

# Najnovija saznanja o prediktivnom korozivskom održavanju

---

Miletić, Ena

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:403832>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-10**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE**  
**SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ**

Ena Miletić

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, rujan 2023.**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE  
POVJERENSTVO ZA ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja Ena Miletić

Predala je izrađen završni rad dana: 14. rujna 2023.

Povjerenstvo u sastavu:

prof. dr. sc. Sanja Martinez, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Jozefina Katić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

dr. sc. Lidija Furač, viša predavačica, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

izv. prof. dr. sc. Igor Dejanović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 19. rujna 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE**  
**SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ**

Ena Miletić

**NAJNOVIJA SAZNANJA O PREDIKTIVNOM KOROZIJSKOM**  
**ODRŽAVANJU**

**ZAVRŠNI RAD**

Mentor: prof. dr. sc. Sanja Martinez

Članovi ispitnog povjerenstva:

1. prof. dr. sc. Sanja Martinez
2. doc. dr. sc. Jozefina Katić
3. dr. sc. Lidija Furač

Zagreb, rujan 2023.

## SAŽETAK

Metali se koriste u razne svrhe poput izrade građevinskih objekta, cjevovoda, prijevoznih sredstva, elektroničke opreme i slično. Metali u rudama se nalaze u stabilnom stanju no prilikom obrade metali prelaze u metastabilno stanje. U tom metastabilnom stanju je podložan kemijskoj reakciji s okolinom koja se zove korozija te takva reakcija rezultira u gubitku mase metalnog materijala i potencijalnoj šteti. Svake godine raste potreba za proizvodnjom zamjenskih metalnih dijelova samo zbog djelovanja korozije, što je jako opterećujući trošak današnje ekonomije. Iz tog razloga, sve više se počelo ulagati u istraživanja za primjenu prediktivnog korozijskog održavanja. Prediktivno korozijsko održavanje je tehnika koja omogućuje predviđanje nastanka korozije na metalnoj površini primjenom simulacija realnih uvjeta korozijskog sustava. Prediktivno korozijsko održavanje uključuje tehnike zaštite metala i legura te tehnike praćenja samog korozijskog sustava. Kako bi se mogao predložiti sustav zaštite metala od korozije, potrebno je primijeniti saznanja iz područja elektrokemije, metalurgije i fizike.

U okviru ovog završnog rada je predstavljen kratki pregled oblika korozije te najpoznatije tehnike zaštite. Zatim slijedi literatura koja navodi najnovija saznanja prediktivnog korozijskog održavanja i prijedlog sustava zaštite pomorskih brodova integracijom umjetne inteligencije u sustav.

Ključne riječi: korozija, prediktivno održavanje, zaštita, najnovija saznanja

## ABSTRACT

Metals are used for various purposes such as materials in construction, pipelines, transportation vehicles, electrical equipment and more. Metals in nature (ores) are found to be in a stable state, but during processing they transition into a metastable state. In the metastable state, they are susceptible to a chemical reaction with the environment called corrosion, that results in the mass loss of the metal material and potential damage. Each year, the need for producing replacement metal parts due to corrosion-related effects is growing, posing a significant burden on today's economy.

As a result, increasing investments have been made for the research and application of predictive corrosion maintenance. Predictive corrosion maintenance is a technique that allows the prediction of corrosion occurrence on metal surfaces by simulating real corrosion system conditions. It involves protective techniques for metals and alloys, as well as monitoring techniques for the corrosion system itself. To propose a corrosion protection system for metals, knowledge from fields such as electrochemistry, metallurgy and physics must be applied.

This study provides a brief overview of corrosion types and well-known protection techniques. It also reviews the literature on the latest advancements in predictive corrosion maintenance and suggests a protection system for maritime vessels by integrating artificial intelligence into the system.

Key words: corrosion, predictive maintenance, protection, state of the art

## SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b> .....	5
1. UVOD .....	1
2. OPĆI DIO.....	2
2.1. OBLICI KOROZIJE.....	2
2.1.1. Jednolika korozija .....	2
2.1.2. Lokalizirana korozija .....	2
2.1.3. Galvanska korozija.....	3
2.1.4. Pukotinska korozija.....	4
2.1.5. Jamičasta korozija.....	5
2.1.6. Intergranularna korozija .....	7
2.1.7. Selektivno otapanje .....	7
2.1.8. Erozijska korozija .....	8
2.1.9. Korozijsko raspucavanje uz naprezanje i korozijski zamor .....	8
2.1.10. Mikrobiološki uzrokovana korozija .....	9
2.2. TEHNIKE ZAŠTITE OD KOROZIJE.....	10
2.2.1. Katodna zaštita.....	10
2.2.2. Anodna zaštita.....	11
2.2.3. Korozijski inhibitori.....	11
2.2.4. Prevlake i premazi.....	13
2.2.4.1. Metalne prevlake .....	13
2.2.4.2. Anorganski premazi.....	14
2.2.4.3. Organski premazi .....	14
3. PREGLEDNI DIO.....	16
3.1. Praćenje i održavanje metalnih struktura.....	16
3.2. Prediktivno korozijsko održavanje .....	16
3.3. NAJNOVIJA RIJEŠENJA ZA PRAĆENJE KOROZIJE.....	17

3.3.1.	Pametni kupon baziran na olovnom cirkonatu titanatu (PZT) za zaštitu od korozije uz pomoć elektromehaničke impedancije (EMI) .....	17
3.3.2.	Model baziran na informacijskom prikupljanju (BIM) za predviđanje korozije ispod izolacije .....	21
3.3.3.	Sustav prediktivnog korozijskog održavanja pomorskih brodova.....	23
4.	ZAKLJUČAK .....	25
5.	POPIS SIMBOLA .....	26
6.	LITERATURA .....	28



## 1. UVOD

Korozija je rezultat međudjelovanja metalnog materijala sa svojom okolinom uslijed kemijske ili elektrokemijske reakcije. Korozijsko djelovanje na materijal mijenja uporabna svojstva materijala, odnosno kad metal korodira, on može postati neupotrebljiv. Elektrokemijska korozija nastaje kao rezultat reakcije između metalne površine i medija koji provodi ione. Do takve korozije može doći ako metal dođe u kontakt s elektrolitom u kojem je moguć prijenos električnog naboja. Najčešće se javlja u vodenim sredinama kao što su prirodne vode, atmosferska vlaga i kiša, te naprave koje prenose fluide kao što su bojleri, cjevovodi, brodovi i tako dalje. Korozija je također moguća u suhim uvjetima, odnosno na visokim temperaturama u plinovitim sredinama, rastaljenim solima, ili tekućim metalima. Reakcije suhe korozije su izravne kemijske reakcije između metala i medija. Može doći do poremećaja rada pokretnih dijelova strojeva i opreme uslijed stvaranja krutih produkata. Korozija svojim djelovanjem skraćuje životni vijek metalnih konstrukcija, transportnih sustava te građevinskih objekata i posljedica korozije mogu biti nezgode koje ugrožavaju ljudski život. Korozija može kontaminirati i obradne medije ili hranu. Korozija rezultira značajnim gubicima materijala svake godine. Procjenjuje se da se oko 10% svjetske proizvodnje čelika, što iznosi otprilike  $5 \cdot 10^7$  tona godišnje, koristi za zamjenu korodiranih čeličnih objekata. Ova velika količina zamjenskog materijala pokazuje koliko korozija može biti štetna i ekonomski opterećujuća. <sup>[1]</sup>

## 2. OPĆI DIO

### 2.1. OBLICI KOROZIJE

#### 2.1.1. Jednolika korozija

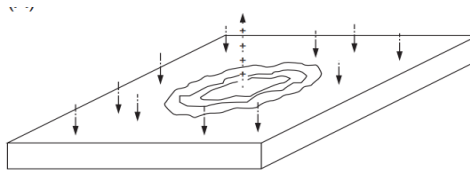
Jednolika korozija ili opća korozija je oblik korozije koji se širi po površini materijala jednoliko, odnosno katodna i anodna reakcija su podjednako raspoređene po površini metala (slika 2.1). Jednolika korozija je najčešći oblik korozije i rezultira najvećim gubitkom materijala. Zbog svog jednolikog karaktera i obično dobro odredivu brzinu, može se predvidjeti životni vijek materijala s razumnim granicama točnosti. <sup>[1]</sup>



Slika 2.1. Prikaz jednolike korozije na sidru izložen morskoj vodi <sup>[2]</sup>

#### 2.1.2. Lokalizirana korozija

Lokalizirana korozija je oblik korozije koja se odvija na fiksiranim anodnim mjestima na površini metala gdje dominira reakcija oksidacije te se oko anodnog mjesta nalazi katodna zona gdje se odvija reakcija redukcije prikazano na slici 2.2. Lokaliziranu koroziju za razliku od jednolike korozije, je puno teže predvidjeti i kontrolirati pri čemu može doći do velikih materijalnih šteta. <sup>[1]</sup>



Slika 2 2. Shematski prikaz lokalizirane korozije <sup>[1]</sup>

### 2.1.3. Galvanska korozija

Galvanska korozija nastaje kad se dva različita metala dovedu u električni kontakt u otopini elektrolita. Kad nastane galvanski par, metal koji predstavlja anodu (manje plemeniti metal) je pod jačim napadom korozije nego kad nije spojen u galvanski članak, dok metal koji predstavlja katodu (plemenitiji metal) korodira značajno sporije nego kad nije spojen na članak. Takav oblik korozije se može nazvati i bimetalnom (kontaktnom) korozijom te je prikazan na slici 2.3.



**Slika 2.3.** Prikaz galvanske korozije na čeličnom limu izazvan velikom katodnom području (admiralne brončane cijevi) i anodnog područja (ugljični čelik s epoxy prevlakom); sivo područje predstavlja neuspjeli epoksidni premaz, a narančasto područje predstavlja korodirani sloj lima <sup>[2]</sup>

Metal koji je u kontaktu s plemenitijim metalom postaje anodno polariziran. Na anodi se odvija reakcija oksidacije prema reakciji (1):



Plemenitiji metal je katodno polariziran te u aeriranoj, neutralnoj i lužnatoj otopini dolazi do reakcije redukcije kisika i vode prema reakciji (2):



U slučaju nedostatka kisika odnosno u kiseloj otopini, dolazi do redukcije vodika prema reakciji (3):



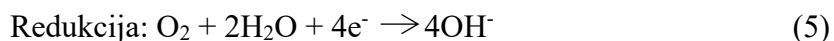
Galvanska korozija je česta pojava i javlja se na neočekivanim mjestima. Razlika potencijala polučlanaka je pokretačka sila galvanske korozije. Za plemeniti metal s negativnim elektrodnim potencijalom dolazi do porasta vrijednosti potencijala što dovodi do veće brzine korozije metala. Za manje plemeniti metal koji je u aktivnom stanju, dolazi do smanjenja elektrodnog potencijala.

Pojava galvanske korozije ovisi o mnogim čimbenicima kao što su površina i električna vodljivost otopine elektrolita. Površinski čimbenik galvanske korozije predstavlja omjer površina plemenitog i aktivnog metala. Ako je površina aktivnog metala mala, dolazi do povećanja potencijala uzrokovanog prisutnošću velike plemenite površine te rezultira visokom gustoćom struje anodne reakcije i posljedično, visokom stopom korozije. Stoga se preporučuje da omjer površina plemenitog i aktivnog metala budu jednake ili da aktivni metal ima veću površinu od plemenitog metala. <sup>[1]</sup>

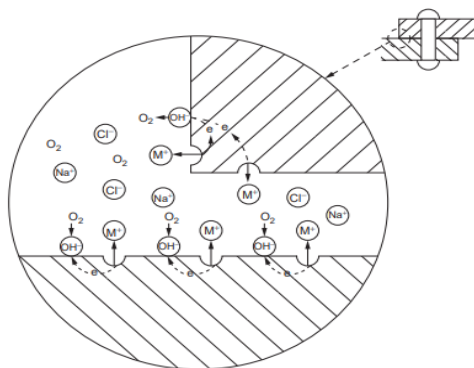
#### 2.1.4. Pukotinska korozija

Pukotinska korozija je vrsta korozije koja je česta pojava kod aktivno-pasivnih metala. Pukotinska korozija se javlja na mjestima gdje se male količine elektrolita zadržavaju, poput zavara, vijaka, prirubnica i matica,. Prisutnost kloridnih iona pogoduje razvoju pukotinske korozije, uz uvjet da pukotina mora biti dovoljno široka kako bi omogućila ulazak vlage, ali dovoljno uska da zadrži vlažni medij. Mehanizam pukotinske korozije opisano je na sljedeći način:

U slučaju prisutnosti dviju metalnih površina (M) koje su spojene zakovicama i nalaze se u aeriranoj morskoj vodi (pH = 7). Ukupna reakcija (4 i 5) uključuje otapanje metala (M) i redukciju kisika u hidroksidne ione:

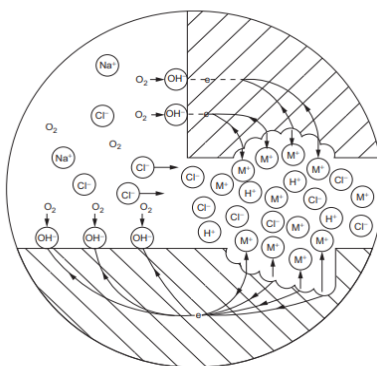
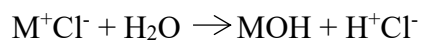


Ove reakcije oksidacije i redukcije se odvijaju preko cijele površine metala i unutar pukotine. Nakon nekog vremena kisik unutar zazora se potroši u malom volumenu elektrolita, dok otapanje metala se nastavlja unutar zazora kao što je prikazano na slici 2.4.



Slika 2.4. Pukotinska korozija na početku <sup>[1]</sup>

Nastavak otapanja metala unutar pukotine rezultira povećanjem koncentracije metalnih kationa što privlači agresivne kloridne ione iz otopine te je ovaj proces prikazan na slici 2.5. Zbog velikih koncentracija metalnih kationa i kloridnih aniona dolazi do reakcije gdje se razvija netopljivi metalni hidroksid i klorovodična kiselina:



Slika 2.5. Pukotinska korozija nakon nekog vremena <sup>[1]</sup>

Rezultat reakcije je smanjenje pH (razvijanje jake kiseline) što povećava samu brzinu otapanja metala. Pukotinska korozija je evidentno autokatalitički proces jer odvijanje reakcije stvara još povoljnije uvjete za njegov nastavak. <sup>[3]</sup>

### 2.1.5. Jamičasta korozija

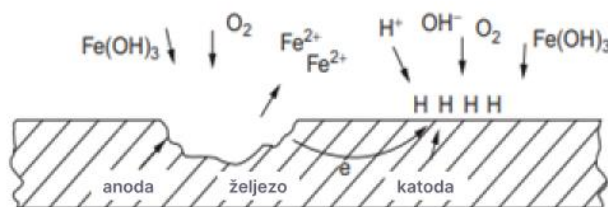
Jamičasta korozija je oblik korozije čije djelovanje rezultira u pojavi rupa u metalu koje je teško uočiti zbog prekrivenosti korozijskim produktima i zbog malih promjera. Na slici 2.6. prikazana je jamičasta korozija na ugljičnom čeliku izmjenjivača topline. <sup>[3]</sup>



**Slika 2.6.** Jamičasta korozija (eng. *pitting*) na ugljičnom čeliku izmjenjivača topline <sup>[1]</sup>

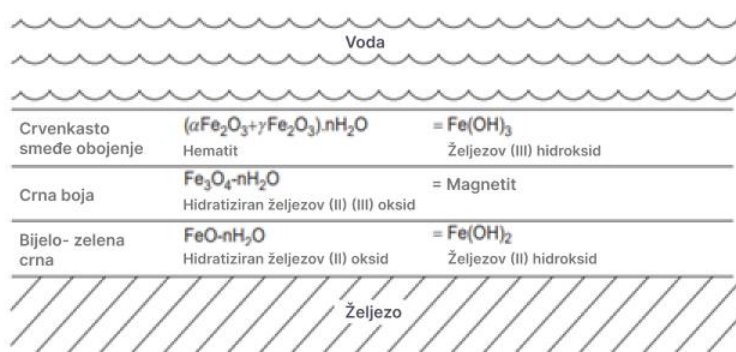
Postoje dvije vrste jamičaste korozije, jamičasta korozija uzrokovana halogenim ionima (najčešće kloridni ioni) i korozija površine ugljičnog čelika uzrokovana djelovanjem kisika. Jamičasta korozija izazvana kloridnim ionima je također autokatalitički proces koji je sličan pukotinskoj koroziji (2.1.4.). Prisutnost otopine koja sadrži kloridne ione ima veliki utjecaj na stvaranje jamičaste korozije. Primjer takve otopine je morska voda, koja se često koristi kao rashladni medij te može uzrokovati značajnu štetu. Nehrđajući čelici i drugi pasivni metali (nikal, titan, aluminij) su posebice osjetljivi na jamičastu koroziju zbog pristunosti kloridnih iona. Kloridni ioni prodiru u pasivni sloj metala i sprječava njegovo obnavljanje pri čemu se lokalno aktivira metal. Rezultat djelovanja je stvaranje galvanskog članka s velikom katodnom površinom i malom anodnom površinom.

Mehanizam napada kisika na ugljični čelik je uzrokovan malim lokalnim razlikama u strukturi čelične površine koje mogu nastati zbog razlika u sadržaju ugljika, toplinskih i mehaničkih promjena. Takve promjene mogu uzrokovati formiranje malih anodnih i katodnih mjesta za odvijanje jednolike korozije.



**Slika 2.7.** Mehanizam napada kisika na ugljični čelik <sup>[1]</sup>

Mehanizam je opisan reakcijama oksidacije čelika na anodi, a na katodi dolazi do redukcije vodika i kisika te depolarizacije vodika i kisika u vodu prikazano na slici 2.7. Prilikom stvaranja hidroksida redukcijom kisika, stvara se željezov hidroksid te daljnjom oksidacijom može doći do stvaranja željezovog (III) oksida. Na površini čelika formira se sloj hrđe koji je sastavljen od slabo topljivih spojeva željeza koji smanjuju difuziju kisika na površinu kao što je prikazano na slici 2.8. [3] Ispod opisanog sloja hrđe dolazi do pojave nove korozije koja se stvara zbog razvoja lokalnih koncentracijskih članaka te one predstavljaju lokalne anode na kojima će se odvijati reakcija oksidacije. Rezultat tog procesa je stvaranje nakupina hrđe ispod kojih se javlja rupičasta korozija.



Slika 2.8. Prikaz sastava nakupina hrđe na ugljičnom čeliku u aeriranoj vodi [1]

#### 2.1.6. Intergranularna korozija

Intergranularna korozija je oblik korozije koji se javlja uslijed reaktivnosti malih područja na granicama zrna metala. Ovaj oblik korozije može dovesti do smanjenja čvrstoće metalnih konstrukcija zbog otapanja kristalnih zrna (granice zrna predstavljaju anodno područje). [1]

#### 2.1.7. Selektivno otapanje

Selektivno otapanje je otapanje elektrokemijski aktivnije komponente u leguri uslijed djelovanja korozije. Najpoznatiji primjeri selektivnog otapanja su decinkacija i grafitna korozija. Decinkacija se odvija najčešće na legurama bakra i cinka te se može odvijati jednoliko i lokalizirano ovisno o mediju u kojem se legura nalazi. Decinkacija uzrokuje otapanje cinka, a zatim dolazi do stvaranja poroznog sloja bakra i bakrenog oksida. Grafitna korozija se javlja uslijed otapanja lijevanog željeza zbog djelovanja grafita koji predstavlja katodu, što rezultira smanjenjem čvrstoće i tvrdoće lijevanog željeza. [1]

### 2.1.8. Erozijska korozija

Erozijska korozija sastoji se od procesa smanjenja kvalitete metalnih materijala u protočnim sustavima. Poremećaji uslijed kojih dolazi do erozijske korozije mogu biti rezultat utjecaja abrazivskih smjesa ili toka fluida. U slučaju velikih turbulencija na određenom mjestu, metal se uklanja s površine u obliku otopljenih iona ili produkta korozije. Erozijska korozija se ubrzava u slučaju višefaznih sustava (čvrste čestice, mjehurići, ulje) što dovodi do oštećenja metala i/ili oksidnog sloja. Na slici 2.9. prikazan je primjer erozijske korozije izazvan utjecajem protoka. [1]



**Slika 2.9.** Primjer erozijske korozije unutar cijevi izrađene od ugljičnog čelika za skladištenje ukapljenog naftnog plina (uočava se karakteristična hrapava površina s nejednolikom debljinom) [2]

### 2.1.9. Korozijsko raspucavanje uz naprezanje i korozijski zamor

Korozijsko raspucavanje uz naprezanje (SCC, *eng. Stress corrosion cracking*) i korozijski zamor su oblici korozije koji nastaju djelovanjem metala s korozivnim okolišem i mehaničkog naprezanje. Korozijsko raspucavanje nastaje uslijed djelovanja konstantnog naprezanja na površini te može biti intergranularno i transgranularno. Na slici 2.10. prikazano je korozijsko raspucavanje cijevi od nehrđajućeg čelika. [1]





**Slika 2.10.** SCC korozija cijevi izrađene od nehrđajućeg čelika (SS 316) izložen atmosferi koji sadrži plinovitu klorovodičnu kiselinu <sup>[2]</sup>

Korozijsko raspucavanje je najčešće kod legura bakra i to u okolišu amonijevih para i pod utjecajem kloridnih otopina na nehrđajući čelik. Glavni mehanizam je propagacija napreznaja što slabi veze među molekulama. Shodno tome, dolazi do pucanja zaštitnog filma što omogućuje stvaranje anodnog područja koji se jako velikom brzinom otapa, a pasivni metal djeluje kao katoda. Korozijski zamor uključuje cikličko mehaničko naprezanje i koroziju pri čemu dolazi do pucanja materijala. Uslijed pucanja materijala, površina se dijeli na dva dijela te je najčešće jedan dio karakteriziran hrapavom površinom, a drugi dio je glatka površina s korozijskim produktima. Za razliku od korozijskog raspucavanja uz naprezanje, ne dolazi do grananja loma. <sup>[1]</sup>

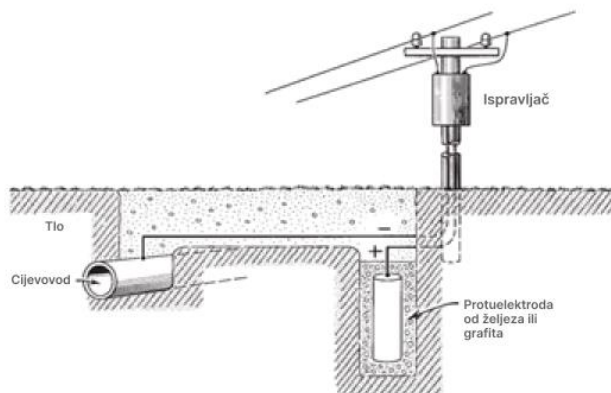
#### 2.1.10. Mikrobiološki uzrokovana korozija

Mikrobiološki uzrokovana korozija je potaknuta mikroorganizmima koji se nalaze svugdje u okolišu. U anaerobnim uvjetima, korozija je najčešće uzrokovana sulfat reducirajućim bakterijama. Mehanizam se sastoji od reakcije vodikovog sulfida na čeliku. Većina metala i legura su osjetljivi na ovaj tip korozije te bi se za sva metalna postrojenja koja su zakopana ili uronjena u muljevito tlo se mogla očekivati mikrobiološka korozija. <sup>[3]</sup>

## 2.2.TEHNIKE ZAŠTITE OD KOROZIJE

### 2.2.1. Katodna zaštita

Katodna zaštita je tehnika zaštite od korozije koja uvelike pridonosi kvalitetnoj i učinkovitoj zaštiti materijala. Zasniva se na polarizaciji konstrukcije u područje zaštitinog potencijala. Postoje dvije vrste katodne zaštite: katodna zaštita s vanjskim izvorom (ICCP, eng. *Impressed current cathodic protection*) i katodna zaštita sa žrtvenom anodom (SACP, eng. *Sacrificial anode cathodic protection*). Katodna zaštita s vanjskim izvorom zahtjeva vanjski izvor struje, transformator, elektrolit i protuelektrodu koja služi kao anoda te je najčešće sačinjena od grafita ili željeza. Izvor istosmjerne struje (DC, eng. *Direct current*) je povezana na pozitivni pol na protuelektrodu, a negativni pol je povezan na materijal kojeg želimo zaštititi. Na slici 2.11. je prikazan zakopani cjevovod s katodnom zaštitom. Katodnom polarizacijom (odnosno smanjenjem potencijala na negativniji od ravnotežnog potencijala) materijala smanjuje se brzina anodne reakcije otapanja metala.



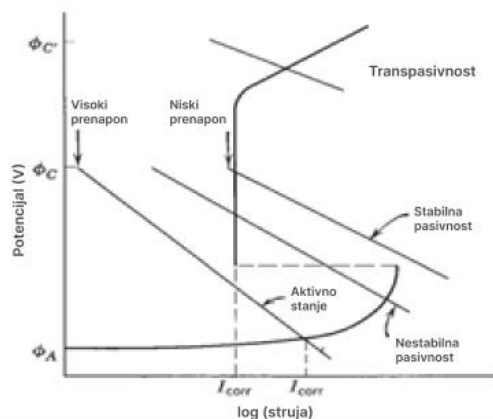
**Slika 2.11.** Prikaz katodno zaštićene cijevi s protuelektrodom (anodom) i ispravljačem (izvor struje) <sup>[4]</sup>

Druga metoda je zaštita s žrtvovanom anodom s ciljem održavanja mješovitog potencijala negativnijim od ravnotežnog potencijala materijala kojeg želimo zaštititi. Žrtvovane anode su najčešće legure na bazi magnezija, aluminija i cinka. Takve anode su reaktivnije od katode te služe kao donori elektrona koji putuju prema katodi i štite konstrukciju potičući odvijanje katodne reakcije dok anoda korodira uslijed gubitka elektrona. Ova metoda ne zahtjeva vanjski izvor struje. Metoda se koristi najčešće za održavanje zakopanih čeličnih cijevi. Također, aluminijske anode

koriste se kao zaštita trupa brodova. Cink se može koristiti kao premaz tako da se nanosi elektrodepozicijom ili vrućim umakanjem prilikom čega cinkov sloj ima galvansko djelovanje poput žrtvovane anode. [1,4]

### 2.2.2. Anodna zaštita

Pojedini metali, poput željeza i nehrđajućeg čelika, mogu biti zaštićeni tako što se anodno polariziraju. Na taj način materijal prelazi u pasivno područje anodne polarizacijske krivulje dok uz pomoć potenciostata se održava potencijal pasivnog područja. Polarizacijski dijagram na slici 2.12. prikazuje ovisnost potencijala o logaritmu struje te se iz dijagrama može identificirati dio grafa u kojem se metal nalazi u pasivnom stanju. Kod anodne zaštite struja teče u suprotnom smjeru nego kod katodne zaštite. Također, anodna zaštita je primjenjiva samo za metale koji se mogu pasivirati kad su anodno polarizirani kao na primjer ugljični čelik u koncentriranoj sulfatnoj kiselini. [1,4]

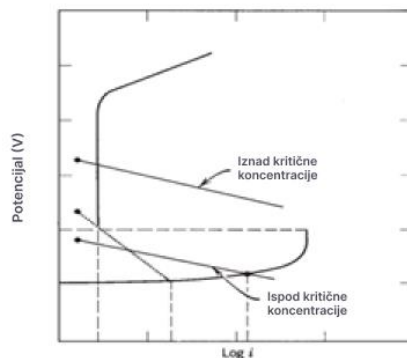


**Slika 2.12.** Polarizacijski dijagram (ovisnost potencijala o logaritmu struje) [4]

### 2.2.3. Korozijski inhibitori

Inhibitori su tvari koje utječu na brzinu korozivne reakcije tako da ju usporavaju (inhibiraju). Mogućnost inhibitora da djeluju na brzinu reakcije uvelike doprinosi zaštiti metala od korozije. Postoji nekoliko razreda inhibitora, a to su: pasivatori, organski inhibitori i inhibitori u parnoj fazi. Pasivatori su uglavnom anorganski oksidirajući agensi koji pasiviraju metal odnosno stvaraju tanki film oksida koji štiti od daljnjeg širenja korozije. Ioni koji imaju sposobnost oksidacije metala i koji se pritom lako reduciraju, mogu imati primjenu kao pasivator. Za

učinkovitu inhibiciju koncentracija pasivatora treba imati veću vrijednost od kritične. Na slici 2.13. prikazana je polarizacijska krivulja metala, pri čemu iscrtkana linija predstavlja kritični potencijal iz čega se može zaključiti da se, ako je koncentracija pasivatora preniska, oni se ponašaju kao aktivni depolarizatori. Posljedično, dolazi do lokalizirane korozije jer se pri nižoj koncentraciji, katodna polarizacijska krivulja pomiče na niže potencijale i siječe u aktivno područje anodne polarizacijske krivulje.



**Slika 2.13.** Polarizacijska krivulja željeza te ovisnost koncentracije pasivatora o položaju katodne polarizacijske krivulje [4]

Najučinkovitiji korozijski inhibitori su kromati i nitriti. Oni su samoodrživi oksidacijski inhibitori koji oksidiraju željezo i primjenjuju se kao inhibitori za čelične sustave u neutralnim otopinama. Kromati ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) su najpoznatiji po svojoj primjeni kao inhibitor za održavanje recirkulirajućih rashladnih sustava poput rashladnih tornjeva ili motora s unutarnjim izgaranjem. Nitriti ( $\text{NO}_2^-$ ) se koriste u cjevovodima koji prenose benzin i druge naftne proizvode. Kemijske tvari poput natrijevih polifosfata, silikata, benzoata, su inhibitori koji djeluju učinkovito isključivo uz prisutnost kisika. Koriste se za zaštitu čelika i željeza u blago lužnatim i neutralnim medijima jer tad se pod njihovim utjecajem razvija netopлива željezova (III) oksidna faza koja stvara naslage na površini željeza. Postoje inhibitori koji djeluju u kiseljoj otopini tako da formiraju adsorbirani sloj na metalnoj površini koji sprječava dopremanje vodikovih iona (na primjer jodidi tako inhibiraju željezo u otopini klorovodične kiseline). Organski inhibitori se koriste za zaštitu čeličnih površina prilikom skladištenja. Najčešće se sastoje od ulja, masti ili voskova koji sadrže male udjele organskih aditiva. Organski aditivi su polarne skupine koje imaju tendenciju da se adsorbiraju na metalnu površinu. Inhibitori u parnoj fazi to su tvari koje imaju niski, ali značajni tlak para. Mehanizam inhibitora nije proučen detaljno, no radi se o formiranju adsorbiranog filma na

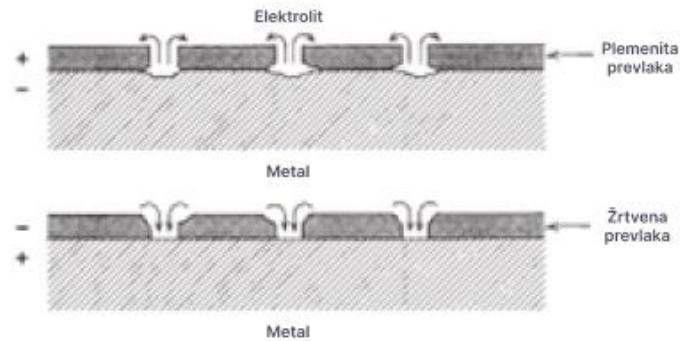
metalnoj površini koji sprječava dopremanje vode ili kisika, Koriste se za zaštitu kritičnih strojnih dijelova (ležajevi) tijekom prijevoza ili skladištenja. [1,3,4]

#### 2.2.4. Prevlake i premazi

Jedan od načina zaštite metala od korozije je primjena zaštitnog premaza ili prevlake na površini aktivnog metala. Prednosti primjene zaštitnih prevlaka i premaza je kombinacija zaštitne funkcije s estetskim izgledom jer prevlake i premazi mogu biti u raznim bojama i imati široki raspon sjaja. [1]

##### 2.2.4.1. Metalne prevlake

Metalne prevlake najčešće se nanose vrućim uranjanjem, elektroprevlačenjem, štrcanjem ili difuzijom. Postupak nanošenja ovisi o primjeni odnosno zahtjevu za otpornost na koroziju, predviđenom vijeku trajanja prevlake, geometriji predmeta koji se štiti a te okolišnim faktorima. Najčešći postupak je vruće uranjanje (*eng. hot dipping*) koji se provodi tako da se metal uranja u kadu ispunjenu tekućim metalom koji tvori prvlakom (najčešće cink i aluminij te njihove legure). Drugi najčešći postupak je elektroprevlačenje (*eng. electroplating*) kod kojeg osnovni metal na koji se taloži prevlaka predstavlja katodu u tekućem elektrolitu koji sadrži ione metala prevlake. Navedenom tehnikom je moguće nanijeti razne prevlake poput cinka, kadmija, bakra, zlata, nikla, kositra i srebra te njihove legure. Pri termalnom štrcanju (*eng. thermal spraying*) metalnih prevlaka koristi se pištolj koja ispušta male kapljice metala te se kapljice raspršuju na površinu koju treba zaštititi. Ovakve prevlake su često porozne, ali se poroznost može kontrolirati te prevlaka može biti bilo koje debljine s mogućnošću nanošenja na već izrađenim konstrukcijama. Difuzijske prevlake su prevlake koje se formiraju difuzijom atoma materijala prevlake na površinu osnovnog metala. Metalne prevlake se mogu podijeliti u dvije skupine, a to su plemeniti premazi i žrtveni premazi. Plemeniti premazi (npr. Ni, Ag, Cu, Pb, Cr na čeliku) plemenitiji su u odnosu na osnovni metal prema galvanskom nizu te čine zaštitnu barijeru prema okolišu. Međutim, uslijed postojanja pora izloženih djelovanju okoliša može doći do ubrzanog otapanja osnovnog metala pa je važno napomenuti da se plemeniti premazi uvijek pripremaju s minimalnim brojem pora i većih debljina. Žrtvene prevlake (Zn, Cd) na čeliku su manje plemeniti u odnosu na osnovni metal te je time osnovni metal katodno zaštićen. Takve anodne prevlake štite osnovni metal tako da uslijed djelovanja korozije žrtvuju svoj materijal i otapaju se, a osnovni metal ostaje zaštićen. Shema oba mehanizma prikazana je na slici 2.14. [4]



**Slika 2.14.** Shema smjera galvanske struje u pristunosti defekta na plemenitim i žrtvenim prevlakama [4]

#### 2.2.4.2. Anorganski premazi

Stakleni emajli, porculanski emajli i staklene obloge su najpoznatije anorganske prevlake. Takve prevlake se dobivaju nanošenjem stakla u prahu na površinu metala, te zagrijavanjem u peći na temperaturi mekšanja stakla pri čemu se omogućuje prijanjanje stakla na površinu metala. Mogu se nanijeti u nekoliko slojeva i uglavnom se koriste za zaštitu čelika, ali moguća je primijena na bakru, mjedi i aluminiju. Stakleni premazi pružaju visoku zaštitu od okoliša zbog svoje nepropusnosti na kisik i vodu te otpornost na jake kiseline i lužine. Anorganski premazi su također dugotrajni i estetski privlačni, jedini nedostaci su osjetljivost na mehaničko naprezanje i temperaturne udare. [4]

#### 2.2.4.3. Organski premazi

Organski premazi su jednostavna, estetski privlačna i jeftina rješenja za zaštitu metala od korozije. Najčešće se nanose u slojevima te se prvi premaz nanosi na suhu metalnu površinu koja je prethodno očišćena. Preporučuje se da primarni premaz bude fosfatni koji omogućuje bolje prijanjanje boje i otpornost na habanje. Drugi premaz, odnosno boja, se nanosi nakon što se primarni osuši te se nakon njega može nanositi još niz slojeva premaza. Boja je suspenzija čestica pigmenta dispergirana u kontinuiranom organskom ili vodenom mediju. Pigmente najčešće tvore čestice metalnih oksida ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ ) ili drugih spojeva ( $\text{BaSO}_4$ ,  $\text{PbCO}_3$ , gline) dok je disperzno sredstvo prirodno ulje. Sintetske smole se koriste kao zaštita za sredstva koja su izložena kontinuiranom prisutnosti vode, kad je potreban veliki otpor na kiseline i lužine te otpornost na visoke temperature. Postoje fenol-formaldehidi, silikonske i poliimidne smole, alkidne smole, vinilne smole i epoxy smole. Kako bi se metal pravilno zaštitio organskim premazom (bojom) potrebno je da usprkos djelomičnoj permeabilnosti pruža dobru zaštitu od prodiranja kisika i vode.

Stoga je potrebno premaz nanijeti u više slojeva kako bi se popunile nepravilnosti i pore. Pigmenti koji čine primarni sloj trebaju biti dobri korozijski inhibitori te su se u prošlosti preporučali spojevi poput crvenog olova ( $Pb_3O_4$ ) i cinkovog kromata ( $ZnCrO_4$ ). Zbog toksičnosti olova i kromata i neprivlačne žute boje, sve više u primjeni se koristi cinkov molibdat ( $ZnMoO_4$ ) koji je bijele boje i manje toksičan. Također je potrebno osigurati razumnu cijenu u odnosu na dugotrajnost premaza i izvedbi. Zaštita od kiselina, lužina te ostalih korozivnih medija se može postići postavljanjem debelog sloja gume ili plastike. Premazi od polimera vinila i polietilena se mogu nanositi kao ljepljiva traka za zaštitu zakopanih metalnih objekata te za premazivanje cijevi, spojeva i ventila ukopanih u zemlji. Nedostatak takvih premaza je gubitak prionjivosti. Plastika koja je u širokoj primjeni kao premaz je tetrafluoretilen (teflon) zbog svoje iznimne kemijske inertnosti i otpornosti na visoke temperature.<sup>[4]</sup>

### 3. PREGLEDNI DIO

#### 3.1. Praćenje i održavanje metalnih struktura

Praćenje (*eng.* monitoring) korozije na metalnim konstrukcijama podrazumijeva mjerenje korozije (prikupljanje podataka u realnom vremenu i okolišu) i obradu podataka u prikladnom programu kako bi se na vrijeme i učinkovito primjenila određena tehnika zaštite. Posebice je važno praćenje korozije u industrijskim postrojenjima kako bi se poboljšala sigurnost, smanjila mogućnost ozbiljnog oštećenja i smanjio rizik od kontaminacije. Tipovi održavanja konstrukcija od korozije se mogu se svrstati u neku četiri skupine: korekcijska, preventivna, prediktivna i održavanje usmjereno prema pouzdanosti. Korekcijsko održavanje je najmanje isplativo i odnosi se na mijenjanje ili popravljanje konstrukcije nakon pojave kvara. Preventivno održavanje se odnosi na servisiranje dijelova prije pojave većeg oštećenja. Cilj metode je da se pojedini parametri mjere sensorima u određenim vremenskim intervalima kako bi se procijenilo optimalno vrijeme za zamjenu dijelova u sustavu. <sup>[3]</sup>

#### 3.2. Prediktivno korozijsko održavanje

Prediktivno korozijsko održavanje odnosi se na održavanje temeljeno na prikupljanju informacija o stanju metalnih komponenti uz pomoć senzora korozije. Shodno tome, za prediktivno održavanje potrebno je primjeniti informacije o mediju i materijalu kako bi se prije same primjene sustava za održavanje omogućila adekvatna zaštita za pouzdanije praćenje i duži vijek trajanja. Sustavi za praćenje korozije se razlikuju po svojoj složenosti, no u svim sustavima se nalaze senzori korozije. Senzori korozije šalju signal koji se može detektirati i obraditi te omogućuje nadziranje promjena u sustavu. Općenito, potrebno je primjeniti više vrsta tehnika praćenja korozije za prediktivno održavanje kompleksnih sustava. Tehnike praćenja korozije se može podijeliti na mnogo razreda i skupina. Najčešća podjela je na direktne i indirektne metode. U direktne metode svrstavaju se fizikalne metode (gravimetrijske, vizualne, mjerenje električnog otpora, elektromagnetske metode), elektrokemijske metode (linearni polarizacijski otpor, potenciodinamična metoda, elektrokemijska impedancijska spektroskopija, metoda harmonijske analize). Indirektne metode se mogu podijeliti na on-line i off-line tehnike. Pod on-line tehnikama podrazumijeva se mjerenje korozijskih produkata poput vodika (vodikove probe), elektrokemijske tehnike (mjerenje korozijskog potencijala), određivanje parametara vode (pH, konduktivnost, redoks potencijal), određivanje procesnih parametara (tlak, temperatura) i mjerenje količine

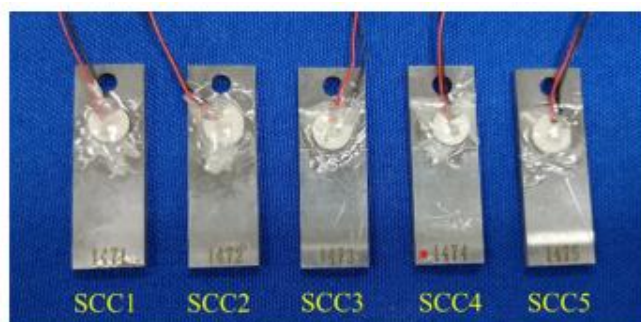


sedimenta. Off-line tehnike podrazumijevaju određivanje koncentracije korozivskih inhibitora, kemijsku analizu procesnih uzoraka (udio sumpora, udio dušika), određivanje kemijskih parametara vode (analiza metalnih iona, plinova, mikrobioloških organizama). [3]

### 3.3. NAJNOVIJA RIJEŠENJA ZA PRAĆENJE KOROZIJE

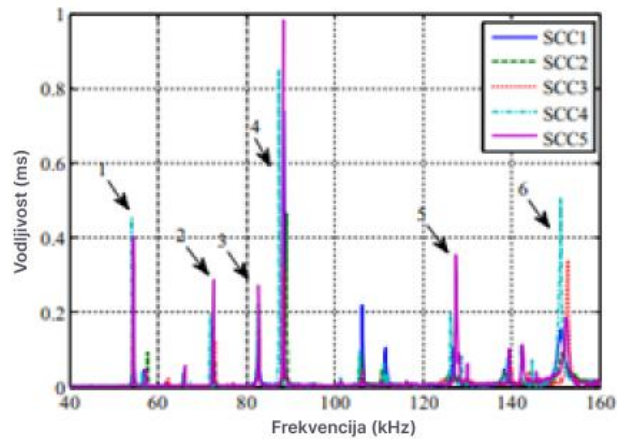
#### 3.3.1. Pametni kupon baziran na olovnom cirkonatu titanatu (PZT) za zaštitu od korozije uz pomoć elektromehaničke impedancije (EMI)

Najčešća metoda praćenja korozije je primjena korozivskih kupona koji se ugrađuju na kritičnim lokacijama kako bi se periodički pratio gubitak mase. U posljednje vrijeme, olovni cirkonat titanat je materijal koji se koristi kao senzor i aktuator u obliku flastera je koji se učvršćuje na korozivski kupon za mjerenje simultanog utjecaja korozije i naprezanja. Olovni cirkonat titanat (PZT) je vrsta materijala koji se temelji na izravnom i obrnutom piezoelektričnom efektu. Prilikom učinka izavnog piezoelektričnog efekta, senzor proizvodi električno polje uslijed deformacije PZT materijala. Obrnuti piezoelektrični efekt navodi da senzor (PZT) djeluje kao aktuator koji se deformira prilikom primjene električnog polja. Pametni korozivski kupon (SCC, eng. *smart corrosion coupon*) je korozivski kupon (čelik klase Q235) s pričvršćenom PZT pločicom. PZT pločica je zalijepljena pomoću epoksidnog ljepila te premazana epoksidom na svim površinama kako bi se zaštitila od vanjskih utjecaja. Na slici 3.1. prikazani su uzorci kupona (SCC1-SCC5). Elektromehanička impedancija je provedena svakih dvadesetčetiri sata. Kuponi su povezani sa impedancijskim analizatorom a prikupljene informacije se pohranjuju na računalu za daljnje analize.



Slika 3.1. Pripremljeni pametni kuponi [5]

Elektromehanička impedancija mjeri šest parametara, impedanciju  $Z$  ( $Z = R + iX$ ), otpor  $R$  (realni dio impedancije), reaktanciju  $X$  (imaginarni dio impedancije), admitanciju ( $Y = 1/Z = G + iB$ ), vodljivost  $G$  (realni dio admitancije) i susceptanciju  $B$  (imaginarni dio admitancije). Promjena vodljivosti je najosjetljiviji parametar na deformaciju kupona. Shodno tome, frekvencije koje odgovaraju signalima promjene vodljivosti su izravno povezane s rezonantnim frekvencijama baze kupona. Rezultat mjerenja elektromehaničke impedancije prikazan na slici 3.2. uzoraka je grafička ovisnost električne vodljivosti (ms) o frekvenciji (kHz).



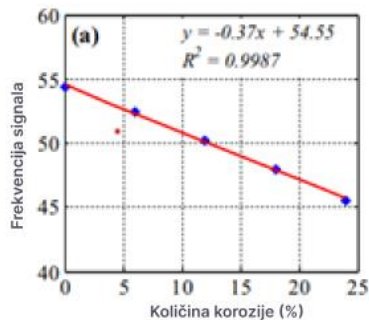
**Slika 3.2.** Rezultati promjene vodljivosti u ovisnosti o frekvenciji za SCC uzorke sa šest označenih signala <sup>[5]</sup>

**Tablica 1.** Tablica frekvencije 6 najvećih signala dobivenih mjerenjem i veza s količinom korozije <sup>[5]</sup>

Udio korozije (%)	Signal 1 (kHz)	Signal 2 (kHz)	Signal 3 (kHz)	Signal 4 (kHz)	Signal 5 (kHz)	Signal 6 (kHz)
0	54,40	72,55	82,75	88,30	127,50	152,50
6	52,45	70,60	79,30	85,90	124,00	148,30
12	50,20	68,80	76,00	83,50	120,60	144,30
18	47,95	66,85	73,15	81,70	117,60	140,70
24	45,55	65,05	70,00	79,15	114,00	135,80

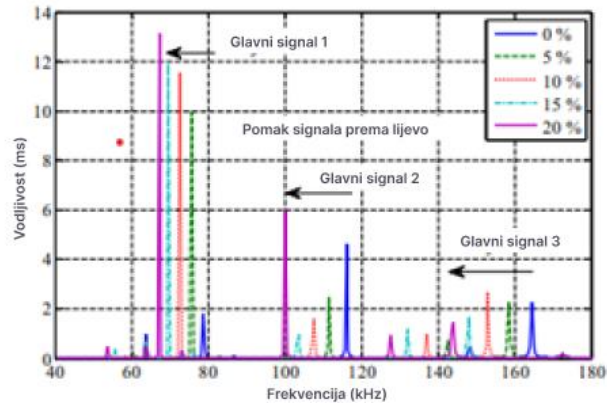
Iz rezultata prikazanih u tablici 5. uočava se pomak frekvencije prema nižim vrijednostima što ukazuje na smanjenje rezonantnih frekvencija kupona. Rezultati prikazani u tablici su zatim

linearizirani te je dobiven koeficijent korelacije preko 0,997 za sve uzorke SCC te je za prvi signal prikazan graf na slici 3.3.



Slika 3.3. Ovisnost frekvencije prvog signala o količini korozije <sup>[5]</sup>

Modeliranje konačnih elemenata (FEM, eng. *finite element modeling*) elektromehaničkih impedancijskih rezultata pametnih korozijskih kupona radi se u programu ANSYS 15.0. PZT flaster je kružnog oblika te je smješten u središtu korozijskog kupona kako bi se pojednostavio sustav. PZT flaster je modeliran uz pomoć 3D elementa SOLID45. Rezultati elektromehaničke impedancije korozijskih kupona su prikupljeni uz pomoć harmonijske analize spregnutog polja te se primjenjuje harmonijska pobuda na glavni čvor na gornjoj površini PZT kupona koji je namješten je napona 1 V. Gubitak mase se simulira tako da se smanjuje debljina kupona pri čemu smanjenje za 0,1 mm odgovara gubitku mase od 5%, te je simulirana količina korozije od 0% do 20%. Osim elektromehaničke impedancije provedena je i modalna analiza koja identificira vibracije elektromehaničkog sustava pri čemu su gornje i donje površine PZT kupona namještene na napon od 0 V. Rezultati i analiza modeliranja konačnih elemenata pametnog korozijskog kupona u rasponu od 40 kHz do 180 kHz prikazani su na slici 3.4.



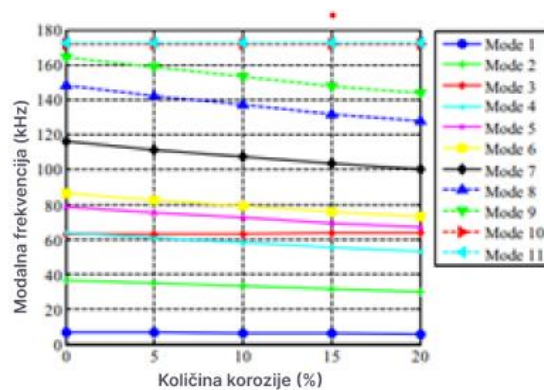
**Slika 3.4.** Rezultati mjerenja dobiveni modeliranjem konačnih elemenata s označena tri glavna signala <sup>[5]</sup>

Slika 3.4. je grafički prikaz ovisnosti vodljivosti o frekvenciji. Tri označena vrha se smanjuju povećanjem količine korozije te su vrijednosti opisane u tablici 6.

**Tablica 2.** Vrijednosti frekvencija glavnih signala u odnosu na količinu korozije <sup>[5]</sup>

Količina korozije (%)	Prvi signal (kHz)	Drugi signal (kHz)	Treći signal (kHz)
0%	78,50	116,00	164,50
5%	75,50	111,50	158,50
10%	72,50	107,50	153,00
15%	69,50	103,50	148,00
20%	67,00	100,00	144,00

Rezultati dobiveni modeliranjem elektromehaničke impedancije posjeduju iste karakteristike kao eksperimentalna elektromehanička impedancija. Modalna analiza je provedena i prikazano je jedanaest načina mehaničkog naprezanja od kojih se 1,2,6 i 8 odnose na longitudinalno savijanje. Način 4 odnosi se na lateralno savijanje, a načini 3,10 i 11 su ekstenzijski. Preostali načini (5,7,9) su spoj longitudinalnog i lateralnog savijanja. Rezultati su prikazani grafički kao ovisnost modalne frekvencije i količine korozije na slici 3.5.



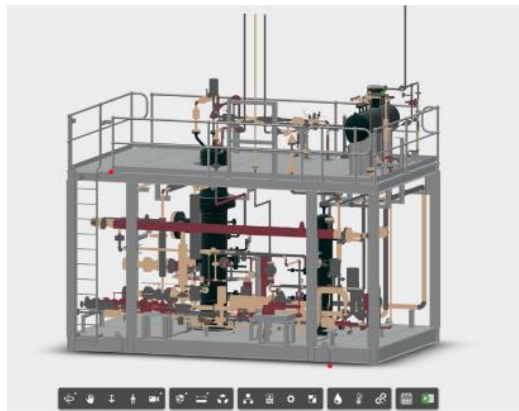
Slika 3.5. Grafička ovisnost modalne frekvencije o količini korozije [7]

Evidentno je da modalne frekvencije opadaju povećanjem udjela korozije od kojih se značajno smanjuju za longitudinalno, lateralno i kombinirano savijanje. Iz dobivenih rezultata analize, postoje određeni nedostaci metode koje treba razmotriti za buduća istraživanja. Jedan od tih je potreba za razvijanje izolacijskog mehanizma pametnog kupona kako bi se kompenzirao vanjski utjecaj na mjerenja i potreba za kompenzacijom temperature kako bi se preciznije odredila količina korozije. Pametni korozivni kupon uspješno detektira jednoliku koroziju, dok je lokaliziranu teže identificirati, no i dalje će doći do neke varijacije u vodljivosti kupona. Predložen pametni korozivni kupon posjeduje prednosti poput kvantitativnog određivanja količine korozije, sposobnost on-line praćenja i ekonomsku učinkovitost. [5]

### 3.3.2. Model baziran na informacijskom prikupljanju (BIM) za predviđanje korozije ispod izolacije

Predložen model prediktivnog korozivnog održavanja u slučaju korozije ispod izolacije primjenjuje se pomoću alata za modeliranje poslovnih procesa (BPMN, eng. *Business Process Modeling Notation*). Postoje četiri koraka koje čine spomenuti model, a to su implementacija senzora, prijenos podataka iz senzora, vizualizacija podataka i zadaci za provedbu inspekcije. Na slici 3.6. prikazan je sustav za predikciju korozije. Pasivni RFID (eng. *Radio Frequency Identification*) senzori su postavljeni kako bi prikupljali informacije o korozivnom sustavu u realnom vremenu. Prednost pasivnih senzora je da su samoodrživi odnosno ne zahtijevaju baterije ili izvor za napajanje. Informacije iz senzora se skladište u centru podataka koji integrira sve signale dobivene sensorom. Dobivene integrirane vrijednosti se prenose u obliku hipertekstualnog protokola (HTTP) i šalju u internet server. Matematički model je odabran prema pretpostavci da je korozija jednolika i da prevladavaju idealni uvjeti poput neutralnog pH, a materijal je meki čelik.

Senzori koji se koriste prilikom modeliranja sustava su bežični senzor temperature RFM3250 koji imaju velik raspon detekcije i senzor vlage RMF2110. Kako bi se vizualizirali podaci, potrebno je posjedovati aplikacije koje obuhvaćaju funkcije za vizualizaciju 3D BIM modela. Kada se pokrene funkcija korozije, sustav preuzima vrijednosti senzora iz baze podataka kako bi se dobile ulazne vrijednosti za predviđanje korozije. Proces predviđanja korozije računa dubinu korozije materijala u određenom vremenskom intervalu te se informacije prenose u svojstva elemenata u BIM modelu. U svakom BIM elementu je moguće ugraditi informacije dobivene senzorom te je stvorena skupina podataka poput praćenja količine vlage, temperature i brzine korozije. Jedne od prednosti BIM modela je što omogućava razvrstavanje elemenata sustava po bojama i odgovarajućoj legendi. Primjer takvog razvrstavanja je na slici 3.6. gdje je prikazan sustav cjevovoda prilikom kojeg metali koji su označeni sivom bojom ne zahtijevaju inspekciju te im je korozijska dubina je manja od 3 mm. Metalni elementi označeni oker bojom predstavljaju elemente kojima je korozijska dubina veća od 3 mm, a manja od 5 mm te nije hitna potreba za servis. Crveno označeni elementi predstavljaju metale za koje je potreban popravak ili zamjena jer je korozijska dubina veća od 5 mm.

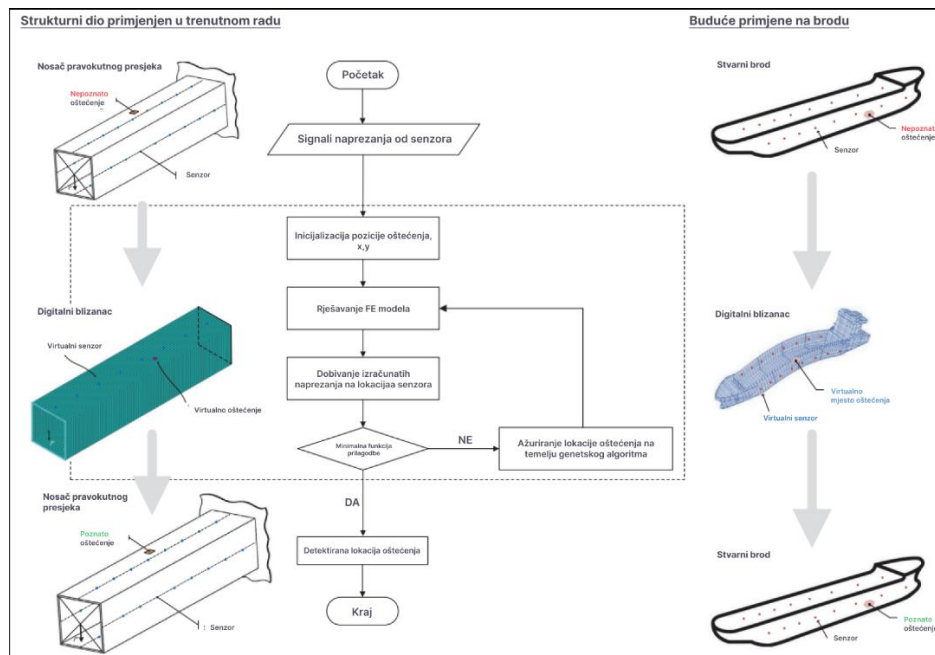


**Slika 3.6.** 3D BIM model za cjevovode sa označenim elementima metala u bojama [6]

Ovakav način prediktivnog korozijskog monitoringa u primjeni je u naftnoj industriji i uvelike doprinosi uštedama smanjenjem troškova održavanja. Signali senzora i analiza rezultata vizualizirana su pomoću BIM modela koji prikuplja informacije iz senzora putem internet sučelja u bazu podataka te prema toj bazi podataka modelira 3D sustav koji uz odgovarajuće matematičke modele može pratiti kompleksnije korozijske sustave. [6]

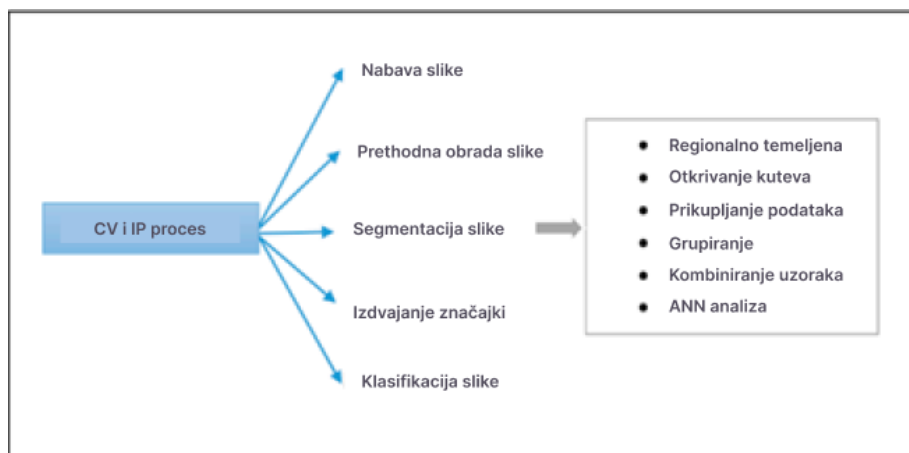
### 3.3.3. Sustav prediktivnog korozijskog održavanja pomorskih brodova

U pomorskoj industriji korozijsko djelovanje je najčešći uzrok propadanja metalnih struktura brodova što rezultira u velikim novčanim štetama. Iz tog razloga počelo se primjenjivati prediktivno korozijsko održavanje kako bi se uz pomoć prikupljanja o informacijama dobiveni sensorima odredio postotak propadanja metala uslijed korozije. U ovom dijelu proučavat će se implementacija umjetne inteligencije u sustave korozijskog održavanja. Postoji više modela prediktivnog održavanja poput modela temeljenih na prikupljenim podacima, računalnom znanju, fizikalnim zakonima i hibridnih modela koji su kombinacija navedenih. Održavanje temeljeno na hibridnom modelu je kombinacija modela na osnovi znanja, podataka i fizikalnih zakona. Primjer je razvoj digitalnih blizanaca za praćenje korozije. Pristup je temeljen na postavljanju senzora po trupu broda kojim bi se očitavali signali dobiveni uslijed naprezanja kako bi se matematičkim modelom odredila lokacija oštećenja. Jedan digitalni blizanac primjenjuje model konačnih elemenata a drugi se sastoji od sheme umjetne neuralne mreže (ANN, eng. *Artificial Neural Networks*). Model konačnih elemenata (FE, eng. *Finite Element*) u ovom primjeru se postavlja pomoću parametra položaja te se omogućuje označavanje položaja (definiran prostornim varijablama) oštećenja. Prikupljanje informacija za razvijanje digitalnog blizanca započinje ovim modelom jer omogućuje mjerenje naprezanja u određenim vremenskim intervalima i uspoređuju se s definiranim funkcijama prilagodbe. Naveden proces je izveden kontinuirano tako da funkcija prilagodbe ne doseže minimalnu vrijednost kako bi se odredila ispravna lokacija oštećenja. Shema opisanog sustava prikazan je na slici 3.7. ANN je u području strojnog učenja što je temeljna tehnologija u digitalnim blizancima. Digitalni blizanci koriste se za razne primjene vezano za konstrukciju broda te se smatra da u realnom vremenu pružaju pouzdana rješenja jer koriste neovisne varijable koje ulaze u sustav kao poznati ulazni podaci, te vraćaju ovisne izlazne varijable što su nepoznati parametri detektiranog kvara. U navedenom slučaju, ANN je korišten za klasifikaciju i prilagodbu modela, a rezultati su pokazali da se lokacija oštećenja ovom metodom može utvrditi na trupu broda. Implementacijom dodatnih senzora na trupu broda može detektirati i više mjesta oštećenja.



Slika 3.7. Shema postavljanja modela digitalnih blizanaca za simulaciju trupa broda [8]

Drugi način integracije umjetne inteligencije u korozijsko održavanje je računalna vizualizacija (*eng. Computer Vision*). U navedenoj primjeni, računalo oponaša ljudski vizualni sustav te interpretiraj uzorke uz pomoć optičkih jedinica. Dobvene digitalne slike se koriste za detekciju korozije te se takav pristup može podijeliti na pet glavnih elemenata, prikazano na slici 3.8., a čine ih: prikupljanje slike, prethodna obrada slike, segmentacija slike, izdvajanje značajki, klasifikacija slike. Ovakva metoda detekcije korozije je pouzdana i precizna zbog svoje mogućnosti replikacije ljudskog vizualnog osjetila. [7,8]



Slika 3.8. Shema računalne vizualizacije i obrada slike podijeljena u pet procesa [7]



#### 4. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je istražiti i opisati nova saznanja u području prediktivnog korozijskog održavanja. Navedene su najnovije tehnike za primjenu u sustavu za korozijsko održavanje. Predstavljeni primjeri pokazuju najnovija rješenja u području prediktivnog održavanja. Primjena pametnih kupona izrađenih od PZT materijala omogućuje beskontaktno prikupljanje informacija o parametrima sustava izloženim koroziji i mehaničkom naprezanju, te je pomoću dobivenih informacija i modeliranje metodom konačnih elemenata moguće kontinuirano pratiti korozijska zbivanja na kuponima. Kombinacijom senzorske tehnologije i matematičkih modela razvijen je BIM model za trodimenzionalno vizualiziranje korozijskog sustava. Nedostatak BIM modela pretpostavka idealnih uvjeta te bi za kompleksnije sustave trebalo postaviti matematički model koji će biti prilagođen sustavu. Navedeni primjeri su ekološki prihvatljivi, ekonomski neopterećujući te pružaju povećanu sigurnost na radu te digitalizaciju sustava koji sam od sebe predlaže matematički model koji će precizno određivati parametre korozijskog djelovanja. Kod zaštite brodova pokazalo se da implementacija umjetne inteligencije u formi digitalnog blizanca za održavanje brodskog sustava omogućuje predviđanje korozije uz pomoć prediktivnih modela koji uključuju prikupljanje podataka od prijašnjih godina, prikupljanje informacija u realnom vremenu te praćenje parametara sustava (temperatura, tlak, protok, medij). Također, implementacija umjetne inteligencije omogućuje simuliranje ljudskog vida te primjenu računalnog vida za vizualizaciju brodskih dijelova izloženim koroziji. U ovom radu istaknuta je velika važnost primjene tehnika zaštite od korozije u kombinaciji s pametnim održavanjem koje osigurava dugotrajnost i kvalitetu rada sustava te pokazuje aktualnost istraživanja modernih rješenja za zaštitu od korozije.

## 5. POPIS SIMBOLA

Ag – srebro

BaSO<sub>4</sub> – barijev sulfat

BPMN- modeliranje poslovnih procesa (eng. *Business Process Modeling Notation*)

Cd – kadmij

Cl<sup>-</sup> - kloridni ion

Cr – krom

CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - kromatni ion

CS – ugljični čelik (eng. *Carbon steel*)

Cu - bakar

DC - istosmjerna struja (eng. *Direct Current*)

e<sup>-</sup> - elektron

EB - model očekivanog ponašanja (eng. *Expected Behavior*)

EMI - elektromehanička impedancija

FEM - modeliranje konačnih elemenata (eng. *Finite Element Modeling*)

G - vodljivost

H<sub>2</sub> - molekula vodika

H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> - oksonijev ion

ICCP - katodna zaštita s vanjskim izvorom struje (eng. *Impressed Current Cathodic Protection*)

$I_{\text{corr}}$  - struja korozije

$J$  - gustoća struje (A/cm<sup>2</sup>)

Log  $i$  - logaritam struje

M - metal

Ni - nikal

$\text{NO}_2^-$  - nitriti

$\text{O}_2$  - molekula kisika

$\text{OH}^-$  - hidroksidni ion

Pb - olovo

$\text{Pb}_3\text{O}_4$  - crveno olovo

$\text{PbCO}_3$  - olovov karbonat

PZT - olovni cirkonat titanat

R - otpor

RFID - radiofrekventni identifikacijski uređaj (eng. *Radio Frequency Identification*)

SACP - katodna zaštita sa žrtvenom anodom (eng. *Sacrificial Anode Cathodic Protection*)

SCC - korozijsko raspucavanje uz naprezanje (eng. *Stress Corrosion Cracking*)

$\text{TiO}_2$  - titanov oksid

UHF RFID - ultra visokofrekventno radiofrekventno označavanje (eng. *Ultra High-Frequency Radio Frequency Identification*)

Z - impedancija

Zn - cink

## 6. LITERATURA

- [1] Khoshnaw F. & Gubner R., Corrosion Atlas Case Studies, Elsevier, 2021. Str. 15- 68.
- [2] Groysman, A. Corrosion for Everybody, 2010., str 37- 92.
- [3] Roberge, P. R., Corrosion Inspection and Monitoring, Wiley Series in Corrosion, 2007., str.- 192 – 312.
- [4] Revie W.R. & Uhlig H.H., Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering (4<sup>th</sup> ed.), Wiley Interscience, 2008., str. 251 - 300.
- [5] Weijie Li, Tiejun Liu, Dujian Zou, Jianjun Wang, Ting-Hua Yi, PZT based smart corrosion coupon using electromechanical impedance, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 129, 2019., str. 455-469.
- [6] Yuan-Hao Tsai, Jun Wang, Wei-Ting Chien, Chia-Ying Wei, Xiangyu Wang, Shang-Hsien Hsieh, A BIM-based approach for predicting corrosion under insulation, Automation in Construction, Volume 107,2019., str. 926-5805.
- [7] Imran, M.M.H.; Jamaludin, S.; Ayob, A.F.M.; Ali, A.A.I.M.; Ahmad, S.Z.A.S.; Akhbar, M.F.A.; Suhrab, M.I.R.; Zainal, N.; Norzeli, S.M.; Mohamed, S.B. Application of Artificial Intelligence in Marine Corrosion Prediction and Detection. J. Mar. Sci. Eng. 2023, str. 11- 256.
- [8] Anyfantis, K. N., An abstract approach toward the structural digital twin of ship hulls: A numerical study applied to a box girder geometry, proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2021., str. 718–736.