

# Ispitivanje galvanske korozije

---

**Palajsa, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:690966>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ISPITIVANJE GALVANSKE KOROZIJE**

Rijeka, rujan 2022.

Dominik Palajsa

0069071733

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij strojarstva

Diplomski rad

**ISPITIVANJE GALVANSKE KOROZIJE**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

Komentor: doc. dr. sc. Matej Fonović

Rijeka, rujan 2022.

Dominik Palajsa

0069071733

Rijeka, 11. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za materijale**  
Predmet: **Zaštita materijala**  
Grana: **2.11.03 proizvodno strojarstvo**

## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Dominik Palajsa (0069071733)**  
Studij: **Diplomski sveučilišni studij strojarstva**  
Modul: **Inženjerstvo materijala**

Zadatak: **Ispitivanje galvanске koroziје / Galvanic Corrosion Testing**

### Opis zadatka:

Opisati korozijske procese. Analizirati unutrašnje i vanjske čimbenike koroziје. Prikazati vrste koroziје prema geometriji korozijskog razaranja, sa naglaskom na galvanску koroziју. Analizirati uzroke galvanске koroziје te metode zaštite.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti gravimetrijsko ispitivanje koroziје sa svrhom analize utjecaja materijala, medija i površine u kontaktu na galvanскую koroziју. Opisati materijale, postupak ispitivanja, korištenu opremu i pribor. Rezultate ispitivanja kritički analizirati. Dati odgovarajuće zaključke..

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

*Dominik Palajsa*

Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:

*Sunčana Smokvina Hanza*  
Izv. prof. dr. sc. Sunčana Smokvina Hanza

*Matej Fonović*  
Doc. dr. sc. Matej Fonović (komentor)

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

*Kristian Lenić*  
Prof. dr. sc. Kristian Lenić

## **IZJAVA**

Sukladno članku 8. „*Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija*“ te sukladno „*Uputama za pisanje diplomskog rada Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci*“ izjavljujem da sam diplomski rad, pod nazivom „*Ispitivanje galvanske korozije*“, izradio samostalno, služeći se znanjima stečenim tijekom studija i literaturom navedenom na kraju rada.

Rijeka, rujan 2022.

---

Dominik Palajsa (0069071733)

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Sunčani Smokvina Hanza i komentoru doc. dr. sc. Mateju Fonoviću na savjetima, pomoći i stručnom vodstvu tijekom pisanja diplomskog rada i provođenja eksperimenta. Isto tako zahvaljujem se asistentima Lovri Liveriću, Lovri Šticu i Dariju Kvrgiću pri pomoći oko provođenja eksperimenta te analize dobivenih rezultata.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji koja mi je pružala podršku i razumijevanje tijekom studiranja. Zahvaljujem se djevojci Tari koja mi je svojom prisutnošću, podrškom, razumijevanjem i neprestanim ohrabriranjem uvelike pomogla u danima studiranja.

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KOROZIJA METALA .....	2
2.1. Uvjeti nastajanja.....	2
2.2. Ekonomski utjecaji korozije.....	3
2.3. Podjela korozijskih procesa.....	3
3. KEMIJSKA KOROZIJA .....	4
3.1. Mehanizmi kemijske korozije .....	4
3.2. Gibbsova slobodna energija .....	5
3.3. Brzina kemijske korozije.....	5
3.4. Pilling – Bedworthov omjer .....	6
4. ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJA .....	8
4.1. Mehanizmi elektrokemijske korozije .....	8
4.2. Standardni elektrodni potencijal .....	11
4.3. Pourbaixovi dijagrami .....	13
4.4. Unutrašnji i vanjski čimbenici.....	14
4.5. Određivanje brzine elektrokemijske korozije .....	16
4.5.1. Gravimetrijsko ispitivanje.....	16
4.5.2. Elektrokemijsko ispitivanje .....	18
5. OBLICI KOROZIJE .....	22
5.1. Opća korozija .....	22
5.2. Rupičasta korozija .....	23
5.3. Selektivna korozija.....	26
5.4. Interkristalna korozija .....	28
5.5. Napetosna korozija.....	30
5.6. Biološka korozija.....	32

5.7.	Erozijska korozija.....	34
5.8.	Korozija u procijepu.....	36
5.9.	Korozija djelovanjem lutajućih struja .....	38
5.10.	Galvanska korozija.....	39
5.10.1.	Mehanizam nastajanja.....	39
5.10.2.	Metode zaštite .....	43
6.	EKSPERIMENTALNI DIO .....	45
6.1.	Planiranje eksperimenta .....	45
6.1.1.	Odabir materijala .....	45
6.1.2.	Odabir medija.....	48
6.1.3.	Odabir veličine uzoraka .....	48
6.1.4.	Potreban broj uzoraka .....	50
6.2.	Priprema eksperimenta.....	52
6.2.1.	Izrezivanje uzoraka .....	52
6.2.2.	Priprema medija .....	54
6.2.3.	Vaganje uzoraka.....	54
6.2.4.	Postavljanje uzoraka u medij .....	56
6.3.	Provedba eksperimenta .....	61
6.3.1.	Početak eksperimenta.....	61
6.3.2.	Prvi pregled.....	61
6.3.3.	Drugi pregled .....	65
6.3.4.	Treći pregled .....	66
6.3.5.	Kraj eksperimenta .....	67
6.4.	Korišteni izrazi .....	71
6.4.1.	Promjena mase .....	71



6.4.2. Brzina korozije.....	71
6.5. Rezultati .....	72
6.5.1. Promjena mase uzoraka .....	72
6.5.2. Usporedba rezultata prema vrsti medija .....	75
6.5.3. Usporedba rezultata prema veličini anode te laboratorijskim i realnim uvjetima ..	82
6.5.4. Brzina korozije uzoraka .....	89
6.6. Analiza i diskusija rezultata .....	92
7. ZAKLJUČAK.....	98
POPIS LITERATURE .....	100
POPIS SLIKA.....	106
POPIS TABLICA .....	111
SAŽETAK .....	112
KLJUČNE RIJEČI:.....	112
SUMMARY .....	113
KEYWORDS:.....	113

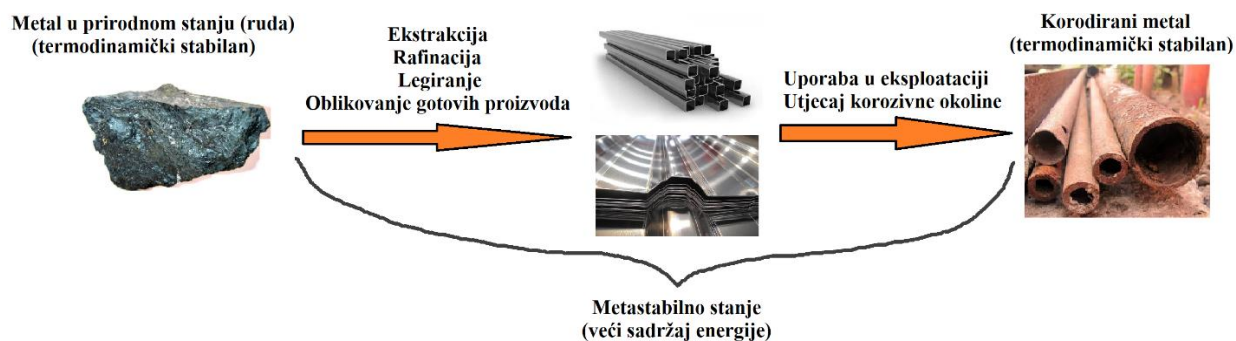
## 1. UVOD

Korozija je odavno poznata kao uobičajena pojava kod metalnih materijala u eksploataciji. Korozija postepeno uništava materijal, narušava integritet njegove površine i smanjuje kvalitetu njegovih mehaničkih svojstava. U ovom radu detaljnije je objašnjeno što je korozija, kako ona nastaje te koliki su troškovi korozije. Prikazana je podjela korozije prema mehanizmima korozije i geometrijskom obliku korozije. Mehanizam djelovanja kemijske korozije, uvjeti njenog nastajanja te utjecajni faktori objašnjeni su u trećem poglavlju. Mehanizam djelovanja elektrokemijske korozije detaljno je objašnjen u četvrtom poglavlju, kao i vanjski i unutarnji čimbenici koji utječu na pojavu ovog tipa korozije. Navedene su metode mjerenja elektrokemijske korozije i objašnjen sam postupak mjerenja. U petom poglavlju prikazana je podjela korozije prema geometrijskom obliku. Opisani su uvjeti nastajanja svakog pojedinog oblika te je svaki oblik prikazan odgovarajućim fotografijama. Posebna pozornost usmjerena je galvanskoj koroziji, koja je i tema eksperimentalnog dijela rada. Opisani su uvjeti nastajanja galvanske korozije te metode zaštite materijala od ovog oblika korozije.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada provedeno je gravimetrijsko ispitivanje galvanske korozije za koje su korišteni uzorci aluminija, čelika i mjedi. Prvi cilj ovog eksperimenta bio je utvrditi kako se pojedine kombinacije materijala ponašaju u različitim medijima. Drugi cilj bio je utvrditi razliku između laboratorijskih i realnih uvjeta ispitivanja na uzorcima. Treći cilj bio je utvrditi brzinu galvanske korozije obzirom na veličinu anode. Dobiveni rezultati prikazani su grafički radi lakše usporedbe i analize. Na kraju eksperimentalnog dijela napravljena je analiza i diskusija dobivenih rezultata.

## 2. KOROZIJA METALA

Riječ „korozija“ dolazi od latinske riječi *corrōdere* što znači „nagrizati“. Najuvriježena definicija korozije je ona prema Cathwellu. Cathwell [1] objašnjava kako metal ekstrahiran iz svoje prirodne rude, u korozivnoj okolini ima tendenciju vraćanja u prvobitno stanje. Ekstrakcijom metala iz rude povećava se energija metala koji postiže metastabilno stanje višeg sadržaja energije od prirodnog stanja. Korozijskim procesima metal se postepeno vraća u termodinamički stabilno stanje sa nižim sadržajem energije. Slika 2.1. prikazuje promjenu stanja metala kroz korozijski „životni“ ciklus.



Slika 2.1. Promjena stanja metala kroz korozijski „životni“ ciklus

### 2.1. Uvjeti nastajanja

Kako bi došlo do pojave korozije moraju se ispuniti uvjeti njenog nastajanja. Uvjet nastajanja je afinitet između metala koji je u metastabilnom stanju i okoline. Pod afinitetom se podrazumijeva kvantitativna težnja pojedinih tvari za spontanom međusobnom reakcijom. Ukoliko uvjeti nisu zadovoljeni neće doći do korozije.

Brzina i tok korozije ovise o afinitetu i otporima koji se suprotstavljaju korozijskim procesima. Na otpore i afinitet utječu vanjski i unutarnji čimbenici. Vanjske čimbenike čine karakteristike okoline koje su promjenjive, a unutarnje čimbenike čine karakteristike samog metala koji korodira. [2] Zbog promjenjivosti vanjskih čimbenika brzina korozije nije konstantna niti je tok linearan. Neki od ovih čimbenika su:

- vrsta korozijskog procesa,
- temperatura,
- koncentracija,
- brzina gibanja okoline,
- parcijalni tlak reaktanata i produkata.

## **2.2. Ekonomski utjecaji korozije**

Korozija neprestano zahvaća kulturnu baštinu, industriju i infrastrukturu. Pojavljuje se u energetici, transportu, proizvodnji hrane i pića, u naftnoj industriji, strojogradnji i građevini, odnosno može se reći kako je korozija sveprisutna pojava. Pogađa i negativno djeluje na metalne konstrukcije, metalom ojačane betonske konstrukcije, cjevovode, odobalne strukture, brodove, mostove, pristaništa, implantate i još mnogo toga.

Prema procjenama ministarstava Ujedinjenog Kraljevstva i Japana i Nacionalnog instituta za znanost SAD-a trošak korozije predstavlja otprilike 3-4 % BDP-a razvijenih industrijaliziranih zemalja. Nedavna studija NACE-a procjenjuje cijenu globalne korozije u iznosu od 2,5 trilijuna američkih dolara (USD), što je oko 3,4 % BDP-a industrijaliziranih zemalja. Trošak korozije uključuje izravne i neizravne troškove. Izravni troškovi su troškovi povezani sa zamjenom oštećenih komponenata i metodama prevencije u vidu zaštitnih premaza, katodne zaštite i drugo. Neizravni troškovi uključuju troškove povezane sa zagađenjem, proizvodnjom, gubitkom renomea i tako dalje. Neizravne troškove teško je dobro procijeniti i često nadmašuju izravne troškove. Nemjerljiv neizravni trošak je gubitak ljudskog života zbog pojave katastrofalnih kvarova ili otkazivanja konstrukcije. Koroziju nije moguće zaustaviti, ali ju je moguće smanjiti i usporiti. Izvešće NACE IMPACT (2016) potvrdilo je da se primjenom osnovnih načela sprečavanja korozije može smanjiti trošak korozije za 15-35 % odnosno 375-875 milijardi američkih dolara.[3]

## **2.3. Podjela korozijskih procesa**

Korozijske procese može se podijeliti prema više značajki sustava korodiranja, a to su [4]:

1. mehanizam korozije – kemijska ili elektrokemijska,
2. metal ili legura – aluminij, bakar, čelik, legure aluminija, legure bakra i dr.,
3. geometrijski oblik oštećenja – opća ili lokalizirana korozija,
4. odnos korozije i drugih negativnih posljedica,
5. privredna grana – infrastruktura, petrokemija, transport i dr.,
6. korozivna okolina – atmosfera, vrući plinovi, voda, zemlja, i dr.

Kemijska i elektrokemijska korozija glavne su podjele prema mehanizmu korozije. U pojedinoj literaturi ta podjela je na suhu i mokru koroziju. Suha korozija, odnosno kemijska se pojavljuje u uvjetima pri visokim temperaturama bez prisutstva vode, dok mokra u svim uvjetima gdje je prisutna voda (zemlja, voda, fluidi iz raznih procesa, i dr.). [5]

### 3. KEMIJSKA KOROZIJA

Kemijska korozija je oblik korozije koji se pojavljuje u neelektrolitima. Neelektrolitima se smatraju vrući suhi plinovi i pare ( $O_2$ ,  $S_2$ ,  $HCl$ ,  $NO_x$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ), te bezvodne organske tekućine poput nafte i njenih derivata. Ovaj tip korozije najčešće nastaje na povišenim temperaturama gdje atomi metala iz kristalne rešetke reagiraju sa električki neprovodnom okolinom. Pritom najčešće nastaju molekule oksida i sulfida. Preciznije rečeno dolazi do oksidacije metala sa kisikom (ugl. iz zraka) pri čemu nastaje metalni oksid. [4]

#### 3.1. Mehanizmi kemijske korozije

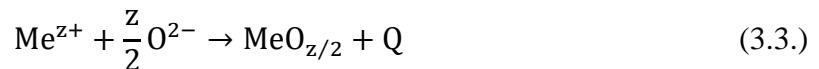
Proces kemijske korozije započinje na površini metala koji je pri visokim temperaturama izložen korozivnoj okolini. Površina metala na granici sa oksidnim slojem otpušta valentne elektrone iz vanjske ljuske:



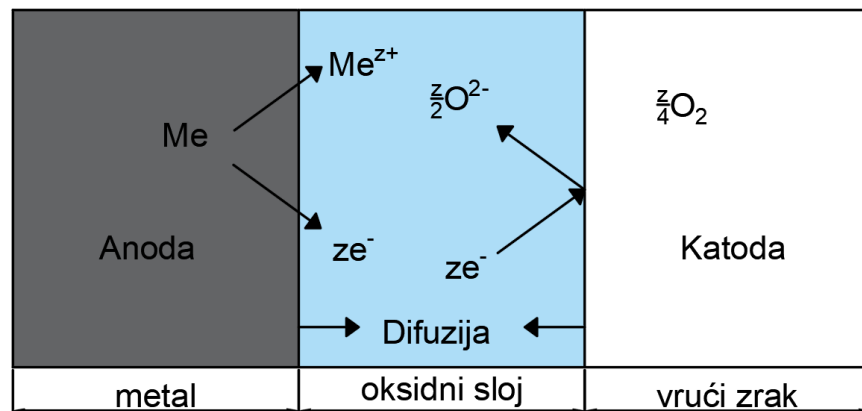
Molekule kisika uz sam oksidni sloj primaju elektrone i dolazi do redukcije kisika:



Redukcijom kisika stvaraju se negativno nabijeni ioni kisika koji reagiraju sa kationima metala i stvaraju metalne okside te dolazi do oslobađanja topline (Q):



Slika 3.1. vizualni je prikaz ovog procesa.



Slika 3.1. Mehanizam kemijske korozije [4]

### 3.2. Gibbsova slobodna energija

Gibbsova slobodna energija ukazuje na smjer kemijske reakcije. Promjena Gibbsove slobodne energije ( $\Delta G$ ) je jednaka razlici promjene entalpije ( $\Delta H$ ) i umnošku temperature ( $T$ ) i promjene entropije ( $\Delta S$ ):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.4.)$$

Gibbsova slobodna energija može predvidjeti smjer kemijskih reakcija pri konstantnom tlaku i temperaturi. Ako je  $\Delta G > 0$  reakcija nije spontana te je za njeno pokretanje potrebno dovesti energiju (endotermna reakcija).  $\Delta G = 0$  predstavlja ravnotežni sustav u kojem nema promjene, dok su pri  $\Delta G < 0$  reakcije spontane i oslobađaju energiju (egzotermne reakcije). Korozija se pojavljuje pri  $\Delta G < 0$  što znači da je ona egzoterman proces. [6, 7]

### 3.3. Brzina kemijske korozije

Brzina kemijske korozije ovisi o mnogo faktora, a to su:

- metal koji korodira,
- naprezanje u metalu,
- temperatura,
- sastav i koncentracija agresivne okoline,
- koeficijent difuzije iona,
- transport elektrona,
- parcijalni tlak oksida,
- kvaliteta oksidnog sloja,
- pH vrijednost okoline.

Brzina korozije može se smanjiti na dva načina: kinetičkim (aktivacijskim) otporom koroziji i difuzijskim (transportnim) otporom koroziji. Kinetički otpor se postiže snižavanjem temperature okoline čime se smanjuje energija atoma i molekula zbog čega oni teže međusobno reagiraju, odnosno smanjuje se brzina reakcija. Difuzijski otpor postiže se stvaranjem korozijskih produkata na površini metala koji u obliku zaštitnog sloja štite metal od daljnjeg stvaranja korozijskih produkata. Taj sloj usporava koroziju i naziva se pasivacijskim slojem. Debljina pasivacijskog sloja može biti od  $< 40$  do  $> 500$  nm. [4]

### 3.4. Pilling – Bedworthov omjer

U prethodnom potpoglavlju spomenuto je da oksidni sloj koji se stvara na površini metala smanjuje brzinu korozije. Kako bi brzina korozije uistinu bila smanjena oksidni sloj mora prekrivati cijelu površinu metala i treba biti kompaktan te fizikalno-kemijski stabilan. Uz navedeno oksidni sloj mora dobro prijanjati uz površinu metala. Kompaktnost oksidnog sloja procjenjuje se pomoću Pilling-Bedworthovog omjera:

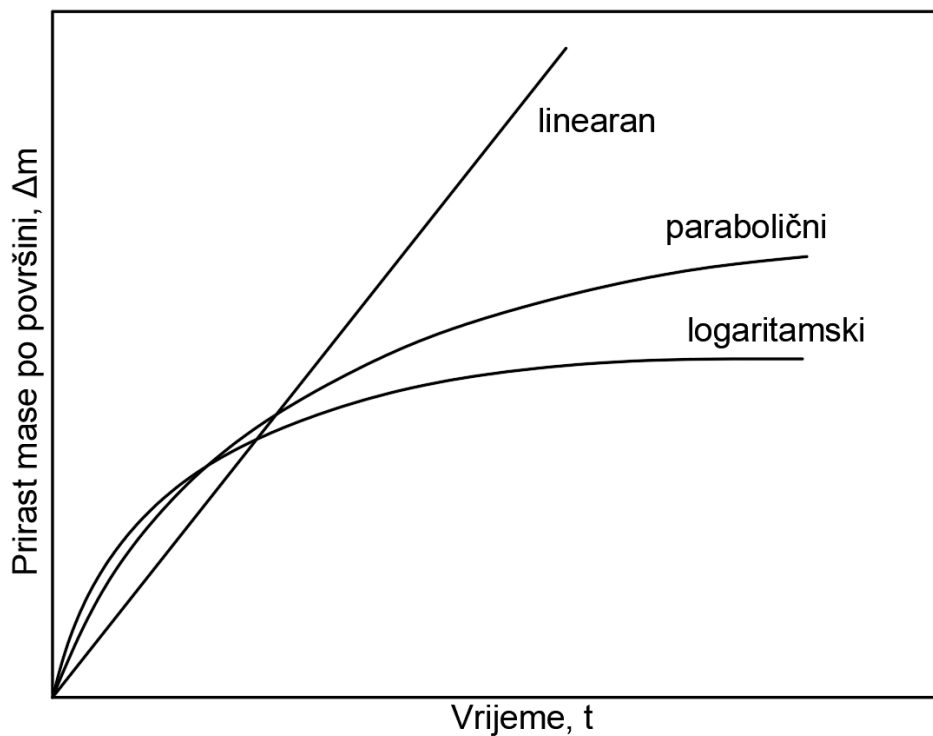
$$PB = \frac{V_{KP}}{V_m} = \frac{M_{KP}\rho_m}{xM_m\rho_{KP}} \quad (3.5.)$$

gdje je:

- $V_{KP}$  [ $m^3$ ] – volumen korozijskog produkta
- $V_m$  [ $m^3$ ] – volumen metala
- $M_{KP}$  [ $g\ mol^{-1}$ ] – molarna masa korozijskog produkta
- $\rho_m$  [ $kg\ m^{-3}$ ] – gustoća metala
- $x$  – broj atoma metala u molekuli korozijskog produkta
- $M_m$  [ $g\ mol^{-1}$ ] – molarna masa metala
- $\rho_{KP}$  [ $kg\ m^{-3}$ ] – gustoća korozijskog produkta

Ako je  $PB < 1$  dolazi do mrvljenja korozijskih produkata i nemogućnosti stvaranja kompaktnog oksidnog sloja. Mrvljenje korozijskih produkata karakteristično je za kalij, natrij, berilij i magnezij. Kod  $PB > 2$  dolazi do bubrenja i otkidanja oksidnog sloja što je karakteristično za vanadij, volfram i molibden. Stoga se može zaključiti kako se kompaktan oksidan sloj stvara pri vrijednosti  $PB$  do 1 do 2. Metali koji stvaraju kompaktan sloj su: aluminij, kadmij, olovo, cink, nikal, bakar, titanij, krom i željezo. [8]

Stvaranje oksidnog sloja povećava masu i debljinu metala. Proučavanjem prirasta mase u vremenu može se utvrditi kakva su svojstva oksidnog sloja. Slika 3.2. prikazuje tri varijante prirasta mase u vremenu zbog stvaranja oksidnog sloja.



Slika 3.2. Prirast mase u vremenu zbog stvaranja oksidnog sloja [4]

Linearan prirast mase ukazuje na jednolik rast oksidnog sloja što znači da taj sloj nema zaštitna svojstva. Brzina korozije će unatoč stvaranju oksidnog sloja biti konstantna. Parabolični prirast mase ukazuje na sve sporiji rast oksidnog sloja iz čega se može zaključiti da taj sloj ima zaštitna svojstva. Zaštitna svojstva se ostvaruju pri izloženosti metala visokim temperaturama, npr. za Fe iznad 250 °C. Logaritamski prirast mase ukazuje na stvaranje oksidnog sloja koji ima dobra zaštitna svojstva. Ovaj oksidni sloj stvara se već pri niskim temperaturama. [9]

Može se zaključiti kako kompaktnost oksidnog sloja ovisi o više faktora:

- PB omjer,
- prionjivost uz površinu metala,
- fizikalna i kemijska postojanost (nema taljenja, sublimacije, itd.),
- mehanička svojstva (čvrstoća, tvrdoća, elastičnost),
- toplinska rastezljivost (mora biti jednaka ili slična kao i kod osnovnog metala).



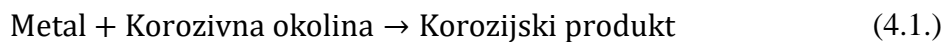
## 4. ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJA

Elektrokemijska korozija ili mokra korozija je mehanizam korozije koji se odvija uz prisutstvo elektrolita. Za razliku od kemijske korozije prijenos elektrona kod elektrokemijske korozije događa se uz pomoć vode, tj. elektrolita koji provodi električnu energiju. Temelji se na mehanizmu u kojem se zbrajaju reakcije anode gdje se oslobađaju elektroni i katode koja troši elektrone.

### 4.1. Mehanizmi elektrokemijske korozije

Svaki metal u svojoj strukturi sadrži određene nepravilnosti. Nepravilnosti uzrokuju pojavu mjesta nižeg ili višeg elektrodnog potencijala u odnosu na ostatak metala. Pritom nastaju anodna i katodna područja. Zbog anodnih i katodnih područja dolazi do stvaranja mikro i makro galvanskih članaka na površini metala koji rezultiraju pojavom korozije, a nazivaju se još i korozijskim člancima.

Korozija metala se može zapisati u obliku:



Ukoliko se metal nalazi u električki vodljivom okruženju korozijska reakcija je suma dvaju procesa, onog na anodi i onog na katodi. Anodni proces uključuje oksidaciju metala, dok katodni uključuje redukciju (uobičajeno kisika ili redukcija iona vodika).

Anodni proces započinje ionizacijom atoma metala pri čemu se otpuštaju valentni elektroni, odnosno stvaraju se  $\text{Me}^{z+}$  metalni ioni. Metal je ovdje reducens jer oksidira i otpušta elektrone. Na anodnim mjestima u materijalu nastaju korozijska oštećenja. Proces oksidacije prikazan je jednadžbom [10]:



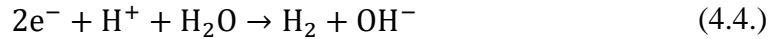
Katodni proces započinje dolaskom otpuštenog elektrona do katodnog područja metala. Na katodi se odvijaju redukcija i depolarizacija gdje depolarizator veže otpuštene elektrone iz procesa oksidacije na anodi. Ovi procesi ovise o pH vrijednosti i kemijskom sastavu elektrolita. Najčešće kemijske reakcije su vodikova i kisikova depolarizacija. Obje ovise o pH vrijednosti elektrolita.

Kemijske reakcije vodikove depolarizacije su:

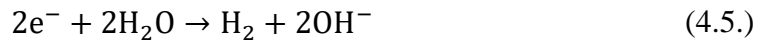
1. Vodikova depolarizacija u kiselim otopinama ( $\text{pH} < 7$ ):



2. Vodikova depolarizacija u neutralnim otopinama ( $\text{pH} = 7$ ):



3. Vodikova depolarizacija u lužnatim otopinama ( $\text{pH} > 7$ ):



Kemijske reakcije kisikove depolarizacije su:

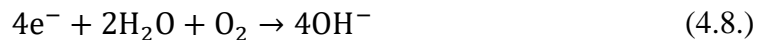
1. Kisikova depolarizacija u kiselim otopinama ( $\text{pH} < 7$ ):



2. Kisikova depolarizacija u neutralnim otopinama ( $\text{pH} = 7$ ):



3. Kisikova depolarizacija u lužnatim otopinama ( $\text{pH} > 7$ ):



Afinitet korozije uz kisikovu depolarizaciju je veći od onog uz vodikovu depolarizaciju. No uz ove reakcije postoje i još neke reakcije koje nisu česte. Redukcija metalnih iona i taloženje metala najčešće se pojavljuju u cijevima i spremnicima kod kemijskih procesa u kemijskoj i procesnoj industriji. Jednadžbe ovih reakcija su [11]:

1. Redukcija metala:



2. Taloženje metala:



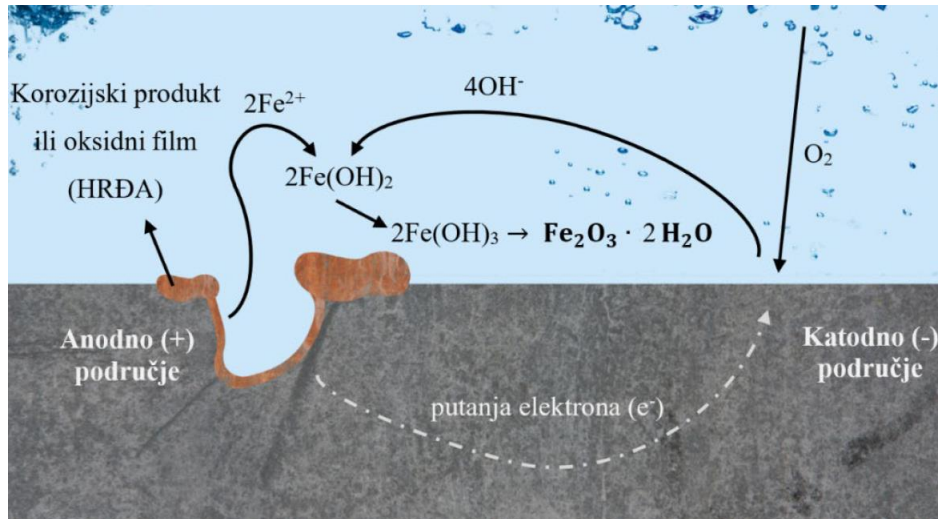
Anodna i katodna reakcija su parcijalne reakcije te se obje odvijaju istovremeno, brzina katodne reakcije ovisi o anodnoj reakciji i obrnuto. Kada bi u nekom slučaju brzine ovih reakcija bile neujednačene metal bi se našao u električki nabijenom stanju, što naravno nije moguće. Količina i brzina otpuštanja elektrona na anodi jednaka je količini i brzini trošenja elektrona na katodi.

Proces elektrokemijske korozije se nastavlja reakcijom metalnih kationa s anodnog dijela sa anionima nastalim na katodnom dijelu metala.

Primjer reakcije kationa željeza sa hidroksidnim ionima:

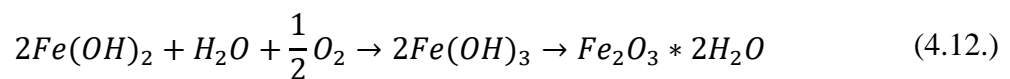


Slika 4.1. prikazuje proces elektrokemijske korozije željeza u morskoj vodi.



Slika 4.1. Elektrokemijska korozija željeza u morskoj vodi [12]

Željezov hidroksid ( $2\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) je nestabilan i reaktivan spoj u uvjetima gdje je izložen i najmanjoj količini kisika. Stoga reagira sa kisikom pri čemu nastaje željezov (III) oksid:



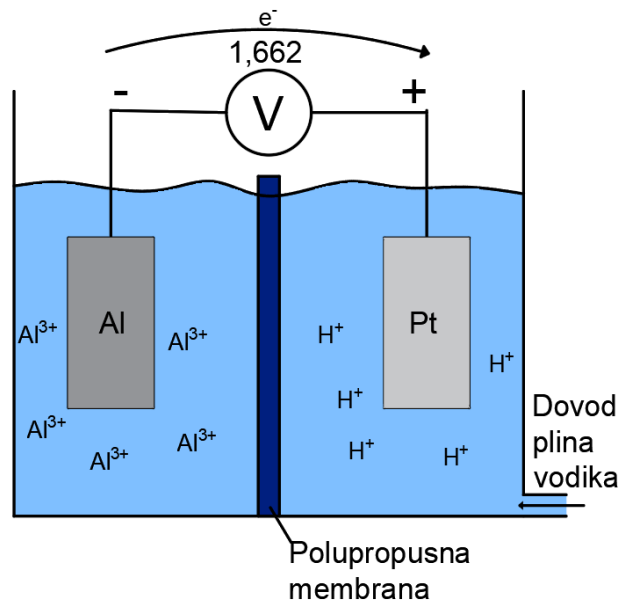
Željezov (III) oksid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) je jedan od tri osnovna oksida željeza. Te je uz  $\text{FeO}$  i  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  uobičajeni produkt korozije željeza (slika 4.2.). Obično je narančaste do crvenkasto-smeđe boje, a u prirodi se pojavljuje u obliku željezne rude hematita. [13]



Slika 4.2. Korozija željeza

## 4.2. Standardni elektrodni potencijal

Standardni elektrodni potencijal ( $E^0$ ) je mjera tendencije oslobađanja elektrona u redoks sustavu, odnosno razlika elektrodnog potencijala ispitivanog metala i elektrodnog potencijala standardne vodikove elektrode (SHE). U galvanskom članku elektroda od metala čiji potencijal ispitujemo spaja se kao anoda, dok je kao katoda najčešće spojena standardna vodikova elektroda ( $E^0 = 0$  V). Za dobivanje preciznih podataka potrebno je postići standardne uvjete ispitivanja. Standardni uvjeti podrazumijevaju čisti metal bez prisutnosti nečistoća, tlak od 101325 Pa i koncentraciju otopine  $M = 1$  mol/dm<sup>3</sup>. Ako obje elektrode rade po standardnim uvjetima razlika njihovog potencijala je potencijal elektrode anode. Primjer ispitivanja standardnog elektrodnog potencijala aluminijske prikazan je na slici 4.3.



Slika 4.3. Galvanski članak sa elektrodama aluminijske i platine

Reakcija aluminijske i vodikovih iona može se podijeliti na dvije polureakcije:



Odnosno jednačina ukupne reakcije je:



Elektrodu od vodika nije moguće napraviti pa se stoga koriste inertne elektrode poput platine. Iako mnogi metali mogu funkcionirati kao vodikova elektroda platine je zbog svoje inertnosti i mogućnosti lakog prenošenja elektrona najbolji izbor. Elektroda platine služi kao sredstvo redukcije i oksidacije vodika i njegovih iona. Reakcije se odvijaju na nasumičnim područjima elektrode, pri čemu dolazi do prijenosa elektrona između tih područja. U praktičnim mjerenjima često nije moguće koristiti SHE jer vodik reagira sa drugim tvarima u članku ili druge tvari reagiraju sa platinskom elektrodom na površini. Stoga se ponekad koriste alternativne elektrode čiji potencijal u odnosu na SHE je dobro poznat. Neke od tih elektroda su zasićena kalomel elektroda (SCE) sa  $E^0 = 0,244$  V ili bakar-sulfatna elektroda (CSE) sa  $E^0 = 0,337$  V. Tablica 4.1. prikazuje galvanski niz elektrodnih potencijala većine metala. [14]

Tablica 4.1. Galvanski niz

<b>Metal</b>	<b>Oksidacija</b>	<b>Standardni elektrodni potencijal <math>E_0</math> [V]</b> <b><math>\vartheta = 25</math> °C, <math>p = 101325</math> Pa</b>
Zlato	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}^-$	1,500
Platina	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}^-$	1,200
Srebro	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}^-$	0,800
Bakar	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	0,342
Vodik	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	0,000
Olovo	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,126
Kositar	$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,136
Molibden	$\text{Mo} \rightarrow \text{Mo}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,200
Nikal	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,250
Kobalt	$\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,277
Talij	$\text{Tl} \rightarrow \text{Tl}^+ + \text{e}^-$	-0,336
Indij	$\text{In} \rightarrow \text{In}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,342
Kadmij	$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,403
Željezo	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,440
Krom	$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^-$	-0,740
Cink	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,763
Mangan	$\text{Mn} \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-1,180
Cirkonij	$\text{Zr} \rightarrow \text{Zr}^{4+} + 4\text{e}^-$	-1,530
Titanij	$\text{Ti} \rightarrow \text{Ti}^{2+} + 2\text{e}^-$	-1,630
Aluminij	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,660
Magnezij	$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,370
Natrij	$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{e}^-$	-2,710
Kalcij	$\text{Ca} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{e}^-$	-2,870
Kalij	$\text{K} \rightarrow \text{K}^+ + \text{e}^-$	-2,930
Litij	$\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$	-3,050

Redoks reakcijama u galvanskom članku stvara se elektromotorna sila ( $E_{MF}$ ) i jednaka je razlici standardnih elektrodni potencijala redoks sustava [15]:

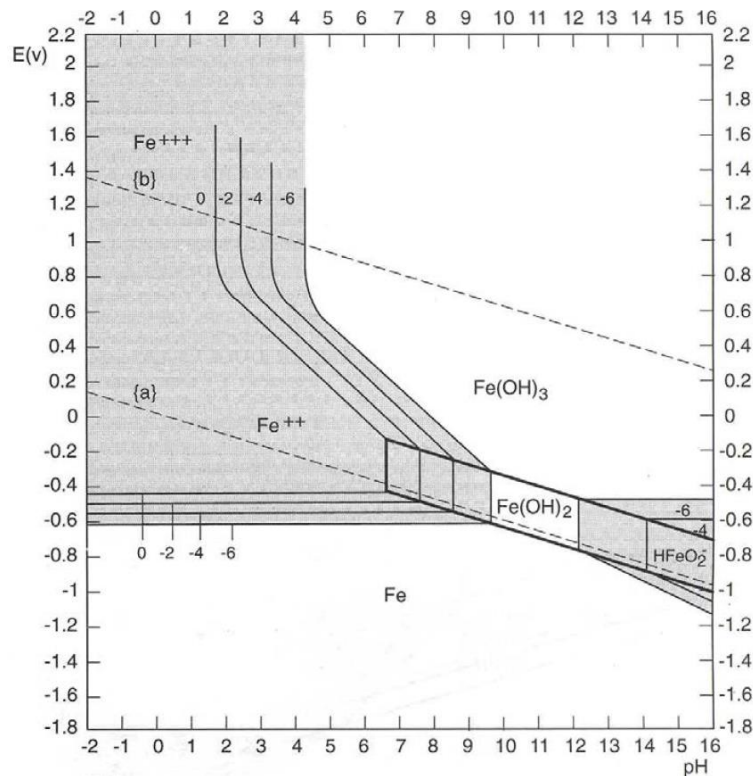
$$E_{MF} = E_K - E_A \quad (4.16.)$$

gdje je:

- $E_K$  – standardni elektrodni potencijal katode
- $E_A$  – standardni elektrodni potencijal anode

### 4.3. Pourbaixovi dijagrami

Dijagram za određeni metal koji izražava odnos njegovog potencijala i pH vrijednosti naziva se Pourbaixov dijagram. Pourbaixov dijagram koristan je način za predviđanje elektrokemijskih procesa koji se mogu pojaviti u određenim uvjetima temperature, tlaka i kemijskog sastava. Koristi se pri predviđanju nastajanja korozijskih produkata, odnosno sastava korozijskih produkata za određene kombinacije elektrodnog potencijala i pH vrijednosti. Pomoću ovog dijagrama može se odrediti i koja kombinacija pH vrijednosti i potencijala rezultira smanjenjem ili povećanjem intenziteta korozije. Slika 4.4. prikazuje Pourbaixov dijagram željeza uronjenog u vodu.



Slika 4.4. Pourbaixov dijagram željeza uronjenog u vodu [16]

Analizirajući ovaj dijagram može se zaključiti kako željezo koje se drži na potencijalu manjem od -1,2 V u odnosu na polućeliju vodika ne bi trebalo korodirati u otopini bilo koje pH vrijednosti. Također se može uočiti da u rasponu potencijala od oko -0,6 V i 0,7 V i pH vrijednosti ispod 9 produkt korozije će biti ion željeza  $\text{Fe}^{2+}$ . Pri pozitivnijim potencijalima produkt će biti željezni ion  $\text{Fe}^{3+}$ . U preostalim slučajevima formirat će se željezovi hidroksidi  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  i  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  te složeni ioni željeza. [16]

Pourbaix-ov dijagram na slici 4.4. pruža informacije o tri stanja stabilnosti željeza, a to su:

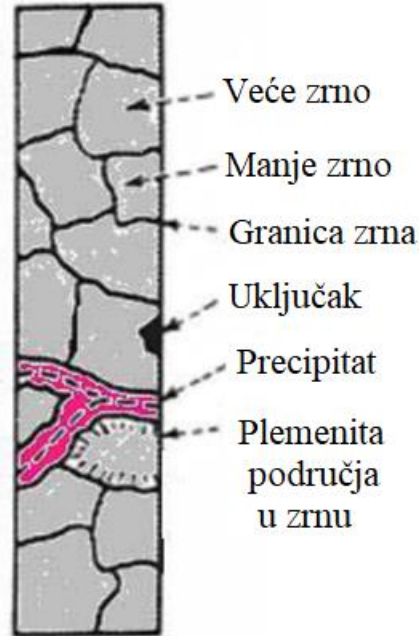
- korozija – sivo područje na grafu,
- pasivnost – područje nastajanja  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  i  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  na grafu,
- imunost – područje Fe na grafu.

#### 4.4. Unutrašnji i vanjski čimbenici

Opće je poznato kako svaki komercijalni metal sadrži određene nečistoće i nepravilnosti. Te nepravilnosti nastaju u procesu proizvodnje ili u eksploataciji te ih nije moguće izbjeći. Unutarnje nepravilnosti se teško uočavaju i mogu se donekle popraviti jedino toplinskom obradom. Vanjske greške je lakše uočiti, kao i vanjske uvjete u kojima se metal nalazi. Čimbenici elektrokemijske korozije mogu biti vanjski i unutrašnji.

Unutrašnji čimbenici, odnosno uzroci nastajanja mikrogalvanskih članaka su (slika 4.5.) [4]:

- razlika u veličini kristalnih zrna (manje zrno anoda),
- granice kristalnih zrna (anode),
- precipitati na granicama kristalnih zrna (anode),
- plemenitija područja u kristalnom zrnu (katode),
- uključci u kristalnim zrnima (katoda ili anoda – ovisno o elektrodnom potencijalu).



*Slika 4.5. Uzroci nastajanja mikrogalvanskog članka [4]*

Vanjski čimbenici, odnosno uzroci nastajanja makrogalvanskih članaka su [4]:

- razlika u temperaturi elektrolita,
- razlika u pH vrijednosti elektrolita,
- razlika u koncentraciji tvari iz elektrolita na površini metala,
- razlika u brzini strujanja elektrolita,
- stanje površine metala,
- razlika u intenzitetu mehaničkih naprezanja,
- pucanje ili poroznost zaštitnog oksidnog filma,
- oštećenja prevlaka na površini metala,
- kontakt dva metala različitih elektrodnih potencijala.



#### 4.5. Određivanje brzine elektrokemijske korozije

Brzina korozije je brzina gubitka materijala na anodi u određenom vremenskom intervalu. Prethodno je navedeno kako je korozija proces istovremenog odvijanja procesa oksidacije i redukcije, koji ovisno o sustavu mogu biti pod difuzijskom ili aktivacijskom kontrolom. Obzirom da je difuzija sporiji proces, ona nerijetko definira brzinu korozije. Na brzinu korozije utječu razni čimbenici. Izuzev vanjskih utjecaja poput: sastava i tlaka plinovitog medija, kretanja elektrolita ili materijala, temperature i osobina produkata korozije, na brzinu korozije utječu i unutrašnje karakteristike metala. Unutrašnji čimbenici su sastav i struktura metala, naprezanja unutar kristalne strukture i deformacije. Na brzinu korozije značan utjecaj može imati i hrapavost površine koja onemogućava stvaranje pasivacijskog sloja. [17]

##### 4.5.1. Gravimetrijsko ispitivanje

Gravimetrijska metoda je najraširenija i najjednostavnija kvantitativna metoda za ispitivanje brzine korozije. Zasniva se na utvrđivanju promjene mase ispitnih uzoraka uslijed djelovanja korozije. Ispitne uzorke je potrebno adekvatno pripremiti. Prije početka ispitivanja uzorci se čiste i suše, a zatim važu koristeći visoko precizne laboratorijske vage koje se često koriste u zlatarskim radnjama. Jedna takva vaga je *Mettler Toledo JP703C* (slika 4.6.). [18]



Slika 4.6. Mettler Toledo JP703C [18]

Nakon vaganja uzorci se uranjaju u medij u kojem se ostavljaju određen period. Zbog toga se ova vrsta ispitivanja ponekad naziva i ispitivanje uranjanjem. Uklanjanjem korozivskih produkata sa uzoraka i njihovim ponovnim vaganjem dobivaju se rezultati o promjeni (gubitku) mase. Smatra se da je svaki gubitak mase prouzročen korozijom. Gubitak mase metala ukazuje na otpornost materijala prema koroziji.

Prosječna brzina korozije računa se prema izrazu:

$$v_{kor} = \frac{\Delta m}{A * t} \text{ [g m}^{-2} \text{ s}^{-1}] \quad (4.17.)$$

gdje je:

- $\Delta m$  [g] - gubitak mase materijala
- $A$  [m<sup>2</sup>] - površina metala
- $t$  [s] – vrijeme

Prosječna brzina prodiranja korozije računa se prema izrazu:

$$v_{kor} = \frac{h}{t} = \frac{\Delta m}{\rho * A * t} \text{ [mm god}^{-1}] \quad (4.18.)$$

gdje je:

- $h$  [mm] – dubina prodiranja
- $\rho$  [g cm<sup>-3</sup>] - gustoća materijala

Klasifikacija materijala prema prosječnoj brzini korozije prikazana je u tablici 4.2.

*Tablica 4.2. Klasifikacija materijala prema prosječnoj brzini korozije*

Prosječna brzina prodiranja korozije [mm god <sup>-1</sup> ]	Postojanost materijala	Upotrebljivost materijala
< 0,001	potpuno postojan	uvijek upotrebljiv
0,001 - 0,01	dobro postojan	uglavnom upotrebljiv
0,01 - 0,1	postojan	obično upotrebljiv
0,1 - 1	smanjeno postojan	katkad upotrebljiv
1 - 10	slabo postojan	iznimno upotrebljiv
> 10	nepostojan	neupotrebljiv

Glavni nedostatak ove vrste ispitivanja je dugotrajno ispitivanje u trajanju od više mjeseci u svrhu dobivanja mjerljivih podataka.

#### 4.5.2. Elektrokemijsko ispitivanje

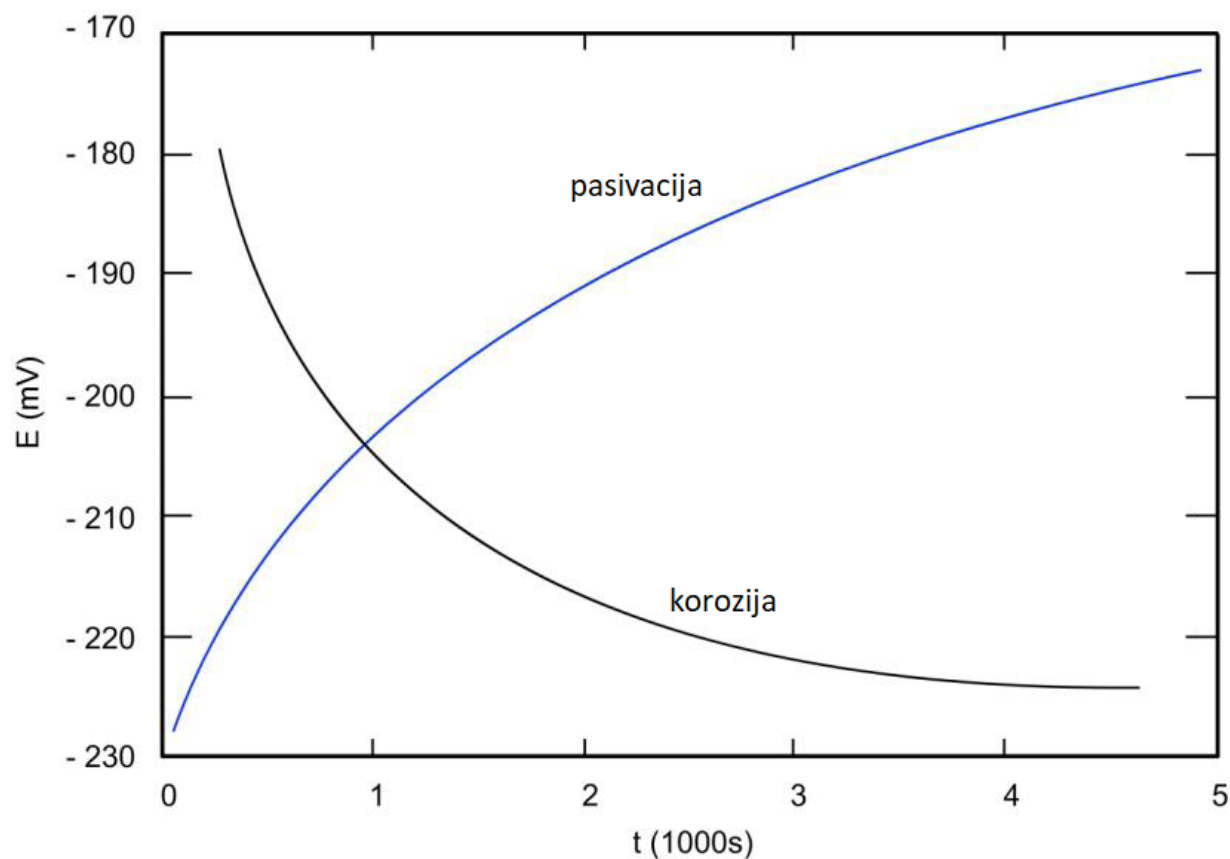
Elektrokemijska metoda za razliku od gravimetrijske nije dugotrajna metoda ispitivanja te koristi napredniju opremu. Osnovna oprema za provođenje elektrokemijskog ispitivanja brzine korozije sastoji se od: računala, potenciozata i peteroglone ćelije. Računalo koristi programe poput PowerSuite i PowerCorr koji služe za dobivanje grafičkog prikaza ponašanja ispitnog uzorka u ispitnom mediju. Potenciozat uspostavlja potencijal na radnoj elektrodi i mjeri struju odziva sustava (slika 4.7.). Peterogrlena ćelija se sastoji od radne, referentne i pomoćne elektrode (slika 4.7.). Radna elektroda je zapravo ispitni uzorak. Referentna elektroda je elektroda s poznatim potencijalom koja nije dio strujnog kruga, već služi za mjerenje potencijala ispitnog uzorka. Uglavnom je to zasićena kalomel elektroda ( $E_{SCE} = +0,242 \text{ V}$ ) koja se preko Lugginovog mosta približava ispitnom uzorku i nije direktno uronjena u elektrolit. Pomoćne elektrode moraju biti izrađene od korozijski postojanog materijala koji provodi električnu energiju. Obično su to grafitne elektrode. [19, 20]



*Slika 4.7. Potenciozat i peteroglona ćelija*

Elektrokemijska korozija najčešće se ispituje na dva načina: dobivanjem krivulje potencijala otvorenog strujnog kruga i dobivanjem Tafelove krivulje (krivulje anodne i katodne polarizacije).

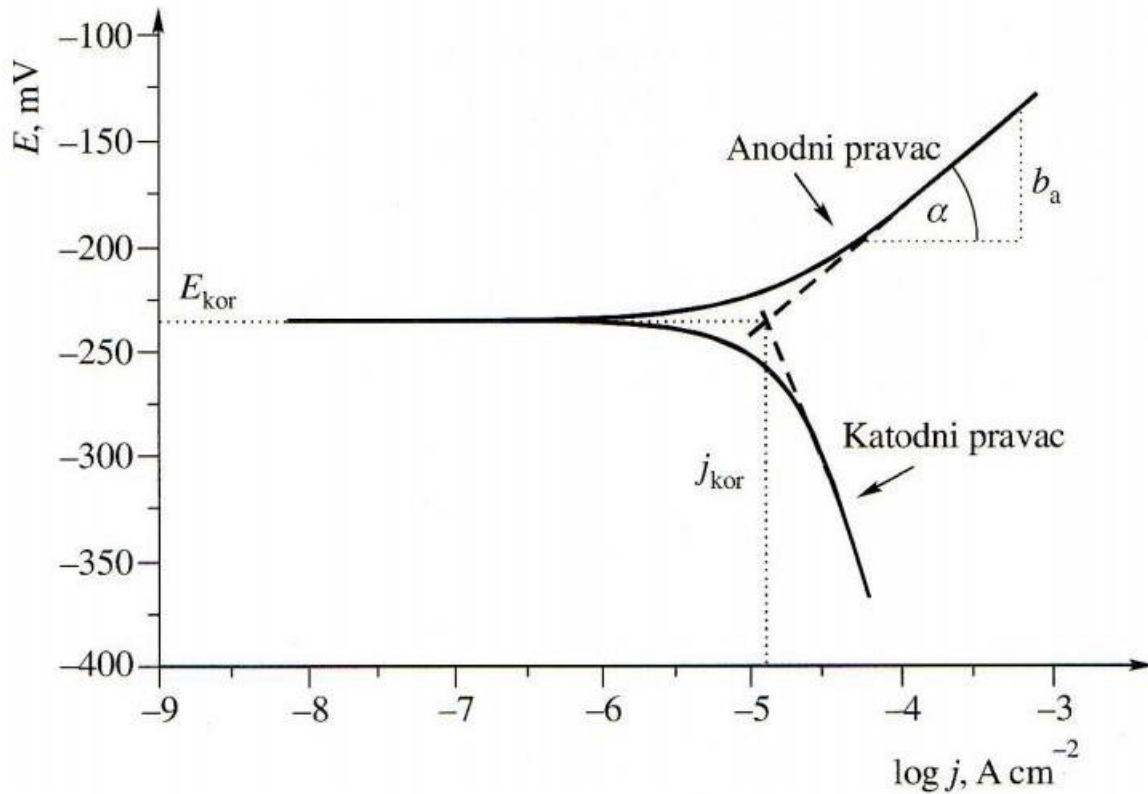
Krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga ovisna o vremenu (slika 4.8.) dobiva se praćenjem promjene stacionarnog potencijala otvorenog strujnog kruga ( $E_{OC}$ ). Na taj način dobivaju se podaci o korozijskom ponašanju ispitnog uzorka u elektrolitu. [4]



Slika 4.8. Krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga [4]

Ukoliko su vrijednosti  $E_{OC}$  pozitivne uzorak se ponaša stabilno i ne korodira u elektrolitu. Negativne vrijednosti  $E_{OC}$  ukazuju na nestabilnost i djelovanje korozije, dok promjena vrijednosti od negativnih prema pozitivnim ukazuje na pojavu pasivacije.

Tafelova krivulja dobiva se prikazom rezultata dobivenih katodnom i anodnom polarizacijom, u rasponu  $E = E_{OC} \pm 250$  mV, u polulogaritamskom obliku (slika 4.9.).



Slika 4.9. Tafelova krivulja [21]

Ekstrapolacijom katodnog i anodnog Tafelovog pravca u njihovom sjecištu određuju se gustoća korozijske struje ( $j_{kor}$ ) i korozijski potencijal ( $E_{kor}$ ). Za izračun brzine korozije potrebno je znati i ekvivalentnu masu materijala ( $EW$ ). Ekvivalentna masa materijala je ona masa tvari koja u redoks procesu troši 1 mol elektrona, a računa se prema izrazu:

$$EW = \sum_{i=1} \frac{f_i * M_{ri}}{n_i} \text{ [g]} \quad (4.19.)$$

gdje je:

- $f_i$  - maseni udio i-tog elementa
- $M_{ri}$  – relativna atomska masa i-tog elementa
- $n_i$  – broj otpuštenih elektrona

Sa poznatom gustoćom korozijske struje, ekvivalentnom masom materijala i gustoćom materijala može se izračunati brzina korozije prema izrazu:

$$v_{\text{kor}} = \frac{0,0033 * j_{\text{kor}} * EW}{\rho} \text{ [mm god}^{-1}\text{]} \quad (4.20.)$$

gdje je:

- $j_{\text{kor}}$  [ $\text{A cm}^{-2}$ ] – gustoća korozijske struje
- $EW$  [g] - ekvivalentna masa materijala
- $\rho$  [ $\text{g cm}^{-3}$ ] – gustoća materijala

## 5. OBLICI KOROZIJE

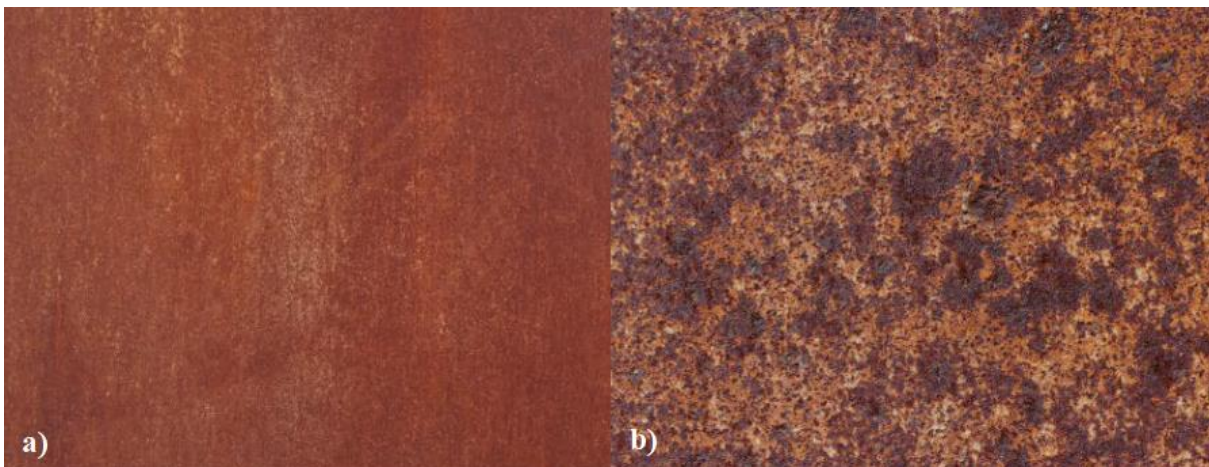
### 5.1. Opća korozija

Opća korozija (eng. uniform corrosion) je najzastupljeniji oblik korozije. Materijal se može razarati ravnomjerno ili neravnomjerno te po dijelu površine ili po kompletnoj površini materijala. Do ove vrste korozije dolazi kada je metal izložen agresivnoj okolini. U njoj pod djelovanjem različitih kemijskih i elektrokemijskih procesa dolazi do postepenog stanjivanja metala sve do trenutka dostizanja kritične debljine presjeka nakon čega se materijal lomi. Ova vrsta korozije stvara najviše korozijskih produkata, ali ne predstavlja veliku opasnost jer njena karakteristika nije širenje u dubinu. Najčešće se pojavljuje na predmetima koji su izloženi atmosferi. (slika 5.1.). [3]



*Slika 5.1. Opća korozija napuštenog automobila [22]*

Ravnomjerna korozija zahvaća cijelu površinu jednako, dok neravnomjerna korozija neke dijelove zahvaća više a neke manje. Razlog tome može biti hrapavost površine ili nejednolikost u strukturi materijala. Neravnomjerna korozija ponekad se zamjenjuje sa širokom i plitkom rupičastom korozijom, stoga kako ne bi došlo do pogreške u predviđanju njenog ponašanja potrebno je pažljivo dijagnosticirati tip korozije. Slika 5.2. prikazuje ravnomjernu i neravnomjernu koroziju.

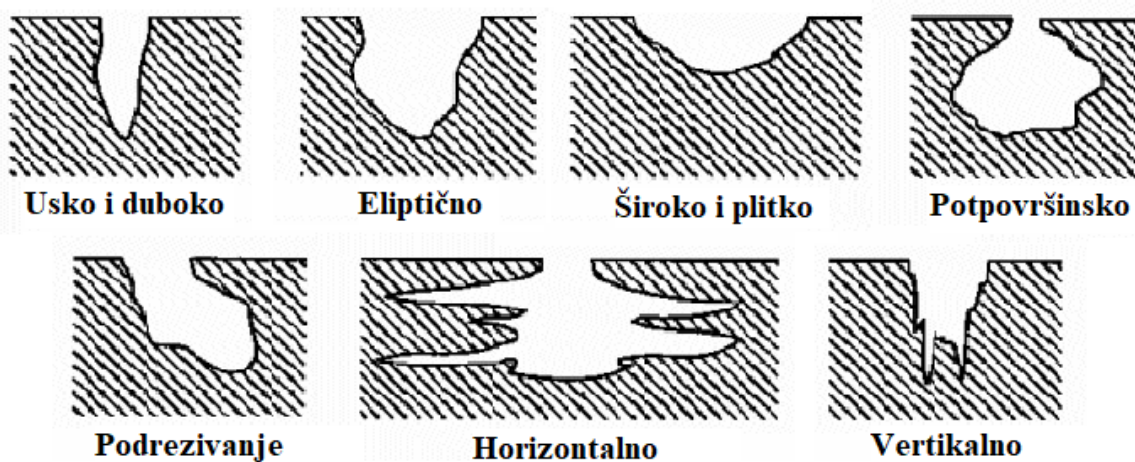


Slika 5.2. a) Ravnomjerna korozija b) Neravnomjerna korozija [12]

## 5.2. Rupičasta korozija

Rupičasta korozija (eng. pitting corrosion) je vrlo intenzivna korozija koja nastaje u obliku lokaliziranih rupica. Predstavlja veću opasnost od opće korozije zbog njenog karakterističnog dubinskog prodiranja u materijal. Teško ju je otkriti i predvidjeti oštećenja. Mala oštećenja koja nastaju mogu uzrokovati veliku štetu zbog dubinskog djelovanja i narušavanja integriteta materijala. Dolazi do gubitka mehaničkih svojstava metala i stvaranja kritične točke na mjestu rupice koja nerijetko rezultira lomom materijala. Ova vrsta korozije uzrokuje minimalnu promjenu u masi materijala. [23, 24]

Slika 5.3. predočava različite načine prodiranja koje ovaj tip korozije može poprimiti.

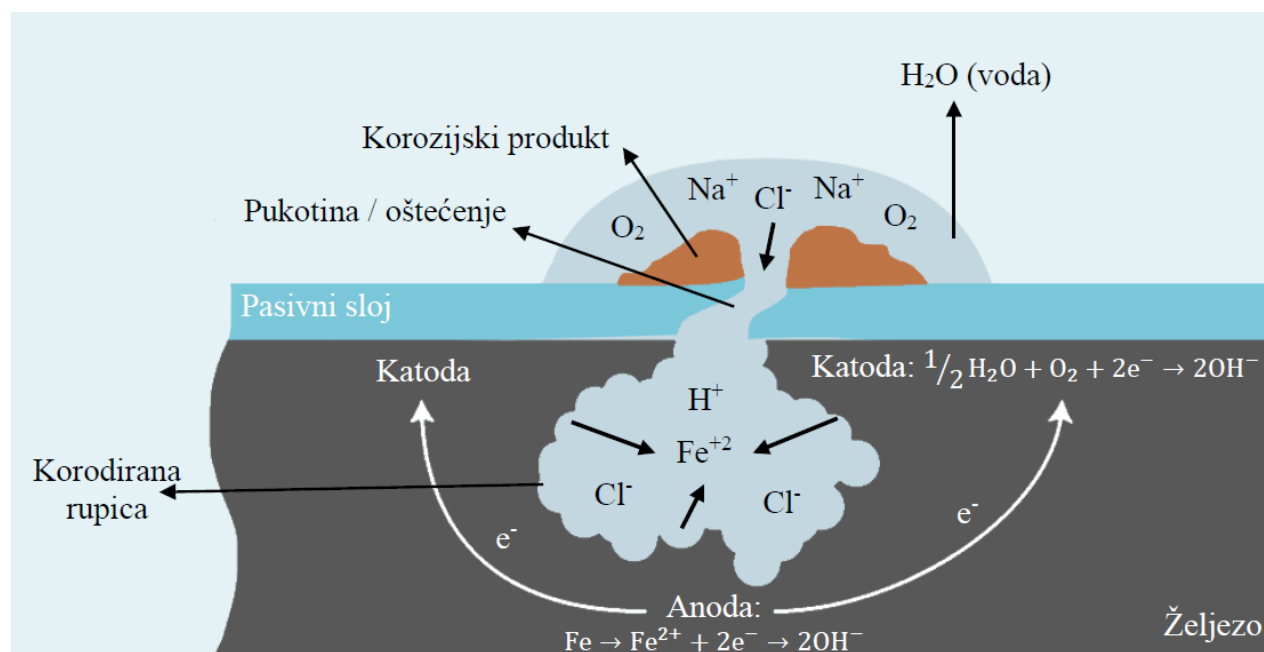


Slika 5.3. Mehanizmi prodiranja rupičaste korozije



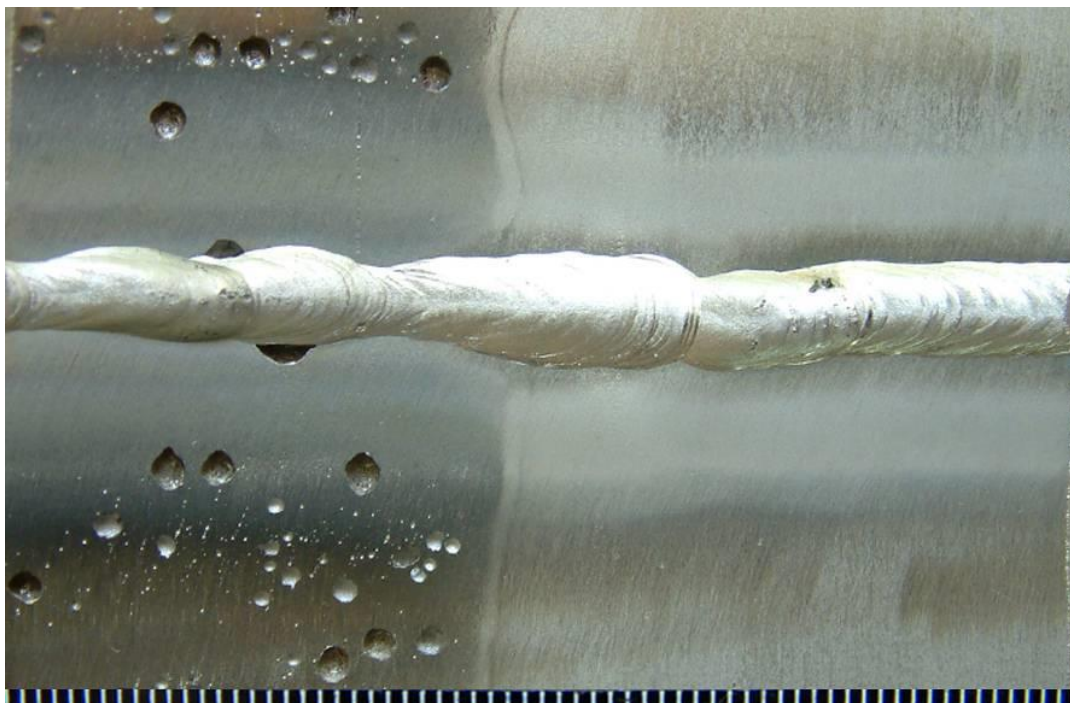
Oštećenja mogu nastati zbog nedostatka pasivnog filma na površini materijala te mogu biti mehanička ili kemijska. Elektroliti koji sadrže kloride ( $\text{Cl}^-$ ) razaraju pasivni film što je karakteristična pojava kod rupičaste korozije. Djelovanje mikroorganizama ili nehomogenost u strukturi materijala također mogu utjecati na pojavu ovog tipa korozije. Nakupine metalnih kationa i klorida uz manji udio kisika pospješuju rast rupice, a zbog svoje agresivnosti utječu na nemogućnost stvaranja pasivnog sloja. [25]

Slika 5.4. prikazuje proces nastajanja rupičaste korozije u željezu izloženom morskoj vodi.



Slika 5.4. Proces nastajanja rupičaste korozije [12]

Rupičasta korozija najčešće napada nehrđajuće čelike nakon procesa zavarivanja. Zagrijavanjem dolazi stvaranja oksida u zoni utjecaja topline. Stvaraju se oksidi kroma, željeza, nikla i drugih metala. Krom u zoni utjecaja topline difundira van osnovnog materijala i osiromašuje osnovni materijal kromom. Osiromašena područja nalaze se tik ispod površine i izrazito su osjetljiva na koroziju. Slika 5.5. prikazuje rupičastu koroziju nehrđajućeg čelika u zoni utjecaja topline.



*Slika 5.5. Rupičasta korozija AISI 304L nehrđajućeg čelika [4]*

Veća količina i veća gustoća lokaliziranih rupica ukazuje na veću dubinu korozije. Kod cjevovoda pojava rupičaste korozije može uzrokovati curenje fluida iz cijevi u okolinu. Korozija u rupicama djeluje u smjeru gravitacije tj. prema dolje. Slučajevi u kojima rupice napreduju prema gore ili okomito na površinu su rijetki. Vidljivije rupice se pojavljuju nakon dužeg razdoblja, nakon nekoliko mjeseci pa čak i godina. Na dnu rupica često se pojavljuje napetosni zamor i dolazi do djelovanja napetosne korozije. [26]

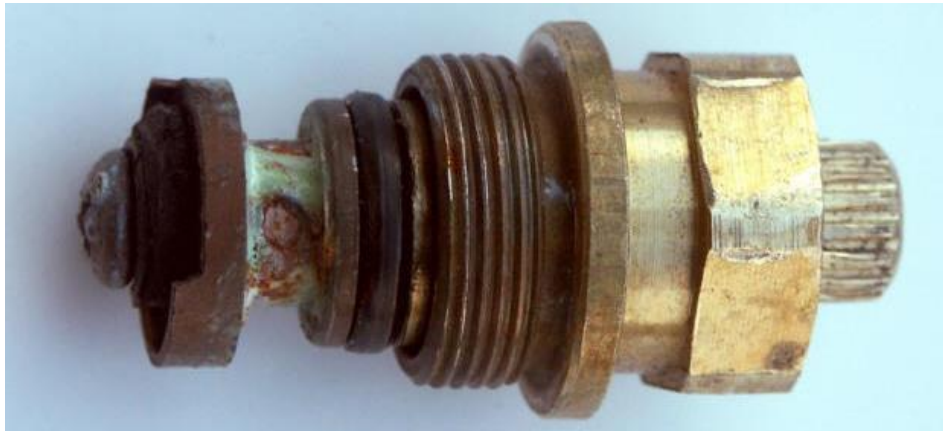
Faktor rupičaste korozije (eng. pitting factor) je omjer najdublje rupice i prosječne dubine rupica, a računa se prema formuli:

$$\text{Faktor rupičaste korozije} = \frac{\text{dubina najdublje rupice}}{\text{prosječna dubina rupice}} = \frac{p}{d} \quad (5.1.)$$

### 5.3. Selektivna korozija

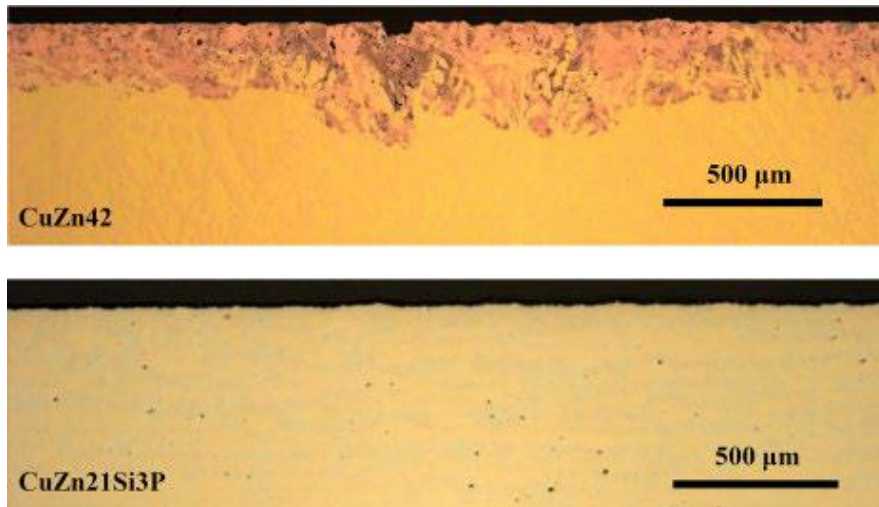
Selektivna korozija je tip korozije koji se pojavljuje kod metalnih legura. Metalne legure se sastoje od dva ili više metala pri čemu selektivna korozija djeluje na onaj metal u leguri koji ima najniži elektrodni potencijal. Metal nižeg elektrodnog potencijala postepeno korodira i „ispire“ se iz legure. Najčešće su to aluminij, kobalt, željezo, cink i krom. Djelovanjem selektivne korozije stvara se krhaki materijal koji je podložan lomu. Česti primjeri ovog tipa korozije su decinkacija i grafitizacija.

Decinkacija je oblik selektivne korozije koji zahvaća cink u nekoj leguri. Često se pojavljuje kod mjedi. Žuta mjed uobičajeno se sastoji od 30% cinka dok ostatak čini bakar. Ona nakon decinkacije mijenja boju iz žute u prepoznatljivu crvenkastu (bakrenu) boju (slika 5.6.). Ova promjena boje karakteristična je kod decinkacije mjedi. Nakon decinkacije ostaje porozna struktura bakra koja je vrlo krhka. [27]



*Slika 5.6. Decinkacija mjedenog ventila [28]*

Najbolji način za smanjenje decinkacije je minimiziranje udjela cinka u leguri. Legura mjedi CuZn42 sadrži 42% cinka te kod nje dolazi do intenzivnije decinkacije za razliku od legure CuZn21Si3P koja sadrži 21% cinka, te joj je dodan silicij u svrhu sprečavanja pojave decinkacije. (slika 5.7.). [29]



*Slika 5.7. Usporedba decinkacije kod legure CuZn42 i legure CuZn21Si3P [29]*

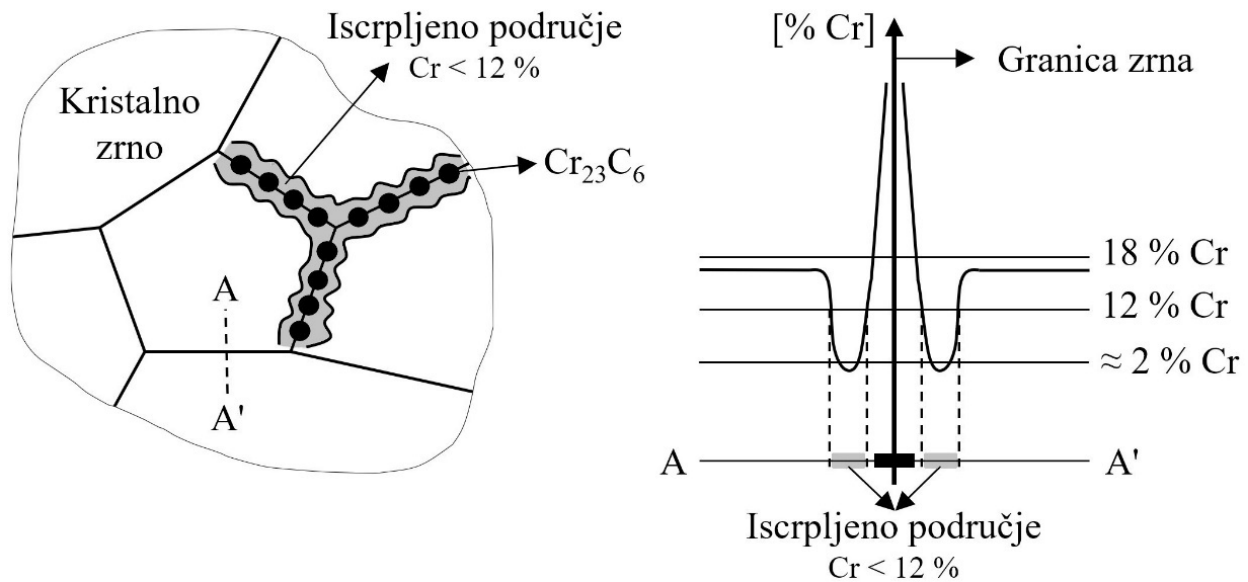
Grafitizacija je tip selektivne korozije koji zahvaća željezo u sivom lijevu, nakon čijeg razaranja ostaje krhki grafitni kostur. Proces grafitizacije je vrlo spor no nakon određenog vremena željezo gubi svoja mehanička svojstva. Gubitak mehaničkih svojstava uslijed djelovanja ovog tipa selektivne korozije može rezultirati pojavom loma. Grafitizacija cijevi od sivog lijeva prikazana je na slici 5.8. [30]



*Slika 5.8. Grafitizacija sivog lijeva [30]*

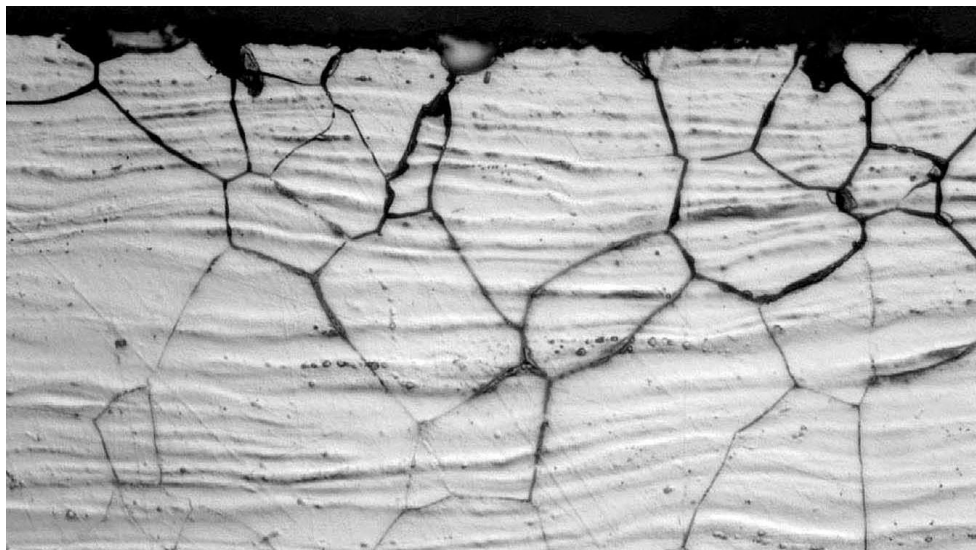
#### 5.4. Interkristalna korozija

Interkristalna korozija (eng. intercrystalline corrosion) je lokalizirani oblik korozije koji razara metal uzduž granice zrna, dok glavnina zrna ostaje bez oštećenja. Mikrostruktura metala se sastoji od mnogo kristalnih zrna na čijim granicama se često talože nečistoće i razni precipitati, a također može doći i do izdvajanja pojedinih faza. Precipitati na granicama zrna stvaraju područja koja mogu biti osjetljiva na koroziju. Stvaranjem karbida kroma na granicama zrna okolno područje se osiromašuje kromom što dovodi do visoke korozijske osjetljivosti tog područja, ovaj proces naziva se još i senzibilizacija (slika 5.9.). U elektrolitu se zatvara galvanski članak između nastalih karbida kao katode i područja osiromašenog kromom kao anode. [31]



Slika 5.9. Udio kroma uz granice kristalnih zrna [12]

Senzibilizacija je najčešće posljedica zagrijavanja metala na visoke temperature. Senzibilizacija austenitnih Cr-Ni čelika najčešće se pojavljuje pri zavarivanju na temperaturama od 400 do 800°C. Problem se najviše očituje u zoni utjecaja topline, jer je tamo senzibilizacija najveća. Slika 5.10. prikazuje interkristalnu koroziju austenitnog čelika. [32]



*Slika 5.10. Interkristalna korozija [33]*

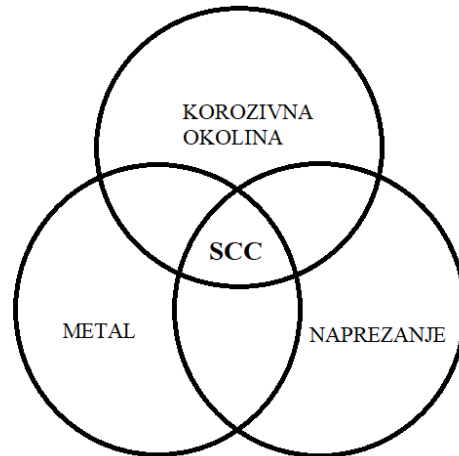
Eksfolijacija, listanje ili raslojavanje je poseban oblik interkristalne korozije koja se širi granicama zrna paralelno s površinom metala. Često se pojavljuje kod aluminijskih legura (slika 5.11.). Ovaj tip korozije karakterističan je za legure aluminija koje su podvrgnute postupcima hladnog oblikovanja. Hladnim oblikovanjem, poput valjanja, se izdužuju kristalna zrna po čijim granicama dolazi do raslojavanja. Korozija započinje na kristalnim zrnima najbližim površini. Nakupljanjem korozijskih produkata između zrna dolazi do odvajanja zrna što rezultira listanjem. Eksfolijacija često započinje na krajevima zrna koja se nađu na obrađenim rubovima, a s vremenom napreduje kroz čitav presjek legure. [4, 34]



*Slika 5.11. Eksfolijacija aluminijske legure [4]*

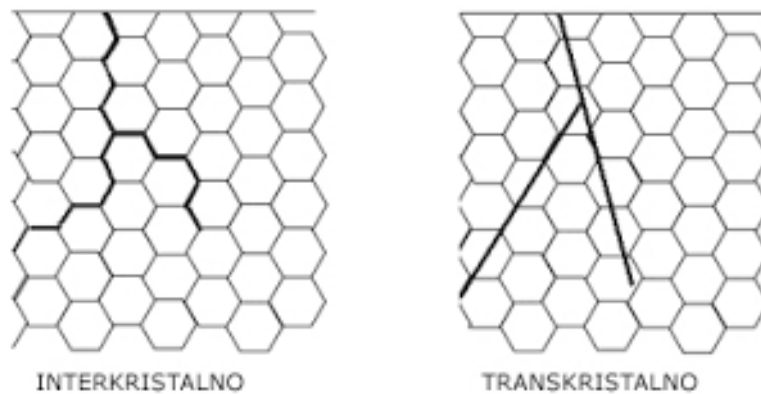
## 5.5. Napetosna korozija

Napetosna korozija (eng. stress corrosion cracking) je oblik korozije koji nastaje na metalnim materijalima uslijed djelovanja vlačnih napreznja i korozivne okoline (slika 5.12.).



*Slika 5.12. Uvjeti nastajanja napetosne korozije*

Napetosna korozija napreduje mnogo brže nego kada napreznje ili korozivna okolina djeluju svaki zasebno. Vlačna opterećenja imaju najveći utjecaj na ovaj tip korozije i uglavnom se pojavljuju unutar samog metala, a ne na površini. Dakle radi se o zaostalim napreznjima u materijalu koja zaostaju nakon procesa hladne deformacije ili zavarivanja. Pukotine se kroz materijal mogu širiti interkristalno i transkristalno (slika 5.13.). [35]



*Slika 5.13. Interkristalno i transkristalno širenje pukotina [35]*

Napetosna korozija često je teško uočljiva i ne manifestira se sve do trenutka stvaranja veće pukotine ili loma. Pojavljuje se u četiri faze: U prvoj fazi dolazi do akumulacije naprezanja u području gdje je onemogućeno kretanje dislokacija. Kada je akumulirano naprezanje dovoljno veliko dolazi do inicijacije pukotine. Zbog stvaranja korozijskih produkata dolazi do širenja pukotine, te na kraju i do loma materijala.

Slika 5.14. prikazuje napetosnu koroziju cijevi na mjestu savijanja.



*Slika 5.14. Napetosna korozija na savijenom dijelu cijevi [35]*

Korozijski zamor (eng. corrosion fatigue) je oblik napetosne korozije koje se pojavljuje pod utjecajem korozivne okoline i dinamičkih (cikličkih) opterećenja. Korozijski zamor uvelike ovisi o korozivnosti elektrolita u kojem se materijal nalazi. Ovisno o elektrolitu korozija se ubrzava ili usporava. Na zraku će korozijski zamor biti manji nego li u morskoj vodi. Također uzrokuje lom materijala što može biti opasno. Slika 5.15 prikazuje lom vratila uslijed korozijskog zamora. [11]



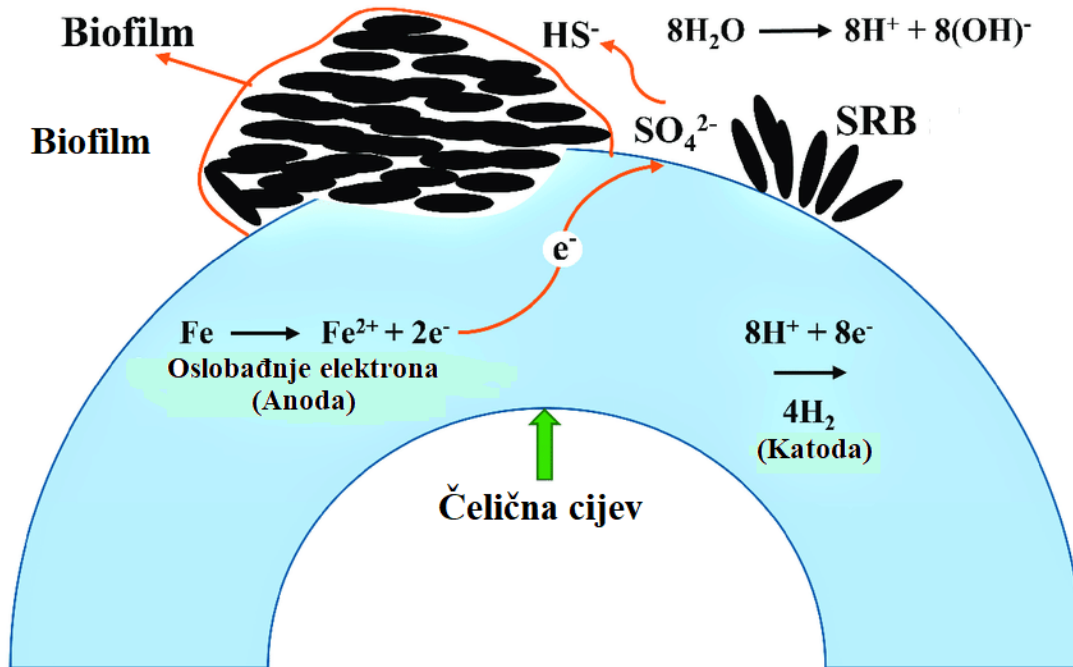
*Slika 5.15. Lom vratila kao posljedica korozijskog zamora [36]*



## 5.6. Biološka korozija

Biološka korozija je oblik korozije koji se pojavljuje zbog djelovanja živih organizama. Dijeli se na bakterijama uzrokovanu koroziju i koroziju u ljudskom tijelu.

Bakterijska korozija se pojavljuje zbog metaboličkih djelovanja mikro i makro organizama koji stvaraju korozivnu okolinu produktima svog metabolizma ili djelovanjima na bilo koji drugi način. Postoji desetak poznatih bakterija koje uzrokuju koroziju nehrđajućih i ugljičnih čelika, legura aluminija i legura bakra u tlu i u vodi. Djeluju na temperaturama okoline od 10 do 50°C te pH vrijednosti od 4 do 9. Najpoznatija je sulfatreducirajuća bakterija (SRB) koja za metaboličke procese koristi kisik iz sulfatnog iona ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) i redukcijom stvara sulfide ( $\text{HS}^-$ ) iz sulfata. Slika 5.16. prikazuje shemu ovog procesa. [37]



Slika 5.16. Korozija čelika djelovanjem metaboličke aktivnosti SRB bakterije

Ovaj tip korozije najčešće se pojavljuje na:

- spremnicima i cjevovodima otpadnih voda, nafte i plina,
- rashladnim sustavima,
- konstrukcijama koje se nalaze u zoni zapljuskivanja,
- Spremnicima za gorivo kod motornih vozila,
- Kondenzatorima nuklearnih elektrana i termoelektrana.

Slika 5.17. prikazuje biološku koroziju koja postepeno uništava potonuli brod Titanik.



*Slika 5.17. Biološka korozija – Titanik [38]*

Biološka korozija pojavljuje se i u ljudskom tijelu. Implantati koje se nalaze u ljudskom tijelu pod utjecajem su raznih čimbenika kao što su:

- brzina tjelesnih tekućina,
- pH tjelesnih tekućina,
- tjelesna temperatura,
- mehanička naprezanja,
- koncentracija iona.

Kvaliteta, način i izbor materijala izrade implantata ima važan utjecaj na pojavu korozije. Implantati se najčešće izrađuju od titanija koji je biokompatibilan i dobrih mehaničkih karakteristika. Pojava korozije na implantatima rezultira bolnim reakcijama kod pacijenata, te lomom samog implantata. Slika 5.18. prikazuje koroziju zubnog implantata napravljenog od titanija. [39]



*Slika 5.18. Korozija titanijevog zubnog implantata [39]*

### **5.7. Erozijska korozija**

Erozijska korozija (eng. erosion corrosion) je oblik korozije koji nastaje istovremenim djelovanjem korozije i erozije. Zaostajanje korozijskih produkata na površini metala je onemogućeno zbog erozijskog djelovanja fluida koji sve produkte ispire s površine. Ne dolazi do usporavanja korozije niti stvaranja pasivacijskog sloja. Najčešće se pojavljuje u sustavima za prijenos fluida, a posebno je opasna u cijevima gdje dolazi do oštećenja unutarnje stijenke cijevi i propuštanja fluida. Od nje nastaju karakteristična oštećenja u obliku žljebova prema kojima se vidi tok fluida kroz cijev (slika 5.19.).



*Slika 5.19. Erozijska korozija bakrene cijevi [40]*

Erozijskoj koroziji su najpodložniji ugljični čelici zbog stvaranja debelih slabo prijanjajućih slojeva, te bakar i bakrove legure zbog niske čvrstoće. Uvelike ovisi o brzini fluida koju je potrebno regulirati u cilju sprečavanja ovog tipa korozije. Postoje tri podvrste, a to su udarna, kavitacijska i tarna korozija. [11, 41]

Udarna korozija je tip erozijske korozije koji je povezan sa lokaliziranim oštećenjima nastalim zbog velike brzine i udara fluida u stijenku cijevi. Često se pojavljuje u koljenima koja su povezana sa vertikalnim cijevima, gdje zbog gravitacije raste brzina fluida, a samim time i jačina udara o stijenku cijevi. Slika 5.20. prikazuje karakterističan izgled oštećenja ovim tipom korozije. [42]



*Slika 5.20. Udarna korozija [42]*

Kavitacijska korozija je drugi oblik erozijske korozije koji nastaje simultanim djelovanjem korozije i kavitacije. Kavitacija je proces u kojem dolazi do stvaranja mjehurića zbog razlike tlakova u fluidu. Mjehurići udaraju u površinu metala gdje implodiraju i otkidaju čestice metala. Ovakav problem često se pojavljuje kod rotacijskih dijelova poput rotora pumpe ili brodskih propelera (slika 5.21.). [43]



*Slika 5.21. Kavitacija brodskog propelera [44]*

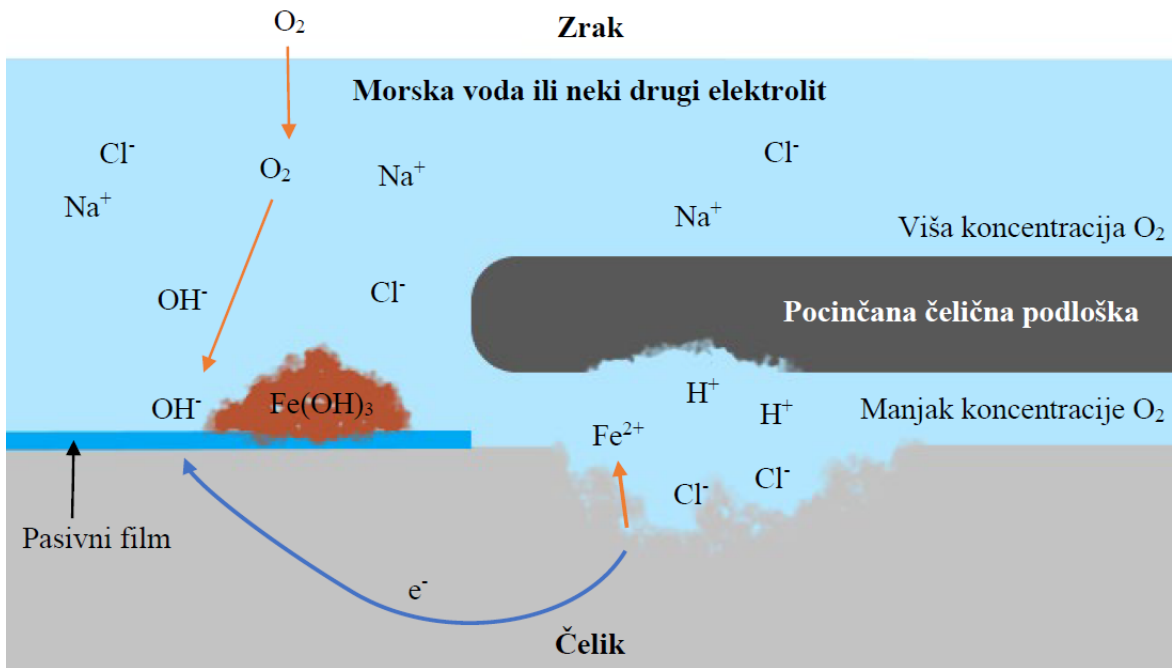
Tarna korozija je oblik korozije koji nastaje trenjem i abrazivnim djelovanjem. Nastaje kod ponavljajućeg gibanja površine uzrokovanog klizanjem i vibracijama u korozivnom okruženju. Oštećenja se očituju u obliku rupica i ostataka korozijskih produkata na pogođenoj površini. Najčešće se pojavljuje kod strojeva u dosjedima sklopova ili ležajevima. Kontaktne površine koje su izložene čestim vibracijama također su izložene opasnosti od ovog oblika korozije, npr. vibracije kod dugotrajnog transporta. Slika 5.22. prikazuje tarnu koroziju vanjskog prstena kotrljajućeg ležaja. [11]



*Slika 5.22. Tarna korozija [45]*

### **5.8. Korozija u procijepu**

Korozija u procijepu (eng. crevice corrosion) je poseban oblik korozije koji se pojavljuje na mjestima sa težom difuzijom kisika. Najčešće su to pukotine, procijepi, preklopni spojevi, prostor ispod podloške, glave vijka ili zakovice. Zbog ograničene difuzije kisika na takvim mjestima se stvara diferencijalni aeracijski članak (koncentracijski članak) između pukotine i vanjske površine sa više kisika. Obzirom da se u području pukotine ne može pojaviti katodna redukcija kisika, to područje se u koncentracijskom članku ponaša kao anoda. Anodnim područjem u pukotini omogućena je pojava korozije u procijepu (slika 5.23.). [46, 47]



Slika 5.23. Korozija u procijepu [12]

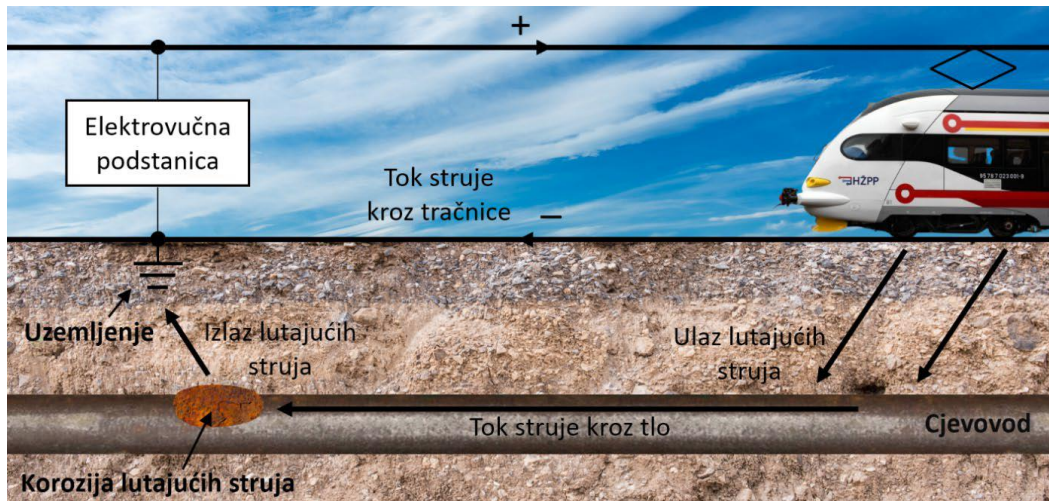
Slika 5.24. prikazuje koroziju u procijepu kod čeličnog stupa pričvršćenog vijcima. Uočljiva je intenzivna pojava u području spoja matice i podloške te podloške i baze stupa gdje je koncentracija kisika minimalna. Također vidljiva je pojava korozije ispod baze stupa.



Slika 5.24. Korozija u procijepu kod čeličnog stupa [47]

## 5.9. Korozija djelovanjem lutajućih struja

Struja koja ne teče predviđenim putem po strujnom krugu naziva se lutajuća struja. Lutajuća struja može biti izmjenična ili istosmjerna. Korozija se zbog djelovanja lutajućih struja može javiti u tlu, moru ili u slatkoj vodi. Električni strojevi za zavarivanje, električne željeznice i postrojenja za galvanizaciju su najčešći izvori istosmjerne lutajuće struje. [48] Lutajuća struja uzrokuje probleme kod metalnih cjevovoda i njihovo propuštanje (slika 5.25.).



Slika 5.25. Putanja lutajućih struja [12]

Velika razlika u električnoj vodljivosti cjevovoda i tračnica je glavni uzrok korodiranja cjevovoda. Neki od izvora lutajuće izmjenične struje su uzemljeni vodiči ili struja koja je magnetski inducirana u paralelnim dalekovodima. Brodovi u lukama također su izloženi ovom tipu korozije dok su u tlu izloženi cjevovodi ili spremnici koji nisu do kraja ukopani u tlo (slika 5.26.). Kako bi se spriječilo nastajanje korozije ovog tipa spremnike je potrebno zaštititi sa katodnom zaštitom. Nezaštićeni predmeti postaju anode te korodiraju. [49]



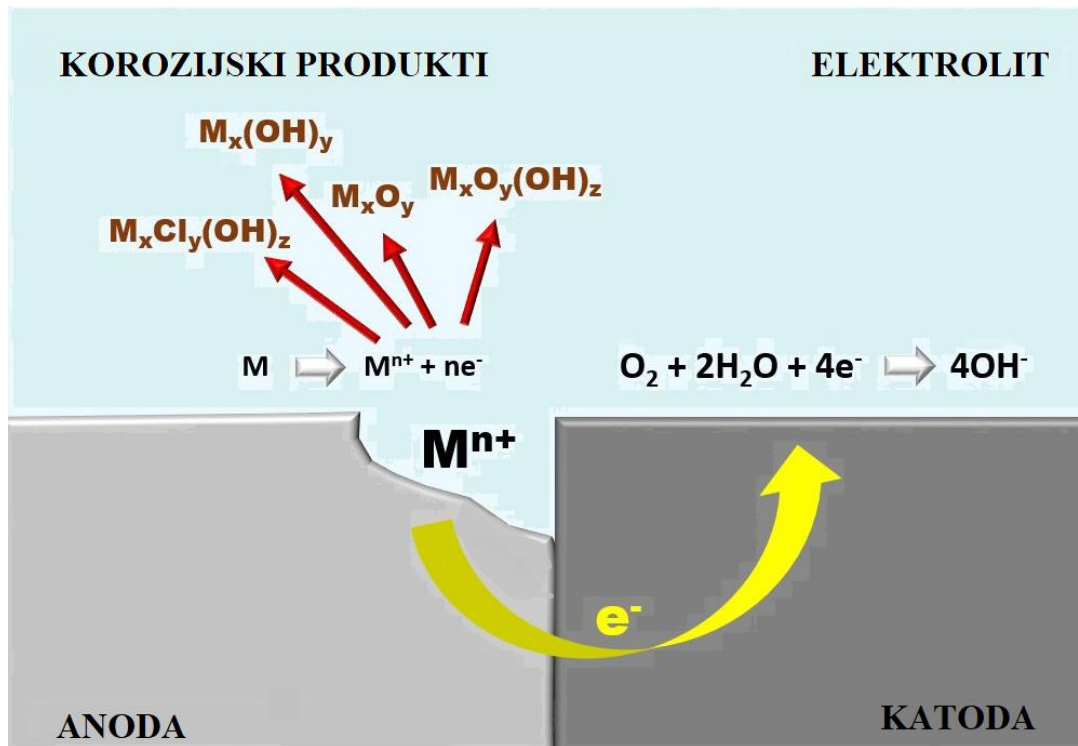
Slika 5.26. Korozija lutajućih struja na tračnicama [50]

## 5.10. Galvanska korozija

Galvanska korozija je posebna vrsta korozije koja se pojavljuje u slučajevima kontakta dvaju različitih metala u elektrolitu. Direktni kontakt dvaju metala različitih elektrodnih potencijala omogućuje lak prijenos elektrona sa anode na katodu. Metali pozitivnijih elektrodnih potencijala u spoju često se nazivaju plemenitijim metalima, dok oni negativnijeg elektrodnog potencijala aktivnim metalima. Plemenitiji metali u pravilu ne korodiraju već su katode u spoju sa aktivnim metalima. Aktivni metali su anode i u spoju s plemenitijim metalom oni korodiraju stvarajući korozijske produkte. Svaki metal ima svoj karakteristični elektrodni potencijal, a ovisno o razlici potencijala u spoju dolazi do brže ili sporije korozije. [12, 51]

### 5.10.1. Mehanizam nastajanja

Ako su dva različita metala u kontaktu dolazi do lakog prijenosa elektrona sa anode na katodu. Anoda oksidira oslobađajući elektron koji putuje prema katodi zbog razlike u elektrodnom potencijalu. Slobodni elektroni u elektrolitu, zajedno sa kisikom i vodom, stvaraju kisikove ili hidroksidne ione. Reakcijom sa pozitivno nabijenom anodom tvore različite okside ili hidrokside. Slika 5.27. prikazuje ovaj proces.



Slika 5.27. Galvanska korozija



Veća razlika između elektrodnog potencijala dvaju metala znači bržu koroziju anode, a naziva se još i elektromotorna sila ( $E_{MF}$ ). Elektromotorna sila računa se prema izrazu 4.16.

Anoda je uvijek onaj materijal u spoju koji ima negativniji elektrodni potencijal. Na primjeru vijka sačinjenog od mjedi u kontaktu sa maticom od čelika objašnjen je ovaj tip korozije. Mjed je u ovom slučaju katoda, a čelik anoda. Obzirom da je matica znatno manja od vijka dolazi do ubrzane korozije matice (slika 5.28.). Kada je anoda znatno manja od katode, može doći od 100 do 1000 brže korozije nego kod jednakih veličina anode i katode. U slučaju da je katoda manja od anode korozija se usporava.



*Slika 5.28. Galvanska korozija čelične matice na mjedenom vijku [12]*

Slika 5.29. prikazuje pojavu galvanske korozije na cijevima. Prikazan je spoj tri različita materijala: koljeno od polipropilena, pocinčana čelična cijev i slavina sa T-spojem od mjedi. Najnižu vrijednost elektrodnog potencijala u ovom slučaju ima cink na čeličnoj cijevi, te zatim željezo u čeliku. Zbog toga dolazi do intenzivne korozije pocinčane cijevi. Često se ovakav oblik pojavljuje u kućanstvima gdje ljudi samoinicijativno pokušavaju postaviti cijevi ili popraviti puknuća bez stručnih znanja.



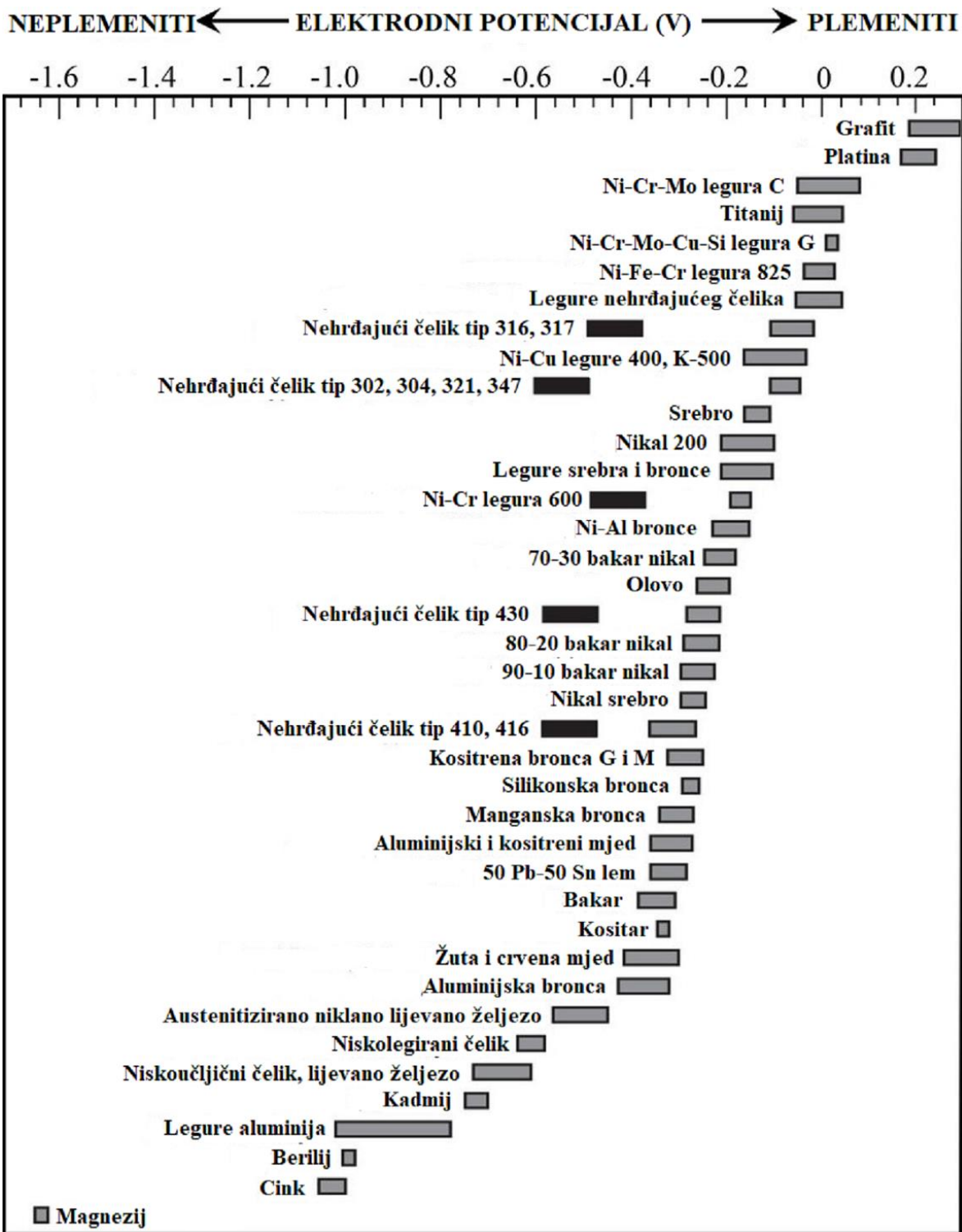
*Slika 5.29. Galvanska korozija pocinčane čelične cijevi [52]*

Slika 5.30. prikazuje pravilno spojene cijevi od različitih materijala. Lijevo se nalazi pocinčana čelična cijev, u sredini mjedena cijev, a lijevo bakrena cijev. Umetanjem mjedene cijevi između bakra i čelika smanjena je mogućnost pojave galvanske korozije. [53]



*Slika 5.30. Pravilno spojene cijevi od različitih materijala [53]*

Kako bi se izbjegla pojava galvanske korozije potrebno je već pri konstruiranju voditi računa o odabiru materijala. Ukoliko dođe do odabira materijala jako različitih elektrodnih potencijala može doći do intenzivne korozije i propadanja konstrukcije. Stoga konstruktori za pomoć pri odabiru materijala koriste galvanske nizove metala i legura za određeni elektrolit (slika 5.6.). Pomoću tog niza određuje se koja dva metala se mogu kombinirati a da ne dođe do korozije. Primjer jednog takvog spoja prikazan je na slici 5.31. [11]



Slika 5.31. Galvanski niz nekih metala i legura u morskoj vodi

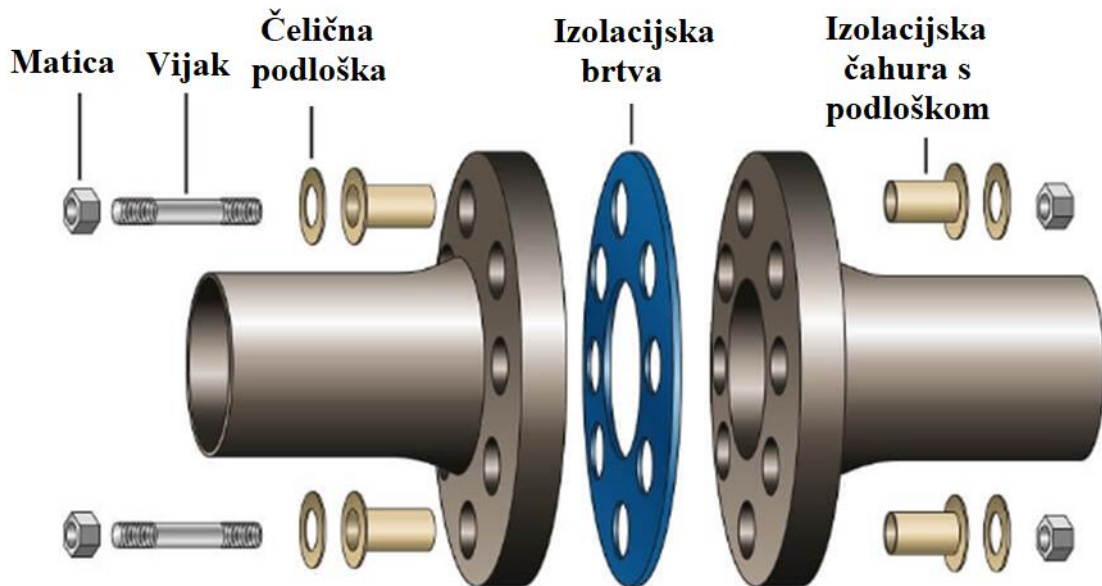
### 5.10.2. Metode zaštite

Postoje neke prakse sprečavanja galvanske korozije, a to su:

- Sprečavanje kontakta između metala,
- Izolacija od elektrolita,
- Minimiziranje razlike potencijala,
- Korištenje inhibitora korozije,
- Minimiziranje veličine katode.

Sprečavanje kontakta između metala može se postići umetanjem nevodljivog materijala u područje kontakta dvaju metala. Ovo je jedan od najučinkovitijih načina prekidanja električnog puta, odnosno sprečavanja slobodnog kretanja elektrona od anode prema katodi. Izolacijski materijal blokira protok elektrona čime se sprečava pojava reakcija oksidacije i redukcije.

U praksi se izolacija obično postiže postavljanjem izolacijskih brtvila, premaza, čahura i podložaka na bazi polimera ili elastomera. Na primjer, u naftnoj industriji koriste se nekonduktivne epoksidne brtve ojačane staklom (GRE). Obično se postavljaju na prirubnice spojenih cijevi kako bi se prekinula vodljivost između susjednih cjevovoda (slika 5.32.).



Slika 5.32. Izolacijska brtva i rukavac s podloškom između spoja cijevi [54]

Izolacija od elektrolita podrazumijeva sprečavanje kontakta površine metala sa elektrolitom. Elektrolit je jedan od glavnih elemenata potrebnih za pojavu galvanske korozije jer sadrži ione koji omogućuju reakcije oksidacije i redukcije u galvanskom članku. Mjere koje uključuju izolaciju metala od elektrolita pokazale su se vrlo učinkovitim u sprečavanju nastanka galvanske korozije. Izolacija se postiže nanošenjem vodootpornih spojeva koji djeluju kao barijere između površine metala i otopine elektrolita. U brojnim industrijama se koriste boje, premazi, ulja i masti, koje pokazuju visoku učinkovitost zaštite.

Galvansku koroziju moguće je izbjeći i minimiziranjem razlike potencijala između metala. Već je navedeno kako elektroni teku od anode prema katodi zbog razlike potencijala, koji djeluje kao pokretačka sila. Što je veća razlika potencijala, to je veća i inducirana galvanska struja te intenzitet korozije. Manja razlika potencijala rezultira manjim intenzitetom korozije. Cilj ovog principa je odabrati kontaktne metale sa sličnim elektrodnim potencijalima, odnosno metale koji su u galvansko nizu blizu jedan drugome. Na ovaj način smanjuje se mogućnost nastajanja galvanske korozije.

Inhibitori korozije su spojevi, najčešće tekući, koji se dodaju elektrolitu u cilju sprečavanja kemijskih reakcija koje uzrokuju galvansku koroziju. Inhibitori djeluju na mnogo načina, a većina uključuje složene kemijske procese. Prema sastavu su to uglavnom organski i anorganski spojevi. Najučinkovitiji su oni koji uklanjaju kisik iz otopine okolnog medija. Uklanjanjem kisika smanjuje se mogućnost redukcije na anodi, a obzirom da su katodne reakcije ovisne o anodnim, galvanski proces je onemogućen.

Prethodno je navedeno da na brzinu i intenzivnost galvanske korozije utječe omjer površina katode i anode. Stoga je tijekom faza projektiranja i konstruiranja potrebno voditi računa o omjeru površina metala, odnosno potrebno je da površina metala nižeg elektrodnog potencijala bude što veća. Na taj način uspostavlja se određena zaštita metala od korozije, odnosno brzina korozije se maksimalno usporava. Na primjer, čelični vijci u aluminijskoj ploči dat će bolje rezultate nego aluminijski vijci u čeličnoj ploči. [54]

## 6. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio ovog rada odnosi se na utvrđivanje korozijskog ponašanja odabranih materijala. Korozijsko ponašanje se prati iz tri različite perspektive. Prati se ponašanje jednog metala u kombinaciji sa drugim metalom, ponašanje materijala prema veličini anode u tim kombinacijama, te ponašanje materijala u laboratorijskim i realnim uvjetima.

### 6.1. Planiranje eksperimenta

#### 6.1.1. Odabir materijala

Eksperimentom je potrebno utvrditi korozijsko ponašanje materijala. Pa je tako potrebno unaprijed definirati pojedine koncepte. Kako bi se pojavila korozija, odnosno kako bi se ostvarila korozija koju je moguće mjeriti i pratiti, potrebno je odabrati pogodne materijale. Materijali odnosno njihove kombinacije su birane prema dostupnosti materijala, njihovoj primjeni i elektrodnom potencijalu.

Odabrani su slijedeći materijali:

- aluminij,
- čelik,
- mjed.

Elektrodni potencijali aluminija, željeza iz čelika, te bakra i cinka koji se nalaze u mjedi prikazani su u tablici 6.1..

*Tablica 6.1. Elektrodni potencijali odabranih materijala*

METAL	OKSIDACIJA (IONIZACIJA)	STANDARDNI ELEKTRODNI POTENCIJAL, $E^0$ [V]
Aluminij	$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$	-1,662
Cink	$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,763
Željezo	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$	-0,440
Bakar	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$	+0,340

Aluminij je odabran zbog svog niskog elektrodnog potencijala i široke primjene. Kupljen je I profil tehnički čistog aluminijsa duljine 2000 mm, širine 40 mm i visine 2 mm (slika 6.1.).



*Slika 6.1. I profil tehnički čistog aluminijsa [55]*

Čelik je odabran kao najvažniji konstrukcijski element, koji ima visoki udio željeza koje je nešto većeg elektrodnog potencijala od aluminijsa. Kupljen je I profil toplo valjanog čelika duljine 1000 mm, širine 20 mm i visine 4 mm (slika 6.2.).



*Slika 6.2. I profil toplo valjanog čelika [56]*

Mjed je materijal jako rasprostranjen u strojogradnji i građevinarstvu, zbog čega je odabran kao treći materijal ispitivanja. Mjed je zapravo slitina bakra i cinka, bakar je element pozitivnog elektrodnog potencijala, a cinkov elektrodni potencijal je niži od željezovog i veći od aluminijevog. Kupljen je I profil „zlatne“ mjedi duljine 1000 mm, širine 20 mm i visine 2 mm (slika 6.3.). „Zlatna“ mjed legura je sa 85 % bakra i 15 % cinka.



*Slika 6.3. I profil „zlatne“ mjedi [57]*



### 6.1.2. Odabir medija

Nakon odabira materijala uslijedio je odabir medija u kojem će se odvijati eksperiment. U eksploataciji materijali su uglavnom izloženi utjecaju zemlje, slatke vode i morske vode. Zbog čega su za ovaj eksperiment izabrani upravo zemlja, slatka voda i morska voda.

Za zemlju je odabrana zemlja za cvijeće. Za slatku vodu je odabrana voda iz slavine za ispitivanje u laboratorijskim uvjetima, koja je po karakteristikama najbližnja vodi u blizini izvora u kojoj su bili postavljeni uzorci u realnim uvjetima. Morska voda je uzeta sa lokacije Kantrida u Rijeci.

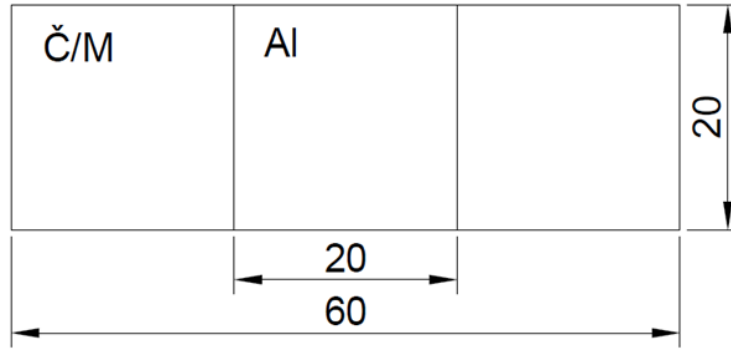
### 6.1.3. Odabir veličine uzoraka

Odabirom medija jedino što je preostalo je bilo odrediti veličine pločica i njihove kombinacije. Obzirom da aluminij ima najniži elektrodni potencijal od odabranih materijala, on predstavlja anodu u kombinaciji sa čelikom ili mjedi. Kako bi se utvrdilo korozijsko ponašanje s obzirom na veličinu anode odlučeno je da će se eksperiment provesti uz tri različite veličine anode, odnosno pločice aluminija. Uz različite veličine anode potrebno je da katoda, odnosno u ovom slučaju čelik ili mjed, bude jednake veličine u svim uzorcima. Zamišljeno je da omjeri kontaktnih površina pločica aluminija i čelika ili mjedi budu 1:3, 2:3 i 1:1. Dimenzije pločica čelika i mjedi su 20x60 mm, a dimenzije pločica aluminija:

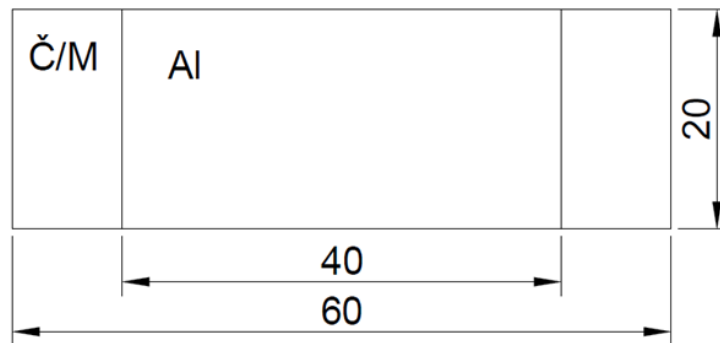
- 20x20 mm,
- 20x40 mm,
- 20x60 mm.

Kombiniranjem aluminija sa čelikom i mjedi dobivaju se sljedeće kombinacije:

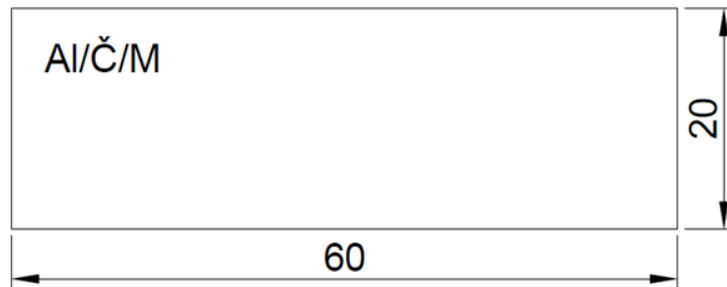
- aluminij (20x20 mm) – čelik/mjed (20x60 mm) (slika 6.4.),
- aluminij (20x40 mm) – čelik/mjed (20x60 mm) (slika 6.5.),
- aluminij (20x60 mm) – čelik/mjed (20x60 mm) (slika 6.6.).



Slika 6.4. Kombinacija aluminija sa čelikom/mjedi uz omjer veličina 1:3



Slika 6.5. Kombinacija aluminija sa čelikom/mjedi uz omjer veličina 2:3



Slika 6.6. Kombinacija aluminija sa čelikom/mjedi uz omjer veličina 1:1

#### 6.1.4. Potreban broj uzoraka

Prema zamišljenom konceptu kombiniranja različitih materijala, potrebno je odrediti potrebnu količinu ispitnih uzoraka prije početka pripreme eksperimenta. Obzirom da se eksperiment vrši u pet različitih medija, uz tri različite dimenzije pločica anode, potreban broj pločica čelika je petnaest (tablica 6.2.) isto kao i mjedi (tablica 6.3.).

*Tablica 6.2. Potreban broj ispitnih uzoraka čelika*

ISPITNI UZORCI - ČELIK	
DIMENZIJA	BROJ
20x60 mm	15

*Tablica 6.3. Potreban broj ispitnih uzoraka mjedi*

ISPITNI UZORCI - MJED	
DIMENZIJA	BROJ
20x60 mm	15

Potreban broj ispitnih uzoraka aluminija je nešto veći i varira prema dimenzijama. Pa je sveukupno potrebno trideset pločica aluminija za kombiniranje sa drugim metalom, te još dodatnih pet za ispitivanje korozije aluminija bez prisutnosti drugog materijala (tablica 6.4.).

*Tablica 6.4. Potreban broj ispitnih uzoraka aluminija*

ISPITNI UZORCI - ALUMINIJ	
DIMENZIJA	BROJ
20x60 mm	15
20x40 mm	10
20x20 mm	10

Tablica 6.5. prikazuje konačan plan veličine pločica i odabir medija za svaki uzorak.

*Tablica 6.5. Konačan plan provedbe eksperimenta za svaki uzorak*

UZORAK	KOMBINACIJA	OMJER	MEDIJ	DIMENZIJE ALUMINIJ	DIMENZIJE ČELIK/MJED
1	Al-Č	1:1	Zemlja	20x60 mm	20x60 mm
2	Al-M	1:1	Zemlja	20x60 mm	20x60 mm
3	Al-Č	1:1	Slatka voda	20x60 mm	20x60 mm
4	Al-M	1:1	Slatka voda	20x60 mm	20x60 mm
5	Al-Č	1:1	Morska voda	20x60 mm	20x60 mm
6	Al-M	1:1	Morska voda	20x60 mm	20x60 mm
7	Al-Č	2:3	Zemlja	20x40 mm	20x60 mm
8	Al-M	2:3	Zemlja	20x40 mm	20x60 mm
9	Al-Č	2:3	Slatka voda	20x40 mm	20x60 mm
10	Al-M	2:3	Slatka voda	20x40 mm	20x60 mm
11	Al-Č	2:3	Morska voda	20x40 mm	20x60 mm
12	Al-M	2:3	Morska voda	20x40 mm	20x60 mm
13	Al-Č	1:3	Zemlja	20x20 mm	20x60 mm
14	Al-M	1:3	Zemlja	20x20 mm	20x60 mm
15	Al-Č	1:3	Slatka voda	20x20 mm	20x60 mm
16	Al-M	1:3	Slatka voda	20x20 mm	20x60 mm
17	Al-Č	1:3	Morska voda	20x20 mm	20x60 mm
18	Al-M	1:3	Morska voda	20x20 mm	20x60 mm
19	Al-Č	1:1	Zemlja (R)	20x60 mm	20x60 mm
20	Al-M	1:1	Zemlja (R)	20x60 mm	20x60 mm
21	Al-Č	1:1	Slatka voda (R)	20x60 mm	20x60 mm
22	Al-M	1:1	Slatka voda (R)	20x60 mm	20x60 mm
23	Al-Č	2:3	Zemlja (R)	20x40 mm	20x60 mm
24	Al-M	2:3	Zemlja (R)	20x40 mm	20x60 mm
25	Al-Č	2:3	Slatka voda (R)	20x40 mm	20x60 mm
26	Al-M	2:3	Slatka voda (R)	20x40 mm	20x60 mm
27	Al-Č	1:3	Zemlja (R)	20x20 mm	20x60 mm
28	Al-M	1:3	Zemlja (R)	20x20 mm	20x60 mm
29	Al-Č	1:3	Slatka voda (R)	20x20 mm	20x60 mm
30	Al-M	1:3	Slatka voda (R)	20x20 mm	20x60 mm
31	Al	/	Zemlja	20x60 mm	/
32	Al	/	Slatka voda	20x60 mm	/
33	Al	/	Morska voda	20x60 mm	/
34	Al	/	Zemlja (R)	20x60 mm	/
35	Al	/	Slatka voda (R)	20x60 mm	/

## 6.2. Priprema eksperimenta

### 6.2.1. Izrezivanje uzoraka

Prvi korak kod pripreme eksperimenta je izrezivanje materijala kako bi se dobili ispitni uzorci odgovarajućih dimenzija. Dimenzije ispitnih uzoraka su definirane u planu eksperimenta. Uzorci su izrezivani iz plosnate šipke aluminija dimenzija 40x2000 mm, plosnate šipke čelika dimenzija 20x1000 mm i plosnate šipke mjedi dimenzija 20x1000 mm. Debljina aluminijske šipke je 2 mm, mjedene šipke 2 mm, a čelične šipke 4 mm. Slika 6.7. prikazuje proces izrezivanja ispitnih uzoraka u laboratoriju. Nakon izrezivanja dobiven je potreban broj ispitnih uzoraka odgovarajućih dimenzija (slika 6.8.).



*Slika 6.7. Izrezivanje ispitnih uzoraka od aluminija*



*Slika 6.8. Izrezani ispitni uzorci*

### 6.2.2. Priprema medija

Kao što je već navedeno za laboratorijske uvjete ispitivanja kao medij koriste se zemlja za cvijeće, voda iz slavine i morska voda. U realnim odnosno stvarnim uvjetima kao medij se koristi zemlja za cvijeće i prirodna izvorska voda. U realnim uvjetima potrebna je priprema korita šumskog potoka radi osiguravanja konstantne količine vode i priprema zemlje u posude koje će biti ostavljene na otvorenom.

U laboratorijskim uvjetima potrebno je staklene posude napuniti zemljom te uliti vode, pritom treba paziti da je kod svih posuda u pitanju jednaka količina zemlje i vode. Isto tako potrebno je napuniti posude vodom iz slavine i morskom vodom.

### 6.2.3. Vaganje uzoraka

Kako bi bilo moguće pratiti korozijsko ponašanje odabranih materijala potrebno je ispitne uzorke očistiti i odrediti njihovu masu. Ispitni uzorci se čiste pomoću etilnog alkohola prije samog vaganja, kako bi se uklonile sve nečistoće koje se nalaze na njegovoj površini. Vaganje se izvodi pomoću visoko precizne vage *Mettler Toledo* koja ima sposobnost detekcije promjene mase već od 0,1 miligram (slika 6.9.). Prije početka mjerenja potrebno je kalibrirati vagu.



*Slika 6.9. Vaganje ispitnih uzoraka - mjed*

Nakon vaganja svakog ispitnog uzorka potrebno je dokumentirati masu očitavanu sa vage. Za svaki pojedini uzorak upisuje se masa aluminija, te čelika ili mjedi ovisno o kombinaciji u uzorku.

Vođenjem računa o navedenom osigurano je dobivanje tablice sa točnim i preglednim podacima (tablica 6.6.).

*Tablica 6.6. Podaci dobiveni prvim vaganjem ispitnih uzoraka*

UZORAK	POČETNA MASA ALUMINIJA $m_p$ [g]	POČETNA MASA ČELIKA/MJEDI $m_p$ [g]
1	6,415	40,0224
2	6,242	20,0596
3	6,2225	39,8943
4	6,3517	19,7293
5	6,3537	39,7931
6	6,3803	19,8937
7	4,1839	39,8884
8	4,1381	19,7936
9	4,3207	40,0844
10	4,2005	20,5387
11	4,2339	39,0163
12	4,1953	19,5903
13	2,0445	39,7427
14	2,1922	19,9049
15	1,9279	39,8499
16	2,076	19,5353
17	2,037	39,7972
18	2,1134	19,7635
19	6,5045	40,2564
20	6,0305	19,8104
21	6,3448	40,4953
22	6,3028	20,0811
23	4,2597	39,9415
24	4,2087	18,767
25	4,1295	40,0653
26	4,1992	19,826
27	2,033	40,1336
28	2,1321	19,7566
29	2,0137	39,8783
30	2,0201	19,8093
31	6,3298	/
32	6,4596	/
33	6,3662	/
34	6,0997	/
35	6,3543	/



#### 6.2.4. Postavljanje uzoraka u medij

Završetkom dokumentiranja podataka dobivenih vaganjem započinje postavljanje ispitnih uzoraka u planirani medij. Kako se u ovom radu ispituje korozijsko ponašanje dvaju različitih materijala koji su u kontaktu, potrebno je čvrsto povezati te materijale kako ne bi došlo do njihovog razdvajanja tijekom eksperimenta. Vezivno sredstvo treba biti od nemetalnog materijala kako ne bi utjecalo na rezultate eksperimenta. Ispitni uzorci su povezani gubicama koje se koriste u kućanstvu (slika 6.10.).



*Slika 6.10. Ispitni uzorak povezan gubicom*

Nakon povezivanja prema planu eksperimenta svaka kombinacija, odnosno svaki ispitni uzorak se postavlja u određeni medij (slika 6.11.). Kod postavljanja ispitnih uzoraka potrebno je voditi računa da su uzorci u potpunosti uronjeni u medij, tj. da im je čitava površina u kontaktu s medijem. Također uzorke se ne smije dirati golim rukama kako bi površina materijala ostala čista, jer masnoća sa ruku može utjecati na razvoj korozije. Zbog toga je potrebno koristiti rukavice ili čistu krpu.



*Slika 6.11. Postavljanje ispitnog uzorka u zemlju*

Isto tako ispitni uzorci postavljaju se u slatku vodu i u morsku vodu, te se ispod svake posude postavlja oznaka sa brojem uzorka (slika 6.12.). Postavljanjem oznake osigurava se da ne dođe do pogreške i zamjene ispitnih uzoraka na kraju eksperimenta.



*Slika 6.12. Ispitni uzorak u slatkoj vodi*

Kada su svi ispitni uzorci položeni u pripadajuće posude potrebno je zabrtviti posude kako ne bi došlo do hlapljenja vode. Na vrh svake posude se postavlja parafilm, nepropusan rastezljiv film koji sprečava isparavanje vode (slika 6.13.). Poslije zatvaranja svih posuda parafilmom uzorci se ostavljaju u mediju slijedećih pet mjeseci (slika 6.14.).



*Slika 6.13. Parafilm*



*Slika 6.14. Posude s ispitnim uzorcima u laboratorijskim uvjetima*

Nakon postavljanja ispitnih uzoraka u laboratoriju, postavljaju se ispitni uzorci u realnim uvjetima. Za svaki ispitni uzorak koji mora biti u zemlji uzima se jedna posuda. Posuda se napuni zemljom i u nju se postavljaju ispitni uzorci (slika 6.15.). Razlika je u tome što se ove posude nalaze na otvorenom, te se na njih ne postavlja parafilm. Na taj su način zemlja, odnosno ispitni uzorci u njoj konstantno izloženi vanjskim utjecajima.



*Slika 6.15. Posuda sa zemljom na otvorenom*

Ispitni uzorci koji se postavljaju u slatkoj vodi u realnim uvjetima postavljeni su u šumski potok nedaleko od izvora. Za postavljanje uzoraka potrebna je određena priprema lokacije. Korito je produbljeno zbog mogućnosti smanjenja vodostaja u toplijim mjesecima. Na taj način osigurana je konstantna izloženost uzoraka vodi. Uzorci su ribolovnom niti povezani i nanizani na drveni štap te uronjeni u potok na tom mjestu. U potpunosti su okruženi medijem i nisu u kontaktu sa dnom korita potoka. Kako bi eksperiment bio sakriven od znatiželjnih pogleda štap sa ispitnim uzorcima je natkriven granjem i lišćem (slika 6.16.).



*Slika 6.16. Ispitni uzorci postavljeni u šumskom potoku*

### **6.3. Provedba eksperimenta**

#### **6.3.1. Početak eksperimenta**

Datum početka eksperimenta je 12.2.2022. kada su svi ispitni uzorci uronjeni u pripadajući medij prema eksperimentalnom planu. Posude sa uzorcima se još jednom provjeravaju i utvrđuje se da su uzorci odgovarajuće pripremljeni i postavljeni, te da su sve posude adekvatno izolirane parafilmom. Kako je trajanje eksperimenta predviđeno za period od 5 mjeseci, potrebno je povremeno kontrolirati ispitne uzorke. Kontrola se vrši kako bi se utvrdilo ide li eksperiment po planu. Kod svake kontrole gleda se stanje ispitnih uzoraka, posuda u kojima se nalaze ispitni uzorci, te ima li potrebe za promjenom parafilma.

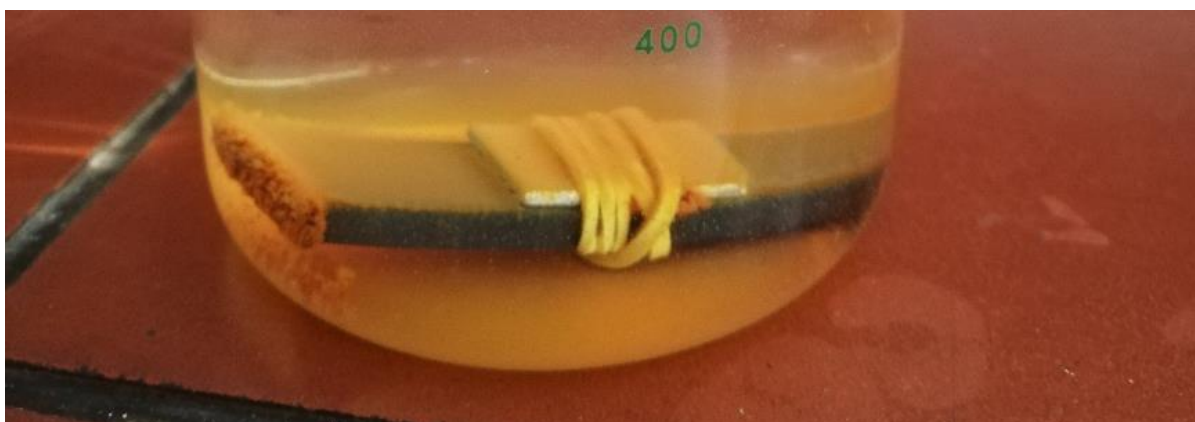
#### **6.3.2. Prvi pregled**

Prvi pregled proveden je 10.3.2022., otprilike mjesec dana nakon postavljanja eksperimenta. Po dolasku u laboratorij uočeno je da je kod nekih posudica film koji sprečava isparavanje popucao (slika 6.17.). Svi oni koji su popucali ili su bili na neki način oštećeni su zamijenjeni novim filmom. Na taj način sprečeno je isparavanje i sačuvana je pouzdanost rezultata eksperimenta. Također primjećuje se promjena boje vode u nekim posudama uzrokovana djelovanjem korozije na materijale koji se ispituju.



*Slika 6.17. Izgled posuda kod prvog pregleda*

Pregledom svake pojedine posude uočene su neke promjene. Kod više uzoraka pa tako i kod ispitnog uzorka broj 15 koji se nalazi u slatkoj vodi uočena je promjena boje vode, te također prvi znakovi korozije (slika 6.18.). U uzorku 15 nalaze se u kombinaciji pločica aluminija dimenzija 20x20 mm i pločica čelika dimenzija 20x60 mm. Na pločici aluminija nisu vidljive nikakve promjene, dok na pločici čelika uočavamo koroziju na mjestu reza pločice. Kako se radi o toplo valjanom čeliku, koji na površini ima povećanu koncentraciju ugljika, ne treba čuditi da se korozija prvo pojavljuje u području reza pločice. Područje reza ima djelomično izloženu jezgru pločice koja sadrži manje ugljika nego površina, zbog čega tu prvenstveno dolazi do korozije.



*Slika 6.18. Kombinacija aluminija i čelika u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 15) – prvi pregled*

Ispitni uzorak 16 sastoji se od pločice aluminija dimenzije 20x20 mm i pločice mjedi dimenzije 20x60 mm uronjenih u slatku vodu. Kod prve provjere uočena je pojava bijelih naslaga u području spoja pločica (slika 6.19.). Te bijele naslage su zapravo korozijski produkti odnosno aluminijev hidroksid i cinkov hidroksid. Cinkov hidroksid nastaje iz mjedi gdje površinski cink reagira s vodom. Na taj način dolazi do postepene decinkacije mjedi.



*Slika 6.19. Kombinacija aluminija i mjedi u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 16) – prvi pregled*

Ispitni uzorci postavljeni u morskoj vodi pokazivali su nešto drugačije rezultate. Uzmimo za primjer ispitni uzorak 17. Taj uzorak sadrži pločicu aluminija dimenzija 20x20 mm i čelika 20x60 mm. Toplo valjani čelik nije pokazivao znatnu korozijsku promjenu, dok je aluminij korodirao i počeo se stvarati aluminijev hidroksid u obliku bijele praškaste tvari (slika 6.20.).



*Slika 6.20. Kombinacija aluminija i čelika u morskoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 17) – prvi pregled*



Kao i kod slatke vode u uzorku 18 uronjenom u morsku vodu pojavljuju se cinkov i aluminijev hidroksid (slika 6.21.). Uzorak se sastoji od pločice aluminijske 20x20 mm i pločice mjedi 20x60 mm što je ista kombinacija kao i kod uzorka 16. Za razliku od uzorka u slatkoj vodi ovaj u morskoj vodi pokazuje na oko vidljivo više korozivskih produkata. Što bi moglo značiti da je korozija u morskoj vodi nešto brža nego u slatkoj vodi.



*Slika 6.21. Kombinacija aluminijske i mjedi u morskoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 18) – prvi pregled*

Ispitni uzorci koji se nalaze u zemlji ne mogu se pregledati, jer bi se vađenjem uzoraka narušili eksperimentalni uvjeti i sama pouzdanost rezultata eksperimenta.

Prva kontrola ispitnih uzoraka koji se nalaze u realnim uvjetima bila je 23.4.2022.. Pregledom ispitnih uzoraka malo toga se moglo vidjeti. Kako su postavljeni u tekućoj vodi uzorci se redovito ispiru zbog erozije vode. Erozija uklanja korozivske produkte i ne vide se promjene na materijalu. Zbog čega je odlučeno da nakon ove provjere neće biti više provjera do završetka eksperimenta. Stanje uzorka 22 pri prvoj kontroli može se vidjeti na slici 6.22.



*Slika 6.22. Kombinacija aluminijske i mjedi u slatkoj vodi pri realnim uvjetima u omjeru 1:1 (uzorak 22) – prvi pregled*

### 6.3.3. Drugi pregled

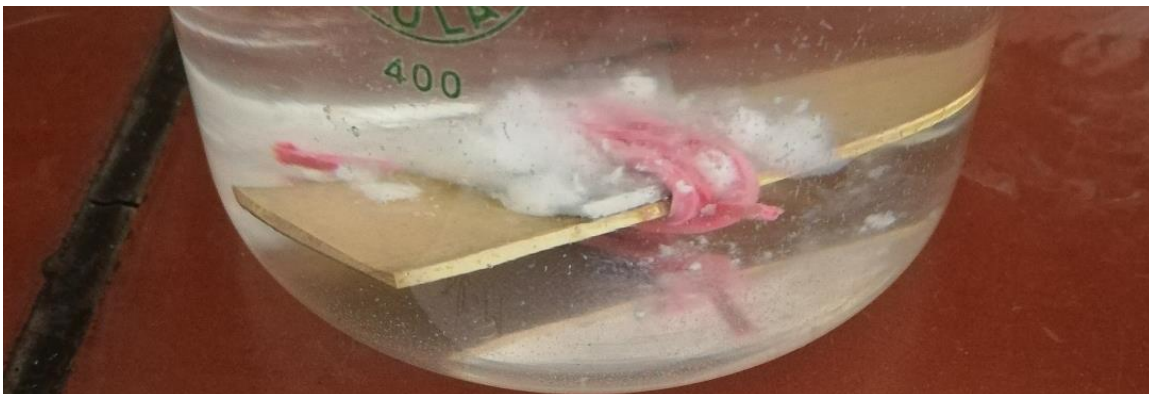
Tijekom drugog pregleda 26.4.2022. ustanovljeno je da su svi laboratorijski filmovi čitavi. Stoga nije bilo potrebe za zamjenom ijednog filma. Detaljnijim pregledom ispitnih uzoraka uočeno je napredovanje korozije, odnosno povećana količina korozivskih produkata, kao i još veća promjena boje medija u posudama. Ispitni uzorak 15 koji je prvotno počeo korodirati na mjestu reza pločice čelika, sada korodira i na ostatku površine (slika 6.23.). Pločica aluminija korodira stvarajući male količine aluminijevog hidroksida.



*Slika 6.23. Kombinacija aluminija i čelika u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 15) – drugi pregled*

Moguće je uočiti da kod ispitnog uzorka 15 ne nastaje veća količina aluminijevog hidroksida, što i nije tako neobično uzimajući u obzir razliku elektrodnih potencijala između aluminija i čelika, odnosno željeza kao najviše zastupljenog metala u čeliku.

Za razliku od uzorka broj 15 kod uzorka 16 nastaju veće količine aluminijevog hidroksida, ali također i cinkovog hidroksida iz pločice mjedi. Mjed je legura bakra i cinka. Poznato je da je bakar element pozitivnog elektrodnog potencijala, dok je cink element negativnog elektrodnog potencijala. Imajući to na umu lako možemo zaključiti da će u tom slučaju korodirati cink, te također aluminij s kojim je mjed u kontaktu. Zbog korozije tih dvaju metala dolazi do povećane količine korozivskih produkata na mjestu spoja. U odnosu na prvu provjeru uočljivo je da se količina korozivskih produkata postepeno povećava (slika 6.24.). Također je vidljivo da je došlo do puknuća gumice koja povezuje ove dvije pločice, no obzirom da se ispitni uzorak nalazi u laboratorijskim uvjetima ne dolazi do razdvajanja pločica. Stoga se ispitni uzorak ostavlja takav kakav je i pažljivo vraća na svoju poziciju.



*Slika 6.24. Kombinacija aluminija i mjedi u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 16) – drugi pregled*

#### 6.3.4. Treći pregled

Kod trećeg pregleda 21.6.2022. na svim posudama parafilm je bio bez oštećenja. Pregledavanjem ispitnih uzoraka utvrđene su povećane količine korozivskih produkata u odnosu na prethodnu provjeru. Primjerice na uzorku 15 vidljiva je intenzivnija promjena boje tekućine, te pojava i ljuštenje korozivskih produkata s površine materijala (slika 6.25.).



*Slika 6.25. Kombinacija aluminija i čelika u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 15) – treći pregled*

### 6.3.5. Kraj eksperimenta

Završetak eksperimenta je bio 12.7.2022. godine. Od početka eksperimenta do tog datuma je prošlo 150 dana što znači da je vrijeme trajanja eksperimenta 150 dana. Ispitni uzorci se vade iz medija u kojima su se nalazili i kreće se sa uzimanjem potrebnih podataka. Slika 6.26. prikazuje ispitne uzorke postavljene u šumskom potoku netom nakon vađenja.



*Slika 6.26. Ispitni uzorci izvađeni iz šumskog potoka*

Prvi korak pri dolasku u laboratorij je priprema potrebne opreme za čišćenje uzoraka. To uključuje spužvicu za odstranjivanje korozijskih produkata, te uređaj za ultrazvučno čišćenje uzoraka. Također potrebno je pripremiti podlogu, u ovom slučaju krpu, na kojoj će se sušiti pločice.

Kada se ispitni uzorak izvadi iz medija potrebno je skinuti gumicu koja je povezivala pločice i razdvojiti pločice. Na pločicama se primjećuje promjena boje i hrapavosti površine, a najviše upravo na onom dijelu gdje su pločice bile u kontaktu (slika 6.27.).



*Slika 6.27. Razdvojena kombinacija aluminija i mjedi u morskoj vodi u omjeru 2:3 (uzorak 12)*

Razdvajanje pločica u nekim slučajevima je bilo zahtjevno zbog čvrstog povezivanja pločica uslijed djelovanja korozivskih produkata. Kada su pločice uspješno odvojene kreće se sa čišćenjem uzoraka. Za početak se uzorci ispiru u vodi i sa površine se skida zemlja sa uzoraka na kojima se ona nalazi. Zatim se pomoću spužvice uklanjaju preostale nečistoće i korozivski produkti (slika 6.28.).



*Slika 6.28. Čišćenje ispitnih uzoraka (uzorak 12)*

Odmah nakon ručnog čišćenja pločica prelazi se na ultrazvučno čišćenje. Ultrazvučno čišćenje vrši se pomoću *ASonic* ultrazvučne kade (slika 6.29.). Ultrazvučna kada stvara valove koji se prenose kroz medij odnosno u ovom slučaju vodu. Voda zatim prodire u pukotine, zazole i šupljine gdje se tlači i širi te dolazi do kavitacije. Kavitacija uzrokuje pojavu vakumskih mjehurića koji udaraju u predmet i čiste ga pod tlakom od 650 do 700 bara. Na ovaj način se odvajaju nečistoće i korozivski produkti nastali na površini metala. [58]



*Slika 6.29. Ultrazvučna kada ASonic*

Pločice se postavljaju u ultrazvučnu kadu na pet minuta. Za to vrijeme se uklanjaju sve nečistoće i korozijski produkti. Pločice se u kadu postavljaju okomito uz sami rub rešetke kako bi ultrazvučni valovi što efikasnije čistili površinu metala (slika 6.30.).



*Slika 6.30. Ultrazvučno čišćenje uzoraka*

Očišćene pločice se zatim postavljaju na krpu gdje se suše prije vaganja (slika 6.31.). Svrha sušenja pločica je uklanjanje vode koja se nalazi u materijalu, a mogla bi utjecati na rezultate vaganja. Kako bi se pločice dobro osušile ostavljaju se sušiti jedan dan prije vaganja.



*Slika 6.31. Sušenje ispitnih uzoraka*

Osušeni ispitni uzorci, odnosno pločice važu se na već spomenutoj visokopreciznoj vagi *Mettler Toledo*. Dobiveni podaci se spremaju i kreće se u analizu rezultata.

## 6.4. Korišteni izrazi

### 6.4.1. Promjena mase

Promjena mase materijala ( $\Delta m$ ) dobiva se oduzimanjem mase uzorka nakon eksperimenta od one prije početka eksperimenta, odnosno prema izrazu:

$$\Delta m = m_p - m_k \text{ [g]} \quad (6.1.)$$

gdje je:

- $m_p$  [g] – početna masa metala
- $m_k$  [g] – masa metala na kraju eksperimenta

Obzirom da nisu sve pločice u uzorcima jednake potrebno je izračunati postotak promjene mase ( $\Delta m_{\%}$ ) za svaki uzorak:

$$\Delta m_{\%} = \frac{\Delta m}{m_p} * 100 \text{ [%]} \quad (6.2.)$$

### 6.4.2. Brzina korozije

Brzina korozije je brzina gubitka materijala na anodi za vrijeme određenog vremenskog perioda. Prethodno je navedeno da postoje dva načina određivanja brzine korozije. Obzirom da se u ovom eksperimentalnom dijelu vršilo gravimetrijsko ispitivanje, za ispitivanje brzine će se koristiti gravimetrijska metoda. Kod gravimetrijske metode brzina korozije se računa prema izrazu 4.17. dok se prosječna brzina prodiranja korozije računa prema izrazu 4.18.

Površina materijala  $A$  odnosi se na površinu koja je u kontaktu sa elektrolitom. Preciznije rečeno radi se o oplošju jer je cijela površina pločice u kontaktu sa medijem, a računa se prema izrazu:

$$A = 2 * a * b + 2 * a * h + 2 * b * h \text{ [m}^2\text{]} \quad (6.4.)$$

gdje je:

- $a$  [m] - duljina pločice
- $b$  [m] - širina pločice
- $h$  [m] - visina pločice



Za pločicu aluminija 20x20x2 mm površina iznosi:

$$A = 2 * 20 * 20 + 2 * 20 * 2 + 2 * 20 * 2 = 960 \text{ mm}^2 = 0,00096 \text{ m}^2$$

Za pločicu aluminija 20x40x2 mm površina iznosi:

$$A = 2 * 20 * 40 + 2 * 20 * 2 + 2 * 40 * 2 = 1840 \text{ mm}^2 = 0,00184 \text{ m}^2$$

Za pločicu aluminija 20x60x2 mm površina iznosi:

$$A = 2 * 20 * 60 + 2 * 20 * 2 + 2 * 60 * 2 = 2720 \text{ mm}^2 = 0,00272 \text{ m}^2$$

Površina pločice čelika iznosi:

$$A = 2 * 20 * 60 + 2 * 20 * 4 + 2 * 60 * 4 = 3040 \text{ mm}^2 = 0,00304 \text{ m}^2$$

Površina pločice mjedi iznosi:

$$A = 2 * 20 * 60 + 2 * 20 * 2 + 2 * 60 * 2 = 2720 \text{ mm}^2 = 0,00272 \text{ m}^2$$

Vrijeme izlaganja metala agresivnoj okolini ( $t$ ) je definirano početkom i krajem eksperimenta. Datum početka eksperimenta je 12.2.2022. dok je datum kraja eksperimenta 12.7.2022.. To je vremenski period od 150 dana. Preračunavanjem u sekunde dobiva se da je vrijeme jednako:

$$t = 150 [\text{dana}] * 24 [\text{h}] * 60 [\text{min}] * 60 [\text{s}] = 12960000 [\text{s}]$$

Kada su poznati svi ovi podaci može se izračunati brzina korozije aluminija.

## 6.5. Rezultati

Rezultati eksperimenta sagledani su iz više aspekata. Prvenstveno su prikazani rezultati vaganja te je izračunat postotak promjene mase uzoraka prema izrazu 4.17. Uspoređene su promjene mase uzoraka prema vrsti medija i prema veličini anode. U zadnjem potpoglavlju izračunata je prosječna brzina korozije i prosječna brzina prodiranja korozije aluminija.

### 6.5.1. Promjena mase uzoraka

U tablici 6.7. prikazane su mase svih uzoraka, odnosno svih pločica u uzorku, sa početka i kraja eksperimenta. Svaki neparan broj uzorka je spoj aluminija i čelika, dok je svaki paran spoj aluminija i mjedi.

Tablica 6.7. Mase uzoraka na početku i na kraju eksperimenta

UZORAK	POČETAK		KRAJ	
	MASA AI $m_p$ [g]	MASA Č/M $m_p$ [g]	MASA AI $m_k$ [g]	MASA Č/M $m_k$ [g]
1	6,415	40,0224	6,4152	39,8866
2	6,242	20,0596	6,2182	20,079
3	6,2225	39,8943	6,2244	39,7771
4	6,3517	19,7293	6,3476	19,7496
5	6,3537	39,7931	6,3461	39,7354
6	6,3803	19,8937	6,3418	19,891
7	4,1839	39,8884	4,1911	39,729
8	4,1381	19,7936	4,0997	19,8263
9	4,3207	40,0844	4,3254	39,9414
10	4,2005	20,5387	4,1746	20,5624
11	4,2339	39,0163	4,2275	38,9417
12	4,1953	19,5903	4,1628	19,5873
13	2,0445	39,7427	2,0483	39,6028
14	2,1922	19,9049	2,1636	19,9196
15	1,9279	39,8499	1,9337	39,6519
16	2,076	19,5353	2,0440	19,5634
17	2,037	39,7972	2,0349	39,6826
18	2,1134	19,7635	2,0868	19,7626
19	6,5045	40,2564	6,5063	40,2647
20	6,0305	19,8104	6,0119	19,8356
21	6,3448	40,4953	6,3418	40,4526
22	6,3028	20,0811	6,2832	20,0698
23	4,2597	39,9415	4,2629	39,9417
24	4,2087	18,767	4,1866	18,7871
25	4,1295	40,0653	4,1293	40,0406
26	4,1992	19,826	4,1824	19,8113
27	2,033	40,1336	2,0398	40,1436
28	2,1321	19,7566	2,1187	19,7817
29	2,0137	39,8783	2,0152	39,8463
30	2,0201	19,8093	2,0049	19,7793
31	6,3298	/	6,333	/
32	6,4596	/	6,4620	/
33	6,3662	/	6,3681	/
34	6,0997	/	6,1031	/
35	6,3543	/	6,3487	/

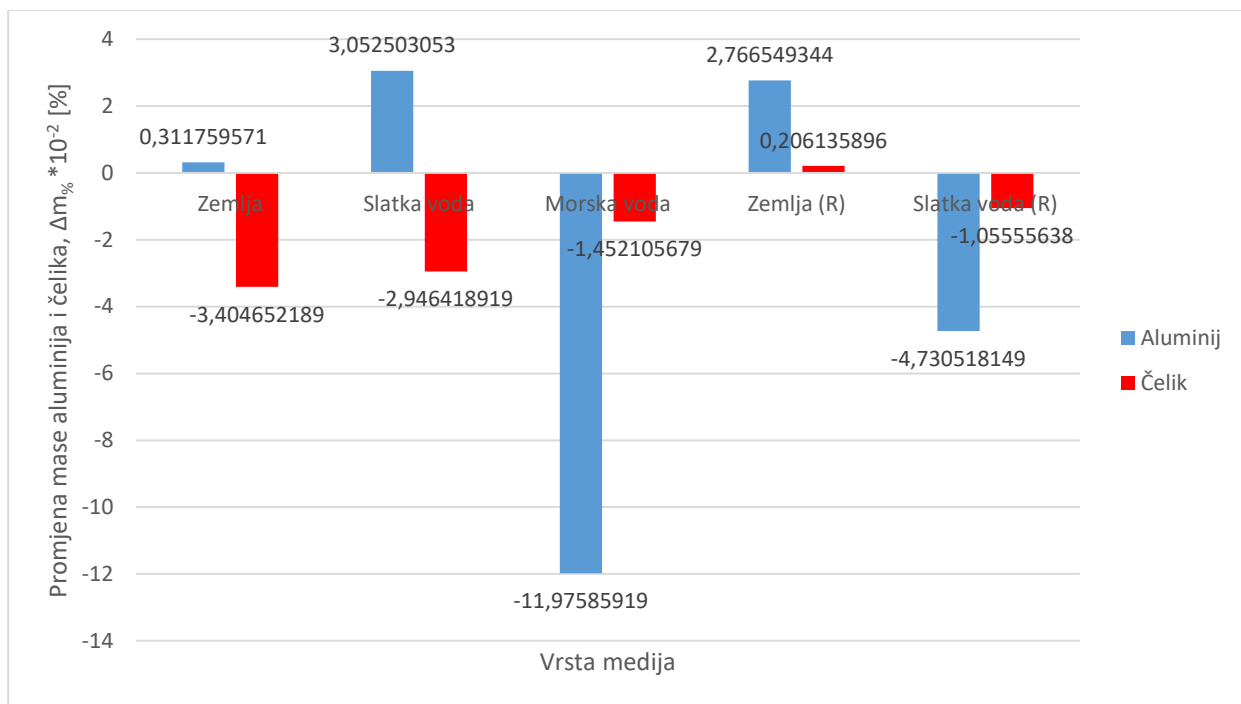
Radi lakše usporedbe rezultata izračunat je postotak promjene mase prema izrazu 6.2. (tablica 6.8.).

Tablica 6.8. Postotak promjene mase aluminija, čelika i mjedi

UZORAK	PROMJENA MASE ALUMINIJA $\Delta m_{\%} * 10^{-2}$ [%]	PROMJENA MASE ČELIKA/MJEDI $\Delta m_{\%} * 10^{-2}$ [%]
1	0,311759571	-3,404652189
2	-38,27474189	0,966183575
3	3,052503053	-2,946418919
4	-6,459134161	1,027868919
5	-11,97585919	-1,452105679
6	-60,70831625	-0,135739782
7	17,17926081	-4,012182537
8	-93,66539015	1,649324382
9	10,86604707	-3,580245059
10	-62,04187228	1,152589192
11	-15,13897102	-1,915684215
12	-78,07245123	-0,153160466
13	18,55196993	-3,532578505
14	-132,1870956	0,737966626
15	29,99431142	-4,993455547
16	-156,555773	1,436355644
17	-10,31991744	-2,88791561
18	-127,4678934	-0,045540567
19	2,766549344	0,206135896
20	-30,93863837	1,270443042
21	-4,730518149	-1,05555638
22	-31,1942959	-0,563035008
23	7,506626944	0,005007298
24	-52,78746477	1,069883058
25	-0,484343593	-0,616873873
26	-40,16832441	-0,742000777
27	33,33660163	0,24910571
28	-63,2463303	1,268849492
29	7,443429933	-0,803085857
30	-75,81425508	-1,516737195
31	5,052897521	/
32	3,714020427	/
33	2,983621488	/
34	5,570939359	/
35	-8,820703451	/

### 6.5.2. Usporedba rezultata prema vrsti medija

Jedan od ciljeva eksperimentalnog dijela ovog rada bio je utvrditi kako se određene kombinacije materijala ponašaju u različitim medijima. Uzimajući u obzir pet uzoraka istih kombinacija i jednakih dimenzija pločica, a koji su bili uronjeni u različitim medijima, dobivaju se grafovi pomoću kojih se uspoređuje korozivnost medija. Grafovi prikazuju postotak mase materijala koja je dobivena ili izgubljena tijekom eksperimenta. Na grafu na slici 6.32. prikazan je postotak promjene mase za uzorke 1, 3, 5, 19 i 21. Svi navedeni uzorci su kombinacija aluminija i čelika u omjeru 1:1. Slika 6.33. prikazuje izgled tih uzoraka nakon čišćenja.



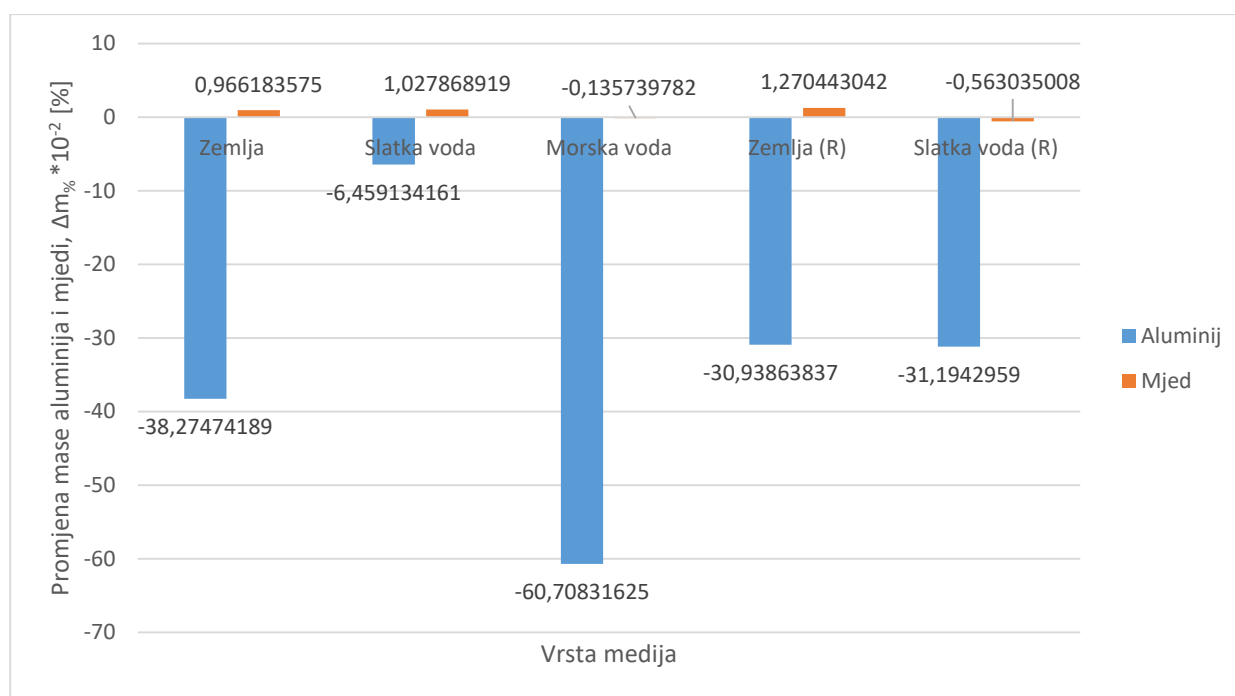
Slika 6.32. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 1 (zemlja), 3 (slatka voda), 5 (morska voda), 19 (zemlja (R)) i 21 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 1:1



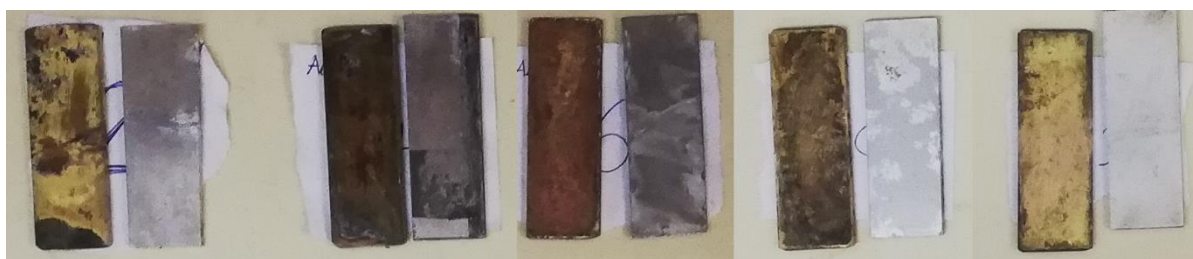
Slika 6.33. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 1 (zemlja), 3 (slatka voda), 5 (morska voda), 19 (zemlja (R)) i 21 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 1:1

Na grafu se može primjetiti kako aluminij ne reagira jednako u svim medijima. Najviše mase gubi u morskoj vodi, a nešto manji gubitak mase ostvaruje se i u slatkoj vodi u realnim uvjetima. S druge strane u preostalim medijima može se uočiti određeni porast mase. Čelik u svim slučajevima gubi masu. Najviše mase izgubio je u zemlji pri laboratorijskim uvjetima, dok ju u stvarnim uvjetima masa čelika nešto povećana, ali gotovo jednaka.

Slijedeći graf na slici 6.34. prikazuje postotak dobivene ili izgubljene mase za uzorke 2, 4, 6, 20 i 22. Ovi navedeni uzorci su kombinacija aluminija i mjedi u omjeru 1:1. Slika 6.35. prikazuje te ispitne uzorke.



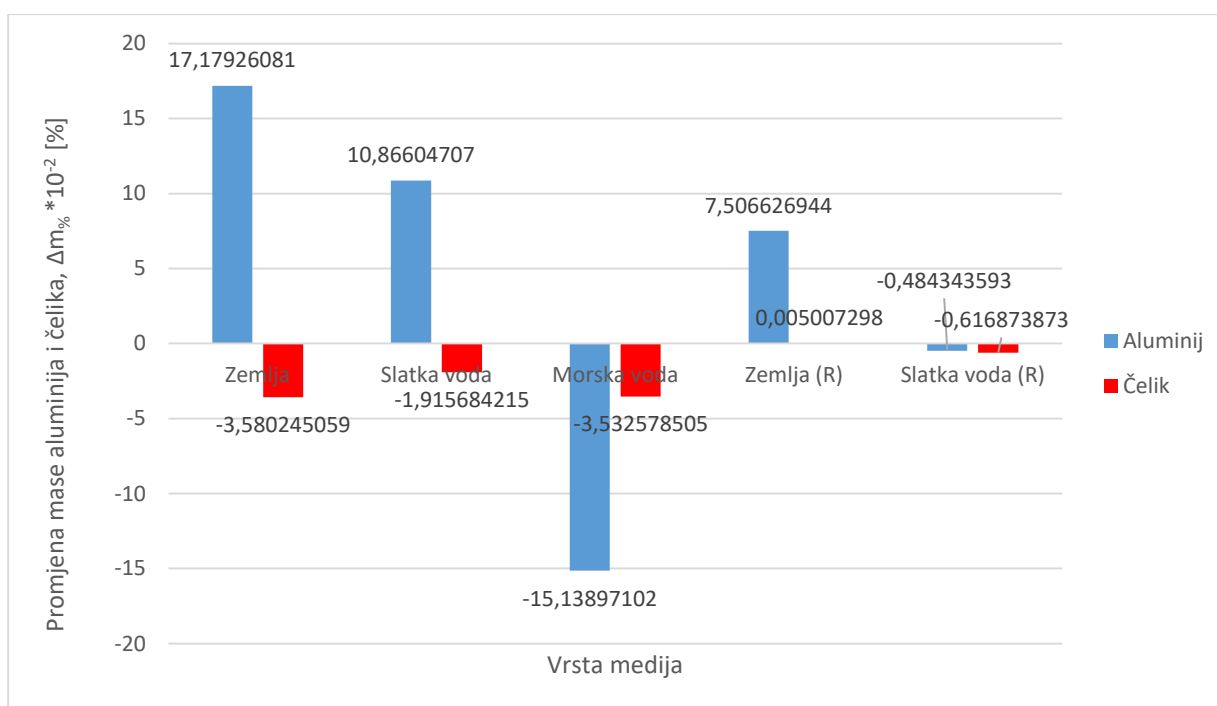
Slika 6.34. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 2 (zemlja), 4 (slatka voda), 6 (morska voda), 20 (zemlja (R)) i 22 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i mjedi 1:1



Slika 6.35. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 2 (zemlja), 4 (slatka voda), 6 (morska voda), 20 (zemlja (R)) i 22 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i mjedi 1:1

Na ovom grafu primjećujemo nešto drugačiju situaciju od prethodnog grafa. Aluminij u ovoj situaciji gubi znatno veći postotak mase nego li u kombinaciji sa čelikom. Najveći postotak mase izgubio je u morskoj vodi, a najmanji u slatkoj vodi u laboratorijskim uvjetima. Mjed ne pokazuje gotovo nikakvu promjenu mase. Promjene se dakako događaju ali one su neznatne.

Preostali grafovi također prikazuju ponašanje ispitnih uzoraka u različitim medijima uz iznimku da se radi o drugačijim omjerima površine aluminija i čelika odnosno mjedi. Pa tako graf na slici 6.36. prikazuje postotak gubitka mase za uzorke 7, 9, 11, 23 i 25 koji se sastoje od aluminija i čelika u omjeru 2:3, a slika 6.37. prikazuje izgled tih uzoraka.

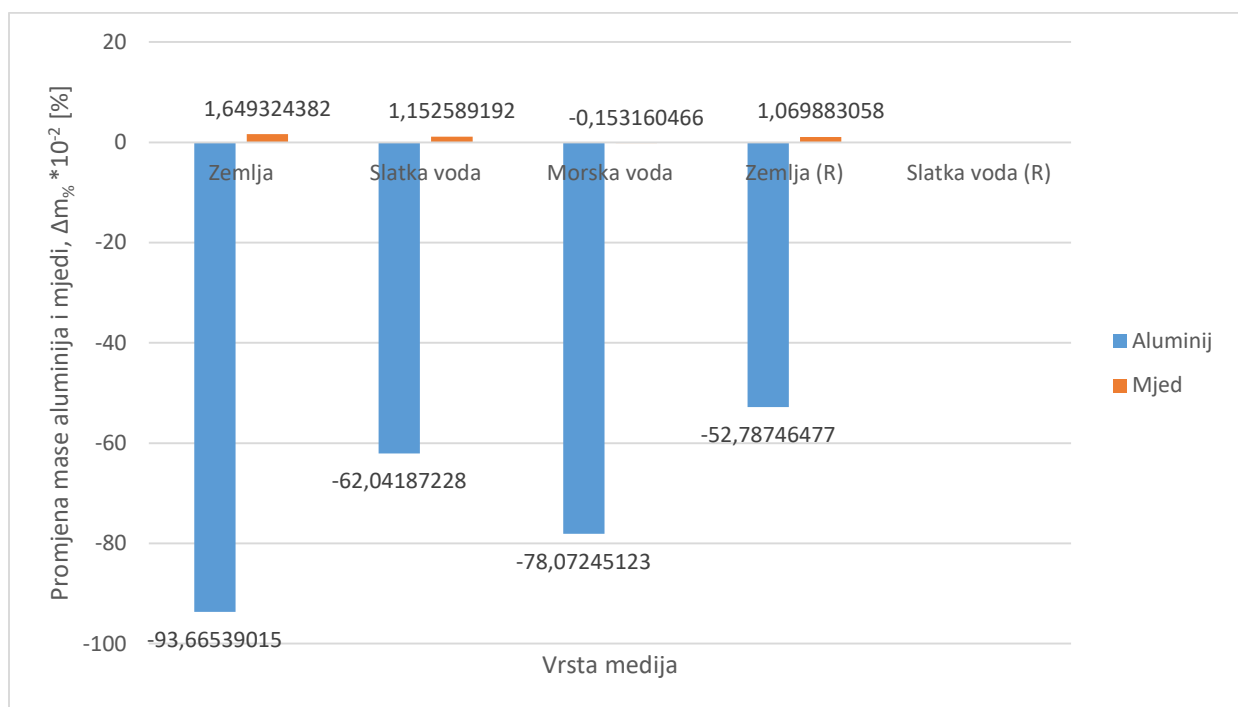


Slika 6.36. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 7 (zemlja), 9 (slatka voda), 11 (morska voda), 23 (zemlja (R)) i 25 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 2:3

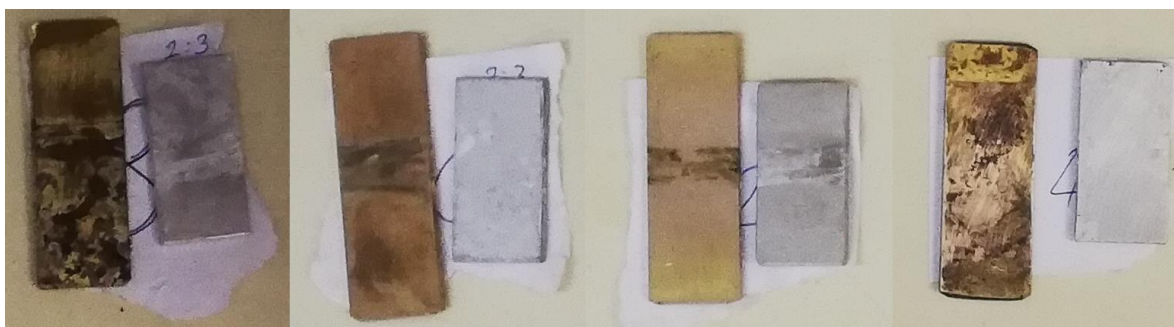


Slika 6.37. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 7 (zemlja), 9 (slatka voda), 11 (morska voda), 23 (zemlja (R)) i 25 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 2:3

Graf na slici 6.38. prikazuje postotak promjene mase za uzorke 8, 10, 12, 24 koji sadrže aluminij i mjed u omjeru 2:3. Slika 6.39. prikazuje izgled uzoraka.



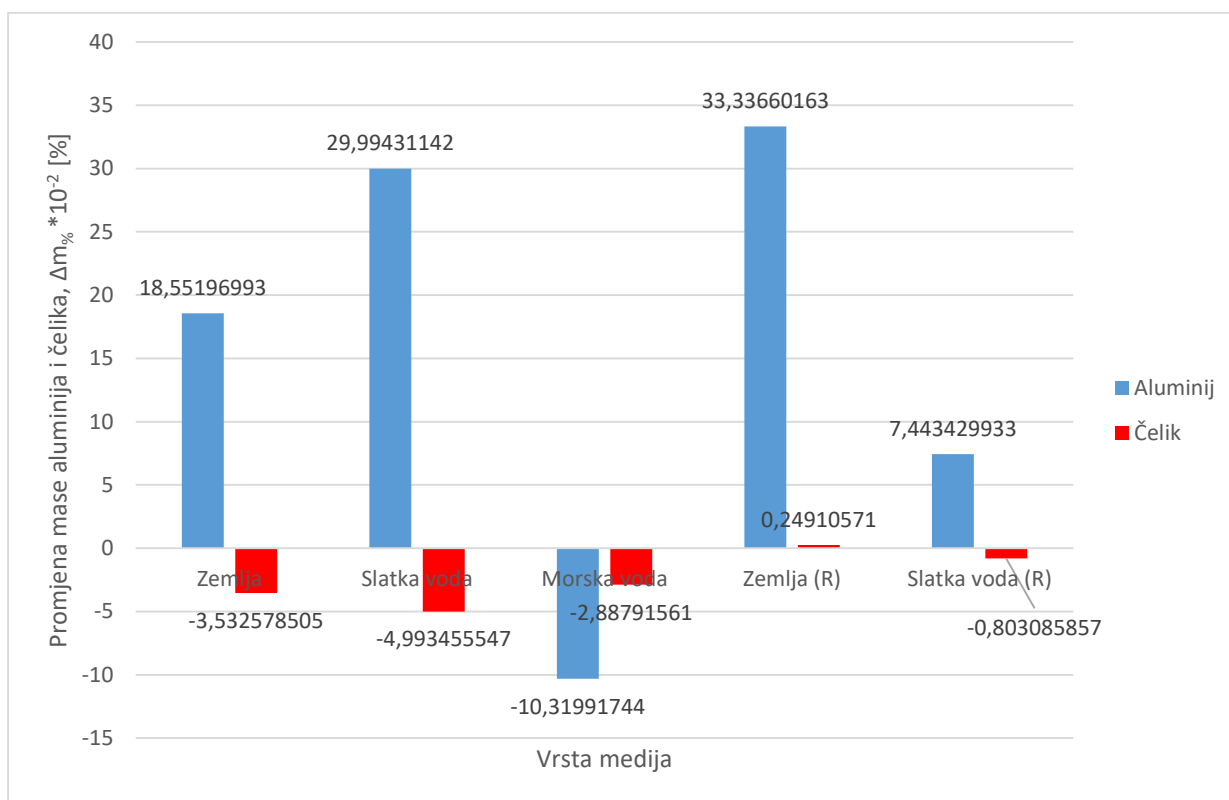
Slika 6.38. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 8 (zemlja), 10 (slatka voda), 12 (morska voda) i 24 (zemlja (R)). Omjer površina aluminija i mjedi 2:3



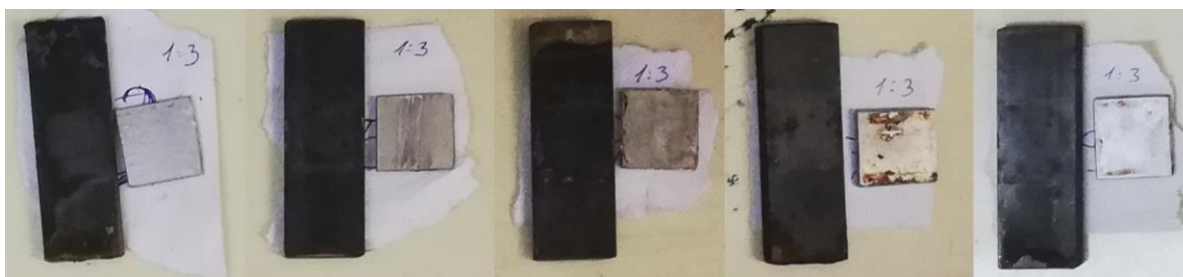
Slika 6.39. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 8 (zemlja), 10 (slatka voda), 12 (morska voda) i 24 (zemlja (R)). Omjer površina aluminija i mjedi 2:3

Kao i kod prethodnih grafova vidimo da aluminij u kombinaciji sa čelikom gubi masu samo u morskoj i u slatkoj vodi pri realnim uvjetima, dok u preostalim slučajevima dolazi do porasta mase. Aluminij u kombinaciji sa mjeđi gubi masu u svim slučajevima. Uzorak 26 nije pronađen na mjestu gdje je položen u slatkoj vodi u realnim uvjetima, stoga nedostaje podatak o promjeni mase tog uzorka. Čelik i mjed neznatno mijenjaju svoju masu.

Graf na slici 6.40. prikazuje postotak gubitka mase za ispitne uzorke 13, 15, 17, 27 i 29 koji se sastoje od pločice aluminija i čelika u omjeru 1:3. Slika 6.41. prikazuje izgled ovih uzoraka.



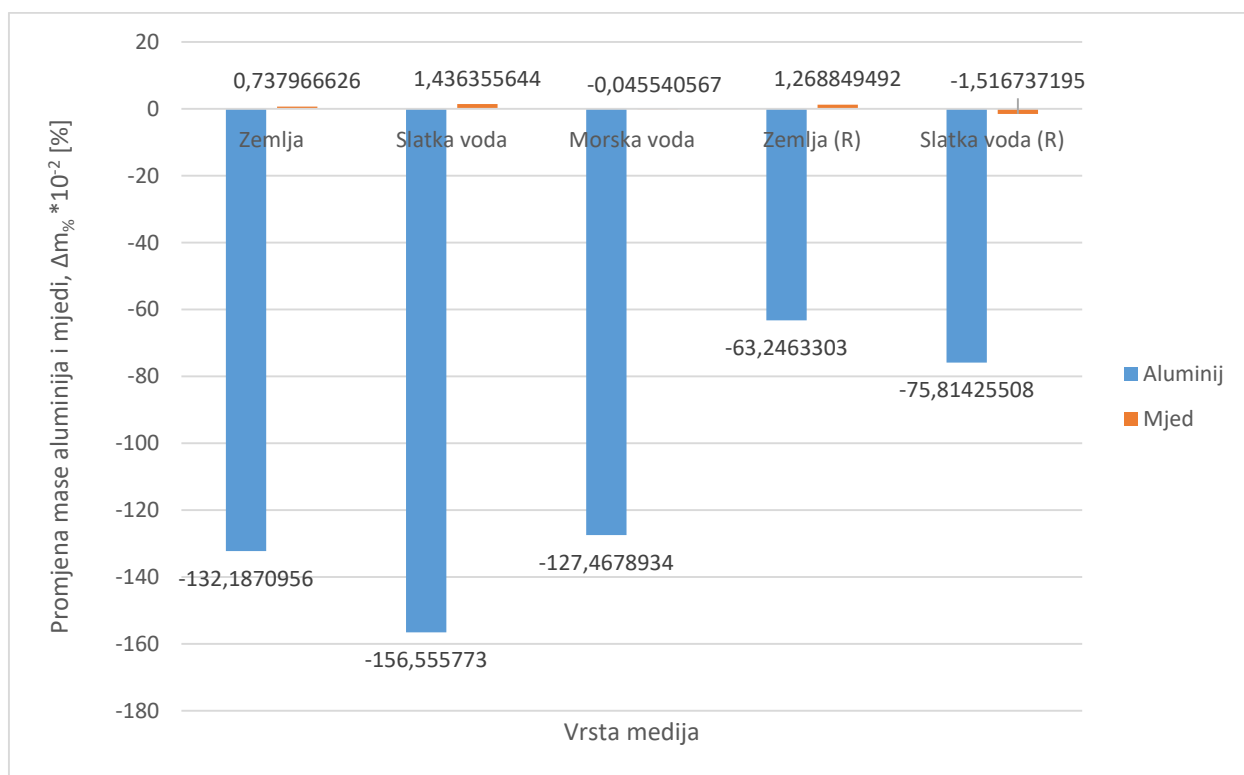
Slika 6.40. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 13 (zemlja), 15 (slatka voda), 17 (morska voda), 27 (zemlja (R)) i 29 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 1:3



Slika 6.41. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 13 (zemlja), 15 (slatka voda), 17 (morska voda), 27 (zemlja (R)) i 29 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 1:3



Graf na slici 6.42. prikazuje postotak gubitka mase za uzorke 14, 16, 18, 28 i 30 koji se sastoje od pločice aluminija i mjedi u omjeru 1:3. Slika 6.43. prikazuje izgled tih ispitnih uzoraka.



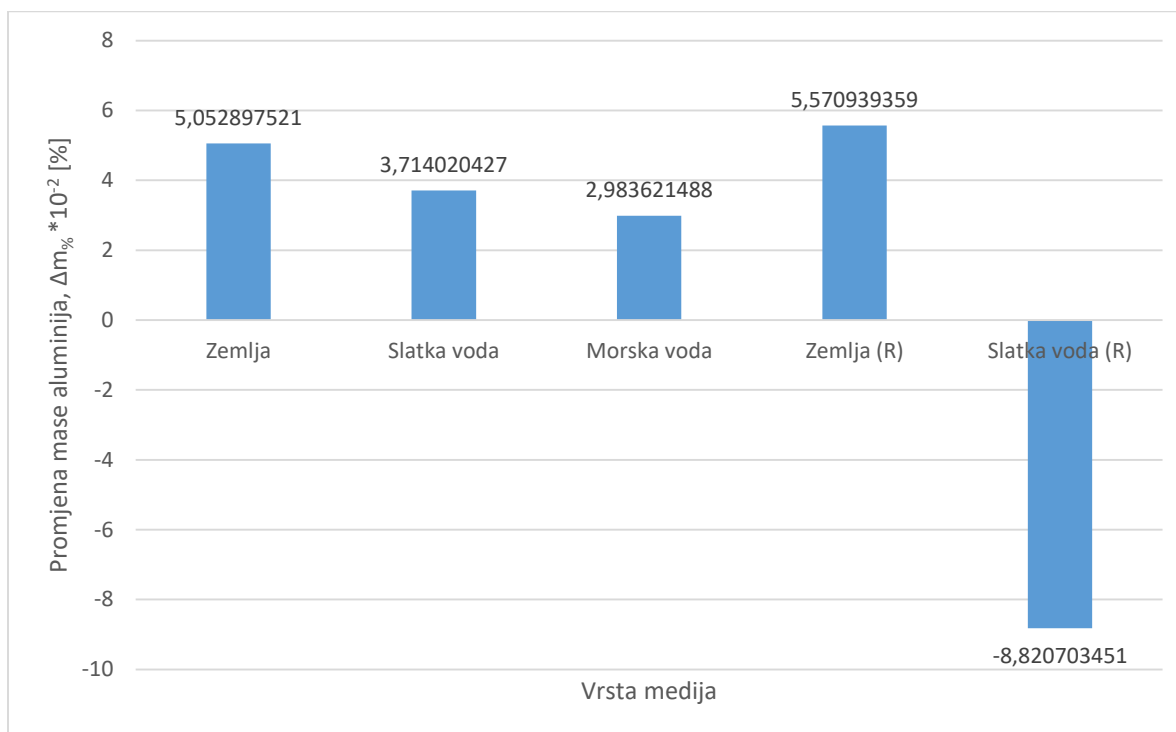
Slika 6.42. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 14 (zemlja), 16 (slatka voda), 18 (morska voda), 28 (zemlja (R)) i 30 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i mjedi 1:3



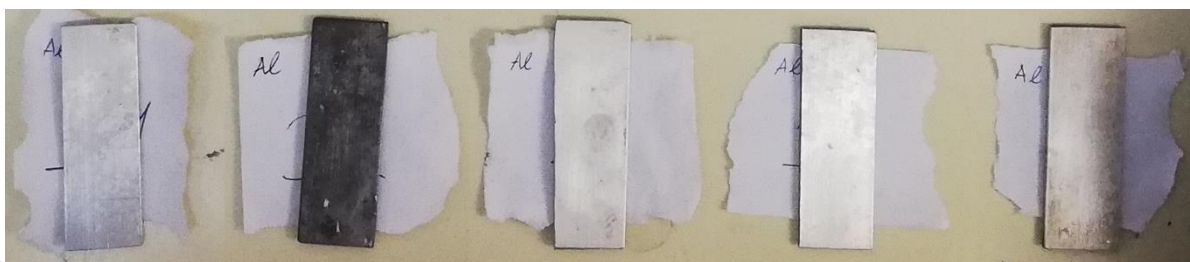
Slika 6.43. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 14 (zemlja), 16 (slatka voda), 18 (morska voda), 28 (zemlja (R)) i 30 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i mjedi 1:3

Aluminij u kombinaciji sa čelikom u ovom slučaju gubi masu samo u morskoj vodi, dok u preostalim slučajevima dolazi do porasta mase. U kombinaciji s mjedi aluminij u svim uvjetima gubi masu. Kod čelika i mjedi gotovo da i nema promjene mase.

Korozijsko ponašanje aluminija koji je samostalno uronjen u medij bez ikakvog kontakta sa drugim materijalom također je provedeno u ovom eksperimentu. Za ovaj dio ispitivanja upotrijebljene su pločice aluminija dimenzija 20x60 mm. Svaka pločica uronjena je u različiti medij. Slika 6.44. prikazuje graf na kojem su prikazani gubici mase uzoraka 31, 32, 33, 34 i 35 u različitim medijima, dok slika 6.45. prikazuje izgled tih uzoraka.



Slika 6.44. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 31 (zemlja), 32 (slatka voda), 33 (morska voda), 34 (zemlja (R)) i 35 (slatka voda (R)). Aluminij bez kontakta sa drugim metalom.



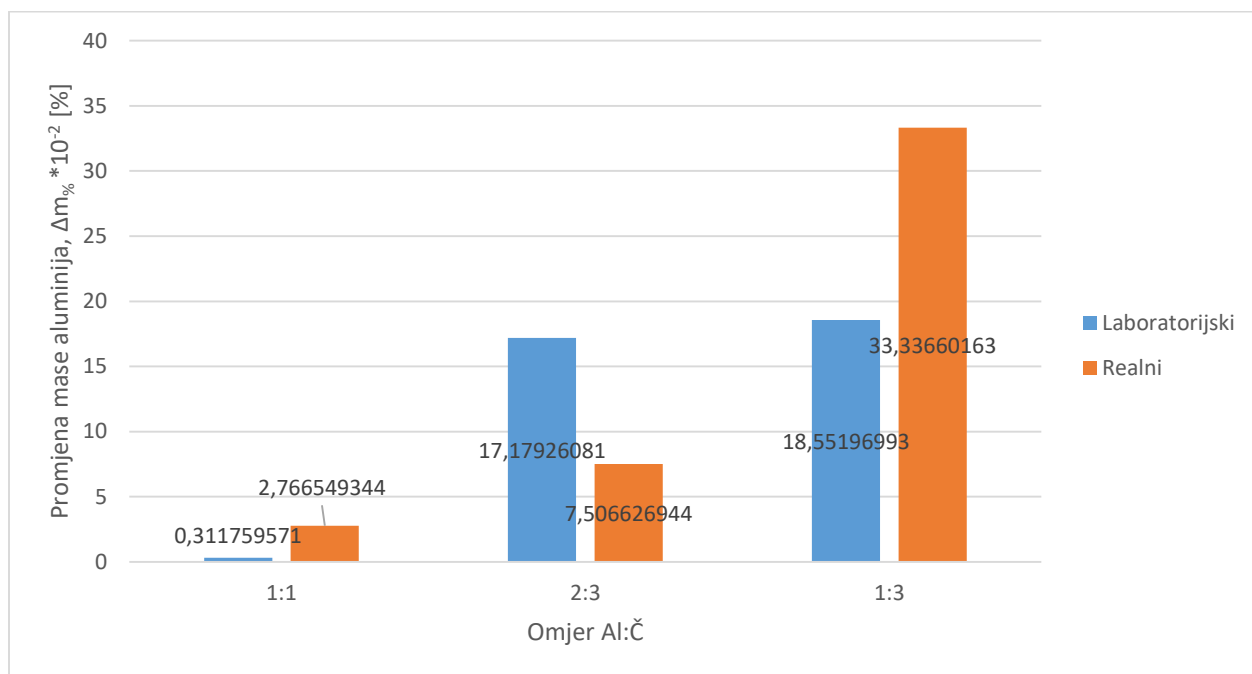
Slika 6.45. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 31 (zemlja), 32 (slatka voda), 33 (morska voda), 34 (zemlja (R)) i 35 (slatka voda (R)). Aluminij bez kontakta sa drugim metalom.

Na grafu je vidljivo da aluminij najviše na masi dobiva u zemlji pri realnim uvjetima, dok aluminij koji se nalazi u slatkoj vodi pri realnim uvjetima najviše gubi masu.

### 6.5.3. Usporedba rezultata prema veličini anode te laboratorijskim i realnim uvjetima

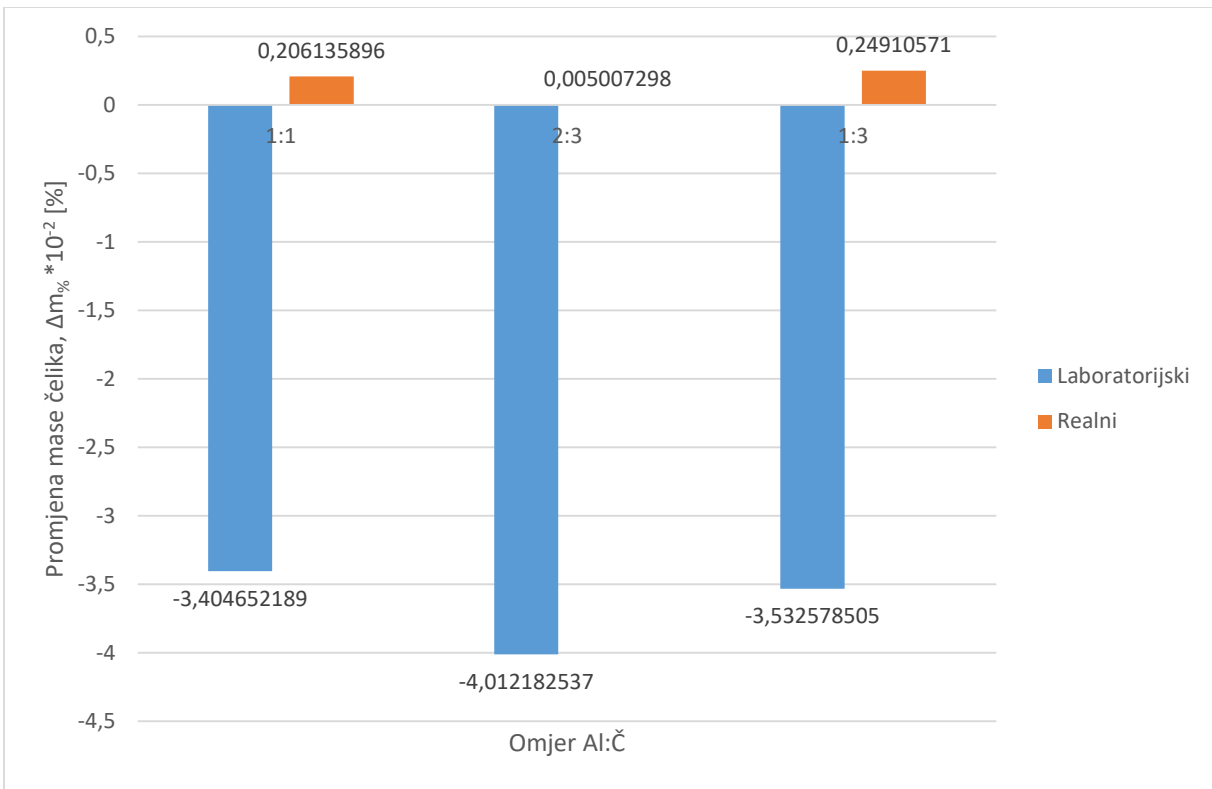
Utjecaj veličine anode na brzinu korozije bio je drugi cilj ovog eksperimenta. Valja napomenuti kako su dimenzije svih pločica čelika i mjedi 20x60 mm, a aluminijske 20x60 mm, 20x40 mm i 20x20 mm. Kombinacijama se nastojalo ispitati kako veličina anode utječe na brzinu korozije. Kako bi bilo lakše utvrditi promjene napravljene su grafovi usporedbe promjene mase uzoraka prema veličini anode.

Graf na slici 6.46. prikazuje promjenu postotka mase aluminijske, a graf na slici 6.47. promjenu postotka mase čelika kod uzoraka 1, 7, 13, 19, 23 i 27 koji su postavljeni u zemlju. Svi navedeni uzorci su kombinacija aluminijske i čelika, uz različite omjere površina.



Slika 6.46. Promjena mase aluminijske ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 1 (omjer 1:1), 7 (omjer 2:3) i 13 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 19 (omjer 1:1), 23 (omjer 2:3) i 27 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u zemlju.

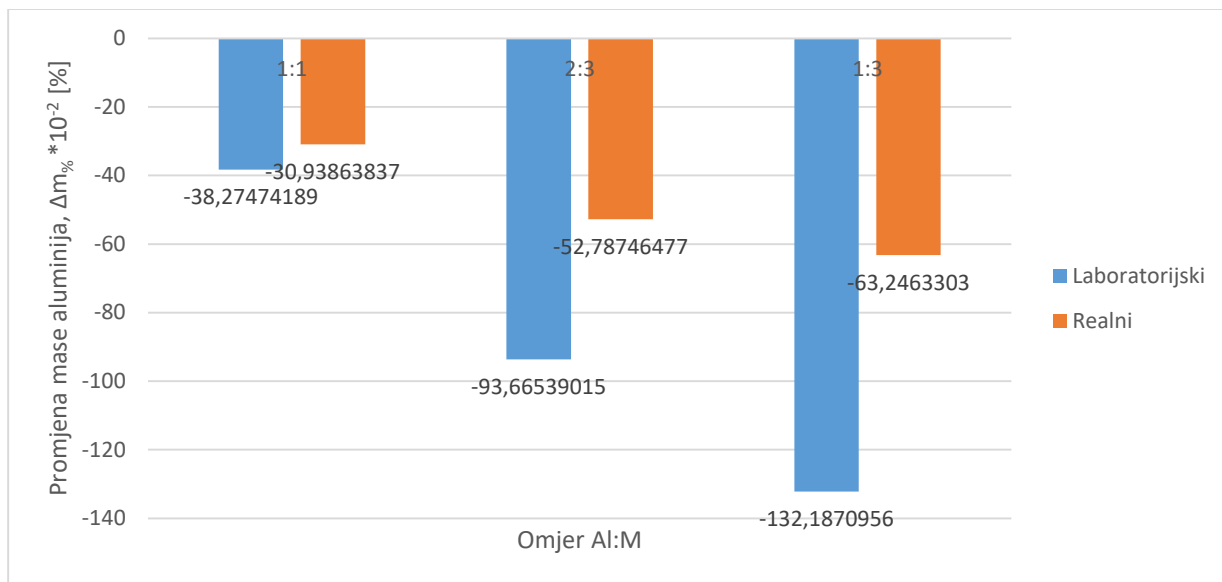
Možemo uočiti da je najmanja promjena mase aluminijske kod omjera 1:1 odnosno tamo gdje je pločica aluminijske jednaka pločici čelika. Najveća promjena dogodila se pri omjeru 1:3 gdje je pločica aluminijske najmanja i najviše je dobila na masi. Uspoređujući laboratorijske i realne uvjete uočava se veća promjena mase pri realnim uvjetima.



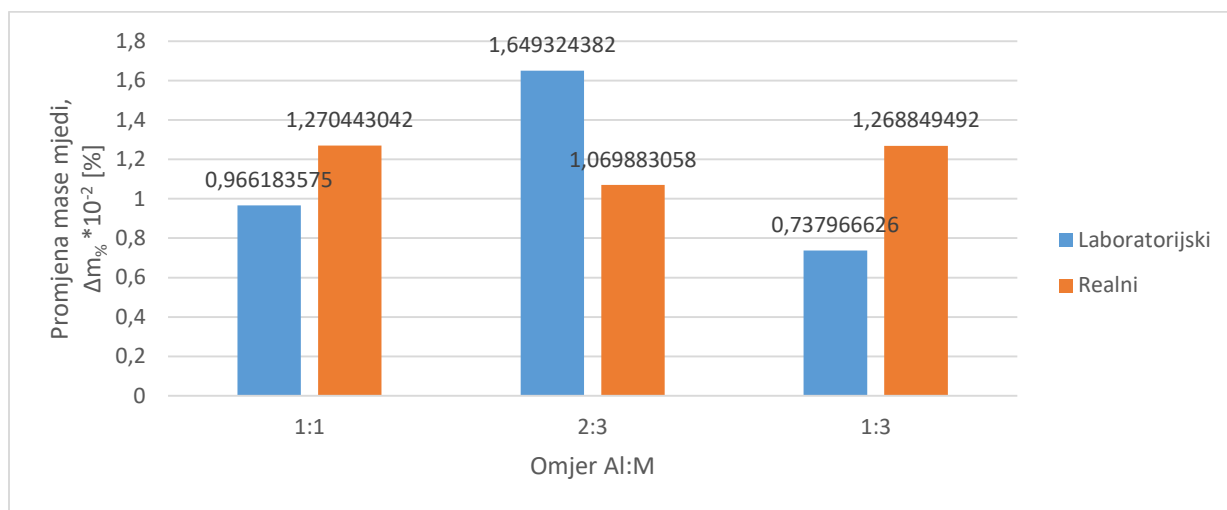
Slika 6.47. Promjena mase čelika ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 1 (omjer 1:1), 7 (omjer 2:3) i 13 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 19 (omjer 1:1), 23 (omjer 2:3) i 27 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u zemlji.

Čelik u realnim uvjetima gotovo da i ne mijenja masu. Veće promjene dogodile su se u laboratorijskim uvjetima iako su one zanemarive. Korozija u pravilu ne ovisi o veličini pločice čelika jer aluminij je materijal koji prvi korodira i glavni je fokus promatranja.

Promjena mase aluminija i mjedi na ispitnim uzorcima 2, 8, 14, 20, 24 i 28 prikazana je na grafovima na slici 6.48. i 6.49. Navedeni ispitni uzorci postavljeni su u zemlju.



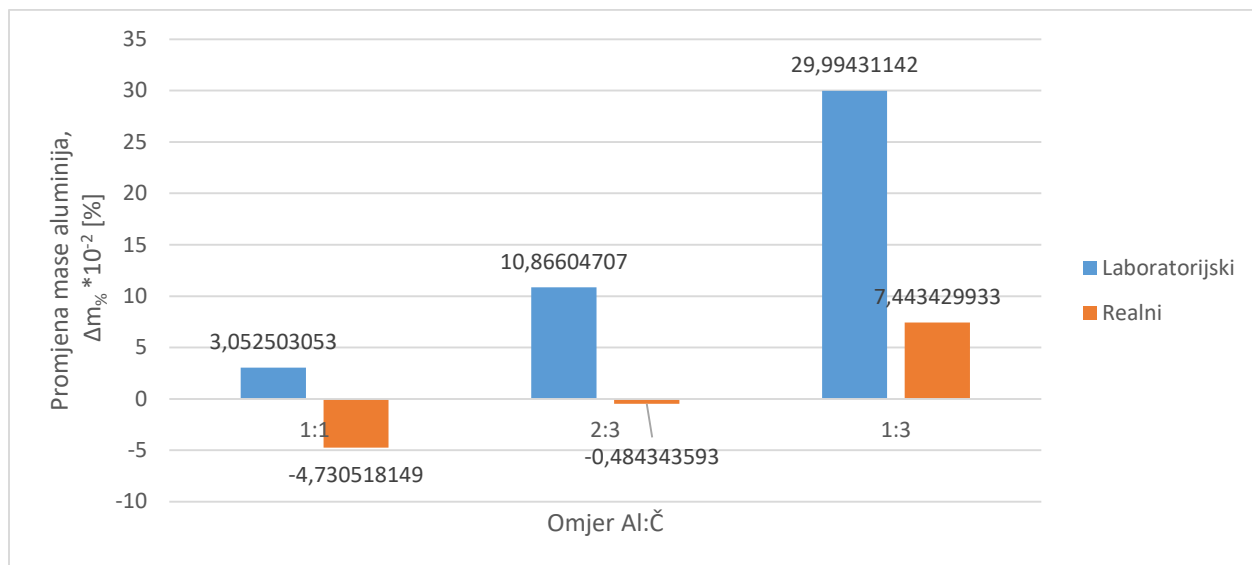
Slika 6.48. Promjena mase aluminija ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 2 (omjer 1:1), 8 (omjer 2:3) i 14 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 20 (omjer 1:1), 24 (omjer 2:3) i 28 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u zemlji.



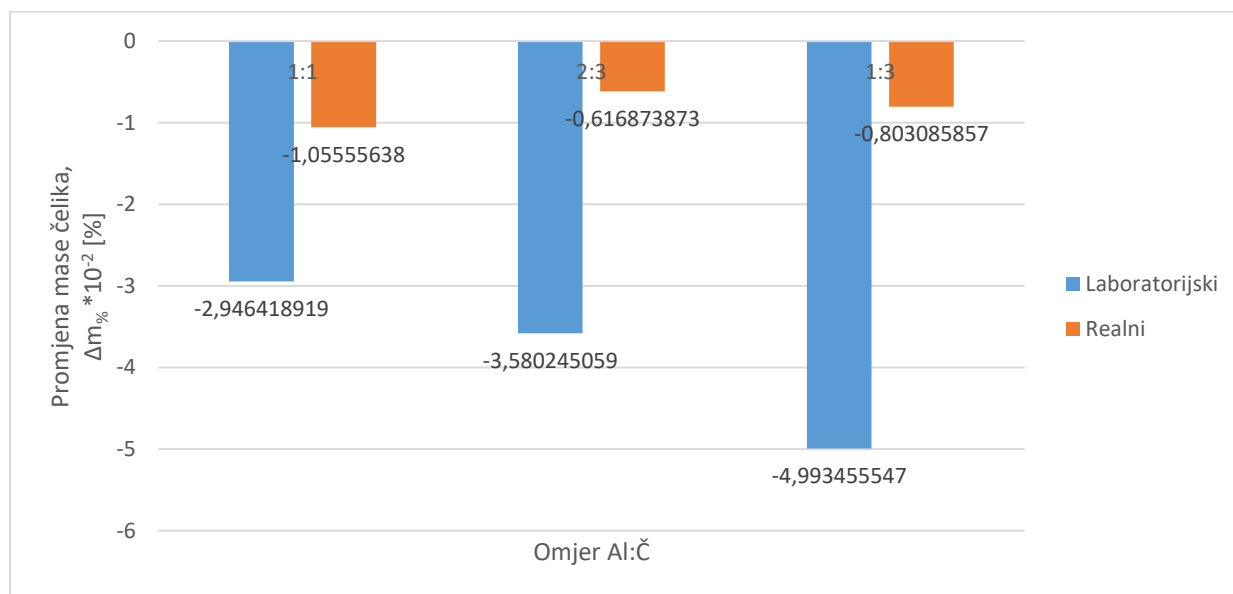
Slika 6.49. Promjena mase mjedi ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 2 (omjer 1:1), 8 (omjer 2:3) i 14 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 20 (omjer 1:1), 24 (omjer 2:3) i 28 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u zemlji.

Aluminij u kombinaciji sa mjedi najviše mase gubi u situaciji kada je pločica najmanja. Odnosno kao i kod kombinacije sa čelikom primjećuje se trend povećanja brzine korozije sa smanjenjem pločice aluminija. Kada usporedimo stanje u laboratorijskim i realnim uvjetima vidimo da su pločice u laboratorijskim uvjetima izgubile nešto više mase od onih u realnim uvjetima. Mjed s druge strane gotovo da i nema promjene.

Usporedba za ispitne uzorke 3, 9, 15, 21, 25 i 29 koji su postavljeni u slatkoj vodi prikazana je u obliku grafa na slici 6.50. i slici 6.51.. Graf na slici 6.50. prikazuje ponašanje aluminija, dok onaj na slici 6.51. prikazuje ponašanje čelika.



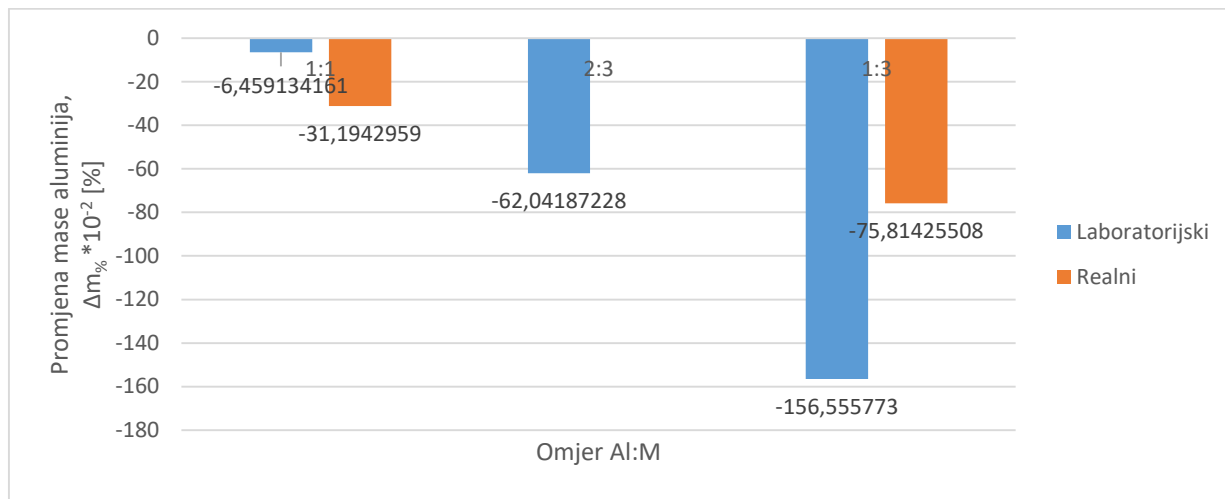
Slika 6.50. Promjena mase aluminija ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 3 (omjer 1:1), 9 (omjer 2:3) i 15 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 21 (omjer 1:1), 25 (omjer 2:3) i 29 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u slatkoj vodi.



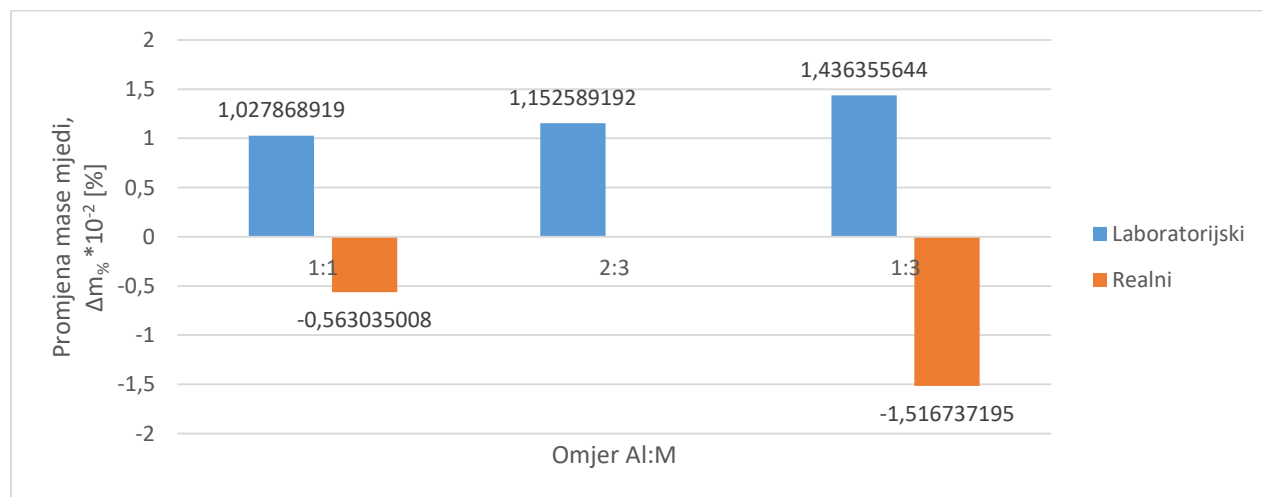
Slika 6.51. Promjena mase čelika ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 3 (omjer 1:1), 9 (omjer 2:3) i 15 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 21 (omjer 1:1), 25 (omjer 2:3) i 29 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u slatkoj vodi.

Vidljivo je da se masa aluminija najviše povećava najmanjoj pločici. U realnim uvjetima primjećujemo da najveća pločica aluminija najviše gubi na masi. Kada pogledamo srednju pločicu vidimo da je masa gotovo jednaka, dok je najmanja pločica dobila masu. Čelik u odnosu na aluminij neznatno gubi masu.

Kombinacije aluminija i mjedi u slatkoj vodi odnosno uzorke 4, 10, 16, 22, 26 i 30 prikazuju grafovi na slici 6.52 i 6.53..



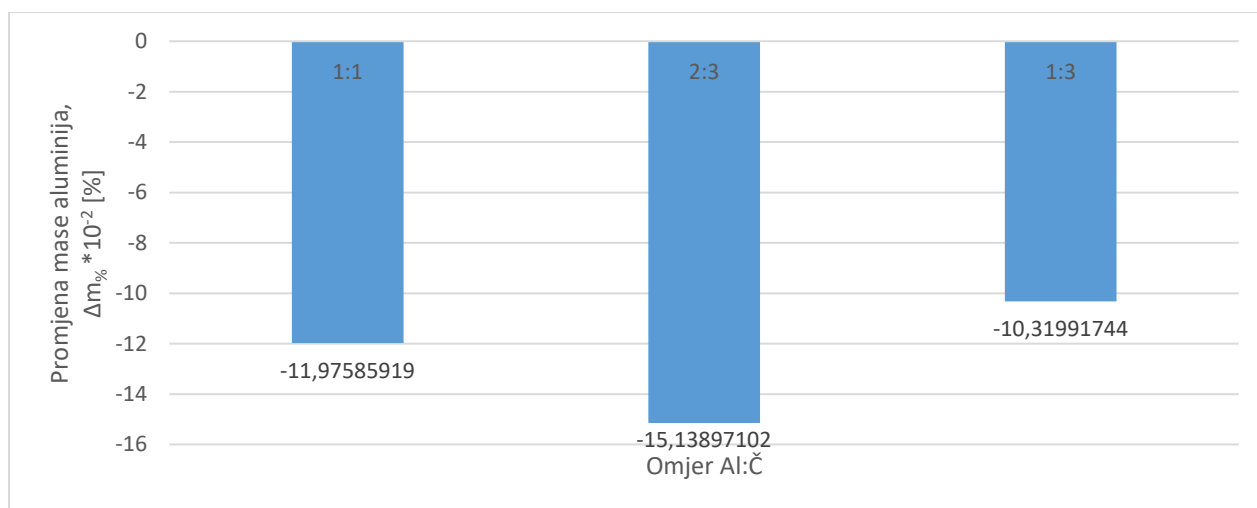
Slika 6.52. Promjena mase aluminija ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 4 (omjer 1:1), 10 (omjer 2:3) i 16 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 22 (omjer 1:1), 26 (omjer 2:3) i 30 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u slatkoj vodi.



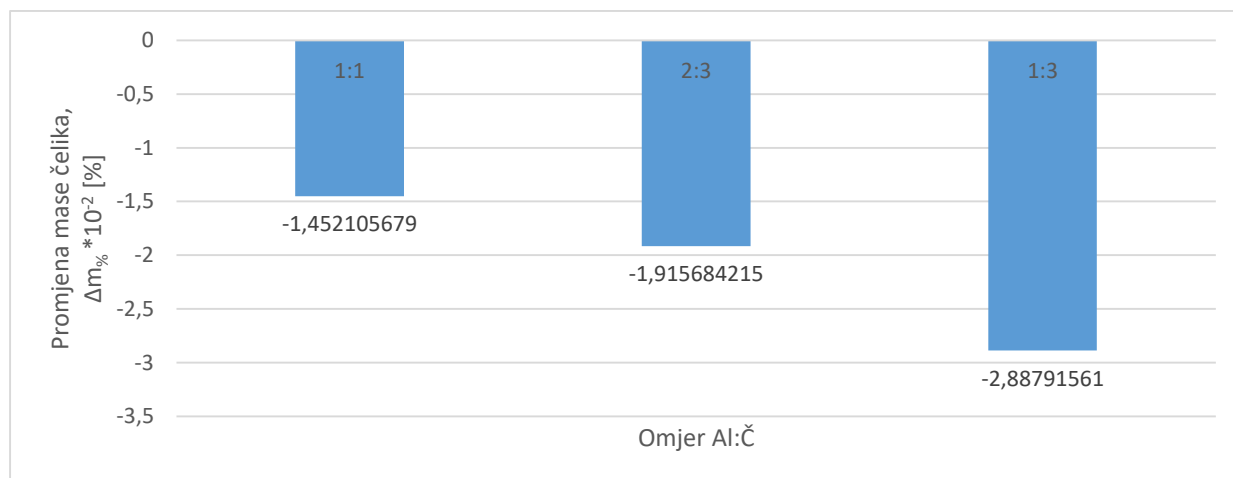
Slika 6.53. Promjena mase mjedi ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 4 (omjer 1:1), 10 (omjer 2:3) i 16 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 22 (omjer 1:1), 26 (omjer 2:3) i 30 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u slatkoj vodi.

Kao i u svim dosadašnjim primjerima možemo uočiti da najbrže korodira najmanja aluminijska pločica. Najveća pločica aluminijska izgubila je više mase u realnim uvjetima nego u laboratorijskim. Mjed u laboratorijskim uvjetima neznatno povećava masu, dok se u stvarnim uvjetima njegova masa neznatno smanjuje.

Preostaje nam usporediti promjenu mase za uzorke koji su bili uronjeni u morsku vodu. Ispitne uzorke 5, 11 i 17 koji se sastoje od pločica aluminijska i čelika prikazuju grafovi na slikama 6.54 i 6.55.



Slika 6.54. Promjena mase aluminijska ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 5 (omjer 1:1), 11 (omjer 2:3) i 17 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima. Uzorci su postavljeni u morskoj vodi.

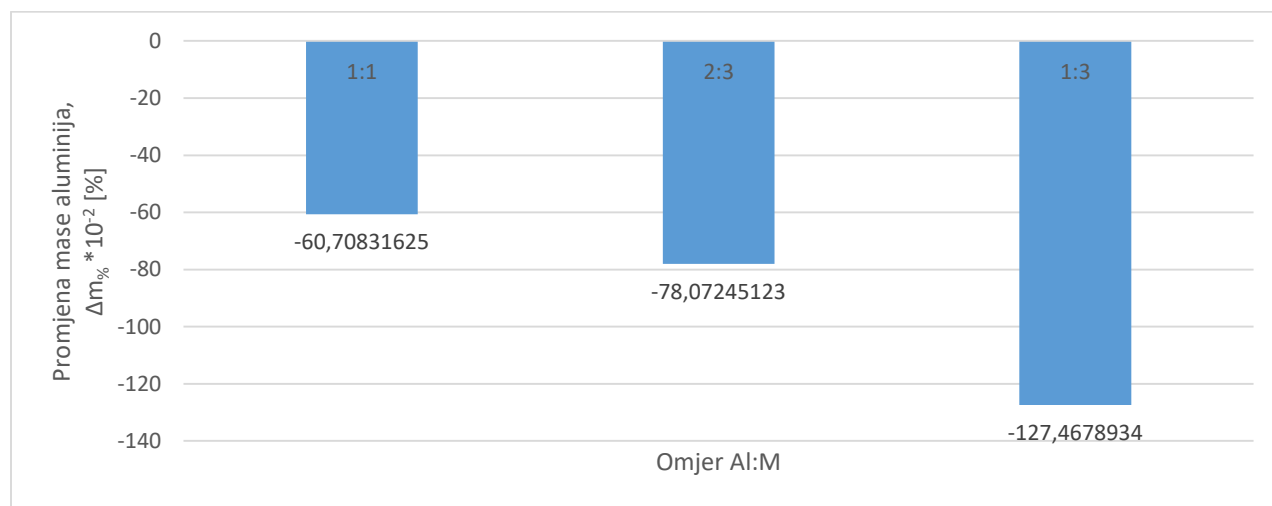


Slika 6.55. Promjena mase čelika ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 5 (omjer 1:1), 11 (omjer 2:3) i 17 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima. Uzorci te su postavljeni u morskoj vodi.

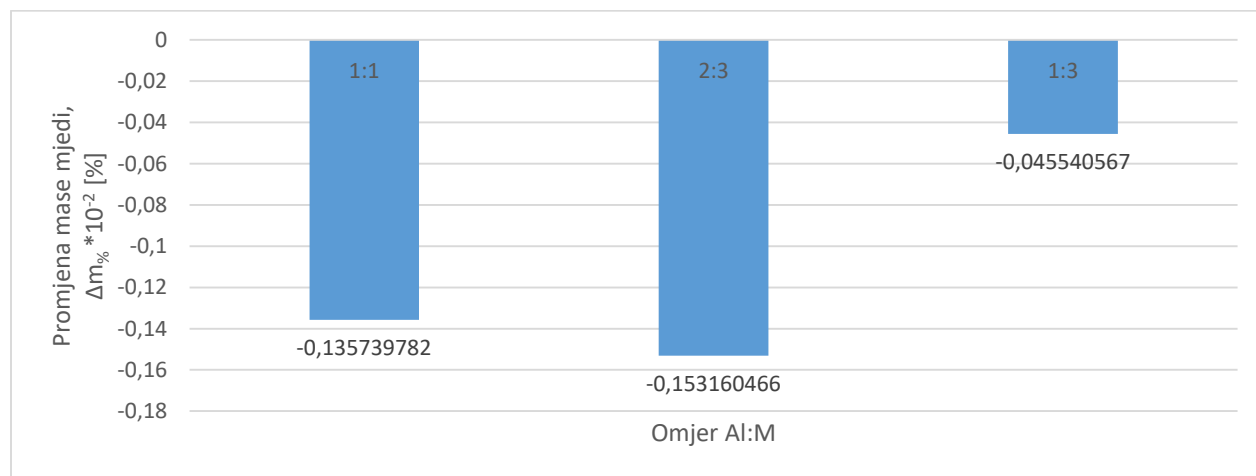


Aluminij u morskoj vodi gubi masu kod svih veličina pločice, iako bi u pravilu najmanja pločica trebala izgubiti najveći postotak mase u ovom slučaju nije tako. Što se tiče pločice čelika ona neznatno gubi masu.

Na grafovima na slici 6.56. i slici 6.57. prikazano je korozijsko ponašanje aluminija i mjedi u kontaktu, odnosno uzoraka 6, 12 i 18.



Slika 6.56. Promjena mase aluminija ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 6 (omjer 1:1), 12 (omjer 2:3) i 18 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima. Uzorci su postavljeni u morskoj vodi.



Slika 6.57. Promjena mase mjedi ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 6 (omjer 1:1), 12 (omjer 2:3) i 18 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima. Uzorci su postavljeni u morskoj vodi.

Aluminij u ovom slučaju gubi znatnu količinu mase. Što je manja pločica više mase gubi. Mjed neznatno gubi masu.

#### 6.5.4. Brzina korozije uzoraka

Uz poznatu promjenu mase i ostalih potrebnih podataka može se izračunati prosječna brzina korozije anode, odnosno aluminija. Tablica 6.9. sadrži izračunate prosječne brzine korozije anode.

Tablica 6.9. Prosječna brzina korozije aluminija

UZORAK	KOMBINACIJA	OMJER	MEDIJ	$v_{kor} [g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
1	Al-Č	1:1	Zemlja	$5,67357 \cdot 10^{-9}$
2	Al-M	1:1	Zemlja	$-6,75154 \cdot 10^{-7}$
3	Al-Č	1:1	Slatka voda	$5,38989 \cdot 10^{-8}$
4	Al-M	1:1	Slatka voda	$-1,16308 \cdot 10^{-7}$
5	Al-Č	1:1	Morska voda	$-2,15595 \cdot 10^{-7}$
6	Al-M	1:1	Morska voda	$-1,09216 \cdot 10^{-6}$
7	Al-Č	2:3	Zemlja	$3,01932 \cdot 10^{-7}$
8	Al-M	2:3	Zemlja	$-1,61031 \cdot 10^{-6}$
9	Al-Č	2:3	Slatka voda	$1,97095 \cdot 10^{-7}$
10	Al-M	2:3	Slatka voda	$-1,08612 \cdot 10^{-6}$
11	Al-Č	2:3	Morska voda	$-2,68384 \cdot 10^{-7}$
12	Al-M	2:3	Morska voda	$-1,36289 \cdot 10^{-6}$
13	Al-Č	1:3	Zemlja	$3,05427 \cdot 10^{-7}$
14	Al-M	1:3	Zemlja	$-2,29874 \cdot 10^{-6}$
15	Al-Č	1:3	Slatka voda	$4,66178 \cdot 10^{-7}$
16	Al-M	1:3	Slatka voda	$-2,57202 \cdot 10^{-6}$
17	Al-Č	1:3	Morska voda	$-1,68789 \cdot 10^{-7}$
18	Al-M	1:3	Morska voda	$-2,13799 \cdot 10^{-6}$
19	Al-Č	1:1	Zemlja (R)	$5,10621 \cdot 10^{-8}$
20	Al-M	1:1	Zemlja (R)	$-5,27642 \cdot 10^{-7}$
21	Al-Č	1:1	Slatka voda (R)	$-8,51035 \cdot 10^{-8}$
22	Al-M	1:1	Slatka voda (R)	$-5,56009 \cdot 10^{-7}$
23	Al-Č	2:3	Zemlja (R)	$1,34192 \cdot 10^{-7}$
24	Al-M	2:3	Zemlja (R)	$-9,26765 \cdot 10^{-7}$
25	Al-Č	2:3	Slatka voda (R)	$-8,38701 \cdot 10^{-9}$
26	Al-M	2:3	Slatka voda (R)	$-7,04509 \cdot 10^{-7}$
27	Al-Č	1:3	Zemlja (R)	$5,46553 \cdot 10^{-7}$
28	Al-M	1:3	Zemlja (R)	$-1,07703 \cdot 10^{-6}$
29	Al-Č	1:3	Slatka voda (R)	$1,20563 \cdot 10^{-7}$
30	Al-M	1:3	Slatka voda (R)	$-1,22171 \cdot 10^{-6}$
31	Al	/	Zemlja	$9,07771 \cdot 10^{-8}$
32	Al	/	Slatka voda	$6,80828 \cdot 10^{-8}$
33	Al	/	Morska voda	$5,38989 \cdot 10^{-8}$
34	Al	/	Zemlja (R)	$9,64506 \cdot 10^{-8}$
35	Al	/	Slatka voda (R)	$-1,5886 \cdot 10^{-7}$

U tablici su crvenom bojom označene brzine gubitka mase, dok su zelenom označene brzine dobivanja mase. Najveće brzine gubitka i dobivanja mase označene su tamnijom nijansom. Stoga iz ove tablice možemo zaključiti kako najveću brzinu korozije, gdje su korozijski produkti lakoćom uklonjeni, imaju uzorci 6, 8, 12, 14, 16, 18, 28, 30. Svi ovi uzorci kombinacija su aluminijska i mjedi. Pokazalo se da je morska voda najkorozivniji elektrolit za kombinaciju aluminijska i mjedi, te su najveće brzine korozije pri omjeru veličina pločica 1:3. Uzorci 7, 9, 13, 15, 23, 27, 29 su uzorci s najvećom brzinom korozije pri kojoj na površini aluminijska zaostaju korozijski produkti. Ovi uzorci kombinacija su aluminijska i čelika. Brzina korozije u ovom slučaju ipak je manja nego u slučaju kada je aluminij u kontaktu s mjedi. Primjećujemo da do porasta mase dolazi samo kod slučajeva gdje se aluminij nalazi u zemlji ili u slatkoj vodi. Najveći porast je naravno pri omjeru 1:3 gdje je ujedno i najveća brzina korozije. Ispitni uzorci 31, 32, 33, 34, 35 su zapravo pločice aluminijska koje nisu u kontaktu sa drugim metalom. Jedino kod uzorka 35 dolazi do gubitka mase, dok kod ostalih uzoraka dolazi do porasta mase.

Uz prosječnu brzinu korozije moguće je izračunati i prosječnu brzinu prodiranja korozije koja se računa prema izrazu 4.18. Dobivanjem rezultata prosječne brzine prodiranja korozije može se utvrditi koliko je materijal postojan u određenom mediju. Klasifikacija materijala prema prosječnoj brzini prodiranja korozije radi se prema tablici 4.2. Prosječna brzina prodiranja korozije prikazana je u tablici 6.10. Sivom bojom su označeni uzorci u kojima se masa aluminijska povećava zbog stvaranja oksidnog sloja na površini. Pretpostavlja se da je zbog pasivacije aluminij u tim uzorcima potpuno postojan i uvijek upotrebljiv. Zelenom bojom označen je aluminij koji je dobro postojan i uglavnom upotrebljiv. Žutom bojom označen je aluminij koji je postojan i obično upotrebljiv. Te crvenom bojom aluminij koji je smanjeno postojan i katkad upotrebljiv.

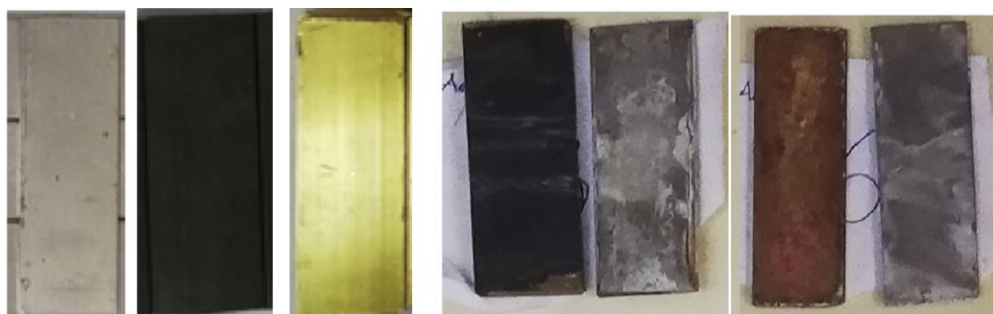
Tablica 6.10. Prosječna brzina prodiranja korozije

UZORAK	KOMBINACIJA	OMJER	MEDIJ	$v_{kor}$ [mm*god <sup>-1</sup> ]
1	Al-Č	1:1	Zemlja	0,00210
2	Al-M	1:1	Zemlja	0,25006
3	Al-Č	1:1	Slatka voda	0,01996
4	Al-M	1:1	Slatka voda	0,04308
5	Al-Č	1:1	Morska voda	0,07985
6	Al-M	1:1	Morska voda	0,40450
7	Al-Č	2:3	Zemlja	0,11183
8	Al-M	2:3	Zemlja	0,59641
9	Al-Č	2:3	Slatka voda	0,07300
10	Al-M	2:3	Slatka voda	0,40227
11	Al-Č	2:3	Morska voda	0,09940
12	Al-M	2:3	Morska voda	0,50477
13	Al-Č	1:3	Zemlja	0,11312
14	Al-M	1:3	Zemlja	0,85139
15	Al-Č	1:3	Slatka voda	0,17266
16	Al-M	1:3	Slatka voda	0,95260
17	Al-Č	1:3	Morska voda	0,06251
18	Al-M	1:3	Morska voda	0,79185
19	Al-Č	1:1	Zemlja (R)	0,01891
20	Al-M	1:1	Zemlja (R)	0,19542
21	Al-Č	1:1	Slatka voda (R)	0,03152
22	Al-M	1:1	Slatka voda (R)	0,20593
23	Al-Č	2:3	Zemlja (R)	0,04970
24	Al-M	2:3	Zemlja (R)	0,34325
25	Al-Č	2:3	Slatka voda (R)	0,00311
26	Al-M	2:3	Slatka voda (R)	0,26093
27	Al-Č	1:3	Zemlja (R)	0,20243
28	Al-M	1:3	Zemlja (R)	0,39890
29	Al-Č	1:3	Slatka voda (R)	0,04465
30	Al-M	1:3	Slatka voda (R)	0,45248
31	Al	/	Zemlja	0,03362
32	Al	/	Slatka voda	0,02522
33	Al	/	Morska voda	0,01996
34	Al	/	Zemlja (R)	0,03572
35	Al	/	Slatka voda (R)	0,05884

## 6.6. Analiza i diskusija rezultata

Vizualnim pregledom tijekom eksperimenta kod ispitnih uzoraka uočene su određene promjene. Tijekom kontrola uočeno je stvaranje vlaknastih struktura u području spoja jednog metala sa drugim. Ondje gdje je aluminij u kontaktu sa mjedi te vlaknaste strukture predstavljaju aluminijev i cinkov hidroksid. U situaciji gdje je aluminij u kontaktu sa čelikom pojavljuje se samo aluminijev hidroksid. Napomenimo da je vizualna kontrola bila moguća samo kod laboratorijskih uvjeta i to za uzorke postavljene u morskoj i slatkoj vodi.

Nakon 150 dana i završetka eksperimenta provedena je vizualna kontrola pri kojoj je bilo moguće primjetiti promjene na uzorcima. Te promjene su se očitovale uglavnom kroz promjenu boje uzoraka, te u manjoj mjeri kroz promjenu hrapavosti površine metala (slika 6.58.).



*Slika 6.58. Razlika u boji ispitnih uzoraka prije i poslije eksperimenta*

Mjerenjem mase uzoraka i dobivanjem tablice sa promjenom postotka mase utvrđeno je koji uzorci su doživjeli najveće promjene. Sistematiziranjem i usporedbom rezultata olakšano je uočavanje promjena ovisno o mediju, veličini anode te laboratorijskim i realnim uvjetima.

Usporedbom uzoraka prema vrsti medija olakšano je prepoznavanje korozivnosti pojedinog medija. Kod ispitnih uzoraka koji su kombinacija aluminija i čelika (slika 6.32., slika 6.36., slika 6.40.) najviše mase je izgubio aluminij u morskoj vodi zbog djelovanja različitih iona, poput iona klorida  $Cl^-$ . U morskoj vodi aluminij stvara aluminijev hidroksid, te također može stvarati i spojeve poput aluminijevog klorida. Koroziji u morskoj vodi pridonose i mikroorganizmi koji se u njoj nalaze. U preostalim medijima dolazi do stvaranja pasivacijskog sloja na aluminiju zbog čega se njegova masa povećava. Aluminij pri omjeru pločice 1:1 (slika 6.32.) gubi masu u slatkoj vodi pri realnim uvjetima. Kako je slatka voda u realnim uvjetima tekućica, gubitak mase se povezuje sa erozijom. Korozijski produkti sa površine aluminija se u realnim uvjetima konstantno ispiru zbog

čega ne može doći do stvaranja pasivacijskog sloja i povećanja mase aluminija. Pri omjeru 2:3 (slika 6.36.) u slatkoj vodi kod realnih uvjeta aluminij neznatno gubi masu, dok u omjeru 1:3 (slika 6.40.) njegova masa raste. Čelik s druge strane masu gubi u svim slučajevima. Najviše gubi u zemlji u laboratorijskim uvjetima zbog konstantne prisutnosti vlage i raznih iona iz zemlje. Kisik reagira sa željezom u čeliku gdje tvori željezov (III) oksid odnosno hrđu. Kako je specifični volumen hrđe veći od specifičnog volumena čelika dolazi do lakog odvajanja hrđe od površine pločice. U zemlji pri realnim uvjetima masa čelika je gotovo jednaka, što se može objasniti relativno kratkim periodima vlažnosti tla. Valja napomenuti kako je u svim ovim kombinacijama aluminij anoda pa s obzirom na to veće promjene na čeliku ili mjedi kao katodi nisu ni očekivane.

Aluminij u kombinaciji sa mjedi (slika 6.34., slika 6.38., slika 6.42.) u svim medijima gubi masu, i to više nego aluminij u kombinaciji sa čelikom. Razlog te pojave leži u velikoj razlici elektrodnih potencijala aluminija i bakra. Bakar je element elektrodnog potencijala +0,340 V, cink -0,763 V, željezo -0,440 V dok je aluminijev elektrodni potencijal 1,662 V. Uz to saznanje ne čudi da aluminij u kombinaciji sa mjedi korodira i gubi masu znatno brže nego u kombinaciji sa čelikom. Najviše mase aluminij gubi u laboratorijskim uvjetima, a nešto manje u realnim. Najviše mase aluminij gubi u morskoj vodi pri omjeru 1:1 (slika 6.34.) što ukazuje na visoku korozivnost morske vode zbog prisutnosti raznih soli i minerala. Kod omjera 2:3 (slika 6.38.) najviše mase gubi aluminij postavljen u zemlji pri realnim uvjetima što je pomalo neobično jer se očekivao veći gubitak mase u morskoj vodi. Postoji mogućnost da korozijski produkti nisu sasvim uklonjeni s površine aluminija koji je bio u morskoj vodi. Najviše mase pri omjeru 1:3 (slika 6.42.) aluminij gubi u slatkoj vodi. Ta činjenica je također pomalo iznenađujuća pa se pretpostavlja da nisu sasvim uklonjeni korozijski produkti sa pločice aluminija koja se nalazila u morskoj vodi. U svakom slučaju moguće je zaključiti kako je pri laboratorijskim uvjetima veći gubitak mase aluminija, te je veća brzina korozije. Razlog leži u konstantnim uvjetima zbog čega se reakcije oksidacije i redukcije zbivaju neometano i kontinuirano. Mjed gotovo da i ne pokazuje nikakve promjene mase. Tek neznatni gubitak mase može se obrazložiti činjenicom da dolazi do decinkacije, dok neznatni porast mase sugerira zaostajanje korozijskih produkata na površini.

Samostalno postavljene pločice aluminijske (slika 6.44.) stvaraju oksidni sloj u svim uvjetima osim u slatkoj vodi pri realnim uvjetima. Aluminij u slatkoj vodi pri realnim uvjetima nalazi se u tekućici te je izložen erozijskom djelovanju vode. Stoga se korozijski produkti ispiru s površine aluminijske i on gubi masu. Usporedbom samostalno postavljenog aluminijske sa uzorcima gdje je aluminij u kontaktu s drugim metalom primjećuje se da je brzina korozije znatno manja kod samostalno postavljenog aluminijske. Stoga možemo zaključiti da je galvanska korozija, odnosno korozija kod kontakta dva ili više materijala različitih elektrodnih potencijala opasnija nego korozija kod koje ne dolazi do kontakta različitih materijala.

Veličina anode u spoju se pokazala ključnom za ubrzavanje napredovanja korozije kod svih uzoraka. Uzorci čiji je omjer pločica bio 1:1 najsporije su korodirali. Uzorci sa omjerom pločica 2:3 korodirali su nešto brže, dok je najbrža korozija bila prisutna kod uzoraka sa omjerom pločica 1:3. Usporedbom uzoraka prema veličini anode olakšano je praćenje brzine korozije s obzirom na veličinu anode i uvjete u kojima se uzorak nalazio. Aluminij u kombinaciji sa čelikom u zemlji imao je najveću promjenu mase pri omjeru pločica 1:3 (slika 6.46.). Radi se o porastu mase aluminijske čija masa se u realnim uvjetima povećava više nego u laboratorijskim. Razlog tome je bolja aeracija tla u realnim uvjetima zbog čega dolazi do stvaranja čvrstog oksidnog sloja na površini aluminijske. U slatkoj vodi također je najbrža korozija na pločicama u uzorcima s omjerom pločica 1:3 (slika 6.50.). Razlika je u tome što se u laboratorijskim uvjetima masa povećava zbog stvaranja pasivnog sloja, dok u realnim uvjetima uzorak s omjerom 1:1 gubi masu, onaj s omjerom 2:3 neznatno gubi masu, a onom s omjerom 1:3 se masa povećava. Razlog leži u istovremenom odvijanju erozije i korozije aluminijske. Korozijom aluminijske na površini pločice nastaje oksidni sloj. Taj sloj nastaje sporije pri omjeru 1:1 nego pri omjeru 1:3. Brzina erozije nadilazi brzinu stvaranja oksidnog sloja pri omjeru 1:1 stoga se korozijski produkti ispiru prije nego li se stvori kompaktan oksidni sloj. Pri omjeru 1:3 brzina korozije je veća od brzine erozije zbog čega ne dolazi do ispiranja oksidnog sloja već on ostaje na površini aluminijske. To rezultira povećanjem mase aluminijske pri omjeru pločica 1:3. Aluminij u kombinaciji sa čelikom u morskoj vodi nije pratio trend rasta brzine korozije sa smanjenjem anode (slika 6.54.). Najviše mase izgubio je uzorak s omjerom 2:3. Postoji mogućnost da nisu dovoljno dobro uklonjeni svi korozijski produkti na uzorku s omjerom 1:3 pa stoga prema dobivenim podacima gubi manje mase. Korozija čelika (slika 6.47., slika 6.51., slika 6.55.) u pravilu ne ovisi o veličini anode jer je aluminij metal koji prvi korodira i glavni je fokus promatranja.

Aluminij u kombinaciji sa mjedi u zemlji (slika 6.48.) također prati trend povećanja brzine korozije sa smanjenjem anode. U ovom slučaju, zbog velike razlike u elektrodnom potencijalu aluminija i bakra nastaje nešto deblji oksidni sloj koji se zatim lakše lomi od površine aluminija kod čišćenja. Stoga dolazi do uspješnog odvajanja svih korozijskih produkata i vidi se da aluminij gubi masu. Kada usporedimo stanje u laboratorijskim i realnim uvjetima vidimo da je aluminij u laboratorijskim uvjetima izgubio nešto više mase od onih u realnim uvjetima. Vjerojatno zbog konstantnosti uvjeta i procesa oksidacije i redukcije, jer ne dolazi do varijacije vlažnosti zbog suhih i vlažnih razdoblja kao u realnim uvjetima. U slatkoj vodi (slika 6.52.) aluminij najviše mase gubi u laboratorijskim uvjetima pri omjeru 1:3, vjerojatno zbog konstantnosti reakcija oksidacije i redukcije. Pri omjeru 1:1 više mase gubi u realnim uvjetima što se može objasniti činjenicom da na te uzorke simultano djeluje i korozija i erozija. Aluminij u kombinaciji sa mjedi u morskoj vodi (slika 6.56.) najviše mase gubi upravo pri omjeru 1:3, što još jednom potvrđuje kako je veličina anode ključna za povećanje ili smanjenje brzine korozije. Manja anoda uzrokuje veću brzinu korozije, dok veća anoda smanjuje brzinu korozije. Korozija mjedi ne ovisi o veličini anode, pa se posebno ne promatra (slika 6.49., slika 6.53, slika 6.57.).

Radi lakšeg razumijevanja u tablici 6.11. su usporedno prikazani rezultati ispitivanja u laboratorijskim i stvarnim uvjetima u zemlji. Uočljivo je kako aluminij u kombinaciji sa čelikom uglavnom više mase dobiva u realnim uvjetima zbog bolje aeracije tla, osim pri omjeru 2:3 koji je iznimka. Aluminij u kombinaciji sa mjedi više mase gubi u konstantnim laboratorijskim uvjetima.

*Tablica 6.11. Usporedba promjene mase aluminija u laboratorijskim i realnim uvjetima u zemlji*

KOMBINACIJA	OMJER	PROMJENA MASE ALUMINIJA (ZEMLJA) $\Delta m \cdot 10^{-2}$ [%]	PROMJENA MASE ALUMINIJA (ZEMLJA (R)) $\Delta m \cdot 10^{-2}$ [%]
Al-Č	1:1	0,311759571	2,766549344
Al-M	1:1	-38,27474189	-30,93863837
Al-Č	2:3	17,17926081	7,506626944
Al-M	2:3	-93,66539015	-52,78746477
Al-Č	1:3	18,55196993	33,33660163
Al-M	1:3	-132,1870956	-63,2463303



Tablica 6.12. prikazuje promjenu mase aluminija u laboratorijskim i realnim uvjetima u slatkoj vodi. Vidljivo je da u laboratorijskim uvjetima aluminij dobiva masu u kombinaciji sa čelikom, dok u realnim uvjetima gubi osim pri omjeru 1:3 gdje dolazi do porasta mase. To je objašnjeno u prije u tekstu. Aluminij u kombinaciji sa mjedi kod omjera 1:1 više mase gubi u realnim uvjetima, dok pri omjeru 1:3 više u laboratorijskim, odnosno erozija ima znatan utjecaj na gubitak mase aluminija.

Tablica 6.12. Usporedba promjene mase aluminija u laboratorijskim i realnim uvjetima u slatkoj vodi

KOMBINACIJA	OMJER	PROMJENA MASE ALUMINIJA (SLATKA VODA) $\Delta m * 10^{-2}$ [%]	PROMJENA MASE ALUMINIJA (SLATKA VODA (R)) $\Delta m * 10^{-2}$ [%]
Al-Č	1:1	3,052503053	-4,730518149
Al-M	1:1	-6,459134161	-31,1942959
Al-Č	2:3	10,86604707	-0,484343593
Al-M	2:3	-62,04187228	/
Al-Č	1:3	29,99431142	7,443429933
Al-M	1:3	-156,555773	-75,81425508

Prosječna brzina korozije aluminija u svakom pojedinom uzorku prikazana je u tablici 6.9., a uz nju prikazana je u tablici 6.10. i prosječna brzina prodiranja korozije. Vidljivo je da je prosječna brzina korozije uglavnom smanjena kod aluminija koji se nalazi u kombinaciji sa čelikom, te je aluminij u tim situacijama uglavnom potpuno postojan i uvijek upotrebljiv. Aluminij je u kombinaciji sa čelikom u slatkoj vodi pri realnim uvjetima te u morskoj vodi postojan i obično upotrebljiv. Jedino u slatkoj vodi pri realnim uvjetima uz omjer aluminija i čelika 2:3 aluminij je dobro postojan i uglavnom upotrebljiv. Aluminij je u kombinaciji sa mjedi u omjeru pločica 1:1 u slatkoj vodi u laboratorijskim uvjetima postojan i obično uporabljiv. U svim ostalim situacijama je aluminij u kombinaciji sa mjedi smanjeno postojan i katkad uporabljiv. U slatkoj vodi u laboratorijskim uvjetima pri omjeru aluminija i mjeda 1:3 aluminij je blizu granice pri kojoj je slabo postojan i samo iznimno uporabljiv.

Obzirom da je u morskoj vodi, zemlji i slatkoj vodi prisutan određen broj mikroorganizama, ne može se isključiti mogućnost pojave biološke korozije. Biološka korozija u ovom radu nije mjerena jer za to treba posebna oprema, koja mjeri fizičke i kemijske karakteristike medija, koja nije bila na raspolaganju.

Eksperiment bi dao točnije rezultate kada bi se sa sigurnošću mogli otkloniti svi korozijski produkti sa površine metala, u tom slučaju moglo bi se precizno odrediti koliki je utjecaj pojedinog medija na gubitak materijala. Ispitivanja u realnim uvjetima pokazala su se zahtjevnim jer traže dobru pripremu mjesta za postavljanje uzoraka, te postoji rizik od nestanka pojedinih uzoraka kao na primjer ispitnog uzorka 26 u ovom eksperimentu. Ispitni uzorak 26 je vjerojatno izgubljen u bujici koja se ponekad stvori tijekom dužih kišnih razdoblja. Također jedna od mana je povezivanje pločica. Kod povezivanja gumaticom nakon nekog vremena dolazi do pucanja gumice što može imati negativan utjecaj na kompaktnost spoja i vjerodostojnost rezultata.

## 7. ZAKLJUČAK

Korozija je neizbježan proces kojem je izložen materijal u eksploataciji. Zbog troškova koje uzrokuju korozijski procesi sve više pažnje pridaje se sprečavanju pojave korozije i zaštiti materijala. Korozija se prema mehanizmu nastajanja dijeli na kemijsku i elektrokemijsku koroziju. Kemijska korozija pojavljuje se u uvjetima bez prisutnosti elektrolita, dok se elektrokemijska pojavljuje u prisutnosti elektrolita. Brzinu elektrokemijske korozije moguće je mjeriti gravimetrijskim ili elektrokemijskim ispitivanjem. Gravimetrijsko ispitivanje je dugotrajno i jednostavno, dok je elektrokemijsko ispitivanje kraćeg trajanja i za njegovo provođenje potrebna je posebna oprema. Postoji više oblika korozije, a neki najčešći oblici su: opća korozija, rupičasta korozija, napetosna korozija, selektivna korozija i galvanska korozija. Galvanska korozija se pojavljuje u slučajevima kada su u direktnom kontaktu dva ili više materijala različitih elektrodnih potencijala. Materijal koji ima niži elektrodni potencijal ponaša se kao anoda i korodira. Postoje određene metode zaštite od nastajanja galvanske korozije. Jedna od poznatijih je odabir materijala prema galvanskom nizu već u fazi konstruiranja. Uz ovu metodu koriste se još minimiziranje veličine katode, sprečavanje kontakta između metala, izolacija od elektrolita i inhibitori korozije.

U teorijskom dijelu rada provedeno je gravimetrijsko ispitivanje brzine galvanske korozije. Ispitivanje je provedeno na trideset i pet uzoraka. Od materijala su korišteni aluminij, čelik i mjed. Aluminij je u kombinaciji i sa čelikom i mjedi anoda i primarno se pratila njegova promjena mase te brzina korozije. U kombinaciji sa čelikom masa aluminijske se uglavnom povećavala, dok je u kombinaciji sa mjedi aluminij gubio masu. S obzirom na korozivnost medija utvrđeno je kako je morska voda najkorozivniji medij jer je aluminij u morskoj vodi u svim kombinacijama gubio masu. Najmanje korozivnim medijem pokazala se zemlja u realnim uvjetima. Usporedbom laboratorijskih i realnih uvjeta utvrđeno je različito ponašanje aluminijske. U laboratorijskim uvjetima, zbog konstantne temperature i vlažnosti tla, reakcije na anodi i katodi neometano se odvijaju pa aluminij gubi više mase te je brzina korozije veća. U realnim uvjetima dolazi do konstantne promjene uvjeta što rezultira manjim gubitkom mase i manjom brzinom korozije aluminijske. Razdoblja niske vlažnosti tla imaju posebno velik utjecaj na usporavanje korozije kao i dobra aeracija tla zbog koje nastaje pasivacijski sloj na površini aluminijske. Slatka voda u laboratorijskim uvjetima pokazuje veću korozivnost u odnosu na slatku vodu u realnim uvjetima. To se može objasniti na način da se u laboratorijskim uvjetima nesmetano odvijaju redoks procesi. U slatkoj vodi u realnim uvjetima (tekuća voda) dolazi do simultanog djelovanja korozije i erozije.

Erozija ima znatan utjecaj na gubitak mase aluminijske anode. Obzirom na veličinu anode, odnosno omjer površina anode i katode utvrđeno je da je brzina korozije veća što je anoda manja. Stoga, najveća brzina korozije je bila u uzorcima kod kojih se aluminij nalazio u omjeru 1:3. Samostalno postavljen aluminij je u svim medijima osim u slatkoj vodi pri realnim uvjetima dobio masu zbog stvaranja pasivacijskog sloja, dok je njegovo nastajanje u realnim uvjetima onemogućeno zbog erozije vode. Promjene mase samostalno postavljenog aluminijskog uzorka su manje nego promjene mase aluminijskog uzorka sa različitim metalima u kontaktu. Izračunom prosječne brzine prodiranja korozije utvrđeno je kako je kontakt aluminijski i mjedi opasniji od kontakta aluminijski i čelika. Pri kontaktu aluminijski i mjedi aluminij je smanjeno postojan te katkad upotrebljiv. Aluminij u kontaktu sa čelikom je u slučajevima gdje dolazi do stvaranja oksidnog sloja potpuno postojan i uvijek upotrebljiv, dok je u morskoj vodi dobro postojan i uglavnom upotrebljiv.

## POPIS LITERATURE

- [1] Cathwell AS: „What is corrosion“, s Interneta, <https://cathwell.com/what-is-corrosion> [26.8.2022.]
- [2] Pačarek, G.: „Laboratorijsko ispitivanje djelotvornosti lakohlapljivih inhibitora korozije“, s Interneta, [https://www.cortecvci.com/whats\\_new/announcements/Laboratorijsko%20ispitivanje%20djelotvornosti%20lakohlapljivih%20inhibitora%20korozije.pdf](https://www.cortecvci.com/whats_new/announcements/Laboratorijsko%20ispitivanje%20djelotvornosti%20lakohlapljivih%20inhibitora%20korozije.pdf) [26.8.2022.]
- [3] Pedferri, P.; Lazzari, L.; Pedferri, M.P.: „Corrosion Science and Engineering“, Switzerland, Springer, 2018.
- [4] Hanza, S. S.: „Zaštita materijala - materijali s predavanja“, Rijeka, Tehnički fakultet Rijeka, 2020./2021.
- [5] UNSW Sydney: „Wet and dry corrosion“, s Interneta, <https://www.unsw.edu.au/science/our-schools/materials/engage-with-us/high-school-students-and-teachers/online-tutorials/corrosion/introduction/wet-and-dry-corrosion> [30.8.2022.]
- [6] Doan, C.; Le, H.: „Gibbs (free) energy“, s Interneta, [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Thermodynamics/Energies\\_and\\_Potentials/Free\\_Energy/Gibbs\\_\(Free\)\\_Energy](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/Energies_and_Potentials/Free_Energy/Gibbs_(Free)_Energy) [30.8.2022.]
- [7] Bozeman science: „Gibbs free energy“, s Interneta, [https://www.youtube.com/watch?v=DPjMPeU5OeM&ab\\_channel=BozemanScience](https://www.youtube.com/watch?v=DPjMPeU5OeM&ab_channel=BozemanScience) [30.8.2022.]
- [8] Corrosionpedia: „Pilling-Bedworth Ratio (P-B Ratio)“, s Interneta, <https://www.corrosionpedia.com/definition/1349/pilling-bedworth-ratio-p-b-ratio> [30.8.2022.]
- [9] Ali, A.; Asghar, R.; Akhtar, M.A.: “Comparative Study on High Temperature Oxidation Behavior of AISI 304, 316 & 321 Austenitic Stainless Steels in Different Environments“, s Interneta, [https://www.researchgate.net/figure/10-Common-kinetic-laws-for-the-rate-of-growth-of-an-oxide-layer-53\\_fig8\\_275964699](https://www.researchgate.net/figure/10-Common-kinetic-laws-for-the-rate-of-growth-of-an-oxide-layer-53_fig8_275964699) [30.8.2022.]
- [10] Roberge, P.R.: “Handbook of Corrosion Engineering”, USA, McGraw-Hill, 2019.

- [11] Fontana, M.G.: „Corrosion Engineering“, Singapore, McGraw-Hill, 1987.
- [12] Urbančić, L.: „Korozijsko ponašanje pocinčane čelične žice konstrukcije gabiona“, s Interneta, <https://repository.riteh.uniri.hr/islandora/object/riteh%3A2652> [27.7.2022.]
- [13] Wikipedia: „Iron(III) oxide“, s Interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Iron\(III\)\\_oxide](https://en.wikipedia.org/wiki/Iron(III)_oxide) [26.8.2022.]
- [14] LibreTexts: „Standard Electrode Potentials“, s Interneta, [https://chem.libretexts.org/Courses/Mount\\_Royal\\_University/Chem\\_1202/Unit\\_6%3A\\_Electrochemistry/6.2%3A\\_Standard\\_Electrode\\_Potentials](https://chem.libretexts.org/Courses/Mount_Royal_University/Chem_1202/Unit_6%3A_Electrochemistry/6.2%3A_Standard_Electrode_Potentials) [26.8.2022.]
- [15] Corrosionpedia: „Electromotive Force Series (EMF Series)“, s Interneta, <https://www.corrosionpedia.com/definition/443/electromotive-force-series-emf-series> [26.8.2022.]
- [16] Swain, G.W.J.; Schultz, M.P.: „Corrosion Basics“, s Interneta, [https://www.usna.edu/NAOE/files/documents/Courses/EN380/Course\\_Notes/Corrosion%20Basics.pdf](https://www.usna.edu/NAOE/files/documents/Courses/EN380/Course_Notes/Corrosion%20Basics.pdf) [26.8.2022.]
- [17] Karaman, D.: „Ispitivanje primjenjivosti tehnika korozijskog monitoringa u različitim okolišima“, s Interneta, <https://repositorij.fkit.unizg.hr/islandora/object/fkit%3A194/datastream/PDF/view> [26.8.2022.]
- [18] H&C Weighing systems: „Mettler Toledo® - JP703C - Carat Scale“, s Interneta, <https://www.affordablescales.com/mettler-toledo/jp-c/jp703c.asp#.Yw4zYdNBxPY> [26.8.2022.]
- [19] Eurofins: „Electrochemical Analysis“, s Interneta, <https://www.eag.com/techniques/electrochemical-analysis/> [27.8.2022.]
- [20] Palajsa, D.: „Projektni zadatak zaštita materijala – Korozijsko ponašanje čelika 30CrNiMo8“, 2021.
- [21] Kanižaj, L.; Žuljević, D.: „Ispitivanje utjecaja antiseptika na korozijsku stabilnost ortodontskih žica“, s Interneta, <https://apps.unizg.hr/rektorova-nagrada/javno/stari-radovi/2781/preuzmi> [27.8.2022.]
- [22] Everypixel: „Abandoned car“, s Interneta, <https://www.everypixel.com/q/abandoned-car> [27.8.2022.]

- [23] Nepoznat autor: „Corrosion of metals“, s Interneta, <https://xapps.xyleminc.com/Crest.Grindex/help/grindex/contents/Metals.htm> [27.8.2022.]
- [24] AMPP: „Pitting Corrosion“, s Interneta, <https://www.ampp.org/resources/impact/corrosion-basics/group-1/pitting-corrosion> [21.8.2022.]
- [25] Alleima: „Pitting corrosion“, s Interneta, <https://www.alleima.com/en/technical-center/corrosion/wet-corrosion/pitting/> [21.8.2022.]
- [26] Wiley, D.: „2 Types of Corrosion that Occur in Industrial Piping Systems“, s Interneta, <https://www.nuflowmidwest.com/2-types-of-corrosion-that-occur-in-industrial-piping-systems/> [21.8.2022.]
- [27] Corrosionpedia: „Dezincification“, s Interneta, <https://www.corrosionpedia.com/definition/384/dezincification> [21.8.2022.]
- [28] Corrosion doctors: „Dezincification of a Brass Valve“, s Interneta, <https://corrosion-doctors.org/Forms-selective/dezinc-valve.htm> [21.8.2022.]
- [29] Zhou, P. i dr.: „An in situ kinetic study of brass dezincification and corrosion“, s Interneta, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013468617300786> [22.8.2022.]
- [30] PICA: „What is Graphitic Corrosion and How to Prevent Water Main Breaks“, s Interneta, <https://www.picacorp.com/Technology/Inspection-Technology/ArtMID/932/ArticleID/195/What-is-Graphitic-Corrosion-and-How-to-Prevent-Water-Main-Breaks> [22.8.2022.]
- [31] WEBCORR The Corrosion Clinic: „Different Types of Corrosion – Intergranular Corrosion“, s Interneta, [https://www.corrosionclinic.com/types\\_of\\_corrosion/intergranular\\_corrosion\\_cracking.htm](https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/intergranular_corrosion_cracking.htm) [22.8.2022.]
- [32] Corrosionpedia: „Intercrystalline Corrosion“, s Interneta, <https://www.corrosionpedia.com/definition/687/intercrystalline-corrosion> [22.8.2022.]
- [33] Wikipedia: „Intergranular corrosion“, s Interneta, [https://en.wikipedia.org/wiki/Intergranular\\_corrosion](https://en.wikipedia.org/wiki/Intergranular_corrosion) [22.8.2022.]

- [34] Dahlager, M.: „Exfoliation“, s Interneta, <https://www.ampp.org/resources/impact/corrosion-basics/group-2/exfoliation> [22.8.2022.]
- [35] Horvat, M.; Samardžić, I.; Kondić, V.: „Napetostna korozija“, s Interneta, <https://hrcak.srce.hr/file/124726> [23.8.2022.]
- [36] AZO materials: „Corrosion Fatigue - Metallic Corrosion“, s Interneta, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=103> [23.8.2022.]
- [37] Rosendo, A.: „Corrosion: Chemical oxidation“, s Interneta, <https://www.plantengineering.com/articles/corrosion-chemical-oxidation/> [23.8.2022.]
- [38] Nepoznat autor: „TITANIC-UNDERWATER-THE-TRAVEL“, s Interneta, <https://www.simplesimonandco.com/2022/05/personal-restoration-renovation-and-conservation-on-sinking-and-resurfacing.html/titanic-underwater-the-travel/> [23.8.2022.]
- [39] Reyes, J.: „Titanium Corrosion in the Oral Environment“, s Interneta, <https://emerginnova.com/titanium-corrosion-in-the-oral-environment/> [23.8.2022.]
- [40] The MULTIMEDIA CORROSION GUIDE: „Erosion and cavitation corrosion“, s Interneta, [https://www.cdcorrosion.com/mode\\_corrosion/corrosion\\_erosion\\_gb.htm](https://www.cdcorrosion.com/mode_corrosion/corrosion_erosion_gb.htm) [23.8.2022.]
- [41] Lister, D.H.: „Corrosion for Engineers“, s Interneta, <https://canteach.candu.org/Content%20Library/20053210.pdf> [24.8.2022.]
- [42] WEBCORR The Corrosion Clinic: „Different Types of Corrosion - Impingment Corrosion“, s Interneta, [https://www.corrosionclinic.com/types\\_of\\_corrosion/What-is-impingement-corrosion.htm](https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/What-is-impingement-corrosion.htm) [23.8.2022.]
- [43] Geitner, F.K. i dr.: „Cavitation Corrosion“, s Interneta, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cavitation-corrosion> [23.8.2022.]
- [44] Belzona: „Popravlak i zaštita propelera od kavitacije“, s Interneta, [https://belzona.hr/reference/galerija/img\\_3131/](https://belzona.hr/reference/galerija/img_3131/) [23.8.2022.]
- [45] Andrić, I.: „KOROZIJA I ZAŠTITA OD KOROZIJE POLJOPRIVREDNE TEHNIKE“, s Interneta, <https://zir.nsk.hr/islandora/object/pfos:982/preview> [24.8.2022.]



- [46] Corrosionpedia: „Crevice Corrosion“, s Interneta, <https://www.corrosionpedia.com/definition/347/crevice-corrosion> [24.8.2022.]
- [47] Corbett, N.: „Crevice Corrosion: What to Know and How to Stop It“, s Interneta, <http://spearindustrial.com/crevice-corrosion-what-to-know-and-how-to-stop-it/> [24.8.2022.]
- [48] WEBCORR The Corrosion Clinic: „Different Types of Corrosion – Stray Current Corrosion“, s Interneta, [https://www.corrosionclinic.com/types\\_of\\_corrosion/stray%20current%20corrosion.htm](https://www.corrosionclinic.com/types_of_corrosion/stray%20current%20corrosion.htm) [24.8.2022.]
- [49] DREYM engineering: „Causes of Stray-Current Corrosion and How To Prevent It“, s Interneta, <https://www.dreiy.com/2021/01/29/causes-of-stray-current-corrosion-and-how-to-prevent-it/> [24.8.2022.]
- [50] Ananthanarayanan, S.: „Change track to lock rust out“, s Interneta, <http://www.simplescience.in/ScienceHTML2/170125.ChangeTrackToKeepRustOut.html> [24.8.2022.]
- [51] AMPP: „Galvanic Corrosion“, s Interneta, <https://www.ampp.org/resources/impact/corrosion-basics/group-1/galvanic-corrosion> [24.8.2022.]
- [52] Nepoznat autor: „An example of galvanic corrosion, in this case a copper alloy fitting mated with a galvanized iron fitting“, s Interneta, [https://www.reddit.com/r/DIYfail/comments/422jnt/an\\_example\\_of\\_galvanic\\_corrosion\\_in\\_this\\_case\\_a/](https://www.reddit.com/r/DIYfail/comments/422jnt/an_example_of_galvanic_corrosion_in_this_case_a/) [25.8.2022.]
- [53] Wilder, R.: „Common Home Plumbing Problems: Corrosion“, s Interneta, [https://www.youtube.com/watch?v=8yv4wm4vv6M&ab\\_channel=UrbanInspection-HomeInspections](https://www.youtube.com/watch?v=8yv4wm4vv6M&ab_channel=UrbanInspection-HomeInspections) [25.8.2022.]
- [54] Nanan, K.: „5 Ways to Avoid Galvanic Corrosion“, s Interneta, <https://www.corrosionpedia.com/5-ways-to-avoid-galvanic-corrosion/2/6809> [25.8.2022.]
- [55] BAUHAUS: „Plosnati profil D x Š: 2.000 x 40 mm, Aluminij, Neobrađeno“, s Interneta, <https://www.bauhaus.hr/metalni-i-plasticni-profil/plosnati-profil/p/20200020> [28.7.2022.]

- [56] BAUHAUS: „Kantoflex Plosnati profil 1.000 x 20 mm, Debljina: 4 mm, Toplo valjani čelik“, s Interneta, <https://www.bauhaus.hr/metalni-i-plasticni-profili/kantoflex-plosnati-profil/p/10526814> [28.7.2022.]
- [57] BAUHAUS: „Stabilit Plosnati profil D x Š: 1.000 x 20 mm, Debljina: 2 mm, Mjed, Zlatne boje“, s Interneta, <https://www.bauhaus.hr/metalni-i-plasticni-profili/stabilit-plosnati-profil/p/10506102> [28.7.2022.]
- [58] VABSONIC: „Princip rada ultrazvučne kade i ultrazvučne kadice“, s Interneta, <https://vabsonic.com/product/ultrazvu-ne-kade-korisne-informacije-7/princip-rada-ultrazvu-ne-kade-i-ultrazvu-ne-kadice-42> [27.8.2022.]

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Promjena stanja metala kroz korozijski „životni“ ciklus.....	2
Slika 3.1. Mehanizam kemijske korozije [4] .....	4
Slika 3.2. Prirast mase u vremenu zbog stvaranja oksidnog sloja [4].....	7
Slika 4.1. Elektrokemijska korozija željeza u morskoj vodi [12] .....	10
Slika 4.2. Korozija željeza .....	10
Slika 4.3. Galvanski članak sa elektrodama aluminijske i platine .....	11
Slika 4.4. Pourbaixov dijagram željeza uronjenog u vodu [16].....	13
Slika 4.5. Uzroci nastajanja mikrogalvanskog članka [4].....	15
Slika 4.6. Mettler Toledo JP703C [18] .....	16
Slika 4.7. Potencijostat i petrogrlena ćelija .....	18
Slika 4.8. Krivulja potencijala otvorenog strujnog kruga [4] .....	19
Slika 4.9. Tafelova krivulja [21] .....	20
Slika 5.1. Opća korozija napuštenog automobila [22].....	22
Slika 5.2. a) Ravnomjerna korozija b) Neravnomjerna korozija [12].....	23
Slika 5.3. Mehanizmi prodiranja rupičaste korozije .....	23
Slika 5.4. Proces nastajanja rupičaste korozije [12] .....	24
Slika 5.5. Rupičasta korozija AISI 304L nehrđajućeg čelika [4] .....	25
Slika 5.6. Decinkacija mjedenog ventila [28].....	26
Slika 5.7. Usporedba decinkacije kod legure CuZn42 i legure CuZn21Si3P [29] .....	27
Slika 5.8. Grafitizacija sivog lijeva [30] .....	27
Slika 5.9. Udio kroma uz granice kristalnih zrna [12] .....	28
Slika 5.10. Interkristalna korozija [33] .....	29
Slika 5.11. Eksfolijacija aluminijske legure [4].....	29
Slika 5.12. Uvjeti nastajanja napetosne korozije .....	30
Slika 5.13. Interkristalno i transkristalno širenje pukotina [35].....	30
Slika 5.14. Napetosna korozija na savijenom dijelu cijevi [35] .....	31
Slika 5.15. Lom vratila kao posljedica korozijskog zamora [36] .....	31
Slika 5.16. Korozija čelika djelovanjem metaboličke aktivnosti SRB bakterije .....	32
Slika 5.17. Biološka korozija – Titanik [38].....	33
Slika 5.18. Korozija titanijevog zubnog implantata [39] .....	34

Slika 5.19. Erozijska korozija bakrene cijevi [40] .....	34
Slika 5.20. Udarne korozija [42].....	35
Slika 5.21. Kavitacija broskog propelera [44] .....	35
Slika 5.22. Tarna korozija [45] .....	36
Slika 5.23. Korozija u procijepu [12].....	37
Slika 5.24. Korozija u procijepu kod čeličnog stupa [47].....	37
Slika 5.25. Putanja lutajućih struja [12].....	38
Slika 5.26. Korozija lutajućih struja na tračnicama [50] .....	38
Slika 5.27. Galvanska korozija .....	39
Slika 6.1. I profil tehnički čistog aluminijsa [55].....	46
Slika 6.2. I profil toplo valjanog čelika [56].....	46
Slika 6.3. I profil „zlatne“ mjedi [57] .....	47
Slika 6.4. Kombinacija aluminijsa sa čelikom/mjedi uz omjer veličina 1:3 .....	49
Slika 6.5. Kombinacija aluminijsa sa čelikom/mjedi uz omjer veličina 2:3 .....	49
Slika 6.6. Kombinacija aluminijsa sa čelikom/mjedi uz omjer veličina 1:1 .....	49
Slika 6.7. Izrezivanje ispitnih uzoraka od aluminijsa.....	52
Slika 6.8. Izrezani ispitni uzorci .....	53
Slika 6.9. Vaganje ispitnih uzoraka - mjed .....	54
Slika 6.10. Ispitni uzorak povezan gumicom.....	56
Slika 6.11. Postavljanje ispitnog uzorka u zemlju .....	57
Slika 6.12. Ispitni uzorak u slatkoj vodi .....	58
Slika 6.13. Parafilm.....	59
Slika 6.14. Posude s ispitnim uzorcima u laboratorijskim uvjetima.....	59
Slika 6.15. Posuda sa zemljom na otvorenom .....	60
Slika 6.16. Ispitni uzorci postavljeni u šumskom potoku .....	61
Slika 6.17. Izgled posuda kod prvog pregleda.....	62
Slika 6.18. Kombinacija aluminijsa i čelika u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 15) – prvi pregled .....	62
Slika 6.19. Kombinacija aluminijsa i mjedi u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 16) – prvi pregled .....	63

Slika 6.20. Kombinacija aluminija i čelika u morskoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 17) – prvi pregled.....	63
Slika 6.21. Kombinacija aluminija i mjedi u morskoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 18) – prvi pregled.....	64
Slika 6.22. Kombinacija aluminija i mjedi u slatkoj vodi pri realnim uvjetima u omjeru 1:1 (uzorak 22) – prvi pregled.....	64
Slika 6.23. Kombinacija aluminija i čelika u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 15) – drugi pregled.....	65
Slika 6.24. Kombinacija aluminija i mjedi u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 16) – drugi pregled.....	66
Slika 6.25. Kombinacija aluminija i čelika u slatkoj vodi u omjeru 1:3 (uzorak 15) – treći pregled .....	66
Slika 6.26. Ispitni uzorci izvađeni iz šumskog potoka.....	67
Slika 6.27. Razdvojena kombinacija aluminija i mjedi u morskoj vodi u omjeru 2:3 (uzorak 12) .....	67
Slika 6.28. Čišćenje ispitnih uzoraka (uzorak 12) .....	68
Slika 6.29. Ultrazvučna kada ASonic .....	69
Slika 6.30. Ultrazvučno čišćenje uzoraka .....	69
Slika 6.31. Sušenje ispitnih uzoraka .....	70
Slika 6.32. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 1 (zemlja), 3 (slatka voda), 5 (morska voda), 19 (zemlja (R)) i 21 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 1:1 ....	75
Slika 6.33. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 1 (zemlja), 3 (slatka voda), 5 (morska voda), 19 (zemlja (R)) i 21 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 1:1 ....	75
Slika 6.34. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 2 (zemlja), 4 (slatka voda), 6 (morska voda), 20 (zemlja (R)) i 22 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i mjedi 1:1 ....	76
Slika 6.35. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 2 (zemlja), 4 (slatka voda), 6 (morska voda), 20 (zemlja (R)) i 22 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i mjedi 1:1 ....	76
Slika 6.36. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 7 (zemlja), 9 (slatka voda), 11 (morska voda), 23 (zemlja (R)) i 25 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 2:3....	77
Slika 6.37. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 7 (zemlja), 9 (slatka voda), 11 (morska voda), 23 (zemlja (R)) i 25 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminija i čelika 2:3....	77

Slika 6.38. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 8 (zemlja), 10 (slatka voda), 12 (morska voda) i 24 (zemlja (R)). Omjer površina aluminijske i mjedi 2:3 .....	78
Slika 6.39. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 8 (zemlja), 10 (slatka voda), 12 (morska voda) i 24 (zemlja (R)). Omjer površina aluminijske i mjedi 2:3 .....	78
Slika 6.40. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 13 (zemlja), 15 (slatka voda), 17 (morska voda), 27 (zemlja (R)) i 29 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminijske i čelika 1:3....	79
Slika 6.41. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 13 (zemlja), 15 (slatka voda), 17 (morska voda), 27 (zemlja (R)) i 29 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminijske i čelika 1:3....	79
Slika 6.42. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 14 (zemlja), 16 (slatka voda), 18 (morska voda), 28 (zemlja (R)) i 30 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminijske i mjedi 1:3 ....	80
Slika 6.43. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 14 (zemlja), 16 (slatka voda), 18 (morska voda), 28 (zemlja (R)) i 30 (slatka voda (R)). Omjer površina aluminijske i mjedi 1:3 ....	80
Slika 6.44. Promjena mase uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 31 (zemlja), 32 (slatka voda), 33 (morska voda), 34 (zemlja (R)) i 35 (slatka voda (R)). Aluminij bez kontakta sa drugim metalom. ....	81
Slika 6.45. Izgled ispitnih uzoraka u ovisnosti o vrsti medija: 31 (zemlja), 32 (slatka voda), 33 (morska voda), 34 (zemlja (R)) i 35 (slatka voda (R)). Aluminij bez kontakta sa drugim metalom. ....	81
Slika 6.46. Promjena mase aluminijske ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 1 (omjer 1:1), 7 (omjer 2:3) i 13 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 19 (omjer 1:1), 23 (omjer 2:3) i 27 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u zemlji. ....	82
Slika 6.47. Promjena mase čelika ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 1 (omjer 1:1), 7 (omjer 2:3) i 13 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 19 (omjer 1:1), 23 (omjer 2:3) i 27 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u zemlji. ....	83
Slika 6.48. Promjena mase aluminijske ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 2 (omjer 1:1), 8 (omjer 2:3) i 14 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 20 (omjer 1:1), 24 (omjer 2:3) i 28 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u zemlji. ....	84
Slika 6.49. Promjena mase mjedi ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 2 (omjer 1:1), 8 (omjer 2:3) i 14 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 20 (omjer 1:1), 24 (omjer 2:3) i 28 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u zemlji. ....	84

Slika 6.50. Promjena mase aluminija ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 3 (omjer 1:1), 9 (omjer 2:3) i 15 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 21 (omjer 1:1), 25 (omjer 2:3) i 29 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u slatkoj vodi. ....	85
Slika 6.51. Promjena mase čelika ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 3 (omjer 1:1), 9 (omjer 2:3) i 15 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 21 (omjer 1:1), 25 (omjer 2:3) i 29 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u slatkoj vodi. ....	85
Slika 6.52. Promjena mase aluminija ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 4 (omjer 1:1), 10 (omjer 2:3) i 16 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 22 (omjer 1:1), 26 (omjer 2:3) i 30 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u slatkoj vodi. ....	86
Slika 6.53. Promjena mase mjedi ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 4 (omjer 1:1), 10 (omjer 2:3) i 16 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima te uzorcima: 22 (omjer 1:1), 26 (omjer 2:3) i 30 (omjer 1:3) u realnim uvjetima. Uzorci su postavljeni u slatkoj vodi. ....	86
Slika 6.54. Promjena mase aluminija ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 5 (omjer 1:1), 11 (omjer 2:3) i 17 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima. Uzorci su postavljeni u morskoj vodi. ....	87
Slika 6.55. Promjena mase čelika ovisno o omjeru Al:Č u uzorcima: 5 (omjer 1:1), 11 (omjer 2:3) i 17 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima. Uzorci su postavljeni u morskoj vodi. ....	87
Slika 6.56. Promjena mase aluminija ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 6 (omjer 1:1), 12 (omjer 2:3) i 18 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima. Uzorci su postavljeni u morskoj vodi. ....	88
Slika 6.57. Promjena mase mjedi ovisno o omjeru Al:M u uzorcima: 6 (omjer 1:1), 12 (omjer 2:3) i 18 (omjer 1:3) u laboratorijskim uvjetima. Uzorci su postavljeni u morskoj vodi. ....	88
Slika 6.58. Razlika u boji ispitnih uzoraka prije i poslije eksperimenta.....	92

## POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Galvanski niz .....	12
Tablica 4.2. Klasifikacija materijala prema prosječnoj brzini korozije .....	17
Tablica 6.1. Elektrodni potencijali odabranih materijala.....	45
Tablica 6.2. Potreban broj ispitnih uzoraka čelika.....	50
Tablica 6.3. Potreban broj ispitnih uzoraka mjedi .....	50
Tablica 6.4. Potreban broj ispitnih uzoraka aluminiija .....	50
Tablica 6.5. Konačan plan provedbe eksperimenta za svaki uzorak .....	51
Tablica 6.6. Podaci dobiveni prvim vaganjem ispitnih uzoraka.....	55
Tablica 6.7. Mase uzoraka na početku i na kraju eksperimenta .....	73
Tablica 6.8. Postotak promjene mase aluminiija, čelika i mjedi.....	74
Tablica 6.9. Prosječna brzina korozije aluminiija.....	89
Tablica 6.10. Prosječna brzina prodiranja korozije .....	91
Tablica 6.11. Usporedba promjene mase aluminiija u laboratorijskim i realnim uvjetima u zemlji .....	95
Tablica 6.12. Usporedba promjene mase aluminiija u laboratorijskim i realnim uvjetima u slatkoj vodi .....	96



## SAŽETAK

Korozija je sveprisutna pojava kod metalnih materijala u eksploataciji. Njeni mehanizmi ovise o uvjetima u kojima se nalazi a prvenstveno o prisutnosti ili odsutnosti elektrolita. Postoji više oblika korozije koji svaki na svoj način utječu na razaranje metala. Jedan od tih oblika je i galvanska korozija. U svrhu utvrđivanja pojavnosti i utjecaja galvanske korozije na metal provedeno je gravimetrijsko ispitivanje čiji rezultati su analizirani iz perspektive utjecaja veličine anode, utjecaja elektrolita i utjecaj kombinacije odabranih metala (aluminij, čelik, mjed) na koroziju. Provedenim ispitivanjem utvrđeno je da brzina korozije aluminijske površine raste sa smanjenjem površine aluminijske površine. Ispitivanje je provedeno u različitim elektrolitima (medijima), a to su zemlja, slatka voda i morska voda. Dio uzoraka postavljen je u elektrolit u laboratorijskim uvjetima, a dio u realnim uvjetima. Ispitni uzorci u laboratorijskim uvjetima pokazuju veću brzinu korozije nego oni u realnim uvjetima. Kombinacija metala također ima znatan utjecaj na brzinu korozije. Ispitni uzorci s kombinacijom aluminijske i mjedi, zbog veće razlike elektrodnog potencijala, znatno brže korodiraju nego uzorci s kombinacijom aluminijske i čelika.

**KLJUČNE RIJEČI:** Korozija, galvanska korozija, aluminij, čelik, mjed, gravimetrijsko ispitivanje, promjena mase, brzina korozije

## **SUMMARY**

Corrosion is a ubiquitous phenomenon of metal materials in exploitation. Its mechanisms depend on the conditions in which it is located, primarily on the presence or absence of electrolytes. There are several forms of corrosion, each of which affects the destruction of metals in its own way. One of these forms is galvanic corrosion. In order to determine the incidence and impact of galvanic corrosion on metal, a gravimetric test was conducted, the results of which were analyzed from the perspective of the influence of the size of the anode, the influence of the electrolyte, and the influence of the combination of selected metals (aluminum, steel, brass) on corrosion. The conducted testing found that the corrosion rate of aluminum increases with the reduction of the aluminum surface area. The test was carried out in different electrolytes (media), namely soil, fresh water and sea water. Part of the samples was placed in the electrolyte under laboratory conditions, and part under real conditions. Test samples in laboratory conditions show a higher rate of corrosion than those in real conditions. The combination of metals also has a significant effect on the rate of corrosion. Test samples with a combination of aluminum and brass corrode significantly faster than samples with a combination of aluminum and steel, due to the greater difference in electrode potential.

**KEYWORDS:** Corrosion, galvanic corrosion, aluminum, steel, brass, gravimetric testing, mass change, corrosion rate