

Primljen / Received: 9.4.2022.

Ispravljen / Corrected: 21.2.2023.

Prihvaćen / Accepted: 14.6.2023.

Dostupno online / Available online: 10.10.2023.

Učinkovitost armature premazane ekstraktom kore nara u betonu pri zaštiti od korozije

Autori:

Doc.dr.sc. **Jeyanth Baskaran**, dipl.ing.građ.

Tehnološki institut Bannari Amman

Odjel za građevinarstvo

Erode, Tamilnadu, Indija

jeyanthbaskaran5890@gmail.com

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Sureshkumar Paramasivam**

Sveučilišni fakultet inženjerstva

Odjel za građevinarstvo

Panruti, Tamilnadu, Indija

erpsuresh@rediffmail.com

Prethodno priopćenje

Jeyanth Baskaran, Sureshkumar Paramasivam

Učinkovitost armature premazane ekstraktom kore nara u betonu pri zaštiti od korozije

Cilj je ovog rada razviti troškovno pristupačan, ekološki prihvatljiv i lako dostupan prirodni inhibitor dobiven iz kore ploda nara. Ekstrakt je pripremljen od kore nara i upotrijebljen kao premaz otporan na koroziju, poznat kao ekstrakt kore nara (PPE), a nanosi se na čeličnu armaturu. Otpornost čelika premazanog PPE-om na koroziju ocijenjena je pomoću ubrzane karbonatizacije, utisnutog napona (engl. *impressed voltage*), potencijala polučelije, gubitka mase i ubrzanih korozivskih ispitivanja. Ispitivanje karbonatizacije pokazalo je da nepremazana čelična rebrasta armatura ima mrlje, što upućuje na karbonatizaciju, dok armatura premazana PPE-om nije pokazala promjene, demonstrirajući nekarbonatizirano područje. Nadalje, ispitivanje potencijala polučelije jasno je pokazalo da čelična šipka premazana PPE-om pokazuje umjereni rizik od korozije s potencijalom od -247 mV. Naime, gubitak mase nepremazanog običnog čelika bio je 40 % veći nego u slučaju šipke premazane PPE-om. Pri ubrzanom korozivskom ispitivanju, šipkama obloženim PPE-om trebalo je više vremena da razviju početne pukotine u betonu, s trajanjem od 182, 206 i 230 sati za uzorke 1, 2 i 3, što je dulje nego u slučaju običnog betona. Stoga su rezultati ispitivanja čelika obloženog PPE-om uspoređeni s rezultatima običnog čelika bez premaza te je ocijenjena učinkovitost šipke obložene PPE-om u pogledu otpornosti na koroziju.

Ključne riječi:

korozija, premazi, organski inhibitor, ubrano korozivsko ispitivanje, djelotvornost inhibicije, karbonatizacija, djelovanje klorida

Research Paper

Jeyanth Baskaran, Sureshkumar Paramasivam

Performance of pomegranate peel extract coated rebars in concrete

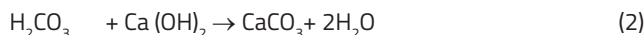
This paper aimed to develop an affordable, eco-friendly, and accessible natural inhibitor derived from the peel of the pomegranate fruit. An extract was prepared from the pomegranate peel and utilised as a corrosion-resistant coating known as pomegranate peel extract (PPE) applied to the steel rebar. The corrosion resistance of the PPE-coated steel was evaluated using accelerated carbonation, impressed voltage, half-cell potential, weight loss, and accelerated corrosion tests. The carbonation test revealed that the uncoated steel rebar displayed patches, indicating carbonation, whereas the PPE-coated rebar was not affected, demonstrating an uncarbonated zone. Moreover, the half-cell potential test clearly indicated that the PPE-coated steel rod exhibited a moderate risk of corrosion with a potential of -247 mV. Particularly, the weight loss of the uncoated conventional steel was 40 % greater than that experienced by the PPE-coated rod. In the accelerated corrosion test, the PPE-coated rods took longer to develop initial cracks in the concrete, with durations of 182, 206, and 230 h for samples 1, 2, and 3, respectively, which were comparatively higher than those of conventional concrete. Thus, the test results of the PPE-coated steel were compared with those of the uncoated conventional steel, and the performance of the PPE-coated rod in terms of corrosion resistance was evaluated.

Key words:

corrosion, coatings, organic inhibitor, accelerated corrosion test, inhibition efficiency, carbonation, chlorination

1. Uvod

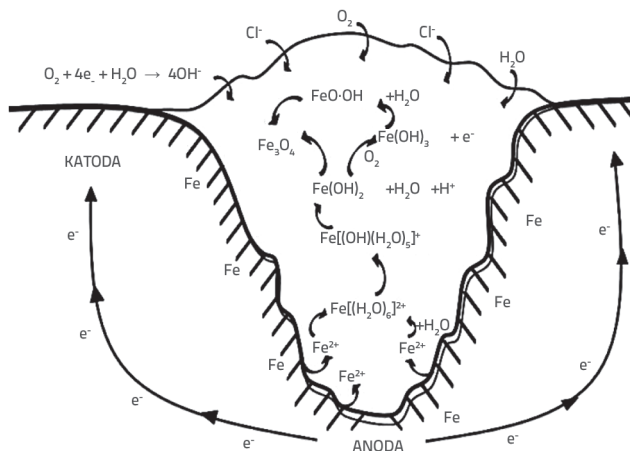
Čelična armatura povećava duktilnost i čvrstoću na savijanje betona. Međutim, korozija čelične armature uvelike smanjuje čvrstoću i trajnost betona. Korozija, koja predstavlja velik konstrukcijski izazov, uzrokuje pukotine, lomove i odlamanje rebraste armature, što dovodi do popuštanja betonskih konstrukcija. Proces korozije u betonu nastaje zbog unutarnje reakcije njegovih sastavnih elemenata s visokom alkalnošću. To pojačava stvaranje hrđe u čeliku, te se povećava volumen produkata hrđe i modificira strukturalna i mehanička svojstva armature [1, 2, 24] Radi se o razornom procesu koji rezultira naprezanjem i popuštanjem materijala. U tablici 1. navedeni su konstitutivni elementi čelika. Dva glavna spoja koji pokreću koroziju čelične armature su kloridi i CO₂. Stoga karbonatizacija i djelovanje klorida predstavljaju dva glavna mehanizma koji negativno utječu na čelik, što dovodi do korozije [3]. Karbonatizacija nastaje kada CO₂ reagira s betonom stvarajući ugljičnu kiselinu. Ovaj proces dovodi do stvaranja kalcijevog karbonata, čime se smanjuje pH vrijednost betona na manje od 8 i stvara korozivno okruženje [4]. Proces karbonatizacije prikazan je izrazima (1) i (2).



Korozija u betonu također je izazvana djelovanjem klorida, pri čemu kloridi reagiraju s Fe²⁺ ionima koji postoje u čeliku, čime se stvara kompleks kloridnih iona koji potom reagira s hidroksidom prisutnim u betonu da bi se stvorio željezni hidroksid i izbacio višak kloridnih iona. Kako bi kloridni ioni pokrenuli koroziju čelika, nužna je prisutnost kisika. Stoga je oksidacija značajna komponenta procesa korozije, a prisutnost FeO (hrđa) dovodi do velikih oštećenja betona zbog početka stvaranja korozije na rebrastoj armaturi. FeO-OH stabilniji je od Fe²⁺ i smanjuje pH betona na manje od 11 [2].



Smanjenje pH-vrijednosti betona dovodi do pokretanja procesa korozije. Slika 1. prikazuje skicu korozije betona izazvanu djelovanjem klorida [1].



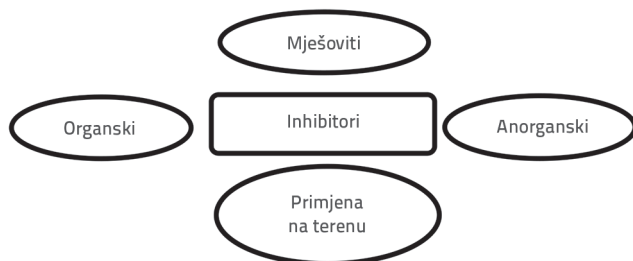
Slika 1. Prikaz stvaranja korozije pri djelovanju klorida [1, 2]

Do korozije dolazi u dvije faze. Prva faza korozije naziva se početnom fazom (engl. *inception stage*), a kada se razvije veliko unutarnje naprezanje i ošteti čelik, to je poznato kao razdoblje širenja (engl. *propagation stage*). Proces korozije uslijed djelovanja klorida opisan je izrazima (7), (8) i (9).



Istraživači su razvili različite metode kako bi produljili trajnost armature u betonu i zaštili je od korozije. Često primjenjivane metode zaštite od korozije uključuju premazivanje, elektrokemijske metode, alternativnu armaturu i inhibitore korozije. Inhibitori korozije su kemijske tvari koje smanjuju brzinu korozije ako su prisutni u sustavu korozije u odgovarajućoj koncentraciji.

Od 1970-ih inhibitori imaju ključnu ulogu u metodama zaštite od korozije [4]. Različite vrste inhibitora prikazane su na slici 2.



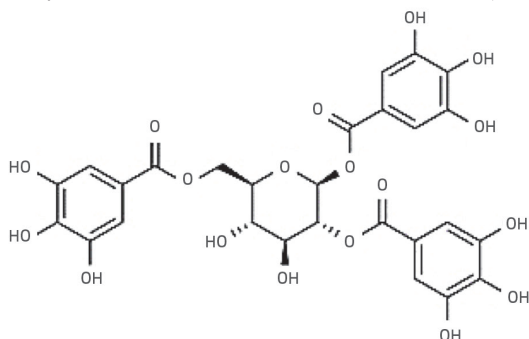
Slika 2. Vrste inhibitora

Tablica 1. Kemijski sastav čelika

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Co	Cu	Sn	Fe
Masa [%]	0,260	0,280	0,920	0,020	0,008	0,050	0,016	0,003	0,013	0,0020	0,028	97,40

Desetljećima su se istraživači fokusirali na otkrivanje prirodnih inhibitora koji su cjenovno pristupačni, lako dostupni i ekološki prihvatljivi [4, 6, 7]. Stoga se od 1990-ih kao prirodni zeleni inhibitori primjenjuju biljni ekstrakti. Nekoliko biljaka kao što su plod palme, narančina kora, a nedavno i mulj upotrijebljeni su kao inhibitori korozije. Plod nara primijenjen je u ovom radu zbog svojih antioksidativnih svojstava [8, 9, 23].

Kao što je prikazano na slici 3., kora nara bogata je vlaknima i sastoji se od hidroksilnih, karbonilnih i aromatskih skupina, uključujući galotaninsku kiselinu. Ove komponente mogu spriječiti oksidacijske procese koji dovode do korozije [10, 11]. Cilj je ovog istraživanja ispitati korozijsku otpornost čelika premazanog ekstraktom kore nara (eng. *pomegranate peel extract* - PPE) i procijeniti učinkovitost rebraste armature premazane PPE-om u betonu u zaštiti od korozije.



Slika 3. Kemijska struktura galotaninske kiseline

2. Materijali

2.1. Priprema ekstrakta kore nara (PPE)

Kora nara prikupljena je iz raznih izvora. Prikupljena je kora očišćena destiliranom vodom i sušena u tamnoj prostoriji sedam dana na sobnoj temperaturi. Osušeni uzorci izrezani su u male komadiće i samljeveni u fini prah, a prah kore prosijan je kroz sito od 75 mikrometara. Na kraju je prah koji je prošao kroz sito ispitan. Radi premazivanja čelika, prah kore nara zamijenjen je ekstraktom. Prah kore otopljen je u 100 ml destilirane vode (10 g). Otopina je zatim kuhana na 100 °C, a vruća je otopina ohlađena i filtrirana nekoliko puta kako bi se dobio ekstrakt [10, 12]. Pripremljeni ekstrakt nanesen je ručno na čelik pomoću kista i ispitan u korozivnom okruženju. Slika 4. prikazuje cijeli proces pripreme ekstrakta kore nara za premazivanje čelika.

2.2. Čelična šipka premazana PPE-om

Uzorak upotrijebljen u ovom radu bila je šipka od mekog čelika jer se primjenjuje u betonu kao rebrasta armatura. Upotrijebljena je čelična šipka promjera 10 mm, duljine 15 cm. Odabrane šipke su

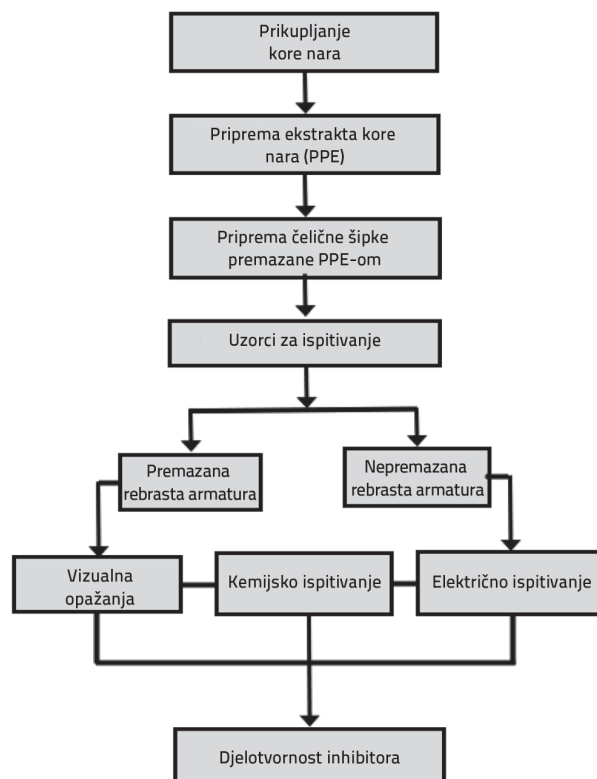


Slika 4. Priprema ekstrakta kore nara (PPE)

očišćene, osušene i zamotane u brusni papir. Prije premazivanja očišćeni je uzorak osušen. Nakon toga je ekstrakt nanesen na uzorke pomoću kista. Uzorak čelika trebao bi biti u potpunosti premazan ekstraktom, osiguravajući da čak ni najmanji dio čelika ne ostane nepremazan. U suprotnom, taj će dio postati područje oštećenja. Naposljetku, čelične šipke obložene PPE-om pripremljene su za ispitivanje.

3. Metodologija

Plan rada za ovo istraživanje prikazan je na slici 5. na kojoj je jasno naveden tijek istraživanja koje počinje prikupljanjem materijala za rezultate eksperimentalnog ispitivanja.



Slika 5. Metodologija

Dijagram toka prikazan je u nizu, zajedno s prikupljanjem materijala i procesom pripreme ekstrakta. Cilj je ispitivanja procjena otpornosti čelične rebraste armature premazane PPE-om na djelovanje korozije.

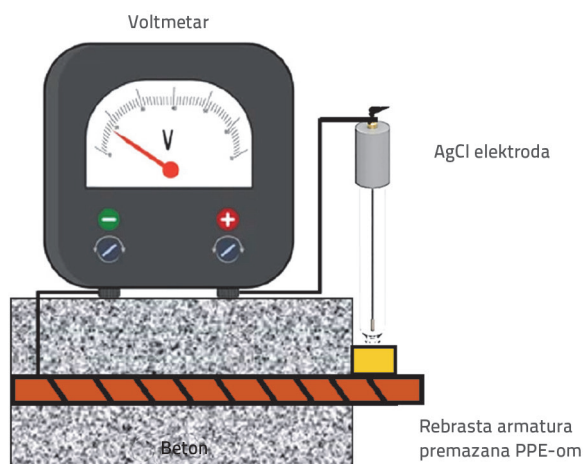
4. Eksperiment

4.1. Metoda ispitivanja ubrzane karbonatizacije (ES 12390-12:2020)

Osnovno kemijsko ispitivanje provedeno je prskanjem betona fenolftaleinom. Karbonatizacija predstavlja veliki nedostatak betona koji dovodi do njegove korozije i propadanja [13]. Do karbonatizacije dolazi kada ugljični dioksid iz okoliša reagira s kalcijevim hidroksidom prisutnim u cementnoj matrici. Za provođenje ispitivanja karbonatizacije izrađene su dvije betonske kocke dimenzija 10 × 10 cm zajedno s armaturnim šipkama. Kocke su zatim sušene 28 dana. Uzorci su prethodno kondicionirani 14 dana pod kontroliranim uvjetima izlaganja s povećanom razinom ugljičnog dioksida, prema preporuci danoj u ES 12390-12:2020. Nakon 90 dana, betonske su kocke očišćene, osušene i slomljene. Fenolftalein je poprskan na tek slomljeni beton kako bi se pratila dubina karbonatizacije. Na taj se način može vizualizirati karbonatizirana zona betona.

4.2. Mjerenje potencijala polučelije

Kako bi se izmjerila vjerojatna brzina korozije čelične rebraste armature, provedeno je potenciostatsko ispitivanje pomoću jedne referentne elektrode. Uzorak odabran za procjenu brzine korozije pripremljen je tako da je jedna četvrtina čelika uronjena u beton, a preostali dio ostavljen je izložen i povezan s elektrodom pomoću voltmetra. Prema normi ASTM C-876, elektroda i uzorak spojeni su u seriju. Vjerojatna brzina korozije čelika tada je izračunana na temelju razlike potencijala između rebraste armature u betonu i elektrode. Slika 6. prikazuje postavu mjerenja potencijala polučelije koja se primjenjuje za mjerenje brzine korozije.



Slika 6. Postava ispitivanja mjerenja potencijala polučelije

Učinkovitost betonske rebraste armature može se procijeniti mjerenjem njihovog potencijala. Iako ovo ispitivanje ne daje specifičnu brzinu korozije betona, može se dobiti vjerojatnost korozije na čeličnoj rebrastoj armaturi u betonu [14].

4.3. Mjerenje gubitka mase

Brzina korozije čelične rebraste armature dobivena je metodom gubitka mase. Ispitivanje je provedeno na uzorku čelika duljine 15 cm i promjera 10 mm. Uzorci čelika su prije ispitivanja očišćeni, osušeni i istrljani. Rebrasta armatura premazana i nepremazana PPE-om uronjena je u 250 ml 3-postotne otopine NaCl, a početne mase objiju šipki zabilježene su prije nego su uronjene u otopinu [15-17]. Postava je ostavljena netaknuta 90 dana na sobnoj temperaturi, a očitavanja su bilježena tjedno. Uzorci su izvađeni iz otopine, očišćeni i osušeni prije vaganja.

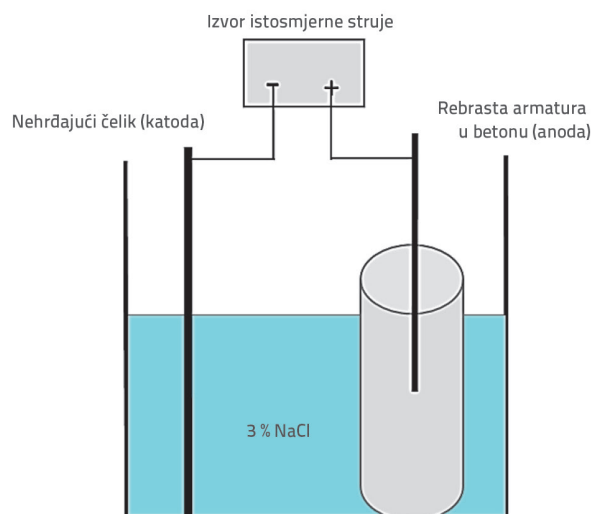
$$W = (w_1 - w_2) / A \quad (10)$$

pri čemu je W gubitak mase (mg/cm^2), w_1 i w_2 su mase uzorka prije i poslije korozije (mg/cm^2), a A je površina uzorka (cm^2). Djelotvornost inhibitora (η) određena je na tjednoj bazi primjenom opće jednadžbe učinkovitosti.

$$\eta = \frac{W_{\text{uncoated}} - W_{\text{coated}}}{W_{\text{uncoated}}} \cdot 100 \% \quad (11)$$

4.4. Ispitivanje utisnutog napona

Metoda utisnutog napona i struje laboratorijska je ispitna metoda koja se primjenjuje za ubrzavanje korozije čelične rebraste armature u betonu i utvrđivanje brzine korozije. Za provođenje ispitivanja izrađeni su betonski valjci promjera 75 mm i visine 200 mm. Čelična šipka duljine 150 mm i promjera 12 mm ugrađena je u beton tako da je 100 mm šipke ostalo nepokriveno [18-20].



Slika 7. Shematski prikaz ispitivanja utisnutog napona

Uzorak betona s armaturom uronjen je u 3-postotnu otopinu NaCl koja je poslužila kao elektrolit za elektrokemijsko ispitivanje. Rebrasta armatura u betonu služila je kao anoda, a šipka od nehrđajućeg čelika kao katoda. Shematski prikaz ispitivanja dan je na slici 7.

Anoda i katoda bile su spojene na izvor istosmjerne struje, osiguravajući konzistentnu snagu od 4 V u strujnom krugu. Primijenjeni napon održavan je konstantnim te je određena varijacija struje s vremenom. Zabilježeni su struja i vrijeme potrebni za nastanak prve pukotine u betonu. Strujni tok se povećavao s razvitkom pukotina te je površina čelika bila izložena elektrolitu.

4.5. Morfološko ispitivanje

Morfološkom karakterizacijom uzorka utvrđuje se prisutnost kemijskih spojeva nastalih tijekom procesa korozije. Stoga je na uzorku provedena mikroskopska analiza pomoću pretražne elektronske mikroskopije (SEM) i emisijske rendgenske spektroskopije (EDS). Šipke su zbog korozije uronjene u otopinu NaCl. Uzorci su izrezani na komade debljine 5 mm, a zatim su prije morfološke analize očišćeni i potpuno osušeni. Čelične šipke bez premaza i čelične šipke premazane PPE-om prikazane su na slikama 8.a i 8.b.



Slika 8. a) Šipka bez premaza; b) Šipka premazana PPE-om

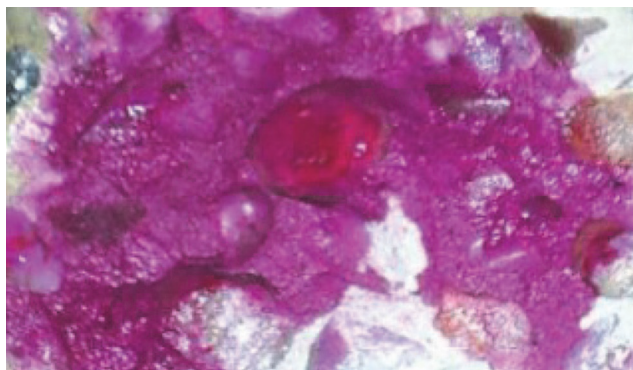
5. Rezultati i rasprava

5.1. Metoda ispitivanja ubrzane karbonatizacije (ES 12390-12:2020)

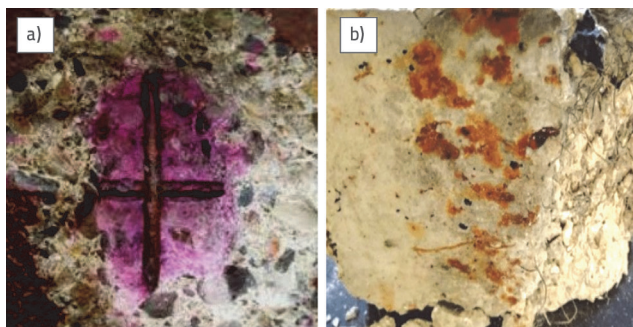
Karbonatizacija je proces u kojem atmosferski CO_2 ulazi u beton. Nakon toga, CO_2 reagira s kalcijevim hidroksidom u hidratiziranom cementu i stvara kalcijev karbonat. Kada karbonatizacija dođe do čelika, ona razgrađuje prirodno prisutni pasivirajući sloj na čeliku i pokreće proces korozije. To se može ispitati jednostavnim prskanjem indikatora fenolftaleina na uzorak. Ružičasta boja uzorka označava nekarbonatizirano stanje betonskog uzorka. Izostanak

promjene boje u uzorku upozorava na pojavu karbonatizacije u betonu, slika 9.

Slika 10.a prikazuje beton s čeličnom armaturom premazanom PPE-om. Slika 10.b prikazuje beton s nepremazanom čeličnom armaturom. Beton s nepremazanom armaturom potpuno je karbonatiziran, jer karbonatizirano područje prekriva čelik. Iako karbonatizacija utječe na uzorak s čelikom premazanim PPE-om, premaz PPE zaštitio je pasivirajući sloj, čime je spriječio koroziju. Stoga armatura premazana PPE-om štiti pasivirajući sloj na čeliku od korozije.



Slika 9. Uzorak betona s armaturom premazanom PPE-om



Slika 10. a) Rebrasta armatura premazana PPE-om; b) Rebrasta armatura bez premaza

5.2. Mjerenje potencijala polučelije

Mjerenje potencijala polučelije armature u odnosu na AgCl referentnu elektrodu provedeno je prema ASTM C 876 – 1992. Eksperimentalni rezultati navedeni su u tablici 2. Među raznim metodama za mjerenje brzine korozije, mjerenje potencijala polučelije predstavlja optimalnu metodu neraznog ispitivanja. Tablica 2. predstavlja vrijednosti potencijala za nepremazani čelik od -74 mV do -367 mV i za premazani od -61 mV do -247 mV, određeno primjenom potencijostatskog mjerenja u razdoblju od 12 tjedana. Rizik nastanka korozije za beton s AgCl elektrodom prema normi ASTM C 876 naveden je u tablici 3. Vrijednost potencijala uzorka premazanog PPE-om doseže -247 mV, što je ispod praga od 90 % osjetljivosti na koroziju. Stoga je očito da šipke premazane PPE-om pokazuju srednji rizik od korozije.

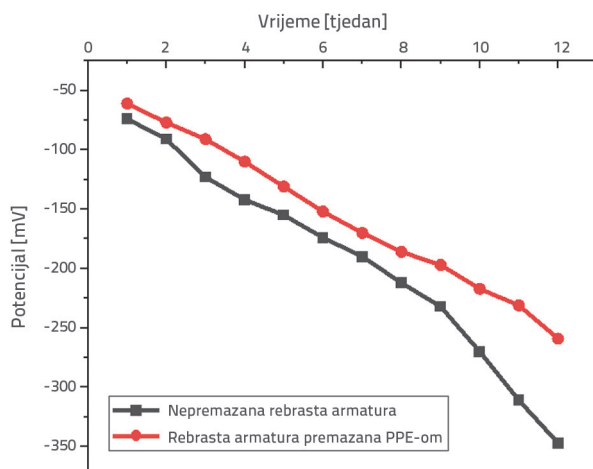
Tablica 2. Mjerenje potencijala polučelije

Vrijeme u tjednima	Rebrasta armatura bez premaza [mV]	Rebrasta armatura premazana PPE-om [mV]
1	-74	-61
2	-91	-77
3	-123	-91
4	-142	-110
5	-155	-131
6	-174	-152
7	-190	-170
8	-212	-186
9	-232	-197
10	-270	-217
11	-311	-231
12	-367	-247

Tablica 3. ASTM C876-91 kriteriji za stanje korozije armiranog betona u odnosu na AgCl

Potencijal čelika u odnosu na AgCl elektrode [mV]	Stanje korozije
> - 100	Nizak (10 %) rizik od korozije
- 100 do -250	Srednji rizik od korozije
< - 250	Visok (90 %) rizik od korozije
< - 400	Jaka korozija

Vrijednosti potencijala polučelije ucrtane su u odnosu na vrijeme (tjedni), kao što je prikazano na slici 11. Dijagram pokazuje da je potencijal nepremazane čelične šipke veći, dosežući približno 367 mV. Ta je vrijednost mnogo niža za armaturu premazanu PPE-om. Vrijednost nepremazane čelične šipke upućuje na ozbiljno stanje korozije, a vrijednost armature premazane PPE-om na srednji rizik korozije. Stoga je uzorak betona s armaturom premazanom PPE-om pokazao bolju učinkovitost protiv korozije.



Slika 11. Varijacija potencijala tijekom vremena (tjedni) za betonski uzorak s armaturom premazanom i nepremazanom PPE-om

Rezultati dobiveni mjerenjem potencijala polučelije uspoređeni su s kriterijima za nastanak korozije navedenima u normi ASTM C 876-91 (tablica 3.). Te granice pružaju smjernice za procjenu rizika od korozije čeličnih armatura u betonu pomoću AgCl elektroda. Norma navodi da vrijednosti potencijala veće od -100 mV upućuju na izuzetno nizak rizik od korozije, a vrijednosti potencijala manje od -400 mV pokazuju da je rizik od korozije izuzetno visok.

5.3. Ispitivanje mjerenja gubitka mase

U tablici 4. prikazani su rezultati mjerenja gubitka mase za obične armaturne šipke premazane i nepremazane PPE-om. Uz gubitak mase uzoraka, učinkovitost čelika premazanog PPE-om protiv korozije dobivena je primjenom izraza (10) [11, 16, 21]. Gubitak mase uzorka zbog korozije ispitani je i zabilježen za različite vremenske intervale. Postotak gubitka mase za nepremazanu čeličnu rebrastu armaturu bio je 89,68 % za 84 dana uranjanja u 3 -postotni HCl, a postotak gubitka mase za uzorak premazan PPE-om 47,19 %. Ovi rezultati pokazuju da je gubitak mase u armaturnoj šipki premazanoj PPE-om manji u usporedbi s gubitkom mase armaturne šipke bez premaza. Stoga je PPE premaz pružao značajnu otpornost čelika na koroziju. Na osnovi izraza (11) utvrđena je učinkovitost inhibitora te je prikazana zajedno s mjerenjem gubitka mase. Rezultati ispitivanja bilježeni su 3 mjeseca. Učinkovitost inhibitora bila je 66,22 % nakon 7

Tablica 4. Gubitak mase armature premazane i nepremazane PPE-om i učinkovitost inhibitora

Vrijeme	Gubitak mase nepremazane armature [mg]	Gubitak mase premazane armature [mg]	Učinkovitost inhibitora η [%]
7	0,002990	0,00101	66,22
14	0,003460	0,00118	65,90
21	0,004180	0,00129	69,14
28	0,004850	0,00139	71,34
35	0,005910	0,00168	71,57
42	0,006830	0,00190	72,18
49	0,007910	0,00206	73,96
56	0,008520	0,00219	74,30
63	0,008990	0,00231	74,30
70	0,014400	0,00310	78,47
77	0,021000	0,00428	79,62
84	0,029000	0,00510	82,41

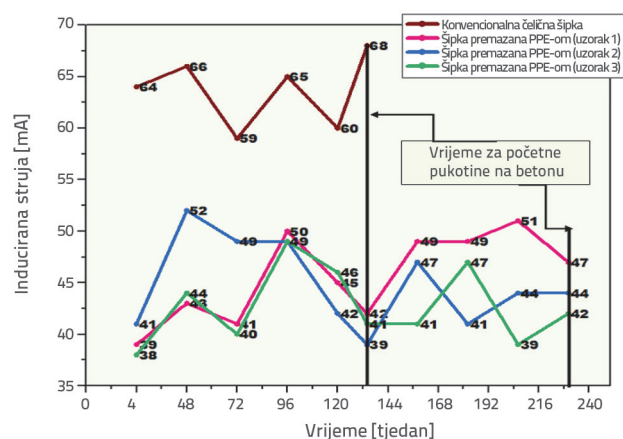
dana, a postotak učinkovitosti porastao je na 82,41 % nakon 84 dana. Antioksidativna svojstva u PPE zbog prisutnosti galotaninske kiseline ometaju prodor kisika u čelik. Stoga klorid u otopini NaCl ne bi utjecao na čelik jer je mogućnost korozije u odsutnosti kisika iznimno mala.

Dijagram učinkovitosti PPE-a u odnosu na vrijeme za armaturu premazanu PPE-om prikazan je na slici 11. Učinkovitost čelika premazanog PPE-om protiv korozije je 82,41 %, što upućuje na mali rizik od korozije čelika. Stoga, PPE premaz produljuje trajanje čelika i poboljšava njegovu trajnost u betonu.

5.4. Ispitivanje utisnutog napona

Ovo je ispitivanje provedeno u laboratoriju kao ubrzano korozijsko ispitivanje za određivanje brzine korozije. Kako bi se dobili točniji rezultati, ispitivanje je provedeno na tri uzorka. Ugrađen je beton s rebrastom armaturom. Nakon njege, beton je stavljen u 3-postotnu otopinu natrijeva klorida. Primijenjen je napon u stacionarnom stanju pomoću voltmetra spojenog na čeličnu šipku i katodu od nehrđajućeg čelika [20, 22]. Struja inducirana primijenjenim potencijalom bilježena je svakih 12 sati. U tablici 5. navedeno je vrijeme potrebno za pojavu početnih pukotina u betonu pri najjačoj anodnoj struji. Prva pukotina u betonu uočena je nakon 134 sata, a struja zabilježena u odgovarajuće vrijeme iznosila je 68 mA. Kod betona s armaturom premazanom PPE-om, ispitivanje je provedeno na tri uzorka kako bi se odredila brzina korozije. Tablično prikazani rezultati jasno pokazuju da je vrijeme potrebno za pojavu početne pukotine u betonu s armaturom premazanom PPE-om 182, 206 i 230 sati za uzorke 2, 3 i 4, a odgovarajuće anodne struje iznose 47, 44, i 41 mA. Ti rezultati potvrđuju da je kapacitet armature premazane PPE-om u korozivnim uvjetima bio 40 % veći od kapaciteta nepremazane šipke.

Anodna struja u odnosu na vrijeme za obične čelike i čelike premazane PPE-om prikazana je na slici 12. Dijagram pokazuje da je struja zabilježena na običnom čeliku veća, što upućuje na uvjete koji su vrlo pogodni za nastanak korozije, dok armatura premazana PPE-om pokazuje malu vjerojatnost nastanka korozije. Vrijeme potrebno da se u uzorku betona pojavi početna pukotina prikazano je na slici 12.



Slika 12. Anodna struja u odnosu na vrijeme

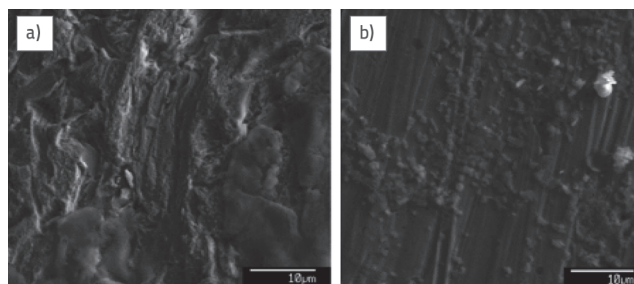
5.5. Morfološko ispitivanje

Uz elektrokemijska mjerenja i ubrzano korozijsko ispitivanje, ispitana su morfološka svojstva uzoraka čelika kako bi se analizirala površina korodiranih uzoraka na mikrorazini. Za promatranje su upotrijebljene dvije čelične šipke duljine 10 cm i promjera 12 mm. Jedna je šipka bila premazana PPE-om, a druga je bila bez premaza. Pripremljeni uzorci uronjeni su u 3,5-postotnu otopinu NaCl u trajanju od 30 dana. Uzorci su ostavljeni netaknuti na unaprijed određeno vrijeme. Nakon 30 dana, iz očišćenih i osušenih postava uklonjene su

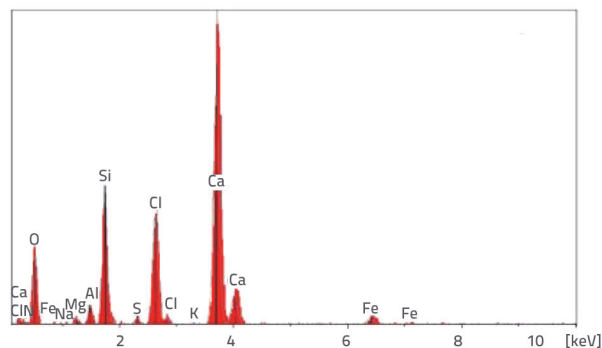
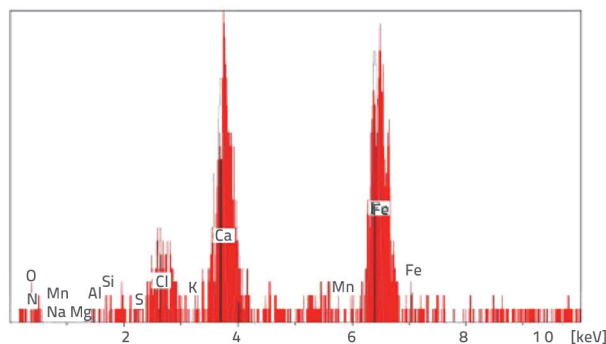
Tablica 5. Rezultati ispitivanja utisnutog napona i struje s induciranom strujom i vremenom

Br.	Uzorci	Vrijeme [sati]	Struja [mA]
1	Obična čelična šipka	24	64
		48	66
		72	59
		96	65
		120	54
		134	68
2	Šipka premazana PPE-om (uzorak 1)	24	39
		48	43
		72	41
		96	50
		120	45
		134	42
		158	49
		182	49
		206	51
3	Šipka premazana PPE-om (uzorak 2)	24	41
		48	52
		72	49
		96	49
		120	42
		134	39
		158	47
		182	41
		206	44
		230	44
4	Šipka premazana PPE-om (uzorak 3)	24	38
		48	44
		72	40
		96	49
		120	46
		134	41
		158	41
		182	47
		206	39
230	42		

čelične šipke. Čelične šipke ispitane su pomoću SEM-a kako bi se proučila vanjska struktura korodiranih uzoraka. Slike 13.a i 13.b prikazuju SEM slike čeličnih šipki premazanih i nepremazanih PPE-om. Slika nepremazane šipke otkriva stvaranje hrđe na šipki, dok slika šipke premazane PPE-om pokazuje manju količinu stvorene hrđe, a učinak korozije na premazanu čeličnu šipku izuzetno je nizak. Visoki stupanj korozije nepremazane čelične šipke pripisuje se prisutnosti klorida u NaCl. Budući da je PPE antioksidans, korozija čelika u prisutnosti kloridnih iona ne započinje brzo.



Slika 13. a) SEM slika nepremazane šipke; b) SEM slika šipke premazane PPE-om



Slika 14. EDX slika uzoraka armature premazane i nepremazane PPE-om

Skenirani uzorci podvrgnuti su emisijskoj rendgenskoj spektroskopiji (EDS) kako bi se utvrdio kemijski sastav čelične šipke. Slika 14. prikazuje prisutnost kemijskih komponenti na premazanoj čeličnoj šipki zbog reakcije NaCl, na skali od 1 μm . Rezultati pokazuju maksimalnu prisutnost kisika i željeza.

6. Zaključak

Ispitivajući sprječavanje nastanka korozije na čeličnoj armaturi premazanoj PPE-om može se zaključiti sljedeće:

- Karbonatizacija betona s običnim čelikom utjecala je na čelik i na njemu stvorila mrlje hrđe, dok je beton s čelikom premazanim PPE-om pokazao nekarbonatizirano područje koje pokazuje učinkovitost premazanog čelika protiv djelovanja karbonatizacije.
- Ispitivanje potencijala polučelije pokazalo je da čelik bez premaza doseže granicu od -367 mV, a ekvivalent za čelik premazan PPE-om doseže granicu vrijednosti od -231 mV. Prema normi ASTM C 876-91, nepremazana čelična šipka pokazuje visok rizik od korozije, a premazana šipka pokazuje umjeren rizik.

- Mjerenja gubitka mase uzoraka pokazala su da je gubitak mase nepremazane čelične šipke bio 40 % veći nego li čelične šipke premazane PPE-om. To je pokazalo da je smanjena masa premazanog čelika pripisana pasivizaciji prisutnoj na čeliku što je stvorilo idealne uvjete za stvaranje korozije na šipki.
- Ubrzano korozijsko ispitivanje pokazalo je da je vrijeme potrebno za nastanak početne pukotine u betonu u slučaju obične armature bilo samo 134 sata, dok je kod čelika premazanog PPE-om to bilo 182, 206 i 230 sati za testove 2, 3, odnosno 4. To objašnjava učinkovitost premaza PPE-a protiv korozije.
- SEM i EDS slike pokazale su da se u slučaju običnog čelika pojavila hrđa te je došlo do posljednjeg razdoblja širenja korozije. Nadalje, premazana šipka nije bila pod utjecajem svojstava koja izazivaju koroziju.

Stoga je eksperimentalno istraživanje dokazalo da PPE u zadovoljavajućem omjeru sprječava nastanak korozije. Također, cilj je ovog rada poboljšati učinkovitost rebraste armature s različitim debljinama premaza.

LITERATURA

- [1] Osial, M., Wiliński, D.: Organic substances as corrosion inhibitors for steel in concrete – an overview, *J. Build. Chem.*, 1 (2016), pp. 42–53, 2016, <https://doi.org/10.17461/j.buildchem.2016.107>.
- [2] Topçu, İ.B., Uzunömeroğlu, A.: Properties of corrosion inhibitors on reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 3 (2020) 2, pp. 93–109, <https://doi.org/10.31462/jseam.2020.02093109>.
- [3] Raja, P.B., Ghoreishiamiri, S., Ismail, M.: Natural corrosion inhibitors for steel reinforcement in concrete - A review, *Surface Review and Letters, World Scientific*, 22 (2015) 3. <https://doi.org/10.1142/S0218625X15500407>.
- [4] Asmara, Y.P., Kurniawan, T., Sutjipto, A.G.E., Jafar, J.: Application of plants extracts as green corrosion inhibitors for steel in concrete - A review, *Indonesian Journal of Science and Technology*, 3 (2018) 2, pp. 158–170, <https://doi.org/10.17509/ijost.v3i2.12760>.
- [5] Bellal, Y., Benghanem, F., Keraghel, S.: A new corrosion inhibitor for steel rebar in concrete: Synthesis, electrochemical and theoretical studies, *Journal of Molecular Structure*, 1225 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129257>.
- [6] Chaudhary, S., Tak, R.K.: Natural corrosion inhibition and adsorption characteristics of tribulus terrestris plant extract on aluminium in hydrochloric acid environment, *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 12 (2022) 2, pp. 2603–2617, <https://doi.org/10.33263/BRIAC122.26032617>.
- [7] Lee, H.S., Saraswathy, V., Kwon, S.J., Karthick, S.: Corrosion Inhibitors for Reinforced Concrete: A Review, in *Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications, InTech*, 2018, <https://doi.org/10.5772/intechopen.72572>.
- [8] Gu, X.F. et al.: Anti-corrosion and Anti-bacteria Property of Modified Pomegranate Peel Extract, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 322 (2018) 2, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/322/2/022004>.

- [9] Honarvar Nazari, M., Shihab, M.S., Havens, E.A., Shi, X.: Mechanism of corrosion protection in chloride solution by an apple-based green inhibitor: experimental and theoretical studies, *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 1 (2020) 1, <https://doi.org/10.1186/s43065-020-00007-w>.
- [10] Ait Aghzzaf, A., Veys-Renaux, D., Rocca, E.: Pomegranate peels crude extract as a corrosion inhibitor of mild steel in HCl medium: Passivation and hydrophobic effect, *Materials and Corrosion*, 71 (2020) 1, pp. 148–154, <https://doi.org/10.1002/maco.201911049>.
- [11] Ashassi-Sorkhabi, H., Mirzaee, S., Rostamikia, T., Bagheri, R.: Pomegranate (*Punica granatum*) Peel Extract as a Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Hydrochloric Acid Solution, *International Journal of Corrosion*, (2015), <https://doi.org/10.1155/2015/197587>.
- [12] Salim, A.M., Dawood, N.M., Ghazi, R.: Pomegranate Peel Plant Extract as Potential Corrosion Inhibitor for Mild Carbon Steel in a 1 M HCl Solution, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 987 (2020) 1, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/987/1/012019>.
- [13] Simpson, D., Robery, P., Broomfield, J., Bladon, S.: *Corrosion Testing of Concrete Structures*, 2016.
- [14] Voulgari, E., Zacharopoulou, A., Chousidis, N., Batis, G.: Effect of Organic Coating Corrosion Inhibitor on Protection of Reinforced Mortar, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 07 (2019)01, pp. 20–34, <https://doi.org/10.4236/msce.2019.71003>.
- [15] Usman, A.D., Victoria, A.F., Okoro, L.N.: Weight Loss Corrosion Study of Some Metals in Acid Medium," *JOURNAL OF ADVANCES IN CHEMISTRY*, 11 (2016) 2, pp. 3434–3440, <https://doi.org/10.24297/jac.v11i2.2211>.
- [16] Hashim, F., Al-Azawi, K., Al-Bghdadi, S.B., Shaker, L.M., Al-Amiery, A.: Experimental and Theoretical Approach to the Corrosion Inhibition of Mild Steel in HCl Solution by a Newly Coumarin, *Proc West Mark Ed Assoc Conf*, 41 (2019) 1, pp. 15, <https://doi.org/10.3390/ecsoc-23-06477>.
- [17] Rathi, V.R., Nirmal, S.D., Kokate, S.J.: Corrosion study of mild steel, tor steel and CRS steel by weight loss method, *J. Chem. Pharm. Res*, 2 (2010) 2, pp. 97–100.
- [18] Dixit, M., Gupta, A.K.: Assessment of Corrosion in Rebars by Impressed Current Technique, in *Lecture Notes in Civil Engineering*, 143 LNCE (2021), pp. 89–97. https://doi.org/10.1007/978-981-33-6969-6_9.
- [19] Satish, V.L., Ravindra, V.: Evaluation of corrosion resistance of corrosion inhibitors in concrete structures by Impressed voltage test, in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1025 (2021) 1. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1025/1/012002>.
- [20] Sun, Y., Qiao, G.: Influence of constant current accelerated corrosion on the bond properties of reinforced concrete, *International Journal of Electrochemical Science*, 14, (2019) 5, pp. 4580–4594, <https://doi.org/10.20964/2019.05.36>.
- [21] Mahdi, M.: Study the Pomegranate's Peel Powder as a Natural Inhibitor for Mild Steel Corrosion, 2015. [Online]. Available: <http://www.aiscience.org/journal/ijmcphttp://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
- [22] el Maaddawy, T.A., Soudki, K.A.: Effectiveness of Impressed Current Technique to Simulate Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15 (2003) 1, pp. 41–47, [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(2003\)15:1\(41\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:1(41)).
- [23] Šoić, I., Martinez, S., Lipošćak, I., Mikšić, B.: Development of method for assessing efficiency of organic corrosion inhibitors in concrete reinforcement, *GRAĐEVINAR*, 70 (2018) 5, pp. 369-375, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.2319.2018>
- [24] Serdar, M., Damjanović, D., Švaco, M., Jerbić, B., Orsag, M., Kovačić, Z.: Development of an autonomous system for assessment and prediction of structural integrity, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 12, pp. 1173-1184, <https://doi.org/https://doi.org/10.14256/JCE.3390.2021>