



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Organinės kilmės korozijos inhibitorių įtaka gelžbetonio ilgaamžiškumui bei mechaninėms savybėms

Baigiamasis magistro projektas

Lukas Bendaravičius

Projekto autorius

Doc. Ignacio Villalon Fornes

Vadovas

Prof. Danutė Vaičiukynienė

Konsultantė

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Organinės kilmės korozijos inhibitorių įtaka gelžbetonio ilgaamžiškumui bei mechaninėms savybėms

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6121EX008)

Lukas Bendaravičius

Projekto autorius

Doc. Ignacio Villalon Fornes

Vadovas

Prof. Danutė Vaičiukynienė

Konsultantė

Doc. Ernestas Ivanauskas

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Lukas Bendaravičius

Organinės kilmės korozijos inhibitorių įtaka gelžbetonio ilgaamžiškumui bei mechaninėms savybėms

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Lukas Bendaravičius

Patvirtinta elektroniniu būdu



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
STATYBOS IR ARCHITEKTŪROS FAKULTETAS**

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studijų programa: Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija	
Baigiamojo projekto tema (tematika, lietuvių k.): Specialios sudėties betonas apsaugantis plieninę armatūrą nuo korozijos	
Baigiamojo projekto tema patvirtinta dekanų potvarkiu Nr.: V25-09-35 (2025-12-01)	
(lietuvių k.): Organinės kilmės korozijos inhibitorių įtaka gelžbetonio ilgaamžiškumui bei mechaninėms savybėms	
(anglų k.): Influence of Organic Corrosion Inhibitors on the Durability and Mechanical Properties of Reinforced Concrete	
Pradiniai duomenys darbui: Nėra.	
Kita papildoma su užduotimi susijusi informacija (pagal poreikį): Nėra.	
Atlikti:	Baigiamojo projekto dalys:
☒	Įvadas
☒	Literatūros apžvalga
☒	Metodologija
☒	Eksperimentiniai tyrimai
☐	Analitiniai tyrimai
☐	Skaitiniai tyrimai
☐	Ekonominė dalis
☒	Išvados
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo suderinimas su baigiamojo darbo vadovu:	
☐	Leidžiama
☒	Draudžiama
Generatyvinio dirbtinio intelekto (GDI) naudojimo sąlygos (jei leidžiama), laikantis Universitete nustatytos GDI etiško naudojimo tvarkos:	
Konsultacijų laikas (su vadovu ir/ar konsultantu suderintas kas savaitinis konsultacijų laikas, kuris įvedamas į AIS, nurodant studento vidinį vidko kodą):	

Vadovas:	doc. Ignacio Villalon Fornes
(indėlis 100 %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Konsultantas:	prof. Danutė Vaičiukynienė
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Socialinis partneris:	
(indėlis _____ %)	<i>pareigos, vardas, pavardė</i> <i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>
Studentas:	Lukas Bendaravičius
	<i>vardas, pavardė</i>
	<i>Patvirtinta elektroniniu būdu</i>

Bendaravičius, Lukas. Organinės kilmės korozijos inhibitorių įtaka gelžbetonio ilgaamžiškumui bei mechaninėms savybėms. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Ignacio Villalon Fornes; Kauno technologijos universitetas, Statybos ir architektūros fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: natrio benzoatas, apelsinų žievelių ekstraktas, organinis korozijos inhibitorius, korozija, mechaninės savybės.

Kaunas, 2026. 60 p.

Santrauka

Magistro baigiamojo projekto tikslas yra ištirti apelsinų žievelių ekstrakto ir natrio benzoato efektyvumą slopinant chloridų sukeltą koroziją bei jų įtaką betono mechaninėms savybėms. Darbas skirstomas į tris dalis: mokslinės literatūros analizė, fizikinių, mechaninių bei korozijos savybių bandymai (eksperimentinė dalis) ir rezultatų analizė.

Šio tyrimo metu buvo atlikta dešimt bandymų tiriančių įvairias betono savybes. Ištirta inhibitorių koncentracijos įtaka betono hidratacijai, tankiui, gniuždomajam, lenkiamajam ir praspaudimo stipriui, chloridų difuzijai, mineralinei sudėčiai ir mikrostruktūrai.

Nustatyta, kad natrio benzoatas beveik neturi įtakos cemento hidratacijai, didėjant koncentracijai hidratacija nežymiai lėtėja. Optimaliausia natrio benzoato koncentracija yra 0,5 %, su kuria pasiekiamas nežymus gniuždomojo ir praspaudimo stiprio padidėjimas, o didesnės koncentracijos lemia stiprio mažėjimą. Natrio benzoato bandinių chloridų difuzijos ir potenciometrinių tyrimų rezultatai neparodė aiškių tendencijų.

Apelsinų žievelių ekstraktas turėjo didesnę poveikį hidratacijai, koncentracijai didėjant hidratacija žymiai lėtėjo, o esant 3 % ir 5 % koncentracijai – neįvyko. 0,5 % ekstrakto koncentracija buvo optimaliausia – pasiektas didžiausias gniuždomasis, lenkiamasis ir praspaudimo stipris, reikšmingai sulėtinta chloridų difuzija bei nustatyta tankesnė betono mikrostruktūra. XRD ir SEM tyrimai patvirtino padidėjusį etringito kiekį ir sutankėjusią mikrostruktūrą. Didesnė nei 0,5 % ekstrakto koncentracija neigiamai veikė betono struktūrą, stiprį ir ilgaamžiškumą.

Nustatyta, kad 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktas yra optimaliausias inhibitorius chloridų sukeltos korozijos mažinimui be neigiamos įtakos betono mechaninėms savybėms. Šio inhibitoriaus naudojimas gali sumažinti vandens telkinių taršą dėl sintetinių korozijos inhibitorių naudojimo bei sukurti būdą pakartotinai panaudoti augalų atliekas.

Bendaravičius, Lukas. Influence of Organic Corrosion Inhibitors on the Durability and Mechanical Properties of Reinforced Concrete. Master's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Dr. Ignacio Villalon Fornes; Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: sodium benzoate, orange peel extract, organic corrosion inhibitor, corrosion, mechanical properties.

Kaunas, 2026. 60 p.

Summary

The aim of master's final degree project is to investigate orange peel extract and sodium benzoate corrosion inhibition efficiency and evaluate their influence on mechanical properties of concrete. The research is divided into three parts: analysis of scientific literature, experimental analysis of physical, mechanical and corrosion-related properties and analysis of the results.

During this study, ten different tests were carried out to evaluate various concrete properties. The influence of inhibitor concentration on cement hydration, density, compressive, flexural and punching strength, chloride diffusion, mineral composition and microstructure was investigated.

The results displayed that sodium benzoate had little effect on cement hydration; with increasing concentration, hydration became slightly slower. The optimal sodium benzoate concentration was found to be 0,5 % at which a slight increase in compressive and punching strength was observed, while higher concentration led to reduction in strength. The results of chloride diffusion and potentiometric corrosion tests for sodium benzoate did not reveal any clear trends.

Orange peel extract exhibited a significantly stronger effect on cement hydration. With increasing extract concentration, hydration was greatly delayed, and at concentrations of 3% and 5% hydration did not happen. A concentration of 0.5% was determined as optimal, resulting in the highest compressive, flexural and punching strength, a significant reduction in chloride diffusion and a denser microstructure. XRD and SEM tests confirmed an increase of ettringite and more compact microstructure. Extract concentration higher than 0,5% negatively affected the concrete structure, strength and durability.

It was concluded that a 0,5% concentration of orange peel extract is most effective inhibitor for reducing chloride-induced corrosion without negatively affecting concrete mechanical properties. The use of this inhibitor has a potential to reduce water pollution caused by synthetic corrosion inhibitors and to provide a method for the reuse of plant-based waste.

Turinys

Lentelių sąrašas	10
Paveikslų sąrašas	11
Įvadas.....	13
1. Literatūros analizė.....	14
1.1. Armatūros korozija	14
1.2. Korozijos rūšys	15
1.3. Korozijos inhibitoriai.....	16
1.3.1. Sintetiniai korozijos inhibitoriai	18
1.3.2. Organiniai korozijos inhibitoriai	18
1.4. Augalų ekstraktų gamybos būdai	19
1.4.1. Maceracija	19
1.4.2. Ekstrakcija naudojant mikrobangas.....	20
1.4.3. Soxhlet ekstrakcija.....	20
1.4.4. Augalinių ekstraktų inhibitorių rūšys	20
1.5. Cukraus poveikis betonui	27
1.6. Cukraus kiekis apelsinų žievelėse	28
1.7. Literatūros apžvalgos išvados.....	28
2. Tyrimų medžiagos ir metodologija	29
2.1. Medžiagos.....	29
2.1.1. Portlancementis	29
2.1.2. Smėlis	29
2.1.3. Vanduo	29
2.1.4. Plieninė armatūra.....	29
2.1.5. Natrio benzoatas	29
2.1.6. Apelsinų žievelių ekstraktas	30
2.2. Tyrimų metodai	33
2.2.1. Bandinių gamyba.....	33
2.2.2. Tankio nustatymas.....	35
2.2.3. Lenkiamojo stiprio nustatymas.....	35
2.2.4. Gniuždomojo stiprio tyrimas	36
2.2.5. Cemento hidratacijos tyrimas	37
2.2.6. Betono pasklidimo-slankumo tyrimas	38
2.2.7. Chloridų difuzijos tyrimas.....	38
2.2.8. Potenciometrinis korozijos tyrimas	39
2.2.9. XRD tyrimas.....	40
2.2.10. SEM mikroskopijos tyrimas	40
2.2.11. Betono praspaudimo stiprio tyrimas.....	40
3. Rezultatai.....	42
3.1. Cemento hidratacija.....	42
3.1.1. Apelsinų žievelių ekstrakcijos efektyvumas	43
3.2. Fizikinės-mechaninės savybės.....	44
3.2.1. Tankis	44
3.2.2. Gniuždomasis stipris	45
3.2.3. Lenkiamasis stipris	46

3.2.4. Betono pasklidimas - slankumas	47
3.2.5. Chloridų difuzija.....	48
3.2.6. Korozijos inhibitorių efektyvumas	49
3.2.7. Potenciometrinis korozijos tyrimas	50
3.2.8. XRD tyrimas.....	51
3.2.9. SEM mikroskopijos tyrimas	52
3.2.10. Betono praspaudimo stiprio tyrimas.....	53
Išvados	56
Priedai.....	61

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Korozijos tikimybė pagal Stratful kriterijų [31, 32]	23
2 lentelė. Inhibitorių dozavimas skirtingiems bandiniams [34]	26
3 lentelė. Portlandcemenčio eksploatacinės savybės	29
4 lentelė. Nagrinėjamų mišinių sudėtys	34
5 lentelė. Plieno betone galimos korozijos kriterijai, naudojant įvairius standartinius elektrodus ...	40
6 lentelė. Bandinių, su natrio benzoatu, hidratacijos temperatūros ir laikai	42
7 lentelė. Bandinių, su apelsinų žievelių ekstraktu, hidratacijos temperatūros ir laikai	42

Paveikslų sąrašas

1 pav. Korozijos proceso iliustracija [4]	14
2 pav. Korozijos rūšys [11]	15
3 pav. Korozijos inhibitorių klasifikacija [5]	16
4 pav. Korozijos inhibitoriaus įtaka konstrukcijos tarnavimo laikui [1].....	17
5 pav. Ekstrakcijos procesas naudojant mikrobangas [23]	20
6 pav. Kokosų plaušo ekstrakto koncentracijos įtaka armatūros korozijos greičiui[27].....	21
7 pav. Granatų žievelių ekstrakto koncentracijos įtaka armatūros svorio pokyčiui [28].....	22
8 pav. Betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos [29]	23
9 pav. Korozijos potencialo priklausomybė nuo tyrimo trukmės [31].....	24
10 pav. Bandinio paruošimas korozijos tyrimui [33].....	25
11 pav. Korozijos greičio priklausomybė nuo drėkinimo-džiūvimo ciklų skaičiaus.....	25
12 pav. Betono gniuždomieji stipriai skirtingiems bandiniams [34]	26
13 pav. Cukraus koncentracijos įtaka betono kietėjimo laikui [35].....	27
14 pav. Cukraus koncentracijos įtaka betono gniuždomajam stipriui [35].....	28
15 pav. Natrio benzoatas	30
16 pav. Apelsinų žievelių ekstrakto gamyba maceracijos būdu	32
17 pav. Bandinių gamybos žingsniai	33
18 pav. Apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos	33
19 pav. Bandinio svorio nustatymas	35
20 pav. Betono lenkiamojo stiprio tyrimas	36
21 pav. Betono gniuždomojo stiprio tyrimas	37
22 pav. Betono slankumo tyrimas	38
23 pav. Chloridų difuzijos tyrimas [51]	39
24 pav. Chloridų įsiskverbimas į bandinį.....	39
25 pav. <i>Elcometer 331</i> potencialo matuoklis	40
26 pav. Praspaudimo stiprio tyrimas	41
27 pav. Suires bandinys po tyrimo	41
28 pav. Bandinių su natrio benzoatu temperatūros kitimo grafikas.....	43
29 pav. Bandinių su apelsinų žievelių ekstraktu temperatūros kitimo grafikas.....	43
30 pav. Betono tankio priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos.....	44
31 pav. Betono tankio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos.....	45
32 pav. Betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos	46
33 pav. Betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos	46
34 pav. Betono lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos	47
35 pav. Betono lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos	47
36 pav. Betono pasklidimo ir slankumo priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto priklausomybės.....	48
37 pav. Betono chloridų difuzijos koeficiento priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos	49
38 pav. Betono chloridų difuzijos koeficiento priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos.....	49
39 pav. Natrio benzoato koncentracijų efektyvumai slopinant chloridų difuziją	50
40 pav. Apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijų efektyvumai slopinant chloridų difuziją	50

41 pav. Bandinių, su natrio benzoatu, potenciometrinio tyrimo rezultatai	51
42 pav. Bandinių, su apelsinų žievelių ekstraktu, potenciometrinio tyrimo rezultatai	51
43 pav. XRD tyrimo rezultatai kontroliniam bandiniui ir bandiniui su 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktu.....	52
44 pav. Kontrolinio bandinio (kairėje) ir bandinio su 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktu (dešinėje) mikrostruktūra (x1000).....	53
45 pav. Kontrolinio bandinio (kairėje) ir bandinio su 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktu (dešinėje) mikrostruktūra (x10000).....	53
46 pav. Betono praspaudimo stiprio priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos.....	54
47 pav. Betono praspaudimo stiprio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos	54
48 pav. Bandiniai po praspaudimo stiprio tyrimo	55

Įvadas

Betonas yra pati populiariausia statybinė medžiaga pasaulyje, tačiau jos trūkumas yra tempiamasis stipris, todėl siekiant padidinti betono atsparumą tempimo jėgoms, su betonu naudojami plieninės armatūros strypai.

Betono šarminė aplinka apsaugo armatūros strypus nuo korozijos, tačiau eksploatuojant betoną ilgesnį laiko tarpą, betone esanti armatūra pradeda kontaktuoti su vis didesniu koroziją sukeliančių dalelių kiekiu, armatūroje prasideda korozija, kuri sukelia didelę žalą konstrukcijai.

Šis procesas žymiai pagreitėja eksploatuojant konstrukcijas agresyvioje aplinkoje, viena dažniausiai pasitaikančių agresyvios aplinkos rūšių yra chloridais užteršta aplinka. Siekiant sumažinti korozijos riziką gelžbetoninėse konstrukcijose eksploatuojamose agresyvioje aplinkoje yra naudojamos įvairios apsaugos priemonės: apsauginė danga tiek konstrukcijos paviršiams, tiek armatūros paviršiui bei įvairūs priedai naudojami betono mišinyje. Viena paprasčiausių ir pigiausių armatūros apsaugos nuo korozijos priemonių yra korozijos inhibitoriai.

Dėl šių priežasčių, sintetiniai korozijos inhibitoriai jau daugelį metų naudojami gelžbetoninių konstrukcijų pramonėje, tačiau dėl sintetinių korozijos inhibitorių žalos aplinkai, mokslininkai pradėjo domėtis aplinkai draugiškais organiniais korozijos inhibitoriais. Nepaisant susidomėjimo, tai yra labai nauja tyrimų kryptis statybų sektoriuje, todėl mokslinių straipsnių skaičius, tiriančių organinių korozijos inhibitorių įtaką betono ir armatūros ilgaamžiškumui bei mechaninėms savybėms, yra ribotas.

Didžiausią įtaką organinių korozijos inhibitorių tyrimų rezultatams turi inhibitoriaus koncentracija betono mišinyje. Išleistuose moksliniuose straipsniuose trūksta tikslių duomenų apie naudojamą organinio korozijos inhibitoriaus koncentraciją, todėl žymiai sumažėja tyrimų pakartotinumai.

Išsamus organinių korozijos inhibitorių tyrimas gali paskatinti statybų sektoriaus mokslininkus domėtis organiniais korozijos inhibitoriais, ypač augalų ekstraktais kaip korozijos inhibitoriais ir bandyti atkartoti atliktą tyrimą ir gautus rezultatus. Organinių korozijos inhibitorių naudojimas gelžbetoninių konstrukcijų gamyboje padėtų išspręsti daugybę tvarumo problemų, tokių kaip inhibitoriaus suirimas aplinkoje, pH lygio keitimas jūrose ir kituose vandens telkiniuose, augalų atliekų panaudojimas bei statybos sektoriaus sukeliamas tarša gamtai.

Darbo tikslas - nustatyti apelsinų žievelių ekstrakto ir natrio benzoato inhibicijos efektyvumą, korozijos greitį ir mechanines savybes, konstrukcijose eksploatuojamose chloridais užterštoje aplinkoje.

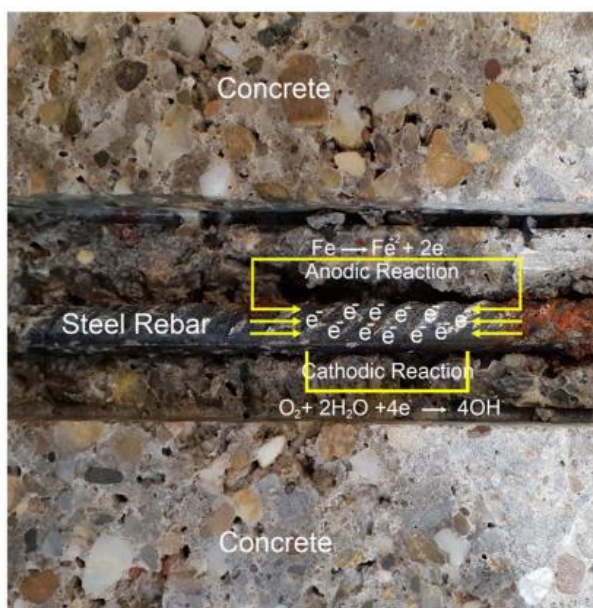
Uždaviniai:

1. Apskaičiuoti apelsinų žievelių ekstrakcijos efektyvumą, naudojant maceracijos metodą;
2. Įvertinti apelsinų žievelių ekstrakto ir natrio benzoato įtaką betono mechaninėms savybėms;
3. Nustatyti apelsinų žievelių ekstrakto ir natrio benzoato inhibicijos efektyvumą silpninant chloridų sukeliamą koroziją.

1. Literatūros analizė

1.1. Armatūros korozija

Betono hidratacijos metu susiformavusi šarminė aplinka padeda apsaugoti betonu užlietą armatūrą, skatindama jos pasyvumą. Pasyvumą skatinančios sąlygos gali silpnėti, taip naikinant armatūros apsauginį oksidų sluoksnį. Pagrindinės šio reiškinio priežastys yra chloridų koncentracija viršijanti kritinę ribą ir betono porose mažėjantis pH lygis, dėl reakcijos su anglies dioksidu [1-3]. Didelė chloridų koncentracija gali susidaryti įvairiausiais būdais, tačiau pagrindinės priežastys yra konstrukcijų kontaktavimas su jūros vandeniu arba buvimas nedideliu atstumu nuo jo bei kontaktas su druskos tirpalu, naudojamu ledo tirpinimui nuo kelių [4]. Korozijos procesas skaidomas į du pagrindinius procesus, t.y. anodinę ir katodinę reakcijas, vienos metu yra atiduodamas elektronas, kitos - jis prisijungiamas (žr. 1 pav.).



1 pav. Korozijos proceso iliustracija [4]

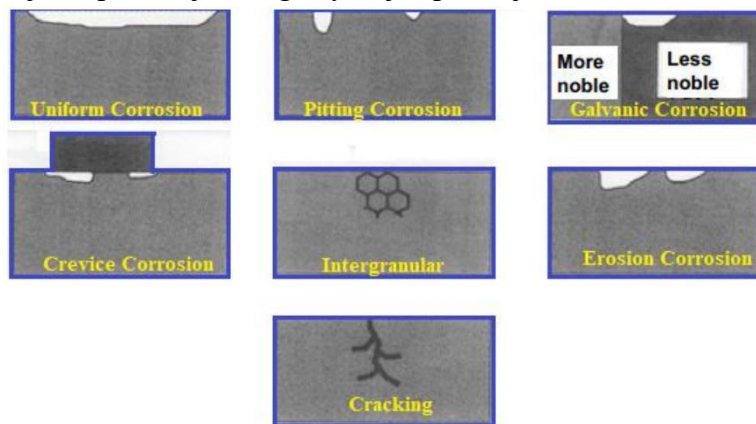
Prasidėjus korozijos procesui mažėja armatūros strypų skerspjūvis, aplink armatūrą formuojasi besiplečianti medžiaga, dėl kurios skylinėja ir trupa aplink armatūrą esantis betonas, dėl to silpnėja betono ir armatūros sukibimas bei pro plyšius armatūra kontaktuoja su vis didesniu koroziją sukeliančių dalelių kiekiu [1, 3, 5]. Siekiant išvengti armatūros korozijos turi būti užtikrintas aukštos klasės betonas, pakankama kietėjimo trukmė bei pakankamas apsauginis betono sluoksnis. Siekiant užtikrinti apsaugą nuo korozijos labai agresyvioje eksploatacijos aplinkoje arba labai ilgam eksploataavimo laikui, galima naudoti papildomas apsaugines priemones – korozijos inhibitoriai, apsauginė danga, korozijai atsparūs armatūros strypai ar katodinė apsaugos priemonė [1, 3].

Uzunōmeroğlu tyrime [6] nustatyta, kad armatūra paveikta korozijos per pirmuosius 5 metus praranda apie pusę savo laikomosios galios, o per pirmuosius 15 metų – iki 90% laikomosios galios. Apskaičiuota, kad kiekvienais metais padaroma korozijos žala siekia 2,5 tūkst. USD, tai sudaro apie 3,4% pasaulinio GVP. Pasirenkant tinkamas apsaugos nuo korozijos priemones, galima kiekvienais metais pasauliniu mastu sutaupyti apie 375-875 mlrd. USD, tai sudaro apie 15-35% visos korozijos sukeliamos žalos vertės [5, 7-10]

1.2. Korozijos rūšys

Al-amier et al. [11] ir Verma et al. [12] savo atliktose mokslinėse apžvalgose nustatė, kad korozija gali pasireikšti labai skirtingais būdais, todėl korozija skirstoma į šias rūšis (žr. 2 pav.):

- **Vientisa korozija** – tai yra dažniausiai sutinkamas korozijos tipas, kuris atsiranda tolygiai dideliame metalinio paviršiaus plote.
- **Taškinė korozija** – tai yra korozijos rūšis, kurios metu korozija įvyksta labai mažame paviršiaus plote, dėl to medžiagoje gali atsirasti „skylučių“. Tai dažniausiai įvyksta dėl medžiagoje esančių nepageidaujamų priemaišų ar aukštos chloridų koncentracijos.
- **Galvaninė koncentracija** – tai korozijos rūšis, kuri įvyksta dviejų skirtingų medžiagų kontakte, kai viena iš jų tampa anodu ir yra linkusi į koroziją, o kita tampa katodu ir yra apsaugota nuo korozijos.
- **Plyšinė korozija** – tai yra korozijos rūšis, kuri įvyksta apribotam plote, tokia kaip plyšiai ar siūlės medžiagoje, kur yra apribotas oro ir skysčių judėjimas. Dėl šios priežasties tokios vietos prisipildo korozinių medžiagų ir korozija prasideda metalinio elemento viduje.
- **Tarpkristalinė korozija** – tai yra korozijos rūšis, kuri įvyksta kristalinės medžiagos struktūros kraštuose, tokiu būdu silpninanti medžiagos struktūrą.
- **Erozinė korozija** – tai korozijos rūšis, kurios metu metalinis elementas kontaktuoja su tekančia korozine medžiaga, kuri judėdama ardo medžiagos paviršių. Ši korozijos rūšis dažniausiai įvyksta metaliniuose vamzdžiuose ir vožtuvuose.
- **Korozinis skylinėjimas** – tai korozijos rūšis, kuri įvyksta, kai medžiagoje susidaro dideli įtempiai ir ji eksploatuojama agresyvioje aplinkoje.



2 pav. Korozijos rūšys [11]

Korozijos greitį, rūšį ir panašius parametrus stipriai įtakoja poveikio klasės, įvertinančios aplinkos sąlygas, kuriose yra eksploatuojama gelžbetoninė konstrukcija. Europos standarte EN 1992-1-1, Eurokode 2 [13], yra aprašomos tokios su armatūros korozija susijusios poveikio klasės:

- **XC1-XC4 poveikio klasės** – šios poveikio klasės yra siejamos su karbonizacijos sukelia korozija. Mažiausiai pavojinga yra XC1 klasė, jai priskiriamos konstrukcijos eksploatuojamos sausoje arba nuolat drėgnoje aplinkoje, pavyzdžiui, kai konstrukcija visą laiką yra panirusi į vandenį. XC2 ir XC3 klasės yra vidutinio pavojingumo, kurioms priskiriamas konstrukcijas veikia tam tikro dydžio nuolatinė drėgmė. Pavojingiausia yra XC4 klasė, kuri nusako

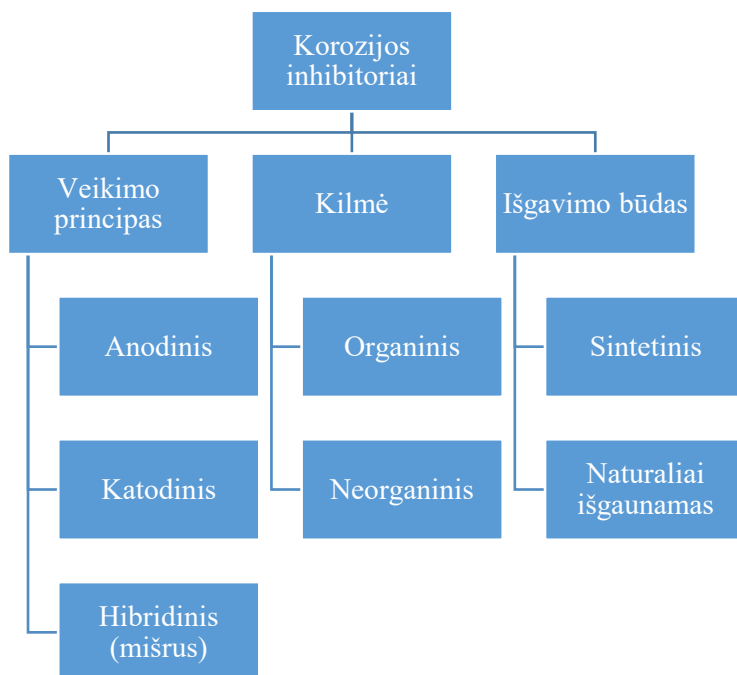
konstrukcijas periodiškai veikiamas drėgmės ir dėl šlapių/sausų ciklų turi padidintą riziką korozijos išsivystymui.

- XD1-XD3 poveikio klasės – šios poveikio klasės yra siejamos su chloridų sukeliama korozija. Mažiausiai pavojinga yra XD1 poveikio klasė, kuri yra siejama su vidutinės drėgmės aplinka, kurioje konstrukciją veikia ore esantys chloridai. XD2 klasė yra priskiriama drėgnai aplinkai, kurioje gelžbetoninius elementus veikia pramoninės nuotekos su chloridais ar baseinų vanduo. Pavojingiausia yra XD3 poveikio klasė, nes jai priskiriama periodiškai drėgna/sausa aplinka, kurioje konstrukcijas veikia pūsiai su chloridais, tai dažniausiai vyksta tiltų konstrukcijoms, arba druskos tirpalas, kuris naudojamas ledo tirpinimui nuo kelio paviršių.
- XS1-XS3 poveikio klasės – šios poveikio klasės yra siejamos su jūros vandens chloridų sukeliama korozija. Jos yra beveik identiškos XD klasėms, didžiausias skirtumas, kad konstrukcijos yra veikiamos ne paprastais chloridų tirpalais, o jūros vandens chloridais, kurie sukelia žymiai didesnę pavojų korozijai. XS1 klasės aplinkoje konstrukcijos veikiamos ore esančios druskos, XS2 aplinkoje gelžbetoniniai elementai yra visą laiką panirę į jūros vandenį, o XS3 klasė – periodinis konstrukcijos paviršių drėkinimas jūros vandeniu, tai galėtų būti potvynių ar aptaškymo zonose esančios konstrukcijos.

Iš visų išvardintų klasių ir jų aprašymų galima pastebėti, kad gelžbetoninių konstrukcijų korozijai mažiausią riziką kelia pastovios aplinkos savybės, o didžiausią poveikį sukelia periodiškai besikeičiančios aplinkos savybės.

1.3. Korozijos inhibitoriai

Zomorodian atliktoje apžvalgoje [5], teigiama, kad viena iš efektyviausių korozijos slopinimo būdų yra korozijos inhibitorių naudojimas. Korozijos inhibitorius yra medžiaga, kuri yra įmaišoma į betono mišinį, siekiant išvengti oksidacijos ar redukcijos proceso. Korozijos inhibitoriai gali būti klasifikuojami pagal įvairius kriterijus: veikimo principą, sudėtį, pagaminimo būdą (kilmę) [5].



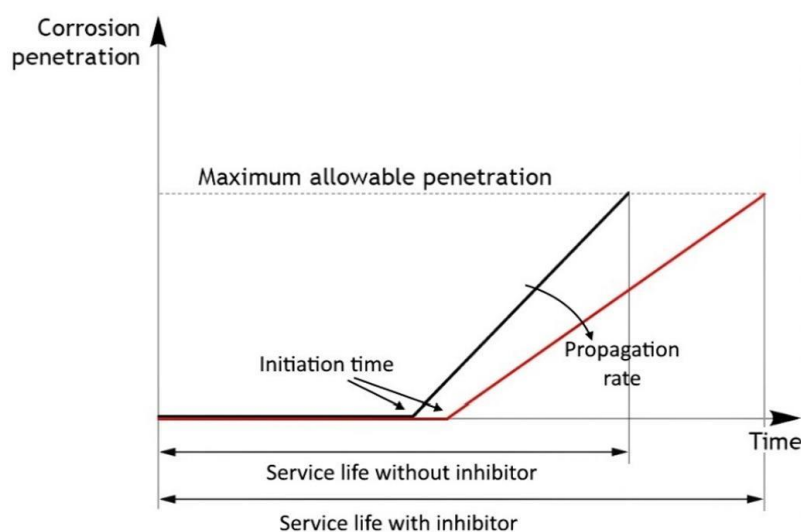
3 pav. Korozijos inhibitorių klasifikacija [5]

Remiantis 3 pav. korozijos inhibitoriai pagal veikimo principą yra skirstomi į anodinius, katodinius ir mišrius inhibitorius. Anodiniai inhibitoriai slopina anodinę reakciją naudojant 2 principus – nesant deguoniui formuoja apsauginę plėvelę sudarytą iš nitratų ar chromatų arba esant deguoniui formuoja apsauginę plėvelę sudarytą iš fosfatų ar silikatų [5, 14]. Naudojant anodinius inhibitorius būtina identifikuoti tinkamą inhibitoriaus koncentraciją, nes maža anodinio inhibitoriaus koncentracija gali paskatinti koroziją. Katodinių inhibitorių veikimo principas paremtas katodinės reakcijos slopinimu arba inhibitoriaus kaupimusi katodinėje zonoje, ribojant elektronų judėjimą iš katodo į anodą. Mišrūs (hibridiniai) inhibitoriai yra organiniai junginiai, kurie geba adsorbuotis prie metalo paviršiaus kaip apsauginė plėvelė ir slopinti tiek anodinę, tiek katodinę reakcijas. [5]

Tolimesnė korozijos inhibitorių klasifikacija yra pagal junginio sudėtį, korozijos inhibitorius gali būti sudarytas iš organinių arba neorganinių medžiagų. Kita labai svarbi korozijos inhibitorių klasifikacija yra pagaminimo būdas arba junginio kilmė. Korozijos inhibitorius gali būti išgautas sintetiniu būdu, tai reikštų, kad toks junginys gamtoje neegzistuoja arba išgautas iš gamtos - „žaliuoju“ būdu.

Sintetiniai inhibitoriai gali būti sudaryti iš daugybės skirtingų funkcinių grupių elementų, tokių kaip nitratų, aminių, karboksilatų, amidų ar heterociklatų. Organiniai inhibitoriai yra junginiai, kurie yra natūralios kilmės, turintys organinių grupių molekulių arba yra gamtoje yrantys. Dažniausiai aptinkama organinius korozijos inhibitorius sudaranti funkcinė grupė yra karboksilatai [5]

Korozijos inhibitorių naudojimas gali tiek pailginti korozijos iniciacijos laiką ir sumažinti korozijos greitį. Korozijos iniciacijos laikas pailginamas, stiprinant apsauginę plėvelę ir didinant kritinę chloridų koncentraciją, nuo kurios prasideda korozijos procesas. Korozijos greitis mažinamas slopinant katodinę arba anodinę reakcijas, taip pailginant bendrą konstrukcijos naudojimo laiką [1].



4 pav. Korozijos inhibitoriaus įtaka konstrukcijos tarnavimo laikui [1]

Tolimesniame skyriuje plačiau aptariami sintetiniai ir organiniai korozijos inhibitoriai, jų rūšys ir skirtumai.

1.3.1. Sintetiniai korozijos inhibitoriai

Statybų sektoriuje egzistuoja daugybė skirtingų korozijos inhibitorių, tačiau dažniausiai naudojami yra nitratai ir aminorai, pasižymintys efektyviu korozijos proceso slopinimu.

Nitratai

Nitratai yra dažnai naudojami kaip korozijos inhibitoriai, ypač konstrukcijose eksploatuojamose chloridais užterštoje aplinkoje. Nitratų veikimo mechanizmas paremtas chloridų jonų donorystės slopinimu, taip mažindamas armatūros jautrumą lokaliai korozijai ir padidindamas armatūros apsaugines savybes. [15]

Arda [6] nustatė, kad naudojant kalcio nitrato inhibitorių, korozijos iniciacijos trukmė padidėja 81,1%, lyginant su kontroliniu bandiniu. Papildomai prie padidinto iniciacijos laiko, taip pat buvo nustatytas ir padidėjęs betono gniuždomasis stipris. Naudojant kalcio nitratai ir plastifikatorių buvo pasiektas 21,6% didesnis gniuždomasis stipris lyginant su kontroliniu bandiniu.

Abdulsada ir Al-Mosawi [4] vykdomame tyrime nustatyta, kad per maža anodinio korozijos inhibitoriaus (kalcio nitrato) koncentracija padidina armatūros koroziją, atsparumo korozijai padidėjimas pastebėtas tik naudojant 3% kalcio nitrato nuo cemento svorio. Naudojant 3% kalcio nitrato koncentraciją buvo pasiektas 35% inhibitoriaus efektyvumas.

Aminai

Aminai yra dažnai naudojamas korozijos inhibitorius, nes jie pasižymi savybėmis, kurios leidžia judėti per poringą betono struktūrą ir pasiekus armatūrą sudaryti apsauginę hidrofobišką plėvelę apsaugančią nuo drėgmės ir chloridų. Dėl šios savybės aminų alkoholiai gali būti naudojami ne tik kaip tradicinis korozijos inhibitorius, bet gali būti ir tepamas ant esamų konstrukcijų, siekiant suremontuoti esamas konstrukcijas. Tokiu būdu naudojant aminorai, jie prasiskverbia į betono vidų, didina kritinę chloridų koncentraciją ir lėtiną koroziją sukeliančias katodines ir anodines reakcijas [5]. Nepaisant šių aminų privalumų, jie labai įtakoja betono gniuždomąjį stiprį. Zomorodian ir Söylev tyrimų [5, 16] metu nustatyta, kad net naudojant 1% aminų nuo cemento svorio dozę, betono stipris gali sumažėti daugiau nei 20%, ypač ankstyvajame betono stiprėjimo laikotarpyje.

1.3.2. Organiniai korozijos inhibitoriai

Korozijos procesas yra sudarytas iš katodinių ir anodinių reakcijų, kurioms slopinti yra naudojami atitinkamai katodiniai ir anodiniai inhibitoriai. Tiek katodiniai, tiek anodiniai korozijos inhibitoriai yra efektyvios priemonės stabdant ir lėtinant korozijos procesą gelžbetoninėse konstrukcijose, tačiau jie turi trūkumų, kuriuos gali panaikinti mišrių korozijos inhibitorių panaudojimas. Mišrių (hibridinių) inhibitorių savybėmis gali pasižymėti tik organiniai junginiai, naudojami kaip korozijos inhibitoriai, todėl siekiant geriau suprasti organinių korozijos inhibitorių privalumus, reikia aptarti katodinius ir anodinius inhibitorius bei jų trūkumus. [5]

Katodiniai inhibitoriai naudojami gelžbetoninėse konstrukcijose, aplink armatūrą sudaro apsauginį sluoksnį, sudarytą iš skirtingų medžiagų priklausomai nuo inhibitoriaus sudėties [17]. Katodiniai korozijos inhibitoriai taip pat turi ir kelis trūkumus, tokius kaip aplinkos tarša, specifinės aplinkos sąlygos siekiant aukšto efektyvumo (pH lygis ir temperatūra) bei galimas vandenilio išsiskyrimas [18]. Anodiniai inhibitoriai yra efektyvesni už katodinius, tačiau anodiniai inhibitoriai pasižymi perforacija – mažų angų sudarymu betono struktūroje [17] Šiuos inhibitorių trūkumus panaikina

mišrūs inhibitoriai, kurie pasižymi savybėmis, būdingomis tiek katodiniams, tiek anodiniams inhibitoriams.

Organiniai korozijos inhibitoriai yra skirstomi į dvi rūšis pagal jų naudojimo būdą: įmaišomi korozijos inhibitoriai, kurie naudojami betono maišymo metu, ir migruojantys korozijos inhibitoriai, kurie naudojami apsaugoti esamas gelžbetonines konstrukcijas nuo korozijos [17]. Pagrindinis migruojančių korozijos inhibitorių trūkumas yra ribotas įsiskverbimo gylis, naudojant šios rūšies inhibitorius konstrukcijose su dideliu apsauginiu sluoksniu, armatūra gali būti nepasiekta ir papildomai neapsaugota.

Zhao et al. [19] savo atliktoje apžvalgoje teigia, kad organiniai korozijos inhibitoriai pagal sudėtį skirstomi į šias rūšis:

- Alkiliniai korozijos inhibitoriai;
- Imidazolas ir jo dariniai;
- Pridinas ir jo dariniai;
- Kvinolinas ir jo dariniai;
- Natūralūs produktai (augalų ekstraktai).

Paskutiniuoju metu padidėjo susidomėjimas augalų ekstraktų panaudojimu apsaugai nuo korozijos dėl juos sudarančių aromatinių žiedų struktūros ir draugiškumo aplinkai. Organiniai korozijos inhibitoriai pasižymintys aukštu inhibicijos efektyvumu taip pat sudėtyje turi sudvigubintų jungčių tarp aromatinių žiedų ir poliarinių dalelių [19]. Šie korozijos inhibitoriai plačiau aprašomi kituose skyriuose.

1.4. Augalų ekstraktų gamybos būdai

Augalų ekstraktai yra pigiausia organinių, aplinkai draugiškų korozijos inhibitorių rūšis, nes dažniausiai yra išgaunami iš augalų atliekų. Nepaisant kainos, gaminant augalų ekstraktus panaudojamos atliekos, kurios buvo tiesiog išmetamos. Ekstraktai gali būti gaminami įvairiausiais būdais, nuo pačių paprasčiausių, kuriems nereikalinga jokia speciali įranga iki pačių sudėtingiausių, kuriems yra reikalinga specializuota cheminė įranga. Kituose poskyriuose aprašomi dažniausiai naudojami augalinių ekstraktų gamybos būdai.

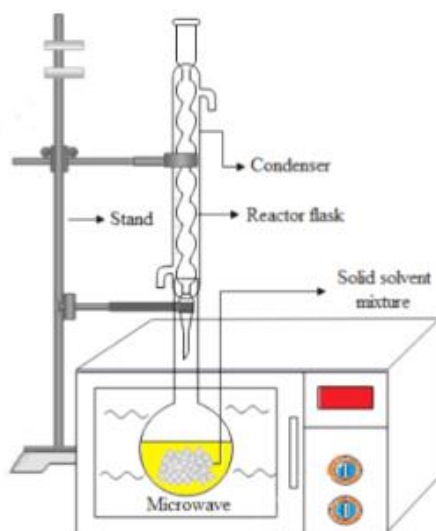
1.4.1. Maceracija

Maceracija yra pats paprasčiausias ekstrakcijos būdas, kurio metu susmulkinti augalai yra laikomi tirpiklyje kambario sąlygomis nuo 3 dienų iki savaitės. Ekstrakcijos procesui pasibaigus, ekstraktas yra perkošiamas per sietelį arba labai tankų tinklėlį. Maceracijos procesą geriausia vykdyti uždaramame inde, sumažinant tirpiklio praradimą dėl garavimo. Galiausiai tirpiklis yra išgarinamas ir atskiedžiamas vandeniu iki reikiamos koncentracijos. Pagrindiniai šio metodo trūkumai yra mažas efektyvumas ir ilga ekstrakcijos trukmė. Nepaisant šių trūkumų, suoptimizavus ekstrakcijos sąlygas, gali būti išgautas didelis kiekis įvairių junginių, esančių augaluose [20, 21].

Albuquerque et al. atliktame tyrime [22], kuriame ekstraktai buvo gaminami mikrobangų, ultragarso ir maceracijos metodais iš žemuoginio arbuto vaisių. Mikrobangų metodas parodė geriausius rezultatus, tačiau maceracijos metodas pavaizdavo beveik identišką efektyvumą prie žemesnės temperatūros, kas įtakoja žemesnę ekstrakcijos kainą.

1.4.2. Ekstrakcija naudojant mikrobangas

Tai yra modernus ekstrakcijos metodas, kurio metu ekstrakcijos proceso paspartinimui yra naudojama mikrobangų energija. Ekstrakcija, naudojant mikrobangas, yra naudojama įvairiausiose srityse, tokiose kaip farmacija, maisto pramonė ir natūralių medžiagų ekstrakcija. Šis metodas yra labai panašus yra maceraciją, nes pirmieji ekstrakcijos etapai yra vienodi, susmulkinta medžiaga yra suberiama į tirpiklį ir yra veikiamą mikrobangų, kas sparčiai pakelia tirpiklio temperatūrą ir taip padidina slėgį mišinyje (žr. 5 pav.). Slėgis padeda išgauti reikiamus junginius iš susmulkintų medžiagų. Šis ekstrakcijos būdas yra žymiai greitesnis už maceraciją, tačiau dėl aukštesnės temperatūros negali būti naudojamas visiems junginiams išgauti, dėl junginių sunaikinimo rizikos [23].



5 pav. Ekstrakcijos procesas naudojant mikrobangas [23]

1.4.3. Soxhlet ekstrakcija

Soxhlet ekstrakcija yra ekstrakcijos metodas, kurio metu yra išgaunami įvairūs junginiai, panaudojant įkaitintą tirpiklį. Susmulkinti augalai yra patalpinami porėtame maišelyje, pagamintame iš filtravimo popieriaus arba celiuliozės ir patalpinamas Soxhlet aparato skyriuje [21, 24]. Ekstrakcijai naudojamas tirpiklis, etanolis arba metanolis, yra patalpinamas apatiniam aparato skyrelyje ir kaitinamas. Kaitinamas tirpiklis pradeda garuoti, karšti garai judėdami per augalų miltelius, prisisotina tam tikrais junginiais ir pasiekus kondensatorių, kondensuojasi į ekstraktą [21]. Šiam ekstrakcijos metodui yra reikalinga specializuota įranga, tačiau jis pasižymi didesniu efektyvumu už maceraciją, yra greitesnis bei sunaudoja žymiai mažesnį tirpiklio kiekį.

Alara et al. [25] ir Rezvankhah et al. [26] atliktų tyrimų metu buvo išgaunamos riebalų rūgštys ir fenoliniai junginiai iš pramoninės kanapės sėklų, naudojant Soxhlet ekstrakcijos metodą. Riebalų rūgštys buvo išgaunamos 70 °C temperatūroje 8 valandas, o fenoliniai junginiai išgaunami naudojant 60 % koncentracijos etanolį per 2 valandas trukusį ekstrakcijos procesą.

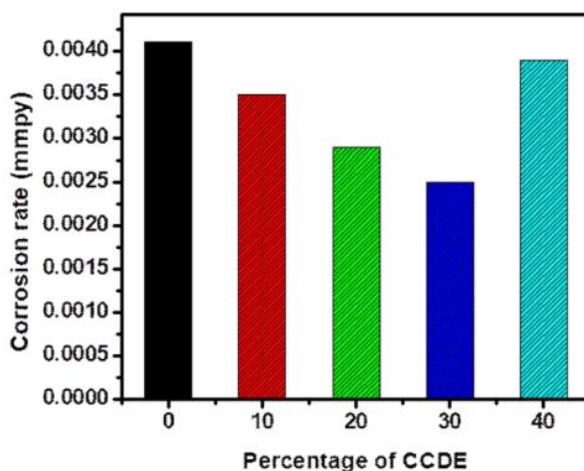
1.4.4. Augalinių ekstraktų inhibitorių rūšys

Korozijos inhibitorių tyrimus sudaro dvi didžiausios bandymų grupės: mechaninių savybių bandymai ir korozijos bandymai. Korozijos greitis ir inhibicijos efektyvumas yra pagrindiniai rezultatai, kuriuos

siekiama nustatyti tiriant korozijos inhibitorių įtaką gelžbetoninių elementų ilgaamžiškumui tam tikrose aplinkos sąlygose. Šiems dydžiams nustatyti naudojami įvairūs tyrimai, tokie kaip potenciometrinis korozijos tyrimas, svorio pokyčio tyrimas ar chloridų išsiskverbimo tyrimas. Naudojant korozijos inhibitorius gelžbetoniniuose elementuose, dažnai būna įtakojamos gaminio mechaninės savybės, tokios kaip betono gniuždomasis ir lenkiamasis stipriai. Dėl šios priežasties tiriant korozijos inhibitorių efektyvumą taip pat turėtų būti tiriamos ir šios mechaninės savybės, siekiant įvertinti korozijos inhibitoriaus tinkamumą.

Kokosų plaušų ekstraktas

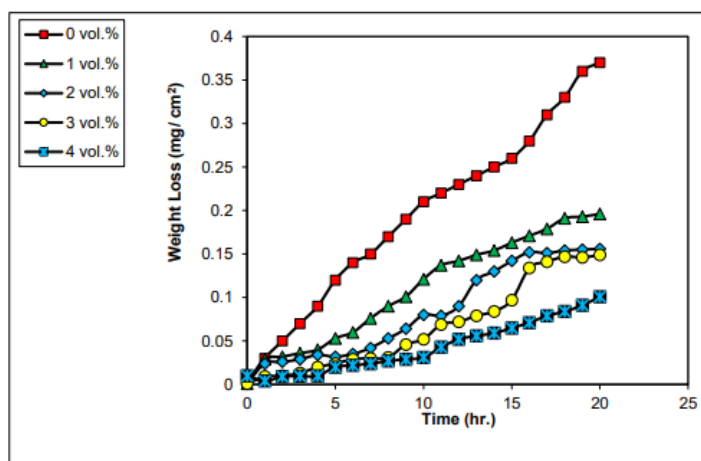
Kokosų plaušų ekstraktas, gali būti naudojamas kaip pigus ir plačiai prieinamas korozijos inhibitorius tropinio klimato šalyse, sukuriančiose didelius kiekius kokoso atliekų. Ramesh et al. [27] vykdytame tyrime buvo tiriama kokosų plaušo ekstrakto įtaka atsparumui korozijai chloridais užterštoje aplinkoje naudojant iki 40% koncentracijos inhibitorių. Siekiant nustatyti naudojamo inhibitoriaus efektyvumą, buvo atliekamas potenciometrinis korozijos tyrimas. Nustatyta, kad naudojant kokosų plaušo ekstraktą, gali būti pasiektas net 95 % inhibicijos efektyvumas, kuris pasiekiamas naudojant 30 % inhibitoriaus koncentraciją (žr. 6 pav.). Naudojant didesnę koncentraciją, korozijos greitis tampa didesnis už kontrolinio bandinio, kuriam nėra naudojamas korozijos inhibitorius. Šiam korozijos inhibitoriui, taip pat buvo tiriamas ir betono gniuždomasis stipris naudojant nuo 10 % iki 40 % koncentracijos kokoso plaušo ekstrakto. Nustatyta, kad betono gniuždomasis stipris nesumažėjo naudojant net iki 40 % koncentracijos kokoso plaušo ekstrakto. Visų bandinių reikšmės buvo didesnės, tačiau dėl gana didelės rezultatų sklaidos nepavyko nustatyti kiek gniuždomasis stipris išaugo naudojant inhibitorių.



6 pav. Kokosų plaušo ekstrakto koncentracijos įtaka armatūros korozijos greičiui[27]

Granatų žievelių ekstraktas

Salim et al. [28] vykdytame tyrime buvo tiriamas granatų žievelių ekstrakto inhibicijos efektyvumas ir korozijos greitis, naudojant iki 4 % koncentracijos inhibitorių. Šiam parametru nustatyti buvo atliekamas svorio pokyčio tyrimas, bandinį mirkant druskos tirpale (chloridais užterštoje aplinkoje). Tyrimo rezultatai pateikti 6 pav.



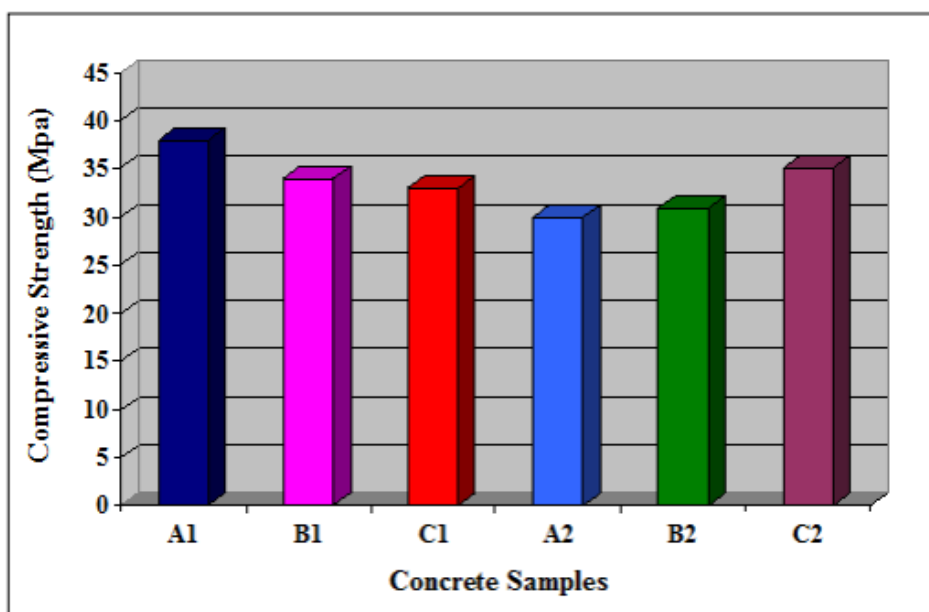
7 pav. Granatų žievelių ekstrakto koncentracijos įtaka armatūros svorio pokyčiui [28]

Nustatyta, kad mažiausias korozijos greitis pasiektas naudojant 4 % koncentracijos ekstraktą, kuris buvo apie keturis kartus mažesnis už kontrolinio bandinio (žr. 7 pav.). Naudojant 4 % koncentracijos ekstraktą, pasiektas 83,18 % inhibicijos efektyvumas [28]. Mažiausias korozijos greitis nustatytas, naudojant didžiausią ekstrakto koncentraciją, todėl siekiant nustatyti efektyviausią inhibitoriaus koncentraciją, yra reikalingi papildomi tyrimai su didesnėmis granatų žievelių ekstrakto koncentracijomis. Siekiant užtikrintai teigti, kad šis korozijos inhibitorius yra tinkamas ir efektyvus, papildomai reikėtų ištirti šio inhibitoriaus įtaką betono gniuždomajam stipriui, naudojant 1-5 % koncentracijos granatų žievelių ekstraktą.

Apelsinų žievelių ekstraktas

Apelsinų žievelių ekstraktas, kaip augalinis korozijos inhibitorius galėtų būti lengvai prieinamas didesnėje pasaulio dalyje lyginant su kokosų plaušo ekstraktu, dėl didelio populiarumo ir suvartojimo beveik visame pasaulyje. Abbas et al. [29] vykdytame tyrime buvo bandomas apelsinų žievelių ekstrakto tinkamumas korozijos greičio mažinimui. Šis parametras buvo nustatomas armatūros svorio pokyčio bandymu, naudojant 1 ir 3 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktą. Atlikus tyrimą buvo pastebėta, kad naudojant tiek 1 %, tiek 3 % koncentracijos ekstraktą, buvo pasiekti beveik identiški rezultatai, naudojant apelsinų žievelių ekstraktą kaip korozijos inhibitorių, korozijos greitis sumažėjo apie 2,5-3 kartus, lyginant su kontroliniu bandiniu. Norint užtikrintai nuspręsti, kuri apelsinų žievelių koncentracija yra labiau tinkama, gelžbetoninių konstrukcijų ilgaamžiškumui didinti, reikalingas betono gniuždomojo stiprio tyrimas, kuris nebuvo atliekamas šio tyrimo metu.

Abdulsada ir Török [30] ištyrė apelsinų žievelių ekstrakto, 1 % ir 3 % koncentracijos nuo cemento svorio įtaką betono gniuždomajam stipriui ir nustatė, kad po 28 dienų nuo bandinių išformavimo betono gniuždomasis stipris, naudojant skirtingus plastifikatorius, buvo paveikti skirtingai. Naudojant vieną plastifikatorių betono gniuždomasis stipris sumažėjo apie 10-13 % lyginant su kontroliniu bandiniu, tačiau naudojant kitą plastifikatorių ir 3 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktą buvo pasiektas 16,6 % didesnis gniuždomasis stipris, lyginant su kontroliniu bandiniu, kuriame buvo naudojamas tik plastifikatorius (žr. 8 pav.). Siekiant nustatyti konkrečiai apelsinų žievelių ekstrakto įtaką betono gniuždomajam stipriui, tyrimas turėtų būti pakartotas nenaudojant jokių papildomų betono priedų. Šiame tyrime skirtingai nei Abbas et al. [29] atliktame tyrime yra tiriama įtaka betono gniuždomajam stipriui, tačiau nėra vertinama įtaka armatūros korozijai, todėl neįmanoma palyginti tyrimų rezultatų.



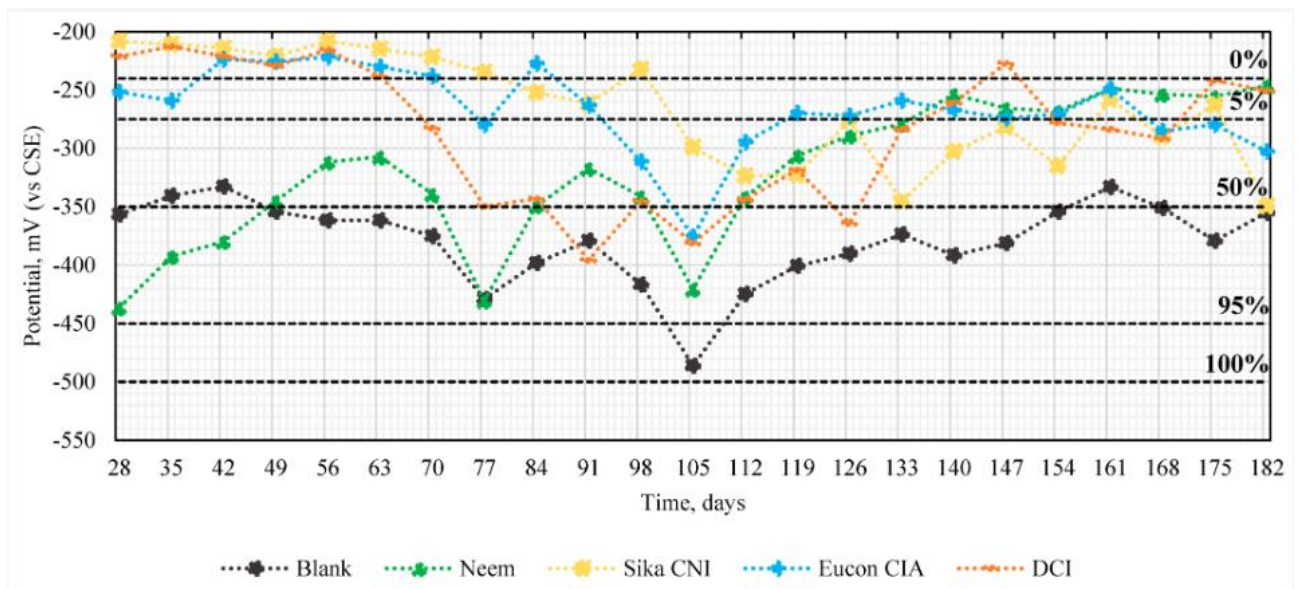
8 pav. Betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos [29]

Indiškos alyvos ekstraktas

Valdez-Salas et al. [31] vykdytame tyrime buvo tiriamas indiškios alyvos ekstrakto efektyvumas naudojant kaip korozijos inhibitorių, lyginant su neorganiniais korozijos inhibitoriais Sika SNI, Eucon CIA ir DCI. Siekiant tiksliai įvertinti šio aplinkai draugiško inhibitoriaus efektyvumą, papildomai buvo tiriami 3 neorganiniai korozijos inhibitoriai, kurių efektyvumas buvo lyginamas su indiškios alyvos ekstraktu. Visiems korozijos inhibitoriams tirti buvo naudojamas tas pats dozavimas, 10 litrų inhibitoriaus 1 m³ betono, tai būtų apie 5,5-6 % koncentracijos inhibitorius. Korozijos procesas bandiniuose buvo tiriamas 182 dienas. Korozijos tikimybė buvo tirama atliekant potenciometrinį korozijos tyrimą ir rezultatai analizuojami pagal Stratful kriterijų (žr. 1 lentelė), kuris naudojamas nustatyti korozijos tikimybę pagal išmatuotą potencialą (žr. 9 pav.).

1 lentelė. Korozijos tikimybė pagal Stratful kriterijų [31, 32]

Išmatuota elektros įtampa, mV	Korozijos tikimybė
-240	0 %
-275	5 %
-350	50 %
-450	95 %
-500	100 %

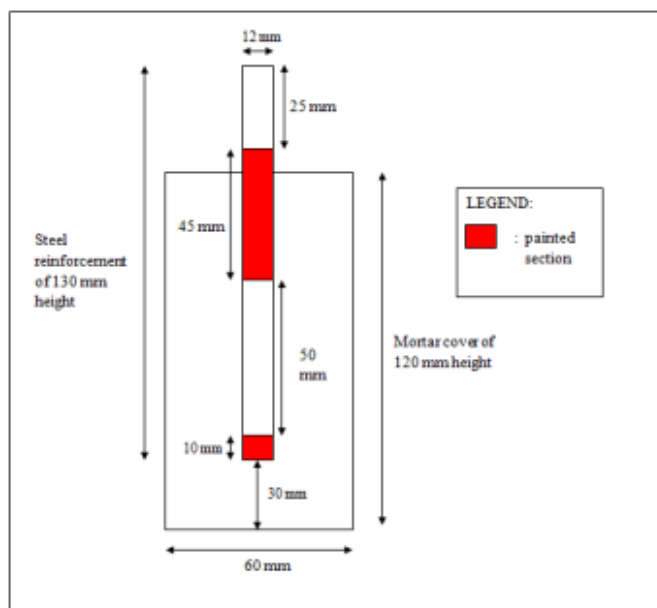


9 pav. Korozijos potencialo priklausomybė nuo tyrimo trukmės [31]

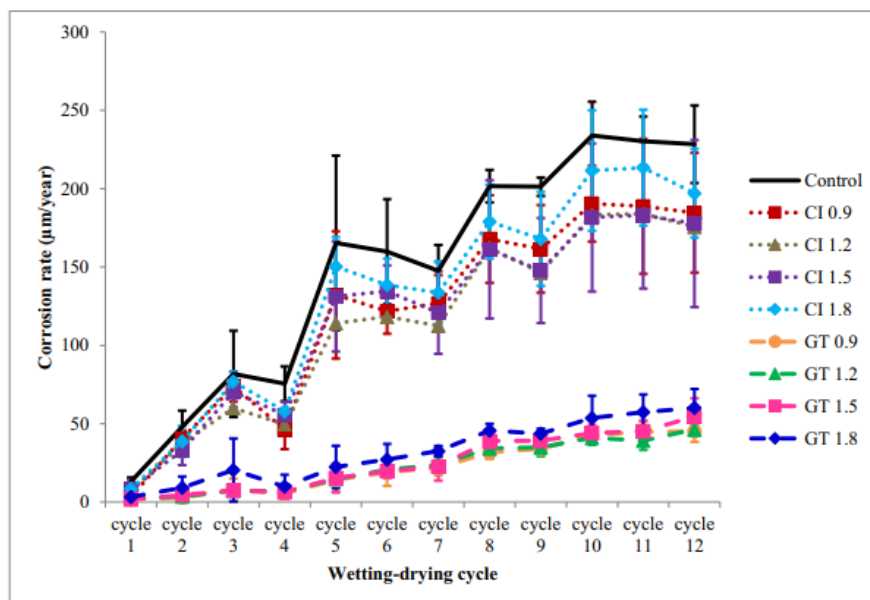
Ankstyvoje tyrimo stadijoje, tarp 28 ir 50 tyrimo dienos, indiškų alyvos ekstrakto bandiniai pasižymėjo didesne korozijos rizika nei kiti bandiniai, įskaitant ir kontrolinį bandinį. Tyrimo trukmei ilgėjant bandinių su sintetinių korozijos inhibitoriais, korozijos tikimybė pradėjo nežymiai didėti, ypač Sika CNI inhibitoriui, kurio efektyvumas po 182 dienų beveik susivienodino su kontrolinio bandinio. Bandinių su indiškų alyvos ekstraktu korozijos tikimybė keitėsi visai kitaip nei kitų bandinių, jų korozijos tikimybė pradėjo mažėti ir nors pradžioje buvo pati didžiausia tikimybė ir mažiausias efektyvumas, po 162 dienų pasiekus beveik 0 % korozijos tikimybę, tai yra beveik 100 % inhibitoriaus efektyvumą. Galima daryti išvadą, kad indiškų alyvos ekstraktas yra ne toks efektyvus ankstyvoje betono kietėjimo stadijoje, galima sakyti, net žalingas betonui, tačiau vėlyvojoje kietėjimo stadijoje, po 150 ir daugiau dienų jo efektyvumas pralenkia visus išbandytus sintetinius korozijos inhibitorius.

Žaliosios arbatos ekstraktas

Žaliosios arbatos ekstraktas yra dar vienas augalinis ekstraktas, turintis potencialą tapti visame pasaulyje plačiai naudojamu augaliniu korozijos inhibitoriumi, dėl didelio populiarumo ir didelio sunaudojimo. Pradipta et al. [33] ištyrė žaliosios arbatos ekstrakto efektyvumą mažinant armatūros koroziją gelžbetoniniuose elementuose. Šiame tyrime žalios arbatos ekstrakto efektyvumas buvo lyginamas su sintetinio korozijos inhibitoriaus, kalcio nitrato, efektyvumu. Tiek kalcio nitrato, tiek žaliosios arbatos ekstrakto bandiniams buvo naudojamos tos pačios inhibitoriaus koncentracijos, nuo 2 % iki 4 % skaičiuojant nuo betono tūrio ($20\text{--}40\text{ l/m}^3$). Korozijos tyrimui buvo naudojamas potenciometrinis tyrimas, tačiau kitaip nei kituose tyrimuose, šiuo atveju armatūros strypas prieš dedant į bandinį buvo nudažytas antikoroziniais dažais, kad korozijos procesas vyktų tik nustatytose vietose ir atvira armatūra nebūtų veikiamas druskos tirpalo garų (žr. 10 pav.).



10 pav. Bandinio paruošimas korozijos tyrimui [33]



11 pav. Korozijos greičio priklausomybė nuo drėkinimo-džiūvimo ciklų skaičiaus

11 pav. legendoje pateikti žymėjimai žymi sintetinį (CI) ir žaliosios arbatos ekstrakto (GT) korozijos inhibitorius ir jų didėjančias koncentracijas nuo 2 % iki 4 %. Tyrimo pradžioje, po pirmo ciklo, visų bandinių korozijos greičiai skiriasi tik nežymiai, tačiau žymesnis skirtumas pastebimas po 4 ir tolimesnių ciklų. Bandiniuose su kalcio nitratu nustatomas tik nežymiai mažesnis korozijos greitis nei kontroliniame bandinyje, kitaip nei bandiniuose su žaliosios arbatos ekstraktu, kuriuose nustatytas korozijos greitis po 12 ciklų yra apie 3,5 kartų mažesnis už kalcio nitrato bandinius ir apie 5 kartus mažesnis už kontrolinio bandinio. Tarp skirtingų žaliosios arbatos ekstrakto dozių rezultatų žymių skirtumų pastebėti negalime, tačiau pats mažiausias korozijos greitis nustatytas bandiniuose su 2 % inhibitoriaus doze, o didinant dozę, korozijos greitis atitinkamai didėja, ypač naudojant didžiausią 4 % dozę. Šio tyrimo metu nebuvo tiriama žaliosios arbatos ekstrakto įtaka gniuždomajam betonui stipriui, kas turėtų būti ištirta, prieš darant išvadas apie korozijos inhibitoriaus tinkamumą pramoninėje gamyboje.

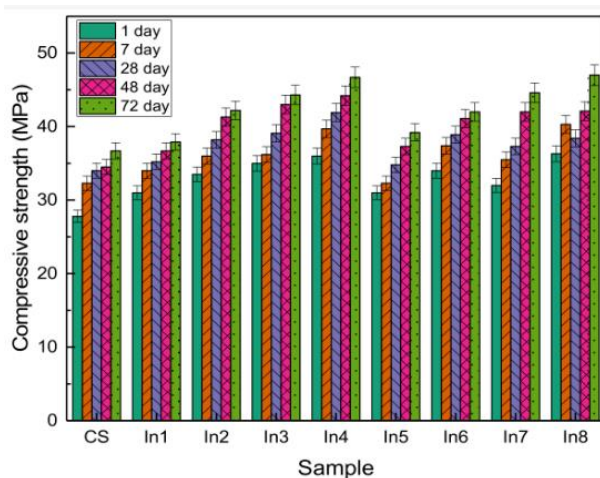
Akacijų sakai ir pupenių lipai

Akacijų sakų ir pupenių lipų ekstraktas kaip ir kokosų plaušų ekstraktas gali tapti labai populiarus korozijos inhibitorius tropinio klimato šalyse, dėl šių augalų mėgstamo klimato. Guo et al. [34] atliktame tyrime buvo tiriamas akacijų sakų (lipų) ir pupenių lipų inhibicijos efektyvumas. Šio tyrimu metu buvo naudojami ypač maži kiekiai inhibitorių, tiek akacijų sakų, tiek pupenių lipų atitinkamiems mišiniams buvo naudojama nuo 100 iki 1000 milijoninių dalių, inhibitorių dozavimas pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė. Inhibitorių dozavimas skirtingiems bandiniams [34]

Inhibitorius	Akacijų sakai (ppm)	Pupenių lipai (ppm)	pH	Dalelių dydis (nm)
CS	-	-		-
ln1	100	100	6,4	17 ± 1
ln2	250	500	6,3	20 ± 2
ln3	500	250	5,8	19 ± 2
ln4	250	250	6,3	18 ± 1
ln5	500	500	6,4	29 ± 2
ln6	750	250	5,3	32 ± 2
ln7	250	750	6,4	34 ± 3
ln8	1000	1000	6,5	46 ± 3

Tyrimas buvo atliekamas 72 dienas, kurio metu naudojant potenciometrinį tyrimo būdą, buvo matuojama bandiniuose susidaranti elektrinė įtampa (potencialas) ir pagal tai apskaičiuojamas inhibitoriaus efektyvumas lyginant su kontroliniu bandiniu. Nustatyta, kad didžiausiu inhibicijos efektyvumu pasižymėjo ln 4 ir ln 8 bandiniuose, kuriuose buvo atitinkamai naudojama 250 ir 1000 milijoninių dalių abiejų inhibitorių. Šiuose bandiniuose nustatytas apie 54 % ir 48 % inhibicijos efektyvumas. Remiantis šiais rezultatais buvo padaryta išvada, kad didinant pupenių lipų dozę iki 750 ppm, inhibicijos efektyvumas didėjo, tačiau didinant akacijų sakų dozę, inhibicijos efektyvumas buvo paveiktas tik nežymiai.



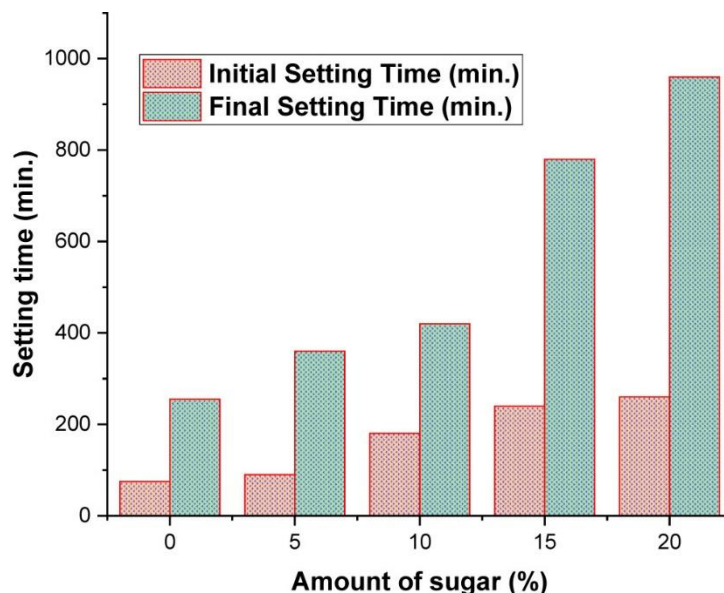
12 pav. Betono gniuždomieji stipriai skirtingiems bandiniams [34]

Šio tyrimo metu buvo tiriama ir šių korozijos inhibitorių įtaka betono gniuždomajam stipriui. Nustatyta, kad akacijų sakų ir pupenių lipų naudojimas betono mišinyje nemažina betono

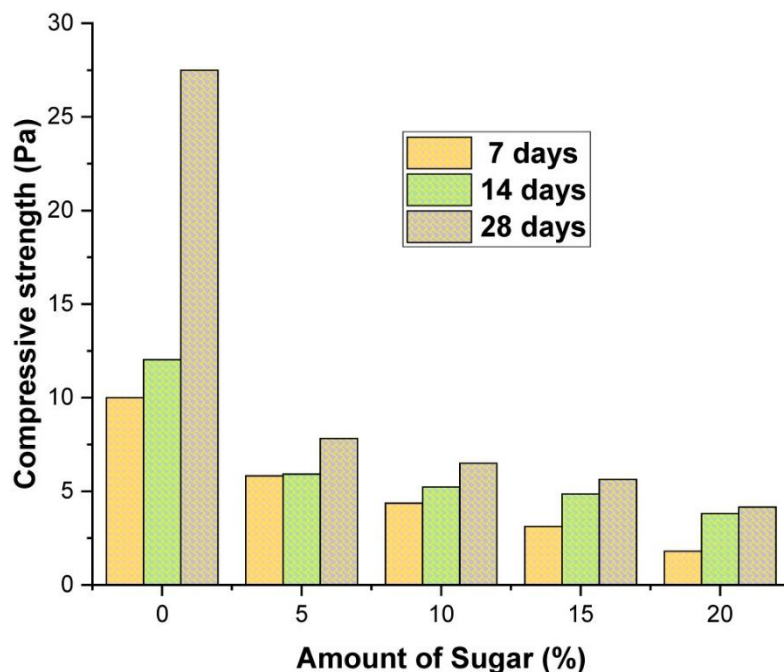
gniuždomojo stiprio, o jį net padidina. In 4 ir In8 bandiniai pasižymėjo didžiausiu gniuždomuoju stipriu, kuris buvo apie 10 MPa didesnis po 72 dienų nuo suformavimo lyginant su kontroliniu bandiniu (žr. 12 pav.). In 8 bandinio gniuždomasis stipris po 28 dienų buvo beveik identiškas kontrolinio bandinio stipriui, tačiau žymiai padidėjo vėlesnėje tyrimo stadijoje tarp 48 ir 72 dienų.

1.5. Cukraus poveikis betonui

Iš analizuotų tyrimų galima pastebėti, kad augalų ekstraktai yra efektyvūs korozijos inhibitoriai, tačiau daugumoje jų yra nemažas kiekis cukraus, kuris gali turėti neigiamą įtaką betono savybėms. Betono mišinio apdirbamumui didelę įtaką turi betono mišinio sudėtis ir kietėjimo sąlygos [35, 36]. Siekiant optimizuoti betono savybes, į betono sudėtį įtraukiami įvairūs priedai, kurie padidina betono slankumą, stiprį ir ilgaamžiškumą [35, 37]. Greitkliai greitina betono kietėjimą ir padidina betono pirminį stiprį, o lėtikliai lėtina betono kietėjimą [35, 38]. Cukrus yra žinomas kaip lėtiklis, nes įmaišius jo į betono mišinį, betono hidratacijos procesas sulėtėja [35]. Palaniappan et al. [35] atliktame tyrime nustatyta, kad betono sudėtyje naudojama maža cukraus koncentracija, gali būti naudojama betono kietėjimui lėtinti, tačiau naudojant didesnę nei 5 % cukraus koncentraciją, betono kietėjimo greitis sumažėja net iki 5 kartų, lyginant su kontroliniu bandiniu (žr. 13 pav.). Didelė cukraus koncentracija neigiamai paveikia betono stiprį (žr. 14 pav.) bei formuoja porėtą struktūrą [35].



13 pav. Cukraus koncentracijos įtaka betono kietėjimo laikui [35]



14 pav. Cukraus koncentracijos įtaka betono gniuždomajam stipriui [35]

1.6. Cukraus kiekis apelsinų žievelėse

Jungtinės Tautos nustatė, kad 2018 metais pasaulyje buvo užauginta apie 104 mln. tonų citrusinių vaisių, iš kurių apie 76 mln. tonų sudaro apelsinai. Šie skaičiai kiekvienais metais auga, kartu su apelsinų sukuriamomis atliekomis, kurias sudaro apelsinų sėklos, minkštimas ir žievelė. Dalis gamybos įmonių pasinaudoja augančiu citrusinių vaisių atliekų kiekiu ir juos panaudoja gamindami gyvulių pašarą, eterinius aliejus ir panašius produktus [39]. Vidutiniškai apie 20% apelsino svorio sudaro apelsino žievelė, kurią, įvairių literatūros šaltinių teigimu [40-42], apelsinų žievelę sudaro apie 23% cukrus, 22% celiuliozė, 25% pectinas ir 11% hemiceliuliozė [39].

1.7. Literatūros apžvalgos išvados

Vienas iš efektyviausių korozijos slopinimo būdų yra korozijos inhibitorių naudojimas. Sintetiniai korozijos inhibitoriai yra skirstomi į anodinius ir katodinius inhibitorius, organiniai korozijos inhibitoriai dažniausiai būna mišrūs, kurie slopina tiek anodines, tiek katodines reakcijas. Organiniai korozijos inhibitoriai pagal sudėtį skirstomi į alkilinus, imidazolus, pridinus, kvinolinus ir natūralius produktus (ekstraktus).

Paprasčiausias, tačiau gerus rezultatus pasiekiantis, ekstrakcijos būdas yra maceracija. Pritaikius tinkamas ekstrakcijos sąlygas, galima pasiekti iki 25 % ekstrakcijos efektyvumą. Kitas populiarus ekstrakcijos būdas yra Soxhlet metodas, kuris yra sudėtingesnis ir reikalauja specializuotos įrangos, tačiau reikalauja mažiau medžiagų ir pasiekia didesnę efektyvumą.

Didžiausias augalų ekstraktų pagrindu gamintų inhibitorių trūkumas yra cukraus kiekis ekstraktoje. Cukrus betone veikia kaip lėtiklis ir turi neigiamą įtaką betono mechaninėms savybėms jei naudojant per didelę cukraus koncentraciją. Panaudojus tinkamą cukraus koncentraciją betone galima pastebėti ir teigiamą įtaką mechaninėms savybėms. Naudojant augalinius ekstraktus betone reikia riboti ekstrakto koncentraciją arba mažinti cukrų ekstrakto sudėtyje.

2. Tyrimų medžiagos ir metodologija

2.1. Medžiagos

Bandinių gamyboje naudojamos įprastos betono sudėtinės dalys portlandcementis, smėlis, kaip smulkus užpildas, ir vanduo, papildomai dalyje bandinių naudojama plieninė armatūra ir organiniai korozijos inhibitoriai – natrio benzoatas ir apelsinų žievelių ekstraktas. Naudos medžiagos plačiau aprašomos kituose skyreliuose.

2.1.1. Portlandcementis

Bandiniuose, kaip pagrindinė rišamoji medžiaga naudotas CEM II 42,5R tipo portlandcementis. Visiems tyrimuose naudotiems bandiniams gaminti naudoti to paties gamintojo portlandcementis, kuris turi atitikti 3 lentelėje pateiktas savybes.

3 lentelė. Portlandcemenčio eksploatacinės savybės

Portlandcemenčio savybė	
Ankstyvasis gniuždymo stipris, MPa	$\geq 10,0$
Standartinis gniuždymo stipris, MPa	$\geq 42,5 \leq 62,5$
Rišimosi pradžia, min	≥ 60
Tūrio pastovumas, mm	≤ 10
Kaitmenys, %	-
Netirpmenys, %	-
Sulfatų (SO ₃) kiekis, %	$\leq 3,5$
Chloridų kiekis, %	$\leq 0,10$
Šarmų kiekis, sk Na ₂ O ekv., %	$\leq 0,8$

2.1.2. Smėlis

Betono mišinyje, dėl mažo bandinių dydžio, naudojamas tik smulkus užpildas, kuriam naudojamas 0/4 frakcijos smėlis.

2.1.3. Vanduo

Betono mišinio kietėjimas vyksta dėl betono hidratacijos, kuriai reikalingas vanduo. Šio tyrimo metu naudojamas geriamasis vanduo iš vandentiekio, kuris pagal Lietuvos standartą [43] yra tinkamas naudoti betone ir neturi būti tiriamas.

2.1.4. Plieninė armatūra

Bandiniuose, naudojamuose korozijos tyrimuose, įbetonuojamas B500B klasės 10 mm skersmens armatūros strypas, nuo kurio, panaudojant fosforo rūgštį, nuvalomi esami korozijos produktai.

2.1.5. Natrio benzoatas

Natrio benzoatas yra vienas iš dviejų šiame tyrime naudotų organinės kilmės korozijos inhibitorių. Šis korozijos inhibitorius įsigytas cheminių medžiagų parduotuvėje. Parduotuvėje parduodamas natrio benzoatas yra birios formos, sudarytas iš apvalių „grūdelių“.



15 pav. Natrio benzoatas

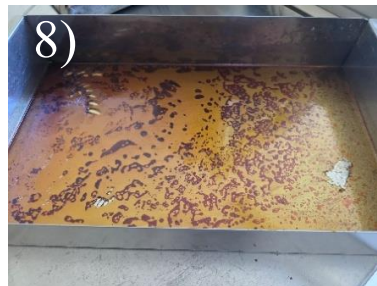
2.1.6. Apelsinų žievelių ekstraktas

Apelsinų žievelių ekstraktas yra antrasis šiame tyrime naudotas organinės kilmės korozijos inhibitorius. Šis korozijos inhibitorius nėra parduodamas, todėl jį reikia pasigaminti naudojant vieną iš daugelio ekstrakcijos metodų. Šio tyrimo metu apelsinų žievelių ekstraktas gamintas naudojant maceracijos metodą, kuris yra paprasčiausias ir specialios įrangos nereikalaujantis procesas.

Apelsinų žievelių ekstrakto gamyba:

1. **Apelsinų žievelių surinkimas.** Apelsinų žievelės renkamos rankiniu būdu, nuo apelsinų atskiriant tik žievelės spalvotąją dalį, siekiant padidinti apelsinų ekstrakto išgavimo efektyvumą. Toks sprendimas buvo priimtas, nes baltojoje žievelės dalyje yra žymiai mažesnė naudingų medžiagų koncentracija ir dėl to sumažėtų ekstrakcijos efektyvumas bei padidėtų sunaudojamų išteklių kiekis.
2. **Apelsinų žievelių džiovinimas.** Atrinktos apelsinų žievelės džiovinamos iki 40 °C temperatūros įkaitintoje krosnelėje iki pastovios masės. Išdžiovinus apelsinų žievelės pailgėja maceracijos procesas, tačiau yra išgaunamas didesnis žievelėse esančių naudingų medžiagų kiekis, t.y. pasiekiamas didesnis maceracijos efektyvumas.
3. **Apelsinų žievelių smulkinimas.** Sudžiovintos žievelės smulkinamos iki miltelių, taip palengvinant tirpikliui žievelėse esančių medžiagų skaidymą ir tirpinimą.
4. **Apelsinų žievelių miltelių sudėjimas į tirpiklį.** Siekiant kuo didesnio maceracijos efektyvumo, kaip tirpiklį buvo pasirinkta naudoti etanolį, kuris buvo atskiedžiamas iki 70 % koncentracijos. Tirpiklis turi būti patalpintas į stiklinį indą arba aukštos kokybės plastikinį indą, tačiau šio tyrimo metu siekiant geresnių rezultatų buvo pasirinktas stiklinis indas.
5. **Maceracijos procesas.** Susmulkintos apelsinų žievelės laikomos etanolyje ne trumpiau kaip savaite, du kartus per dieną sujudinant tirpiklyje esančius žievelių miltelius. Tirpiklis su žievelėmis turi būti laikomas kambario temperatūroje, be tiesioginių saulės spindulių.

6. **Kietųjų dalelių filtravimas iš ekstrakto.** Po maceracijos proceso, ekstraktas yra filtruojamas panaudojant filtracinį popierių. Filtruojant didelį kiekį ekstrakto naudojant tik gravitaciją, filtravimas užtrunka labai ilgai, todėl šio tyrimo metu filtravimui naudojamas slėgių skirtumas. Tokiu būdu filtravimo procesas pagreitėja dešimtimis kartų.
7. **Tirpiklio išgarinimas.** Etanolis yra alkoholis, todėl jo naudojimas betono mišinyje gali neigiamai paveikti betono savybes, todėl yra būtina jį išgarinti. Siekiant nesunaikinti maceracijos metu išgautų medžiagų, etanolio garinimas vykdomas apie 40 °C temperatūroje. Tokioje temperatūroje etanolis neužverda, todėl garinimas vyksta lėtai, garinimo metu ekstraktą reikia paskleisti kuo plonesniu sluoksniu. Garinimas tęsiamas kol pasiekama kieta ar gelinė konsistencija, priklausomai nuo ekstrakto sluoksnio.
8. **Sauso ekstrakto surinkimas.** Po visiško etanolio išgarinimo ekstraktas surenkamas iš džiovinimo formos. Siekiant pastovesnių rezultatų, surinktas ekstraktas yra dar pakaitinamas 40 °C temperatūroje, kad ekstraktas susimaišytų ir išnyktų skirtingų koncentracijų sritys. Surinktas sausas ekstraktas pasveriamas, kad būtų galima apskaičiuoti ekstrakcijos proceso efektyvumą.
9. **Reikalingos koncentracijos ekstrakto gamyba.** Sausas ekstraktas yra 100% koncentracijos, todėl siekiant pasiekti tyrimo metu naudotas 0,5-5 % koncentracijas, ekstraktas yra tirpdomas/atkiedžiamas atitinkamame kiekyje vandens.

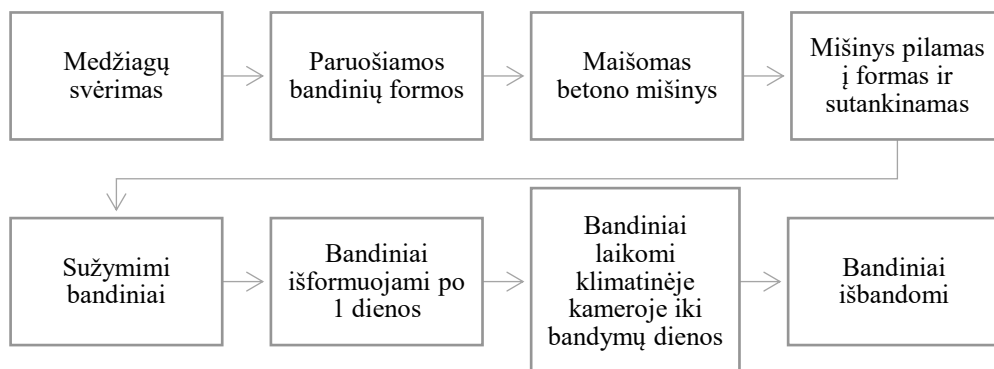


16 pav. Apelsinų žievelių ekstrakto gamyba maceracijos būdu

2.2. Tyrimų metodai

Šiame darbe naudojami įvairūs tyrimo būdai, padedantys nustatyti organinių korozijos inhibitorių įtaką betono mechaninėms, fizikinėms ir korozijos savybėms. Šie tyrimo metodai plačiau aptariami kituose skyriuose.

2.2.1. Bandinių gamyba



17 pav. Bandinių gamybos žingsniai

Bandymams atlikti bandiniai gaminami iš skirtingų medžiagų arba jų proporcijų, visos betono mišiniuose naudojamos medžiagos aprašytos 2.1 skyriuje. Pagrindinis betono mišinių sudėties skirtumas yra naudojamas organinis korozijos inhibitorius, t.y. apelsinų žievelių ekstraktas arba natrio benzoatas. Kitas galimas skirtumas yra naudojama korozijos inhibitoriaus koncentracija mišinyje. Bandiniuose yra naudojamos 6 skirtingos natrio benzoato koncentracijos – 0% (kontrolinis bandinys), 0,5%, 1%, 3% ir 10%, skaičiuojant nuo vandens svorio betono mišinyje. Bandiniuose apelsinų žievelių ekstraktas naudojamas tokiomis pačiomis koncentracijomis kaip natrio benzoatas, išskyrus didžiausią 10% koncentraciją, kuri buvo atmesta remiantis literatūros analize ir pusiau adiabatinio kalorimetrijos tyrimo rezultatais. Skirtingos apelsinų ekstrakto koncentracijos pavaizduotos 18 pav.



18 pav. Apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos

Kiekvienai korozijos inhibitoriaus koncentracijai gaminami 3 skirtingų rūšių bandiniai – 70x70x70 mm kubeliai, 40x40x160 mm prizmelės ir 100x50 mm (DxH) cilindrai. Kubeliuose papildomai įdedama po armatūros strypą, kurie bus naudojami korozijos ir praspaudimo stiprio tyrimams,

kiekvienai korozijos inhibitoriaus koncentracijai gaminama po 3 kubelius. Kiekvienai inhibitoriaus koncentracijai taip pat gaminama po 3 prizmeles, kurios naudojamos mechaninių savybių tyrimams, gniuždomojo ir lenkiamojo stiprio nustatymui. Galiausiai kiekvienai inhibitoriaus koncentracijai gaminama po vieną cilindą, kuris yra naudojamas chloridų difuzijos tyrimui atlikti. Visų skirtingų betono mišinių sudėtys pateiktos 4 lentelėje.

4 lentelė. Nagrinėjamų mišinių sudėtys

Natrio benzoatas				
Bandinio žymėjimas	Cementas, g	Vanduo, g/ml	Smėlis, g	Natrio benzoatas. g
B-0	624	384	3840	0
B-0,5		382		2
B-1		380		4
B-3		372		12
B-5		365		19
B-10		346		38
Apelsinų žievelių ekstraktas				
Bandinių žymėjimas	Cementas, g	Vanduo, g/ml	Smėlis, g	Apelsinų žievelių ekstraktas, g
A-0	624	384	3840	0
A-0,5		382		2
A-1		380		4
A-3		372		12
A-5		365		19

Nusistačius betono mišinių sudėtį, iš pradžių susveriamos visos mišiniui reikalingos medžiagos naudojant tas pačias svarstyklas, taip suvienodinant visų medžiagų kiekių paklaidas. Betono mišinio maišymas atliekamas su elektrine maišykle, o maišymas vyksta tokiais etapais:

- Į maišyklę supilamas visas mišiniui naudojamas smėlis ir 2/3 mišiniui naudojamo vandens;
- Smėlis maišomas maišyklėje tol kol visas smėlis sudrėksta ir nelieka neįsimaišiusio vandens;
- Į sudrėkintą smėlį pilamas visas naudojamas cementas ir toliau maišoma;
- Po šiek tiek maišymo supilamas likęs vanduo ir maišoma kol pasiekama norima konsistencija.

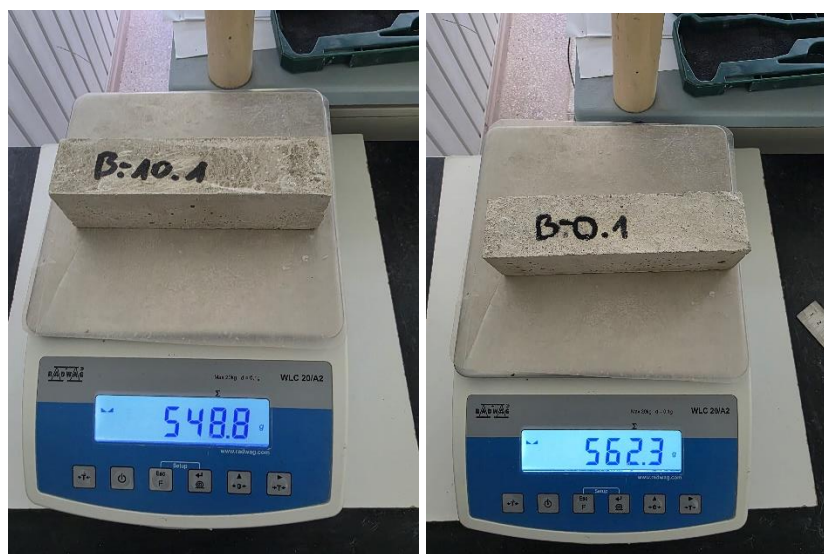
Sumaišius betono mišinį, formuojami šiame poskyryje išvardinti bandiniai, remiantis LST EN 12390-2 [44] standartu. Kubeliams ir prizmelėms naudojamos metalinės formos, o cilindrams naudojamos plastikinės formos. Prieš pilant betono mišinį į formas, visų formų vidus ištepamas plonu sluoksniu tepalo, siekiant palengvinti bandinių išformavimą, kuris vykdomas po 24 valandų. Supylus betoną į formas, papildomai į kubelių formas sudedami armatūros strypai taip, kad po strypu liktų 30 mm betono apsauginis sluoksnis. Šio tyrimo metu gaminamas skystos konsistencijos betonas, todėl siekiant išlaikyti armatūros strypą nuo grimzdimo gilyn, ant armatūros užmaunamas polistireninio putplasčio gabaliukas, taip padidinant atrėmimo plotą ir neleidžiant armatūrai grimzti.

Po užpildymo formos yra nešamos į klimatinę kamerą, taip daroma, kad bandiniuose būtų išlaikoma drėgmė ir bandiniai kietėtų dėl hidratacijos proceso. Šiuo atveju dėl bandiniuose naudojamų armatūros strypų, būtų sunku kokybiškai juos uždengti plėvele, todėl visi bandiniai tiek pirmas 24 valandas, tiek 28 dienas po suformavimo laikomi klimatinėje kameroje, kurioje palaikoma 20 °C temperatūra ir 100 % aplinkos drėgmė. Bandinių su apelsinų žievelių ekstraktu išformavimas iš formų vykdomas šiek tiek kitaip, dėl apelsinų žievelių ekstrakto, kaip lėtiklio, savybių. Išformavimas

vykdomas tada, kai pasiekiamas pakankamas stipris, kuris gali būti įvertinamas vizualiai arba atsargiai išformuojant vieną grupės bandinį ir taip nustatant ar bandinys išlaiko formą.

2.2.2. Tankio nustatymas

Tankio nustatymui šiame tyrime naudojamos 40x40x160 mm prizmelės, kurių tankis nustatomas nei papildomai prisotinant vandeniu, nei išdžiovinant džiovykloje. Visi tankio nustatymui reikalingi matavimai ir skaičiavimai atliekami remiantis betono tankio nustatymą aprašantį standartą LST EN 12390-7 [45]. Tankio nustatymui naudojamas slankmatis su 0,01 mm tikslumu, liniuotė su 1 mm tikslumu bei svarstyklės su 0,01 g tikslumu (žr. 19 pav.). Matavimo priemonės pasirinktos, kad tenkintų [45] standarte pateiktas leistinas paklaidas. Kiekvienam bandiniui yra išmatuojami skerspjūvio plotis ir aukštis abiejuose prizmelės galuose bei prizmelės ilgis. Šios reikšmės užrašomos milimetrais, 0,1 mm (plotis ir aukštis) bei 1 mm (ilgis) tikslumu.



19 pav. Bandinio svorio nustatymas

2.2.3. Lenkiamojo stiprio nustatymas

Šiame tyrime lenkiamojo stiprumo nustatymas vykdomas vadovaujantis sukietėjusio betono lenkiamojo stiprio standartu LST EN 12390-5 [46]. Remiantis LST EN 12390-1 [47] standartu, bandomos prizmelės ilgis, turi būti ne mažiau kaip 2 kartus didesnis už prizmelės skerspjūvio aukštį, todėl šiame tyrime naudojamos 40x40x160 mm prizmelės tenkina bandiniams keliamus reikalavimus. Tiriami bandiniai turi būti išbandomi kuo greičiau po išėmimo iš kietėjimo aplinkos, jei tai neįmanoma, bandiniai turi būti apsaugomi nuo drėgmės praradimo.

Lenkiamojo stiprio tyrimui naudojamas mažasis „Toni Technik“ presas, atitinkantis bandymo mašinų techninių reikalavimų standartą LST EN 12390-4 [48]. Presas reguliuojamas naudojant specializuotą programinę įrangą, taip užtikrinant pastovų apkrovimo greitį ir tikslios suirimo apkrovos nustatymą.



20 pav. Betono lenkiamojo stiprio tyrimas

Bandymas atliekiant tritaškiu lenkimo būdu, perduodant apkrovą per bandinio viduryje pridėta ritinį, kuris yra bent 10 mm ilgesnis už bandinio plotį, o bandinys atremtas ant dviejų tokių pačių išmatavimų ritinių bandinio apačioje. Apkrovimas lenkiamojo stiprio tyrimo metu atliekamas 0,05 MPa/s greičiu ir didinamas kol didesnė apkrova nėra atlaikoma. Gauta suirimo apkrova užrašoma kN, o išbandyto bandinio lenkiamasis stipris nustatomas, panaudojant (1) formulę [46]:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2}; \quad (1)$$

čia: $f_{ct,fl}$ – lenkiamasis stipris, N/mm²;

F – didžiausia apkrova, N;

l – atstumas tarp apatinių ritinių, mm;

b, h – bandinio skerspjūvio plotis ir aukštis.

2.2.4. Gniuždomojo stiprio tyrimas

Šiame tyrime gniuždomojo stiprio nustatymas vykdomas vadovaujantis suketėjusio betono gniuždomojo stiprio standartu LST EN 12390-3 [49]. Šiame tyrime gniuždomojo stiprio tyrimui naudojamos po lenkiamojo stiprio tyrimo likusios prizmelių pusės, todėl gniuždomajam stipriui nustatyti yra naudojamas dvigubai didesnis bandinių skaičius. Gniuždomasis stipris kiekvienai bandinių grupei nustatomas po 7, 14 ir 28 dienų, taip nubrėžiant tikslesnę gniuždomojo stiprio augimo diagramą.

Gniuždomojo stiprio tyrimas atliekamas naudojant didesnį ir mažąjį „Toni Technik“ presus. Didysis presas naudojamas visiems bandiniams, išskyrus bandinius su 3 % ir 5 % apelsinų žievelių ekstrakto, dėl žymiai sumažėjusio gniuždomojo stiprio. Siekiant sugniuždyti prizmelių puses, kaip 40x40x40 mm kubelius, bandiniai sudedami tarp metalinių plokštelių, kurios apriboja gniuždomą plotą iki reikiamo.



21 pav. Betono gniuždomojo stiprio tyrimas

Prieš dedant bandinius į presą, siekiant sumažinti rezultatų paklaidą, atliekami šie veiksmai:

- bandinių gniuždomas paviršius yra nušlifuojamas;
- Po kiekvieno bandinio sugniuždymo preso paviršiai yra kruopščiai nuvalomi;
- Kiekvienas bandinys yra išcentruojamas pasinaudojant ant preso paviršių pažymėtomis centrinėmis ašimis.

Tyrimo metu apkrova didinama 0,8 MPa/s greičiu ir didinama kol didesnė apkrova nėra atlaikoma. Gauta suirimo apkrova užrašoma kN, o išbandyto bandinio gniuždomasis stipris nustatomas, panaudojant (2) formulę [49]:

$$f_c = \frac{F}{A_c}; \quad (2)$$

čia: f_c – gniuždomasis stipris, MPa;

F – didžiausioji ardomoji apkrova, N;

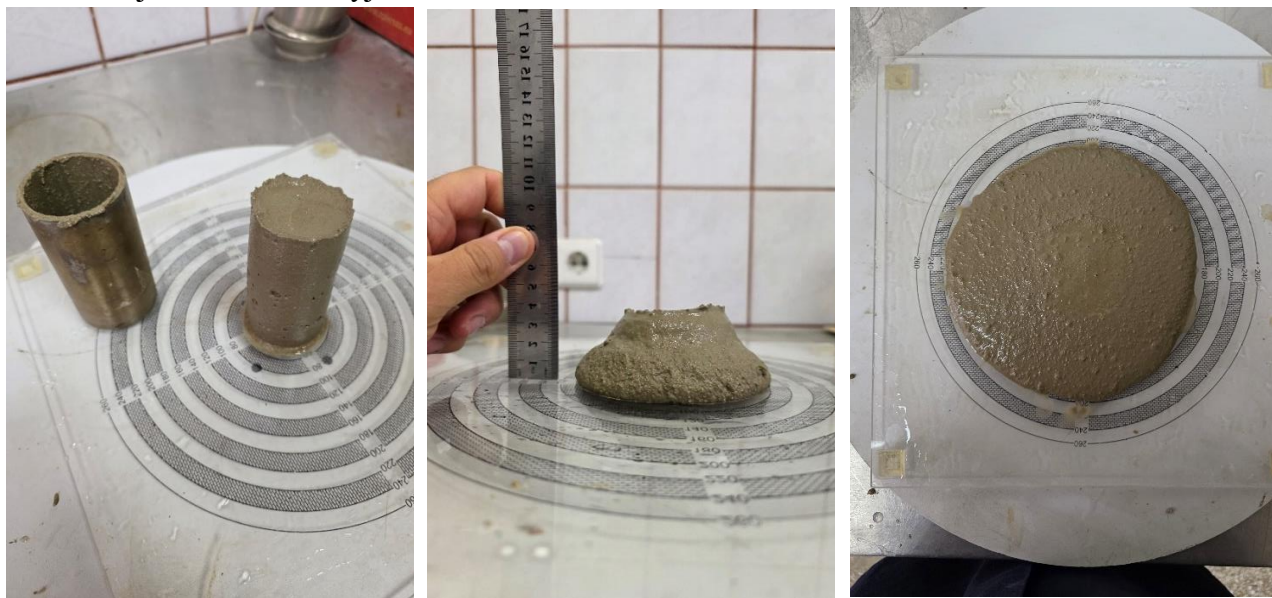
A_c – gniuždomo bandinio skerspjūvio plotas, mm².

2.2.5. Cemento hidratacijos tyrimas

Šiame tyrime į betono mišinį buvo maišomi dviejų rūšių organiniai korozijos inhibitoriai ir turi būti nustatyta, kokią įtaką cemento hidratacijai daro įvairių koncentracijų organinių korozijos inhibitorių naudojimas. Cemento hidratacija tiriama pusiau adiabatinio kalorimetrijos metodu, kurio metodika aprašyta LST EN 196-9:2010 standarte [50]. Tyrimui atlikti naudojamas „Pico Technology“ aštuonių kanalų USB duomenų registratorius TC-08, kuris registruoja betono temperatūrą 30 sekundžių intervalais; leistinas temperatūrų matavimo intervalas yra nuo –270 iki 1820 °C. Tyrimui užmaišoma po 100 g cementinio mišinio be priedų ir su kiekviena tiriama korozijos inhibitoriaus koncentracija. Tyrimo metu, panaudojant temperatūros jutiklius, kas minutę matuojama kiekvieno mišinio temperatūra ir registruojama programinėje įrangoje, taip nustatant aukščiausią temperatūrą ir laiko momentą kada ji buvo pasiekta. Tyrimas vykdomas 2 dienas, tačiau trukmė gali būti koreguojama priklausomai nuo hidratacijos proceso greičio.

2.2.6. Betono pasklidimo-slankumo tyrimas

Šio tyrimo metu išbandoma betono mišinio konsistencija, t.y. suslūgusio bandinio aukštis, po formos nukėlimo. Šiam tyrimui tinkamas betonas, kuriame užpildo dalelės neviršija 40 mm dydžio. Šio tyrimo metu išbandomos tik betono mišinio sudėtys su apelsinų žievelių ekstraktu, nes kitų tyrimų metu buvo pastebėtas betono mišinio konsistencijos pokytis priklausomai nuo ekstrakto koncentracijos betono mišinyje.

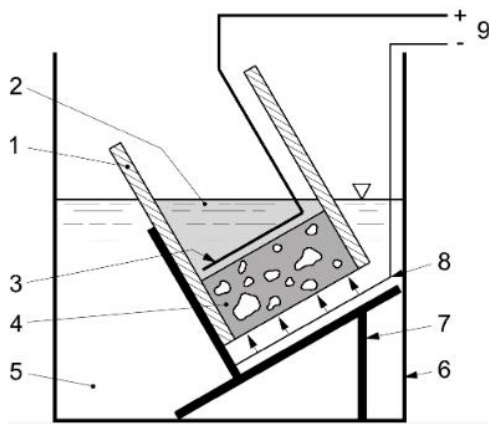


22 pav. Betono slankumo tyrimas

Slankumo tyrimas atliekamas iškart po betono mišinio paruošimo, t.y. po vieną bandinį vienu metu. Prieš tyrimą sudrėkinamas cilindras ir plokštė ant kurios atliekamas tyrimas, o drėgmės perteklius panaikinamas drėgna šluoste. Cilindras pripildomas betono mišiniu ir netankinant nuo viršaus nuimamas perteklius, tada nelaukiant cilindras tolygiu judesiu nukeliamas ir stebima ar bandinys suslūgo vertikalčiai ir ar nenuslinko į šoną. Matuojamas suslūgusio bandinio aukštis ir diametras, užsirašomas milimetrais (mm) ir toliau kartojama su kitos sudėties bandiniu.

2.2.7. Chloridų difuzijos tyrimas

Šiame tyrime betono chloridų difuzijos koeficientas nustatomas remiantis Lietuvos standartu LST EN 12390-18 [51]. Šio tyrimo metu nustatomas chloridų įsiskverbimo į betoną greitis, kuris yra aktualus kalbant apie gelžbetoninių konstrukcijų, eksploatuojamų jūroje ar kitose chloridais užterštoje aplinkoje, koroziją.



23 pav. Chloridų difuzijos tyrimas [51]



24 pav. Chloridų įsiskverbimas į bandinį

Tyrimo metu bandinys įdedamas į guminį cilindą ir panardinamas į šarminį mišinį be chloridų, o cilindras virš bandinio užpildomas šarminiu mišiniu turinčiu chloridų, taip skatinant aukščiau esančio mišinio skverbimąsi per bandinį (žr. 23 pav.). Tada naudojant voltmetrą išmatuojamas tekančios srovės stipris ir pagal tai nustatoma bandymo trukmė. Po tyrimo bandinys išimamas iš cilindro ir perskėlus apipurškiamas sidabro nitratu. Sidabro nitratai sureagavus su chloridais išryškėja chloridų įsiskverbimo gylis (žr. 24 pav.). Išmatuojamas bandinio aukštis ir įsiskverbimas, užrašomas milimetrais. Chloridų difuzijos koeficientas apskaičiuojamas pagal (3) formulę [51]:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239 \cdot (273 + T) \cdot L}{(U - 2) \cdot t} \cdot (x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T) \cdot L \cdot x_d}{U - 2}}); \quad (3)$$

čia: D_{nssm} – chloridų difuzijos koeficientas, $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$; U – įtampos vertė, V; T – temperatūra, °C; L – bandinio storis, mm; x_d – chloridų įsiskverbimo gylis betone, mm; t – bandymo trukmė, h.

2.2.8. Potenciometrinis korozijos tyrimas

Potenciometrinis korozijos tyrimo metu nustatoma bandinių korozijos tikimybė. Potenciometriniam korozijos tyrimui naudojami du elektrodai – lyginamasis elektrodas ir matavimo elektrodas, matuojantis potencialų skirtumą. Šiame darbe kaip lyginamasis elektrodas naudojamas vario ir vario sulfato elektrodas. Abu elektrodai jungiami į *Elcometer 331* potencialo matuoklį (žr.), kuris išmatuoja ir pateikia tarp elektrodų susidariusį potencialų skirtumą.

Potenciometrinio korozijos tyrimo atlikimo žingsniai:

- Prieš pradėdant tyrimą bandiniai sudrėkinami, jei nėra laikomi vandenyje, o lyginamasis elektrodas prisotinamas vario sulfato tirpalu.
- Matavimo elektrodas jungiamas prie bandinyje įbetonuotos armatūros, lyginamasis elektrodas liečiamas prie sudrėkinto betono.
- Užsirašomas potencialų skirtumas ir nustatoma armatūros korozijos tikimybė, pagal korozijos kriterijų lentelę (žr. 5 lentelė).



25 pav. Elcometer 331 potencialo matuoklis

5 lentelė. Plieno betone galimos korozijos kriterijai, naudojant įvairius standartinius elektrodus

Elektrodas, išmatuotas potencialas, mV				Korozijos sąlygos
Vario/vario sulfato	Sidabro/sidabro chlorido	Vandenilio	Kalomelio	
>-200	>-100	>+120	>-80	Nežymios (10 % korozijos tikimybė)
-200...-350	-100...-250	+120...-30	-80...-230	Vidutinės
<-350	<-250	<-30	<-230	Aukštos (>90 % korozijos tikimybė)
<-500	<-450	<-180	<-380	Ypač palankios

2.2.9. XRD tyrimas

Bandinių mineralinė kompozicija nustatyta atliekant XRD tyrimą, kuriam naudojamas Bruker D8 Advance difraktometras. Parametrai: $\text{CuK}\alpha$ spinduliuotė, filtruota naudojant Ni filtrą; 40 kV įtampa; 40 mA srovės stipris. Difrakcijos dėsningumas registruotas naudojant Bragg-Brentano geometriją 2 θ intervale nuo 3° iki 70°, esant 6°/min skenavimo greičiui. Rentgeno difrakcijos (XRD) spektrai buvo priskirti tam tikriems mineralams iš PDF-2 duomenų bazės panaudojant Oxford Cryosystems Crystallographica Search-Match programinę įrangą.

2.2.10. SEM mikroskopijos tyrimas

Vizualinis bandinių mikro-struktūros bandymas atliktas naudojant elektroninę mikroskopą Hitachi S-3400N Type II. Parametrai: vaizdo rezoliucija ≥ 3 nm arba ≥ 10 nm; 10 kV pagreitinimo įtampa, naudota atlikti patobulinimus.

2.2.11. Betono praspaudimo stiprio tyrimas

Šiame tyrime betono praspaudimo stipris yra nustatomas, siekiant įvertinti armatūros apsauginio sluoksnio, susidariusio dėl korozijos inhibitorių, įtaką. Šiam tyrimui naudojami korozijos tyrimams naudoti bandiniai, su įbetonuotu armatūros strypu.

Betono praspaudimo stiprio tyrimui naudojamas didysis „Toni Technik“ presas, atitinkantis bandymo mašinų techninių reikalavimų standartą LST EN 12390-4 [48]. Prese po bandiniu padedamos dvi metalinės plokštelės, su tarpu per vidurį bandinio, armatūros praspaudimui (žr. 26 pav.). Armatūros strypas apkraunamas vis didesne apkrova 400 N/s greičiu, kol bandinys suskyla, dėl praspautos armatūros (žr. 27 pav.).



26 pav. Praspaudimo stiprio tyrimas



27 pav. Suiręs bandinys po tyrimo

Maksimalią apkrovą registruoja kompiuterinė programa, o atlikus tyrimą su visais bandiniais, rezultatai apdorojami ir pateikiami diagramose.

3. Rezultatai

3.1. Cemento hidratacija

Šiame tyrime bandinių cemento hidratacija nustatoma pagal 2.2.5 skyrelyje pateiktą metodiką. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

6 lentelė. Bandinių, su natrio benzoatu, hidratacijos temperatūros ir laikai

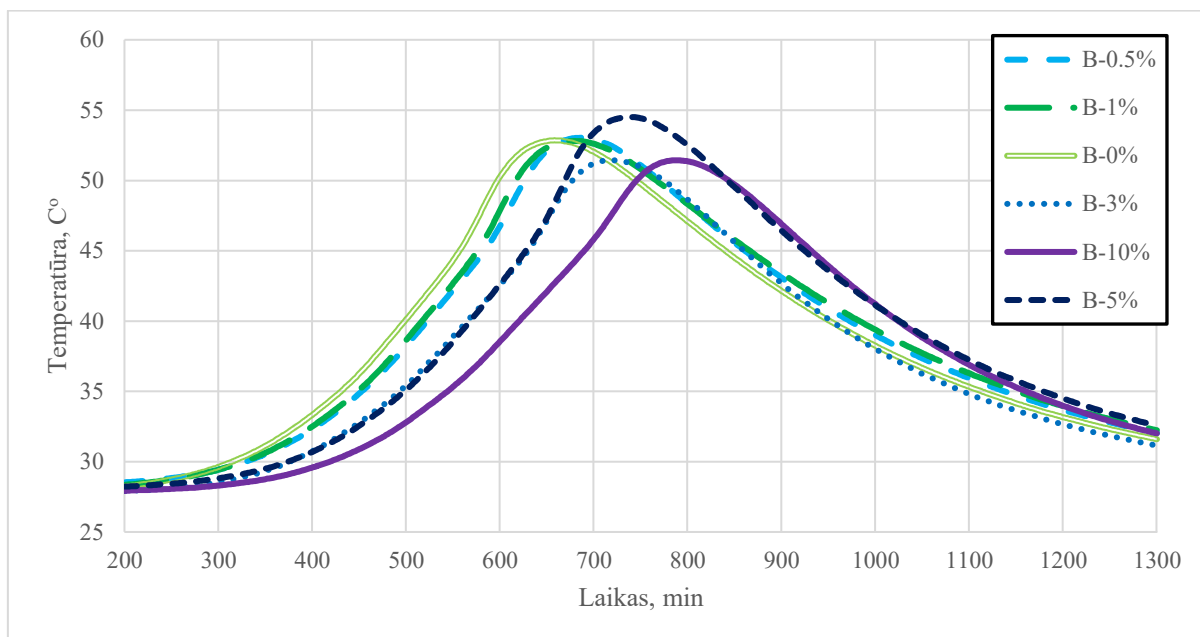
Koncentracija	0%	0.5%	1%	3%	5%	10%
Didžiausia temperatūra, °C	52.86	52.82	53.05	51.45	54.52	51.44
Laikas, min	658	679	686	718	736	788

7 lentelė. Bandinių, su apelsinų žievelių ekstraktu, hidratacijos temperatūros ir laikai

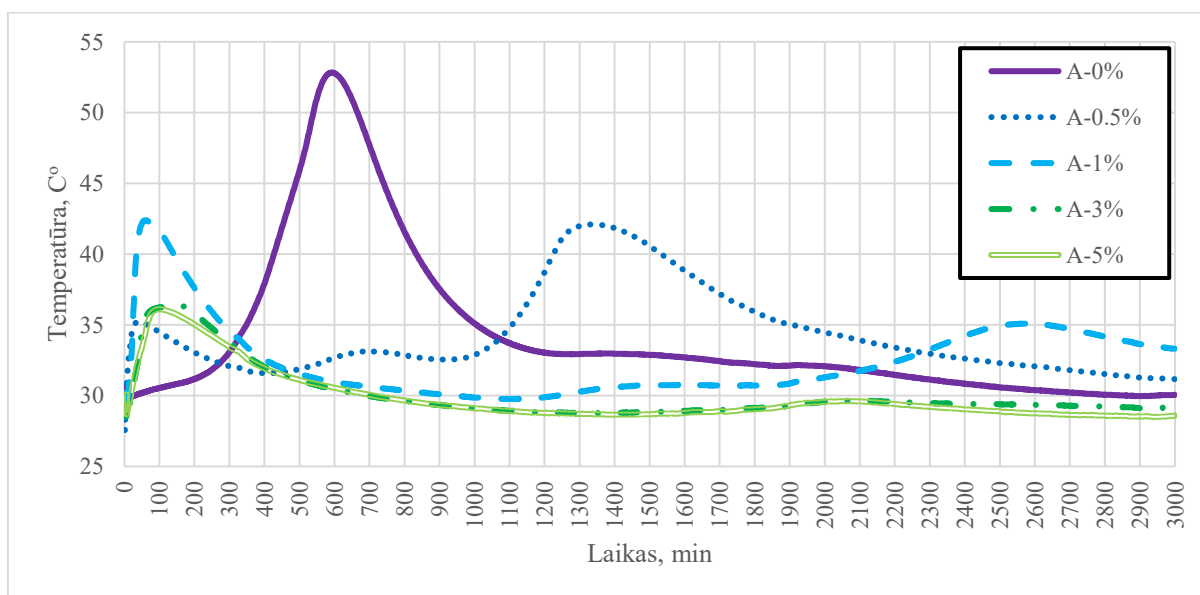
Koncentracija	0 %	0.5 %	1 %	3 %	5%
Didžiausia temperatūra, °C	52.83	42.1	42.39	36.46	36.11
Laikas, min	592	1328	60*	142*	99*

Iš gautų aukščiausių cemento hidratacijos temperatūrų rezultatų (žr. 6 ir 7 lentelėse), galima nustatyti, kad bandiniuose su natrio benzoatu yra pastebima nežymi hidratacijos temperatūros priklausomybė nuo inhibitoriaus koncentracijos (žr. 28 pav.). Kontrolinis bandinys aukščiausią hidratacijos temperatūrą pasiekė pirmasis, didinant natrio benzoato koncentraciją bandiniai vis vėliau pasiekė aukščiausias temperatūras, tačiau šis skirtumas yra nežymus, nes visi bandiniai aukščiausią hidratacijos temperatūrą pasiekė ne vėliau kaip po 130 min.

Bandiniuose su apelsinų žievelių ekstraktu tendencija yra panaši į bandinių su natrio benzoatu, t.y. didesnė inhibitoriaus koncentracija lemia lėtesnę hidrataciją, tačiau įtaka hidratacijos greičiui yra žymiai didesnė (žr. 29 pav.). Pirmasis aukščiausią hidratacijos temperatūrą pasiekė kontrolinis bandinys (po 592 min.), kitas bandinys pasiekęs aukščiausią temperatūrą yra bandinys su 0,5 % apelsinų žievelių ekstrakto, tačiau tik po 1328 min. po bandinių suformavimo, t.y. 736 min arba daugiau nei 12 valandų skirtumas. Kitas suhidratavęs bandinys yra bandinys su 1 % ekstrakto koncentracija, kurio hidratacijos procesas pasibaigė po 2500-2600 min. po bandinių suformavimo, t.y. apie 12 valandų vėliau nei bandinio su 0,5 % koncentracija, tačiau aukščiausia šio bandinio temperatūra, buvo pasiekta per pirmąją valandą po bandinio suformavimo. Remiantis šiais pirmais trimis bandiniais galima pastebėti, kad didinant ekstrakto koncentraciją, mažėja didžiausia hidratacijos temperatūra, hidratacijos procesas trunka vis ilgiau ir didėja, pirmą valandą po bandinių suformavimo pasiekiamą temperatūrą. Galima daryti išvadą, kad cukraus kiekis apelsinų žievelių ekstrakto, stipriai lėtina hidratacijos procesą betone. Dėl paskutiniųjų bandinių su 3 ir 5 % koncentracijomis, kurių temperatūrų padidėjimo grafikuose nematome, bandymas buvo pratęstas iki 5 dienų, tačiau temperatūros padidėjimo nustatyti vis tiek nepavyko. Šiuos rezultatus, vaizduojančius, kad bandiniuose turėjo neįvykti hidratacija, patvirtina tai, kad bandiniai su šiomis aukščiausiomis koncentracijomis net ir po 5 dienų buvo labai silpni ir trapūs.



28 pav. Bandinių su natrio benzoatu temperatūros kitimo grafikas



29 pav. Bandinių su apelsinų žievelių ekstraktu temperatūros kitimo grafikas

3.1.1. Apelsinų žievelių ekstrakcijos efektyvumas

Šio tyrimo metu apelsinų žievelių ekstraktas buvo gaminamas naudojant maceracijos ekstrakcijos metodą, kuris nepasižymi aukštu efektyvumu ir dėl to, jo efektyvumui didelę įtaką turi ekstrakcijos sąlygos. Apskaičiuojant ekstrakcijos efektyvumą, įvertiname pritaikytų ekstrakcijos sąlygų tinkamumą. Ekstrakcijos efektyvumo skaičiavimas yra elementarus, reikia suskaičiuoti santykį tarp išgauto ekstrakto ir pirminės žaliavos svorių.

Ekstraktui gaminti buvo sunaudota 355 g džiovintų apelsinų žievelių, kurias laikant etanolyje, buvo pagaminta 87 g sausos formos apelsinų žievelių ekstrakto. Apskaičiuotas 24,5 % ekstrakcijos efektyvumas, kuris yra arti galimo didžiausio maceracijos efektyvumo. Galima daryti išvadą, kad pritaikytos ekstrakcijos sąlygos yra tinkamos apelsinų žievelių ekstrakto gamybai.

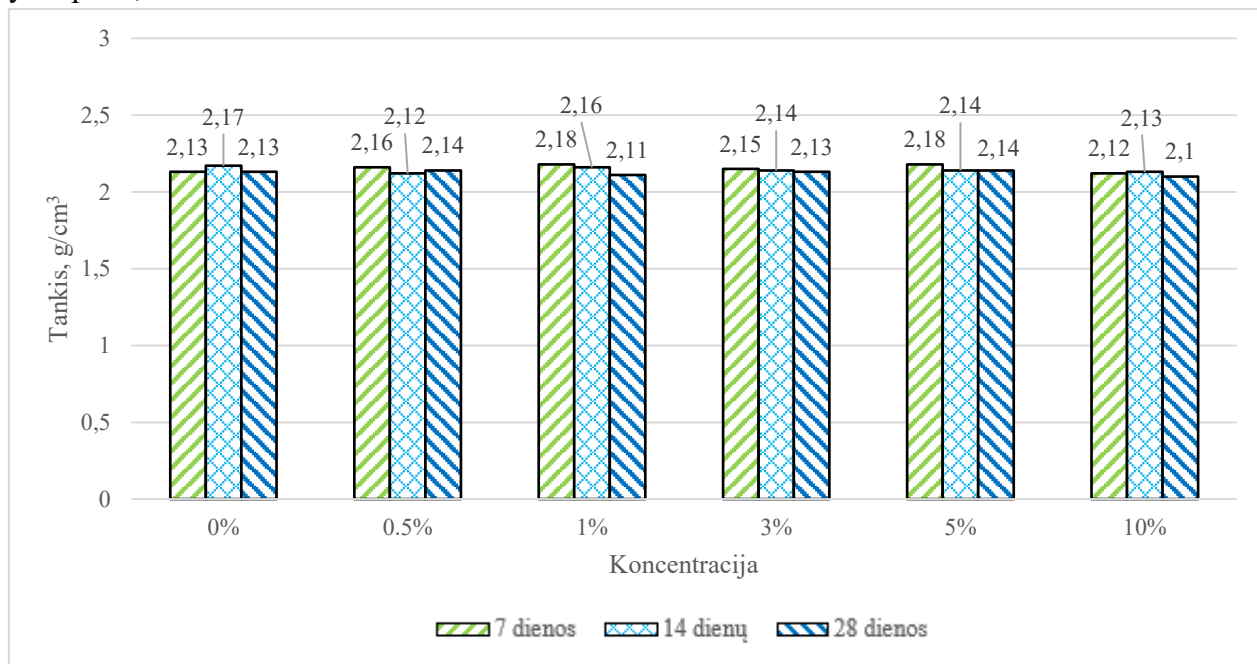
3.2. Fizikinės-mechaninės savybės

Šiame skyrelyje pateikiami tiriamų bandinių fizikinių-mechaninių savybių tyrimų rezultatai. Analizuojamos savybės apima betono tankį, lenkiamąjį ir gniuždomąjį stiprį, kurie leidžia įvertinti tiriamų korozijos inhibitorių įtaką betono struktūrai, atsparumą išoriniams poveikiams ir tinkamumą praktiniam panaudojimui.

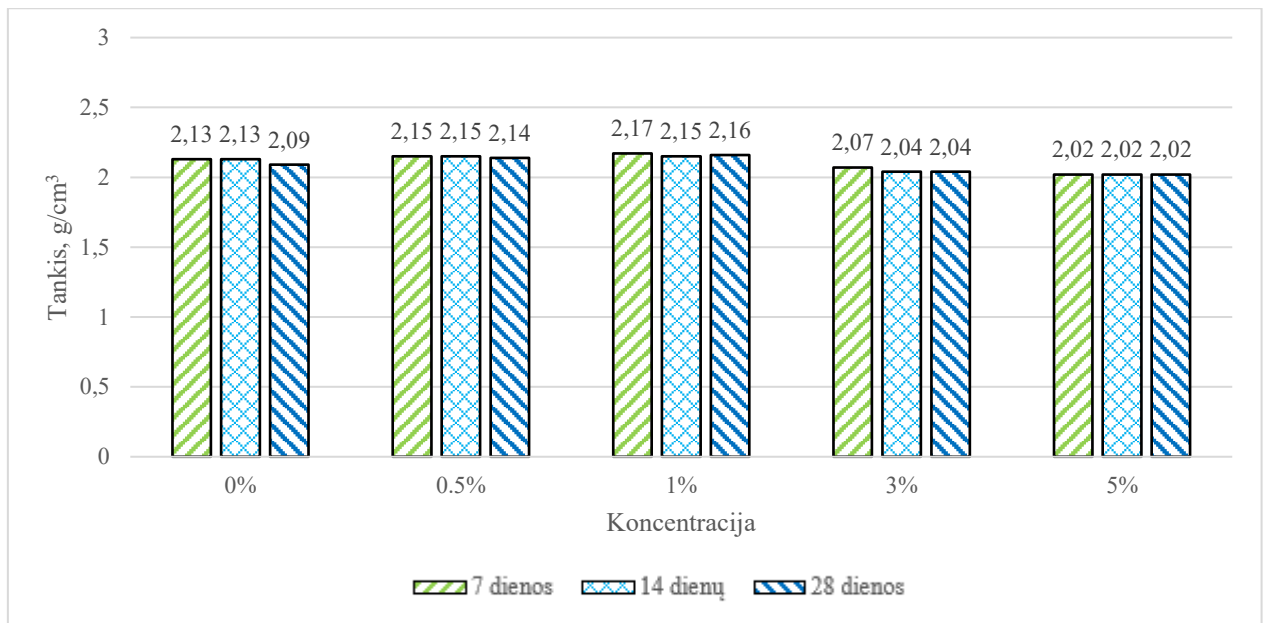
3.2.1. Tankis

Šiame tyrime bandinių tankis nustatomas pagal 2.2.2 skyrelyje pateiktą metodiką praėjus 7, 14 ir 28 dienoms po bandinių suformavimo. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

Nustatytuose tankiuose galima pastebėti, kad bandiniuose su natrio benzoatu tankiai yra pastovūs, beveik nekintantys, keičiant inhibitoriaus koncentraciją. Šių bandinių tankių skirtumas yra iki 4 % (žr. 30 pav.). Bandiniuose su apelsinų žievelių ekstraktu taip pat stebimi tik minimalūs tankių skirtumai, tačiau tai kinta nuo 3 % koncentracijos, nuo kurios sutrinka betono hidratacija ir tuo pačiu sumažėja bandinių tankis. Didžiausias pastebimas skirtumas yra tarp 1 % ir 5 % koncentracijų, kuris yra apie 7,5 %.



30 pav. Betono tankio priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos



31 pav. Betono tankio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos

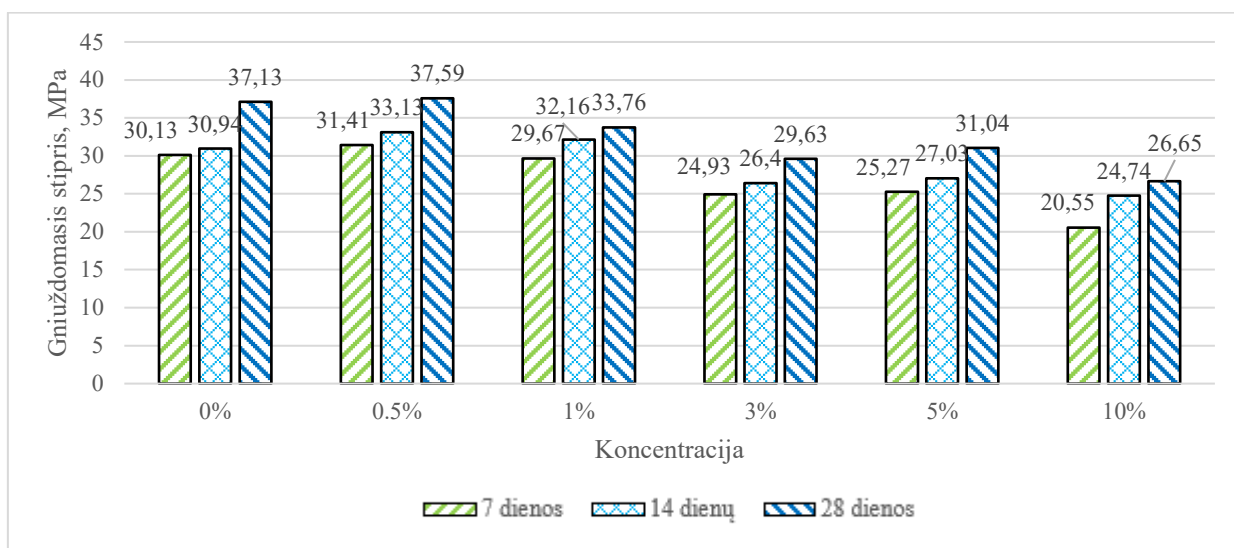
3.2.2. Gniuždomasis stipris

Šiame tyrime betono gniuždomasis stipris nustatomas pagal 2.2.4 skyrelyje pateiktą metodiką praėjus 7, 14 ir 28 dienoms po bandinių suformavimo. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

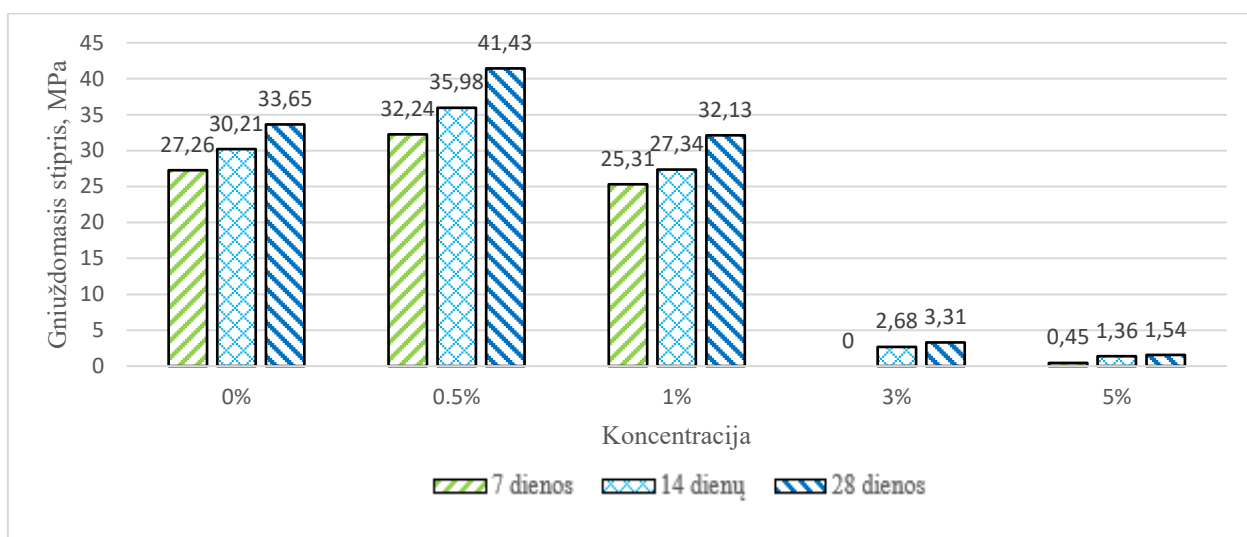
Išanalizavus bandinių su natrio benzoatu gniuždomuosius stiprius (žr. 32 pav.), pastebima aiški priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos. Naudojant 0,5 % natrio benzoato gniuždomasis stipris visose stadijose (po 7, 14 ir 28 dienų) pasiekia didesnę gniuždomąją stiprį lyginant su kontroliniais bandiniais, skirtumas siekia 1-4 %, didžiausias padidėjimas pastebimas ankstyvajame stipryje (žr. . Naudojant didesnę nei 0,5 % koncentraciją, gniuždomasis stipris palaipsniui mažėja, naudojant didžiausią tiriamą 10 % natrio benzoato koncentraciją, pasiekiamas net apie 40 % mažesnis gniuždomasis stipris. Bandinių su natrio benzoatu lenkiamųjų ir gniuždomųjų stiprių priklausomybės nuo ekstrakto koncentracijos nesutampa, to priežastis galimai yra lenkiamų bandinių paviršių nelygiagretumas, kuris aprašytas ir 2.3.3 poskyryje.

Bandinių su apelsinų žievelių ekstraktu gniuždomojo stiprio rezultatuose (žr. 33 pav.) pastebima labai panaši priklausomybė kaip ir bandiniuose su natrio benzoatu. Didžiausias gniuždomasis stipris pasiekiamas bandiniuose su 0,5 % apelsinų žievelių ekstrakto, kuris yra apie 23 % didesnis už kontrolinių bandinių gniuždomąją stiprį po 28 dienų po bandinių suformavimo. Naudojant didesnes nei 0,5 % koncentracijas, gniuždomasis stipris mažėja. Naudojant 1% koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktą pasiekiamas apie 5 % mažesnis gniuždomasis stipris, lyginant su kontroliniu bandiniu, tačiau naudojant 3 arba 5 % koncentracijos ekstraktą betono hidratacija yra stipriai paveikiama ir po 28 dienų pasiekiamas tik 1,5 - 3,5 MPa gniuždomasis stipris, kuris yra apie 10 - 20 kartų mažesnis už kontrolinio bandinio. Tokie rezultatai pasiekti dėl 3 % ir 5 % bandinių sutrikdytos hidratacijos (žr. 29 pav.). Bandinio su 3 % apelsinų žievelių ekstrakto koncentracija, gniuždomasis stipris neturi reikšmės, dėl stiprio artimo nuliui ir per didelio gniuždymo stiprio, nesitikint tokių rezultatų. Bandant kitus didesnius ekstrakto koncentracijų bandinius, gniuždymo stipris buvo atitinkamai pakoreguotas (žr. 33 pav.). Bandinių su apelsinų žievelių ekstraktu lenkiamųjų ir gniuždomųjų stiprių priklausomybės nuo ekstrakto koncentracijos sutampa, naudojant 0,5 %

koncentracijos ekstraktą padidėja, koncentraciją toliau didinant, vis mažėja, o pasiekus kritinę 3 % reikšmę, drastiškai sumažėja.



32 pav. Betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos



33 pav. Betono gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos

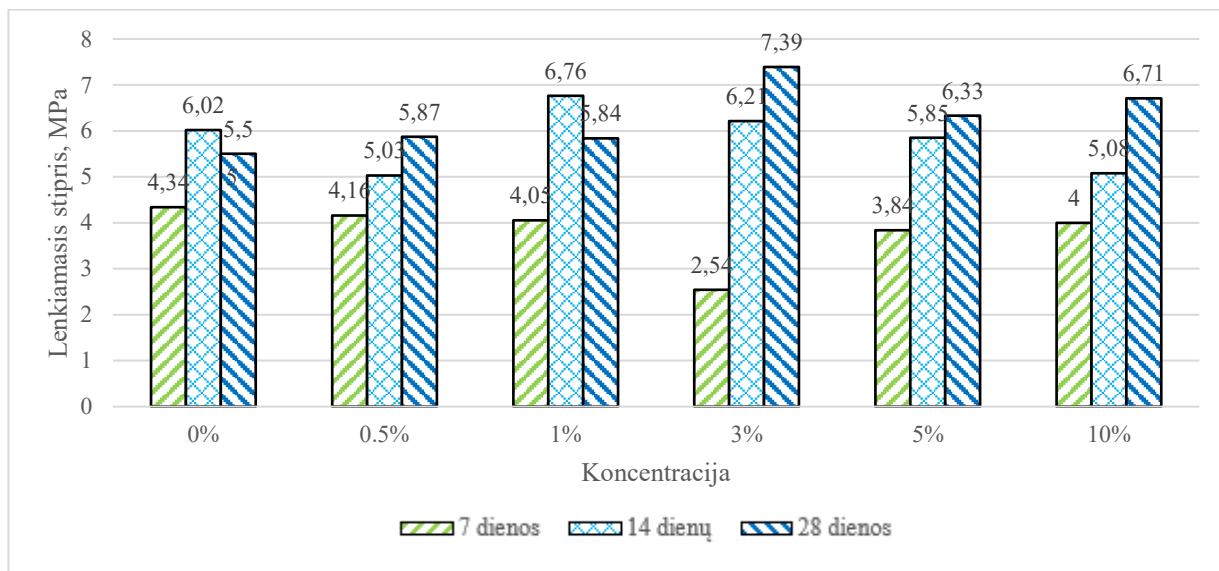
3.2.3. Lenkiamasis stipris

Šiame tyrime betono lenkiamasis stipris nustatomas pagal 2.2.3 skyrelyje pateiktą metodiką praėjus 7, 14 ir 28 dienoms po bandinių suformavimo. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

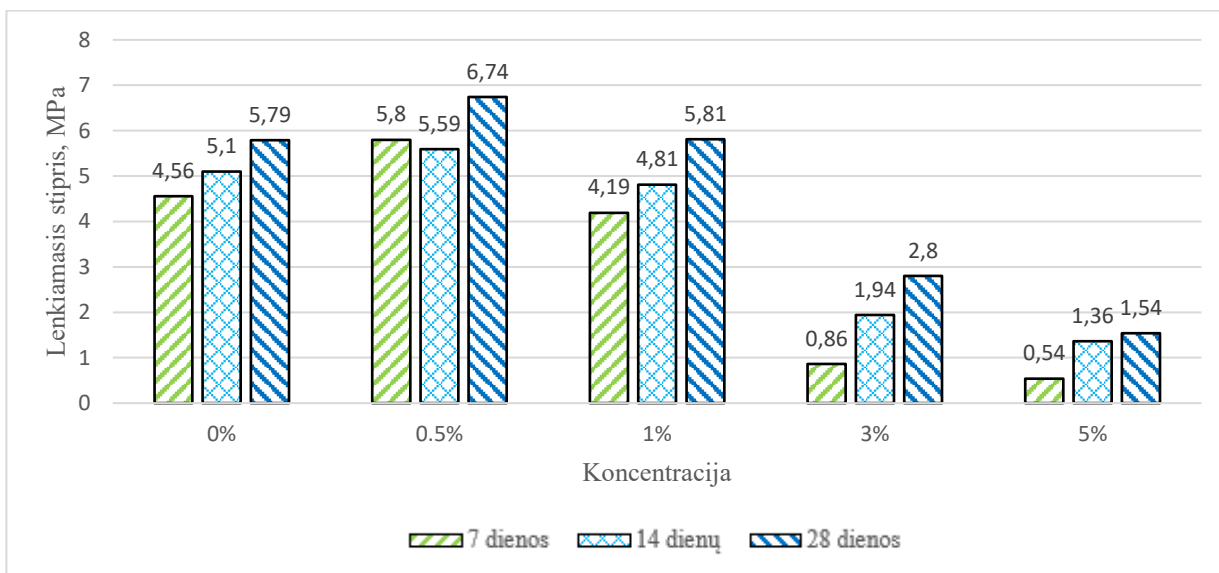
Išanalizavus gautus lenkiamųjų stiprių rezultatus (žr. 34 pav.), pastebėta, kad bandiniuose su natrio benzoatu aiški lenkiamojimo stiprio priklausomybė nuo inhibitoriaus koncentracijos nepastebima. Po 7, 14 ir 28 dienų mažiausias lenkiamasis stipris pastebimas skirtingų koncentracijų bandiniuose (žr. 34 pav.). Šie netikslumai galėjo atsirasti dėl nelygiagrečių lenkiamų paviršių, susidariusių kietėjimo metu.

Kita vertus bandinių su apelsinų žievelių ekstraktu rezultatuose galima pastebėti aiškią tendenciją, po 7, 14 ir 28 dienų, didžiausią lenkiamąjį stiprį pasiekė bandiniai su 0,5 % koncentracija (žr. 35 pav.).

Vienintelis 0,5 % koncentracijos bandinių rezultatas iškreipiantis rezultatus yra stipris po 14 dienų, kuris vaizduoja sumažėjusį stiprį, lyginant su stipriu, po 7 dienų. Kontroliniuose ir 1 % koncentracijos bandiniuose lenkiamieji stipriai po 28 dienų beveik identiški, tačiau bandiniuose po 7 dienų, kuriuose 1 % koncentracijos bandinio stipris yra apie 9 % mažesnis lyginant su kontroliniu, tačiau po 14 dienų šis skirtumas mažėja. Šis ankstyvojo stiprio skirtumas atsiranda dėl apelsinų žievelių ekstrakto, kaip lėtiklio, savybių. Šios savybės lėtina betono hidrataciją ir sumažina ankstyvąjį stiprį. 3 % ir 5 % bandiniai visose kietėjimo stadijose pasižymėjo žymiai mažesniais lenkiamaisiais stipriais, kurie atsirado dėl per didelės inhibitoriaus koncentracijos ir dėl to sutrikusio hidratacijos proceso.



34 pav. Betono lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos

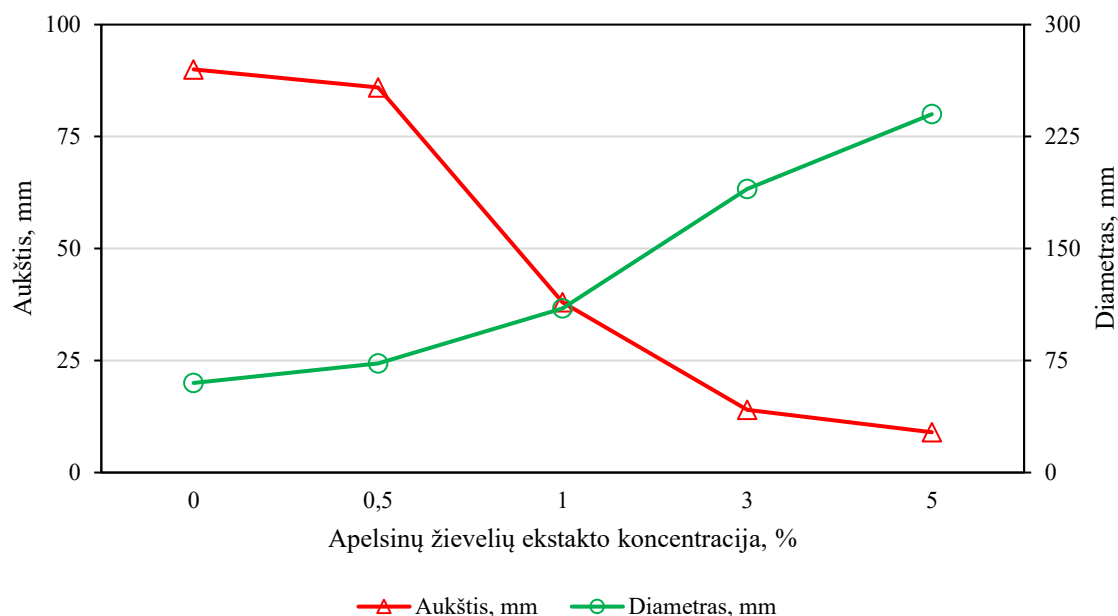


35 pav. Betono lenkiamojo stiprio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos

3.2.4. Betono pasklidimas - slankumas

Šiame tyrime betono slankumas nustatomas pagal 2.2.6 skyrelyje pateiktą metodiką. Bandymas atliekamas tik bandiniams su apelsinų žievelių ekstraktu, dėl pastebėtų konsistencijos pokyčių, keičiant ekstrakto koncentraciją. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

Išanalizavus bandinių, su apelsinų žievelių ekstraktu, aukščio ir diametro pokyčius, galima pastebėti aiškią slankumo priklausomybę nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos. Naudojant didesnę apelsinų žievelių ekstrakto koncentraciją, betono konsistencija vis labiau skystėja (žr. 36 pav.). Panaudojus 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktą bandinio aukštis sumažėja tik apie 5 %, tačiau didžiausias pokytis pastebimas panaudojus 1 % koncentracijos ekstraktą, kuris bandinio aukštį sumažina apie 140 %.



36 pav. Betono pasklidimo ir slankumo priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto priklausomybės

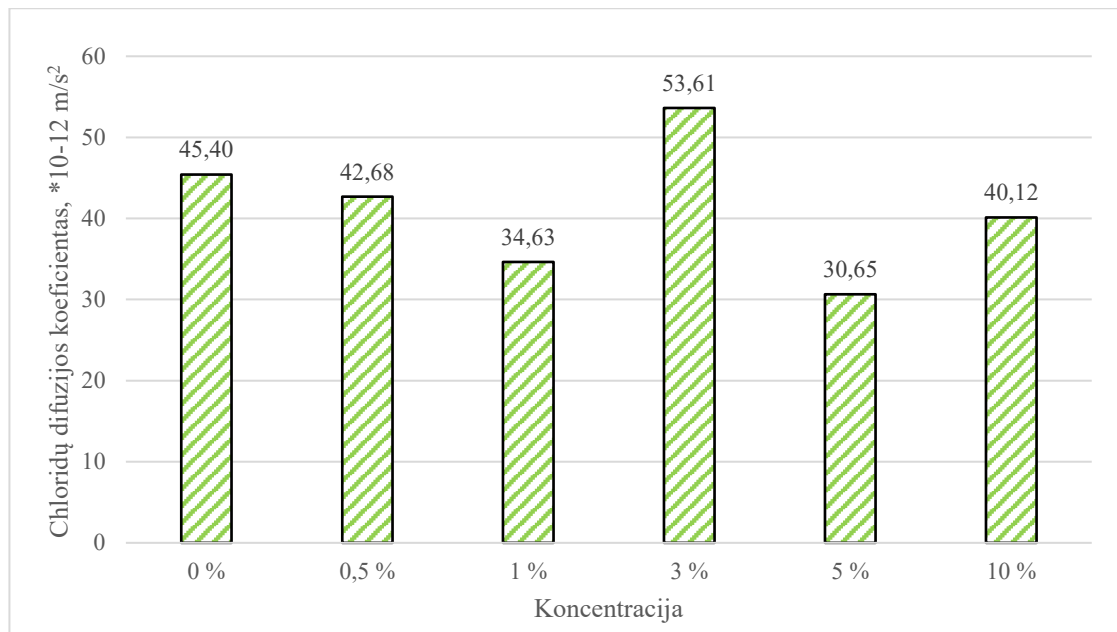
3.2.5. Chloridų difuzija

Šiame tyrime betono chloridų difuzijos greitis nustatomas pagal 2.2.7 skyrelyje pateiktą metodiką praėjus 28 dienoms po bandinių suformavimo, su pilnai sukietėjusiais bandiniais. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

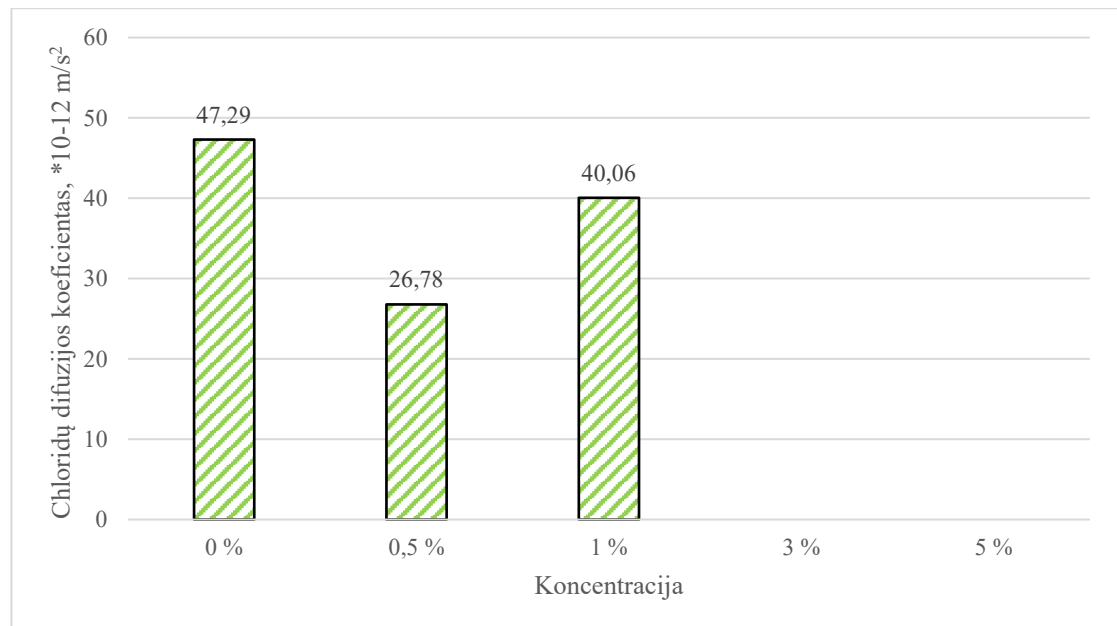
Išanalizavus gautas chloridų difuzijos koeficiento reikšmes, galima pastebėti, kad aiškos tendencijos natrio benzoato bandinių rezultatuose nenustatyta. Bandiniuose su 1 % ir 5 % natrio benzoato koncentracija chloridų difuzija sulėtėja 23 - 39 % (žr. 37 pav.), tačiau bandiniuose su 3 % koncentracija, rezultatas yra blogiausias iš visų bandinių, todėl reikėtų kartoti bandymą ir įsitikinti ar bandinys nebuvo pažeistas, o rezultatai iškreipti.

Kita vertus, bandiniuose su apelsinų žievelių ekstraktu, pastebima aiški chloridų difuzijos priklausomybė, nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos. Bandinyje su 0,5 % ekstrakto koncentracija pasiekama 77 % lėtesnė chloridų difuzija, lyginant su kontroliniu bandiniu. Šis rezultatas patvirtinamas 0,5 % koncentracijos bandinio padidėjusio gniuždomojo stiprio. Bandiniuose su 3 % ir 5 % ekstrakto koncentracijomis chloridų difuzija negalėjo būti išmatuota, nes:

- 3 % koncentracijos bandinyje chloridų difuzija buvo per greitą, per dvigubai trumpesnę laiką, įsiskverbė kelis kartus giliau ir taip persiskverbė per visą bandinį.
- 5 % koncentracijos bandinio nebuvo įmanoma įdėti į tyrimo formą, dėl per mažo stiprio ir trapumo. Pabandžius formą apspausti, pagal 2.2.7 pateiktą metodiką, bandinys tiesiog sutrupėjo.



37 pav. Betono chloridų difuzijos koeficiento priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos

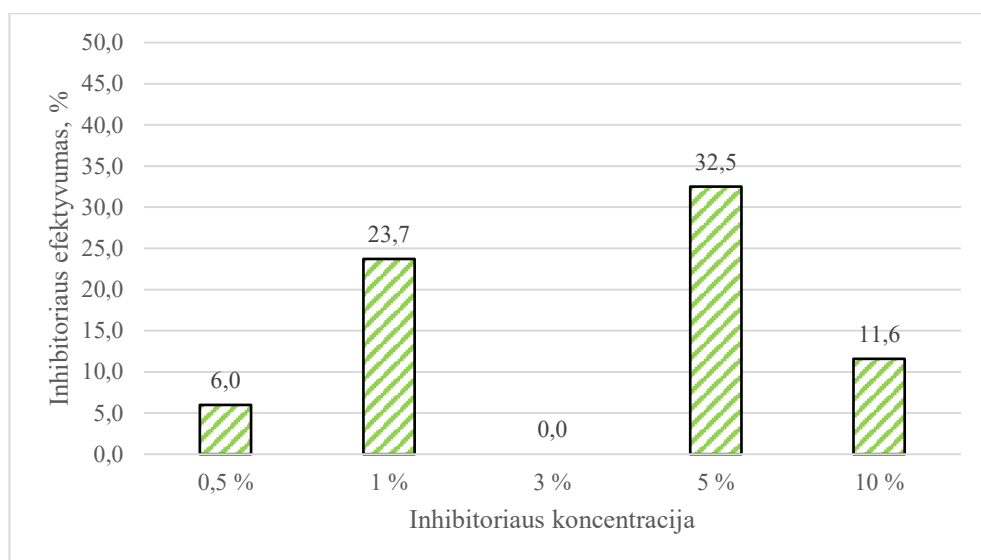


38 pav. Betono chloridų difuzijos koeficiento priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos

3.2.6. Korozijos inhibitorių efektyvumas

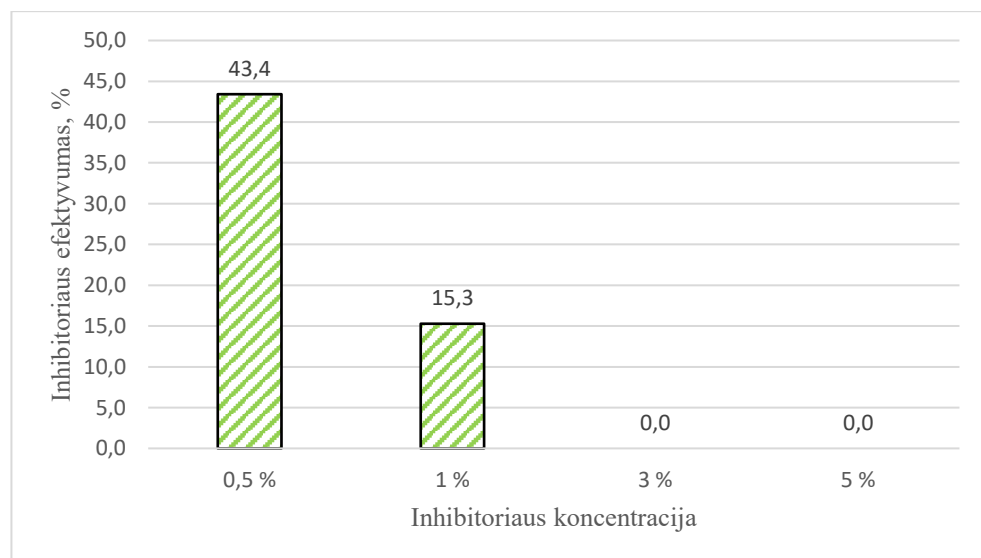
Šiame tyrime inhibitorių efektyvumas nustatomas, pagal chloridų difuzijos slopinimą. Inhibitoriaus efektyvumas apskaičiuojamas vertinant chloridų difuzijos sumažinimą su chloridų difuzija kontroliniame bandinyje.

Išanalizavus natrio benzoato koncentracijų efektyvumus, galima pastebėti, kad rezultatuose aiškios tendencijos nėra, tačiau didžiausias efektyvumas pasiekiamas su 5 % koncentracija, kuri pasiekia 32,5 % efektyvumą (žr. 39 pav.). Vienintelė iš konteksto išskirianti reikšmė yra su 3 % natrio benzoato koncentracija, kuri nepasiekė jokio efektyvumo arba neigiamą efektyvumą, nes buvo pasiekti blogesni rezultatai, nei su kontroliniu bandiniu.



39 pav. Natrio benzoato koncentracijų efektyvumai slopinant chloridų difuziją

Išanalizavus natrio benzoato koncentracijų efektyvumus, galima pastebėti rezultatų kitimo tendenciją, kuri parodo, kad 0,5 % koncentracija yra pati efektyviausia, su pasiektu 43,4 % efektyvumu, o toliau didinant koncentraciją efektyvumas sparčiai mažėja. Naudojant 3 % ir 5 % koncentracijas efektyvumas nepasiekiamas, nes chloridų difuzija buvo per didelė, kad būtų galima išmatuoti arba bandiniai buvo per silpni bandymui atlikti.

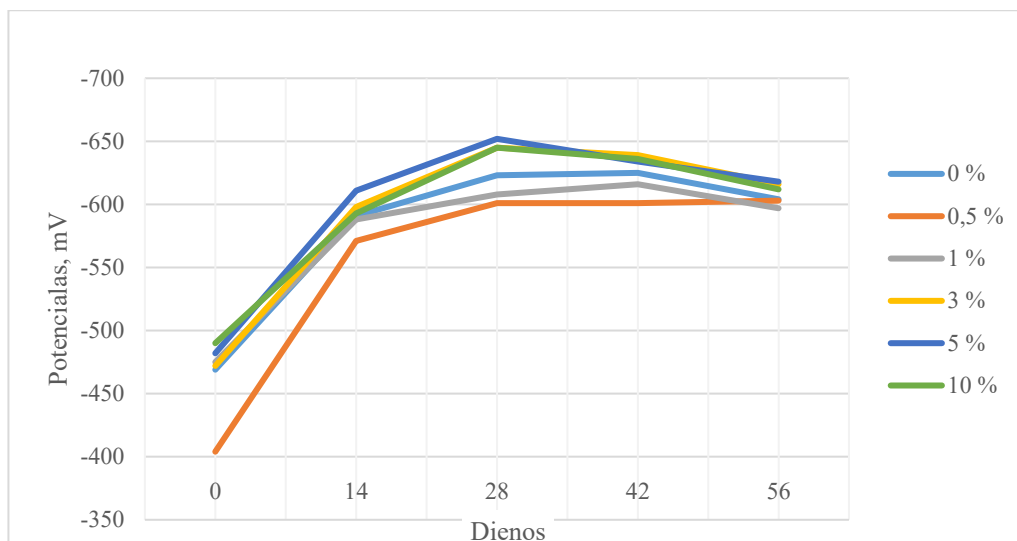


40 pav. Apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijų efektyvumai slopinant chloridų difuziją

3.2.7. Potenciometrinis korozijos tyrimas

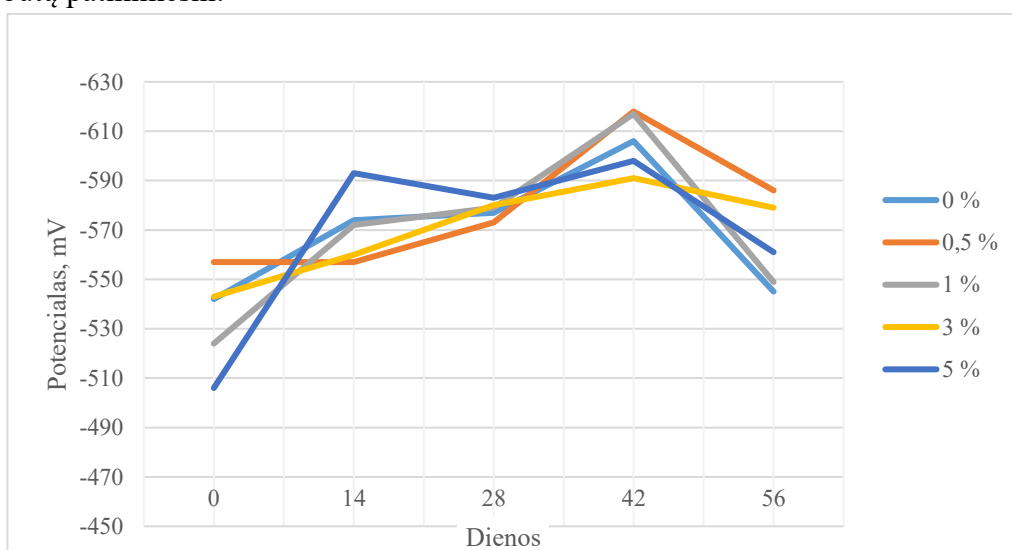
Šiame tyrime armatūros korozijos tikimybė nustatoma atliekant potenciometrinį korozijos tyrimą pagal 2.2.8 skyrelyje pateiktą metodiką. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

Išanalizavus bandinių, su natrio benzoatu, potenciometrinio tyrimo rezultatus (žr. 41 pav.), galima pastebėti, kad rezultatai kinta nechaotiškai, tačiau juose aiškos tendencijos nepastebima. Galima daryti išvadą, kad natrio benzoatas nedaro įtakos betono kalkių išplovimui.



41 pav. Bandinių, su natrio benzoatu, potenciometrinio tyrimo rezultatai

Išanalizavus bandinių, su apelsinų žievelių ekstraktu, potenciometrinio tyrimo rezultatus (žr. 42 pav.), galima pastebėti, kad rezultatai kinta chaotiškai, todėl tendencijos rezultatuose nustatyti neįmanoma. Galima daryti tokią pačią išvadą, kaip ir bandiniams su natrio benzoatu, kad apelsinų žievelių ekstraktas neturi įtakos betone esančių kalkių išplovimui, tačiau bandymą reikėtų pakartoti, kad rezultatai būtų patikimesni.



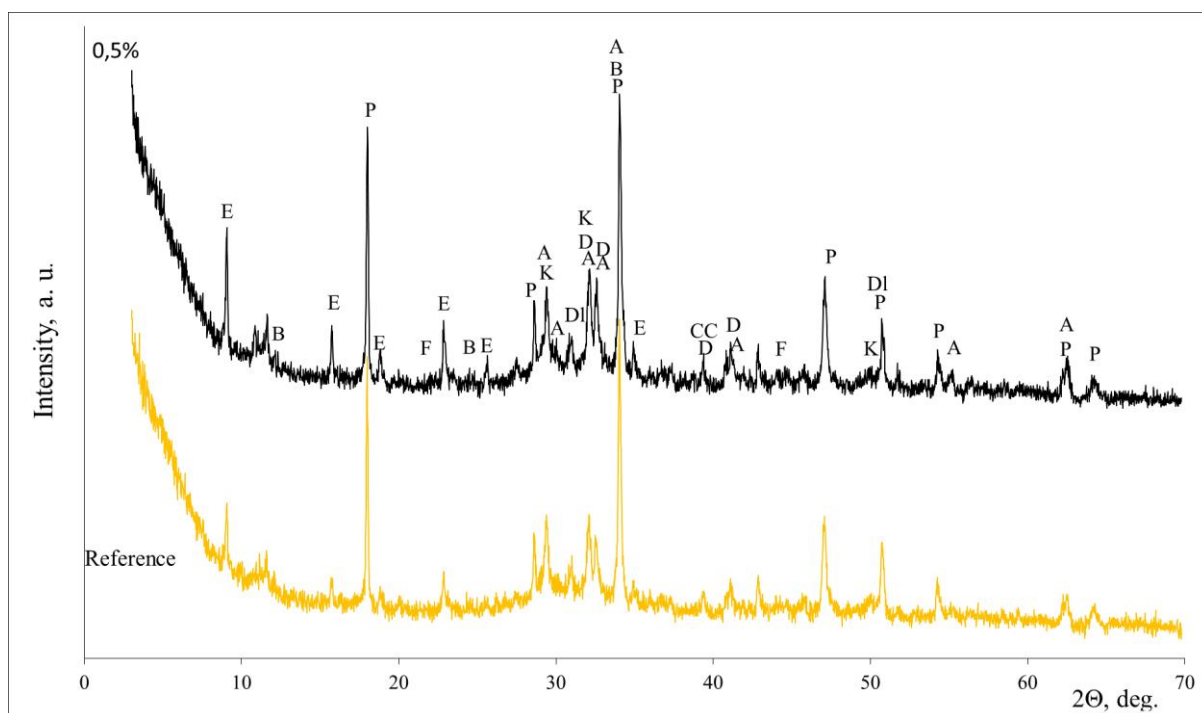
42 pav. Bandinių, su apelsinų žievelių ekstraktu, potenciometrinio tyrimo rezultatai

3.2.8. XRD tyrimas

Šiame tyrime bandinių mineralinė kompozicija nustatoma pagal 2.2.9 skyrelyje pateiktą metodiką praėjus ne mažiau nei 28 dienoms po bandinių suformavimo, su pilnai sukietėjusiais bandiniais. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

Tyrimas atliktas tik kontroliniam bandiniui ir bandiniui su 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktu, kaip geriausius rezultatus pasiekiančiu bandiniu. Iš XRD tyrimo rezultatų, galima nustatyti žymų etringito pagausėjimą, tai reiškia, kad apelsinų žievelių ekstraktas skatina etringito susidarymą, kuris tankina betono struktūrą. XRD tyrimo rezultatai patvirtina bandinių su 0,5 % koncentracijos

apelsinų žievelių ekstraktu gniuždomojo stiprio ir chloridų difuzijos rezultatus. Tankesnė betono struktūra lemia, tiek stipresnį betoną, tiek lėtesnį ir sudėtingesnį chloridų įsiskverbimą į betoną.



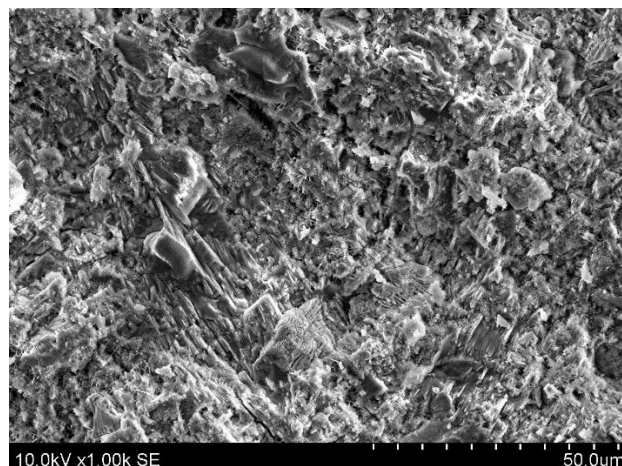
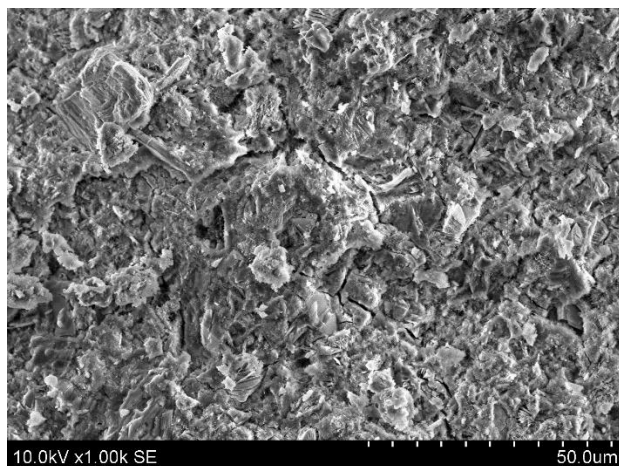
43 pav. XRD tyrimo rezultatai kontroliniam bandiniui ir bandiniui su 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktu

čia: P – portlanditas $\text{Ca}(\text{OH})_2$; E – etringitas $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$; A – alitas $\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$; D – larnitas $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$; K – kalcio silikato hidratas $\text{Ca}_{1,5}\text{SiO}_{3,5}\cdot x\text{H}_2\text{O}$; B – braunmilleritas $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$.

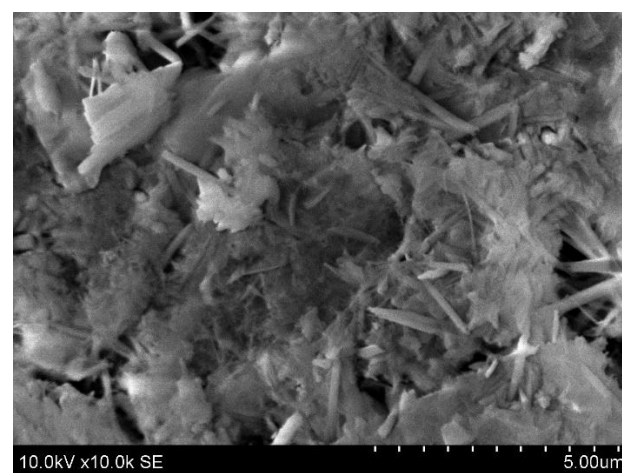
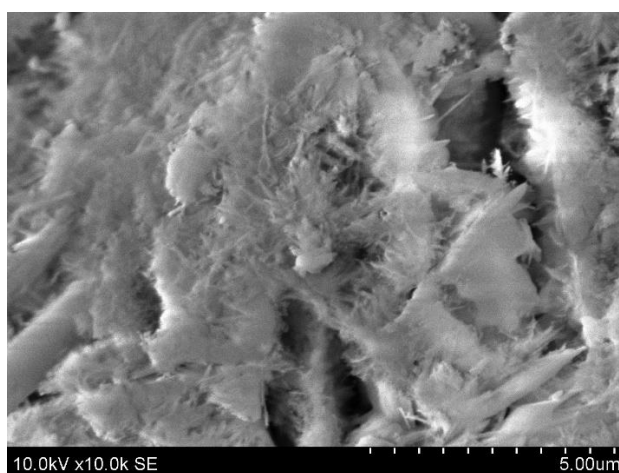
3.2.9. SEM mikroskopijos tyrimas

Šiame tyrime SEM mikroskopijos tyrimas atliekamas pagal 2.2.9 skyrelyje pateiktą metodiką praėjus ne mažiau nei 28 dienoms po bandinių suformavimo, su pilnai sukietėjusiais bandiniais. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

SEM tyrimas kaip XRD tyrimas, buvo atliekamas tik kontroliniam bandiniui ir bandiniui su 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktu. Priartinus bandinių mikrostruktūrą 1 000 kartų yra sunku pastebėti sutankėjusią bandinio su apelsinų žievelių ekstraktu struktūrą (žr. 44 pav.), tačiau priartinus 10 000 kartų, aiškiai matome sutankėjusią bandinio su ekstraktu struktūrą, lyginant su kontrolinio bandinio struktūra bei matomos etringito adatėlės (žr. 45 pav.). SEM mikroskopijos tyrimai patvirtina XRD tyrimo rezultatus, rodančius, kad bandinio su 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktu struktūra yra sutankėjusi dėl padidinto etringito kiekio.



44 pav. Kontrolinio bandinio (kairėje) ir bandinio su 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktu (dešinėje) mikrostruktūra (x1000)

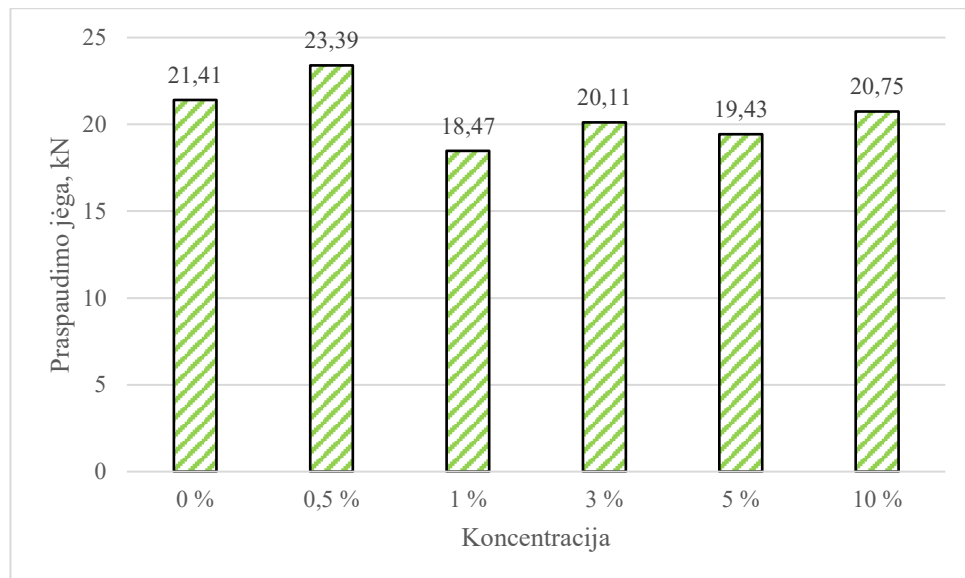


45 pav. Kontrolinio bandinio (kairėje) ir bandinio su 0,5 % koncentracijos apelsinų žievelių ekstraktu (dešinėje) mikrostruktūra (x10000)

3.2.10. Betono praspaudimo stiprio tyrimas

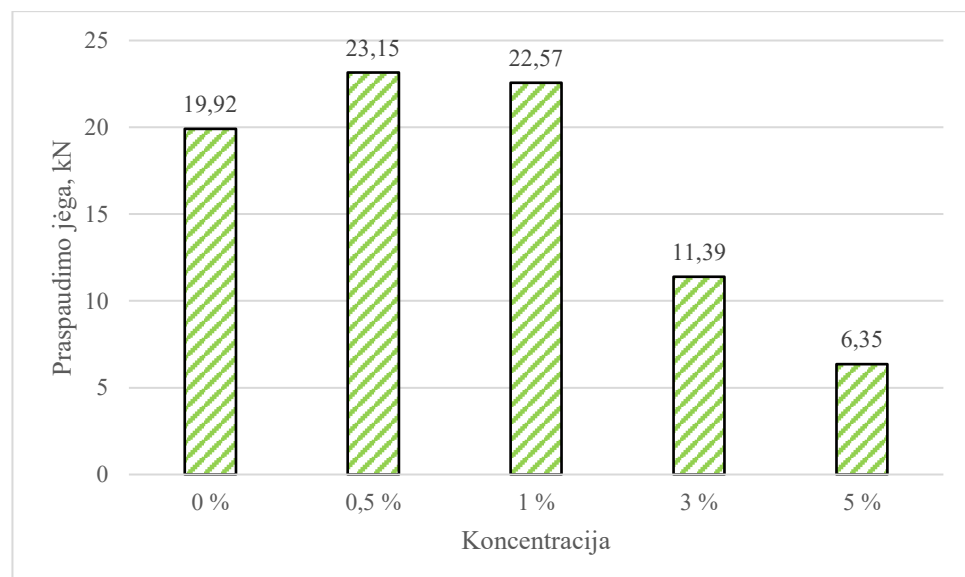
Šiame tyrime betono praspaudimo stipris nustatomas pagal 2.2.11 skyrelyje pateiktą metodiką praėjus nemažiau kaip 28 dienoms po bandinių suformavimo, su pilnai sukietėjusiais bandiniais. Rezultatai palyginami tarpusavyje ir su kontrolinių bandinių rezultatais.

Išanalizavus bandinių su natrio benzoatu praspaudimo stiprius, pastebima aiški priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos. Naudojant 0,5 % natrio benzoato praspaudimo stipris yra didžiausias, naudojant didesnę koncentraciją stipris sumažėja (žr. 46 pav.). Praspaudimo stipris kinta proporcingai gniuždomajam stipriui, todėl galima daryti išvadą, kad praspaudimo stiprį labiausiai paveikia betono gniuždomasis stipris.

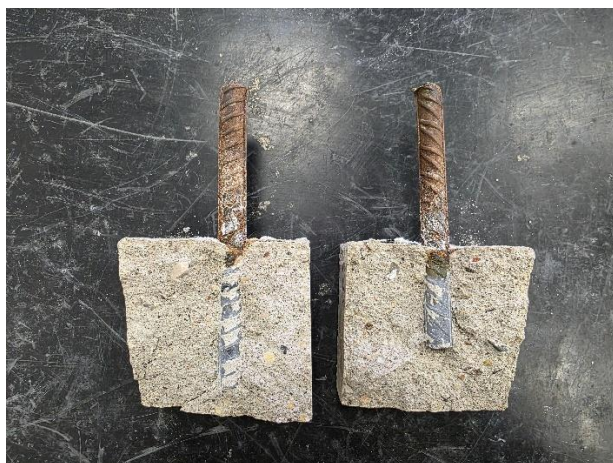


46 pav. Betono praspaudimo stiprio priklausomybė nuo natrio benzoato koncentracijos

Bandinių su apelsinų žievelių ekstraktu praspaudimo stiprio rezultatuose pastebima labai panaši priklausomybė kaip ir bandiniuose su natrio benzoatu. Didžiausias praspaudimo stipris pasiekimas bandiniuose su 0,5 % apelsinų žievelių ekstrakto, kuris yra apie 16 % didesnis už kontrolinių bandinių praspaudimo stiprį. Naudojant didesnes nei 0,5 % koncentracijas praspaudimo stipris mažėja (žr. 47 pav.), tačiau dėl sutrikusios 3 % ir 5 % koncentracijos bandinių hidratacijos, pasiektas žymiai mažesnis stipris ir tendencija matoma dar ryškiau. Iš šių rezultatų taip pat galima matyti, kad didžiausią įtaką praspaudimo stipriui turi betono gniuždomasis stipris, o armatūros apsauginis sluoksnis arba nedaro įtakos, arba ji yra minimali. Papildomai praspaudimo stiprio rezultatų tikslumą gali sumažinti nevienodi armatūrų įleidimo į bandinį gyliai, kurie pakeičia po armatūra esančio apsauginio betono sluoksnio storį ir tuo pačiu užbetonuotos armatūros paviršiaus plotą (žr. 48 pav.).



47 pav. Betono praspaudimo stiprio priklausomybė nuo apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijos



48 pav. Bandiniai po praspaudimo stiprio tyrimo

Išvados

Šiame tyrime buvo analizuojami du organiniai korozijos inhibitoriai – apelsinų žievelių ekstraktas ir natrio benzoatas. Pagrindinės bandymų rezultatų išvados:

1. Atlikus apelsinų žievelių ekstrakciją naudojant maceracijos metodą, pasiektas aukštas 24,5 % ekstrakcijos efektyvumas, lyginant su literatūros analizės rezultatais. Literatūros analizės metu nustatyta, kad didžiausias, maceracijos metodu pasiektas, ekstrakcijos efektyvumas retai viršija 25 %, todėl gautas rezultatas yra artimas maksimalioms literatūroje aprašytoms vertėms. Tai leidžia teigti, kad pasirinktos ekstrakcijos sąlygos buvo tinkamos, siekiant pasiekti didelį efektyvumą. Naudotos sąlygos: 70 % koncentracijos etanolis kaip tirpiklis, 1:10 džiovintų apelsinų žievelių ir etanolio santykis bei 7 dienų ekstrakcijos trukmė.
2. Įvertinus apelsinų žievelių ekstrakto ir natrio benzoato įtaką betono mechaninėms savybėms, nustatyta, kad abiejų inhibitorių poveikis betono gniuždomajam ir lenkiamajam stipriui yra stipriai priklausomas nuo naudojamos jų koncentracijos. Mažos koncentracijos (0,5 %) tiek natrio benzoato, tiek apelsinų žievelių ekstrakto darė teigiamą poveikį betono gniuždomajam stipriui. Naudojant 0,5 % natrio benzoato koncentraciją, gniuždomasis stipris po 28 dienų buvo apie 3 % didesnis, lyginant su kontroliniu bandiniu, didžiausias stiprio padidėjimas pastebėtas ankstyvojoje betono kietėjimo stadijoje. Analogiškai, naudojant 0,5 % apelsinų žievelių ekstrakto koncentraciją, betono gniuždomasis stipris reikšmingai padidėjo, tai lėmė 23 % didesnę gniuždomąjį stiprį lyginant su kontroliniu bandiniu.
Didinant inhibitorių koncentraciją virš 0,5 % betono mechaninės savybės blogėjo. Naudojant didžiausią ištirtą 10 % natrio benzoato koncentraciją gniuždomasis stipris sumažėjo apie 40 %, o naudojant 3 % ir 5 % apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijas, buvo pasiektas tik 2 - 3 MPa gniuždomasis stipris, dėl sutrikdytos hidratacijos. Lenkiamojo stiprio tyrimo rezultatai parodė, kad natrio benzoato poveikis nėra nuoseklus, aiškios tendencijos nustatyti nepavyksta, tuo tarpu apelsinų žievelių ekstrakto įtaka turi aiškią tendenciją – didžiausias stipris pasiektas naudojant 0,5 % koncentraciją, o ją didinant - stipris mažėjo.
3. Įvertinus apelsinų žievelių ekstrakto ir natrio benzoato inhibicijos efektyvumą silpninant chloridų difuziją, nustatyta, kad abiejų inhibitorių poveikis chloridų difuzijai yra stipriai priklausomas nuo naudojamos koncentracijos. Natrio benzoato bandiniuose aiški chloridų difuzijos rezultatų tendencija nenustatyta, tačiau bandiniai su 1 % ir 5 % koncentracijomis pasiekė atitinkamai 23 % ir 39 % lėtesnę chloridų difuziją, kas lėmė 32,5 % inhibitoriaus efektyvumą naudojant 5 % natrio benzoato koncentraciją.
Tuo tarpu apelsinų žievelių ekstrakto bandinių rezultatuose pastebima aiški chloridų difuzijos priklausomybė nuo inhibitoriaus koncentracijos. Naudojant 0,5 % ekstrakto koncentraciją chloridų difuzija sulėtėjo 77 % lyginant su kontroliniu bandiniu, o inhibitoriaus efektyvumas siekė 43,4 %, kas yra didžiausias efektyvumas iš visų natrio benzoato ir apelsinų žievelių ekstrakto koncentracijų. Didinant ekstrakto koncentraciją iki 3 % ir 5 %, chloridų difuzijos nebuvo galima išmatuoti, dėl per didelio difuzijos greičio arba per daug trapaus bandinio. Galima daryti išvadą, kad apelsinų žievelių ekstraktas naudojant 0,5 % koncentraciją yra efektyvesnis už natrio benzoatą slopinant chloridų difuziją betone.

Literatūros sąrašas

1. BOLZONI, Fabio; BRENNIA, Andrea ir ORMELLESE, Marco. Recent advances in the use of inhibitors to prevent chloride-induced corrosion in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. 154 (2022), pp. 106719. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884622000102..>
2. OKI, M.; AKINTOLA, S. A.; ADEDIRAN, A. A.; IKUBANNI, P. P. ir OGUNSEMI, B. T. Reinforcement bar Corrosion - Causes and Management. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1378 (2019), nr. 2.
3. BERTOLINI, Luca; ELSENER, Bernhard; PEDEFERRI, Pietro; REDAELLI, Elena ir POLDER, Rob B. *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. John Wiley & Sons, 2013. Prieiga per: https://books.google.lt/books?hl=lt&lr=&id=7B9sug5DDHkC&oi=fnd&pg=PP11&ots=Q4E-r9G0CW&sig=5kK9Rb_jUSgqImDtkbEEMFdFIIE&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [žiūrėta Mar 30, 2025].
4. ABDULSADA, Shaymaa Abbas ir AL-MOSAWI, Ali I. Analysis of corrosion rate, inhibition efficiency, and economic cost of XD3 reinforced concrete related to inhibitor and plasticiser types. *Engineering Research Express*, vol. 5 (2023), nr. 3, pp. 035032. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1088/2631-8695/acee46>. [žiūrėta Mar 30, 2025].
5. ZOMORODIAN, Amir ir BEHNOOD, Ali. Review of Corrosion Inhibitors in Reinforced Concrete: Conventional and Green Materials. *Buildings*, vol. 13 (2023), nr. 5.
6. AHMED E S, Junaid ir GANESH, G. Mohan. A Comprehensive Overview on Corrosion in RCC and Its Prevention Using Various Green Corrosion Inhibitors. *Buildings*, vol. 12 (2022), nr. 10, pp. 1682. Prieiga per: <https://jresm.org/article/resm2023-715st0324/>.
7. BEN HARB, Marwa; ABUBSHAIT, Samar; ETTEYEB, Naceur; KAMOUN, Madiha ir DHOUB, Adnene. Olive leaf extract as a green corrosion inhibitor of reinforced concrete contaminated with seawater. *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 13 (2020), nr. 3, pp. 4846–4856. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535220300204..>
8. SAJEDI, Siavash ir HUANG, Qindan. Reliability-based life-cycle-cost comparison of different corrosion management strategies. *Engineering Structures*, vol. 186 (2019), pp. 52–63. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029618313853>. [žiūrėta Mar 30, 2025].
9. ORHORHORO, E. K.; OYIBORUONA, P. E. ir IKPE, A. E. Investigation and evaluation of the corrosion inhibition properties of water hyacinth extract on low carbon steel. *International Journal of Emerging Engineering Research and Technology*, vol. 5 (2017), nr. 12, pp. 45–50.
10. AHMED E S, Junaid ir GANESH, G. Mohan. A Comprehensive Overview on Corrosion in RCC and Its Prevention Using Various Green Corrosion Inhibitors. *Buildings*, vol. 12 (2022), nr. 10, pp. 1682. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/10/1682>. [žiūrėta Mar 30, 2025].
11. AL-AMIERY, Ahmed A.; ISAHAK, Wan Nor Roslam Wan ir AL-AZZAWI, Waleed Khalid. Corrosion Inhibitors: Natural and Synthetic Organic Inhibitors. *Lubricants*, vol. 11 (2023), nr. 4, pp. 174. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2075-4442/11/4/174>. [žiūrėta Mar 30, 2025].
12. VERMA, Chandrabhan; EBENSO, Eno E. ir QURAISHI, M. A. Ionic liquids as green and sustainable corrosion inhibitors for metals and alloys: An overview. *Journal of Molecular Liquids*, vol. 233 (2017), pp. 403–414. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167732217302003..>
13. *Eurokodas 2. Gelžbetoninių Konstrukcijų Projektavimas. 1-1 Dalis. Bendrosios Ir Pastatų Taisyklės.* .

14. WANG, Cai; CHEN, Jianxin; HU, Baisong; LIU, Zhiyong; WANG, Chongbin ir kt. Modified chitosan-oligosaccharide and sodium silicate as efficient sustainable inhibitor for carbon steel against chloride-induced corrosion. *Journal of Cleaner Production*, vol. 238 (2019), pp. 117823. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619326836>..
15. FRONTINI, M. A.; SCHREINER, W.; VÁZQUEZ, M. ir VALCARCE, M. B. Nitrite corrosion inhibition in chloride-rich electrolytes correlated to the electrical properties of surface films on carbon steel. *Construction and Building Materials*, vol. 227 (2019), pp. 116650. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819320628>..
16. SÖYLEV, T. A. ir RICHARDSON, M. G. Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, vol. 22 (2008), nr. 4, pp. 609–622. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061806002959>..
17. HEJAZIAN, Shayeste ir AHMADYARI-SHARAMIN, Mehdi. Synergistic effect of Arabic and guar gums on corrosion behavior of steel reinforced concrete in a simulator environment. *Case Studies in Construction Materials*, vol. 16 (2022), pp. e01024. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522001565>..
18. HAYDAROV, Quvonchbek; TILAVOV, Husan ir Shomurodovich. *Corrosion Inhibitors Classification. a Review.* .
19. ZHAO, Wenwen; LI, Feixiang; LV, Xianghong; CHANG, Jianxiu; SHEN, Sicong ir kt. Research Progress of Organic Corrosion Inhibitors in Metal Corrosion Protection. *Crystals*, vol. 13 (2023), nr. 9, pp. 1329. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/2073-4352/13/9/1329>. [žiūrėta Mar 30, 2025].
20. ZHANG, Qing-Wen; LIN, Li-Gen ir YE, Wen-Cai. Techniques for extraction and isolation of natural products: a comprehensive review. *Chinese Medicine*, vol. 13 (2018), nr. 1.
21. BITWELL, Chibuye; INDRA, Singh Sen; LUKE, Chimuka ir KAKOMA, Maseka Kenneth. A review of modern and conventional extraction techniques and their applications for extracting phytochemicals from plants. *Scientific African*, vol. 19 (2023), pp. e01585. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227623000443>..
22. ALBUQUERQUE, Bianca R.; PRIETO, M. A.; BARREIRO, Maria Filomena; RODRIGUES, Alírio; CURRAN, Thomas P. ir kt. Catechin-based extract optimization obtained from *Arbutus unedo* L. fruits using maceration/microwave/ultrasound extraction techniques. *Industrial Crops and Products*, vol. 95 (2017), pp. 404–415. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092666901630735X>..
23. BHADANGE, Yogesh A.; CARPENTER, Jitendra ir SAHARAN, Virendra K. *A Comprehensive Review on Advanced Extraction Techniques for Retrieving Bioactive Components from Natural Sources*. American Chemical Society (ACS), -07-08, 2024.
24. NN, Azwanida. A Review on the Extraction Methods Use in Medicinal Plants, Principle, Strength and Limitation. *Medicinal & Aromatic Plants*, vol. 04 (2015), nr. 03.
25. ALARA, Oluwaseun R.; ABDURAHMAN, Nour H. ir UKAEGBU, Chinonso I. Soxhlet extraction of phenolic compounds from *Vernonia cinerea* leaves and its antioxidant activity. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, vol. 11 (2018), pp. 12–17.
26. REZVANKHAH, Amir; EMAM-DJOMEH, Zahra; SAFARI, Mohammad; ASKARI, Gholamreza ir SALAMI, Maryam. Microwave-assisted extraction of hempseed oil: Studying and comparing of fatty acid composition, antioxidant activity, physiochemical and thermal properties with Soxhlet extraction. *Journal of food science and technology*, vol. 56 (2019), pp. 4198–4210.

27. T. Ramesh; D.S. Chauhan ir M.A. Quraishi. Coconut Coir Dust Extract (CCDE) as green corrosion inhibitor for rebar' steel in concrete environment. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition* (2021), pp. 618–633. Prieiga per: https://ijcsi.pro/wp-content/uploads/2021/04/ijcsi-2021_v10-n2-p9.pdf. [žiūrėta Mar 30, 2025].
28. SALIM, Asia Mishaal; DAWOOD, Nawal Mohammed ir GHAZI, Rasha. Pomegranate Peel Plant Extract as Potential Corrosion Inhibitor for Mild Carbon Steel in a 1 M HCl Solution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 987 (2020), nr. 1, pp. 012019. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/987/1/012019>. [žiūrėta Mar 30, 2025].
29. ABBAS, A. S.; FAZAKAS, É ir TÖRÖK, T. I. Corrosion studies of steel rebar samples in neutral sodium chloride solution also in the presence of a bio-based (green) inhibitor. *International Journal of Corrosion and Scale Inhibition* (2017).
30. ABDULSADA, Shaymaa Abbas ir TÖRÖK, Tamás I. Studying effect of addition green inhibitor on compression strength of reinforced concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 613 (2019), nr. 1, pp. 012024. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/613/1/012024>. [žiūrėta Mar 30, 2025].
31. VALDEZ-SALAS, Benjamin; VAZQUEZ-DELGADO, Ramiro; SALVADOR-CARLOS, Jorge; BELTRAN-PARTIDA, Ernesto; SALINAS-MARTINEZ, Ricardo ir kt. Azadirachta indica Leaf Extract as Green Corrosion Inhibitor for Reinforced Concrete Structures: Corrosion Effectiveness against Commercial Corrosion Inhibitors and Concrete Integrity. *Materials*, vol. 14 (2021), nr. 12.
32. ASTM, C. Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete. *ASTM International: West Conshohocken, PA, USA* (2015).
33. PRADIPTA, Ivan; KONG, Daniel ir BAN LEE, Joash Tan. Corrosion inhibition of green tea extract on steel reinforcing bar embedded in mortar. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 431 (2018).
34. GUO, Rui' E.; ZHANG, Qian; WANG, Zaixing; TAYEBI, Morteza ir HAMAWANDI, Bejan. The Effect of Eco-Friendly Inhibitors on the Corrosion Properties of Concrete Reinforcement in Harsh Environments. *Materials*, vol. 15 (2022), nr. 14.
35. MEYYAPPAN PALANIAPPANP, Karthiga Muruganpp; ARAVIND GURUSAMY, Aarthi Koppayaraj and ir Keerthickbalaji Sivasubramanian. Arriving the optimum retarder dosage level of sugar on the setting time, compressive strength, and microstructure property of Portland pozzolana cement. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, pp. 338–346.
36. DE BRITO, Jorge ir KURDA, Rawaz. The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials. *Journal of Cleaner Production*, vol. 281 (2021), pp. 123558. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620336039>..
37. BEERANNA DEVAKATE, Arpana ir GOWDA, Keerthi. *Effect of Sugar on Setting-Time and Compressive Strength of Concrete*. .
38. AİTCIN, P. -. 18 - RetardersIn: *Science and Technology of Concrete Admixtures*, pp. 395–404Pierre-Claude Aïtcin ir Robert J. Flatt (eds.). Woodhead Publishing, 2016. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081006931000187>..
39. AYALA, José R.; MONTERO, Gisela; CORONADO, Marcos A.; GARCÍA, Conrado; CURIEL-ALVAREZ, Mario A. ir kt. *Characterization of Orange Peel Waste and Valorization to Obtain Reducing Sugars*. MDPI AG, -03-03, 2021.

40. ngel Siles López, J., Li, Q., & Thompson, I. P. Biorefinery of waste orange peel. *Critical Reviews in Biotechnology* (2010), pp. 63–69.
41. Dávila, J.A., Rosenberg, M. & Cardona. Techno-economic and Environmental Assessment of p-Cymene and Pectin Production from Orange Peel. *Waste Biomass Valor* 6 (2015), pp. 253–261.
42. GAIND, S. Exploitation of Orange Peel for Fungal Solubilization of Rock Phosphate by Solid State Fermentation. *Waste Biomass Valor* 8 (2017), pp. 1351–1360.
43. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Vanduo Betonui. Techniniai Vandens Ėminių Ėmimo, Bandymo Ir Tinkamumo Reikalavimai, Įskaitant Gražinamą Iš Gamybos Betono Pramonėje Vandeni, Pakartotinai Naudojamą Betono Mišiniui Ruošti [LST EN 1008:2003]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2005..
44. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 2 Dalis. Bandinių Pagaminimas Ir Kietinimas Stipriui Nustatyti [LST EN 12390-2]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2022..
45. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 7 Dalis. Sukietėjusio Betono Tankis [LST EN 12390-7]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020..
46. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 5 Dalis. Bandinių Lenkimo Stipris [LST EN 12390-5]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2022..
47. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 1 Dalis. Pavidalas, Matmenys Ir Kiti Bandinių Bei Liejimo Formų Reikalavimai [LST EN 12390-1]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2021..
48. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 4 Dalis. Gniuždymo Stipris. Bandymo Mašinų Techniniai Reikalavimai [LST EN 12390-4]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2025..
49. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 3 Dalis. Bandinių Gniuždymo Stipris [LST EN 12390-3]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2020..
50. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Cemento Bandymo Metodai. 9 Dalis. Hidratacijos Šiluma. Pusiau Adiabatinis Metodas [LST EN 196-9]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2010..
51. LIETUVOS STANDARTIZACIJOS DEPARTAMENTAS. *Sukietėjusio Betono Bandymai. 18 Dalis. Chloridų Migracijos Koeficiento Nustatymas [LST EN 12390-18]*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2021..

Priedai

1 priedas. DI naudojimas

Dirbtinio intelekto įrankiai nebuvo naudojami šiame baigiamajame darbe.

2 priedas. Mokslinės konferencijos sertifikatas

STUDENT SCIENTIFIC CONFERENCE



CERTIFICATE

Lukas Bendaravičius

Has participated in Student scientific conference
„SMART BUILT ENVIRONMENT“
on 5 December 2025

Delivered the presentation:
**Influence of Organic Corrosion Inhibitors on the Durability and
Mechanical Properties of Reinforced Concrete**

Dean of the Faculty of Civil
Engineering and Architecture

Prof. Dr. Andrius Jurelionis

