



**Kauno technologijos universitetas**  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

**Didelio stiprumo ir ilgaamžiškumo sauso mišinio kūrimas,  
savybės ir technologija**  
Magistro baigiamasis projektas

---

**Vladas Šlivinskas SKM-7gr.**  
Projekto autorius

**Prof. Dr. Vitoldas Vaitkevičius**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS

**Didelio stiprumo ir ilgaamžiškumo sauso mišinio kūrimas,  
savybės ir technologija**

Magistro baigiamasis projektas  
Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

---

**Vladas Šlivinskas SKM-7gr.**  
Projekto autorius

**Prof. Dr. Vitoldas Vaitkevičius**  
Vadovas

**Doc. Algirdas Augonis**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2019**



**Kauno technologijos universitetas**  
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS  
Vladas Šlivinskas

**Didelio stiprumo ir ilgaamžiškumo sauso mišinio kūrimas,  
savybės ir technologija**  
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Vlado Šlivinsko, baigiamasis projektas tema „Didelio stiprumo ir ilgaamžiškumo sauso mišinio kūrimas, savybės ir technologija“ 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

<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>6</b>
<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros analizė .....</b>	<b>12</b>
1.1. Bendrosios žinios .....	12
1.2. Pritaikymo sritys .....	13
1.3. Ypatingai stipraus betono panaudojimo galimybės .....	14
1.4. Ypač stipraus betono sudėtis.....	17
1.5. Ekologiškas ypatingai stiprus betonas .....	18
1.6. Ypatingai stipraus betono maišymas.....	20
1.7. Fizikinės, mechaninės ir technologinės labai stipraus betono savybės.....	20
1.7.1. Tankis .....	20
1.7.2. Gniuždomasis stipris.....	21
1.7.3. Lenkiamasis stipris .....	22
1.8. Terminis atsparumas .....	23
1.9. Ekonominė palyginimas.....	25
<b>2. TYRIMŲ METODIKA.....</b>	<b>30</b>
2.1. Tyrimams naudotos medžiagos.....	30
2.2. Betono mišinio ruošimas.....	30
2.3. Betono mišinio veikimas ultragarso dispergatoriumi .....	32
2.4. Tyrimas pusiau adiabatiniu kalorimetru.....	33
2.5. Betono mišinio dinaminės klampos nustatymas .....	33
2.6. Betono bandinių formavimas ir kietinimas .....	34
<b>3. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS .....</b>	<b>35</b>
3.1. Betono mišinio veikimas ultragarsiniu dispergatoriumi .....	35
3.2. Ypač stipraus betono sudėties optimizavimas.....	36
3.3. Stiprumo nustatymas .....	37
3.4. Stiprumo nustatymo rezultatai .....	39
3.5. Betono susitraukimo deformacijų matavimas .....	41
3.6. Betono poringumo parametrai.....	43
3.7. Paviršinis betono šaldymo bei atšildymo bandymas.....	44
3.8. Sukurto ypač stipraus betono palyginimas su rinkoje naudojamais mišiniais .....	45
3.9. Padidinto tankio ypač stipraus betono gaminimas naudojant metalo apdirbimo atliekas.....	47

3.10. Ypač stipraus betono kainos palyginimas su rinkoje esama produkcija .....	50
<b>Išvados .....</b>	<b>53</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>54</b>

## Paveikslų sąrašas

1.2.1. pav. HPC panaudojimas statant daugiaaukščius pastatus (Nishant et al. 2016).....	13
1.2.2. pav. Seonyu pėsčiųjų tiltas , Seulas, Pietų Korėja (M.Schmidt et.al 2004) .....	14
1.2.3. pav. Greitkelio tilto „π“ formos sija Vašingtone. (M.Schmidt et.al 2004).....	14
1.3.1. pav. Roboto konstrukcijos korpusas pagamintas iš ypač stipraus betono. (Sudholt-Wasemann group.2017) .....	15
1.3.2. pav. Architektūrinis sprendimas naudojant ypač stiprųjį betoną.(MuCEM muziejus, Marselis, Prancuzija. 2013).....	16
1.3.3. pav. Seifo korpusas pagamintas naudojant ypač stiprųjį betoną.(Seifuva. 2017) .....	16
1.3.4. pav. Įvairių sijų atlaikančių tą patį lenkimo momentą palyginimas (Holdboork 2016).....	17
1.4.1. pav. Tipinės savaime susitankinančio betono (SSB), normaliojo stiprumo betono (NB) ir ypatingai stipraus betono (YSB) komponentų pasiskirstymas betone (Geisenhansluke et al. 2004)	18
1.5.1. pav. Išskiriamo CO2 kiekio priklausomybė nuo gaminamo ypač stipraus betono tipo(LP-lakieji pelenai, MA-Metalurgijos atliekos, MSt-Maltas stiklas. ( N.A. Soliman, et.al. 2016).....	19
1.5.2. pav. Cheminė alternatyvinių reaktyviųjų elementų sudėtis. (N.A. Soliman, et.al. 2016) .....	19
1.6.1.pav. UHPC maišymo tvarka (Šerelis et al. 2016).....	20
1.7.1.1. pav. Betono bandinių gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo bandinių tankio (Arafa et al. 2010).....	21
1.7.2.1. pav. UHPC gniuždomojo stiprio diagrama (Park et al.2015).....	22
1.7.3.1. pav. Sakata - Marai tiltas, Japonija .(www.fhwa.dot.gov) .....	23
1.7.3.2. pav. Lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio nustatymo bandymų rezultatai (Vogt et al.2004). 23	
1.8.1. pav. Temperatūrinio bandymo bandiniai be fibrų ir su 0,3% ,nuo viso bandinio tūrio, fibromis. (Bei, Zhixiang 2015) .....	24
1.8.2. pav. Tamprumo modulio, simuliuojat gaisro atvejį, bandymo įranga ir ciklograma (Xiong et al. 2016).....	25
1.8.3.pav. Įvairių bandinių gniuždomojo stiprio ir tamprumo modulio reikšmės bandymo metu esant atitinkamoms temperatūroms. (Xiong et al.2016).....	25
1.9.1. pav. Rekomenduojamų medžiagų, skirtų ypač stipraus betono, savybės bei kaina (Wille K. et.al 2015).....	26
1.9.2. pav. Mikroužpildų ypač stipriame betone savybės bei kaina (Wille K. et.al.2015).....	26
1.9.3. pav. JAV rinkos įvairių statybinių medžiagų kaina už kubinį metrą medžiagos. Duomenys pateikti Portlandcemenčio asociacijos (angl. PCA- Portland Cement Association) 2005-2011 metų duomenys.....	27
1.9.4. pav. Didelio gabarito vamzdžio mova, pagaminta naudojant ypač stiprųjį betoną. ....	28

1.9.5. pav. Staklių korpusas pagamintas iš ypač stipraus betono mišinio. (Sudholt-Wasemann group.2017) .....	29
2.2.1. pav. Skiedinio maišyklė Automix-65 .....	31
2.3.1. pav. Ultragarso dispergatorius „Bandelin electronic UW3400“ .....	32
2.5.1. pav. Betono mišinio klampos nustatymo įranga.....	33
2.6.1. pav. Suformuoti bandiniai. ....	34
3.1.1. pav. Temperatūros išsiskyrimo matavimo rezultatai.....	36
3.3.1. pav. Betono bandinių stiprumo nustatymas hidraulinių presu „Toni Technik 2020“ .....	38
3.4.1. pav. Betono bandinių gniuždomasis stipris po 7 parų kietėjimo .....	39
3.4.2. pav. Betono bandinių lenkiamasis stipris po 7 parų kietėjimo .....	39
3.4.3. pav. Betono bandinių tankis $\text{kg/m}^3$ .....	40
3.4.4. pav. Betono bandinių gniuždomasis stipris po 7 parų kietėjimo .....	40
3.4.5. pav. Betono bandinių lenkiamasis stipris po 7 parų kietėjimo .....	41
3.4.6. pav. Betono bandinių tankis $\text{kg/m}^3$ .....	41
3.5.1. pav. Betono bandinių susitraukimo deformacijų matavimo įranga.....	42
3.6.1. pav. Betono bandinys po lenkimo stiprio nustatymo bandymo su poromis.....	43
3.7.1. pav. Ypač stipraus betono bandiniai įmerkti į 3% druskos tirpalą, bei šaldymo kamera. ....	44
3.8.1. pav. Komercinis mišinys (1) ir ypač stiprus betonas pagal formulę NR8.1(2) .....	45
3.8.2. pav. Bandinių lenkiamasis stipris .....	46
3.8.3. pav. Bandinių gniuždomasis stipris.....	46
3.9.1. pav. Metalų apdirbimo atlieka. ....	47
3.9.2. pav. Išformuoti RNR formulės bandiniai .....	48
3.9.3. pav. Betono su metalo atliekomis defektai,(1)- tuštumų atsiradimai, (2)-paviršinė betono korozija.....	48
3.9.4. pav. Bandinių su metalo atliekų dulkėmis tankis, $\text{kg/m}^3$ .....	49
3.9.5. pav. Lenkiamasis stipris bandiniu su metalų atliekų dulkėmis, MPa.....	49
3.9.6. pav. Gniuždomasis stipris bandinių su metalų atliekų dulkėmis, MPa. ....	50
3.10.1. pav. Ypač stipraus betono kainos bei gniuždomojo stiprumo palyginimas. ....	51
3.10.2. pav. Laboratorinėmis sąlygomis maišyto betono maišymo trukmės ir šio betono kainos palyginimas.....	52

## Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Tipinės UHPC mišinio komponentų proporcijos (Graybeal. 2013). .....	18
2.1 lentelė. Betono mišinio 1m <sup>3</sup> tipinė sudėtis .....	30
2.2 lentelė. Betono mišinio 1m <sup>3</sup> pataisyta sudėtis .....	31
3.1 lentelė. Ultragarso dispergatoriaus disperguoti mišiniai. ....	35
3.2 lentelė. Betono mišinio maišymo eiga.....	36
3.3 lentelė. Betono mišinių 1 m <sup>3</sup> sudėtys.....	37
3.4 lentelė. Betono mišinių 1m <sup>3</sup> pataisytos sudėtys.....	37
3.5 lentelė. Mišinių klampos bandymo rezultatai.....	37
3.6 lentelė. Deformacijų matavimų reikšmės (mm). ....	42
3.7 lentelė. Betono bandinių masė.....	43
3.8 lentelė. Betono mišinių 1m <sup>3</sup> pataisytos sudėtys.....	47
3.9 lentelė. Naudotų medžiagų kainos Lietuvoje ir Pasaulyje.....	50
3.10 lentelė. Naudotų mišinių sudėties kaina vienam kubiniam metrui ypač stipraus betono pagaminti. .....	51



Vladas Šlivinskas. Didelio stiprumo ir ilgaamžiškumo sauso mišinio kūrimas, savybės ir technologija. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Vitoldas Vaitkevičius; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis: Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija: Apskaita (6211EX008).

Reikšminiai žodžiai: ypač stiprus betonas, sausieji mišiniai, sausas plastiklis, draugiškas aplinkai, poringumas.

Kaunas, 2018. 57 p.

## **Santrauka**

Magistro baigiamojo projekto tikslas sukurti didelio stiprumo ir ilgaamžiškumo betono mišinį naudojant tik sausas medžiagas. Nustatyti šio mišinio fizikines bei mechanines savybes bei prognozuoti šio mišinio gamybos technologiją. Darbas susideda iš teorinės analizės bei eksperimentinės dalies.

Teorinėje dalyje atliekama mokslinė literatūros analizė. Nagrinėjamos analogiško tipo ypač stipriųjų betonų fizikinės bei mechaninės savybės, lyginami šiam betonui naudojamų komponentų mechaniniai parametrai. Literatūros analizės metu nagrinėta šio betono ekonominė nauda, bei paklausa pasaulio rinkoje, numatytos alternatyvios ekologinės ypač stipraus betono sudėtys.

Eksperimentinėje dalyje gaminamas ypač stiprus betonas naudojant tik sausuosius komponentus. Vanduo yra vienintelis šlapiasis komponentas. Sukurtas betonas lyginamas su rinkoje esamu analogiško tipo sausuoju mišiniu. Šis sausasis mišinys kuriamas naudojant alternatyvią mišinio sudėtį.

Atlikti mišinio bandinių mechaninių parametrų nustatymo bandymai, šalčio atsparumo prognozavimas, poringumo matavimas, ekonominis medžiagų ir gamybos kainos palyginimas.

Darbą sudaro 5 dalys: įvadas, literatūros analizė, tyrimų metodai, eksperimentinė dalis, išvados.

Vladas Šlivinskas. High Strength and Durability Dry Mix Creation, Properties and Technology. Master's Final Degree Project / supervisor assoc. prof. Dr. Vitoldas Vaitkevičius. The Faculty of Civil Engineering and Architecture Kaunas University of Technology.

Building constructions and materials engineering. Accounting (6211EX008).

Keywords: Ultra high performance concrete, dry mix, dry plasticizer, ecofriendly, porosity.

Kaunas, 2018. 57 pages.

### **Summary**

Master's final project is to create a concrete mixture of high strength and durability using only dry materials, to determine the physical and mechanical properties of this mixture and to predict the production technology of this mixture. The work consists of theoretical analysis and experimental part.

Scientific literature analysis was performed in theoretical part. Physical and mechanical properties of identical high performance concrete in other scientists researches and the mechanical parameters of the components used for this concrete mixture were analyzed. The economic benefits of this concrete and the demand in the world market, alternative compositions of high performance concrete were foreseen in the analysis of the literature.

In the experimental part a high performance concrete was made from merely dry ingredients. Water is the only wet component. The finished concrete has been compared with the similar type of dry mixtures available on the market. This dry mixture has been developed using an alternative mixture composition.

Tests of mechanical parameters of mixture samples were completed, frost resistance predicted, porosity measured, economic comparison of material and production price was made .

Structure: introduction, literature analysis, research methods, experimental part, conclusions.

## **Įvadas**

Betono su įdėtine armatūra atsiradimas XIX a. negrižtamai pakeitė statybos sektorių. Tai tapo viena populiariausių statybinių ir plačiausiai naudojamų statybinių medžiagų pasaulyje. Palyginti maža kaina, patvarumas, stiprumas, ilgaamžiškumas lėmė augančią šio betono paklausą. Vystantis pramonei bei ekonomikai ir atsirandant poreikiui statyti sudėtingesnius, erdvesnius ir sunkesnius statinius, laikui bėgant pradėta ieškoti inovatyvesnių bei racionalesnių betono tipų.

Atlikus skaičiavimus ir gilinantis į medžiagų savybes bei struktūrą, buvo sukurti stiprieji betonai. Plastiklių bei superplastiklių sukūrimas pasauliui suteikė dar nematytą ypač stiprų armuotą betoną. Šio betono gamyba nuolatos optimizuojama ir šių dienų sudėtis bei taikomi betono elementai leido pasiekti keletą kartų geresnes savybes nei įprastojo betono. Šio betono panaudojimas palyginti mažai paplitęs dėl didelės kainos, projektavimo metodų bei fizikinių modelių trūkumo. Šio betono komponentai nėra jungiami ir maišomi optimizuotai panaudojant automatikos galimybes.

Tikėtina, kad artimiausiu laiku pavyks sukurti ekonomišką, bei racionalia gamyba pasižymintį ypač stiprų betoną. Apibendrinus atliktą literatūros analizę suformuluotas šio darbo tikslas - pagaminti ypač stiprų betoną sauso mišinio pavidale.

### **Tikslai ir uždaviniai**

Pagrindinis tiriamojo darbo tikslas – įvertinti ar įmanoma pagaminti ypač stiprų sauso mišinio pavidalo betoną, naudojant tik birias medžiagas kurio vienintelis drėgnas komponentas – vanduo.

### **Tiriamojo darbo tikslai ir uždaviniai:**

- pagaminti ypač stiprų betoną, nenaudojant skystų medžiagų;
- įvertinti ypač stipraus betono atsparumą šalčio poveikiui. Atlikti paviršinį betono šaldymo ir atšildymo metodą;
- atlikti tarpinę suformuotų bandinių kontrolę įvertinant, ypač stipraus betono gaminamo kaip sauso mišinio fizikines ir mechanines savybes – nustatyti gniuždomąjį ir lenkiamąjį betono stiprį, dinaminį tamprumo modulį, atsparumą šalčiui, poringumą;
- numatyti galimas šio betono gamybos alternatyvas, taikant aplinkai draugiškus elementus, antrines žaliavas;
- atlikti ypač stipraus betono kaip sauso mišinio gamybos technologijos prognozavimą ir ekonominį palyginimą su rinkoje esamais panašaus tipo mišiniais.

# 1. Literatūros analizė

## 1.1. Bendrosios žinios

Betonas statybos sektoriuje yra plačiausiai naudojama medžiaga. Jis pradėtas naudoti daugiau, kaip prieš tūkstantį metų Italijoje, Senovės Egipte, Artimuosiuose rytuose, Graikijoje statytuose statiniuose. Portlandcementis – svarbiausia šiuolaikinio betono sudedamųjų dalių, kuris pirmą kartą buvo panaudotas 1824 m. Anglijoje. Masinė portlandcemenčio gamyba pradėta kiek vėliau, po dvidešimties metų (Karmout 2009).

Gelžbetonis pradėtas naudoti XIX amžiaus viduryje tapo praeito amžiaus statybos pagrindu. (Vadliūga 2001). Šiomis dienomis vietoje įprasto gelžbetonio populiarėja platesnė sąvoka - armuotas betonas apibrėžianti įvairių armatūros tipų ir betono kompozitinį junginį. Vietoj tradicinės strypinės plieninės armatūros dažniau taikomas dispersinis armavimas, dėl kurio strypai keičiami į įvairius polimerinius ar plieninius armavimo elementus – plaušus (fibras). Ilgą laiką dispersinė (plaušinė) armatūra plačiai naudojama, kaip cementinio skiedinio ir betoninių mišinių priedas, gaminant statybines konstrukcijas.

Lietuvos mastu, šis armavimas dažniausiai aptinkamas grindų betonavime, tačiau kitose pasaulio valstybėse (JAV, Vokietijoje, Japonijoje ir kt.) šis armavimas aptinkamas daug platesnėje statybinių konstrukcijų srityje, pavyzdžiui – tiltų perdangose, plonasieneis rezervuarų, tunelių konstrukcijoms, automobilių kelių dangoms, oro uostų kilimo takams ar poliniuose pamatuose (Kaklauskas et.al 2012).

Iki 1960 m. statybose naudojamo betono stipris gniuždamas buvo nustatytas iki 40 MPa, o jau nuo 1970-ųjų metų pradėjus naudoti betono mišiniuose plastiklius, o vėliau ir superplastiklius, pasaulyje pradėta vartoti apibrėžimą stiprusis betonas (angl. high-performance concrete, sutrumpintai HPC). Šis betonas bandymuose pasiekdavo iki 100MPa gniuždomąją stiprį (Fehling et.al 2014). Superplastiklių panaudojimas leido sumažinti vandens/užpildo santykį, o siekiant sumažinti tampriąsias betono deformacijas ir padidinant plastines, į struktūrą įtraukiamos fibros. Nepaisant to, kad HPC pasižymi puikiomis mechaninėmis savybėmis, tai nėra pažangiausia medžiaga pagaminta naudojant portlandcementį.

Radikaliai sumažinus poringumą ir naudojant smulkesnį užpildą įmanoma pagaminti ypač stiprų betoną (angl. Ultra high-performance concrete, sutrumpintai UHPC) (Camões et.al 2010). UHPC dar yra žinomas kaip labai stiprus plaušu armuotas betonas (ang. Ultra high-performance fibre reinforced concrete, sutrumpintai UHPFRC). Fibros gniuždomajam betono stiprumui bei tamprumo moduliui ryškios įtakos neturi, tačiau tempiamajam stiprumui padidinti yra labai svarus komponentas (Kaklauskas et al. 2012).

## 1.2. Pritaikymo sritys

Labai stipraus betono panaudojimas įgauna pagreitį. Pasaulio rinkoje daugiausiai naudojamas betonas, kurio gniuždomasis kubinis stipris siekia 30-60MPa, tuo tarpų HPC mažiau įtraukiamas projektuose. Pagrindinės HPC panaudojimo sritys (Nishant et al. 2016):

- didelio tarpatramio tiltų konstrukcijose;
- didelio aukščio statiniuose;
- greitkelių kelio dangoje.



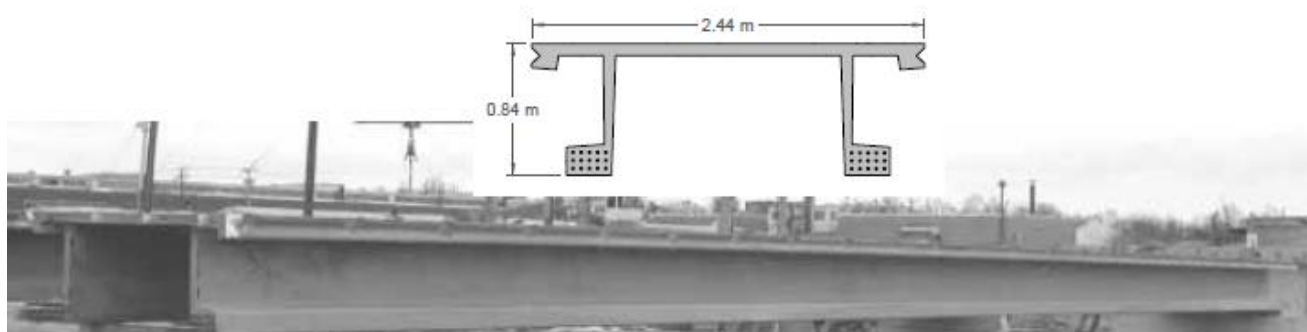
1.2.1. pav. HPC panaudojimas statant daugiaaukščius pastatus (Nishant et al. 2016)

Ypatingai stipraus betono (UHPC) panaudojimas analogiškas HPC, tačiau racionalesnis šiais aspektais (M.Schmidt et.al 2004):

- gaunamos mažesnio skerspjūvio konstrukcijos;
- suteikiamas erdvumas konstrukcijose dėl mažesnių matmenų;
- paprastesnis konstrukcijų gaminimas.



1.2.2. pav. Seonyu pėsčiųjų tiltas , Seulas, Pietų Korėja (M.Schmidt et.al 2004)



1.2.3. pav. Greitkelio tilto „π“ formos sija Vašingtone. (M.Schmidt et.al 2004)

### 1.3. Ypatingai stipraus betono panaudojimo galimybės

Pasak techninio direktoriaus „T.Y Lin International“ Man-Chung Tang „Šių dienų konstrukcijoms mes ieškome medžiagų, kurios išsiskirtų keturiais pagrindiniais aspektais: stiprumas, tinkamumas, ilgaamžiškumas ir prieinamumas“. Trumpai apie kiekvieną iš šių aspektų.

- Stiprumas:

Stipresnių medžiagų naudojimas padeda sutaupyti įsigyjant reikiamą medžiagų kiekį. Tuo pačiu sumažina savitąją konstrukcijų svorį. UHPC stiprumas siekia 200MPa, kuomet įprasto betono stiprumas gniuždant yra iki 50MPa. Betono poreikis siekiant užtikrinti norimą stiprumą tampa mažesnis.

- Tinkamumas:

Konstrukcija turi būti ne tik suprojektuota, bet ir pagaminta. Tinkamumo sąlygoje apsprendžiamas laikas bei išlaidos norint pagaminti konstrukciją. Mūsų atveju UHPC neturi

tinkamumo privalumo, nes betonavimo laikas palyginus su įprasto betono konstrukcijomis yra ilgesnis.

- Ilgaamžiškumas

Senoviniai statiniai nuo Bizantijos ar Romos imperijos laikų vis dar stovi, tačiau nėra aišku, kiek laikys mūsų laikų konstrukcijos. Pavyzdžiui – tiltų konstrukcijos projektuojamos numatant, kad jos bus tinkamos eksploatuoti po 100-150 metų. UHPC naudojimas suteikia vilčių, kad jo panaudojimas atneš norimą rezultatą. Tačiau šios teigiamos viltys yra nagrinėjamos eksperimentiškai, o praktiškai UHPC konstrukcijos tokį laikotarpį dar nebuvo eksploatuotos.

- Prieinamumas

Lemiami žodį konstrukcijos panaudojimui taria kaina ir gamybos sąnaudos. Šiuo metu UHPC naudojimas yra sąlyginai brangus, todėl praktikoje tvirtai įsitvirtinęs įprastojo arba stipraus betono panaudojimas (Tang.M.C.2004)

Tačiau, pasaulinėje rinkoje daugėja atveju, kai šis ypač stiprus betonas reikalauja mažiau gamybos sąnaudų nei analogiškos paskirties plieninės konstrukcijos. Viena iš panaudojimo sričių – staklių ar kitų masyvių įrenginių korpusų gamyba.



1.3.1. pav. Roboto konstrukcijos korpusas pagamintas iš ypač stipraus betono. (Sudholt-Wasemann group.2017)

Ypatingai stipraus betono stiprumo savybės ir mažesnio skerspjūvio gabaritai vilioja naudoti šį betoną platesne prasme. Puikios šio betono mechaninės savybės leidžia pagaminti mažesnio skerspjūvio, sąlyginai lengvesnes konstrukcijas, kurias būtų galima panaudoti ekstremaliose vietose, kuriose reikia elementų, pasižyminčių dideliu lenkiamuoju ir gniuždomuoju stiprumu.



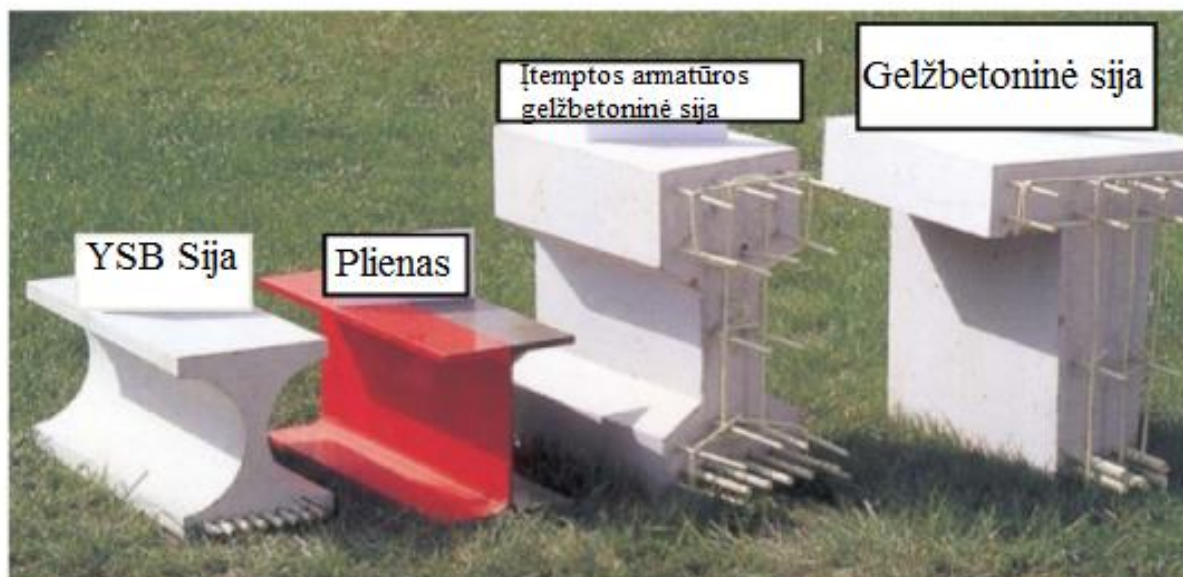
1.3.2. pav. Architektūrinis sprendimas naudojant ypač stiprųjį betoną.(MuCEM muziejus, Marselis, Prancuzija. 2013)



1.3.3. pav. Seifo korpusas pagamintas naudojant ypač stiprųjį betoną.(Seifuva. 2017)



Pateiktame 1.3.4 paveikslėlyje matome keturių skirtingų tipų sijas, kurių atlaikomas lenkimo momentas yra vienodas. Ypač stipraus betono sija savo gabaritais prilyginama plieno sijai, tačiau nedaug sunkesnė už plieno konstrukciją. Lyginant su įprastojo betono sijomis, ypač stipraus betono sija kelis kartus lengvesnė ir mažesnio skerspjūvio ploto.



1.3.4. pav. Įvairių sijų atlaikančių tą patį lenkimo momentą palyginimas (Holdboork 2016)

#### 1.4. Ypač stipraus betono sudėtis

Kaip ir įprastas ar stiprusis betonas, bendru atveju betono modelis išlieka panašus – cementas su vandeniu, užpildais bei betoną vienaip, ar kitaip įtakojančiais cheminiais priedais (Camões et.al 2010). Parenkant užpildą, svarbu žinoti, kad porėtumas labai įtakoja galutinį betono stiprį. Mažinant betono porėtumą gaunamas didesnis betono stipris.

Gaminant ypač stiprų betoną reikėtų atsisakyti stambių užpildų, kuriu dėka įprastojo betono matricoje atsiranda tuštumos. Naudojant smulkų užpildą ir norint, kad visos tuštumos būtų užpildytos, mišinyje naudojama silicio mikrodulkių pudra (Мещерин 2008). Kaip alternatyvą silicio mirkodulkių pudrai, galima panaudoti maltą stiklą, kurio mechaninės savybės nenusileidžia silicio mikrodulkėms, tačiau jo kaina yra mažesnė. (Vaitkevičius et al. 2014).

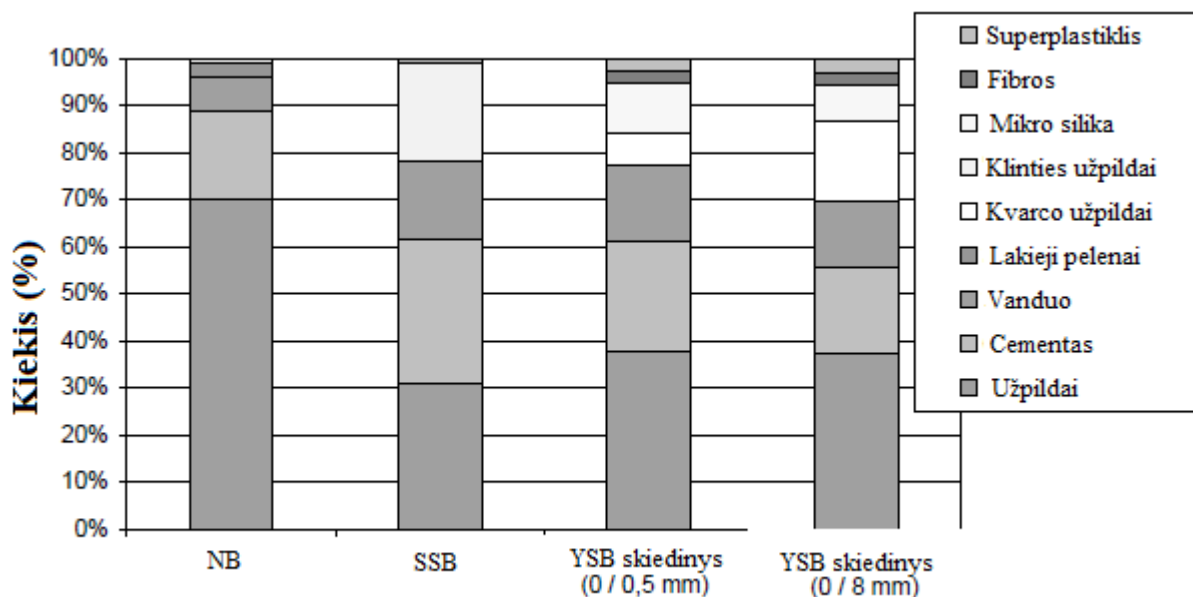
Cementas. UHPC sudėčiai tinkamas yra portlandcementis, kuris turi pasižymėti mažu trikalčio aluminato ( $C_3A$ ) kiekiu (Camões et.al 2010). Superplastikliai dažniausiai sudaryti iš polikarboksilatų ar polikarboksilatų polimerų. Šie elementai yra kondensacijos produktas iš poliakrilinės rūgšties ir polieteramino (ang. polyetheramin). (Terzijski. 2004)

Žemiau pateikiamos tipinės ypač stipraus betono sudėties proporcijos bei populiariausi sudėčių komponentai.

1.1 lentelė. Tipinės UHPC mišinio komponentų proporcijos (Graybeal. 2013).

Medžiaga	Kiekis (kg/m <sup>3</sup> )	Procentas nuo bendro svorio	Vidutinis diametras (μm)
Portlandcementis	712	28,5	15
Silicio mikro dulkių pudra	231	9,3	<10
Kvarcinis smėlis	211	8,4	10
Smėlis	1020	40,8	150-600
Vanduo	109	4,4	n/a
Superplastiklis	30,7	1,2	n/a
Rišimosi greitiklis	30	1,2	n/a
Plieninės fibros	156	6,2	200

(pastaba: n/a- nenurodyta)

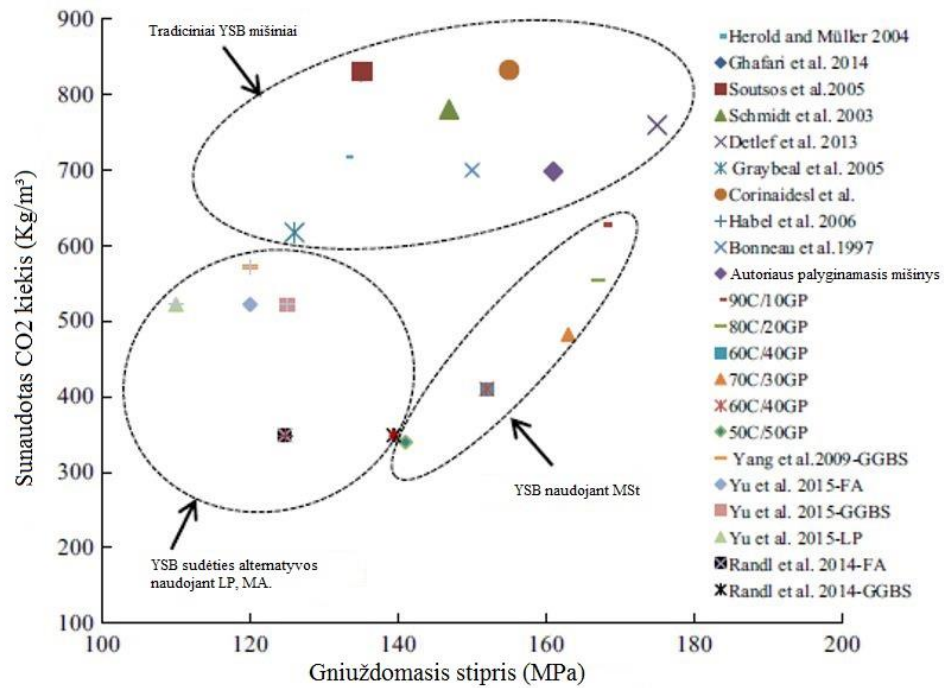


1.4.1. pav. Tipinės savaimės susitankinančio betono (SSB), normaliojo stiprumo betono (NB) ir ypatingai stipraus betono (YSB) komponentų pasiskirstymas betone (Geisenhanslücke et al. 2004)

## 1.5. Ekologiškas ypatingai stiprus betonas

Cementinio pagrindo medžiagos statybos sektoriuje privalo ne tik pasižymėti geromis mechaninėmis bei ilgaamžiškumą lemiančiomis savybėmis, bet šios medžiagos dar ir privalo būti draugiškos aplinkai ir suteikti ekonominės naudos (P.-C AĪTCIN. 2000). Pasauliniu mastu, cementinio pagrindo skiediniai, betoninės ir gelžbetoninės konstrukcijos, bei jų gamybai reikalingi resursai sumoje sudaro apie 7% pasaulinės anglies dioksido emisijos aplinkoje. (Dong 2018)

Didelis cemento kiekio sunaudojimas ne tik paveikia gamybos sąnaudas ir vartoja natūraliuosius išteklius, didelis cemento suvartojimas taipogi neigiamai veikia aplinką išskleisdamas į ją didelius kiekius anglies dioksido (CO<sub>2</sub>), kuris įtakoja šiltnamio efektą. Siekiant sumažinti anglies dioksido kiekį, cementas dalinai gali būti keičiamas į malto stiklo dulkes. Jos išgaunamos malant antrines stiklo atliekas, perdirbant į sąvartynus išmestą stiklą. (N.A. Soliman, et.al. 2016) Betono gamybai naudojamas maltas stiklas yra 30μm ir mažesnės dalelių frakcijos. (SHAO, et.al.2000)



1.5.1. pav. Išskiriamo CO2 kiekio priklausomybė nuo gaminamo ypač stipraus betono tipo(LP-lakieji pelenai, MA-Metalurgijos atliekos, MSt-Maltas stiklas. ( N.A. Soliman, et.al. 2016)

Remiantis autoriaus pateikta diagrama, nuo priklausomybės tarp naudojamo ypač stipraus betono, bei per 28 paras kietėjimo natūraliomis sąlygomis išskiriamo anglies dioksido kiekio, matyti, kad malto stiklo panaudojimas betono gamyboje duoda naudos. Pavyzdžiui autoriaus palyginamojo mišinio gniuždomasis stipris siekė 169 MPa, o į aplinką gamybos metu išsiskyrė 700kg nuo 1 m<sup>3</sup> cementinės masės anglies dvideginio. Tuo tarpu naudojus mišinį, kurio cementinės masės 1 m<sup>3</sup> tūrį sudarė 70% cemento bei 30% malto stiklo, išsiskyrusio CO<sub>2</sub> kiekis siekė 482 kg nuo 1 m<sup>3</sup> tūrio ir šio betono gniuždomasis stipris siekė 163 MPa. (N.A. Soliman, et.al. 2016)

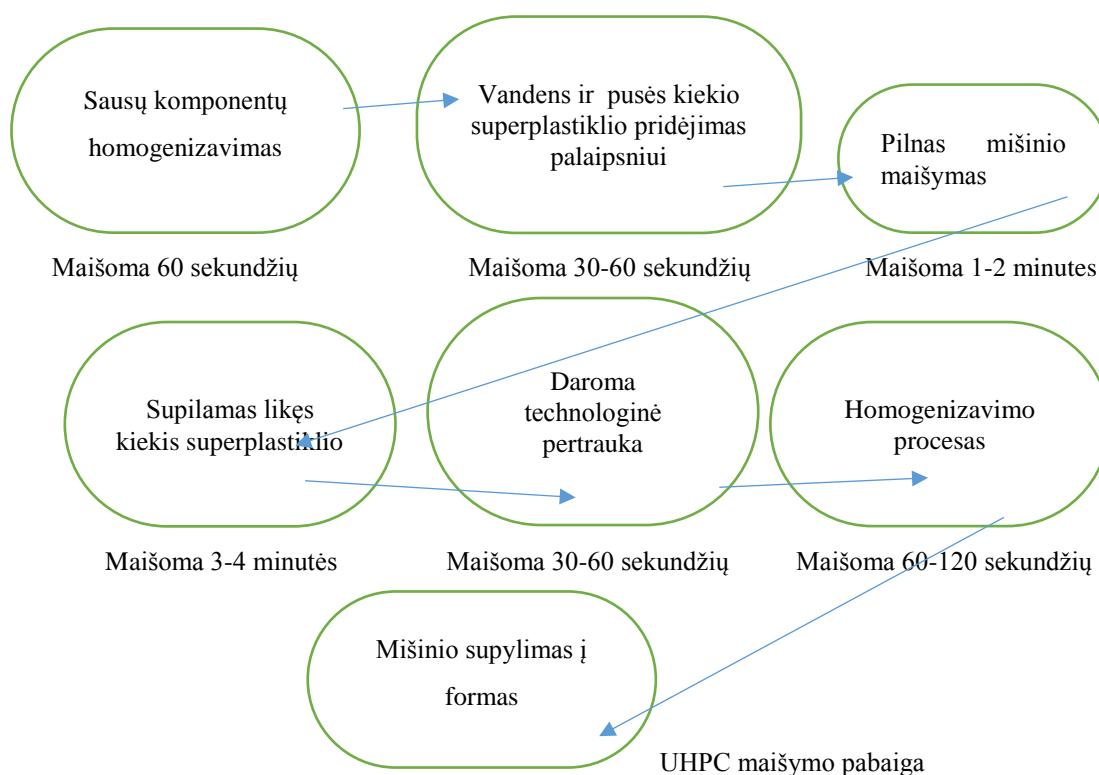
Malto stiklo panaudojimas nėra vienintelis alternatyvus sprendimas. Galimos variacijos su kitais alternatyviais sprendimais, tokiais kaip lakiųjų pelenų, (fly ash), geležies pudros, kvarcinio smėlio pudros ar kitų perdirbtų komponentų panaudojimas. (Vaitkevičius et al. 2014)

	Pavadinimas	Kvarcinis smėlis	Kvarco pudra	Stiklo pudra	Cementas	Silicio pudra
Cheminė sudėtis (%)	Silicio dioksidas (SiO <sub>2</sub> )	99.80	99.80	73.00	22.00	99.80
	Geležies dioksidas (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.04	0.09	0.40	4.30	0.09
	Aluminio oksidas (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0.14	0.11	1.50	3.50	0.11
	Kalcio oksidas (CaO)	0.17	0.38	11.30	65.6	0.40
	Titano oksidas (TiO <sub>2</sub> )	0.02	0.25	0.04	0.20	-
	Sieros trioksidas (SO <sub>3</sub> )	-	0.53	-	2.30	-
	Magnio oksidas (MgO)	0.01	0.20	1.20	1.90	0.20
	Natrio oksidas (Na <sub>2</sub> O)	-	0.25	13.00	0.07	0.20
	Kalio oksidas (K <sub>2</sub> O)	0.05	3.50	0.50	0.80	0.50
	Natrio šarmai (Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> )	-	-	-	0.90	-
	Cinko oksidas (ZnO)	-	-	-	0.09	0.25
	Hidratacijos nuostoliai	0.20	0.32	0.60	1.00	3.50
	Naujadarai elementai	C <sub>3</sub> S	-	-	-	50.00
C <sub>2</sub> S		-	-	-	25.00	-
C <sub>3</sub> A		-	-	-	2.00	-
C <sub>4</sub> AF		-	-	-	14.00	-
Fizikiniai parametrai	Santykinis svoris	2.70	2.73	2.60	3.21	2.20
	Piltinis paviršiaus plotas (m <sup>2</sup> /kg)	-	-	380	430	20,000
	Frakcija d <sub>50</sub> , (µm)	250	13	12	11	0.15
	Didžiausias dalelės dydis d <sub>max</sub> , (µm)	600	-	100	-	-
	Kaina (\$/ton)	235	560	150	220	450

1.5.2. pav Cheminė alternatyvinių reaktyviųjų elementų sudėtis. (N.A. Soliman, et.al. 2016)

## 1.6. Ypatingai stipraus betono maišymas

UHPC maišymas nėra apibrėžtas vienu modulių, kuris būtų taikomas visiems alternatyviems šio betono mišiniams. Principinis mišinio maišymo eiliškumas pavaizduotas 1.5.1. pavyzdyje.

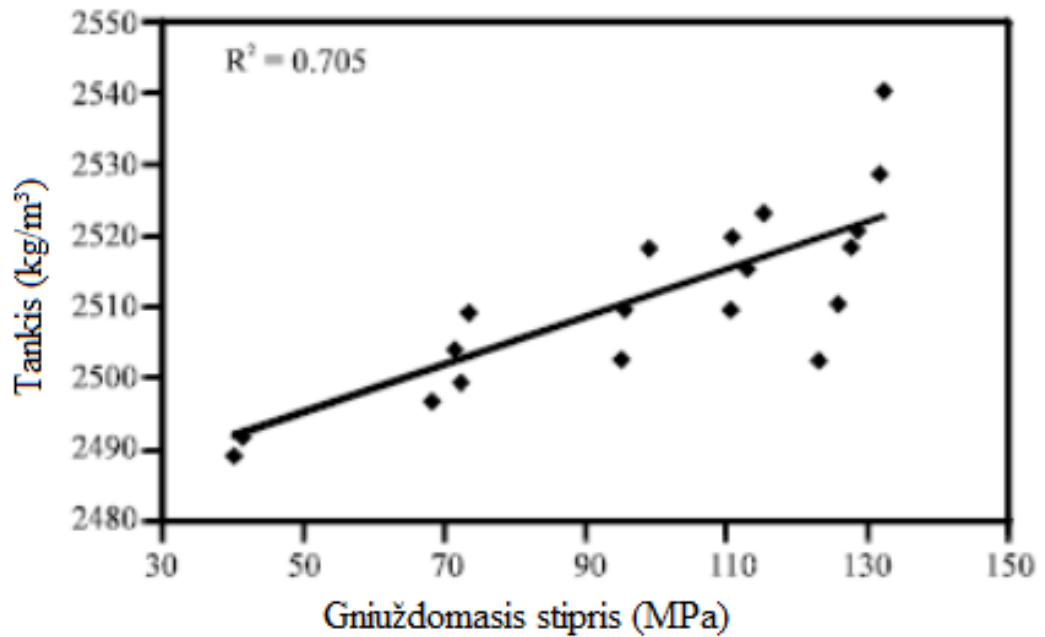


1.6.1.pav. UHPC maišymo tvarka (Šerelis et al. 2016)

## 1.7. Fizikinės, mechaninės ir technologinės labai stipraus betono savybės

### 1.7.1. Tankis

Ypatingai stipraus betono tankio dydis yra svarus aspektas siekiant turėti stipresnį betoną. Tankio padidėjimą lemia kalcio sulfatų ( $C_2S$  ir  $C_3S$ ) hidratacija. Kuomet silicio mirkodulkės įmaišomos į betoną, jos chemiškai reaguoja su betone esančiais kalcio hidratais (CH), ir susidaro kalcio hidrosilikatai (CSH). Šis junginys užpildo poras ir pašalina juose esantį vandenį. Dėl porų sumažėjimo padidėja tūrinis tankis ir betonas tampa stipresniu. (Arafa et al. 2010)



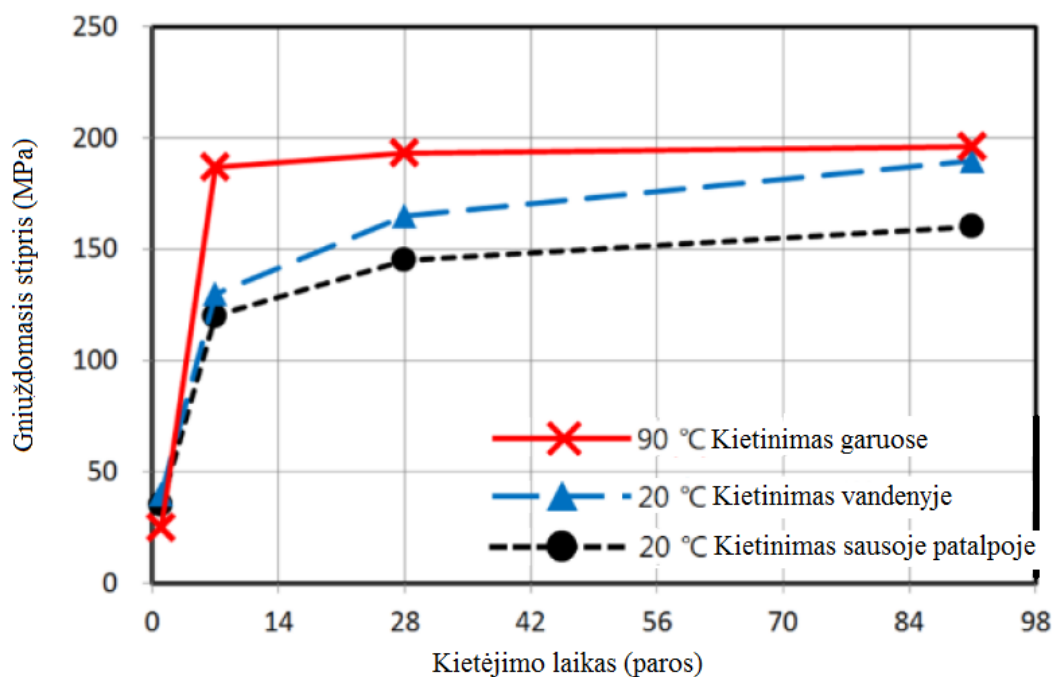
1.7.1.1. pav. Betono bandinių gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo bandinių tankio (Arafa et al. 2010)

Kaip matome iš 1.7.1.1. diagramos, didesnis betono tankis nusako didesnę betono gniuždomąją stiprį. UHPC tankio reikšmės nuo 2511 iki 2530 kg/m<sup>3</sup>, vidutinė reikšmė siekia 2520 kg/m<sup>3</sup>.

### 1.7.2. Gniuždomasis stipris

Tai viena svarbiausių charakteristikų nusakančių šio betono vertę. Amerikos betono institutas (angl. American Concrete Institute (ACI)) pritarė ypač stipraus betono gamybai – ypač stipriu betonu laikomas toks betonas, kurio minimalus specifikuotas gniuždomasis stipris siekia 150 MPa. Taip pat turi turėti ilgaamžiškumo, plastiškumo savybes, naudojamos fibros irgi privalo turėti specifikacijas. (M.Schmidt et.al 2004).

UHPC gniuždomojo stiprio reikšmės po 28 dienų kietėjimo svyruoja nuo 150 MPa iki 250MPa. Eksperimentiškai šios stiprumo reikšmės atitinka skaičiuotinas vertes. Sudėtingesniuose bandymuose gali būti pasiekiamos ženkliai didesnės šios stiprio reikšmės, tačiau tokių eksperimentų rezultatai sunkiai prieinami. Bendru atveju superplastiklio, silicio mirkodulkių ar kitų panašios struktūros mikroužpildų panaudojimas ne tik padidina betono tankį, gniuždomąją betono stiprį, tačiau taip pat padidina plastiškumą bei ilgaamžiškumą. (Nishant 2016)



1.7.2.1. pav. UHPC gniuždomojo stiprio diagrama (Park et al.2015)

### 1.7.3. Lenkiamasis stipris

Fibrų panaudojimas svariai prisideda prie UHPC kietumo gniuždymo atžvilgiu matricoje. Tačiau tai suteikia didelį poveikį pagerinant lenkiamąjį stiprį lyginant su betonu, be fibrų, matricą. Betonai tampa plastiškesnis (Yu et al.2015). Dauguma mokslinių tyrimų yra atliekami siekiant išsiaiškinti UHPC sudedamųjų komponentų charakteristikas medžiagų lygmenyje, kurios fokusuojasi ties betono gniuždomojo stiprio gerinimu.

Tačiau yra atlikta tyrimų, kuriais nusakomi betoninių konstrukcijų lenkiamieji stipriai ir įlinkiai. (Yang et al. 2011) Bandymai atliekami suformuojant UHPC bandinius stačiakampes 40x40x160 mm liejimo formas, kurios kietinamos apie 24 val. ir po šio laiko ištraukiamos ir įdedamos į vandenį bei kurį laiką palaikomos. Vėliau ištraukiamos ir laikomos kambario temperatūroje (+21<sup>0</sup>) iki kol bus atliekami bandymai po 28 d. ir 90 d. kietėjimo. Bandymai atliekami pagal EN 196-1 reglamentą. Minimaliai testuojami trys bandiniai, kad būtų įmanoma nustatyti vidutinį lenkiamąjį stiprį (Yu et al. 2015).

Didelis ypač stipraus betono lenkiamasis stipris leidžia projektuoti didelio tarpatramio konstrukcijas, kuriose yra svarbu atlaikyti dideles apkrovas, susidarančias net nuo savojo svorio, taip sukiant lenkimo momentus tarpatramio viduryje. Pavyzdinė situacija – Sakatos - Marai tiltas Japonijoje. Tiltas pastatytas naudojant ypač stiprųjį betoną. Betonai pasižymėjo pakankamai dideliu lenkiamuoju stipriu, todėl jo konstrukcijoje nebuvo naudojama išilginė armatūra, tik fibros.



1.7.3.1. pav. Sakata - Marai tiltas, Japonija .(www.fhwa.dot.gov)

Laikas	Gniuždomasis stipris [MPa]				Lenkiamasis stipris [MPa]		
	RPC 20°C	UHPC-SF 5°C	UHPC-SF 20°C	UHPC-GF 20°C	RPC 20°C	UHPC-SF 20°C	UHPC-GF 20°C
1 para		22.7	52.3	53.1		-	-
2 paros	52.2	72.3	79.9	78.8		-	-
7 paros	113.3	103.7	111.5	102.7		-	-
28 paros	158.2	141.4	154.8	145.6	31.6	21.5	24.5
91 paros	182.2	161.5	171.7	161.4	31.8	24.1	25.7
<b>Stiklo pluošto fibrų ilgaamžiškumo testas</b>					<b>Lenkiamasis stipris [MPa]</b>		
Palyginimas (Kietėjimas esant 20 C temperatūrai ir 100% oro drėgnumui)					26.0		
Po 100 ciklų klimato dežėje					29.6		



1.7.3.2. pav. Lenkiamojo ir gniuždomojo stiprio nustatymo bandymų rezultatai (Vogt et al.2004).

Remiantis Vogt.C ir kitų atliktais lenkimo bandymais, UHPC lenkiamasis stipris gali siekti iki 50MPa. Lentelėje 1.6.3.1 pavaizduotos mikro silicio pudros betono (RPC), UHPC su plieninėmis fibromis (SF) ir UHPC su stiklo pluošto fibromis (GF) lenkiamojo ir gniuždomojo stiprumo nustatymo bandymo rezultatai.

## 1.8. Terminis atsparumas

Šalia gniuždomojo ir lenkiamojo stiprio nustatymo, labai svarbu žinoti ir UHPC savybes atlaikyti ekstremalius temperatūros pokyčius. Staigus temperatūros kilimas tiriamas eksperimentiškai, siekiant išsiaiškinti betoninių konstrukcijų elgseną (Bei, Zhixiang 2015). Svarbu užtikrinti konstrukcijų laikomąją galią esant ekstremalioms situacijoms. Pavyzdžiui, kuomet gaisro metu temperatūra, šalia atitvarų gali staigiai pakilti net iki 1000 °C, o kitoje konstrukcijų pusėje yra degių ar net sprogių medžiagų. Įprastas betonas veikiant tokioms radikaliai besikeičiančioms temperatūroms pradeda byrėti, todėl atsiranda paspartis išsiaiškinti ar UHPC nesubyrys dėl šio temperatūrų skirtumo (Chan 1996).

Eksperimentų metu buvo bandomi 40x40x160mm liejimo formų matmenų UHPC bandiniai su atitinkamais polipropileninių fibrų kiekiais. Bandymų metu bandiniai 30 min. buvo laikomi apytikriai 1000 °C temperatūroje, vėliau atvėsinti bei bandytas jų gniuždomasis atsparumas pagal numatytus techninius reikalavimus. Veikiant tokioms temperatūroms, betonas be rišančiųjų fibrų subyra, praranda savo forma (Bei, Zhixiang 2015).

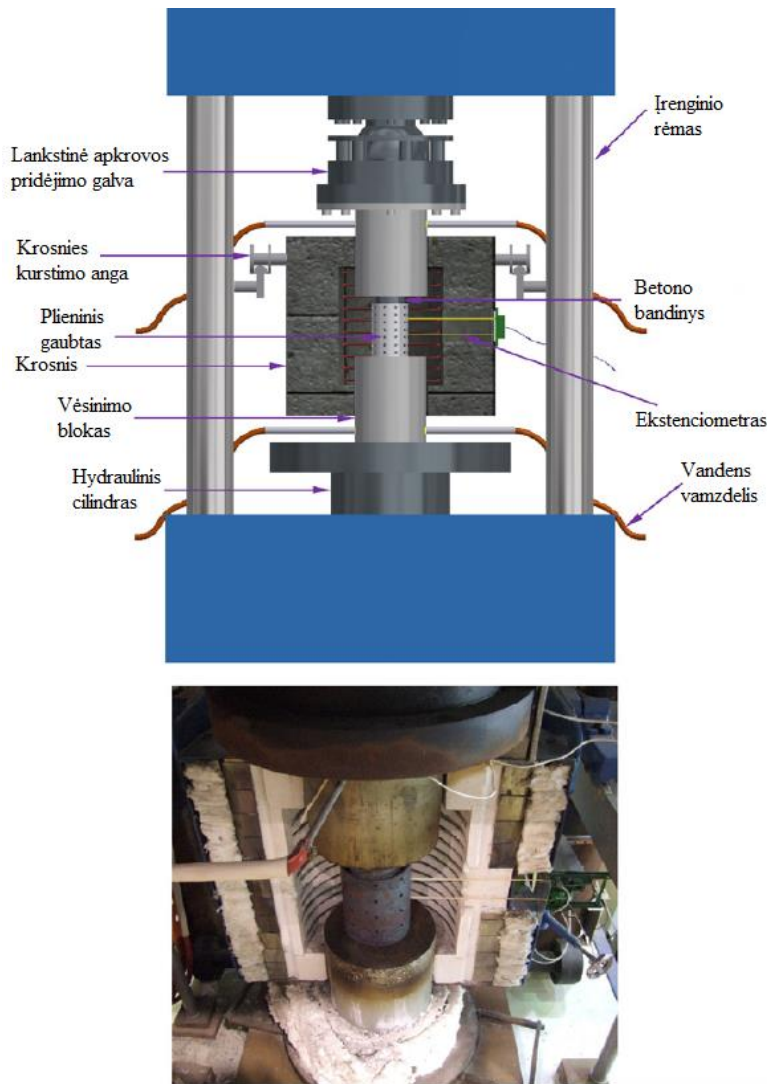
PP Fibrų kiekis (%)	0	0.30
Vaizdas po kaitinimo		
	Pilnas subyrėjimas	Menki įtrūkimai
Vizualus vertinimas	Bandinio pilnas sujrimas	Menki nuostoliai,
Masės praradimas (%)	100	7,4.
Gniuždomasis stiprumas prieš kaitinimą (MPa)	169	160
Gniuždomojo stiprumo santykinė reikšmė po kaitinimo (%)	0	73.3

1.8.1. pav. Temperatūrinio bandymo bandiniai be fibrų ir su 0,3% ,nuo viso bandinio tūrio, fibromis. (Bei, Zhixiang 2015)

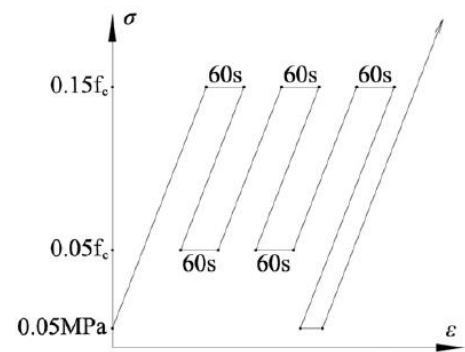
Šio eksperimento prielaida nėra visiškai teisinga, nes apkrovimas vyko tik atvėsintus bandinius. Konstrukcijos viso gaisro ar staigaus temperatūros kilimo metu būna apkrautos, patiria slėgimą, todėl svarbu yra prognozuoti konstrukcijos elgseną temperatūros kilimo metu. M.Xiang Xiong ir J.Y. Richard Liew atliko bandymus , kuriuose temperatūra buvo keliama tuo pačiu metu kaip ir slėgiamas bandinys. Tuomet gauti parodymai lyginami su Eurocode 2 ir ANSI/AISC 360-10 parengtais normaliojo (NS) ir stipraus betono (HSC) rezultatais.

Bandymo metu buvo palaipsniui didinama temperatūra ir apkrova. Temperatūra pirmąsias 25min buvo keliama po 5 °C/min, o vėliau po 25°C/min, ir vėl sumažinta iki 5 °C/min, siekiant simuliuoti realaus gaisro poveikį konstrukcijai. Apkrovimas didinamas ciklais iki 40 procentų skaičiuotinos laikomosios galios, o vėliau gniuždomoji galia keliama iki pilno bandinio sunaikinimo. Šiuo bandymu buvo nustatinėjamas betono tamprumo modulis gaisro metu.





1.8.2. pav. Tamprumo modulių, simuliuojat gaisro atvejį, bandymo įranga ir ciklograma (Xiong et al. 2016).



Temp. (°C)	Gniuždomasis stiprumas (MPa)			Tamprumo modulis (GPa)		
	Bandymų rezultatai	Vidurkis	Santykis	Bandymų rezultatai	Vidurkis	Santykis
30	165.7, 168, 166.1, 169.1, 168.5, 162.2	166.6	1.000	59.9, 63.4, 59.8, 62.8, 62, 58.2	61.0	1.000
100	133.1, 133.6, 119.9	128.9	0.773	47.9, 54.9, 50	50.9	0.835
200	161.9, 139.8, 145.1	149.0	0.894	59.5, 54.8, 50.3	54.9	0.900
300	155.5, 160.4	158.0	0.948	46.5, 45.2	45.8	0.751
400	138.5, 137.2, 143.4	139.7	0.839	36, 32.2, 33.3	33.8	0.554
500	97.2, 131.8, 127.1	118.7	0.712	26.6, 29.8, 27.8	28.0	0.460
600	112.8, 95, 99.6	102.4	0.615	15.9, 20.4, 20.9	19.1	0.313
700	82.3, 86.2	84.2	0.505	13.5, 17.8	15.6	0.257
800	48.4, 49.9, 50.8	49.7	0.298	13.5, 15.3, 16.4	15.1	0.247

1.8.3.pav. Įvairių bandinių gniuždomojo stiprio ir tamprumo modulių reikšmės bandymo metu esant atitinkamoms temperatūroms. (Xiong et al.2016)

## 1.9. Ekonominė palyginimas

1900-aisiais metais viso pasaulio cemento produkcija siekė 10 milijonų tonų, 1998-aisiais ji siekė 1,6 milijardo tonų. Laikantis sąlygos, kad vidutiniškai reikia 250 kg cemento norint paruošti 1

m<sup>3</sup> betono, 1990-aisiais buvo sunaudota tik 40 milijonų m<sup>3</sup> betono, kai 1997-aisiais sunaudoto arba pagaminto betono tūris bendrai siekė apie 6,4 milijardus kubinių metrų. ( P.-C AİTCIN. 2000)

Pavertus šiuos cemento sunaudojimo kiekius pinigine verte, įvertinus, kad betono kaina apie 120 eurų. gauname, kad 1998-aisias metais, betonui remiantis dabartinėmis kainomis būtų išleista apie 768 milijardus eurų. (Wille K. et.al 2015)

Viršijant normalaus betono ribą, atsiranda poreikis naudoti stipriuosius ar ypač stipriuosius betonus. Projektiniai šių betonų stiprumai yra dideli, tačiau ir šio betono kaina išaugusi.

Šiuo metu ypač stipraus betono kaina svyruoja tarp 420-570 eur./m<sup>3</sup>, priklausomai iš kokių medžiagų yra sukurtas šis betonas ir ar į jo sudėti įeina fibros, kurios ženkliai padidina kainą. (Wille K. et.al 2015)

Komponentas	Kaina <sup>a</sup> \$/US/ton	Dalelių dydis μm			Pastabos
		Mediana	D10%	D90%	
Vanduo	-	-	-	-	-
Superplastiklis	13-20 <sup>b</sup>	-	-	-	Pasižymi geromis oro šalinimo savybėmis ir lengvai naudojamas
Silicio mikro dulkės	350-1100	0.2-1	0.1	2	Sudėtyje mažai anglies priemaišų
Paildomas komponentas	46-879	2-5	1	10	Papildomas balastinis elementas naudojams kaip mirko užpildas
Cementas	92-250	10-20	3	40	Mažai C <sub>3</sub> A, daug C <sub>3</sub> S + C <sub>2</sub> S
Smulkus užpildas 1	8.5-162.5	100	>50	<300	Aukštos kokybės, didelio stiprumo ir mažo vandens įgeriamumo
Smulkus užpildas 2	8.5-162.5	500	>300	<1000	užpildai. Optimizuotas dalelių frakcijos santykis pakuotėje.
Stambus užpildas	8.25-19		>1000	<9000	
Fibros	2800-13,300				

<sup>a</sup> Kaina naudotų medžiagų remiantis teksto autoriaus kainos analize

<sup>b</sup> Kaina už superplastiklio pakuotę (3.8l)

1.9.1. pav. Rekomenduojamų medžiagų, skirtų ypač stipraus betono, savybės bei kaina (Wille K. et.al 2015)

Autorius pateikia ir galimas alternatyvas pagrindinėms medžiagoms gaminant ypač stiprųjį betoną. Kiekvieno elemento variacijų yra keletas, kiekviena iš jų skiriasi savo chemine struktūra ir tam tikrų cheminių elementų kiekiu. Yra begalės modifikacijų bei ypač stipraus betono sudėčių, todėl pagrindinis ekonominės naudos vertinimas paremtas atskirų medžiagų kaina ir ilgaamžiškumo vertinimu. (Wille K. et.al 2015)

Pavadinimas	Frakcijos mediana (μm)	Kaina \$/US/ton	v/c <sup>a</sup>	Tešlos sklaidimas <sup>b</sup> (mm)	Gniuždomasis stipris <sup>b</sup> f <sub>c</sub> MPa (ksi)
Silicio mikro dulkės	1.7	879	0.21	315	171 (24.75)
Lakieji pelenai	25	60	0.23	340	192 (27.88)
Lakieji pelenai	9.4	46	0.23	364	197 (28.59)
Lakieji pelenai	12.7	46	0.23	341	192 (27.87)
Lakieji pelenai	10.4	N/A	0.23	313	170 (24.71)
Metakaolinas	1.4	500	0.31	333	164 (23.74)
Metakaolinas	3	500	0.32	220	160 (23.25)
Metalurgijos atlieka	1.5% <sup>b</sup>	100	0.24	295	202 (29.31)
Metalurgijos atlieka	2.0% <sup>b</sup>	102	0.24	300	181 (26.27)
Lakieji pelenai	14% <sup>b</sup>	N/A	0.25	395	187 (27.16)
Klinties pudra	3.2	N/A	0.23	300	194 (28.21)
Klinties pudra	14% <sup>b</sup>	122	0.23	260	164 (23.82)
Klinties pudra	0.6% <sup>b</sup>	124	0.23	295	160 (23.22)

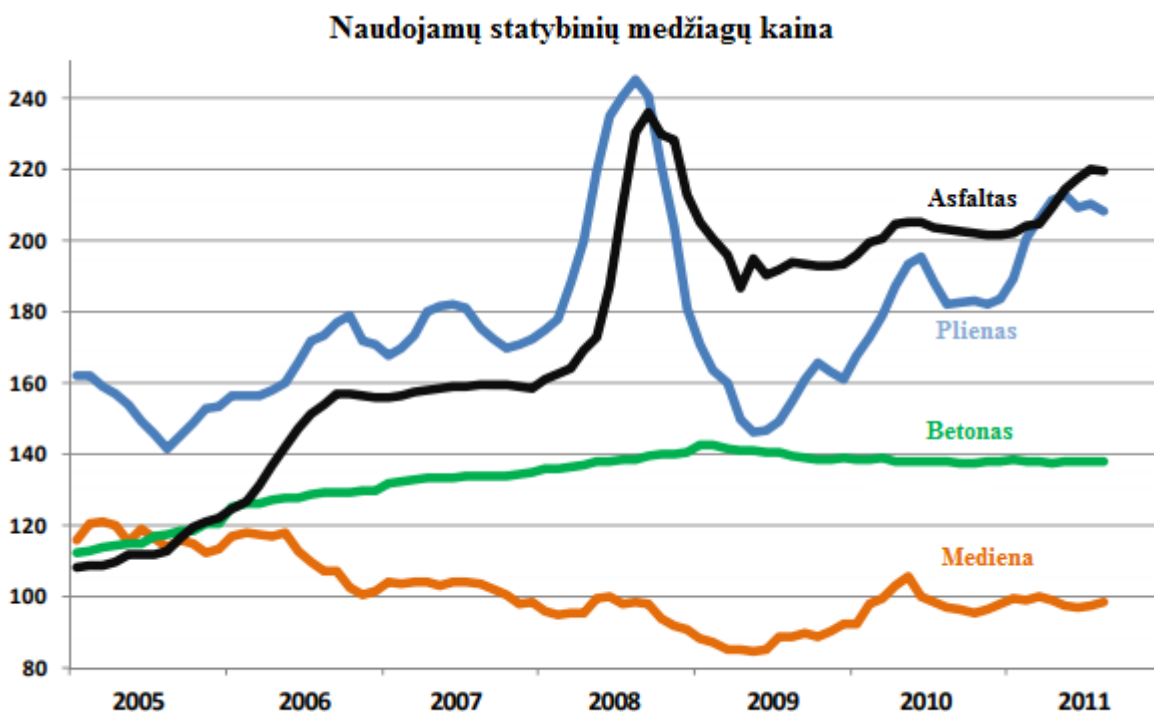
<sup>a</sup> Vertės pateiktos gaminant palyginamąjį mišinį ir naudojant šiuos elementus kaip papildomus užpildus.

<sup>b</sup> Priimamas procentinis kiekis medžiagos išbyrėjes per 45 μm akučių diametro sieta.

1.9.2. pav. Mikroužpildų ypač stipriame betone savybės bei kaina (Wille K. et.al.2015)

Atsižvelgiant į LEED (angl. Leadership in Energy and Environmental) projektavimo sertifikatą, naudojant atsinaujinančias ar perdirbtas medžiagas ypač stipraus betono gamyboje, galutinio betono vertinimo balai dvigubėja. (N.A. Soliman, et.al. 2016) Ilgaamžiškumu pasižymintis ypač stiprusis betonas reikalauja mažesnių investicijų ateityje prižiūrint iš šio betono pagamintas konstrukcijas.

Ypač stipraus betono gaminimas reikalauja nemažai išteklių ir laiko. Medžiagų komponavimas platus, tačiau pats gamybos procesas ilgas, ir šio betono kietėjimas trunka ilgiau nei sunkiojo ar stipraus betono. Ypatingai stiprus betonas pasižymi geromis terminio atsparumo savybėmis. Lenkiamasis ir gniuždomasis stipris pranoksta įprastojo betono ir pamažu kelia konkurenciją plieno konstrukcijoms. Pagrindinė priežastis, neleidžianti plisti šio betono panaudojimui Lietuvoje – kaina.



1.9.3. pav. JAV rinkos įvairių statybinių medžiagų kaina už kubinį metrą medžiagos. Duomenys pateikti Portlandcemenčio asociacijos (angl. PCA- Portland Cement Association) 2005-2011 metų duomenys

Remiantis PCA duomenimis, 2011-ais metais betono kaina siekė apie 120 eur./m<sup>3</sup>. Šiuo metu kaina yra sumažėjusi ir siekia 80-110 eur./m<sup>3</sup> - kaina priklauso nuo betono stiprumo klasės, pateikti kainos intervalai atitinka C12/15 – C30/37 klases.

Kainos skirtumas tarp įprastojo betono ir ypač stipraus, ženklus – pavyzdžiui C30/37 klasės betono gaminimui žaliavų kaina apie 100-110 eur./m<sup>3</sup> betono, tuo tarpu naudojant papildomus elementus, tokius, kaip silicio mikro dulkes, lakiuosius pelenus ir kitus ypač stipriam betonui pagaminti reikalingus komponentus, vieno kubinio metro betono kaina siekti gali apie 500 eur./m<sup>3</sup>.

Elektrinės maišyklės, betono maišymo įrenginiai dėl ypač stipraus betono tankio ir sunkesnio maišymo taip pat reikalingi galingesni. Į kainos aspektą atsiremia faktas, jog UHPC maišymas trunka ilgiau nei įprastojo betono, todėl statybos aikštelėje prarandama laiko.

Lyginant anksčiau pastebėtą kriterijų, kad ypač stipraus betono gniuždomasis stiprumas gali siekti 250 MPa, galima ieškoti alternatyvų jį naudoti vietoje plieninių konstrukcijų. Plieno apdirbimo kaina, įskaitant virinimo darbus bei plieno formavimą siekia iki 1400 eur./t. Šis aspektas leidžia tolimesniuose darbuose pagalvoti apie ypač stipraus betono konstrukcijų lyginimą su plieninėmis.



1.9.4. pav. Didelio gabarito vamzdžio mova, pagaminta naudojant ypač stiprųjį betoną.

Viena iš šio betono panaudojimo alternatyvų plieninėms konstrukcijoms yra ypač stipraus betono naudojimas vietoje ketaus konstrukcijų. Pramonės industrijoje naudojami sunkiojo metalo įrenginiai, jų rėmai, konstrukcija tradiciškai gaminama iš ketaus. Ketaus gaminimas ir formavimas reikalauja daug energinių išteklių. Ypač stipraus betono naudojimas sumažintų sunkiosios įrangos gamybos kaštus.



1.9.5. pav. Staklių korpusas pagamintas iš ypač stipraus betono mišinio. (Sudholt-Wasemann group.2017)

Racionalizavus greitesnį šio betono maišymą ir pasitelkiant pigesnes medžiagas būtų galima gauti ekonomiškesnį ir prieinamą ypač stiprųjį betoną. Šiam tikslui pasiekti, vienas realus variantas yra atsisakyti šlapijojo gamybos būdo ir naudoti tik sausuosius komponentus, įskaitant ir plastikius, rišiklius ir kita.

## 2. TYRIMŲ METODIKA

### 2.1. Tyrimams naudotos medžiagos

**Cementas** Tyrimams naudotas Švedijos įmonės „Cemex“ ir Lietuvos įmonės AB „Akmenės cementas“ portlandcementis CEM I 42,5 R. Savybės nustatytos pagal LST EN 197-1:2001/A3:2007 standartą. Cemento standartinis gniuždomasis stipris  $\geq 42,5 \text{ MPa} \leq 62,5 \text{ MPa}$ . Rišimosi pradžia  $\geq 60$  minučių, sulfatų ( $\text{SO}_3$ ) kiekis neviršija 4,0% , chloridų kiekis  $\leq 0,1 \%$ .

**SiO<sub>2</sub> mikro dulkės.** Mikro silicio milteliai yra pramoninės gamybos proceso metu, atsitiktinai išgaunami į medžiagą, gaminami pramoninio silicio perdirbimo proceso metu. Ši medžiaga yra savaime lakiosios dujos, šios dujos išskiriamos į atmosferą ir deguonies orą, kartu su nusodinta medžiaga šiandien yra mikro silika. Mikro dulkių tankis  $\sim 2120 \text{ kg/m}^3$ , cheminėje sudėtyje gryno SiO<sub>2</sub> - 93%. Savybės tenkina LST EN 12620:2003 + A1:2008 standarto reikalavimus.

**Maltas stiklas.** Tyrimams panaudotas įvairių butelių maltas stiklas. Stiklas buvo malamas iki tol, kol nesimatė plika akimi jokių stambių dalelių ir sijojamas pro 0,1 mm stambumo sietą. Malto stiklo frakcija – 0/01. Užpildo savybės tenkina LST EN 12620:2003 + A1:2008 standarto reikalavimus. Medžiagos tankis  $1650 \text{ kg/m}^3$ .

**Kvarcinis smėlis.** Tyrimams naudotas Anykščių karjero kvarcinis smėlis 0/1 ir 0/2 frakcijos, kurio tankis –  $2670 \text{ kg/m}^3$ , piltinis tankis –  $1600 \text{ kg/m}^3$ , molio ir dulkių kiekis – 0,5%. Užpildo savybės tenkina LST EN 12620:2003 + A1:2008 standarto reikalavimus.

**Cheminiai priedai.** Naudotas plastiklis, sauso miltelinio pavidalo. Plastiklis, naudojamas rinkoje, tinkamas naudoti gaminant specialiosios paskirties mišinius, kuriuose būtina užtikrinti geras stiprumo savybes. Pagamintas polikarboksilatų polimerų pagrindu, pasižymi labai dideliu vandens sugeriamumu. Piltinis tankis –  $600 \text{ kg/m}^3$ , dozavimas nuo 0,05-0,5 % silicio mikro dulkių ir malto stiklo svorio

### 2.2. Betono mišinio ruošimas

Betono mišinio ruošimui buvo pasirinkta principinė ypač stipraus betono sudėtis, pakeičiant superplastiklį į sauso pavidalo rinkoje naudojamą plastiklį. Komponentų proporcijos buvo išlaikytos tūriniam pasiskirstymui, lyginant su tipine ypač stipraus betono sudėtimi.

2.1 lentelė. Betono mišinio  $1 \text{ m}^3$  tipinė sudėtis

Komponentas	CEM	SiO <sub>2</sub>	St	Ks	V	Plastiklis	V/C
Kiekis ( $\text{kg/m}^3$ )	735	99	412	962	180	2,16	0,245

Atsižvelgiant į mišinio proporcijas, buvo sumaišytas kontrolinis bandinys. Medžiagų kiekiai buvo perskaičiuoti iš kiekių, reikalingų sumaišyti  $1 \text{ m}^3$  betono į 1 litro kiekį. Pasvėrus medžiagas,

drėgnu skudurėliu apšluostoma maišyklė ir į ją supilamos sausos medžiagos. Mišinys maišomas tol, kol pasidaro vienalytis. Maišymas atliekamas tokia tvarka:

- visos sausos medžiagos supilamos į maišyklę ir maišomos 1 minutę;
- supilama 70% vandens ir maišoma 2 minutes;
- supilamas likęs vanduo ir maišoma 5 minutes;
- atsižvelgus į per didelį betono tirštumą pridėta dar 40ml vandens ir dar permaišyta 6 minutes.

Palyginus su atliktais betono bandiniais prieita prie išvados, kad tokių proporcijų bandinys nepavyko dėl miltelinio pavidalo plastiklio stokos. Perskaičius proporcijas, padidinus pradinį plastiklio kiekį gautos naujos proporcijos

2.2 lentelė. Betono mišinio 1m<sup>3</sup> pataisyta sudėtis

Komponentas	CEM	SiO <sub>2</sub>	St	Ks	V	Plastiklis	V/C
Kiekis (kg/m <sup>3</sup> )	735	99	412	962	180	8,36	0,245

Betono mišinių maišymas atliktas automatiniu mechaniniu maišytuvu.

Gamintojo pateikti maišytuvo parametrai:

- maišymo talpa 5 l;
- 4 automatiniai maišymo režimai, 1 rankinio valdymo režimas;
- 2 maišymo greičiai: 140 apsk./min ir 285 apsk./min;
- maišymo režimai atitinka EN 196-1, EN196-3, DIN 1164-5, DIN 1164-7.



2.2.1. pav. Skiedinio maišyklė Automix-65

Kontrolinis bandinys buvo maišomas naudojantis ultragarso dispergatoriaus pagalba. Vienas bandinys buvo sumaišytas taikant principinę maišymo technologiją, kitas – išlaikant analogišką maišymo technologiją ir išmaišytą bandinį paveikiant ultragarso dispergatoriumi.

### 2.3. Betono mišinio veikimas ultragarso dispergatoriumi

Ultragarso dispergatoriaus panaudojimo tikslas pagreitinti aktyviųjų komponentų hidratacijos procesą bei pašalinti laisvasias oro poras iš mišinio bei tuo pačiu sutankinti bandinį. Betono mišinys yra veikiamas ultragarso, kurio dažnis siekia –  $\sim 20000$  Hz, mišinį paveikia, taip sukeldamas šio mišinio skysčio temperatūros kilimą. Pasireiškia kavitacijos reiškinys betono mišinyje. Kavitacijos metu didelio intensyvumo ultragarso bangos sukuria vakuuminius burbuliukus skiedinyje. Šie burbulai sugeria šiluminę energiją ir, pasiekus ribą, kurios burbulai nebeatlaiko, jie sprogs, taip paskleisdami smulkiąsias betono komponentų daleles po visą ultragarso dispergatoriaus veikiamo betono tūrį.



2.3.1. pav. Ultragarso dispergatorius „Bandelin electronic UW3400“

Bandymo metu naudoto ultragarso dispergatoriaus galia 400W, vibracinis strypas (zondas) pagamintas iš titano, plokščiu galu, kurio diametras 25mm.

Dispergatoriumi paveikiamas kontrolinis ypač stipraus betono mišinys. Atliekant gniuždomojo stiprumo nustatymo bandymą paaiškėjo, jog mišinys, kuris buvo paveiktas ultragarso



dažniu, atlaikė didesnę gniuždomąją stiprumą, lyginant su analogišku mišiniu, kuris nebuvo paveiktas ultragarso dispergatoriumi. Daroma prielaida, kad vienas, ar keli betono rišimosi komponentai turi teigiamos įtakos galutiniam betono gniuždomajam stiprumui. Šiai hipotezei patvirtinti atliekamas pusiau adiabatiniu kalorimetru hidratacijos proceso tyrimas.

#### 2.4. Tyrimas pusiau adiabatiniu kalorimetru

Pusiau adiabatiniu kalorimetru atliekamas betono mišinio komponentų hidratacijos parametrų matavimas. Tyrimas atliekamas remiantis LST EN 196-9:2010 reglamento nurodymais tiriant betono mišinio šilumos kiekio išsiskyrimą hidratacijos metu. Bandymo metu į betono tešlos mišinį įstatoma termopora, kuri fiksuoja šilumos kiekio pokyčius. Viso matavimo metu kompiuterinė įranga įrašinėja mišinio kietėjimo parametrus.

#### 2.5. Betono mišinio dinaminės klampos nustatymas

Ypač stiprus betonas dėl mažo V/C santykio yra labai klampus mišinys, tačiau skirtingai nei tradiciniai betonai, dėl puikiai parinktų komponentų pasižymi labai dideliu slankumu, kartais artimu net savaime sutankėjančiam betonui. Mišinio klampą galima išmatuoti krintančio rutulio metodu. Šio metodo vienas didžiausių privalumų, jog nebūtinai didelis mišinio kiekis, pakankamai greitai gaunami rezultatai, metodas pakankamai tikslus. Vienas iš didžiausių šio metodo trūkumų, jog negalima klampos nustatinėti, jei mišinyje yra tam tikros sukūrinės srovės, t. y., betono mišinys, kuriame nustatoma klampa, negali būti veikiamas jokiais išoriniais poveikiais, turi būti natūralioje būsenoje (pvz., nustatymo metu mišinys negali būti vibruojamas).



2.5.1. pav. Betono mišinio klampos nustatymo įranga

## 2.6. Betono bandinių formavimas ir kietinimas

Sukietėjusio betono savybėms tirti iš kiekvienos sudėties mišinio, remiantis LST EN 12390-2:2009 standartu, suformuotos 3 bandinių prizmės (40x40x160 mm). Bandiniai formose nebuvo elektrinėmis priemonėmis ir įrenginiais mechaniškai tankinami ar vibruojami – maišyta anksčiau minėta maišykle, ir rankiniu/mechaniniu būdu sutankinami.



2.6.1. pav. Suformuoti bandiniai.

Formos, į kurias buvo supiltas vienalytis mišinys buvo uždengiamos drėgnu skudurėliu ir paliekamos kietėti 2 paras laboratorinėje aplinkoje ( $20 \pm 2$  °C). Po 2 parų kietėjimo, bandiniai buvo išformuojami ir paliekami kietėti vandenyje ( $20 \pm 2$  °C). Po 5 parų kietėjimo vandenyje, viso eksperimento laikotarpiu, buvo matuojami bandinių stiprumai.

### 3. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

#### 3.1. Betono mišinio veikimas ultragarsiniu dispergatoriumi

Ultragarso dispergatoriaus pagalba paveikiami vienos sudėties mišiniai. Tikslas – nustatyti kuris iš mišinio sudėties komponentų turi didžiausią įtaką ankstyvajai betono hidratacijai. Kiekvienas elementas disperguojamas su balastiniu elementu, kurio fizikinės savybės neturi įtakos hidratacijos procesui. Konkrečiu atveju balastiniu komponentu priimtas kvarcinis smėlis.

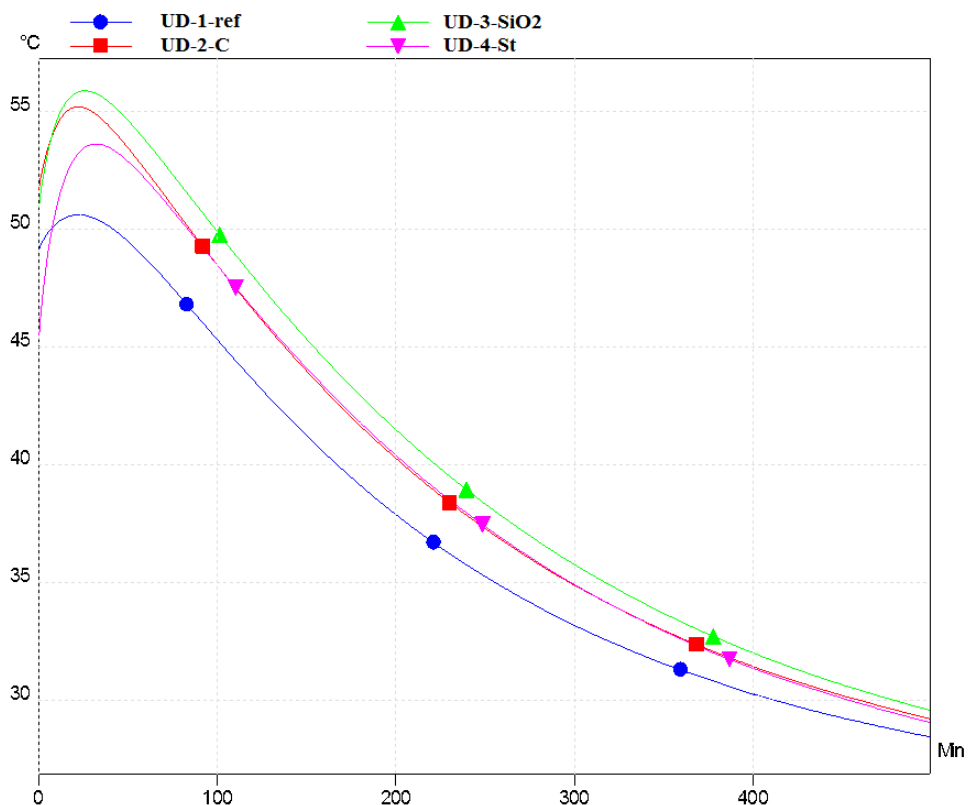
Kiekvienas bandinys disperguojamas ultragarsiniu dispergatoriumi po 10 sekundžių, ultragarso galingumas 250 W (vatų). Viso buvo atlikti 4 bandymai:

- kontrolinis bandinys, kurio visi elementai sumaišomi ir disperguojami;
- kontrolinis bandinys, kurio cementas su vandeniu ir kvarciniu smėliu pirmiausiai sumaišomas ir disperguojamas, o paskui tik sumaišomos likusios medžiagos;
- analogiškas 2 bandiniui, tik pirmiausiai sumaišomos silicio mikrodulkės ir kvarcinis smėlis su vandeniu;
- analogiškas 2 bandiniui, tik pirmiausiai sumaišomos malto stiklo, vandens ir kvarcinio smėlio medžiagos, disperguojamos ir tada sumaišomos visos likusios.

3.1 lentelė. Ultragarsinio dispergatoriaus disperguoti mišiniai.

Mišinio pavadinimas	pastabos
UD-1-ref	Disperguoti visi komponentai
UD-2-C	Disperguotas cementas ir kvarcinis smėlis
UD-3-SiO <sub>2</sub>	Disperguotas SiO <sub>2</sub> ir kvarcinis smėlis
UD-4-St	Disperguotas maltas stiklas ir kvarcinis smėlis

Visi keturi bandiniai sumaišomi rankiniu būdu. Bandiniai buvo supilti į formas, pusiau adiabatinio kalorimetro pagalba, šilumos išsiskyrimo nustatymui. Į bandinius buvo įvestos termoporos, kompiuterių pagalba buvo matuojamas kiekvieno bandinio temperatūros išsiskyrimas ir hidratacijos procesas. Matavimas truko 48 valandas.



3.1.1. pav. Temperatūros išsiskyrimo matavimo rezultatai

Iš bandymo rezultatų matyti, jog aukščiausia temperatūra ir anksčiausias rišimasis prasidėjo antrojo bandinio (UD-2-SiO<sub>2</sub>), kurio disperguotos medžiagos buvo silicio mikrodulkės, kvarcinis smėlis ir vanduo.

Atsižvelgus į šilumos išsiskyrimo rezultatus buvo pasirinkta galutinė maišymo tvarka:

3.2 lentelė. Betono mišinio maišymo eiga

Laikas, s	Betono mišinio maišymo eiga
30	Kvarcinio smėlio, silicio mikrodulkių ir 70% vandens homogenizavimas
60	Esamos tekstūros ir likusių medžiagų homogenizavimas
300	Likusio vandens kiekio supylimas į esamą struktūrą ir bendro mišinio homogenizavimas
30	Pauzė, per kuria mišinys nusistovi.
240	Mišinio homogenizavimas

### 3.2. Ypač stipraus betono sudėties optimizavimas

Nustačius silicio mikrodulkių dispergavimo naudą, ir įvertinus, kad V/C santykis atitinka praktikoje paplitusio ypač stipraus betono mišinio sudėtį, maišomi keletas skirtingų mišinių, norint pasiekti geresnius stiprumo rodiklius, ir nustatyti sausojo plastiklio efektyvumą.

Visi mišiniai maišomi naudojant vienodą maišymo technologiją. Esminis skirtumas tarp mišinių – skirtingas vandens ir plastiklio kiekis mišiniuose.

Kiekvienam mišiniui atliekamas klampos matavimo bandymas. Mišiniai dedami į klampos nustatymo įrangą, kurioje ant mišinių paviršiaus dedamas plieninis rutulys, bei fiksuojamas laikas,

per kurį rutulys prasiskverbia iki mišinio apačios. Pagal šį metodą nustatome mišinio klampumą. Remiantis kitų atlikta praktika, plieninis rutulys bandymo įrangoje, per geros mišinį prasiskverbia apie 1 – 1,5 minutės laikotarpį.

3.3 lentelė. Betono mišinių 1 m<sup>3</sup> sudėtys.

<i>Elementas</i>	C	SiO <sub>2</sub>	St	Ks	V	Plastiklis	V/C
<i>Bandinio Nr.</i>							
NR3	735	99	412	962	180	8,36	0,245
NR4	735	99	412	962	180	16,7	0,245
NR5	735	99	412	962	170	20	0,231
NR6	735	99	412	962	170	24	0,231
NR7	735	99	412	962	175	30	0,238

Šios mišinio vandens ir plastiklio proporcijos vėliau buvo tikslinamos ir, remiantis anksčiau atliktais eksperimentais, buvo suformuoti papildomi bandiniai, atsižvelgiant į artimą idealiam vandens ir cemento santykį – 0,25.

3.4 lentelė. Betono mišinių 1m<sup>3</sup> pataisytos sudėtys.

<i>Elementas</i>	C	SiO <sub>2</sub>	St	Ks	V	Plastiklis	V/C
<i>Bandinio Nr.</i>							
NR8	735	99	412	962	184	16,72	0,25
NR9	735	99	412	962	184	20	0,25
NR10	735	99	412	962	184	23	0,25

Atliekant klamos nustatymo bandymą rezultatai turėjo nemažą nuokrypį nuo prognozuotų rezultatų. Priežastis – patalpos temperatūra buvo didelė, mišnių paviršius iš karto pradėjo stingti, todėl paviršinis klampumas buvo labai mažas. Rezultatai surašomi į lentelę.

3.5 lentelė. Mišinių klamos bandymo rezultatai

<i>Bandinio Nr.</i>	<i>Rutulio nusileidimo laikas(min.)</i>
NR3	>3min
NR4	1:31 min
NR5	>3min
NR6	>3min
NR7	2:30 min
NR8	1:43 min
NR9	2:52 min
NR10	1:12 min

### 3.3. Stiprumo nustatymas

Kiekvieno mišinio stiprumas buvo matuotas tris kartus – po 7, 14 ir 28 parų. Bandinių gniuždomajam ir lenkiamajam stiprumui nustatyti buvo naudojamas hidraulinis presas „Toni Technik 2020“, kurio lenkimo staklėse didžiausia apkrova yra iki 10 kN, o gniuždymo iki 500 kN.

Lenkimo bandymo metu, bandinio prizmė yra laisvai atremiama. Prizmė padedama ant lankstinių atramų, tarp kurių atstumas 10 cm. Apkrova prizmei perduodama centriškai, apkrovos kryptis viduryje atramų.

Lenkiamasis bandinio stipris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\sigma_L = \frac{3Fl}{2bh^2}$$

čia:

F – didžiausia koncentruota apkrova kuri veikė bandinį (kN)

L – atstumas tarp atramų (10 cm)

b, h – bandinio plotis ir aukštis

Gniuždymo bandymo metu bandinys įstatomas tarp 40x60mm plieninių plokštelių ir padedamas preso gniuždomojoje dalyje. Gniuždomasis stipris apskaičiuojamas:

$$\sigma_g = \frac{F}{A}$$

čia:

F – bandymo metu bandiniui užfiksuota gniuždymo jėga (kN)

A – Gniuždomasis plotas (40x60mm)

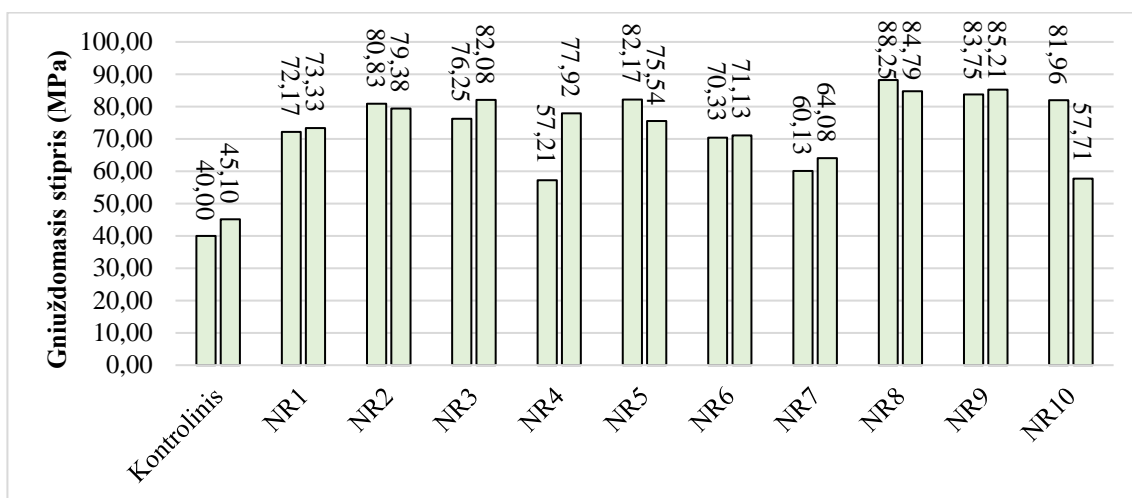


3.3.1. pav. Betono bandinių stiprumo nustatymas hidraulinių presu „Toni Technik 2020“

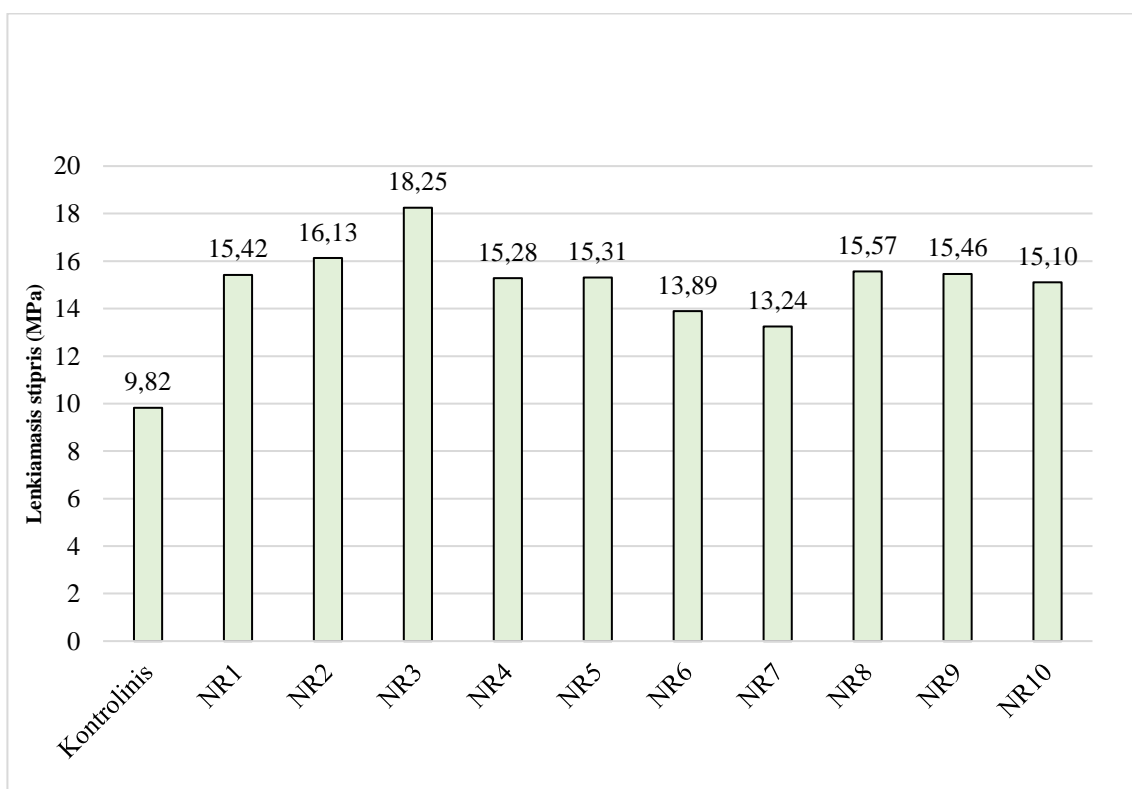
Viso laikotarpio metu nuo bandinio išformavimo iki stiprumo bandymo, bandiniai buvo laikomi vandenyje.

### 3.4. Stiprumo nustatymo rezultatai

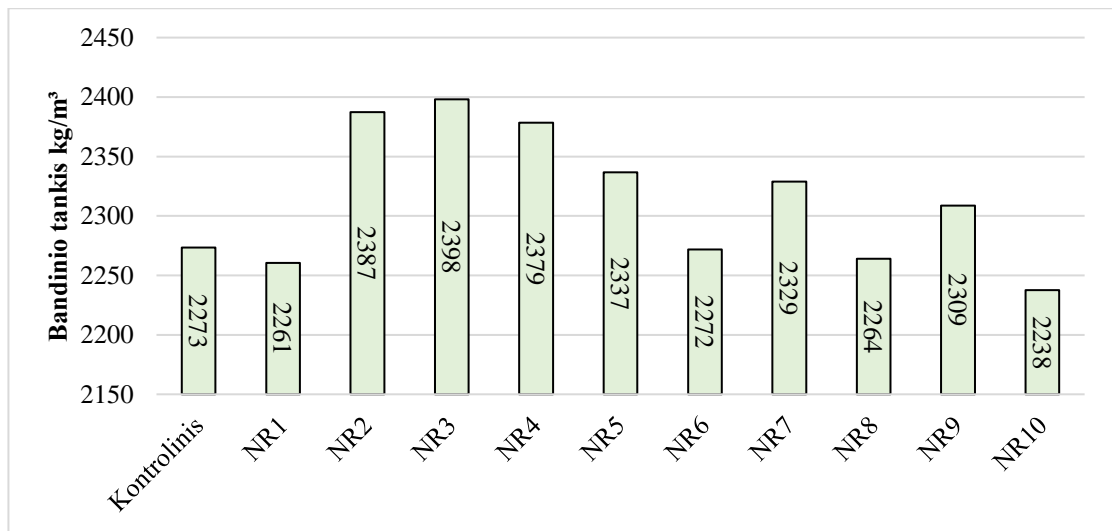
Pagaminus mišinius ir praėjus 7 paroms po mišiniu suformavimo į bandinių formas atliekami gniuždomojo bei lenkiamojo stiprumo nustatymo bandymai.



3.4.1. pav. Betono bandinių gniuždomasis stipris po 7 parų kietėjimo



3.4.2. pav. Betono bandinių lenkiamasis stipris po 7 parų kietėjimo

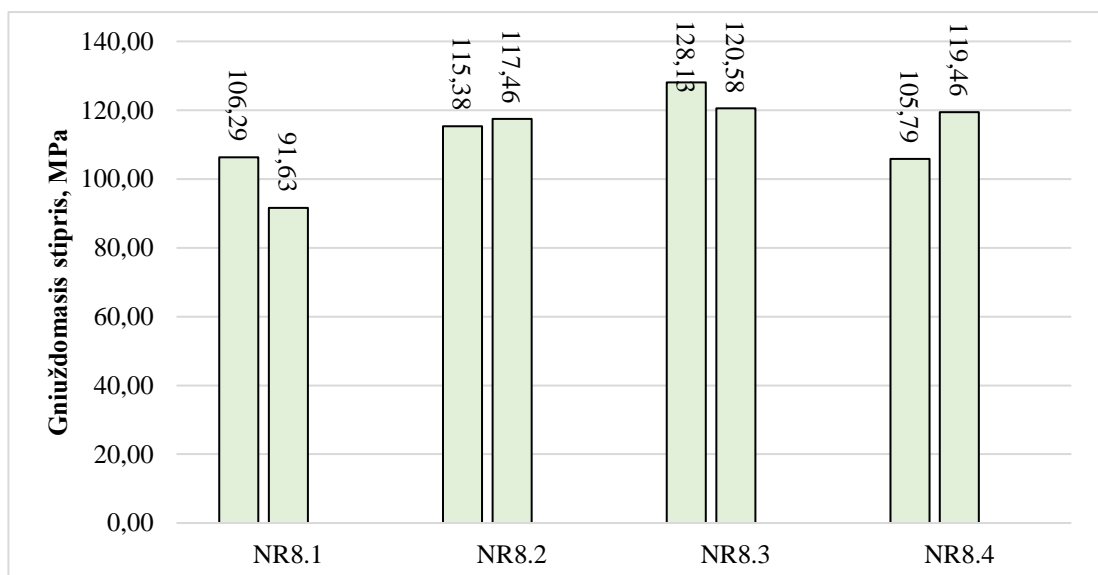


3.4.3. pav. Betono bandinių tankis kg/m<sup>3</sup>

Iš stiprumo rezultatų matyti, kad NR8 bandinys pasiekė didžiausias gniuždomojo stiprumo ribas po 7 dienų. Šio bandinio tankis buvo mažesnis nei panašaus stiprumo kitų bandinių. Artimo rezultato buvo ir NR9 bei NR10 bandinys. Padariau išvadą, kad NR8 bandinį reikia tirti toliau.

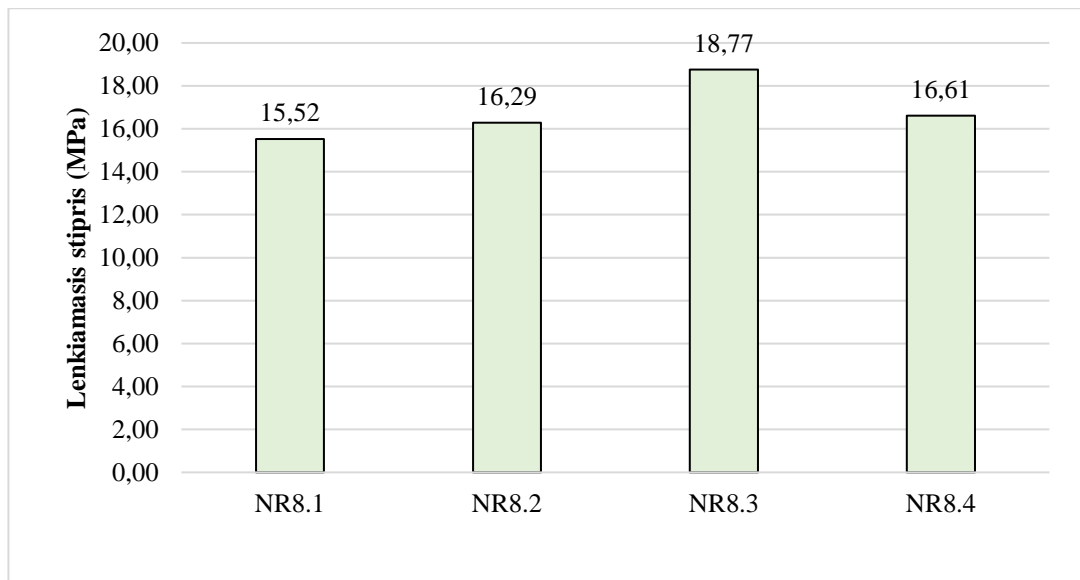
Buvo atlikti pakartotiniai šio bandinio maišymai, suformuotos 9 analogiškos prizmės NR8 bandinio tekstūros. 6 iš 9 prizmių buvo kaitinamos kietinimo kameroje. Kameros temperatūra buvo laikoma +80 laipsnių, buvo išlaikytas 100 % drėgnis. Bandiniai kaitinami 7 dienas.

Trys bandiniai buvo suformuoti su įdėtiniais įdėklais susitraukimo deformacijų matavimui nustatyti. Pora kaitintų bandinių buvo palikti poringumo nustatymui. Su likusiais, kaitintais 7 dienas kaitinimo kameroje bandiniais, buvo atlikti stiprumo matavimai.

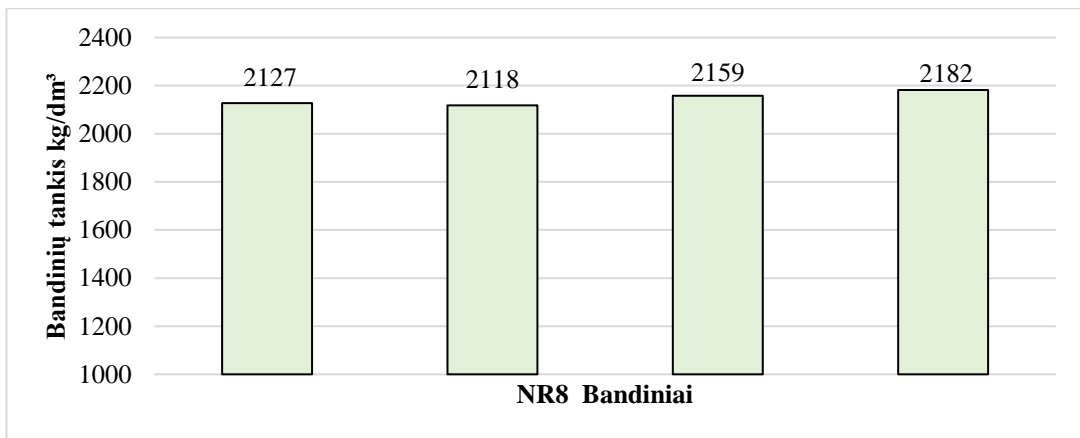


3.4.4. pav. Betono bandinių gniuždomasis stipris po 7 parų kietėjimo





3.4.5. pav. Betono bandinių lenkiamasis stipris po 7 parų kietėjimo



3.4.6. pav. Betono bandinių tankis  $\text{kg/m}^3$

### 3.5. Betono susitraukimo deformacijų matavimas

Buvo nustatinėjamos betono susitraukimo deformacijos. Tikslas – išsiaiškinti betono elgseną laikui bėgant, jo deformatyvumą. Šiam tikslui pasiekti, bandiniai po kietinimo kameroje buvo laikomi orasausėmis sąlygomis. Matavimo prietaisas sudarytas iš dvejų dalių – matavimo indikatoriaus, matuojančio 1 mikrometro ( $\mu\text{m}$ ) tikslumu, bei plieninio rėmo, atitinkančio šio matavimo prietaiso reikalavimus. Matavimai atliekami įstatant betono bandinio prizmes, su jau įbetonuotais reperiais (įdėklais skirtais taisyklingai įstatyti prizmes į matavimo rėmą) prizmių galuose, bei matavimo indikatoriaus pagalba, matuojant betono bandinio ilgio pokytį nuo pradinės matavimo reikšmės. Kiekvieno matavimo metu nustatoma nulinė reikšmė.

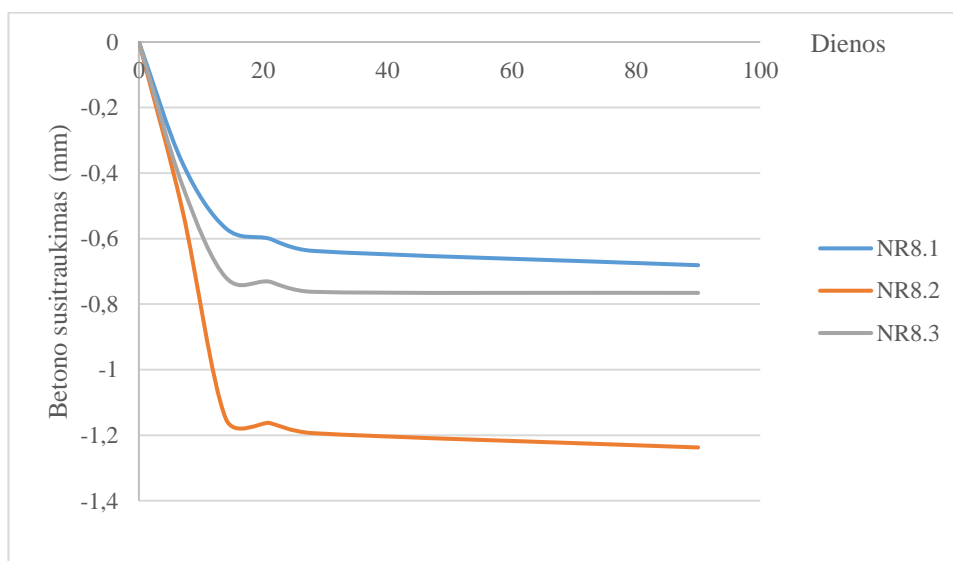


3.5.1. pav. Betono bandinių susitraukimo deformacijų matavimo įranga

Ypač stipraus betono deformacijų matavimo reikšmės perskaičiuojamos proporcingai nuo 16 cm ilgio prizmės iki 1 m ilgio, laikantis sąlygos, kad teisingai bus vertinamas betono pailgėjimas arba sutrumpėjimas. Kiekvienos dienos matavimas atliekamas sukalibravus prietaisus iki nulinės reikšmės ir fiksuojant pailgėjimą nuo nulinės reikšmės.

3.6 lentelė. Deformacijų matavimų reikšmės (mm).

Bandinys	Pirmas matavimas	Matavimas po 7 parų	Matavimas po 14 parų	Matavimas po 21 paros	Matavimas po 28 parų	Matavimas po 90 parų
NR8.1	7,574	7,515	7,483	7,478	7,472	7,465
NR8.2	8,129	8,047	7,945	7,943	7,938	7,931
NR8.3	6,013	5,943	5,898	5,896	5,891	5,8905



3.5.2. pav. Betono bandinių susitraukimo deformacijų matavimo rezultatai po 90 parų kietėjimo

Atlikus matavimus matome, kad ypač stiprus betoną matavimo periode traukiasi. Susitraukimas artimas ribiniam betonų susitraukimui – 1 mm nuo metro ilgio betono .NR.8.2 bandinio susitraukimo deformacijos yra didesnės nei leistinos, tačiau tam poveikį galėjo turėti žmogiškojo faktoriaus klaida matavimo metu.

### 3.6. Betonų poringumo parametrai

Viena iš priežasčių, kodėl šis stiprumas nebuvo pasiektas – galimai didelis betonų poringumas.



3.6.1. pav. Betonų bandinys po lenkimo stiprio nustatymo bandymo su poromis

Šiam tikslui išsiaiškinti buvo atliktas poringumo nustatymo bandymas.

Du bandiniai kaitinimo kameroje buvo išdžiovinti ir periodiškai laikomi vandenyje. Po nustatyto laiko mirkimo vandenyje, bandiniai buvo nusauginami ir sveriami. Sverimai vyko po 15 min, 45 min, 24 val. ir 48 valandų laikymo vandenyje. Bandinys taip pat buvo sveriamas ir vandenyje. Gautos reikšmės surašomos.

3.7 lentelė. Betonų bandinių masė

Bandinys	Masė sauso bandinio	Masė vandenyje	Masė po 15 min laikymo vandenyje	Masė po 45 min laikymo vandenyje	Masė po 24 val laikymo vandenyje	Masė po 48 val laikymo vandenyje
8.1.A	539,69g.	293,4g.	540,74 g.	541,08g.	542,24g.	542,59g.
8.1.B	539,21g.	293,3g.	540,26g.	540,26 g.	541,72g.	542,09g.

Pagal gautas bandinių mases apskaičiuojamas pilnas poringumas

$$P_p = 1 - \frac{T}{M_s} 100$$

čia:

$T$  – Sausos cementinės masės tankis apskaičiuojamas:

$$T = \left( \frac{M_{sauso}}{M_{48val} - M_{vand}} \right) 1000$$

$M_{sauso}$  – Masė sauso bandinio;

$M_{48val}$  – Masė bandinio po 48val laikymo vandenyje;

$M_{vand}$  – Bandinio masė vandenyje;

$M_s$  – Masė sausųjų betono komponentų

$$M_s = \sum m_{saus.el}$$

Gaunamos pilno poringumo reikšmės:

$$P_{p,8.1A} = 1 - \frac{T}{2409} 100 = 10,10\%$$

$$P_{p,8.1B} = 1 - \frac{T}{2409} 100 = 10,03\%$$

Gautas poringumas buvo palygintas su dėst. E. Šerelio magistro baigiamajame darbe nustatytu bandymuose ypač stipraus betono poringumu. Jo darbe pateikiamos pilno poringumo reikšmės svyruoja nuo 12 – 18 %. Jo bandiniuose gauto ypatingai stipraus betono gniuždomasis stiprumas siekė 131 – 146 MPa. Gautas poringumas nežymiai mažesnis, tačiau poringumas nebuvo pagrindinis faktorius nulėmęs mažesnes gniuždomojo stiprumo reikšmes. Rezultatui įtakos galėjo turėti sauso pavidalo plastiklio naudojimas.

### 3.7. Paviršinis betono šaldymo bei atšildymo bandymas

Paviršinis ypač stipraus betono šaldymo bei atšildymo bandymas atliekamas remiantis LST EN 1338:2003 standarto nurodymais. Šio bandymo metu bandiniai įmerkami į 3 % NaCl tirpalą ir sudedami į šaldymo kamerą.



3.7.1. pav. Ypač stipraus betono bandiniai įmerkti į 3% druskos tirpalą, bei šaldymo kamera.

Bandymo metu šaldymo kameroje bandiniai periodiškai yra atšaldomi bei atšildomi. Temperatūros amplitudė šaldymo kameroje svyruoja nuo -20 °C iki +20 °C. Periodas, per kurį temperatūros svyravimas atlieka vieną ciklą yra 24 valandos. Ypač stipraus betono bandiniai buvo bandomi 60 ciklų ir fiksuojamas bandinių vizualinis pokytis bei bandinių masės nuostolis. Masės nuostolis vertinamas kilogramais kvadratiniam metrui (kg/m<sup>2</sup>) ir apskaičiuojamas pagal formulę:

$$L = \frac{M}{A}$$

Čia:

L – masės nuostolis bandinio ploto vienetui, (kg/m<sup>2</sup>);

M – visa atskilusios medžiagos masė, apskaičiuota po „n“ ciklų, (kg);

A – bandinio paviršiaus plotas (m<sup>2</sup>).

Atlikus bandymą bei pasvėrus nusausintus bandinius po paviršinio šaldymo bei atšildymo bandymo gauta, jog bandiniai po 60 ciklų prarado 2,2 – 2,8g nuo bandinio masės. Apskaičiavus masės nuostolius gauname, kad ypač stipraus betono bandiniai prarado nuo 76,38 g/m<sup>2</sup> iki 97,22 g/m<sup>2</sup>.

### 3.8. Sukurto ypač stipraus betono palyginimas su rinkoje naudojamais mišiniais

Ypač stipraus betono stiprumo parametrai nustatyti laboratorinėmis sąlygomis buvo lyginami su rinkoje naudojamu mišiniu. Šiam palyginimui buvo pasirinkta NR8.1 mišinio formulė ir šio mišinio maišymo technologija. Mišinys buvo lyginamas su vienos įmonės pagamintu sausuoju mišiniu, kuris pasak gamintojų yra artimas ypač stipraus betono klasifikacijos gniuždomojo stiprumo ribai – įmonės cementinio mišinio gniuždomasis stipris siekė apie 150 MPa.

Abu mišiniai buvo maišomi vienodomis sąlygomis. Naudota NR8.1 mišinio maišymo seka, mišinio maišymas trūko iki 15 min. Maišyklė buvo naudojama ta pati, sausų komponentų masė vienoda. Vandens kiekis mišiniuose buvo vienodas (184 ml). Tiek NR8.1 formulės mišinys, tiek

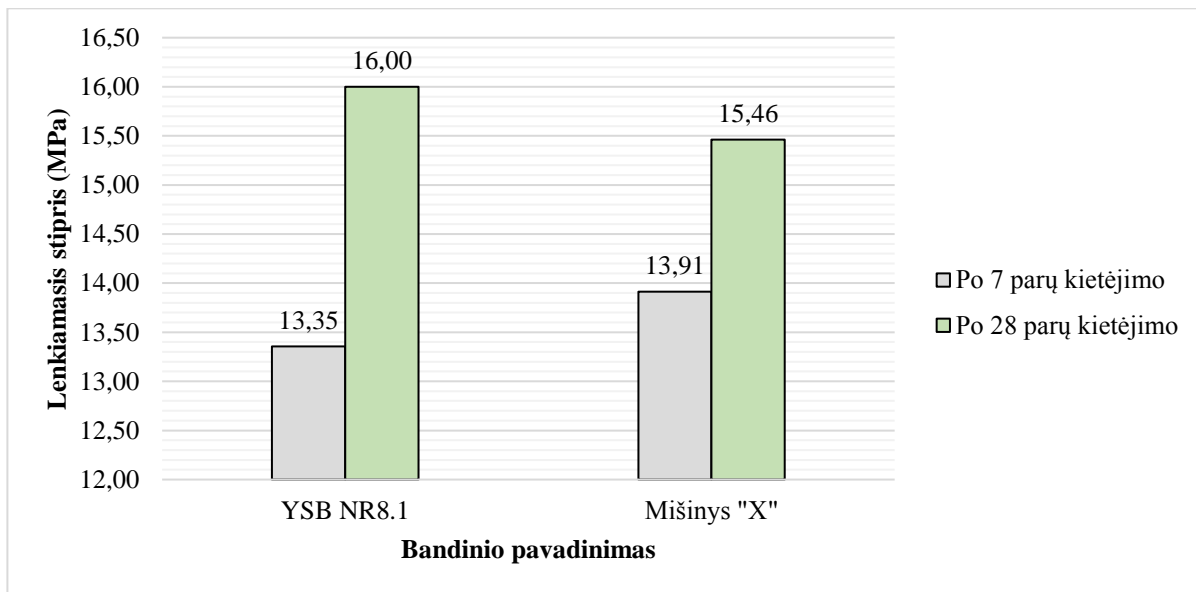


komerciniams tikslams naudojamo mišinio bandiniai, buvo kietinami vienodomis sąlygomis.

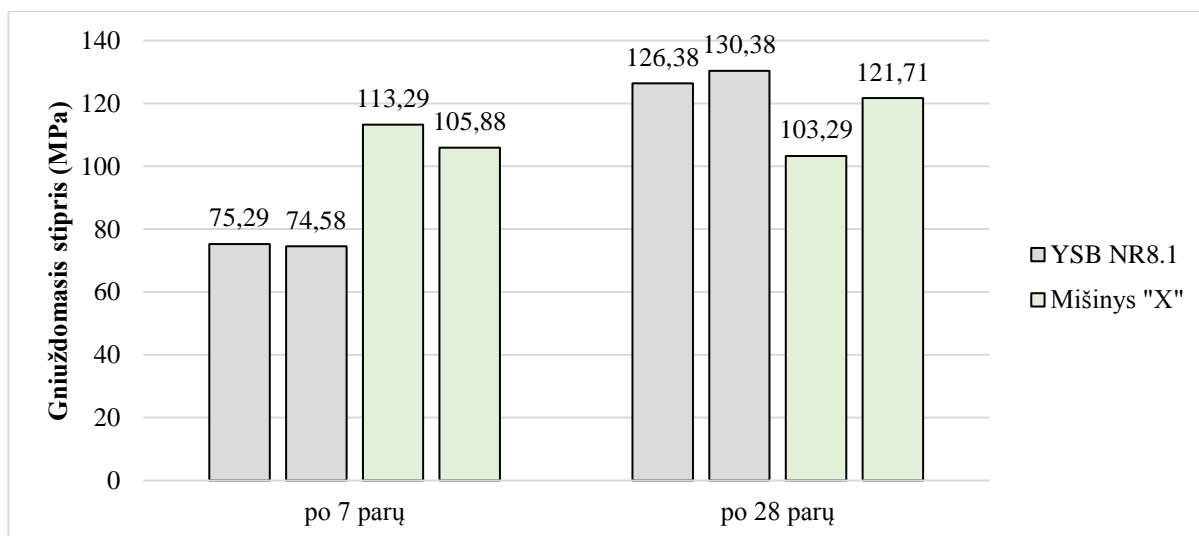
3.8.1. pav. Komercinis mišinys (1) ir ypač stiprus betonas pagal formulę NR8.1(2)

Maišant komerciniam tikslui naudojama mišinį buvo pakeistas vandens kiekis – papildomai maišymo metu įdėta 30 ml vandens. Šio sprendimo priežastis – maišant mišinį, pirminis vandens kiekis buvo nepakankamas. Todėl periodiškai buvo pridedama po 5 ml vandens ir stebėta, kaip įmonės mišinys pasiekia analogišką konsistencija mano gamybos mišinio.

Atliekami gniuždomojo stiprumo matavimai po 7 parų ir po 28 parų kietėjimo.



3.8.2. pav. Bandinių lenkiamasis stipris



3.8.3. pav. Bandinių gniuždomasis stipris

Gauti stiprumo bandymo rezultatai gali skirtis atsižvelgiant į gamintojo nurodytas mišinio gaminimo gaires. Taipogi vandens kiekis parinktas pagal mano gaminto betono nustatytus kriterijus. Šio vandens kiekio nepakako komerciniams tikslams naudojamam mišiniui, vandens kiekis buvo padidintas, tai galėjo sumažinti šio mišinio gniuždomąjį stiprį.

### 3.9. Padidinto tankio ypač stipraus betono gaminimas naudojant metalo apdirbimo atliekas

Viena iš svarbiausių ypač stipraus betono savybių yra didelis šio betono tankis. Tačiau net ir naudojant nustatytas medžiagas, kai kuriose aplikacijose šio betono tankio nepakanka. Pavyzdžiui seifų pramonėje plačiai naudojamas ypač stiprus betonas gali būti gaminamas naudojant medžiagas, kurios padidina betono tankį. Siekiama, kad ir mažų gabaritų konstrukcija būtų sunki, būtų užtikrintas ne tik šiuo atveju seifo stiprumas įsilaužimo metu, bet ir sutrukdytas seifą išsinešti.

Vienas iš galimų ypač stipraus betono tankio didinimo būdų yra naudoti metalo apdirbimo atliekas.



3.9.1. pav. Metalo apdirbimo atlieka.

Ši metalo atlieka - tai antrinė žaliava gauta šveičiant metalinius laivų korpusus. Konkrečiu atveju, šios dulkės gautos nugrandžius rudis bei nešvarumus nuo laivo korpuso, kelis kartus skalaujant vandeniu ir, magneto pagalba, išrenkant grynąją metalų dalį iš visos masės. Šios metalo atliekos sudarytos iš 98 % metalų ir 2 % organinių priemaišų. Produktas gautas komerciniu keliu.

Atliekant bandymą, šios dulkės buvo naudojamos kaip balastinis elementas. Buvo keičiama anksčiau naudota bandinio NR8.1 formulė. Metalų atliekos buvo naudojamos keičiant atitinkamą kvarcinio smėlio turį bandinyje. Buvo perskaičiuota kvarcinio smėlio masė per tūrio vienetą, ir atitinkamai sumaišyti 4 bandiniai pakeičiant atitinkamai 5 %, 15 % ir 25 % kvarcinio smėlio tūrio į metalų dulkių turį. Perskaičiuojamos bandinių komponentų masės.

3.8 lentelė. Betono mišinių 1m<sup>3</sup> pataisytos sudėtys

<i>Elementas</i>	CEM	SiO <sub>2</sub>	St	Ks	V	V225	Fe	V/C
<i>Bandinio Nr.</i>								
<i>RNR.8.1.1_ref.</i>	735	99	412	962	184	16,72	0	0,25
<i>RNR.8.1.2_5%</i>	735	99	412	913.9	184	16.72	84.06	0,25
<i>RNR.8.1.3_15%</i>	735	99	412	817.7	184	16.72	253.06	0,25
<i>RNR.8.1.4_25%</i>	735	99	412	721.5	184*	16.72	421.77	0,25*

\*-Bandiniui RNR.8.1.4\_25% maišymo metu, papildomai įdėta 5ml vandens

Bandiniai buvo kietinami analogiškais sąlygomis kaip ir anksčiau aprašyti bandiniai. Nustatinėjamas bandinių tankis, taip pat gniuždomasis bei lenkiamasis betono bandinių stiprumas po 7, 14 ir 28 parų kietėjimo.



3.9.2. pav. Išformuoti RNR formulės bandiniai

Dėl geležies dulkių panaudojimo padidėjo bandinių masė, ko pasekoje padidėjo ir tūris. Bandiniai buvo sutankinami vibracinio įrenginio pagalba siekiant optimizuoti bandinių tankį, sumažinant porų bei tuščių ertmių kiekį bandiniuose. Taip pat bandymo metu buvo užsibrėžtas tikslas pasiekti didžiausią NR8.1 formulės (RNR.8.1.1\_ref) bandinio gniuždomąjį stiprumą. Šiam tikslui bandiniai buvo maišomi pora minučių prailgintu režimu- po technologinės pertraukos (30sek.) mišinio homogenizavimas truko ne 240 sekundžių, o 360 sekundžių. Visi bandiniai tankinami ne rankiniu būdu, o naudojant vibracinį tankinimo įrenginį, tankinimo trukmė 15 sekundžių.

Maišant lyginamąjį bandinį, bandinius su atitinkamai 5 % ir 15 % geležies dulkių nuo kvarcinio smėlio tūrio, vandens kiekio bandiniui susimaišyti užteko. Tačiau maišant bandinį su 25% metalų atliekų dulkių nuo smėlio tūrio, vandens kiekis bandinyje buvo nepakankamas, neįvyko komponentų homogenizavimo procesas, todėl periodiškai buvo dedama papildomo vandens. Maišyta iki kol bandinio tekstūra tapo artima pirminiams bandiniams.



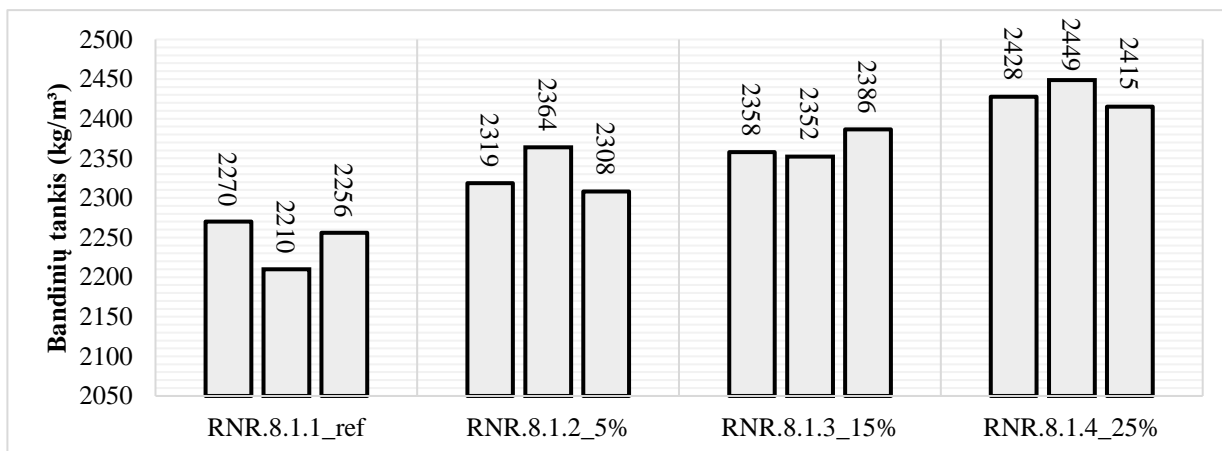
3.9.3. pav. Betono su metalo atliekomis defektai,(1)- tuštumų atsiradimai, (2)-paviršinė betono korozija

Bandinių formavimas buvo analogiškas anksčiau aprašytuose bandymuose. Tačiau pastebėta technologinių nesklandumų pačio betono struktūroje jį išformavus. Bandiniuose su geležies dulkėmis aiškiai buvo pastebimos tuštumos, kurios koregavo taisyklingą betono formą. Įtariama priežastis –

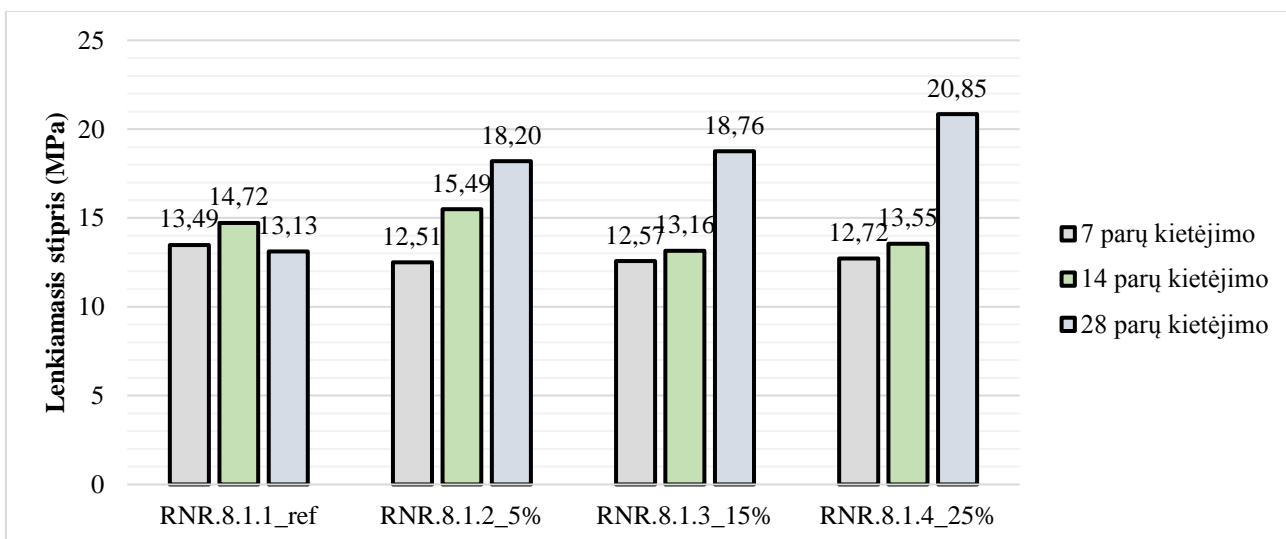


tankinio metu naudotas elektrinis vibracinis tankinimo įrenginys, ir nuo jo variklio magnetinio poveikio metalų dulkės galėjo bandinyje pasiskirstyti netolygiai. Taip pat galima išvelgti korozijos pėdsakus betono paviršiuje.

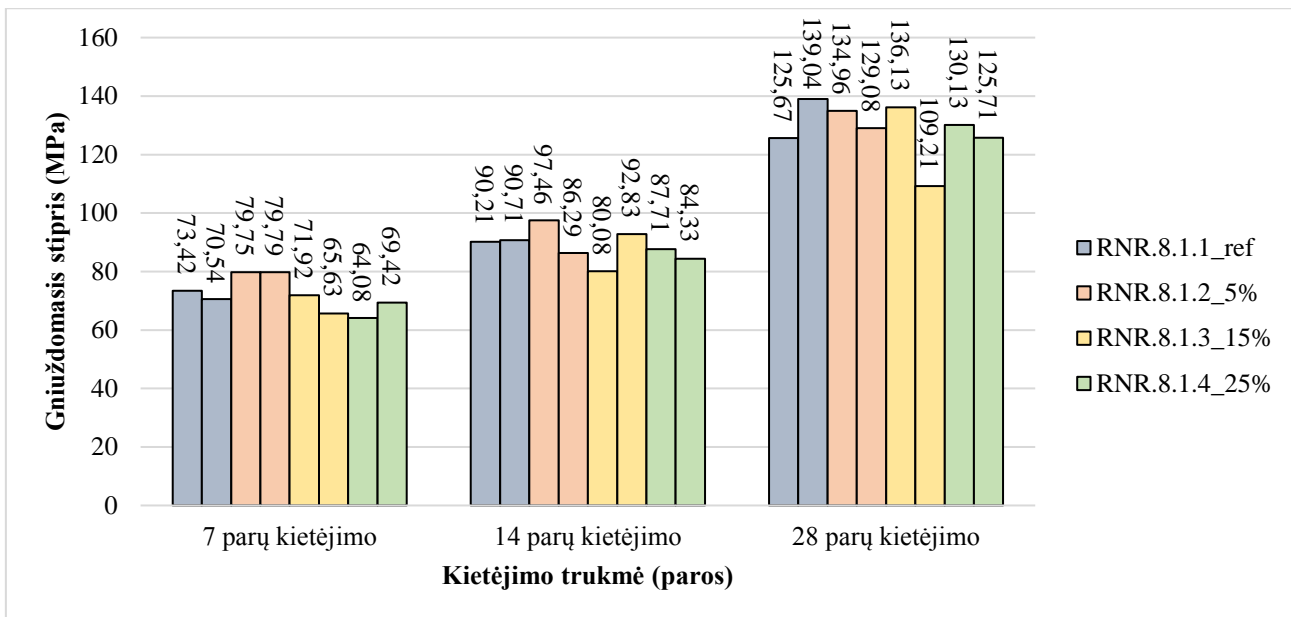
Atliekami gniuždomojo ir lenkiamojo stiprumo nustatymo bandymai.



3.9.4. pav. Bandinių su metalo atliekų dulkėmis tankis, kg/m³.



3.9.5. pav. Lenkiamasis stipris bandiniu su metalų atliekų dulkėmis, MPa.



3.9.6. pav. Gniuždomasis stipris bandinių su metalų atliekų dulkėmis, MPa.

Atsižvelgiant į gautus lenkiamojo stiprumo rezultatus, prieinama prie išvados, kad antrinės metalų atliekos panaudojimas duoda teigiamą poveikį betono stiprumui. Tikėtina, kad šios atliekos ypač stipriajame betone veikia kaip armatūra. Gniuždomajam stiprumui didelio poveikio metalų atliekos panaudojimas nesuteikė. Bandinys „RNR.8.1.1\_ref“, kurio sudėtyje nebuvo metalo priemaišų, atlaikė didžiausią gniuždomąjį spaudimą.

### 3.10. Ypač stipraus betono kainos palyginimas su rinkoje esama produkcija

Gautas ypač stipraus betono bandinių gniuždomasis stiprumas po 28 parų kietėjimo siekė iki 139 MPa. Komerciniam naudojimui skirtu mišinio, bei mišinių, naudojant alternatyvines sudėtis, gniuždomieji stiprumai buvo artimi, stiprumo reikšmės svyravo tarp 110-135 MPa. Sudaromas visų naudotų komponentų ekonominis palyginimas.

3.9 lentelė. Naudotų medžiagų kainos Lietuvoje ir Pasulyje.

Medžiagos pavadinimas	Kaina €/tona,	Kaina €/tona,
	Remiantis teorine analize	Remiantis rinkos duomenimis
Cementas	81-220	114,28
Silicio mikrodulkės	308-968	305
Maltas stiklas	79-317	78,79
Kvarcinis smėlis	106-485	148
Sauso pavidalo plastiklis	13-20	1500
Vanduo	0	0
Mišinys "X"	176-1500	2000
Geležies dulkės	500-1320	0

Pastabos:

- Laikome, kad vandens kaina nevertinama.
- Komercinės paskirties mišinio kaina preliminari, tiksli informacija neatskleidžiama.
- Eksperimento metu naudotos metalo atliekos savikainos neturi, medžiaga gauta nemokamai. Kainos nustatymui naudosime mažiausią teorinės analizės vertę.

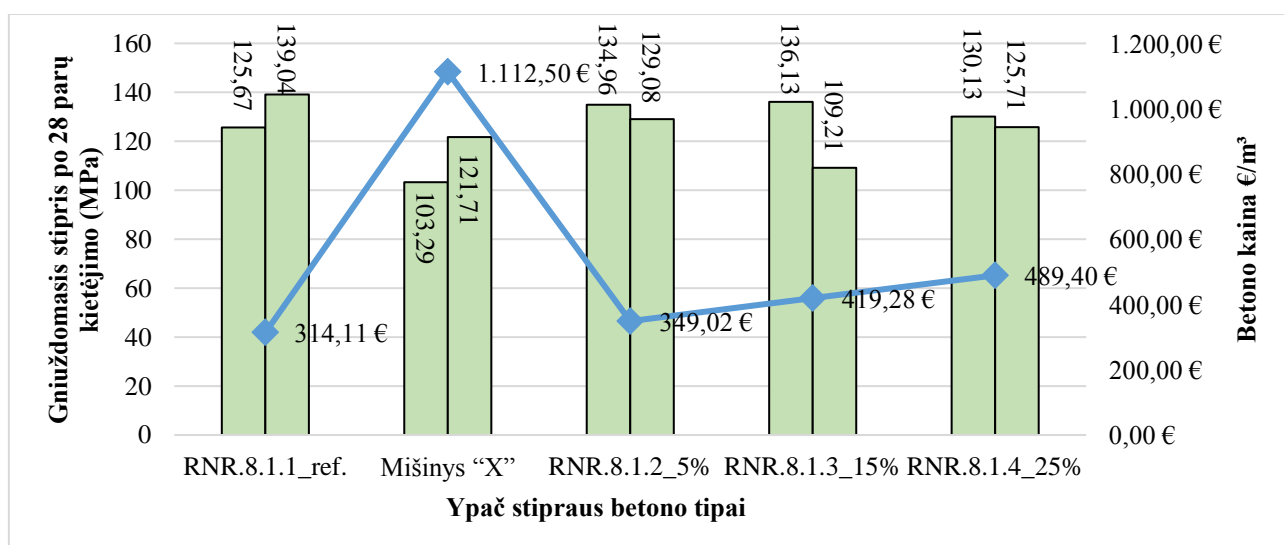
Duomenis apie medžiagų kainas pasaulyje ir Lietuvoje priimame atsižvelgdami į skelbimuose nurodytas kainas, bei remdamiesi didmeninių prekybos tinklų duomenimis. Atsižvelgus į anksčiau prognozuotą ypač stipraus betono kainą, kuri svyruoja nuo 500 iki 700 eurų už kubinį metrą, lyginame su eksperimento metu daryto betono medžiagų kaina.

Žemiau pateikiama lentelė, kurioje įvertintos kainos eksperimento metu naudotu medžiagu, iš kurių buvo gaminamas ypač stiprus betonas. Medžiagų kainos priimamos atsižvelgiant į Lietuvos didmeninės prekybos duomenis. Metalų atliekų kaina priimama mažiausiai nustatyta geležies dulkių pasaulinės rinkos kainai.

3.10 lentelė. Naudotų mišinių sudėties kaina vienam kubiniam metrui ypač stipraus betono pagaminti.

Medžiagos pavadinimas	Kaina €/tona, Remiantis rinkos duomenimis	Naudotos medžiagos (kg.)				
		RNR.8.1.1_ref.	Mišinys "X"	RNR.8.1.2_5%	RNR.8.1.3_15%	RNR.8.1.4_25%
Cementas	114,28	84,00 €		84,00 €	84,00 €	84,00 €
Silicio mikrodulkės	305	30,20 €		30,20 €	30,20 €	30,20 €
Maltas stiklas	78,79	32,46 €		32,46 €	32,46 €	32,46 €
Kvarcinis smėlis	148	142,38 €		135,26 €	121,02 €	106,78 €
Sauso pavidalo plastiklis	1500	25,08 €		25,08 €	25,08 €	25,08 €
Vanduo	0	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Mišinys "X"	2000	0,00 €	4.450,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Geležies dulkės	500	0,00 €		42,03 €	126,53 €	210,89 €
<b>Suma:</b>		<b>314,11 €</b>	<b>4.450,00 €</b>	<b>349,02 €</b>	<b>419,28 €</b>	<b>489,40 €</b>

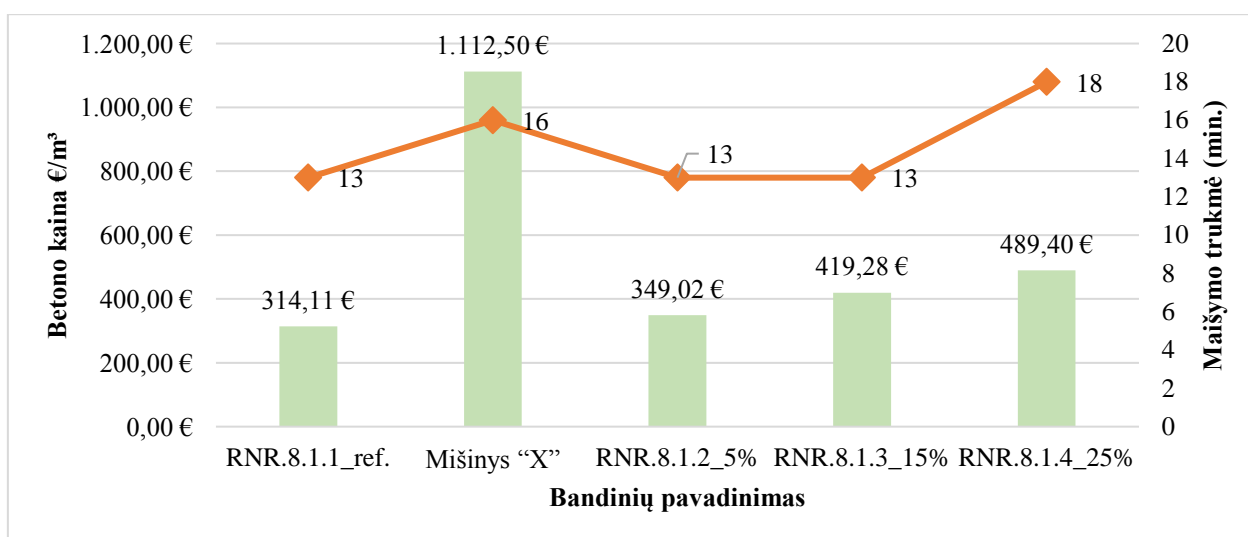
Gauta ypatingai stipraus betono kaina naudojant tik sausus komponentus ir nenaudojant metalo atliekos siekia 314 €. Lyginant su bandiniais, kurių sudėtyje buvo naudojamos metalo atliekų dulkės, sauso mišinio betonai yra pigesni bei sąlyginai stipresni.



3.10.1. pav. Ypač stipraus betono kainos bei gniuždomojo stiprumo palyginimas.

Atsižvelgdami į lentelės duomenis matome, kad NR.8.1 formulės betonas, kuris buvo gamintas naudojant sausus komponentus ir be jokių metalo atliekų dulkių priemaišų, pasižymi didžiausiu gniuždymo stiprumu, bei mažiausia mažiausią kainą lyginant su betonu, kurio sudėtyje buvo naudojamos metalų atliekų dulkės. Komerciniams tikslams naudojamo mišinio „X“ kaina preliminari. Naudojant metalų atliekų dulkes gaunamas didesnio tankio betonas, tačiau pačios metalų dulkės pasižymi didesne kaina nei pagrindiniame mišinyje naudoto kvarcinio smėlio.

Tikslingas metalų dulkių panaudojimas šiame betone būti siekiant pagaminti didelio tankio betoną. Tačiau metalų dulkių naudojimas betone nėra pilnai ištirtas. Nėra aišku, kaip šis betonas reaguotų į magnetinius poveikius bei kokių mastu pasireikštų korozija betone.



3.10.2. pav. Laboratorinėmis sąlygomis maišyto betono maišymo trukmės ir šio betono kainos palyginimas

Lygindami betono kainą ir atitinkamo betono maišymo trukmę, galime matyti, kad gaminant ypač stiprųjį betoną be papildomo metalo dulkių kiekio, betoną išmaišome per 13 minučių. Pridėtinis metalo atliekos kiekis padidina mišinio tankį ir tuo pačiu reikalauja daugiau energijos bei laiko norint išmaišyti šį betoną.

Maišymai vyko laboratorijoje, todėl tik proporcingai galime daryti prielaidą, kad maišymas betono pramoniniu būdu, arba betono maišymas statybos aikštelėje truktų panašų laikotarpį. Komercinės paskirties „Mišinys „X““ buvo maišomas pagal NR.8.1 maišymo seką. Tikėtina, kad komercinės paskirties mišinio maišymo laikas gali keistis, maišant jį pagal gamintojo nurodymus.

## Išvados

1. Bandymų metu buvo pagaminti sauso gamybos būdo, naudojant tik birias medžiagas, ypač stipraus betono mišiniai. Viso buvo pagaminta 16 skirtingų mišinių tipų, kuriu visų bendras išskirtinumas iš kitų ypač stipraus betono mišinių – naudotas sauso pavidalo, miltelinis superplastiklis. Nustatytas šio miltelinio pavidalo superplastiklio efektyvumas bandymų metu.
2. Atlikus paviršinio šaldymo ir atšildymo bandymą, nustatytas betono masės praradimas neviršija  $100 \text{ g/m}^2$ . Skaičiuojant masės praradimą nuo bandinio prizmės tūrio, bandiniai, po 60 šaldymo ir šildymo ciklų, prarado iki 0,5% savo masės. Apskaičiuotas šalčio atsparumo kriterijus  $K_s = 85$ , betonas yra atsparus šalčio poveikiui.
3. Nustatytas didžiausias ypač stipraus betono gniuždomasis stipris  $139,04 \text{ MPa}$ , didžiausias lenkiamasis stipris  $16,01 \text{ MPa}$ . Šios lenkiamojo ir gniuždomojo stiprumo reikšmės yra ypač stipraus betono mišinio, kurio sudėtyje nebuvo naudojamos metalų atliekų dulkės. Nustatytas šio betono pilnas poringumas yra 10,01 %.
4. Eksperimento laiku maišytuose ypač stipraus betono mišinių sudėtyje naudotos draugiškos aplinkai malto stiklo dulkės. Jos yra perdirbta atlieka iš išmesto nenaudojamo stiklo, yra švari bei hidratacijos metu neišskiria kenksmingo anglies dvideginio ( $\text{CO}_2$ ). Taip pat naudojamos metalų atliekų dulkės, kurios didina betono tūrį. Tikėtina, kad kvarcinis smėlis gali būti keičiamas ir į analogiškos frakcijos antrinį mirko užpildą.
5. Ekonominis palyginimas. Atliktas ypač stipraus betono mišinio kainos palyginimas su rinkoje parduodamais analogiškais mišiniais, bei analogiško betono tipo, kitų mokslininkų sukurtais mišiniais. Rinkoje ypač stipraus betono mišinių kaina siekia iki  $500 \text{ eur/m}^3$  priklausomai nuo šio betono sudėties, naudojamų plastiklių ir fibrų. Eksperimento metu pagaminto betono medžiagų kaina yra  $314,11 \text{ eur/m}^3$ . Į kaina neįskaičiuotas mechanizmų darbas maišant bei formuojant šį betoną. Betono maišymo trukmė analogiška moksliniuose darbuose bei tyrimų medžiagose aprašytiems ypač stipraus betono mišiniams.

## Literatūros sąrašas

ACI 211.1-91, 2002. ACI Committee 211, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1. American Concrete Institute, USA., ISBN-13: 978-9992130896.

Aïtcin Pierre-Claude. Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. *Cement and Concrete research*, 2000, 30.9: 1349-1359.

Als Salman A., Dang C. N., Hale W. M. Development of ultra-high performance concrete with locally available materials. *Construction and Building Materials*, 2017, 133: 135-145.

Arafa, M., Shihada, S. ir Karmout, M., 2010. Mechanical properties of ultra high performance concrete produced in the Gaza Strip. *Asian Journal of Materials Science* [interaktyvus]. 2(1), 1-12 [žiūrėta 2018-05-12]. ISSN 1996-3394. Prieiga per: <http://docsdrive.com/pdfs/knowledgia/ajmskr/2010/1-12.pdf>

Azmee N. M., Shafiq N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. *Case Studies in Construction Materials*, 2018, 9: e00197.

Bei S., Zhixiang L. Investigation on spalling resistance of ultra-high-strength concrete under rapid heating and rapid cooling. *Case Studies in Construction Materials*, 2016, 4: 146-153.

BS-EN-196-1. Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. British Standards Institution-BSI and CEN European Committee for Standardization; 2005.

Camões A., Ferreira.R. M., 2010. Technological evolution of concrete: from ancient times to ultra high-performance concrete. Department of Civil Engineering, University of Minho, Portugal. 8p.

Chan S. Y., Peng G. F., Chan J. K. Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature. *Materials and Structures*, 1996, 29.10: 616.

Dong Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 414-425.

EN, B. S. 1-2: 2004 Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules-Structural fire design. European Standards, London, 2004.

Fehling E. et al. *Ultra-high performance concrete UHPC: Fundamentals, design, examples*. John Wiley & Sons, 2014.

Fehling E., Schmidt M., Stürwald S. Ultra High Performance Concrete (UHPC): Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008. kassel university press GmbH, 2008.

Geisenhansluke C., Schmidt M. Methods for modeling and calculation of high density packing for cement and filler in UHPC. In: *Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, Kassel, Germany. 2004. p. 303-312.

Greg Holdbrook. Amerikos statybos inžinierių sąjunga [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-11]. Prieiga per internetą <http://www.asce-pgh.org/Blog/4468471>

Yang I. H., Joh C., Kim B. S. Flexural strength of ultra high strength concrete beams reinforced with steel fibers. *Procedia engineering*, 2011, 14: 793-796.

Yu R., Spiesz P., Brouwers H. J. H. Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*, 2015, 55: 383-394.

Kaklauskas G., Bačinskas D., Gribniak V., Jakubovskis R., Ulbinas D., Gudonis E. ir Sokolov, A., 2012. *Kompozitais armuotos betoninės konstrukcijos*. Vilnius, Technika. ISBN 978-609-457-349-1.

Мещерин, В. 2008. Высокопрочные и сверхпрочные бетоны: технологии производства и сферы применения. Статья в журнале *СтройПРОФИЛЬ №8(70)*.

Nishant R., Abhishek T., Alok K. S., 2016. High performance Concrete and its Applications in the Field of Civil Engineering Construction. Department of civil Engineering, JP Institute of Engineering & Technology, Meerut, Uttar Pradesh, India. 4p.

Park Jong-Sup, et al. Early-age strength of ultra-high performance concrete in various curing conditions. *Materials*, 2015, 8.8: 5537-5553.

Pasaulinė pardavimų sistema [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-06]. Prieiga per internetą: <https://www.alibaba.com/showroom/glass-powder-price.html>

Perry, V. „Ductal® -A Revolutionary New Material for New Solutions“. Association of Professional Engineers and Geoscientists of the Province of Manitoba (APEGM), 2006.

Portlandcemenčio asociacija. Jungtinės Amerikos Valstijos [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-05]. Prieiga per internetą: <http://www2.cement.org/exec2/09-26-11.htm>

Richard P. Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*, 1995, 25.7: 1501-1511.

Russell Henry G., Graybeal B. A. Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community. 2013.

Sakata-Marai tiltas, Japonija [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-05]. Prieiga per internetą: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/006.cfm>

Shao Y. et al. Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30.1: 91-100.

Soliman N. A., Tagnit-Hamou, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder–Towards ecofriendly concrete. *Construction and building materials*, 2016, 125: 600-612.

Sudholt-wasemann grupė [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-07]. Prieiga per internetą <https://www.sudholt-wasemann.de>

Šerelis E. et al. Influence of Water to Cement Ratio with Different amount of Binder on properties of Ultra-high Performance Concrete. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*, 2015, 10.1: 78-86.

Šerelis E. „Ypatingai stipraus betono ilgaamžiškumas“ Magistro baigiamasis darbas. Kaunas 2011

Tang M. C. 2004. Chairman of the Board and Technical Director TY Lin International San Francisco, USA. In *Ultra High Performance Concrete (UHPC): Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, September 13-15, 2004 (No. 3, p. 3). Kassel University Press.

Terzijski I. Compatibility of components of high and ultra high performance concrete. In: *Proceedings of the 1st International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany*. 2004. p. 175-186.

UAB Seifuva. Seifų gamintojas [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-11]. Prieiga per internetą <http://www.seifuva.lt>

Ultra high performance concrete [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-11]. Prieiga per internetą <http://hhbc-consulting.blogspot.com/>

Ultragarso dispergatoriaus Bandelin techniniai duomenys [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-12-12] Prieiga per internetą:  
<[http://bandelin.com/prospekte/Laboratory\\_brochure\\_GB\\_BANDELIN.pdf](http://bandelin.com/prospekte/Laboratory_brochure_GB_BANDELIN.pdf)>

Vadlūga R. ir Pukelis P., 2001. Gelžbetoninių konstrukcijų tyrimai Lietuvoje praėjusiame amžiuje. The 7th International Conference, May 16-18, 2001. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas.

Vaitkevičius V., Šerelis E., Hilbig H. The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 102-109.

Vogt C., Lagerblad B., Hugo-Persson T. Optimization of UHPC for selective stabilization of deep boreholes. *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, 2004, 769.

Wille K., Boisvert-Cotulio C. Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 2015, 86: 33-43.



Xiong M. X., Liew J. R. Mechanical behaviour of ultra-high strength concrete at elevated temperatures and fire resistance of ultra-high strength concrete filled steel tubes. *Materials and Design*, 2016, 104: 414-427.