

# Akreditirana ispitivanja korozije u industriji

---

**Paun, Domagoj**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Istrian University of applied sciences / Istarsko veleučilište - Università Istriana di scienze applicate**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:212:769245>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-19**



image not found or type unknown

*Repository / Repozitorij:*

[Digital repository of Istrian University of applied sciences](#)



image not found or type unknown

ISTARSKO VELEUČILIŠTE –  
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE



Domagoj Paun

# **AKREDITIRANA ISPITIVANJA KOROZIJE U INDUSTRIJI**

Završni rad

Pula, 2024.

ISTARSKO VELEUČILIŠTE –  
UNIVERSITÀ ISTRIANA DI SCIENZE APPLICATE

Domagoj Paun

**AKREDITIRANA ISPITIVANJA KOROZIJE U INDUSTRIJI**

Završni rad

JMBAG: 0009055946, izvanredni student  
Studijski smjer: Preddiplomski stručni studij Politehnika  
Predmet: Upravljanje kvalitetom  
Mentor: doc.dr.sc. Vedrana Špada

Pula, 2024.



## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Ja, dolje potpisani \_\_\_\_\_, kandidat za prvostupnika \_\_\_\_\_ ovime izjavljujem da je ovaj Završni rad rezultat isključivo mogega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na objavljenu literaturu kao što to pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da niti jedan dio Završnog rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz kojega necitiranog rada, te da ikoji dio rada krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za koji drugi rad pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili radnoj ustanovi.

U Puli, 2024. godine.

Student

---



**IZJAVA**  
**o korištenju autorskog djela**

Ja, \_\_\_\_\_ dajem odobrenje Istarskom veleučilištu – Università Istriana di scienze applicate, kao nositelju prava iskorištavanja, da moj završni rad pod nazivom **AKREDITIRANA ISPITIVANJA KOROZIJE U INDUSTRIJI** koristi na način da gore navedeno autorsko djelo, kao cjeloviti tekst trajno objavi u javnoj internetskoj bazi Sveučilišne knjižnice u Puli te kopira u javnu internetsku bazu završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice (stavljanje na raspolaganje javnosti), sve u skladu s Zakonom o autorskom pravu i drugim srodnim pravima i dobrom akademskom praksom, a radi promicanja otvorenoga, slobodnoga pristupa znanstvenim informacijama.

Za korištenje autorskog djela na gore navedeni način ne potražujem naknadu.

U Puli, 2024. godine.

Student

\_\_\_\_\_

## SAŽETAK

Cilj ovog rada bilo je dubinsko istraživanje mehanizama korozije koji utječu na industrijska postrojenja i infrastrukturu, posebno fokusirajući se na cijevi naftovoda, aluminijske profile korištene u građevinarstvu i rashladne sustave termoelektrana. Svrha je bila razumjeti kako korozija utječe na sigurnost, efikasnost i dugovječnost nekih od ključnih komponenata industrijskih sustava i konstrukcija te kako se provode akreditirana ispitivanja za evaluaciju i prevenciju korozivnih procesa uz naglasak na upravljanje kvalitetom u svim postupcima i koracima. Teorijska i metodološka osnova rada temelji se na primjeni raznovrsnih ispitivanja, od optičke emisijske spektrometrije i EDS mikroanalize do SEM analize i ispitivanja tvrdoće, koja omogućuju detaljna ispitivanja i ocjenu kemijskog sastava, mikrostrukture i mehaničkih svojstava materijala. Rezultati istraživanja ukazali su na složene mehanizme korozije, poput lokalizirane korozije, pittinga i transgranularne korozije te su identificirane specifične naslage koje sadrže elemente poput bakra, cinka, kisika i sumpora, što ukazuje na potencijalne korozivne agense. Na temelju ovih nalaza, predložene su strategije za smanjenje korozije, uključujući primjenu željeznog sulfata i biocida te promjene u procesima obrade i skladištenja. Ovaj rad doprinosi boljem razumijevanju korozivnih procesa u industrijskim sustavima i pruža vjerodostojne podatke koji industrijskim subjektima omogućuju donošenje informiranih odluka vezanih uz materijale, dizajn i održavanje, ističući važnost akreditiranih ispitivanja u osiguranju kvalitete i usklađenosti s normama.

**Ključne riječi:** korozija, akreditirana ispitivanja, industrijska postrojenja, strategije prevencije korozije.

## SUMMARY

The aim of this work was an in-depth investigation of corrosion mechanisms affecting industrial plants and infrastructure, with a particular focus on oil pipeline tubes, aluminum profiles used in construction, and cooling systems in thermal power plants. The purpose was to understand how corrosion impacts the safety, efficiency, and longevity of these key industrial components and how accredited tests are conducted for the evaluation and prevention of corrosive processes with accent on quality management within every step. The theoretical and methodological foundation of the work is based on the application of various tests; from optical emission spectrometry and EDS microanalysis to SEM analysis and hardness testing, which allow for a detailed analysis and assessment of the chemical composition, microstructure, and mechanical properties of materials. The research results have pointed to complex corrosion mechanisms, such as localized corrosion, pitting, and transgranular corrosion, and specific deposits containing elements like copper, zinc, oxygen, and sulfur have been identified, indicating potential corrosive agents. Based on these findings, strategies for reducing corrosion have been proposed, including the application of iron sulfate and biocides and changes in processing and storage processes. This work contributes to a better understanding of corrosive processes in industrial applications and provides reliable data that enable industrial entities to make informed decisions related to materials, design, and maintenance, highlighting the importance of accredited testing in ensuring quality and compliance with standards.

**Keywords:** corrosion, accredited testing, industrial plants, corrosion prevention strategies.

# SADRŽAJ

## SAŽETAK

## SUMMARY

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. KOROZIJA I NJEZINE ZNAČAJKE</b> .....	2
2.1. Općenito o koroziji.....	3
2.2. Metode zaštite od korozije.....	6
2.3. Vrste korozije.....	11
2.4. Korozija u industriji.....	16
2.5. Norme za ispitivanje korozije.....	20
<b>3. PRIMJERI AKREDITIRANIH ISPITIVANJA KOROZIJE U INDUSTRIJI</b> .....	22
3.1. Cijev naftovoda.....	23
3.2. Aluminijski profili.....	25
3.3. Cijev rashladnog sustava termoelektrane.....	27
<b>4. RASPRAVA</b> .....	29
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	31
<b>LITERATURA</b> .....	33
<b>POPIS SLIKA</b> .....	35



# 1. UVOD

Korozija materijala predstavlja jedan od značajnih izazova s kojima se suočava industrijski sektor, uzrokujući ne samo ekonomske gubitke, već i potencijalne sigurnosne rizike. Ovaj rad bavi se tematikom akreditiranih ispitivanja korozije, s ciljem razumijevanja kako standardizirani postupci i prakse doprinose efikasnosti zaštite od korozije u ključnim industrijskim primjenama. Postavlja se osnovno istraživačko pitanje: Kako akreditirana ispitivanja korozije utječu na razumijevanje i upravljanje korozijom u industriji, te na koji način doprinose poboljšanju sigurnosti i održivosti industrijskih postrojenja? Odnosno nameću se zaključci kako je upravljanje kvalitetom pri provođenju detaljnih analiza te elaboriranju rezultata presudno za preciznost i točnost, usporedivost te eventualno dokazivanje odgovornosti za nastale korozijske štete.

S obzirom na širok spektar utjecaja korozije, od financijskih gubitaka do sigurnosnih rizika, rad detaljno analizira metodologije i prakse ispitivanja korozije, uz poseban osvrt na akreditirane postupke. U kontekstu industrijskih aplikacija, poput naftovoda, aluminijskih profila i cijevi rashladnog sustava termoelektrane, istražuje se primjena akreditiranih ispitivanja u cilju identifikacije optimalnih strategija sanacije, prevencije i zaštite.

Analizom normi za ispitivanje korozije i studijama slučaja iz prakse, rad pruža uvid u najnovije trendove i izazove u borbi protiv korozije. Kroz temeljitu evaluaciju primijenjenih metoda i njihovih rezultata, istraživanje ima za cilj pridonijeti širem razumijevanju važnosti akreditiranih ispitivanja u očuvanju integriteta i produženju vijeka trajanja industrijskih komponenti.

Ovim pristupom, rad teži doprinijeti širem polju znanja o koroziji, ističući važnost akreditacije u postizanju visokih standarda sigurnosti i efikasnosti u održavanju industrijske opreme i infrastrukture. Kroz integrativni pregled teorijskih osnova i praktičnih primjera, istraživanje usmjerava pažnju na ključne aspekte prevencije korozije,

naglašavajući ulogu akreditiranih ispitivanja u osiguravanju dugoročne stabilnosti i funkcionalnosti u različitim industrijskim sektorima.

Upravljanje kvalitetom i predviđanje korozije kao problema u analizi rizika u industriji te samim time uvođenje postupaka prevencije i zaštite u sve sastavnice sustava, može smanjiti financijski teret koji nose korozijska oštećenja i njihove posljedice. U ovom radu se razmatra upravljanje kvalitetom kroz postupke normiranih, standardiziranih, certificiranih i akreditiranih analiza koje korozijskim problemima, kada do njih ipak dođe, daju mjerljiv uzrok i predlažu rješenje, sanaciju i prevenciju. Kasnije je na inženjerima u pogonima i djelatnicima koji su zaduženi za kvalitetu, ovakve spoznaje uvesti u sustav upravljanja kvalitetom od popravnih i preventivnih radnji, prilika, analize rizika i slično, a sve u svrhu poboljšanja procesa, a i uštede, odnosno učinkovitosti sustava u smislu smanjenja zastoja u proizvodnji, broja reklamacija, financijskih izdataka, tužbi za odštetu i slično.

## **2. KOROZIJA I NJEZINE ZNAČAJKE**

Ovo se poglavlje detaljno bavi fenomenom korozije, istražujući njezine osnovne odrednice i utjecaj na materijale korištene u industriji. Korozija, iako često percipirana kao isključivo tehnički izazov, predstavlja složeni problem koji se proteže kroz različite aspekte materijalnog inženjerstva, kemije i fizike. U ovom poglavlju, fokus je na razumijevanju temeljnih mehanizama koji pokreću korozivne procese, pružajući temeljit pregled metoda koje se koriste za zaštitu materijala od oštećenja uzrokovanog korozijom. Razmatrajući široki raspon vrsta korozije i njihovih specifičnih karakteristika, poglavlje pruža uvid u kako različiti vanjski i unutarnji faktori pridonose koroziji, od atmosferskih uvjeta do kemijskog sastava materijala. Osim toga, detaljno se ispituje kako suvremene strategije i tehnologije zaštite, uključujući i norme za ispitivanje korozije, doprinose očuvanju materijala i sigurnosti industrijskih postrojenja. Kroz prizmu znanstvenih istraživanja i industrijske primjene, ovo poglavlje postavlja temelje za razumijevanje kompleksnosti korozije i njezine prevencije, ključne za osiguranje dugovječnosti i efikasnosti u različitim sektorima industrije.

## 2.1. Općenito o koroziji

Korozija materijala predstavlja jedan od značajnih izazova s kojima se suočava industrijski sektor, uzrokujući ne samo ekonomske gubitke, već i potencijalne sigurnosne rizike. Korozija se definira kao prirodni proces koji rezultira degradacijom (razaranjem, propadanjem) metala i njihovih legura kada su izloženi određenim okolišnim uvjetima. Ovaj proces nije samo ograničen na metalne materijale; i nemetali mogu podlijegati sličnim oblicima korozije, što dodatno naglašava njezinu sveprisutnost i važnost (Jones, 1996). Prema Alaru (2015), korozija je u tehničkom smislu nepoželjno trošenje konstrukcijskih metala kemijskim djelovanjem okoline, često rezultirajući spojevima kao što su oksidi ili sulfidi.

U srži korozije leže elektrokemijski procesi, gdje metal u kontaktu s elektrolitom (npr., vodom) doživljava oksidaciju, rezultirajući formiranjem korozivnih produkata kao što su hrđa na željezu (Melchers i Jeffrey, 2003). Brzina i oblik korozije mogu se znatno razlikovati ovisno o vrsti metala, njegovom okolišu i prisutnosti zaštitnih premaza ili inhibitora. Na primjer, čelik u morskoj vodi podliježe bržoj koroziji nego u slatkoj vodi zbog veće koncentracije soli koja djeluje kao elektrolit (Alar, 2015). Dodatno, korozija nije jednoličan proces. Postoji više vrsta korozije, uključujući, ali ne ograničavajući se na, jednoličnu koroziju, galvansku koroziju, pitting (točkasta) koroziju, koroziju ispod premaza i interkristalnu koroziju, svaka s vlastitim mehanizmima i uvjetima koji ih potiču. Pitting korozija, na primjer, može uzrokovati ozbiljnu štetu na inače otpornim materijalima poput nehrđajućeg čelika, stvarajući male, ali duboke rupe koje značajno umanjuju strukturni integritet materijala (Davis, 2008; Revie i Uhlig, 2008).

Osim direktnog utjecaja na materijale, korozija ima i široke ekonomske posljedice. Procjenjuje se da troškovi povezani s korozijom dosežu stotine milijardi dolara godišnje na globalnoj razini, što uključuje izravne troškove popravka i zamjene oštećenih materijala, kao i indirektne troškove povezane s gubitkom produktivnosti i nepredviđenim zastojevima (Koch, Brongers, Thompson, Virmani i Payer, 2002). U SAD-u troškovi zbog korozije koji obuhvaćaju metode zaštite, popravke i zamjenu dostižu do 3.1% BDP-a, što

je oko 276 milijardi američkih dolara, odnosno oko 1000 USD godišnje po stanovniku (Juraga, Alar, Šimunović i Stojanović, 2022).

Željezni atomi prelaze u otopinu u vodi kao  $\text{Fe}^{2+}$  kation, ostavljajući iza sebe po dva elektrona (anodna reakcija). Ti se elektroni provode kroz metal do mjesta gdje se može odvijati reakcija "redukcije kisika" kako bi se potrošili elektroni (katodna reakcija). Ova reakcija generira  $\text{OH}^-$  ione koji se zatim kombiniraju s  $\text{Fe}^{2+}$  ionima kako bi se formirao hidratizirani željezni oksid  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  (stvarno  $\text{FeO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ); no umjesto da se formira na površini, gdje bi mogao pružiti neku zaštitu, često se formira kao precipitat u samoj vodi. Reakcija se može sažeti kao: Materijal (M) + Kisik + (Hidratizirani) materijalni oksid, baš kao u slučaju suhe oksidacije. Tada je formiranje i otapanje  $\text{Fe}^{2+}$  analogno formiranju i difuziji  $\text{M}^{2+}$  u oksidnom filmu pri suhoj oksidaciji; i formiranje  $\text{OH}^-$  je vrlo slično redukciji kisika na površini oksidnog filma. Međutim, mnogo brži napad koji se nalazi u mokroj koroziji posljedica je sljedećeg (Ashby i Jones, 2002):

- a)  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  se ili taloži dalje od materijala koji korodira; ili, ako se taloži na površini, čini to kao labav talog, pružajući malu ili nikakvu zaštitu.
- b) Shodno tome,  $\text{M}^{2+}$  i  $\text{OH}^-$  obično difundiraju u tekućem stanju, i stoga to čine vrlo brzo.
- c) U provodnim materijalima, elektroni se također mogu vrlo lako kretati.

Rezultat je da oksidacija željeza u prozračenoj vodi (hrđanje) teče brzinom koja je milijunima puta veća nego u suhom zraku.

Razumijevanje korozije i njezinih mehanizama ključno je za razvoj učinkovitih strategija zaštite i održavanja, koje uključuju izbor otpornih materijala, primjenu zaštitnih premaza, upotrebu inhibitora korozije i implementaciju katodne zaštite. Ove strategije omogućuju smanjenje ili čak eliminaciju šteta uzrokovanih korozijom, što može značajno produljiti vijek trajanja materijala i smanjiti ukupne troškove održavanja i zamjene. Međutim, izazov leži u pravilnom identificiranju specifičnih uvjeta kojima su materijali izloženi, kao i odabiru najprikladnijih metoda zaštite za te uvjete (Jones, 1996). Tako ključ za razumijevanje i suzbijanje korozije leži ne samo u poznavanju osnovnih elektrokemijskih procesa koji doprinose koroziji, već i u dubokom razumijevanju interakcije između metala i njihove

okoline (Alar, 2015). Kroz detaljno proučavanje pojavnih oblika korozije i mehanizama koji ih pokreću, moguće je razviti specijalizirane legure i premaze koji ciljano preveniraju specifične vrste korozije. Jedan od primjera takvog pristupa je razvoj legura koje su posebno dizajnirane da budu otporne na pitting koroziju, koja se često javlja u agresivnim kloridnim okolinama. Osim toga, katodna zaštita je pokazala značajnu učinkovitost u sprečavanju korozije na podvodnim konstrukcijama i cjevovodima, gdje se kao anode koriste materijali koji su elektrokemijski aktivniji od zaštićenog metala, čime se odvrća proces korozije od zaštićenog materijala (Davis, 2008).

Razlikovanje između kemijske i elektrokemijske korozije ključno je za precizno razumijevanje različitih oblika i mehanizama korozije koje se mogu javiti u različitim okruženjima. Kemijska korozija, koja se odvija bez prisutnosti elektrolita, primarno se javlja u plinovitim okruženjima, poput onih s visokom temperaturom i prisutnošću oksidirajućih plinova. Primjeri uključuju koroziju metala u dimnim plinovima ili u prisutnosti drugih korozivnih plinova u industrijskim postrojenjima. Kemijska korozija rezultira formiranjem oksida ili sulfida na površini metala, što može znatno oslabiti materijal i smanjiti njegovu funkcionalnost. S druge strane, elektrokemijska korozija uključuje prijenos elektrona između metala i elektrolita, što dovodi do formiranja iona metala i njihovog odlaganja kao oksida ili drugih spojeva. Ovaj proces je tipičniji za situacije gdje su metali izloženi vlažnim uvjetima, uključujući prisutnost vode, soli, kiselina, ili baza. Često se javlja u infrastrukturi poput mostova, cjevovoda, brodova i drugih konstrukcija izloženih vodi ili vlažnom zraku (Alar, 2015; Davis, 2008). U tom je kontekstu važno naglasiti i da atmosferska korozija, koja se može smatrati posebnim slučajem elektrokemijske korozije, nastaje kada kondenzacija vode iz zraka na metalnoj površini stvara tanki sloj elektrolita, omogućavajući elektrokemijske reakcije. Iako ovaj proces može biti spor, kontinuirano izlaganje vodi do postupnog propadanja materijala (Koch i sur., 2002).

Ekonomski utjecaj korozije, kako direktni tako i indirektni, predstavlja značajan teret za gospodarstva širom svijeta. Direktni troškovi uključuju potrebu za zamjenom ili popravkom oštećenih dijelova, dok indirektni troškovi obuhvaćaju zastoje u proizvodnji, onečišćenje proizvoda, i potencijalnu štetu na okolišu. Osim materijalne štete, postoji i

rizik od ljudskih žrtava, posebno u slučajevima kada korozija dovodi do strukturnog zatajenja u kritičnim infrastrukturama. Tako suočavanje s korozijom zahtijeva sveobuhvatan pristup koji uključuje kako preventivne mjere, poput pravilnog odabira materijala i primjene zaštitnih premaza, tako i redovito održavanje i inspekciju kako bi se identificirali i riješili potencijalni problemi prije nego što dovedu do ozbiljnih posljedica. Zato se problem korozije treba promatrati kao jedan od zasebnih procesa unutar sustava upravljanja kvalitetom u industriji. Razvoj novih materijala i tehnologija za zaštitu od korozije također igra ključnu ulogu u smanjenju ekonomskih i sigurnosnih rizika povezanih s ovim široko rasprostranjenim fenomenom.

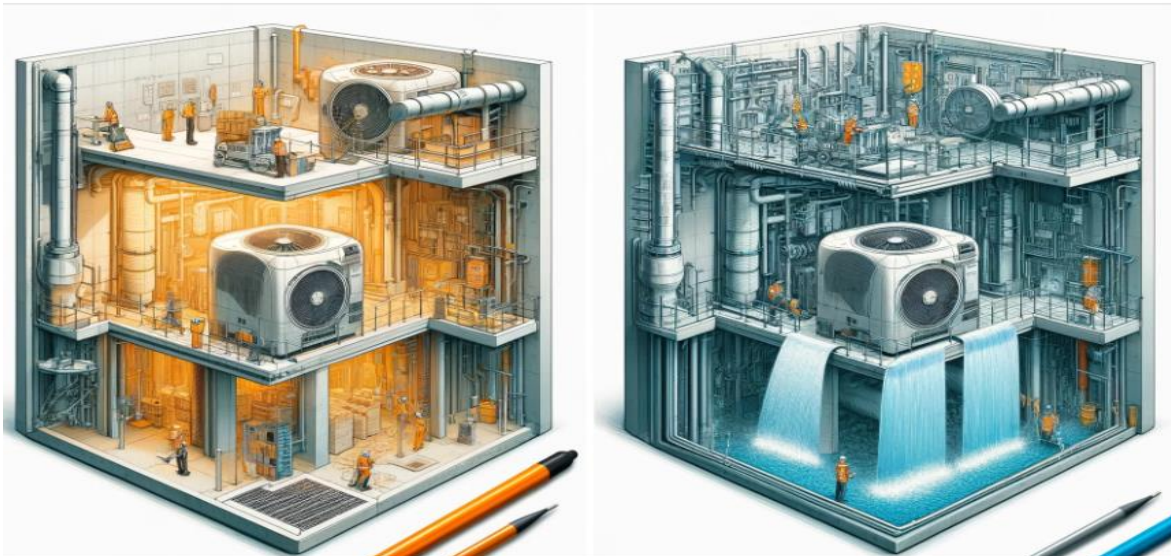
Zaštita od korozije ne završava samo na tehničkim rješenjima; obuhvaća i redovito održavanje i inspekcije kako bi se osiguralo da zaštitne mjere ostaju učinkovite tijekom vremena. S obzirom na to da korozija može imati različite brzine napredovanja ovisno o brojnim faktorima, uključujući promjene u okolišnim uvjetima, redovito praćenje i evaluacija stanja materijala ključni su za pravovremeno otkrivanje i rješavanje potencijalnih problema (Jones, 1996). Multidisciplinarni pristup koji uključuje kemiju, materijalnu znanost, inženjerstvo i dizajn, omogućava razvoj sveobuhvatnih strategija za suzbijanje korozije. Takav pristup omogućava ne samo borbu protiv postojećih izazova korozije, već i anticipiranje budućih izazova kroz inovativna rješenja i materijale otporne na koroziju, što doprinosi održivosti industrije i zaštiti okoliša.

## **2.2. Metode zaštite od korozije**

Korozija, definirana kao fizičko-kemijska interakcija između metala i njegovog okruženja koja rezultira promjenom svojstava metala i može dovesti do oštećenja (HRN EN ISO 8044, 2020), predstavlja znatan izazov za održavanje integriteta materijala i struktura (Smoljan, Iljkić i Pomenić, 2015). Prema tome, zaštita od korozije obuhvaća širok spektar strategija, uključujući, ali ne ograničavajući se na, promjenu okoliša, kontrolu dizajna, primjenu premaza, upotrebu inhibitora korozije, katodnu zaštitu, i odabir materijala otpornih na koroziju. Sve te metode teže smanjenju ili eliminaciji korozijskih procesa, od

kojih svaka ima svoje prednosti i ograničenja, ovisno o specifičnim uvjetima i zahtjevima primjene.

Promjena okoliša jedna je od najučinkovitijih metoda za smanjenje korozije. Ova strategija može uključivati smanjenje vlažnosti, smanjenje prisutnosti korozivnih agenasa kao što su soli i kiseline, ili kontrolu pH vrijednosti okoline. Dakle, temelji se na minimalizaciji ili eliminaciji okolišnih čimbenika koji potiču korozivne procese. Ova metoda može biti posebno učinkovita, jer direktno adresira uzroke korozije bez potrebe za dodatnim intervencijama na samom materijalu. Tako je kontrola vlažnosti vrlo važna jer je jedan od ključnih čimbenika u koroziji upravo prisutnost vode, koja može djelovati kao elektrolit u elektrokemijskim reakcijama korozije. Kontrola vlažnosti, posebno u zatvorenim ili klimatiziranim prostorima, može znatno smanjiti rizik od korozije. Uporaba odvlaživača zraka, dobra izolacija i ventilacija mogu pomoći u održavanju niske relativne vlažnosti. Tako je iz Slike 1 (lijevo) vidljiva unutrašnjost zgrade s različitim strojevima i radnicima, demonstrirajući kako odvlaživač efektivno kontrolira vlažnost i smanjuje rizik od korozije na metalnim komponentama u prostoru. Također, u mnogim okruženjima, prisutnost korozivnih agenasa kao što su soli (npr., morska sol u obalnim područjima) i kiseline (industrijski ispušni plinovi) mogu ubrzati koroziju. Primjena filtera za zrak koji mogu ukloniti ove agense iz atmosfere ili promjena procesnih fluida kako bi se smanjila njihova korozivnost mogu pružiti efikasnu zaštitu (Fontana i Green, 1986).



Slika 1. Odvlaživač zraka u radu unutar zatvorenog prostora (lijevo) i dva dizajna konstrukcije s fokusom na upravljanje vodom (desno)

*Izvor: izrada autora u programu GIMP*

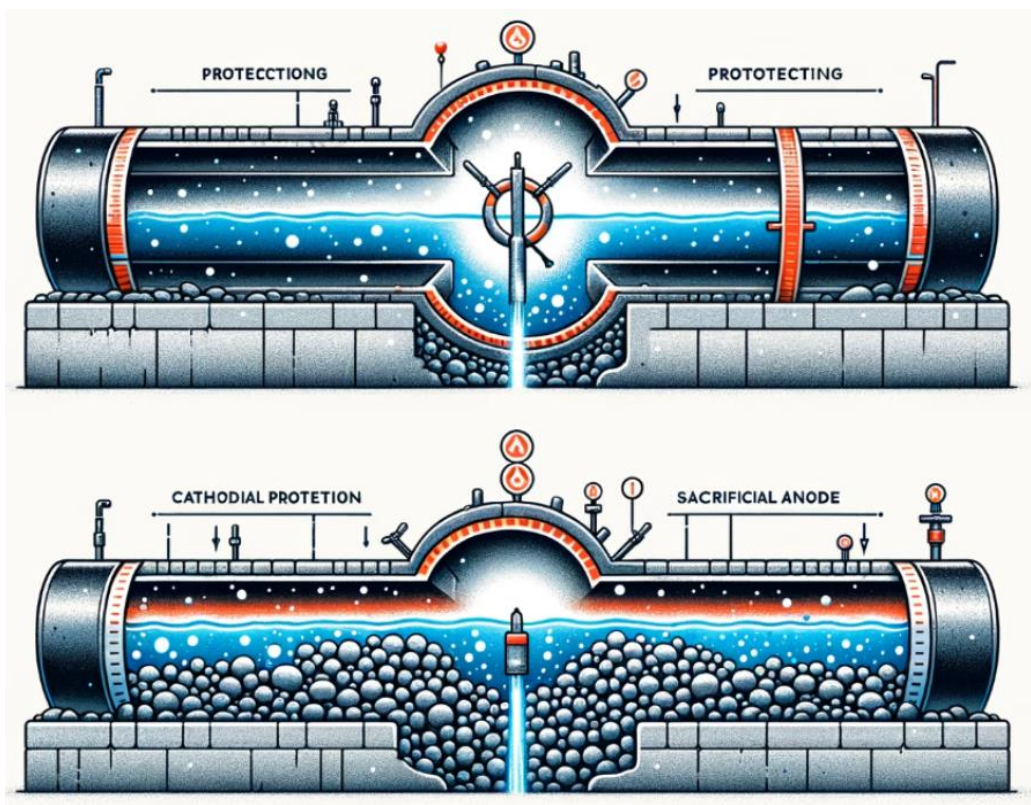
Kontrola dizajna također ima neizostavnu ulogu u zaštiti od korozije. Pravilnim dizajniranjem komponenti i struktura, moguće je minimizirati zadržavanje vlage, osigurati adekvatnu drenažu i izbjegavati stvaranje korozivnih mikro-okoliša. Također, izbjegavanje neprikladnih metalnih parova može spriječiti galvansku koroziju. Tako na primjer, dizajn koji omogućuje akumulaciju vode, bilo zbog lošeg nagiba ili zadržavanja vode u džepovima, može stvoriti uvjete pogodne za koroziju. Tako su na Slici 1 (desno) prikazana dva pristupa dizajnu konstrukcije s obzirom na upravljanje vodom. Gornji kat slike prikazuje loše upravljanje vodom s vidljivim akumulacijama vode koje dovode do korozije – to se može prepoznati po tamnijim mrljama i „vodopadima“ koji teku niz zidove. Na donjem katu prikazan je optimiziran sustav odvodnje s jasnim, plavim tokovima vode koji vode van iz konstrukcije, sprečavajući tako stvaranje korozije. Pravilnim dizajniranjem, koji uključuje dovoljne nagibe, drenažne kanale i glatke površine, može se osigurati odljev vode, sprečavajući stvaranje stajaće vode koja bi mogla poticati koroziju. I dobra ventilacija je ključna za uklanjanje vlažnog zraka i plinova koji mogu poticati koroziju, posebno u zatvorenim prostorima. Dizajn koji uključuje efikasnu ventilaciju može pomoći u održavanju suhog i čistog okruženja, smanjujući rizik od korozije. Nadalje, kada se dva različita metala nađu u električnom kontaktu u prisutnosti elektrolita, može doći do



galvanske korozije. U dizajnu se trebaju izbjegavati ove kombinacije ili koristiti izolacijski materijali koji sprečavaju električni kontakt. Također, primjena zaštitnih premaza može spriječiti direktni kontakt između dva metala (Davis, 2000).

Primjena premaza jedan je od najčešćih pristupa zaštiti metala od korozije. Premazi mogu biti organski, kao što su boje i lakovi, ili anorganski, uključujući metalne i keramičke premaze. Oni djeluju kao barijera između metala i korozivnog okoliša, smanjujući ili sprečavajući interakciju koja vodi koroziji. Uporaba inhibitora korozije, kemikalija koje usporavaju ili sprečavaju korozivne reakcije, također je efikasna metoda zaštite. Ovi inhibitori mogu se dodavati direktno u korozivni medij ili se mogu primjenjivati kao premazi na površinu metala (Jones, 1996).

Katodna zaštita je elektrokemijska metoda koja štiti metal tako što ga čini katodom u elektrokemijskom članku. Ovo se postiže primjenom vanjskog izvora struje (aktivna katodna zaštita) ili korištenjem žrtvene anode (pasivna katodna zaštita). Slika 2 prikazuje metodu pasivne katodne zaštite (gore) gdje je moguće vidjeti kako se koristi žrtvena anoda, koja je obično izrađena od metala koji je elektrokemijski aktivniji od metala cjevovoda. Anoda je spojena na cjevovod i postavljena blizu njega u tlo. Elektrokemijska aktivnost žrtvene anode korodira anodu umjesto cjevovoda, čime se cjevovod zaštićuje od korozije te metodu aktivne katodne zaštite (dolje) koja za razliku od pasivne katodne zaštite, koristi vanjski izvor struje (u ovom slučaju, pravokutni uređaj na lijevoj strani slike, koji je pravokutni izvor napajanja) za zaštitu cjevovoda. Izvor napajanja šalje struju prema cjevovodu, čime cjevovod postaje katoda u elektrokemijskom sustavu i ne korodira. Elektroni putuju od izvora prema žrtvenoj anodi, koja se korodira i štiti cjevovod. Na slici, plavi i narančasti elementi oko oba cjevovoda predstavljaju zaštitni sloj ili površinu koja je izložena zaštiti, dok crveni i tamni dijelovi predstavljaju područja podložna koroziji ili već zahvaćena korozijom. Svjetlucavi efekti i jasno plava boja vode simboliziraju čistoću i zaštitu, suprotno tamnim i crvenkastim tonovima koji sugeriraju eroziju i koroziju.



Slika 2. Pasivna katodna zaštita (gore) i aktivna katodna zaštita (dolje)

*Izvor: izrada autora u programu GIMP*

Primjena premaza, na primjer, dok pruža izvrsnu zaštitu od korozivnih agenasa, zahtijeva pažljivo odabranu formulaciju i metodologiju primjene kako bi se osigurala dugotrajna zaštitna funkcija. Osim toga, neki premazi mogu sadržavati štetne tvari koje zahtijevaju posebne mjere opreza tijekom njihove primjene i održavanja. Slično tome, katodna zaštita, iako izuzetno učinkovita u zaštiti podvodnih struktura i cjevovoda, zahtijeva stalni monitoring i održavanje kako bi se osigurala kontinuirana zaštita od korozije. Stoga, integrirani pristup koji uključuje kombinaciju različitih metoda zaštite može pružiti najučinkovitiju obranu protiv korozije, uzimajući u obzir specifične uvjete okoline i operativne zahtjeve (Jones, 1996; Esih i Dugi, 1990).

Uzimajući u obzir širok spektar dostupnih opcija za zaštitu od korozije, očigledno je da izbor prave strategije zahtijeva temeljitu analizu i prilagođavanje specifičnim potrebama svakog individualnog projekta. Ovo uključuje razumijevanje mehanizama korozije koji djeluju u određenom okruženju, kao i ekonomske i ekološke aspekte koji mogu utjecati

na izvedivost i održivost predloženih rješenja. Kroz kontinuiranu evaluaciju i prilagodbu, moguće je postići optimalnu ravnotežu između troškova, učinkovitosti i dugoročne održivosti zaštite od korozije, čime se osigurava zaštita vrijednih materijala i struktura od štetnih učinaka korozije. Ovaj pregled metoda zaštite od korozije ilustrira složenost i važnost pravilnog upravljanja korozivnim procesima u industriji. Razumijevanje specifičnih uvjeta pod kojima se korozija javlja i izbor odgovarajuće strategije ključni su za uspješnu zaštitu materijala i osiguravanje njihove dugoročne funkcionalnosti.

### **2.3. Vrste korozije**

Ovisno o mehanizmima i uvjetima koji ih potiču, korozija može imati različite oblike, a svaki od njih zahtijeva poseban pristup u prevenciji i zaštiti.

Jednolična korozija, poznata i kao opća korozija (Slika 3), javlja se kada postoji ravnomjerna oksidacija na cijeloj izloženoj površini metala. Ovaj oblik korozije karakterizira uniformni gubitak materijala, što se može uočiti kao postojan, često tanak, ali sveprisutan sloj hrđe ili korozije na površini. Iako može dovesti do znatnog smanjenja debljine metala i time utjecati na strukturni integritet, ova vrsta korozije omogućuje predvidljivost u pogledu brzine korozivnog propadanja. To znači da inženjeri mogu točno planirati očekivani vijek trajanja metala te se pripremiti za njegovu zamjenu ili popravak prije nego što korozija ugrozi funkcionalnost ili sigurnost (Fontana i Greene, 1986).



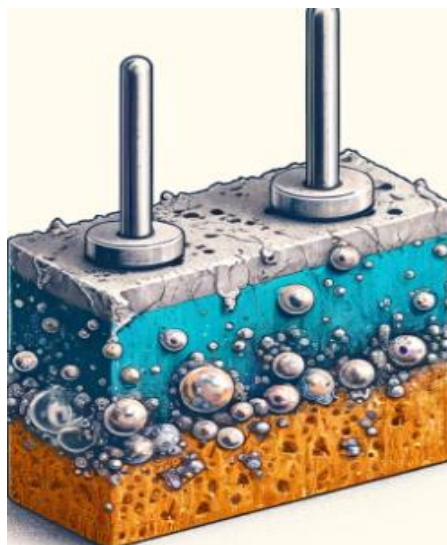
Slika 3. Komad metala s jednoličnom korozijom

*Izvor: izrada autora u programu GIMP*

Preventivne mjere za zaštitu od jednolične korozije su raznovrsne i prilagođene specifičnim zahtjevima primjene. Primjena zaštitnih premaza, kao što su boje, lakovi ili metalne prevlake, jedan je od najčešćih pristupa. Ovi premazi djeluju kao barijera između korozivnog okoliša i samog metala, sprječavajući doticaj agenasa koji uzrokuju koroziju s metalnom površinom. Izbor materijala također igra presudnu ulogu; metali poput nehrđajućeg čelika, aluminija i nekih legura nikla prirodno pokazuju veću otpornost na koroziju. Uz pravilnu upotrebu, ti materijali mogu pružiti dugoročnu zaštitu bez potrebe za dodatnim premazima ili zaštitom. Anodizacija, proces koji se često koristi kod aluminija, stvara oksidativni zaštitni sloj na površini metala koji dalje povećava njegovu otpornost na koroziju. Također, katodna zaštita, tehnika koja se često koristi za podzemne ili podvodne metalne strukture, usporava koroziju korištenjem elektrokemijskih principa za smanjenje oksidativnih reakcija na površini metala. Iako se jednolična korozija smatra najlakšom za kontrolu, njena prevencija i upravljanje zahtijevaju stručno znanje i razumijevanje korozivnih procesa. Redovite kontrole i održavanje mogu osigurati da se premazi i zaštitne mjere održavaju u dobrom stanju te da se metali pravovremeno zamijene ili poprave, osiguravajući sigurnost i funkcionalnost (Fontana i Green, 1986).

Galvanska korozija (Slika 4), poznata i kao bimetalna korozija, nastaje kada se dva različita metala ili legure spoje u prisutnosti elektrolita, stvarajući galvanski članak. Ovaj

elektrokemijski par može biti namjerno stvoren, kao u baterijama, ili nenamjeran, kao u konstrukcijskim materijalima. Manje plemeniti metal, poznat kao anoda, ima veći elektrokemijski potencijal za koroziju i postaje mjesto gdje „žrtveni“ metal, korodira brže nego što bi to učinio samostalno. U isto vrijeme, plemenitiji metal, ili katoda, iskorištava elektrone koje pruža anoda i time je zaštićen od korozije ili korodira znatno sporije. Pristupi za sprečavanje galvanske korozije uključuju korištenje istih ili sličnih metala za spajanje komponenata, upotrebu izolacijskih materijala između različitih metala, primjenu zaštitnih premaza koji sprječavaju direktni kontakt između metala i elektrolita ili dizajniranje sustava gdje su elektroliti prisutni u manjem obujmu ili uopće nisu prisutni. Također, može se koristiti električna izolacija spojeva kako bi se spriječio električni kontakt između dva metala. Osim toga, u nekim slučajevima može se koristiti katodna zaštita za zaštitu anode, smanjujući time brzinu njezine korozije. Kada se galvanska korozija ne može izbjeći zbog dizajna ili operativnih zahtjeva, pažljivo se odabiru materijali tako da metal koji korodira (anoda) ima minimalnu funkcionalnu ili ekonomsku važnost. Upravljanje galvanskom korozijom zahtijeva duboko razumijevanje elektrokemijskih principa i kako se oni primjenjuju na odabir materijala i dizajn sustava (Davis, 2000).



Slika 4. Dva metala u kontaktu u prisutnosti elektrolita, što dovodi do galvanske korozije. Jeden metal, anoda, jasno pokazuje znakove korozije dok drugi metal, katoda, ostaje uglavnom nekorodiran

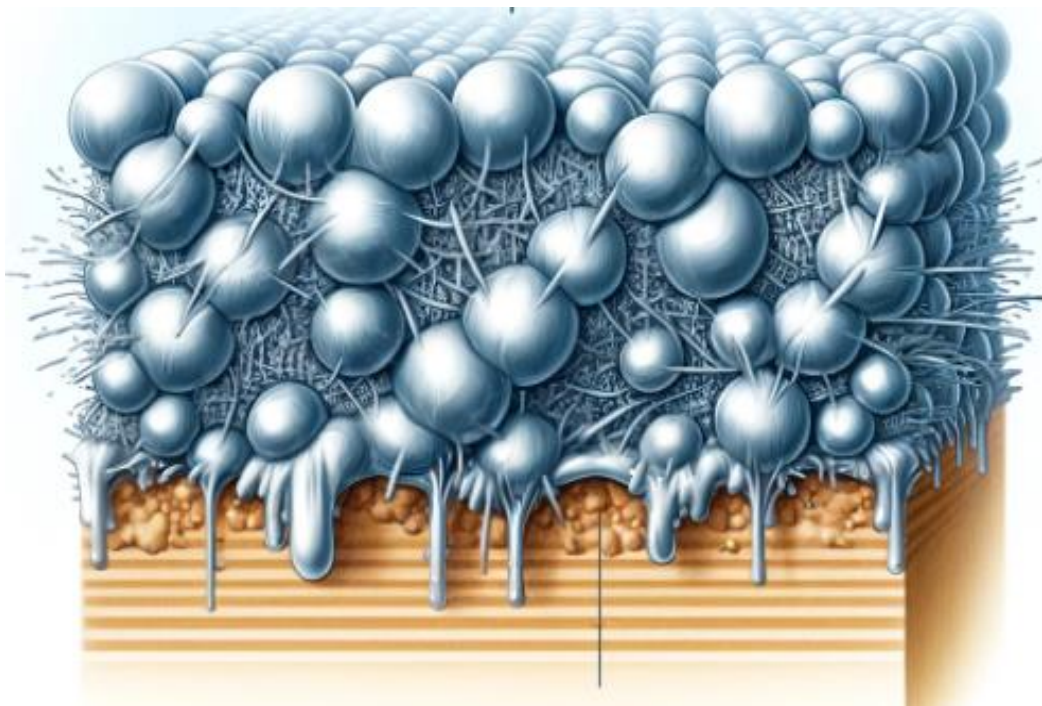
*Izvor: izrada autora u programu GIMP*

Točkasta korozija, poznata i kao *pitting*, predstavlja vrstu lokalizirane korozije koja se razvija na metalnim površinama, osobito na onima koje su generalno otporne na koroziju, kao što su nehrđajući čelici. Ovaj oblik korozije karakterizira stvaranje malih, ali izuzetno dubokih rupa ili šupljina na površini metala, što rezultira strukturnim slabljenjem materijala. Kloridi su često ključni faktor u iniciranju točkaste korozije, prodirući u pasivni sloj metala i potičući lokaliziranu elektrokemijsku reakciju. Unatoč tome što se točke korozije mogu činiti malima na površini, one mogu prodrijeti duboko u metal, često mnogo dublje nego što im je površinska širina, stvarajući potencijal za ozbiljna strukturna oštećenja koja nisu odmah vidljiva tijekom površinske inspekcije (Jones, 1996).

Jamičasta korozija je još jedan oblik lokalizirane korozije, koji se pojavljuje u uskim pukotinama i spojevima metala gdje se može nakupiti elektrolitska otopina. Ovaj oblik korozije nastaje uslijed razlika u koncentraciji kisika između područja unutar jamica i susjednih površina, stvarajući agresivan mikrookoliš koji potiče korozivnu aktivnost. Ona može biti posebno prisutna u okruženjima gdje su spojevi i pukotine izloženi morskoj vodi ili drugim korozivnim otopinama. Zbog svoje skrivene prirode, poput točkaste korozije, jamičasta korozija može dugo ostati neprimijećena, dok ne uzrokuje značajna oštećenja materijala (Jones, 1996).

Interkristalna korozija (slika 5), također poznata kao korozija uz granice zrna, predstavlja specifičan izazov u očuvanju metala, a posebno je istaknuta u slučaju nehrđajućih čelika. Ova forma korozije karakterizira se selektivnim napadom na granice zrna metala, ostavljajući unutrašnjost zrna relativno netaknutom. Jedan od ključnih čimbenika koji doprinose razvoju interkristalne korozije je prisutnost kritičnih koncentracija korozijskih agenasa, poput ugljikova dioksida ili klorida, u kombinaciji s specifičnim toplinskim obradama ili procesima zavarivanja. Ovi postupci mogu uzrokovati promjene u mikrostrukturi materijala, kao što je iscrpljivanje kroma na granicama zrna, stvarajući tako povoljne uvjete za koroziju. Ovo iscrpljivanje kroma, elementa ključnog za formiranje pasivnog zaštitnog sloja na nehrđajućem čeliku, rezultira smanjenjem otpornosti materijala na koroziju u tim kritičnim područjima (Fontana i Green, 1986). Njezina prevencija zahtijeva pažljiv odabir materijala i procesa obrade. Uporaba nisko ugljičnih ili stabiliziranih vrsta nehrđajućeg čelika, koji sadrže dodatke titanija koji se vežu za ugljik i

sprječavaju formiranje karbida kroma, može znatno smanjiti rizik od interkristalne korozije. Nadalje, kontrola toplinskih procesa, poput smanjenja vremena izloženosti visokim temperaturama tijekom zavarivanja i primjena odgovarajućeg naknadnog toplinskog tretmana, ključna je za očuvanje homogene mikrostrukture i sprječavanje iscrpljivanja kroma na granicama zrna (Marcus, 2003). U kontekstu održavanja i inspekcije, redovite evaluacije pomoću naprednih tehnika, poput skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM) i energetske disperzivne spektroskopije (EDS), omogućuju detaljnu analizu mikrostrukture materijala i identifikaciju područja potencijalno osjetljivih na interkristalnu koroziju. Kroz kombinaciju materijalnih inovacija, preciznog inženjeringa i rigoroznog održavanja, moguće je znatno smanjiti rizik od interkristalne korozije i osigurati dugotrajnost i pouzdanost metala u izazovnim okruženjima (Davis, 2000).



Slika 5. Interkristalna korozija na nehrđajućem čeliku

*Izvor: izrada autora u programu GIMP*

Erozivna korozija predstavlja oblik korozije koji je direktno uzrokovan fizičkim trošenjem materijala uslijed brzog protoka fluida. Ovaj fenomen je često praćen prisutnošću abrazivnih čestica u fluidu, koje mogu pojačati efekt trošenja na površini metala. Proces

erozivne korozije nije ograničen samo na metalne površine koje su direktno izložene fluidima; može također utjecati na interne komponente u sustavima poput pumpi, turbina i cjevovoda, gdje brzina fluida i prisutnost suspendiranih čestica dovode do povećane stope korozije i erozije. S obzirom na dinamičku prirodu ovog procesa, erozivna korozija može brzo narušiti mehaničku integritet materijala, uzrokujući značajna oštećenja i potrebu za skupim popravcima ili zamjenom (Roberge, 2000). Korozija pod naponom je složeniji fenomen koji se javlja kada materijal podliježe kombinaciji mehaničkog naprezanja i korozivnog okoliša. Ovaj tip korozije karakterizira formiranje mikroskopskih pukotina koje se mogu proširiti kroz materijal pod utjecajem stalnog ili cikličkog naprezanja, čak i kada su naponi prisutni ispod granice čvrstoće materijala. Korozija pod naponom posebno je opasna jer može proći neprimijećena sve dok ne dođe do iznenadnog i katastrofalnog otkaza strukture te posljedično havarije. Materijali kao što su nehrđajući čelik, legure titana i određene legure aluminijske posebno su osjetljivi na ovaj oblik korozije, posebno u okruženjima koja sadržavaju kloride, vodik i druge korozivne agense (Group of authors, 2003).

Svaka od ovih vrsta korozije može značajno utjecati na sigurnost i dugovječnost materijala i zahtijeva pažljivo razmatranje prilikom dizajna, izrade i održavanja industrijskih sustava.

#### **2.4. Korozija u industriji**

Korozija u industriji predstavlja značajan izazov za održavanje infrastrukture, pouzdanost proizvoda i ekonomsku učinkovitost u različitim sektorima. Korozija, elektrokemijski proces koji dovodi do propadanja metala pod utjecajem okoliša, može uzrokovati ozbiljne posljedice u naftnoj industriji, kemijskoj industriji, proizvodnji energije i mnogim drugim industrijskim sektorima. S obzirom na raznovrsnost uvjeta u kojima metali dolaze u kontakt s korozivnim agensima, inženjeri moraju primjenjivati sveobuhvatan pristup za minimiziranje i kontrolu korozije.

U naftnoj i plinskoj industriji, korozija predstavlja jedan od glavnih izazova u održavanju integriteta infrastrukture, uključujući naftne bušotine, cjevovode i druge ključne



komponente. Sulfidi i voda su među primarnim agensima koji doprinose agresivnoj koroziji u ovim sustavima. Sulfidi, posebno sumporovodik ( $H_2S$ ), prisutni u sirovoj nafti i prirodnom plinu, poznati su po svojoj sposobnosti da uzrokuju sulfidnu napetostnu koroziju pukotina (SSC) i sulfidnu koroziju puknuća pod utjecajem vodika (HIC), dva oblika korozije koji mogu znatno oslabiti metalne komponente i dovesti do njihova otkazivanja. Voda, bilo kao produkt kondenzacije ili kao komponenta izdvojena tijekom proizvodnih procesa, može uzrokovati koroziju putem elektrokemijskih reakcija s metalnim površinama. Kombinacija vode i sulfida stvara izrazito korozivno okruženje koje može dovesti do brzog trošenja materijala i strukturnih oštećenja. Primjena zaštitnih premaza jedna je od osnovnih metoda zaštite infrastrukture od korozije. Ovi premazi djeluju kao barijera između metala i korozivnih agenasa, sprječavajući njihov direktan kontakt. Upravo zbog toga, odabir odgovarajućih premaza koji mogu izdržati specifične uvjete prisutne u naftnoj i plinskoj industriji ključan je za dugotrajnu zaštitu. Katodna zaštita, bilo putem žrtvenih anoda ili primjenom vanjskog izvora napajanja, također je ključna u sprječavanju korozije. Ova metoda smanjuje elektrokemijski potencijal metala, čime se učinkovito sprječava korozija. Katodna zaštita posebno je korisna za cjevovode i podvodne strukture gdje je primjena premaza možda nezadovoljavajuća ili nedovoljna. Odabir materijala otpornih na koroziju, kao što su određene legure nehrđajućeg čelika, legure na bazi nikla i dupleks nehrđajući čelik, dodatno pomaže u zaštiti od korozije. Ovi materijali su posebno dizajnirani kako bi odolijevali agresivnim uvjetima prisutnim u naftnoj i plinskoj industriji, uključujući izloženost sulfidima i vodi.

U kemijskoj industriji, korozija predstavlja izražen problem zbog izloženosti metala agresivnim kemikalijama. Ovaj sektor često koristi razne kiseline, baze, soli i organska otapala, koje mogu biti izuzetno korozivne za tradicionalne konstrukcijske materijale. Metali poput čelika, aluminijskog i bakra, koji se široko koriste zbog svojih mehaničkih svojstava i dostupnosti, mogu brzo propadati kada su izloženi ovim agresivnim medijima, dovodeći do puknuća, curenja i drugih oblika strukturnih oštećenja. Takva oštećenja ne samo da predstavljaju rizik za sigurnost i kontinuitet proizvodnje, već i znatno povećavaju troškove održavanja i zamjene opreme. Napredak u razvoju specijaliziranih materijala igra ključnu ulogu u suzbijanju korozije u kemijskoj industriji. Razvojem legura otpornih na koroziju, poput nehrđajućeg čelika, legura na bazi nikla, titanija i cirkonija, pruža se

znatno bolja zaštita od agresivnih kemikalija. Ovi materijali su dizajnirani tako da formiraju pasivne oksidne slojeve koji štite osnovni metal od daljnjeg korozivnog napada. Izolacija reaktora i spremnika kroz upotrebu specijaliziranih premaza također je od vitalnog značaja. Ovi premazi, koji mogu biti epoksidni, esterski ili drugi polimerni materijali, pružaju dodatnu barijeru između metala i korozivnih medija. Primjena odgovarajućih premaza zahtijeva preciznu pripremu površine, pravilnu aplikaciju i održavanje kako bi se osigurala dugoročna zaštita. Osim toga, pravilno dizajniranje opreme i postrojenja s ciljem minimiziranja mrtvih kutova, zadržavanja i stagnacije tekućina može pomoći u smanjenju rizika od lokalizirane korozije. Korištenje materijala koji su kompatibilni s procesnim medijima, kao i primjena tehnika čišćenja i održavanja koje ne oštećuju zaštitne slojeve, ključni su za sprječavanje korozije.

U sektoru proizvodnje energije, a naročito u termoelektranama i nuklearnim elektranama, korozija predstavlja značajan izazov koji utječe na pouzdanost i sigurnost operacija. U tim postrojenjima, parni kotlovi, hladni sustavi te komponente sigurnosti često su izloženi ekstremnim uvjetima koji mogu poticati koroziju. Takvi uvjeti uključuju visoke temperature, visoki pritisak, kao i izloženost korozivnim tvarima poput vode ili pare, koje mogu dovesti do korozije materijala kao što su čelik i drugi metali. Korozija u parnim kotlovima može dovesti do propuštanja, smanjenja efikasnosti te u krajnjem slučaju do otkaza kotlova, što zahtijeva skupe popravke i potencijalno dovodi do zastoja u proizvodnji električne energije. Slično tome, korozija u hladnim sustavima i komponentama sigurnosti može ugroziti cjelokupnu sigurnost postrojenja, posebno u nuklearnim elektranama gdje su posljedice otkaza kritičnih sistema potencijalno katastrofalne. Jedan od ključnih pristupa upravljanju rizikom od korozije u energetske sektoru jest održavanje optimalnih uvjeta vode kroz precizno kontroliranje kemijskog sastava vode i pare. To uključuje regulaciju pH vrijednosti, koncentracije kisika i drugih korozivnih tvari unutar sustava. Korištenje odgovarajućih tretmana vode i kemijskih inhibitora korozije može znatno smanjiti rizik od korozije unutar energetskih sustava. Osim toga, izbor materijala igra ključnu ulogu u prevenciji korozije. Razvoj i primjena legura visoke otpornosti na koroziju, uključujući one na bazi nikla, titanija i nehrđajućeg čelika, omogućava konstrukciju kotlova, cijevi i drugih komponenti koje su manje podložne korozivnom napadu. Napredak u inženjerstvu i

površinskoj obradi pruža dodatne mogućnosti za zaštitu opreme u energetskim postrojenjima od korozije.

Maritimna industrija, obuhvaćajući širok spektar aktivnosti od brodogradnje i pomorskog prijevoza do tzv. *offshore* platformi i luka, stalno se suočava s izazovom korozije. Glavni faktor koji doprinosi koroziji u ovom sektoru jest izravna izloženost morskoj vodi, koja sadrži visoke koncentracije soli i drugih korozivnih elemenata u atmosferi visokog saliniteta. Ova izloženost može brzo degradirati metalne komponente plovila i morskih konstrukcija, smanjujući njihovu strukturnu integritet i sigurnost. Kako bi se suprotstavila koroziji, maritimna industrija se oslanja na niz strategija zaštite. Jedna od ključnih metoda je upotreba specijaliziranih boja koje služe kao barijera između metala i korozivnog morskog okoliša. Ove boje često sadrže inhibitore korozije koji usporavaju ili sprečavaju kemijske reakcije koje vode koroziji. Također, tehnološki napredak u razvoju *antifouling* boja pomaže u sprječavanju nakupljanja morskih organizama i obraštaja koji mogu dodatno poticati korozivne procese na površinama brodova i podvodnih struktura. Druga važna strategija je upotreba anoda za katodnu zaštitu. Ove anode, često izrađene od cinka, aluminija ili magnezija, djeluju kao žrtveni materijali koji privlače korozivne procese na sebe, štiteći time konstrukcijske metale. Katodna zaštita je posebno učinkovita u zaštiti podvodnih dijelova brodova, platformi i drugih konstrukcija koje su stalno izložene morskoj vodi.

Dodatno, odabir materijala ima ključnu ulogu u prevenciji korozije. Upotreba legura visoke otpornosti na koroziju, kao što su nehrđajući čelik, legure na bazi nikla i titanij, sve je češća praksa u konstrukciji novih plovila i morskih platformi. Ovi materijali nude dugotrajnu zaštitu u agresivnom morskom okolišu, unatoč njihovoj relativnoj skupoći. S obzirom na sveprisutnost i raznovrsnost korozije u industriji, ključna je interdisciplinarna suradnja stručnjaka iz područja mehaničkog inženjerstva, kemijskog inženjerstva i održavanja kako bi se razvile i implementirale strategije zaštite. Ulaganje u istraživanje i razvoj novih materijala i tehnologija za zaštitu od korozije ne samo da osigurava sigurnost i pouzdanost industrijskih operacija, već također pridonosi održivosti i ekonomskoj efikasnosti industrijskih procesa.

## 2.5. Norme za ispitivanje korozije

U Hrvatskoj, norme i standardi, između ostalih, povezani s ispitivanjem korozije uključuju:

1. HRN EN ISO 9227:2017 - Ova norma specificira postupke za korozivno ispitivanje metala i metalnih površina u kontroliranim uvjetima u laboratorijskim okruženjima. Zamijenjena je s novijom verzijom HRN EN ISO 9227:2022, koja se bavi metodama testiranja korozije metala i metalnih premaza u umjetnim atmosferama.
2. HRN EN ISO 11846:2014 - Ova norma opisuje elektrokemijske metode ispitivanja korozivnosti atmosfere, što uključuje mjerenje korozivnosti atmosfere pomoću elektroda ili drugih elektrokemijskih uređaja. Cilj je ocijeniti utjecaj atmosferskih uvjeta na materijale i površine.
3. HRN EN ISO 10289:2017 - Ova norma se bavi ispitivanjem otpornosti materijala na koroziju u kiselim plinovima, kao što su plinovi koji sadrže sumpor dioksid ili dušikov oksid. Definiira postupke ispitivanja i parametre za procjenu otpornosti materijala na koroziju u takvim okruženjima.
4. HRN EN ISO 3668:2019 - Ova norma se fokusira na vizualnu procjenu površina boja i lakova. Propisuje postupke za ocjenjivanje vizualnih karakteristika površina, uključujući aspekte poput sjaja, glatkoće, homogenosti boje i prisutnosti nedostataka poput mrlja ili nepravilnosti.
5. HRN EN ISO 9223:2013 - Ova norma je zamijenjena s HRN EN ISO 9223:2022, koja detaljnije pristupa klasifikaciji i ispitivanju korozivnosti atmosfera.
6. HRN EN ISO 11130:2019 - Ova norma se odnosi na ispitne metode za određivanje otpornosti metala na koroziju u sumpornoj kiselini, posebno u plinskoj fazi. Plinska faza sumporne kiseline često se koristi za simulaciju atmosferske korozije, pa ova norma pruža smjernice za testiranje materijala u takvim uvjetima.
7. HRN EN ISO 7539-1:2018 - Ova norma opisuje elektrokemijske ispitne postupke za ocjenu korozivnosti metala izloženih atmosferi. Elektrokemijski postupci omogućuju mjerenje parametara poput korozijske brzine, potencijala i polarizacije kako bi se procijenila otpornost metala na atmosfersku koroziju.

8. HRN EN ISO 8407:2009, HRN EN ISO 8406:2010, i HRN EN ISO 8405:2010 - Sve ove norme se bave se principima ispitivanja otpornosti metala na koroziju u različitim sredinama (kisela, neutralna i alkalna).
9. HRN EN ISO 14713-1:2017 i HRN EN ISO 12944-2:2018 - Obje norme se fokusiraju na zaštitu čeličnih konstrukcija s pocinčanim premazom od korozije.
10. HRN EN ISO 6507-1:2018 – Ova norma specificira metodu testa tvrdoće po Vickersu za metalne materijale. Ova norma definira tri različita raspona sile testiranja za provođenje ispitivanja tvrdoće. Vickersov test tvrdoće koristi se za mjerenje otpornosti materijala na penetraciju pod kontroliranim uvjetima, a često se koristi za određivanje tvrdoće kod tvrdih metala i drugih vrsta cementiranih karbida.
11. HRN EN ISO 6892-1:2019 – Ova norma specificira metode za vlačno ispitivanje metalnih materijala pri sobnoj temperaturi i definira mehanička svojstva koja se mogu odrediti.
12. HRN EN ISO 8044:2020 - Norma koja se bavi definiranjem terminologije povezane s korozijom metala i legura. Ova norma obuhvaća širok spektar termina koji se često koriste u znanosti i tehnologiji te pruža dodatna pojašnjenja za neke definicije. Posebno se naglašava primjena pravila IUPAC-a za oznake elektrodnih potencijala, a termin "metal" uključuje legure i druge metalne materijale. Također se spominju termini vezani za neorgansku obradu površine metala.

U Hrvatskoj su norme i standardi povezani s ispitivanjem korozije ključni elementi u osiguravanju kvalitete i trajnosti metalnih materijala i njihovih premaza u raznim industrijskim i okolišnim uvjetima. Spomenute norme, kao što su HRN EN ISO 9227:2022, HRN EN ISO 11846:2014, i HRN EN ISO 8044:2020, predstavljaju samo neke od mnogobrojnih normi koje se bave različitim aspektima korozije, od elektrokemijskog ispitivanja do definicija i terminologije. Naime, ove norme služe za postavljanje metodologija i smjernica za testiranje i procjenu materijala, osiguravajući time njihovu adekvatnu zaštitu i duži vijek trajanja u različitim uvjetima. Precizno definiranje testnih postupaka i parametara omogućuje stručnjacima da efikasno identificiraju potencijalne slabosti materijala i pravovremeno reagiraju na znakove korozije te su sastavni dio

upravljanja kvalitetom u proizvodnji i u kontroli te u rješavanju problema kada do njih dođe.

Važno je napomenuti da, iako su ove norme najčešće primjenjivane u praksi, postoji još mnogo drugih normi koje se detaljno bave specifičnim vidovima korozije i metodama zaštite. Raznolikost i opseg dostupnih normi reflektiraju složenost fenomena korozije te potrebu za kontinuiranim razvojem i prilagodbom standarada kako bi se zadovoljile potrebe različitih industrija i tehnoloških aplikacija. Upravo ova širina i dubina standardizacije čini temelj zaštite materijala i osigurava visoku razinu pouzdanosti i sigurnosti proizvoda i infrastrukture.

### **3. PRIMJERI AKREDITIRANIH ISPITIVANJA KOROZIJE U INDUSTRIJI**

Ovo je poglavlje posvećeno prikazu konkretnih primjera akreditiranih ispitivanja korozije u industriji, ilustrirajući kako se teorijska znanja i norme primjenjuju u stvarnim industrijskim uvjetima. Ova ispitivanja nisu samo neophodna za osiguravanje sigurnosti i pouzdanosti industrijskih postrojenja i opreme, već i za produženje njihova vijeka trajanja te smanjenje troškova održavanja. Akreditirana ispitivanja korozije provode se u skladu s međunarodnim standardima i normama, a provode ih ovlaštena tijela sposobna za procjenu otpornosti materijala i konstrukcija na korozivne utjecaje. Sukladno tome, u ovom će se poglavlju razmotriti tri specifična slučaja:

1. Cijev naftovoda: Ispitivanje korozije na cjevovodu koji transportira naftu, fokusirajući se na integritet materijala u dugotrajnom izloženom okolišu te potencijalne posljedice korozije na sigurnost i efikasnost transporta.
2. Aluminijski profili: Analiza otpornosti aluminijskih profila koji se koriste u građevinskoj industriji na koroziju, s posebnim naglaskom na primjene gdje je izloženost korozivnim uvjetima izraženija.
3. Cijev rashladnog sustava termoelektrane: Studija slučaja koja ispituje koroziju u rashladnim sustavima termoelektrana koje koriste morsku vodu, razmatrajući kako korozija utječe na efikasnost i sigurnost rada postrojenja.

Kroz ove primjere biti će prikazane specifične metode ispitivanja korozije, materijali koji su podložni ispitivanju, te mjere koje se poduzimaju za zaštitu od korozije. Također, istražit će se kako akreditirana ispitivanja pružaju vjerodostojne podatke koji omogućuju industrijskim subjektima da donose informirane odluke vezane uz materijale, dizajn i održavanje svojih sustava i opreme. Rezultati istraživanja daju i smjernice kako poboljšati sustave upravljanja kvalitetom u industriji. Izveštaji o ispitivanju specifičnih industrijskih problema (oštećenja) uzrokovanih korozijom u svrhu analize u ovom radu ustupljeni su od Centra za istraživanje METRIS Istarskog veleučilišta.

### **3.1. Cijev naftovoda**

Ispitivanje provedeno na cijevi naftovoda za imalo je za cilj detaljnu analizu korozivnog utjecaja na metalnu konstrukciju. U svrhu istraživanja, primijenjene su različite metode koje uključuju:

1. Optičku emisijsku spektrometriju s metodom tinjajućeg izboja (GDS) za određivanje kemijskog sastava metala i legura, što je omogućilo identifikaciju i kontrolu kemijskog sastava materijala te ispitivanje sukladnosti s certifikatom.
2. Vlačno ispitivanje pri sobnoj temperaturi prema HRN EN ISO 6892-1:2019, kojim se određuju mehanička svojstva materijala, kao što su čvrstoća i duktilnost, što je ključno za razumijevanje kako korozija utječe na strukturni integritet cijevi te služi dodatno za ispitivanje kvalitete materijala.
3. EDS mikroanalizu i SEM analizu površine, koje su omogućile vizualizaciju i kemijsku analizu korozivnih naslaga (produkata korozije) i udubljenja na površini cijevi. Ove analize pružaju uvid u distribuciju i koncentraciju korozivnih elemenata na i ispod površine metala.
4. Ispitivanje tvrdoće i mikrotvrdoće prema Vickersu prema HRN EN ISO 6507-1:2018, koje daje informacije o promjenama u tvrdoći materijala koje mogu biti rezultat korozivnih procesa.
5. Metalografsko snimanje svjetlosnim mikroskopom za proučavanje mikrostrukture metala i utvrđivanje promjena uzrokovanih korozijom.

Analiza korozije na cijevima naftovoda izvedena primjenom akreditiranih metoda ispitivanja istaknula je složenost i raznolikost korozivnih procesa koji utječu na metalne strukture u industriji naftovoda. Detaljna EDS (*Energy-dispersive X-ray spectroscopy*) analiza pružila je uvid u heterogeni kemijski sastav korozivnih naslaga, ističući varijacije u koncentraciji elemenata poput željeza, sumpora i klora na različitim područjima uzorka. Ove varijacije su indikativne za lokaliziranu koroziju, koja se može manifestirati kao pitting ili jamičasta korozija, posebno opasne forme zbog svoje tendencije da izazivaju neočekivane materijalne otkaze.

SEM (*Scanning Electron Microscopy*) analiza omogućila je vizualizaciju mikroskopskih korozivnih oštećenja s visokom razlučivošću. Detekcija mikro udubljenja i pukotina na površini metala, kao i identifikacija promjena u teksturi i morfologiji korozivnih naslaga, potvrdila je prisutnost agresivnih korozivnih procesa koje potiče okruženje naftovoda. Metalografske analize, koje su uključivale promatranje mikrostrukture materijala pod svjetlosnim mikroskopom, dodatno su potvrdile promjene u mikrostrukтури uzrokovane korozijom, uključujući degradaciju i transformaciju ferita i perlita, što ukazuje na smanjenje mehaničkih svojstava materijala. Ispitivanja su također obuhvatila vlačna ispitivanja koja su provedena prema normi HRN EN ISO 6892-1:2019, koja su omogućila procjenu čvrstoće materijala i njegovu sposobnost da izdrži mehanička naprezanja bez oštećenja. Rezultati su ukazali na potencijalno oslabljenu strukturnu integritet cijevi uslijed korozije, što može imati ozbiljne posljedice na sigurnost i pouzdanost cjevovoda.

Ovo istraživanje naglašava kritičnu ulogu akreditiranih metoda ispitivanja u otkrivanju i karakterizaciji korozivnih procesa unutar naftne industrije. Primjena ovih metoda pruža temeljne podatke potrebne za razvoj efikasnih strategija prevencije i kontrole korozije, uključujući odabir materijala otpornih na koroziju, dizajn i implementaciju zaštitnih premaza i katodne zaštite, te prilagodbu operativnih procedura. Kroz mjeriteljstvo i upravljanje kvalitetom prema relevantnim normama, industrija naftovoda može osigurati dugoročnu održivost svoje infrastrukture, štiteći tako okoliš i osiguravajući kontinuitet opskrbe energentima.



### 3.2. Alumijski profili

Istraživanje korozije alumijskih profila koje je provedeno u laboratoriju, bilo je usmjereno na detaljnu analizu nastanka bijele korozije koja se pojavljuje tijekom skladištenja i transporta. Ova pojava, iako česta u industriji obrade metala, predstavlja ozbiljan problem zbog svoje sposobnosti da znatno naruši estetiku i funkcionalnost alumijskih proizvoda. U sklopu ovog istraživanja, analizirano je sedam uzoraka metalnih limova koristeći naprednu tehnologiju FE SEM (*Field Emission Scanning Electron Microscopy*) uz EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*) mikroanalizu. Ove su tehnike omogućile određivanje elementarnog kemijskog sastava korozivnih naslaga i identifikaciju ključnih elemenata koji doprinose koroziji.

Primarna motivacija za ovo ispitivanje bila je potreba za identifikacijom uzročnika bijele korozije na alumijskim profilima, osobito nakon njihove izloženosti različitim emulzijama tijekom procesa obrade. Cilj je bio detektirati i analizirati kritične faktore koji pridonose korozivnim procesima kako bi se razvile učinkovite strategije zaštite i prevencije, osiguravajući time kvalitetu i integritet alumijskih komponenti.

Istraživanje je obuhvaćalo niz koraka, uključujući pripremu uzoraka i fotografiranje uzoraka prije i nakon pripreme za analizu. Ovo je omogućilo vizualnu dokumentaciju stanja materijala u različitim fazama ispitivanja. Zatim je uslijedila EDS mikroanaliza, koja je provedena na površini limova kako prije tako i nakon korozije, identificirajući promjene u kemijskom sastavu koje su se dogodile tijekom procesa korozije. Korištenje SEM-a dodatno je omogućilo detaljnu vizualizaciju strukturnih promjena na mikroskopskoj razini, dajući uvid u morfologiju i rasprostranjenost korozivnih naslaga. Primijenjene metode i tehnike:

1. RU-SEM/EDS-1/0-1/2019:\* EDS mikroanaliza kemijskog sastava čvrstih materijala s pomoću FE SEM-a, omogućujući detaljnu analizu elemenata prisutnih u koroziji.
2. SEM analiza: Vizualizacija mikrostrukture i korozivnih naslaga, ključna za razumijevanje morfologije korozije i procjenu njezina utjecaja na materijal.

EDS mikroanaliza pokazala je varijacije u masenim udjelima ključnih elemenata na površini aluminijskih limova, što je indiciralo na prisutnost heterogenih korozivnih procesa.

Analiza elemenata i njihov utjecaj:

1. Cink (Zn): Dominantan element u površinskim slojevima, cink služi kao zaštitni sloj za aluminijske profile. Međutim, varijacije u masenim udjelima cinka ukazuju na neuniformno trošenje zaštitnog sloja, što može biti posljedica lokalizirane korozije.
2. Klor (Cl) i Natrij (Na): Prisutnost klora i natrija na površini uzoraka sugerira da soli, koje su vjerojatno prenesene s emulzijama tijekom obrade ili iz okoliša tijekom skladištenja i transporta, igraju ključnu ulogu u akceleraciji korozivnih procesa. Te soli mogu djelovati kao elektroliti, potičući galvansku koroziju.
3. Kisik (O): Povećanje koncentracije kisika na površini može ukazivati na formaciju oksida i hidroksida metala, što je tipično za proces oksidacije i korozije.
4. Željezo (Fe): Iako u manjim količinama, prisutnost željeza na površini aluminijskih profila može ukazivati na koroziju čeličnih komponenata u blizini ili na kontaminaciju tijekom proizvodnog procesa.

SEM analize otkrile su mikrostrukturne promjene karakteristične za koroziju, uključujući prisutnost korozivnih naslaga i formiranje mikro udubljenja na površini aluminijskih profila. Ovi udubljeni dijelovi predstavljaju područja gdje je zaštitni sloj cinka bio najviše narušen, što dovodi do izravnog izlaganja osnovnog aluminijskog materijala korozivnom okolišu. Temeljem ovih nalaza, ključno je razviti i implementirati strategije prevencije korozije koje uključuju:

1. Optimizaciju sastava emulzija kako bi se smanjila prisutnost korozivnih soli.
2. Poboljšanje postupaka čišćenja i sušenja nakon obrade emulzijama da se minimizira ostatak soli.
3. Razvoj i primjenu naprednijih površinskih tretmana koji pružaju bolju zaštitu od korozije, uključujući poboljšane zaštitne premaze i pasivacijske slojeve.
4. Redovitu inspekciju i održavanje aluminijskih profila tijekom skladištenja i transporta kako bi se izbjeglo nakupljanje štetnih tvari.

Kroz detaljno razumijevanje korozivnih mehanizama, kao i utjecaja procesnih materijala i okolišnih uvjeta, moguće je razviti učinkovite mjere za smanjenje rizika od korozije. Ovo istraživanje ističe važnost akreditiranih metoda ispitivanja u identifikaciji, analizi i razumijevanju korozivnih procesa. Primjena međunarodno priznatih normi i standarda osigurava visoku razinu pouzdanosti i usporedivosti rezultata. Mjerenje i upravljanje kvalitetom putem akreditiranih normi omogućuje proizvodnim poduzećima optimizaciju procesa obrade, skladištenja i transporta, minimizirajući rizike od korozije i osiguravajući dugovječnost svojih proizvoda. Kroz pridržavanje strogo definiranih protokola i standarda, moguće je sustavno adresirati problem korozije, razvijajući učinkovite metode zaštite koje doprinose održivosti i pouzdanosti aluminijskih konstrukcija.

### **3.3. Cijev rashladnog sustava termoelektrane**

Istraživanje korozije na cijevi rashladnog sustava u termoelektrani provedeno je kako bi se analizirale karakteristike korozije koje su dovele do perforacije cijevi izrađene od legure CuZn20Al2As. Cilj je bio identificirati uzroke korozije, razumjeti mehanizme njezinog nastanka i razviti mjere za njeno suzbijanje. Ovo je od izuzetne važnosti za osiguravanje sigurnosti i pouzdanosti rada termoelektrane, kao i za smanjenje troškova održavanja i popravka. Ispitivanje je obuhvatilo nekoliko ključnih metoda:

1. Određivanje kemijskog sastava metala i legura pomoću optičkog emisijskog spektrometra i EDS mikroanalize, koje su omogućile identifikaciju elemenata prisutnih na površini cijevi i unutar korozivnih naslaga.
2. Ispitivanje mikrotvrdoće prema HRN EN ISO 6507-1:2018, pružajući uvid u promjene mehaničkih svojstava materijala uslijed korozije.
3. Metalografska analiza, koja je razotkrila mikrostrukturne promjene u materijalu, uključujući pojavu transgranularne korozije koja napreduje kroz granice zrna.
4. FT-IR spektroskopija, koja je analizirala kemijski sastav naslaga na cijevi, ukazujući na prisutnost materijala koji mogu potjecati iz rashladne morske vode.

Rezultati ispitivanja otkrili su složene mehanizme korozije, uključujući lokaliziranu koroziju koja se manifestira kroz pitting i transgranularnu koroziju. Otkrivene su naslage koje su sadržavale elemente poput bakra, cinka, kisika i sumpora, a koje su vjerojatno doprinijele korozivnom procesu.

Dubinska analiza korozije na cijevima rashladnog sustava termoelektrane razotkrila je složene mehanizme korozije, koji uključuju lokaliziranu koroziju manifestiranu kroz pitting i transgranularnu koroziju. Identificirane naslage koje sadrže elemente poput bakra, cinka, kisika i sumpora sugeriraju da su specifični kemijski sastojci prisutni u rashladnoj vodi igrali ključnu ulogu u ubrzavanju korozivnih procesa. Ovi nalazi ističu značaj kontroliranih okolišnih uvjeta i kemijskog sastava materijala u prevenciji korozije. Kompleksnost mehanizama korozije i njihove implikacije:

1. Lokalizirana korozija, posebno pitting, posebno je zabrinjavajuća zbog svoje sposobnosti da stvara duboke šupljine koje mogu ozbiljno narušiti strukturni integritet metala bez vidljivih vanjskih znakova oštećenja.
2. Transgranularna korozija, koja napada granice zrna metala, dodatno oslabljuje strukturu materijala na mikroskopskoj razini, čineći ga podložnim pucanju pod mehaničkim stresom.

Ova istraživanja naglašavaju potrebu za rigoroznim nadzorom radnih parametara rashladnog sustava, uključujući temperaturu i brzinu protoka rashladne vode, kako bi se minimizirala mogućnost nastanka korozije. Specifični uvjeti, poput stagnacije vode ili visokih temperatura, mogu stvoriti idealne uvjete za korozivne procese, stoga je ključno održavati optimalne operativne uvjete. Kao odgovor na identificirane izazove, predložene su specifične mjere za suzbijanje korozije, uključujući:

1. Primjena željeznog sulfata: Ova metoda ima za cilj formiranje zaštitnog sloja na unutarnjim površinama cijevi, djelujući kao barijera protiv korozivnih agenasa. Zaštitni sloj smanjuje izravni kontakt između metala i korozivnih elemenata u vodi, time smanjujući stopu korozije.
2. Korištenje biocida: Mikrobiološki inducirana korozija (MIC) predstavlja značajan izazov u rashladnim sustavima u kojima se koristi morska voda, gdje

mikroorganizmi mogu poticati koroziju kroz različite mehanizme, uključujući proizvodnju korozivnih metabolita. Primjena biocida može kontrolirati rast i širenje mikroorganizama, smanjujući rizik od MIC-a.

Ove mjere, zajedno s detaljnijim praćenjem i kontrolom operativnih parametara, formiraju sveobuhvatan pristup upravljanju korozijom. Implementacija ovih strategija zahtijeva kontinuiranu evaluaciju i prilagodbu temeljenu na promjenjivim uvjetima operacije i okoliša, što naglašava važnost integriranog pristupa upravljanju kvalitetom i normama. Kroz akreditirane metode ispitivanja i stroge protokole upravljanja kvalitetom, moguće je osigurati sigurnost i pouzdanost rashladnih sustava u energetskom sektoru, minimizirajući ekonomske gubitke povezane s korozijom i produljujući vijek trajanja ključne infrastrukture.

#### **4. RASPRAVA**

Analiza korozije na cijevima rashladnog sustava termoelektrane, aluminijskim profilima i cijevi naftovoda primjeri su kako akreditirana ispitivanja korozije mogu osigurati ključne uvide u mehanizme korozije, njezine uzroke i potencijalne mjere za suzbijanje. Ova ispitivanja, provedena u skladu s međunarodnim standardima i normama, odražavaju važnost mjerenja, upravljanja kvalitetom i akreditacije u industrijskim aplikacijama.

Akreditirana ispitivanja korozije predstavljaju iznimnu važnost i ključna su za industrijske subjekte jer donose objektivne, pouzdane i usporedive podatke o otpornosti materijala i konstrukcija na korozivne utjecaje. Takva ispitivanja provode se u laboratorijima koji su ovlašteni potvrdama o akreditaciji, što osigurava da se postupci provode prema najvišim standardima kvalitete. Kroz ove postupke, moguće je identificirati specifične uzroke korozije, razumjeti složene mehanizme njezinog nastanka i razviti učinkovite strategije zaštite. Prema tome, akreditirana ispitivanja podupiru industrijske odluke kroz:

1. Razumijevanje i prevenciju korozije: Detaljna analiza kemijskog sastava, mikrostrukture i mehaničkih svojstava materijala omogućuje industrijskim subjektima da razumiju kako specifični uvjeti okoline i radni parametri pridonose koroziji.

Primjerice, u slučaju termoelektrane, ispitivanje je otkrilo da kombinacija bakra, cinka, kisika i sumpora u naslagama doprinosi lokaliziranoj koroziji. Takvo znanje omogućuje razvoj ciljanih mjera za prevenciju korozije, uključujući odabir materijala otpornih na koroziju i prilagodbu procesa.

2. Osiguravanje sigurnosti i pouzdanosti: Korozija može značajno oslabiti strukturni integritet materijala, čime se povećava rizik od otkaza opreme i potencijalnih nesreća. Akreditirana ispitivanja omogućuju pravovremeno otkrivanje korozivnih oštećenja i implementaciju mjera zaštite, čime se osigurava sigurnost i pouzdanost industrijskih postrojenja i infrastrukture.
3. Smanjenje troškova održavanja: Razumijevanje mehanizama korozije i primjena učinkovitih strategija prevencije mogu znatno smanjiti potrebu za čestim održavanjem i popravcima, čime se smanjuju ukupni troškovi održavanja. U slučaju aluminijskih profila, primjena naprednijih površinskih tretmana i optimizacija procesa obrade mogu pomoći u smanjenju pojave bijele korozije, produžujući vijek trajanja proizvoda.
4. Upravljanje kvalitetom i normama: Provedba akreditiranih ispitivanja korozije odražava predanost industrijskih subjekata visokim standardima kvalitete. To ne samo da poboljšava pouzdanost i dugovječnost proizvoda, već i jača povjerenje među potrošačima i partnerima. Uspostavljanje i održavanje mjerenja kvalitete kroz akreditirane norme temelj su za održivo poslovanje i konkurentnost na tržištu.

Akreditirana ispitivanja korozije predstavljaju nezamjenjiv alat u rukama industrijskih subjekata, omogućavajući im znanstveni pristup problemu korozije, razvijanje učinkovite strategije zaštite i osiguranje visoke razine sigurnosti i pouzdanosti svojih proizvoda i usluga. Kroz strogo upravljanje kvalitetom i poštovanje međunarodnih normi i standarda, industrije mogu ne samo zaštititi svoju infrastrukturu i proizvode, već i doprinijeti održivosti i zaštiti okoliša, dok istovremeno smanjuju troškove i osiguravaju zadovoljstvo krajnjih korisnika.

## 5. ZAKLJUČAK

Ovaj rad detaljno je istražio kompleksnost mehanizama korozije koji utječu na različite industrijske sektore, uključujući naftne cjevovode, aluminijske profile u građevinarstvu i rashladne sustave termoelektrana. Kroz teorijski okvir i praktična akreditirana ispitivanja, razotkriveni su ključni čimbenici koji doprinose koroziji, kao i strategije za njihovo suzbijanje. Rad je potvrdio početne hipoteze o važnosti sveobuhvatnog pristupa u prevenciji korozije i potrebi za kontinuiranim istraživanjem u ovom području. Osim što otkriva složenost problema korozije u industrijskoj infrastrukturi, ovo istraživanje ističe važnost primjene odgovarajućih tehnika i metoda kako bi se uspješno upravljalo i kontroliralo negativne posljedice korozije. Osnovna spoznaja proizlazi iz dubinskog istraživanja koje je identificiralo ključne izazove s kojima se susreću industrijska postrojenja, poput naftovoda, građevinskih aluminijskih profila i rashladnih sustava termoelektrana, te je istaknuto kako se tim problemima može učinkovito upravljati.

Akreditirana ispitivanja su se pokazala ključnima, jer su omogućila precizno identificiranje specifičnih mehanizama korozije koji djeluju na različite materijale i komponente. Kroz upotrebu različitih tehnika analize, poput optičke emisijske spektrometrije, EDS mikroanalize, SEM analize i ispitivanja tvrdoće, istraživači su mogli dublje proniknuti u prirodu korozije te razumjeti njezine različite oblike i uzroke.

Jedna od ključnih spoznaja ovog istraživanja je potvrda da je interdisciplinarni pristup neophodan za potpuno razumijevanje korozivnih procesa i učinkovitu borbu protiv njih. Uključivanjem znanja iz područja kemije, materijalne znanosti i inženjerstva, istraživači su bili u mogućnosti sagledati koroziju s različitih perspektiva, što je rezultiralo dubljim uvidima i kreativnijim pristupima u razvoju preventivnih i zaštitnih mjera. Stoga, ovo istraživanje ne samo da naglašava ozbiljnost problema korozije u industrijskim aplikacijama, već i pruža konkretne smjernice za razvoj strategija prevencije i zaštite. Osim toga, ističe se važnost daljnjeg istraživanja kako bi se nastavilo unapređivanje metoda identifikacije, praćenja i suzbijanja korozije, čime će se osigurati dugoročna održivost industrijske infrastrukture.

Daljnje istraživanje trebalo bi se usmjeriti na razvoj novih materijala i premaza otpornih na koroziju, kao i na optimizaciju postojećih procesa obrade i zaštite. Posebno je važno istražiti utjecaj okolišnih faktora na brzinu i intenzitet korozivnih procesa, kako bi se razvile preciznije i učinkovitije strategije zaštite. Osim toga, predlaže se i širenje primjene biocida i drugih kemikalija koje mogu pomoći u smanjenju mikrobiološki inducirane korozije, posebno u rashladnim sustavima i naftnim cjevovodima.

Praktični doprinosi ovog rada leže u razumijevanju složenosti korozije i njezinom utjecaju na industrijsku sigurnost i efikasnost. Predložene mjere zaštite mogu pomoći industrijskim subjektima u smanjenju troškova održavanja i popravaka, kao i u produljenju vijeka trajanja opreme i infrastrukture. Implementacija akreditiranih ispitivanja u redovite postupke održavanja i kontrolu kvalitete može značajno doprinijeti očuvanju materijalnih i ljudskih resursa.

U zaključku, ovaj rad potvrđuje važnost kontinuiranog istraživanja i inovacija u području prevencije korozije. Kroz primjenu interdisciplinarnog pristupa i najnovijih tehnoloških dostignuća, moguće je ne samo suočiti se s izazovima korozije već i unaprijediti sigurnost, pouzdanost i održivost industrijskih procesa, a mjesto tim procedurama je upravo uključivanje u sustav upravljanja kvalitetom te u postupke planiranja, donošenja ciljeva, analize rizika i prilika, postupke kontrole i održavanja i slično. Osim važnosti upravljanja kvalitetom i akreditacije prema HRN EN ISO/IEC 17025 kada do korozije jednom dođe te se traži uzrok i rješenje, prevenciju treba tražiti kroz sustav upravljanja kvalitetom u proizvodnji koji problem korozije treba uvrstiti u sve procedure, jer su materijalne štete koje korozija može prouzročiti zaista značajne gotovo u svakom proizvodnom pogonu.



## LITERATURA

1. Alar, V. (2015). *Kemijska postojanost metala*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
2. Ashby, M. F. i Jones, D. R. H. (2002). *Engineering Materials 1; an introduction to their properties & applications*. Butterworth Heineman: Oxford.
3. Davis, J. R. (2000). *Corrosion: Understanding the Basics*. Almere, Netherlands: ASM International.
4. Davis, J. R. (2008). *Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys*. Almere, Netherlands: ASM International.
5. Esih, I.; Dugi, Z. (1990). *Tehnologija zaštite od korozije*. Zagreb: Školska knjiga.
6. Fontana, M. i Greene, N. (1986). *Corrosion engineering*. New York: McGraw-Hill.
7. Group of Authors (2003). *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. *ASM International*, Vol. 13a., str. 2-2957.
8. Juraga, I., Alar, V., Šimunović, V. i Stojanović, I. (2022). *Korozija i metode zaštite od korozije*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje.
9. Jones, D. A. (1996). *Principles and prevention of corrosion*. New Jersey: Prentice Hall.
10. Koch, G. H., Brongers, M. P. H., Thompson, N. G., Virmani, Y. P. i Payer, J. H. (2002). *Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States, FHWA-RD-01-156*, Washington D.C.: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
11. Marcus, P. (2003). *Introduction to the Fundamentals of Corrosion*, *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. *ASM International*, Vol. 13a, str. 3-4.
12. Melchers, R.E., i Jeffrey, R. (2003). *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*. London: Taylor & Francis.
13. Revie, R. W. i Uhlig, H. H. (2008). *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons.

14. Roberge, P. R. (2000). Handbook of Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill.
15. Smoljan, B., Iljkić, D., Pomenić, L. (2015). Mathematical modelling and computer simulation of steel quenching. Proceedings of the 24th International Conference on Metallurgy and Materials Brno, Češka Republika, 2015. str. - (poster, međunarodna recenzija, cjeloviti rad (in extenso), znanstveni).

## POPIS SLIKA

Slika 1. Odvlaživač zraka u radu unutar zatvorenog prostora (lijevo) i dva dizajna konstrukcije s fokusom na upravljanje vodom (desno) .....	8
Slika 2. Pasivna katodna zaštita (gore) i aktivna katodna zaštita (dolje) .....	10
Slika 3. Komad metala s jednoličnom korozijom .....	12
Slika 4. Dva metala u kontaktu u prisutnosti elektrolita, što dovodi do galvanske korozije. Jeden metal, anoda, jasno pokazuje znakove korozije dok drugi metal, katoda, ostaje uglavnom nekorodiran .....	13
Slika 5. Interkristalna korozija na nehrđajućem čeliku .....	15