mišinį pridedama superplastifikatorių. Esantys nedideli superplastifikatorių kiekiai padidina tinkamą savybių efektyvumą, bet dažniausiai tai yra susiję su stiprumu, nepageidaujamų retardanto reiškinų nustatymu cemento mišinyje.

1.3. Plastifikuojantys priedai ir jų poveikis betonui

Daug darbų skirta klinties portlandcemenčių bei jų betonų savybių modifikavimui naudojant superplastiklius (SP). Naujų, ypač efektyvių SP atsiradimas žymiai išplėtė galimas klintinio cemento naudojimo sritis. Tyrimai rodo, kad klinties portlandcemenčiams, priešingai nei kitokiems, pvz., pucolanų portlandcemenčiams, tinka visi dažniausiai naudojami SP, SP leidžia žymiai sumažinti užmaišymui reikalingą vandens kiekį, t. y. eliminuoja betono eksploatacinių savybių prastėjimą dėl padidinto W/C, kai naudojamas klinties portlandcementis. Autoriai Bonavetis ir Bentzsinis (Bonavetti *et al.* 2003; Bentz *et al.* 2001) nustatė, kad gaminant ypač tankius stiprius betonus su mažu W/C (0,25 - 0,30), kuriuose SP naudojimas būtinas, klinties priedo (tam tikro kiekio, dažniausiai iki 15 – 20 %) poveikis betono stiprumo savybėms nėra žymus, palyginus su betonų iš cemento be priedų. Kitų autorių (Bonavetti *et al.* 2003; Tsivilis *et al.* 2001) teigimu, tokio betono stipris vėlesniais kietėjimo laikotarpiais gali būti tik šiek tiek mažesnis (7 – 10 %), tačiau toks betonas pasižymi smulkesnėmis nesusiekiančiomis poromis, taigi, ir mažesniu pralaidumu, tolygesne struktūra ir atitinkamai geresnėmis eksploatacinėmis savybėmis.

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Mokslininkai (Bentz, Conway 2001) teigia, kad klinties priedas betonuose su mažu W/C atskiesdamas (pakeisdamas) cemento daleles sudaro prielaidas visiškai išnaudoti cemento rišamąsias savybes, t. y. įvykti visiškai cemento hidratacijai. (Bentz *et al.* 2001). Mokslininkas Tayloras (Taylor 1997) ištyrė, kad norint jog cementas (be priedų) visiškai hidratuotųsi, W/C turi būti mažiausiai 0,38, esant mažesniai W/C cementas visiškai nesihidratuoja, taigi dalis cemento dalelių lieka kaip mikro užpildai. Nustatyta, kad klinties priedas palengvina linkusių aglomeruotų silicio dioksido dalelių dispergavimą ir pagerina jų sklaidą cemente, silicio dioksido priedas yra papildoma cementuojanti medžiaga, būtina gaminant didelio tankio stiprius betonus, jis pagerina stiprumo savybes vėlesniu kietėjimo laikotarpiu, chemiškai atsparumą. SP naudojimas yra neatsiejama tokių betonų gamybos dalis (Bonavetti *et al.* 2003; Nedhi *et al.* 1996).

Efektyviausi šiuo metu gaminami priedai – superplastikliai, tai melamino arba naftaleno kondensacijos produktai su formaldehidu. Tačiau melaminas ir naftalenas gana brangios medžiagos, o tokių superplastiklių gamyba yra sudėtingas techninis procesas. Žymiai pigesnis ir prieinamesnis žaliavų požiūriu plastiklis yra techniniai lignosulfonatai. Techniniai lignosulfonatai nėra labai efektyvūs plastikliai, nes didesni jo kiekiai (daugiau kaip 0,25 % nuo cemento kiekio) žymiai lėtina cemento rišimąsi ir kietėjimą.

Daugelio mokslininkų nuomone, cemento rišimosi ir kietėjimo lėtinimo priežastimi yra redukuojančios medžiagos (angliavandeniai, organinės rūgštys ir jų junginiai). O juose esančios cukringos medžiagos nežymiai lėtina cemento hidrataciją ir kietėjimą. Be to, techniniai lignosulfonatai sumažina paviršiaus įtempį fazių sąlyčio paviršiuje „skystis – oras“ ir dėl to padidina oro įtraukimą į betono mišinį. Kiekviena dešimtoji procento dalis LST priedo padidina oro kiekį betono mišinyje (0,8 = 0,9 %) (Skripkiūnas 1996).

1.4. Cheminių priedų rūšys

Norint išgauti geras skiedinio, betono ir jo mišinio ypatybes, į mišinį dedama įvairių priedų, kurie pagreitina arba sulėtina betono mišinio rišimąsi, padaro jį plastiškesnį, pagreitina kietėjimą, padidina stiprumą, pralaidumą vandeniui ir atsparumą šalčiui. Parinkus tinkamus priedus, jų ypatybes ir kiekį, norima linkme galima keisti ir derinti kitas betono ypatybes. Tai rodo, kad betonas yra viena universaliausių statybinių medžiagų, kuriai galima suteikti pačių įvairiausių ypatybių: gana smarkiai keisti stiprumą, tankį, šilumines ypatybes, deformuoti ir kita (Baranauskaitė 2013).

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Priedai naudojami rišančiųjų medžiagų, betonų ir statybinių skiedinių savybėms pagerinti. Jie įmaišomi arba į rišančiąją medžiagą arba įterpiami kartu su kitais betono ir skiedinio komponentais ruošiant mišinius. Priedai maišomi kaip sausi milteliai arba vandeniniai tirpalai ir suspensijos. (Baranauskaitė 2013)

Priedai į betoną yra cheminės medžiagos, kurių nedidelis kiekis įvedamas į betono mišinį ir chemiškai bei fiziškai keičia betono savybes. Cheminiai priedai gali būti skysti, miltelių arba granuliu pavidalo. Priedų kiekis į betono mišinį yra nedidelis, todėl skaičiuojant medžiagų kiekį m^3 , priedų svoris neįtraukiamas. Kaip jau buvo minėta, cheminiai priedai keičia betono mišinio ir sukietėjusio betono savybes. (Baranauskaitė 2013)

Kietėjimą greitinantys priedai keičia rišimosi bei kietėjimo trukmę. Greitinančiais priedais spartinamas kietėjimas esant žemesnei aplinkos temperatūrai. Kietėjimą lėtinantieji priedai dažnai vartojami gipso betonuose. Priedai – mikro užpildai vartojami geriau sutankinti ir tolygumui pasiekti, rišamųjų medžiagų kiekiui betone sumažinti. Priedai – putokšliai ir dujodariai vartojami betono poringumui padidinti. Aktyvūs mineraliniai priedai padidina rišamųjų medžiagų patvarumą agresyvioje aplinkoje.

Šiandieninėje betono pramonėje daugiausiai naudojamos šios priedų grupės:

- plastiklis;
- orą siurbiantys priedai;
- plastikliai – orą įsiurbiantys;
- lėtikliai;
- prieššaltinis priedas;
- dujodariai (putokšliai);
- kietėjimo greitikliai.

Plastiklis – pats paprasčiausias ir seniausiai žinomas betono priedas – plastiklis, kurio bazinė žaliava yra modifikuotas lignino sulfonatas. Dėl jo sudėtyje esančio medžio cukraus šie plastikliai turi rišimąsi lėtinančių savybių, todėl plačiai naudojami prekiniam betonui vasaros metu. Jam nekeliama ypatingi reikalavimai, tačiau šis priedas netinkamas gaminti betono konstrukcijom, kur vienas iš pagrindinių tikslų – kiek galima greičiau išimti elementus iš formų. Šis priedas dozuojamas 0,2 – 0,5% nuo cemento kiekio.

Superplastikliai – plastiklių grupės priedas, dėl savo įvairios paskirties bei skirtingų žaliavų ši grupė yra daug platesnė. Superplastiklius galima būtų skirstyti į tris grupes: tradiciniai superplastikliai – naftalino arba melanino dervų pagrindu, akrilato dervų pagrindu; naujos kartos – sintetiniai superplastikliai polikarboksileterio dervų pagrindu.

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Superplastikliai veikia žymiai stipriau negu plastikliai, tai reiškia, kad jais galima gerokai sumažinti vandens kiekį, žymiai padidinti stiprumą bei plastiškumą. Superplastikliai naudojami prekinio betono ir betono konstrukcijų gamyboje, kur reikalingas aukštas pradinis stiprumas. Jie dozuojami 1-2% nuo cemento kiekio (<http://www.variva.lt/>).

Orą siurbiantys priedai ir plastikliai – priedai, kurie padeda reguliuoti betono mišinio porėtumą ir padidinti betono atsparumą šalčiui bei agresyviajai aplinkai. Dėl jų įtakos mažesnės vienodai išsidėsčiusios poros neleidžia laisvai migruoti vandeniui ar agresyviems skysčiams bei dujoms į betono vidų ir pažeisti jo struktūrą (Statybos technologija...2004).

Lėtiklis – cheminis priedas, be kurio sunku išsiversti esant karštai vasarai, tai lėtiklis, kuris taip pat naudojamas betonuojant masyvius elementus be siūlių, jo pagalba reguliuojamas hidratacijos procesas. Lėtiklis būtinas transportuojant betoną dideliais atstumais arba priverstinio laukimo atveju statybvietyje.

Prieššaltinis priedas – žiemos metu būtų sunku išsiversti be prieššaltinio priedo. Europoje neleidžiama naudoti priedų, kurie turi chloridų, nes jie sukelia gelžbetonio armatūros koroziją. Šie priedai veikia daugiau kaip greitikliai, taip pat turi cheminių medžiagų, kurios pakeičia vandens užšalimo tašką. Šie priedai turi šalutinį plastifikuojantį poveikį, todėl gaminant vidutinio stiprumo betonus galime nenaudoti plastiklio. Jo dedama 1-2% nuo cemento kiekio atsižvelgiant į temperatūrą. Naudojant prieššaltinį priedą galima dirbti iki -15°C . Be abejo, būtina laikytis visų reikalavimų, keliamų betonavimui žiemos metu. Tarkim, esant aplinkos temperatūrai -5°C , betono mišinio temperatūra turi būti ne žemesnė kaip $+10^{\circ}\text{C}$ (Kodėl verta....2011).

Dujodariai – naudojami lengviesiems betonams gaminti (Statybos technologija...2004). Aliuminio pudra maišoma į akytuosius arba poringuosius betonus. Ji būna dviejų markių: PAK-3 ir PAK-4. Dujos išsiskiria dėl aliuminio cheminės reakcijos ir šarmų, esančių cemento tešloje: $2\text{Al}+3\text{Ca}(\text{OH})_2+6\text{H}_2\text{O}\rightarrow 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{H}_2\text{O}+3\text{H}_2\uparrow$. Išsiskirdamas vandenilis išpučia masę. Kuo smulkesni aliuminio milteliai, tuo daugiau išsiskiria dujų.

Kietėjimo greitikliai – greitina kietėjimą, bet jų esant, betonas gali kietėti ir neigiamoje temperatūroje. Priedai, greitinantys cemento rišimą ir kietėjimą, yra kalcio chloridas, natrio chloridas, druskos rūgštis, geležies chloridas, aliuminio sulfatas, kalcio nitratas, kalcio aliuminio chloridas, statybinis (pusvandeninis) gipsas ir jų kompleksai. Iš anksto patikrinus, leidžiama naudoti natrio sulfatą, aliuminio chloridą, trivalentės geležies nitratą $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ ir kt. Šių cheminių priedų dedama tam, kad padidėtų stiprumas kietėjimo pradžioje, mažiau reikėtų cemento, trumpiau būtų galima laikyti gaminius šiluminėse kamerose. Nurodytus priedus rekomenduojama maišyti į betonus ir statybinius skiedinius, gaminamus su paprastu, pucolaniniu ir šlakiniu portlandcemenčiu

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

neleidžiama jų naudoti betonams ir skiediniams, gaminamiems su aluminatiniu cementu (Statybos technologija...2004).

Naudojant priedus galime padarytos tokias išvados:

1. Mažėja cemento sąnaudos;
2. Pagerėja betono techninės savybės (slankumas, plastiškumas);
3. Padidėja atsparumas šalčiui
4. Sumažėja pralaidumas vandeniui;
5. Sulėtėja rišimosi procesas;

Paprasčiausias ir efektyviausias būdas pakeisti betono mišinio savybes ir padidinti jo kokybę yra sukurti technologijas panaudojant cheminius 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. Betono mišiniuose naudojant šiuolaikinius priedus gali būti pasiektas didelis stipris, vandens nepralaidumas, atsparumas šalčiui ir betono ilgaamžiškumas.

Priedai, priklausantys atitinkamai normai plastifikatorių ir superplastifikatorių klasei, žinomi jau nuo 30 –ųjų metų, praeito amžiaus.

Tirpūs vandenyje polimeriniai plastifikuojantys priedai įgalina suformuoti paviršinę plėvelę, pristabdyti pradinę hidrataciją ir kt. Savo ruožtu plastifikuojantis veiksnys, kaip žinoma, priklauso nuo molekulės sandaros, prigimties, apimties ir hidrofiliųjų grupių padėties, molekulinės masės ir kt.

Ekonominiu požiūriu prieinamiausi techniniai lignosulfanatai (LST). Šių polimerų sandaroje yra iki 20 struktūrinių vienetų, kurių molekulinė masė 20000 – 30000 g/mol. Tik dalis turi sulfonatų grupę. LST molekulė apgaubia cemento daleles plėvele, turinčia neigiamą krūvį. Elektrostatinės jėgos padeda nedaug atstumti daleles ir padidinti klojingumą.

Hidratacijos proceso lėtėjimas priklauso nuo priedų dozavimo. Prie naujos kartos superplastifikatorių, polikarboksilato ir akrilato pagrindu, priklauso junginiai, suteikiantys betono tešlai didelį slankumą esant žemoms V/C vertėms (iki 0,28 – 0,3), kai gaminami tankūs betonai. Betono sudėtyje dėl polikarboksilatų poveikio modifikuojasi kopolimerai. Jų pagrindinė grandinė yra molekulės su laisvomis karboksilinėmis grupėmis ir dažnai su natrio druskomis. Naujų superplastifikatoriaus rūšių sintezės procesų ir savybių įvairovė suteikia galimybę reguliuoti betono mišinio reologines savybes ir vandens mažinimą.

Betonas yra viena iš universaliausių statybinių medžiagų, kuriai galima suteikti pačių įvairiausių savybių: gana smarkiai keisti stiprumą, reologines savybes, tankį ir kt (Deltuva 1982).

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Mokslininkas Vovkas (Вовк 2006) tyrė betonų priedus šiuolaikinėje statyboje. Jo tyrimų rezultatai rodo, kad paprasčiausias ir efektyviausias būdas pakeisti betono mišinio savybes ir pagerinti kokybę yra cheminių priedų naudojimas. Jie tampa tokie pat svarbus, kaip ir rišamosios medžiagos, užpildai, vanduo betono mišinyje. Priedų naudojimas yra efektyviausias būdas gauti geresnės kokybės betoną. Didelis stipris, vandens nepralaidumas, atsparumas šalčiui ir betono ilgaamžiškumas, šios savybės yra gaunamos naudojant betono mišiniuose šiuolaikinius priedus.

Rusų mokslininkas Kalašnikovas (Калашников 2006) tyrė plastiklio C-3 panaudojimą betonuose. Buvo tiriamas toks plastiklio priedo kiekis, kad jo pridėjus būtų gautas betono mišinys, kuriame būtų kuo mažiau vandens ir būtų pasiektas didesnis stiprumas ir tankis. Sumažinant vandens ir cemento kiekį panaudojant plastiklį galima reguliuoti betono savybes. Buvo nustatyta, kad panaudojus plastiklį betono mišinyje vandens kiekis yra sumažinamas iki 20 %. Įvedus superplastiklį betono mišinio slankumas padidėja nuo 2–4 cm iki 20 cm, nekeičiant vandens kiekio mišinyje. Plastifikuojančio priedo kiekis bandymų metu neviršijo 0,4–0,8 % nuo cemento masės.

Kita rusų mokslininkė Makišaeva (Макишаева 2007) nagrinėjo „Poliplast“ kompanijos priedų įtaką betono mišinio kokybei. Pagrindinė šių priedų savybė yra išsaugoti betono mišinio slankumą iki 1,5 valandos. Mišiniai išlaiko vienalytiškumą ir turi pakankamą slankumą, o laikas per kurį mišinys pristatomas į statybos aikštelę nepakeičia mišinio savybių. Mokslininkai taip pat tyrė plastiklius, kurie prailgina betono mišinio gyvavimo laiką. Betono mišinys su priedu Poliplast-180 slankumą išlaiko iki trijų valandų. Toks betonas greičiau įgauna savo stiprį, o taip pat yra išvengiama betono išsisluoksniavimo.

Buvo atlikti plastifikuojančio priedo „Winmix“ tyrimai betone. Buvo gaminamas betono mišinys, kurio projektuojamas slankumas 5 cm, susidedantis iš cemento, vandens, smulkaus bei stambaus užpildo ir plastifikuojančio priedo. Gamybai naudojamas cementas, kurio klasė CEM II 42,5. Didžiausias leistinas užpildo stambumas D_{max} yra 20 mm, užpildų kokybė – vidutinė. Formavimo mišiniai $W/C = 0,49$. Kiekviena kubelių partija buvo gaminama su skirtingu plastifikuojančiu priedo „Winmix“ kiekiu. Plastifikuojančio priedo buvo dedama nuo 0,3 iki 0,9 %. Arūno Jarunavičiaus atlikti tyrimai parodė, kad naudojant plastifikuojantį priedą galima sumažinti vandens ir cemento sunaudojamus kiekius (Jarunavičiaus 2007).

2. METODINĖ DALIS

2.1 Naudotos medžiagos

Įvertinus įvairių neorganinių rišamųjų medžiagų, užpildų ir priedų savybes bei jų įsigijimo organizacines ir ekonomines galimybes, betono gamybai buvo atrinktos šios medžiagos:

1. Neorganinės rišamosios medžiagos – AB „Akmenės cementas“ pagamintas CEM I 42,5 N ir CEM II/A-LL 42,5 N tipo cementas.
2. Smulkus užpildas – 0/4 mm frakcijos smėlis (LST EN 12620:2003+A1:2008).
3. Stambus užpildas – 4/16 mm frakcijos žvirgždas (LST EN 12620:2003+A1:2008).
4. Priedas - superplastiklis sintetinio polikarboksilato polimero pagrindu.
5. Vanduo (LST EN 1008:2003).

Žemiau pateikiamos pagrindinės šių žaliavų charakteristikos.

2.1.1.Cementas

Portlandcementis (CEM I) gaminamas iš beveik gryno klinkerio, pridedant iki 5 % papildomų priedų, jis greitai kietėja. Po 6 val. kietėjimo stiprumas gali siekti iki 10 MPa, o po paros kietėjimo 20 – 25 MPa. Šio cemento ankstyvusis stipris nustatomas po dviejų parų kietėjimo. Paprastai klinkeris su priedais esti smulkiau sumaltas (280 – 400 m²/kg), todėl intensyviau kietėja pradiniu laikotarpiu. Sumalto cemento smulkumas nustatomas Bleino prietaisu (EN 196-6). Portlandcemenčio CEM I savitasis tankis yra 3000 – 3200 kg/m³. Tinka naudoti betoninėms ir gelžbetoninėms konstrukcijoms, kai būtina, kad sukietėtų greičiau, ir kur jo neveikia agresyvieji vandenys.

AB „Akmenės cementas“ naudojamas cementas pasižymi tokiais savybėmis:

- Dalelių dydis – 5 – 30 μm .
- Tirpumas vandenyje (kai T = 20 °C) yra nežymus 0,1 – 1,5 g/l.
- Savitasis tankis: 2,75 – 3,20 g/cm³.
- Piltinis tankis 0,9 – 1,5 g/cm³.
- pH (kai vandens temperatūra T = 20 °C) 11 – 13,5.
- Lydymosi temperatūra > 1250 °C.

Klintonis portlandcementis gaminamas keturių atmainų, maišant maltas klintis su klinkeriu. Išskirtinis žymuo – raidė L arba LL. Klintyse $\text{CaCO}_3 \geq 75\%$, ir neturi būti molio bei organinių priemaišų.

2.1.2. Smulkus užpildas

Smėlis – tai biri natūrali arba dirbtinė akmens medžiaga, sudaryta iš 0,14–5 mm dydžio dalelių. Į betoną dažniausiai dedamas suklasifikuotas ir išplautas gamtinis smėlis. Tinkamiausi yra gamtiniai smėliai (t.y. likę dūlėjimo vietoje), nes jų dalelės labiau kampuotos ir šiurkštesnis paviršius. Antrinio (pernešto iš dūlėjimo vietos) smėlio dalelių paviršius būna nuzulintas, lygus, todėl blogiau sukimba su cemento akmeniu, tad ir betonas su tokiais smėliais visada būna.

Granulimetrinė smėlio sudėtis nustatoma sijojant sausą smėlį standartiniais sietais. Gamyboje naudojamas 0/4 mm frakcijos smėlis atitinkantis LST EN 12620:2003 grupės standartą.

2.1.3 Stambus užpildas

Gamtinis žvirgždo ir smėlio mišinys vadinamas **žvyru**. Kaip ir smėlis, žvyras būna pirminis ir antrinis. Pirminis žvyras esti aštriabriaunis, jo stambiosios dalelės vadinamos gargždu. Antrinio žvyro stambiosios dalelės vadinamos žvirgždu. Jų dalelės būna apskritos, plokščios, pailgos, paviršius nuzulintas, lygus. Ruošiant betono mišinius, natūralus nefrakcionuotas žvyras naudojamas retai, nes jame esančio smėlio ir stambių dalelių santykinis kiekis dažniausiai neatitinka reikalavimų. Tiriamajame darbe naudojamas 4/16 mm frakcijos **žvirgždas** atitinkantis LST EN 12620:2003 grupės standartą.

2.1.4. Plastifikuojantis priedas

Betono kokybė priklauso nuo jo sudėtinių dalių, todėl parenkamos medžiagos, kurios suteiktų betonui norimų savybių pagal paskirtį įvairiems gaminiams ir konstrukcijoms, kad iš jų pastatyti statiniai galėtų patikimai funkcionuoti įvairioje aplinkoje. Daugeliu atvejų tai pasiekama įmaišius cheminius priedus, kurie padeda gerinti betono savybes.

Naudotas superplastiklis pagamintas polikarboksilato polimero pagrindu. Suteikia puikių dispersinių savybių ir ilgalaiki betono mišinio plastiškumą. Superplastiklis mažina vandens kiekį reikalingą betono mišinio gamybai iki 45 % ir leidžia gaminti didelio stiprio betonus. Esant labai mažam V/C santykiui išsaugo mišinio plastiškumą. Šio priedo naudojimo dėka pagerėja pradinis ir galutinis gniuždymo stipris, sumažėja vandens pralaidumas, sumažėja vandens išsiskyrimas, pagerėja mišinio pasiurbimas ir žymiai sumažėja išsisluoksniavimo rizika.

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Superplastiklis gali būti naudojamas prekinio betono ir betoninių elementų gamyboje. Plačiai naudojamas savaime susitankinančio betono gamyboje. Geriausi rezultatai pasiekiami, kai superplastiklis pridedamas maišymo ciklo pabaigoje, kai visi komponentai yra drėgni.

2.1.5. Vanduo

Vanduo betono mišiniui ruošti ir betonui laistyti turi būti švarus, be žalingų, normalų betono kietėjimą stabdančių priemaišų (rūgščių, sulfatų, riebalų ir pan.). Betonui tinkamiausias yra geriamasis vandentiekio ir švarus upių bei ežerų vanduo.

Betono mišiniui ruošti galima vartoti jūrų ir kitokį sūrų vandenį, jeigu jame ištirpusių druskų kiekis ne didesnis už leistinąjį. Betono, užmaišyto su tokiu vandeniu, paviršiuje gali atsirasti dėmių, gali rūdyti gelžbetoninių konstrukcijų armatūra. Druskingų vandenų negalima vartoti tada, kai betono mišiniai ruošiami su aliuminatiniais cementais. Betono mišiniams negalima vartoti vandens, kuriame yra daug organinių priemaišų, t.y. jo pH – ne mažesnis nei 4. Betono gamybai naudojamas vanduo atitinka LST EN 1008:2003 grupės standartą.

Vandens tinkamumas betonui gaminti nustatomas remiantis chemine analize ir lyginamaisiais betono dirbinių – pavyzdžių bandymais. Šie bandiniai pagaminti naudojant esamą bei švarų geriamąjį vandenį yra bandomi po 28 parų kietėjimo nustatytomis sąlygomis. Vanduo laikomas tinkamu tik tada, kai su juo pagaminti betono pavyzdžiai pasižymi ne mažesniu stiprumu nei betono, kuriam gaminti buvo panaudotas švarus geriamasis vanduo, pavyzdžiai.

2.2. Betono bandinių formavimas

Bandiniai buvo gaminami pagal LST EN 12390-2:2009, šiuo eiliškumu:

- Į betono maišyklę suberiamas atsvertas neorganinis rišiklio kiekis, smulkus užpildas ir stambus užpildas ir viskas gerai išmaišoma.
- Reikalingas vandens kiekis sumaišomas su atsvertu priedo kiekiu, kuris įpilamas į sausą masę.
- Gautas mišinys sudedamas į $15 \times 15 \times 15$ cm presformas, išteptas alyva, ir sutankinama ant vibrostalo.
- Po paros kietėjimo presformos išardomos, gauti bandiniai išimami ir 28 paras išlaikomi vandenyje.
- Sukietėję ir išlaikę formą bandiniai paruošiami tyrimams.

2.3. Betono savybių nustatymo metodika

2.3.1. Tankis

Pagamintas reikiamos konsistencijos betono mišinys sudedamas į alyva suteptas formas. Mišinys formose sutankinamas vibruojant ant vibrostalo. Sutankintojo betono mišinio perteklius nužeriamas metaline liniuote lygiai su indo kraštais. Bandiniai kietėja 28 paras natūraliomis sąlygomis.

Sukietėjusio betono bandinių tankis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho = m/V, \text{kg/m}^3; \quad (1)$$

čia m – bandinių masė;

V – bandinių tūris.

2.3.2. Gniuždymo stipris

Betono bandiniai, 7 ir 28 paras kietėję vandenyje, gniuždomi presu (1 pav.), gauti rezultatai užrašomi ir apskaičiuojamas kubelių gniuždymo stipris.

Betono bandinių gniuždymo stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_b = F_b/A_b, \text{MPa}; \quad (2)$$

čia F_b – ardančioji jėga;

A_b - gniuždomasis plotas.



1 pav. Gniuždymo presas

2.3.3. Bandinių įmirkio normaliosiomis sąlygomis nustatymas

Betono bandiniai džiovinami iki pastoviosios masės džiovinimo spintoje $110 \pm 5^\circ\text{C}$ temperatūroje. Bandiniai aušinami bevandeniu kalcio chloridu ir laikomi iki tyrimo. Prieš bandymą bandiniai pasveriami svarstyklėmis ir nustatoma bandinio masė (m_0). Paskui bandiniai pamerkami į vandenį bandinių sotinimo vonioje. Vandens temperatūra – $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$, vandens lygis virš bandinių ne mažesnis nei 2 cm. Bandiniai vandenyje išlaikomi 72 valandas. Paskui jie išimami iš vonios, apšluostomi drėgnu audeklu ir pasveriami techninėmis svarstyklėmis (m_1). Tada pagal formulę (3) apskaičiuojamas bandinių įmirkis normaliosiomis sąlygomis:

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100, \% \quad (3)$$

čia m_0 - visiškai sauso bandinio masė, g;

m_1 - normaliosiomis sąlygomis įmirkusio bandinio masė, g.

Kad tyrimo rezultatai būtų išsamesni, bandinių įmirkis buvo skaičiuojamas po 1, 2 ir 3 parų mirkimo vandenyje.

2.3.4. Ultragarso impulso sklidimo greitis

Bandinių UIG buvo nustatomas po 7 ir po 28 parų kietėjimo vandenyje. Su ultragarso signalo sklidimo greičio nustatymo aparatu ir pagal formulę (4) apskaičiuojamas ultragarso impulso sklidimo greitis:

$$v = \frac{l}{\tau \cdot 10^{-6}}, m/s; \quad (4)$$

čia v – ultragarso impulso greitis, m/s;

τ – signalo sklidimo laikas, ms;

l – bandinio ilgis, m;

10^{-6} - konversijos koeficientas.

3. EKSPERIMENTINĖ DALIS

Eksperimentinėje dalyje naudojant Microsoft Excel programą yra analizuojami bandymų duomenys.

Vienas iš pagrindinių tikslų, remiantis parinktų žaliavų savybėmis, buvo parinkti betono sudėtį, reikalingą 1 m³ betono mišiniui paruošti. Betono mišinio sudėtis pateikta 3 lentelėje.

3 lentelė. 1m³ paruošti reikalingas žaliavų kiekis

Partija	Cementas, kg	Smėlis, kg	Žvirgždas, kg	Vanduo, kg	Plastiklis, kg
0L	455	700	1190	180	0
0.4L	455	700	1190	162	1,82
0.8L	455	700	1190	126	3,64
1.2L	455	700	1190	90	5,46

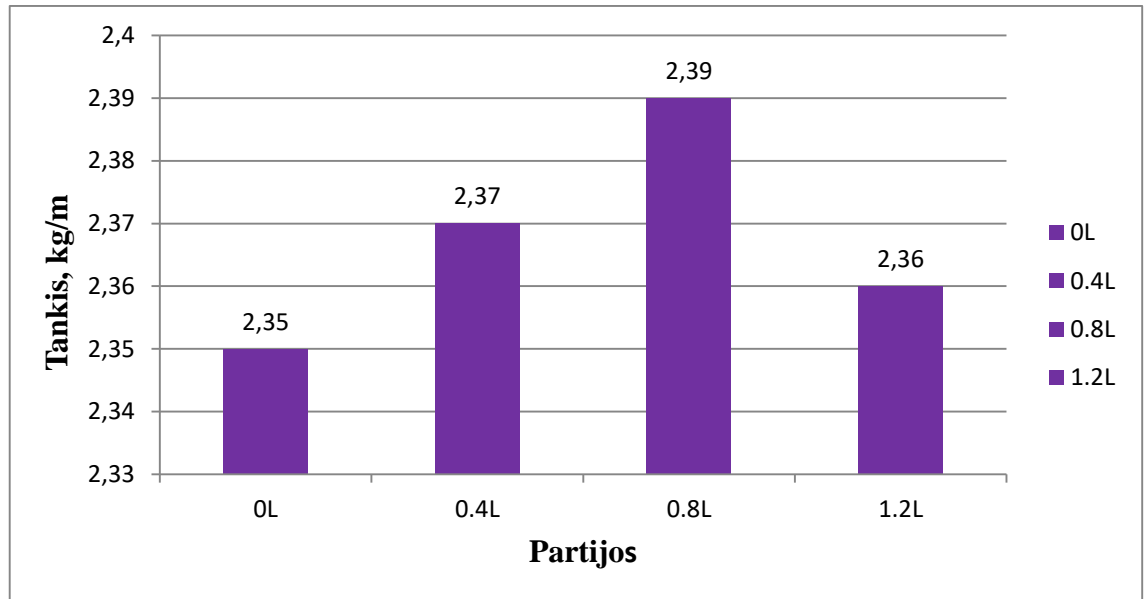
0N	455	700	1190	162	0
0.4N	455	700	1190	144	1,82
0.8N	455	700	1190	144	3,64
1.2N	455	700	1190	126	5,46

3.1. Betono tankio tyrimo rezultatų analizė

Tankiu vadinama natūralios būsenos medžiagos tūrio vieneto masė, išreiškiama absoliučiai sausos medžiagos masės m ir tūrio V santykiu.

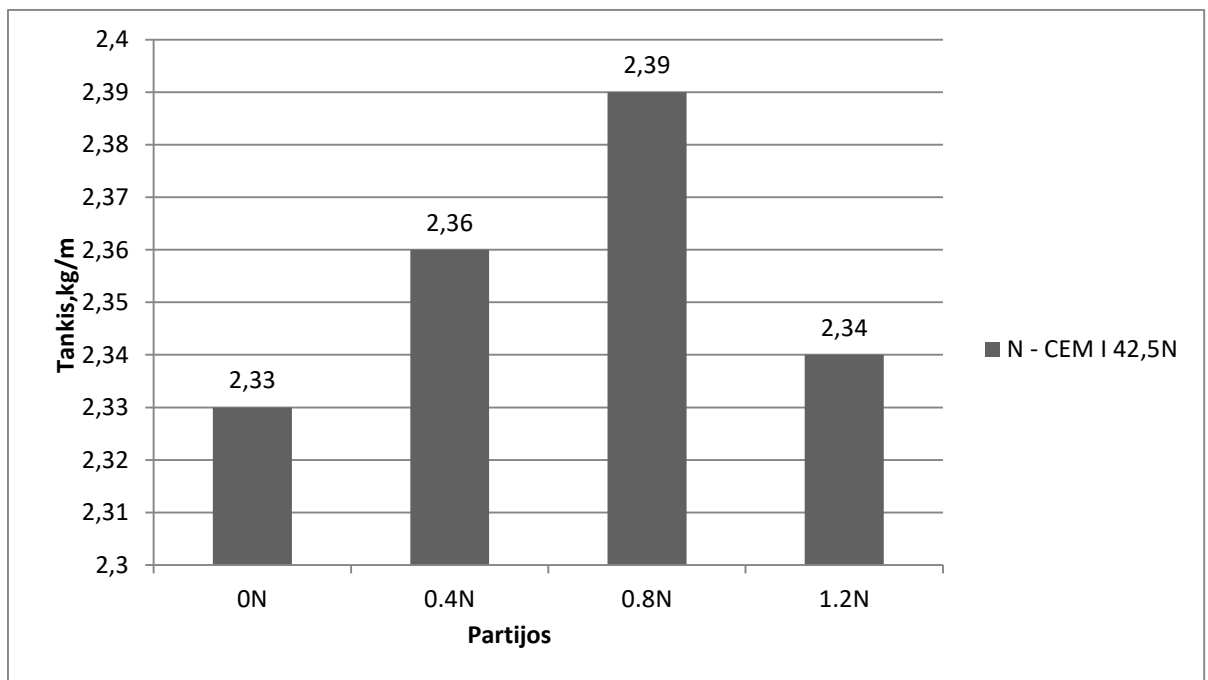
Sukietėjusių ir išdžiovintų iki pastovios masės betono bandinių tankio tyrimų rezultatai naudojant CEM II/A-LL 42,5N klintinį cementą pateikti 1 paveiksle, o naudojant CEM I 42,5 N cementą 2 paveiksle.

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms



2 pav. Tankio priklausomybė nuo plastifikuojančio priedo kiekio cimente CEM II/A-LL 42,5N

Iš 2 paveikslo matyti, kad naudojant betono gamyboje klintinį potlandcementį ir didinant plastifikuojančio priedo kiekį iki 0,8%, sukietėjusio betono tankis žymiai didėja, o vėliau pradeda kristi. Esant 0 % priedo kiekiui, tankis siekia 2,35 kg/m³, esant 0,8% priedo tankis siekia 2,39 kg/m³, o pridėjus maksimalų priedo kiekį, sukietėjusio betono tankis vėl krenta iki 2,36 kg/m³.

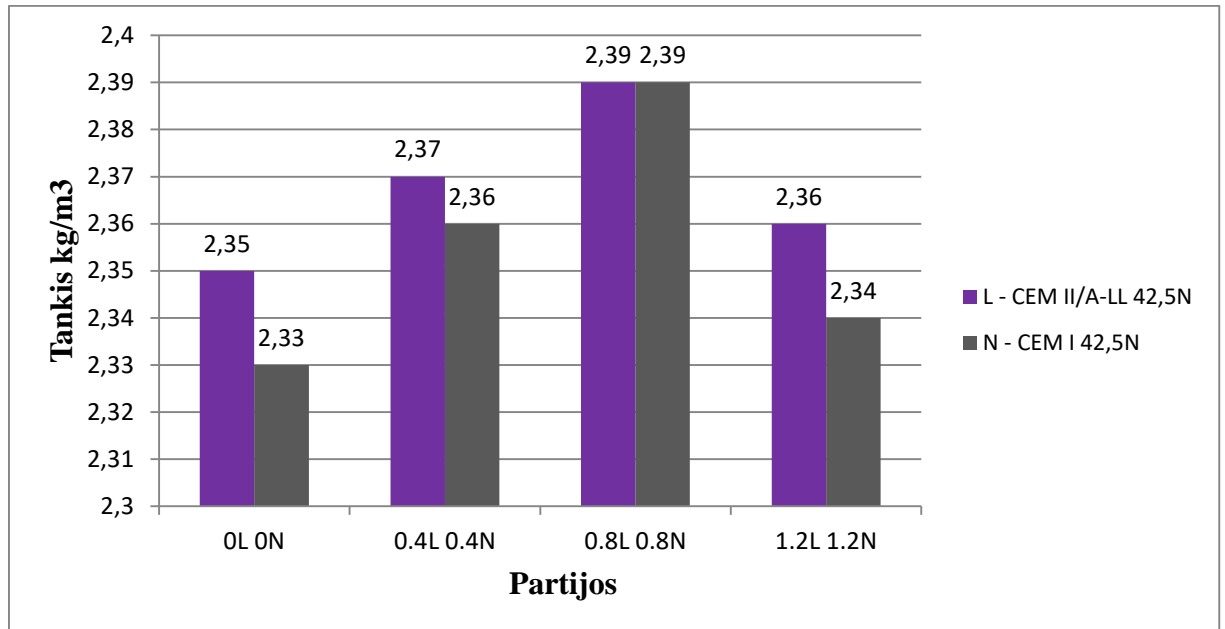


3 pav. Tankio priklausomybė nuo cemento tipo esant vienodam plastifikuojančio priedo kiekiui

Naudojant CEM I 42,5 N cementą, tankis didėja iki tol, kol pastiklio mišinyje yra 0,8%, o dar padidinus kiekį, tankis pradeda kristi. Didžiausias tankis – 2,39 kg/m³.

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

3 paveiksle pateiktas betono tankio rezultatų palyginimas naudojant abu cementus (CEM II/A-LL 42,5N ir CEM I 42,5N) su vienodais kiekiais plastifikuojančio priedo. Tendencija išlieka tokia pat – didžiausias tankis su 0,8% plastifikuojančio priedo, abiem cementams – 2,39 kg/m³.

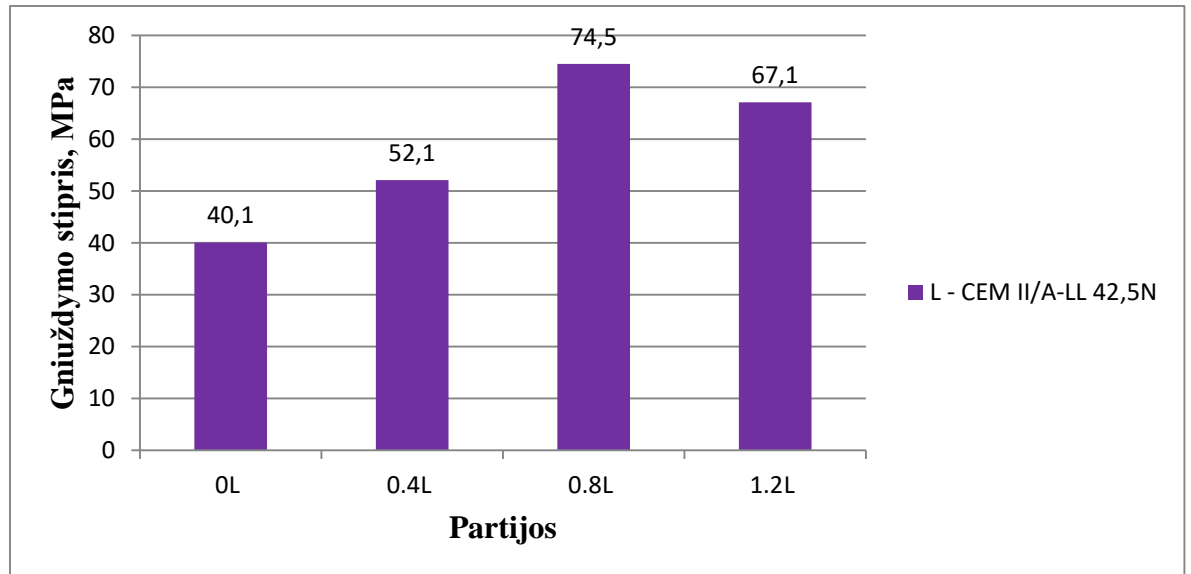


3 pav. Betono tankis naudojant CEM II/A-LL 42,5N ir CEM I 42,5N cementus

3.2. Betono gniuždymo stiprio tyrimo rezultatų analizė

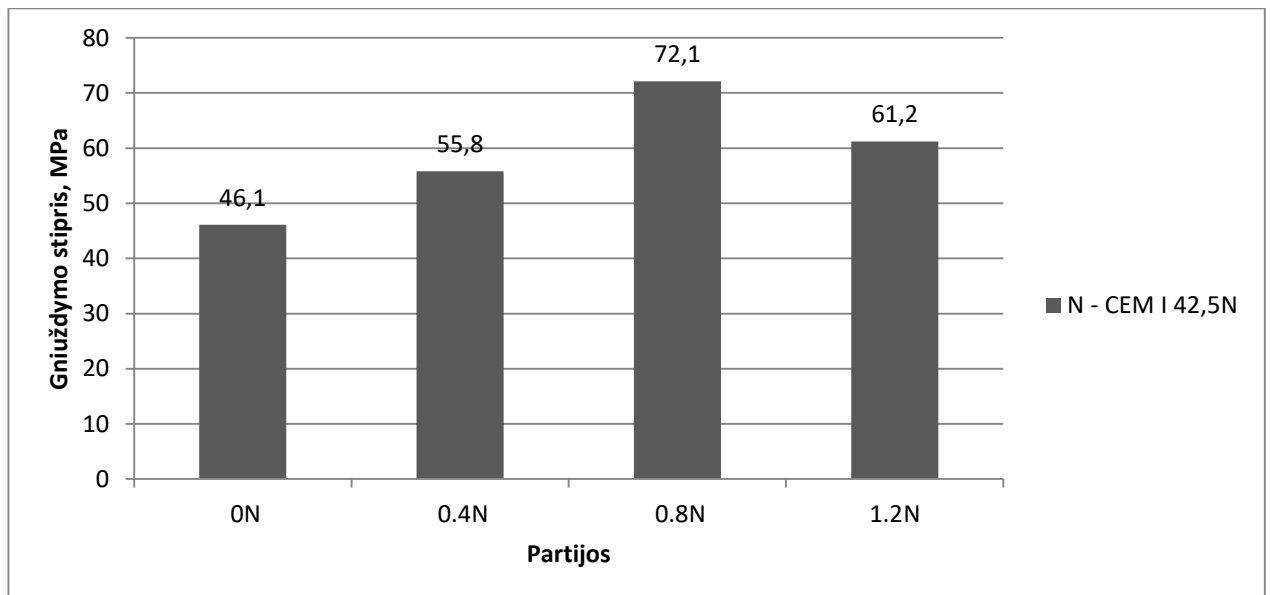
Kad nustatyti betono gniuždymo stiprį, buvo naudojamas hidraulinis presas, fiksuojantis gniuždomąją apkrovą. Bandiniai buvo gniuždomi po 7 ir 28 parų kietėjimo. Atlikus betono tankio tyrimo analizę, buvot tikėtasi, kad grafikai turės panašumų ir atliekant gniuždymo stiprio analizę, nes didesnę tankį turintis kūnas yra sunkiau gniuždomas.

Betono gniuždymo bandymo rezultatai, po 7 bandinių kietėjimo parų, naudojant cementą CEM II/A-LL 42,5N pateikti 4 paveiksle, naudojant cementą CEM I 42,5N pateikti 5 paveiksle.



4 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai naudojant cementą CEM II/A-LL 42,5N po 7 kietėjimo parų

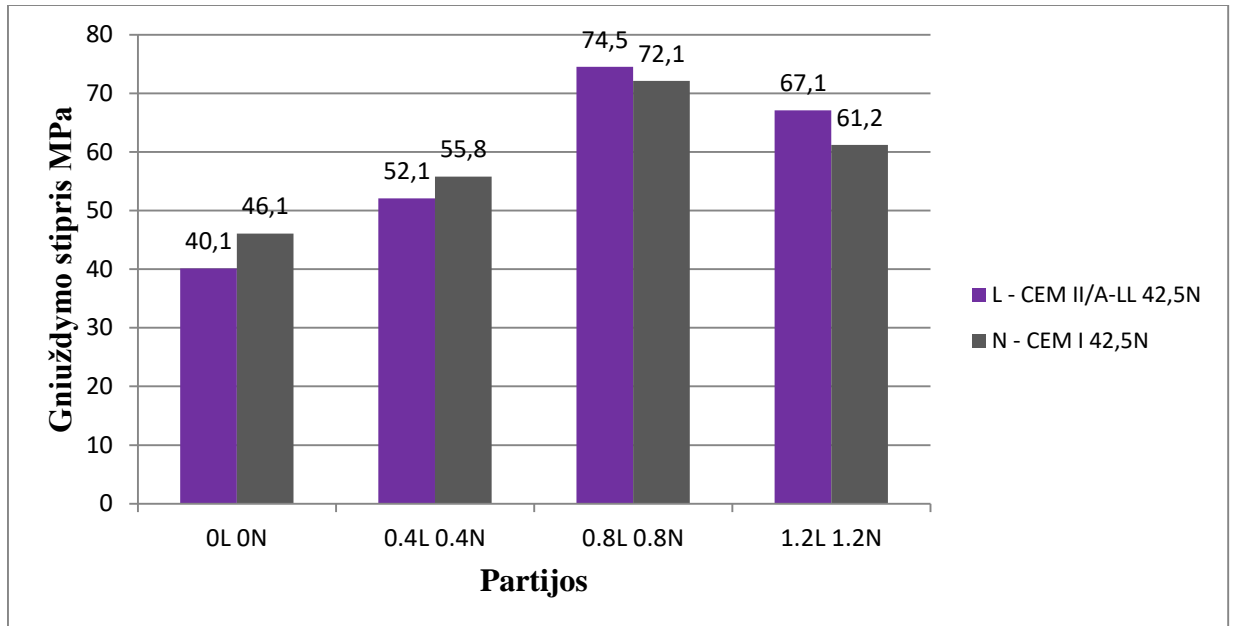
Apdorojus gautus rezultatus matoma, kad gniuždymo stiprio tendencija išlieka tokia pat, kaip ir tankio. Cemento CEM II/A-LL 42,5N bandiniai po 7 kietėjimo parų rodo, kad didžiausias gniuždymo stipris - 74,5 MPa, kai plastiklio įmaišyta 0,8%. Dar labiau didinant plastiklio kiekį – stipris krenta.



5 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai naudojant cementą CEM I 42,5N po 7 kietėjimo parų

Atlikus gniuždymo stiprio bandymus su cemento CEM I 42,5N bandiniais, kurie kietėjo 7 paras, pastebimas toks pat grafikas, tik su kiek kitokiais duomenimis. Į bandinius įmaišius 0,8% plastifikuojančio priedo, gniuždymo stipris didžiausias – 72,1 MPa. Didesnis plastiklio kiekis silpnina bandinius.

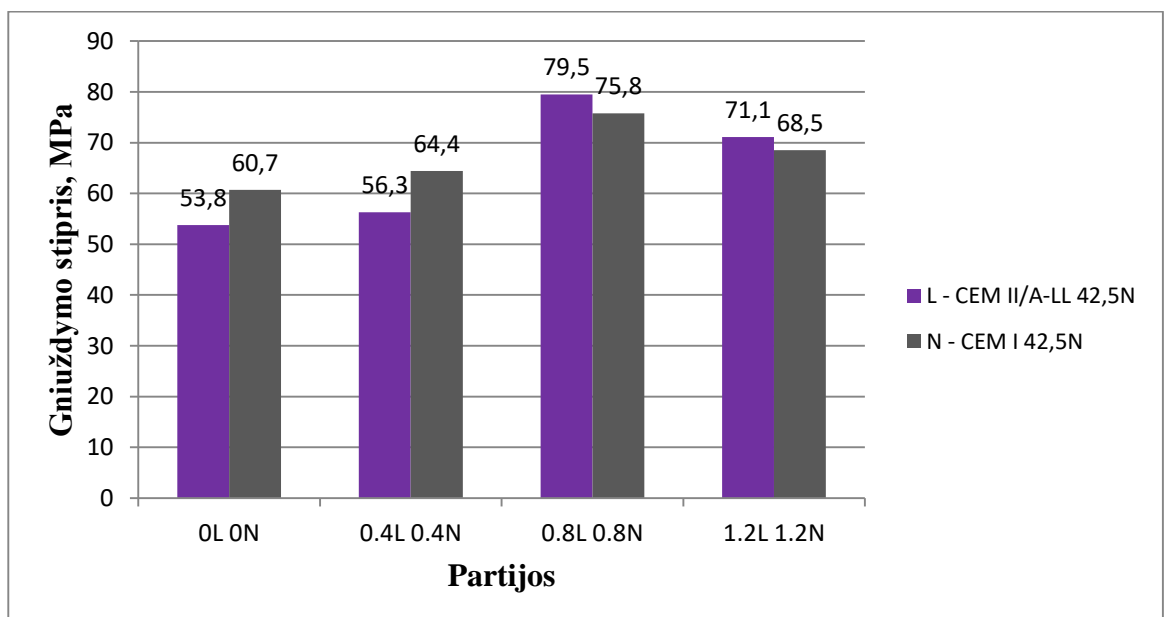
Mineralinių priedų poveikis betono savybėms



6 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai naudojant abu cementus, po 7 kietėjimo parų.

Nustatyta, kad naudojant klintinį portlandcementį gniuždymo stipris didinant plastifikuojančio priedo kiekį padidėja iki 47 %, o naudojant įprastinį portlandcementį gniuždymo stipris padidėja iki 44%. Geriausi rezultatai gaunami, kai įmaišoma 0,8% plastifikuojančio priedo, didinant jo kiekį, bandinio tūris krenta, ko pasekoje krenta ir gniuždymo stipris.

Betono gniuždymo bandymo rezultatai, po 28 bandinių kietėjimo parų, naudojant cementus CEM II/A-LL 42,5N ir CEM I 42,5N pateikti 7 paveiksle.



7 pav. Gniuždymo stiprio rezultatai naudojant abu cementus, po 28 kietėjimo parų.

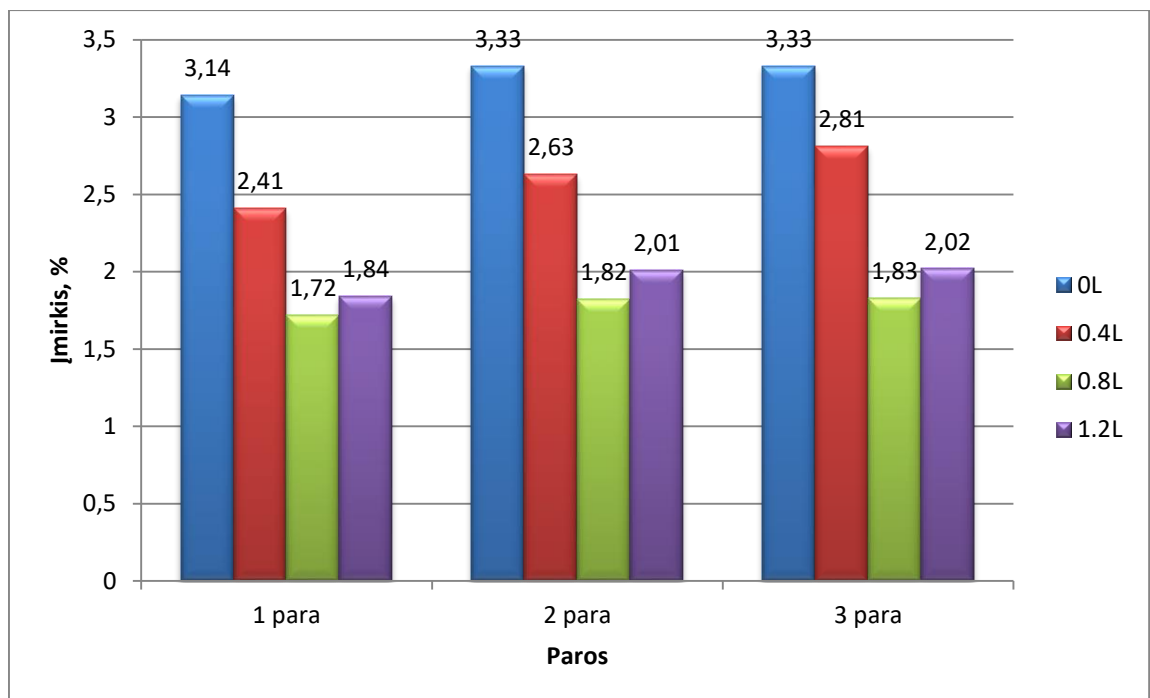
Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Po 28 kietėjimo parų bandinių visų bandinių tankis ir gniuždymo stipris buvo didesnis, nei po 7, tačiau tendencija išliko tokia pat, cemento CEM II/A-LL 42,5N bandiniai, kuriuose buvo įmaišyta 0,8% plastifikuojančio priedo buvo 47% tvirtesni, o cemento CEM I 42,5N – 20%. Esant didesniam pastifikuojančio priedo kiekiui bandiniai silpnėja. Taip pat matoma, kad paprastas cementas yra tvirtesnis, nei klintinis portlandcementis, kol priedo nėra, arba yra 0,4%. Esant didesniam priedo kiekiui, nei 0,8%, bandinių tankis ir gniuždymo stipris krenta, bet būna didesnis nei nededant priedo, ar dedant 0,4%.

3.3. Bandinių įmirkio normaliosiomis sąlygomis nustatymas

Bandymai buvo atliekami su abiejų cementų visų tipų bandiniais, rezultatai užrašomi po 1; 2 ir 3 parų. Bandiniai buvo laikomi namų temperatūros vanenyje.

CEM II/A-LL 42,5N cemento įmirkio bandymo rezultatai pateikti 8 paveiksle.



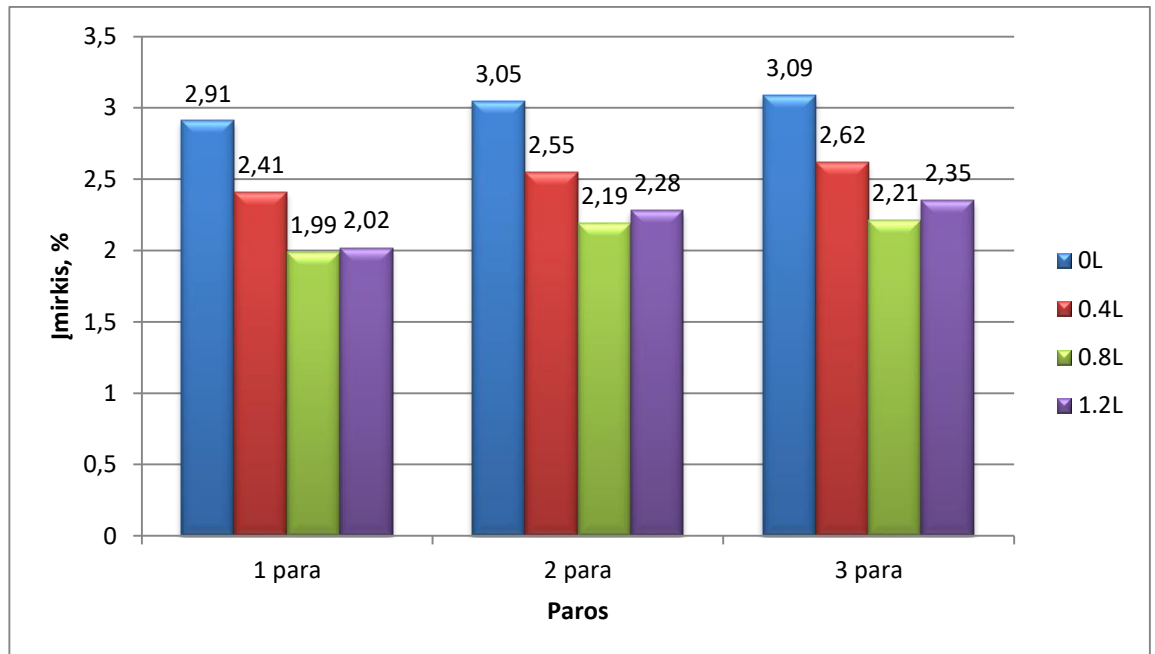
8 pav. Įmirkio rezultatai naudojant cementą CEM II/A-LL 42,5N su skirtingais kiekiais plastifikuojančio priedo

Rezultatai matomi diagramoje parodo, jog didžiausias įmirkis yra bandinių, kuriuose nėra plastifikuojančio priedo. Po pirmos paros jis buvo 3,14%, o po 3 parų pakilo iki 3,33%. Bandiniai, kuriuose buvo plastifikuojančio priedo buvo ženkliai atsparesni įmirkiui, po 3 parų 0,4L partijos bandinių įmirkio procentas – 2,81%, 0,8L – 1,83%, o 1,2L – 2,02%. Tai reiškia, kad atspariausi

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

įmirkiui bandiniai yra tie, kuriuose plastifikuojančio priedo yra 0,8% nuo cemento masės. Didinant plastifikuojančio priedo kiekį iki 1,2% bandiniai, nors ir nežymiai, bet darosi mažiau atsparūs įmirkiui.

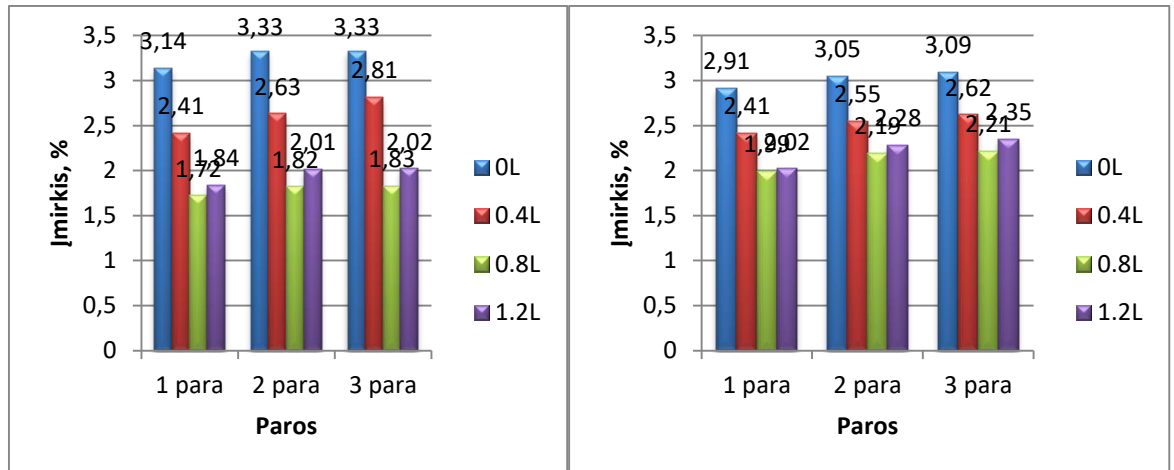
CEM I 42,5N cemento įmirkio bandymo rezultatai pateikti 8 paveiksle.



9 pav. Įmirkio rezultatai naudojant cementą CEM I 42,5N su skirtingais kiekiais plastifikuojančio priedo

Atlikus betono su CEM I 42,5N cementu bandymų rezultatų analizę pastebėta, jog įmirkio kitimo tendencijos išliko tokios pat kaip ir prieš tai aprašytų bandymų rezultatai. Didžiausias įmirkis 3,09 % pasiektas tų bandini, kurie buvo be plastifikuojančio priedo. Įmaišius 0,4 % plastiklio įmirkis sumažėjo, nors kiekvieną parą vis tiek didėja. Mažiausias įmirkis pasiektas tada, kai plastiklio įmaišoma 0,8 %, po 3 parų įmirkis – 2,21%, tačiau didinant šį kiekį, įmirkis vėl ima didėti.

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms



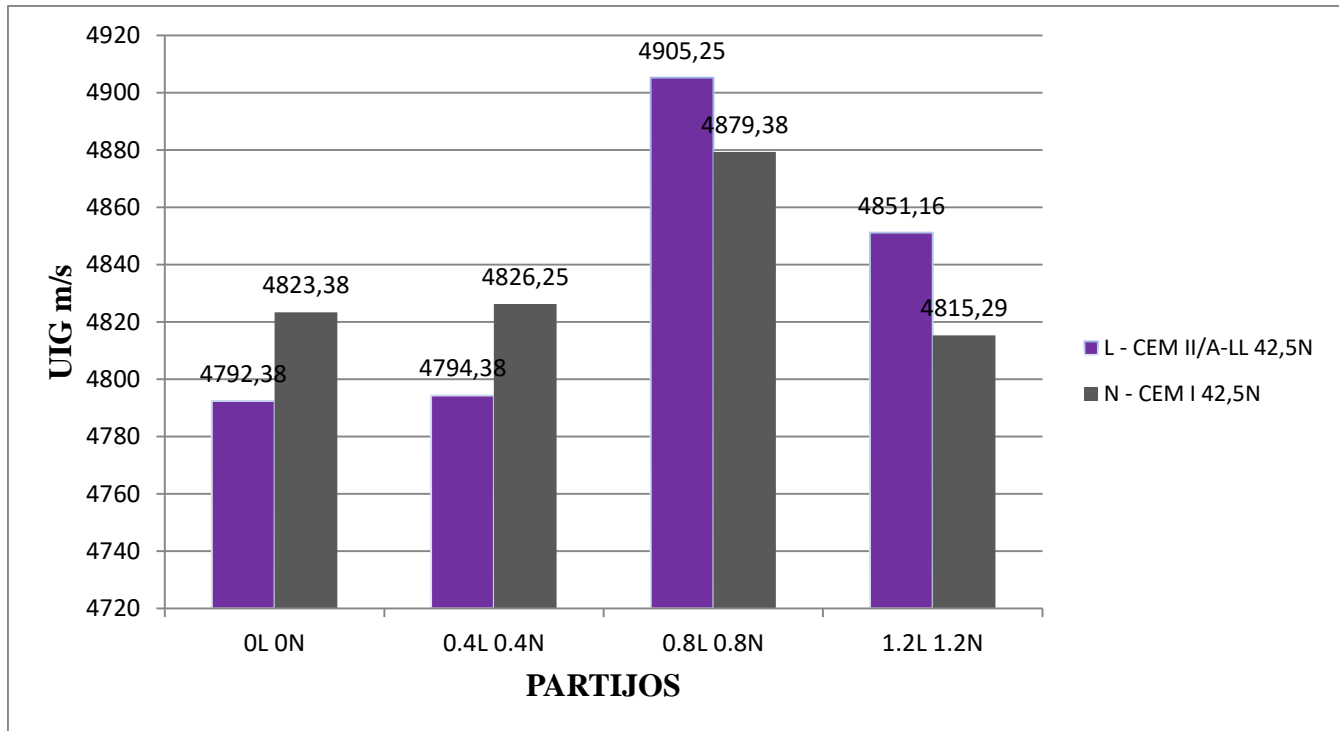
10 pav. Įmirkio rezultatai naudojant cementus CEM II/A-LL 42,5N ir CEM I 42,5N su skirtingais kiekiais plastifikuojančio priedo

Apibendrinant gautus rezultatus, galima teigti, kad be plastifikuojančio priedo labiau įmirkiui atsparus paprastas cementas CEM I 42,5N, po 3 parų įmirkis 3,09%, o klintinio portlandcemenčio CEM II/A-LL 42,5N įmirkis – 3,33%. Bendrai, plastifikuojantis priedas mažina įmirkį visiems bandiniams, geriausi rezultatai su abiem cementais gaunami įmaišius 0,8% plastifikuojančio priedo, paprastojo cemento įmirkis po 3 parų – 2,21%, klintinio portlandcemenčio – 1,83%. Paprastojo cemento bandinių įmirkis su tokiu kiekiu priedo sumažėjo 0,88%, o klintinio portlandcemenčio – 1,5%. Didinant priedo kiekį iki 1,2%, abiejų cementų bandiniai darosi mažiau atsparūs įmirkiui.

3.4. Ultragarso impulso sklidimo greičio tyrimo rezultatų analizė

Atliekant ultragarso impulso sklidimo greičiau tyrimus betono bandinių po 7 ir po 28 parų, diagramų rodmenų tendencija išliko tokia pat kaip ir bandinių su gniuždymo stipriu ar tankiu. Ultragarso impulso sklidimo greičio tyrimų rezultatai po 7 kietėjimo parų, naudojant klintinį portlandcementą CEM II/A-LL 42,5N ir paprastąjį cementą CEM I 42,5N pateikti 11 paveiksle.

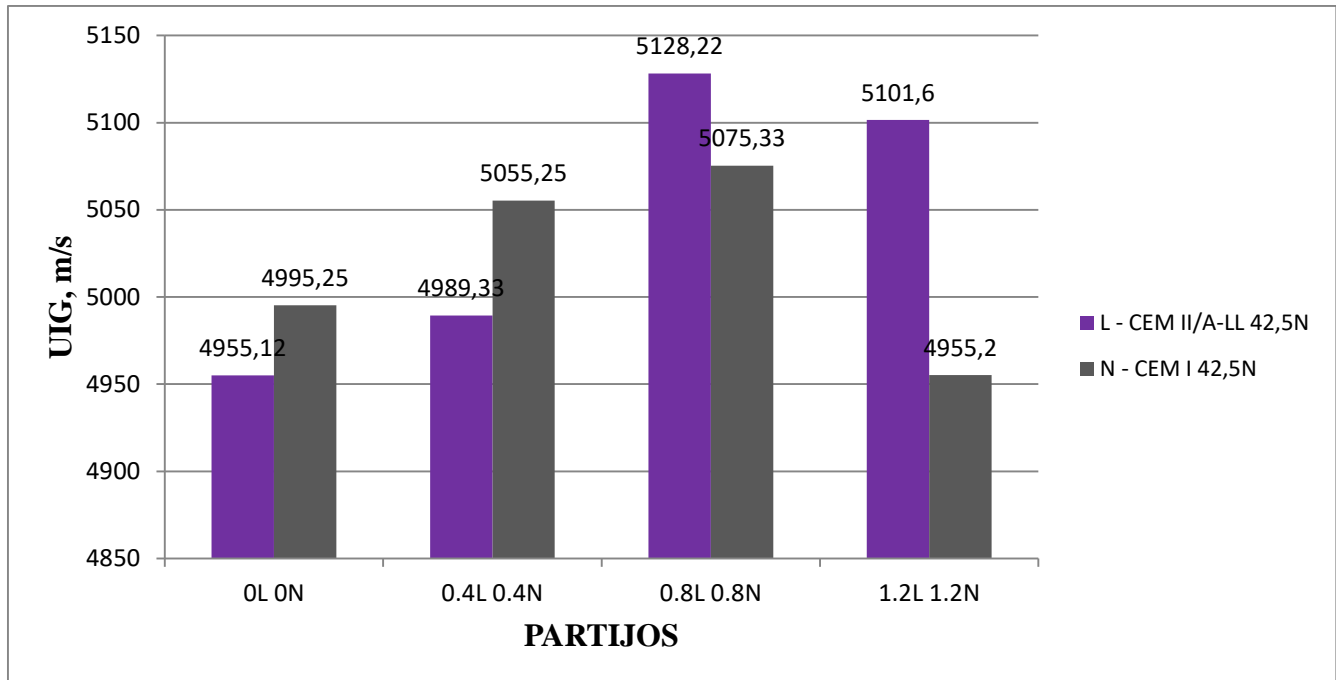
Mineralinių priedų poveikis betono savybėms



11 pav. Ultragarso impulso sklaidimo greitis klintiniu portlandcemenčiu ir paprastuoju cementu po 7 kietėjimo parų.

Ultragarso impulso sklaidimo greitis didėja, kol plastifikuojančio priedo kiekis neviršija 0,8%, esant didesniam kiekiui priedo (1,2%) greitis stipriai krenta, paprastuoju cementu šis greitis net mažesnis, nei bandinių be priedo. Didžiausias ultragaso impulso sklaidimi greitis pastebimas, kai bandiniuose 0,8% plastifikuojančio priedo, cementu CEM II/A-LL 42,5N 4905,25 m/s, o CEM I 42,5N – 4879,38 m/s.

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms



12 pav. Ultragarso impulso sklaidimo greitis klintiniu portlandcemenčiu ir paprastuoju cementu po 28 kietėjimo parų.

Atlikus ultragarso impulso sklaidimo greičio rezultatų analizę po 28 kietėjimo parų, rezultatų grafiko dėsningumai nepasikeitė. Lyginant rezultatus po 7 ir 28 kietėjimo parų, UIG žymiai padidėjo. Didžiausias betono su CEM II/A-LL 42,5N cementu bandinių ultragarso sklaidimo greitis pasiektas, kai plastifikuojančio priedo įmaišyta 0,8%. Rezultatas – 5128,22 m/s. Bandiniai su CEM I 42,5N cementu šoktelėjo iki 5075,33 m/s greičio, taip pat kai pastifikuojančio priedo kiekis – 0,8%. Kaip ir anksčiau nagrinėtuose bandymuose, taip ir šiame ultragarso impulso sklaidimo greitis ėmė mažėti į betoną įmaišius 1,2% priedo. Su pirmuoju cementu įdėjus 1,2 % plastiklio jis nukrito iki 5101,6 m/s, o su antruoju – 4955,2 m/s.

4. IŠVADOS

1. Atlikus tyrimus nustatyta, kad naudojant betono gamyboje klintinį portlandcementį ir didinant plastifikuojančio priedo kiekį, sukietėjusio betono tankis žymiai didėja. Esant 0 % priedo kiekiui, tankis siekia $2,35 \text{ kg/m}^3$, o pridėjus 0,8% priedo kiekį, sukietėjusio betono tankis padidėja ~1.8% iki $2,39 \text{ kg/m}^3$. Su paprastuoju cementu tendencija išlieka tokia pat, geriausias rezultatas, kai priedo – 0,8%, tankis padidėja ~2,6%. Dar labiau didinant priedo kiekį, tankis mažėja.

2. Nustatyta, kad betono bandinių stipruminės savybės priklauso nuo plastifikuojančio priedo kiekio. Gniuždymo stipris po 7 parų kietėjimo vandenyje naudojant klintinį portlandcementį kito nuo 40,10 MPa iki 74,50 MPa, naudojant paprastąjį cementą nuo 46,10 MPa iki 72,10 MPa. Panašus stipris pasiekiamas ir po 28 parų kietėjimo vandenyje, CEM II/A-LL 42,5N nuo 53,8 MPa iki 79,5 MPa, CEM I 42,5N nuo 60,7 MPa iki 75,8 MPa. Lyginant dviejų cementų atmainas esant vienodam plastifikuojančio priedo kiekiui didžiausia vertė gaunama naudojant klintinį portlandcementį ir pridėjus 0,8% plastifikuojančio priedo.

3. Tyrimai parodė, kad sintetinio polikarboksilato polimero pagrindu plastifikuojantis priedas sumažina betono įmirkį ir padidina ilgaamžiškumą. Pridėjus 0,8% priedo kiekį, bandinių su CEM II/A-LL 4,5N cementu įmirkis sumažėja net ~80%, su cementu CEM I 42,5N – 40% betonas tampa atsparesnis šalčiui ir ilgaamžiškesnis. Dar labiau padidinus priedo kiekį, bandiniai, nors ir nežymiai, tačiau tampa mažiau atsparūs įmirkiui.

4. Atliktas UIG tyrimas parodė, kad esant skirtingiems cemento tipams, didžiausias rezultatas pasiekiamas pridėjus į klintinį portlandcementį 0,8% priedo. Po 7 kietėjimo parų, klintinio portlandcemenčio bandiniais, kuriuose buvo 0,8% priedo, ultragarso impulso sklidimo greitis buvo 4905,25 m/s, t.y. 2,35% didesnis, nei bandiniuose, kurie buvo be priedo. Paprastuoju cementu – 4879,38 m/s, t.y. 1,2% didesnis, nei bandiniuose be priedų. Po 28 kietėjimo parų tendencija išliko tokia pat, geriausi rezultatai gauti naudojant klintinį portlandcementį ir 0,8% priedo, priedo dėka sklidimo greitis pakilo nuo 4955,12 m/s iki 5128,22m/s (~3,5%). Paprastuoju cementu sklidimo greitis padidėjo nuo 4955,25 m/s iki 5075,33 m/s (~2,4%). Kaip ir ankstesniuose tyrimuose, didesnis kiekis priedo nepadeda pasiekti geresnių rezultatų.

5. Apibendrinant gautus tyrimo rezultatus, norint pagaminti optimaliausią ir geriausius tyrimų rezultatus parodžiusį betoną, reikia naudoti klintinį cementą ir polimerų technologijos pagrindu pagamintą plastifikuojantį priedą, kurio kiekis turi būti ne mažesnis ir ne didesnis, nei 0,8% nuo cemento masės.

5. LITERATŪRA

- LST EN 197-1 2011 Cementas. 1 dalis. Įprastinių cementų sudėtis, techniniai reikalavimai ir atitikties kriterijai. Vilnius 26p.
- LST EN 206-2014 Betonas. 1 dalis. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis.
- LST 1974:2012 Nurodymai, kaip taikyti LST EN 206-2014 „Betonas. 1 dalis. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis“.
- LST EN 1008:2003 Vanduo betonui. Techniniai vandens ėminių ėmimo, bandymo ir tinkamumo reikalavimai, įskaitant gražinamą iš gamybos betono pramonėje vandenį, pakartotinai naudojamą betono mišiniui ruošti.
- LST EN 12620:2003+A1:2008 Betono užpildai.
- Allahverdi A., Salem S. Simultaneous influences of microsilica and limestone powder on properties of portland cement paste, *Ceramics-Silikaty* 54(1), 2010, p. 65-71
- Bonavetti V., Donza H., Menendez G., Cabrera O., Irassar E.F. Limestone filler cement in low W/C concrete: A rational use of energy, *Cement and Concrete Research*, 33, 2003, p. 865-871.
- Bellmann F, Stark J. Activation of blast furnace slag by a new method. *CemConcr Res* 2009;39(8):644–50.
- Bentz D.P., Conway J.T. Computer modelingo the replacement of „coarse“ cement particles by inert fillers in low W/C ratio concretes, 31, 2001, 503-506
- Deltuva, J. 1982. Statybinės medžiagos. Mokslas, Vilnius. 348 p.
- Deltuva J., Gailius A., Gumuliauskas A., Kalinauskas L., Malakauskas M., Martynaitis M. 1982 Statybinės medžiagos. Vilnius, Mokslas. 348p.
- A.Eisinas ir K. Baltakys. Portlandito kiekio hidratuotame portlandcemytyje nustatymas vienalaikės terminės analizės metodu. *Kauno technologijos universitetas* . 2009.
- Горчаков Г. И., Баженов Ю. М. 1986 Строительные материалы. Москва: Стройиздат. 688р.
- Gumuliauskas. Betono kietėjimo intensyvavimo metodai / "Statyba ir architektūra" Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 1998 m. balandžio 8-10 d., p.179-183.
- Heikal M., Morsy M. S., Aiad I. Effct of polycarboxylate superplasticizer on hydration characteristics of cement pastes containing silica fume. 2006.
- Jarunavičius, A. 2007. *Plastifikuojančio priedo „Winmix“ naudojimas betono tyrimams*.
- Калашников . В И и др. 2006. *Класификационная оценка цементов в присытствиии саперластификаторов для бысокорочник бетоновую* С. 39 – 42
- Макишаева Е.А 2007. „Полирласт Новомосковск“ Июлью 2007 ю С. 28 –29

Mineralinių priedų poveikis betono savybėms

Montvila E. 2003 Portlandcementis ir jo rūšys. Verslo žinios Nr.2 kovas. 26 p.

Baranauskaitė, Erika; Nagrockienė, Džigita. Plastifikuojančio priedo kiekio ir cemento tipo įtaka betono savybėms. 16-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2013 metų teminė konferencija „statyba“, 2013 m. kovo 20-22 d. Vilnius: Technika, 2013 ISSN 2029-7149, p. [1-6].

Nehdi M. Why some carbonate filler cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials, *Cement and Concrete Research*, 30, 2003, p.1663-1669.

Nedhi M., Mindess S., Aitcin P. Optimization of high strength limestone filler cement mortars, *Cement and Concrete Research*, 26,1996, 883-893.

Naujokaitis A. 2007 „Statybinės medžiagos, betonai“ Vilnius technika 13 – 25p.

Naujokaitis A. 2006 „Statybinės medžiagos, užpildai“ Vilnius technika 9- 10 p.;

Naujokaitis A. 2003 Mineralinių medžiagų verpetas. Statome namą. Verslo žinios Nr.1 vasaris. 4-6 p.

Petit J.Y., Wirquin E. Effect of limestone filler content and superplasticizer dosage on rheological parameters of highly flowable mortar under light pressure conditions, *Cement and Concrete Research*, 40, 2010, 235-240.

Skripkiūnas G., Vaitkevičius V. Stipriojo betono gamybos ir naudojimo perspektyvos Lietuvoje / "Statyba ir architektūra" Konferencijos pranešimų medžiaga. Kaunas, 1996 m. balandžio 9-11 d., p. 190-197.

Skripkiūnas, G., 2007. Statybinių konglomeratų struktūra ir savybės. *Mokslas ir studijos*, 2007., „Vitae Litera“. 334 p.

Taylor H.F.W. *Cement Chemistry*, second ed. Thomas Telford, London, 1997.

Tsivilis S., Kakali G., Skaropoulon A., Sharp J. Swany R. Use of mineral admixtures to prevent thaumasite formation in limestone cement mortar. 1995;25:79–85.

Tsivilis, S.; Chaniotakis, E.; Badogiannis, E. 1999. A study on the parameters affecting the properties of Portland limestone cements *Cement and Concrete Composites* 21: 107–116 p.

Voglis N., Kakali G., Chaniotakis E., Taivilis S. Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements, *Cement and Concrete Composites*, 27, 2005, p.191-196.

Вовк А.И., и др., 2006. "Полипласт Новомосковск". *Строительные материалы*. Июль. 2007. УДК 666.972.16: С. 34 – 35.А.

Yahia A., Tanimura M., Shimoyama Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and W/C ratio, *Cement and Concrete Research*, 35, 2005, p. 532-539.