

# Korozijska otpornost metala za kuhinjsko posuđe

---

**Pintarić, Domagoj**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:535317>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-23**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Domagoj Pintarić**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Ivan Stojanović, dipl. ing.

Student:

Domagoj Pintarić

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru izv. prof. dr. sc. Ivanu Stojanoviću na savjetovanju, strpljenju i uloženom trudu. Također se zahvaljujem svim članovima Katedre za zaštitu materijala za pruženu pomoć i stručnim savjetima. Nadalje zahvaljujem se svojim prijateljima i kolegama na podršci te svojim sustanarima Toniju, sestri Nikolini i djevojci Mili na pomoći i savjetima tokom pisanja rada.

Na kraju, zahvaljujem se svojoj majci Davorki i ocu Danijelu koji su mi pružili najveću podršku tokom studiranja. Bez njih ne bih mogao završiti studij.

Domagoj Pintarić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Domagoj Pintarić** JMBAG: 0035208087

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Korozivna otpornost metala za kuhinjsko posuđe**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Corrosion resistance of different cookware metals**

Opis zadatka:

Zbog svoje inertnosti kod pripreme i čuvanja hrane, te postojanosti na visoke temperature, metali su danas neizostavan materijal kad je u pitanju kuhinjsko posuđe, ali i aparati u domaćinstvu. Ipak, uvijek postoji mogućnost pojave korozije i migracije metalnih iona u hranu. Danas se sve više koristi nehrđajući čelik, koji je otporan na korozivno djelovanje različitih medija što omogućava pripremu i čuvanje hrane različitih pH vrijednosti.

U radu je potrebno prikazati korozivna svojstva različitih metala koji se koriste za izradu posuda za pripremu i čuvanje hrane, te obraditi metode zaštite s naglaskom na prevlake emajla i teflona. Posebno obraditi vrste i korozivna svojstva nehrđajućeg čelika koji se primjenjuju za izradu posuda i pribora za jelo. Opisati područje primjene, smjernice za odabir, te prednosti i nedostatke. Prikazati primjere korozivnih oštećenja koja se javljaju na nehrđajućem čeliku kod pripreme hrane.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je osmisliti i u simuliranim laboratorijskim uvjetima ispitati postojanost različitih vrsta metala u kontaktu s otopinama koje će predstavljati kisele i lužnate prehrambene namirnice. U zaključku je potrebno kritički se osvrnuti na rezultate i dati preporuku za odabir materijala.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

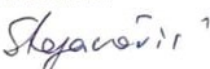
9. svibnja 2024.

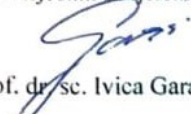
11. srpnja 2024.

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

  
Izv. prof. dr. sc. Ivan Stojanović

  
Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY .....	IX
1. UVOD.....	1
2. KOROZIJA.....	2
3. KOROZIJA U KUHINJSKOM OKRUŽENJU .....	5
3.1. Opća korozija .....	5
3.2. Rupičasta korozija.....	6
3.3. Galvanska korozija.....	7
3.4. Napetosna korozija.....	8
4. METALI U KUHINJI.....	10
4.1. Aluminiij .....	10
4.1.1. Aluminijeve legure.....	11
4.1.1.1. Serija 1000 .....	12
4.1.1.2. Serija 3000 .....	13
4.1.1.3. Serija 5000 .....	13
4.2. Lijevano željezo .....	14
4.3. Nehrđajući čelik .....	15
4.3.1. Vrste nehrđajućih čelika.....	16
4.3.2. Austenitni nehrđajući čelici .....	18
4.3.3. Nehrđajući čelici AISI 304 i AISI 316.....	20
4.3.4. Utjecaj nikla i kroma kod kuhinjskog posuđa od nehrđajućeg čelika.....	22
4.3.5. Korozijska oštećenja u pripremi hrane.....	23
4.4. Bakar .....	25
5. PREVLAKE ZA POSUĐE.....	26

---

5.1. Anodizirani aluminiј	26
5.2. Porculanski emajl na metalu	27
5.3. Neprijanjajuće prevlake	27
5.3.1. Toksičnost PTFE prevlaka	29
5.3.2. Degradacija PTFE prevlaka	31
6. ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJSKA ISPITIVANJA	32
6.1. Elektrokemijska korozija ispitivanja s istosmjernom strujom	32
6.1.1. Potencijal otvorenog strujnog kruga	33
6.1.2. Linearna polarizacija	34
6.1.3. Tafelova ekstrapolacija	35
7. EXPERIMENTALNI DIO	38
7.1. Korištena oprema	38
7.1.1. Princeton Applied Research Model 273A	38
7.1.2. Elektrokemijska ćelija i elektrode	39
7.2. Kemijski sastav ispitanih materijala i elektrolita	39
7.3. Pripremanje uzorka	41
7.4. Određivanje korozijskog potencijala u otvorenom strujnom krugu	42
7.5. Određivanje polarizacijskog otpora metodom linearne polarizacije	48
7.6. Određivanje gustoće korozijske struje i brzine korozije metodom Tafelove ekstrapolacije	54
7.7. Snimanje površina uzorka pomoću mikroskopa	62
8. ZAKLJUČAK	66
9. LITERATURA	67

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Vrste korozije prema obliku i mjestu razaranja [2].....	2
Slika 2. Skica opće korozije [7] .....	5
Slika 3. Skica rupičaste korozije [3].....	7
Slika 4. Skica galvanske korozije [7] .....	7
Slika 5. Širenje pukotina kod napetosne korozije [4].....	9
Slika 6. Aluminijski lonac [9] .....	10
Slika 7. Aluminijski diskovi serije 1000 [13] .....	12
Slika 8. Limenke od aluminija serije 3004 [16] .....	13
Slika 9. Korodirana posuda od lijevanog željeza [19] .....	15
Slika 10. Presjek troslojnog dna lonca od nehrđajućeg čelika [21] .....	16
Slika 11. Prikaz Schafflerovog strukturnog dijagrama [26].....	18
Slika 12. Prikaz mikrostrukture austenita [29].....	19
Slika 13. razredi austenitnih nehrđajućih čelika [30].....	19
Slika 14. Zakovicama spojena klasična tava od nehrđajućeg čelika [34] .....	20
Slika 15. Strojno zaobljavanje rubova isprešanog dijela duboke tave od nehrđajućeg čelika [33] .....	21
Slika 16. Korozijsko trošenje kuhinjskih noževa od nehrđajućeg čelika ispitivanjem u slanoj komori (Laboratorij za zaštitu materijala, FSB).....	24
Slika 17. Pojava rupičaste korozije na površini posuđa od nehrđajućeg čelika.....	24
Slika 18. Bakrena posuda obložena kositrom [37].....	25
Slika 19. Stvaranje mrlja i diskoloracija na posuđu od anodiziranog aluminija zbog kuhanja na previsokoj temperaturi [10] .....	26
Slika 20. Pukotina na emajliranom metalnom loncu [40].....	27
Slika 21. Neprijanjajući PTFE premaz u praktičnoj primjeni [43] .....	28
Slika 22. Skica elektrokemijske ćelije [49].....	33
Slika 23. Određivanje korozijskog potencijala metodom otvorenog strujnog kruga [50] .....	34
Slika 24. Određivanje vrijednosti polarizacijskog otpora [48] .....	35
Slika 25. Prikaz Tafelove ekstrapolacije [51] .....	37



Slika 26. Uređaj Princeton Applied Research Model 273A spojen na upravljačko računalo..	38
Slika 27. Elektrokemijska ćelija tijekom ispitivanja.....	39
Slika 28. Uređaj XRF- Olympus DS 2000-C koji je korišten za ispitivanje kemijskog sastava ispitnih uzoraka te primjer njegovog korištenja .....	40
Slika 29. Pripremljeni ispitni uzorci.....	41
Slika 30. Dijagrami određivanja korozijskog potencijala za ispitne uzorke u običnoj vodi i destiliranoj otopini 0,4% NaCl.....	42
Slika 31. Dijagrami određivanja korozijskog potencijala za ispitne uzorke u destiliranim otopinama 3,5% i 5,0% NaCl.....	43
Slika 32. Dijagrami određivanja korozijskog potencijala za ispitne uzorke u razrijeđenom soku od rajčice sa vodom 1:1 i u bademovom mlijeku.....	44
Slika 33. Graf odnosa rezultata korozijskog potencijala različitih uzoraka za različiti elektrolit .....	45
Slika 34. Dijagrami određivanja korozijskog potencijala za ispitni uzorak AISI 304 za sve ispitane elektrolite .....	46
Slika 35. Dijagrami određivanja korozijskog potencijala za ispitni uzorak AISI 316 za sve ispitane elektrolite .....	47
Slika 36. Dijagrami određivanja korozijskog potencijala za ispitni uzorak AA 3004 za sve ispitane elektrolite .....	47
Slika 37. Dijagrami linearne polarizacije za običnu vodu i destiliranu otopinu 0,4% NaCl ...	48
Slika 38. Dijagrami linearne polarizacije za destiliranu otopinu 3,5% i 5,0% NaCl.....	49
Slika 39. Dijagrami linearne polarizacije za razrijeđeni sok od rajčice sa vodom 1:1 i bademovom mlijekom.....	50
Slika 40. Graf odnosa rezultata polarizacijskih otpora različitih uzoraka za različiti elektrolit .....	51
Slika 41. Dijagrami linearne polarizacije za ispitni uzorak AA 3004 za sve ispitane elektrolite .....	52
Slika 42. Dijagrami linearne polarizacije za ispitni uzorak AISI 316 za sve ispitane elektrolite .....	53
Slika 43. Dijagrami linearne polarizacije za ispitni uzorak AISI 304 za sve ispitane elektrolite .....	53

Slika 44. Dijagrami Tafelove ekstrapolacije za običnu vodu i destiliranu otopinu 0,4% NaCl .....	54
Slika 45. Dijagrami Tafelove ekstrapolacije za destiliranu otopinu 3,5% i 5,0% NaCl .....	55
Slika 46. Dijagrami Tafelove ekstrapolacije za razrijeđeni sok od rajčice sa vodom 1:1 i bademovom mlijekom .....	56
Slika 47. Graf odnosa rezultata brzine korozije različitih uzoraka za različiti elektrolit .....	58
Slika 48. Graf odnosa rezultata gustoće korozijske struje različitih uzoraka za različiti elektrolit .....	58
Slika 49. Dijagrami Tafelovih ekstrapolacija za ispitni uzorak AA 3004 za sve ispitane elektrolite .....	60
Slika 50. Dijagrami Tafelovih eksploatacija za ispitni uzorak AISI 316 za sve ispitane elektrolite .....	60
Slika 51. Dijagrami Tafelovih ekstrapolacija za ispitni uzorak AISI 304 za sve ispitane elektrolite .....	61
Slika 52. Stereomikroskop Leica MZ6 spojen na upravljačko računalo .....	62
Slika 53. Snimke ispitnih uzoraka testiranih u običnoj vodi i destiliranoj otopini 0,4% NaCl .....	63
Slika 54. Snimke ispitnih uzoraka testiranih u destiliranoj otopini 3,5% i 5,0% NaCl .....	64
Slika 55. Snimke ispitnih uzoraka testiranih u razrijeđenom soku od rajčice i bademovom mlijeku .....	65

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Značajke aluminijske serije [12] .....	11
Tablica 2. Prikaz karakteristika različitih vrsta nehrđajućih čelika ovisno o njihovoj mikrostrukturi [24] .....	17
Tablica 3. Promjene PTFE prevlake pri različitim temperaturama.....	30
Tablica 4. Kemijski sastavi ispitnih uzoraka čelika .....	40
Tablica 5. Kemijski sastav ispitnog uzorka aluminijske serije.....	40
Tablica 6. Prikaz pH vrijednosti i saliniteti ispitnih elektrolita.....	41
Tablica 7. Rezultati mjerenja korozivnog potencijala za ispitne uzorke.....	45
Tablica 8. Rezultati polarizacijskih otpora za grafove linearne polarizacije .....	51
Tablica 9. Rezultati dobiveni metodom Tafelove ekstrapolacije za navedene materijale .....	57

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$E_{kor}$	mV	Korozijski potencijal
$E_{ok}$	mV	Potencijal otvorenog strujnog kruga
$R_p$	$\Omega$	Polarizacijski otpor
$j_{kor}$	A/m <sup>2</sup>	Gustoća korozijske struje
$v_{kor}$	Mm/god	Brzina korozije
$b_a$	V/dek	Nagib anodnog pravca
$b_c$	V/dek	Nagib katodnog pravca
Salinitet	ppt	Koncentracija soli u otopini
$t$	s	Vrijeme
AISI		American Iron and Steel Institute

**SAŽETAK**

Kuhinjsko posuđe je nezamjenjivo sredstvo u pripremi hrane i kao takvo izloženo je različitim sredstvima i namirnicama. One mogu različito utjecati na kemijska svojstva kuhinjskog posuđa. Zbog toga je od velike važnosti prilikom njihove izrade odabrati odgovarajuće materijale i adekvatno ih zaštititi kako bi se spriječila pojava korozije i moguće ispuštanje metalnih iona u hranu.

U teorijskom dijelu rada nabrojane su i objašnjene vrste korozije koje se mogu pojaviti u kuhinjskom okruženju. Nadalje su nabrojane i objašnjene vrste metala koji se u prehrambenoj industriji koriste za proizvodnju kuhinjskog posuđa. Također je objašnjena njihova uloga i utjecaj na uporabu različitih namirnica. Zatim, navedene su vrste zaštitnih prevlaka kojima se štiti kuhinjsko posuđe od korozijskih procesa. Nakon toga nabrojani su i objašnjeni tipovi elektrokemijskih ispitivanja koji se koriste u eksperimentalnom dijelu.

U eksperimentalnom dijelu ispituju se kemijska svojstva čelika AISI 304 i AISI 316 i aluminijska AA 3004 u odnosu na različite elektrolite koji predstavljaju česte kuhinjske uvjete pri sobnoj temperaturi. Ti elektroliti su obična voda, destilirana voda koncentracije 0,4/3,5/5,0% NaCl, vodom razrijeđeni sok od rajčice (elektrolit niže pH vrijednosti) i bademovo mlijeko (elektrolit više pH vrijednosti).

Naposljetku je dan zaključak.

Ključne riječi: kuhinjsko posuđe, korozijska postojanost, elektrokemijska ispitivanja, zaštitne prevlake, aluminij

**SUMMARY**

Kitchen utensils are indispensable tools in food preparation and as such, they are exposed to various substances and ingredients. These can differently affect the chemical properties of kitchen utensils. Therefore, it is of great importance to choose appropriate materials and adequately protect them during their manufacture to prevent the occurrence of corrosion and the potential release of metal ions into food.

The theoretical part of this paper is to list and explain the types of corrosion that can occur in a kitchen environment. Furthermore, it lists and explains the types of metals used in the food industry for the production of kitchen utensils, describe their roles, and how they influence the use of different ingredients. Additionally, the types of protective coatings used to shield kitchen utensils from corrosion processes are listed. Following that, the types of electrochemical tests to be used in the experimental are listed and explained.

In the experimental part, the chemical properties of AISI 304 and AISI 316 steel and AA 3004 aluminum are examined in relation to various electrolytes that represent common kitchen conditions at room temperature. These electrolytes include tap water, distilled water with NaCl concentrations of 0,4%, 3,5%, and 5,0%, diluted tomato juice (a lower pH electrolyte), and almond milk (a higher pH electrolyte).

Finally, a conclusion is presented.

Keywords: kitchen utensils, corrosion resistance, electrochemical tests, protective coatings, aluminum

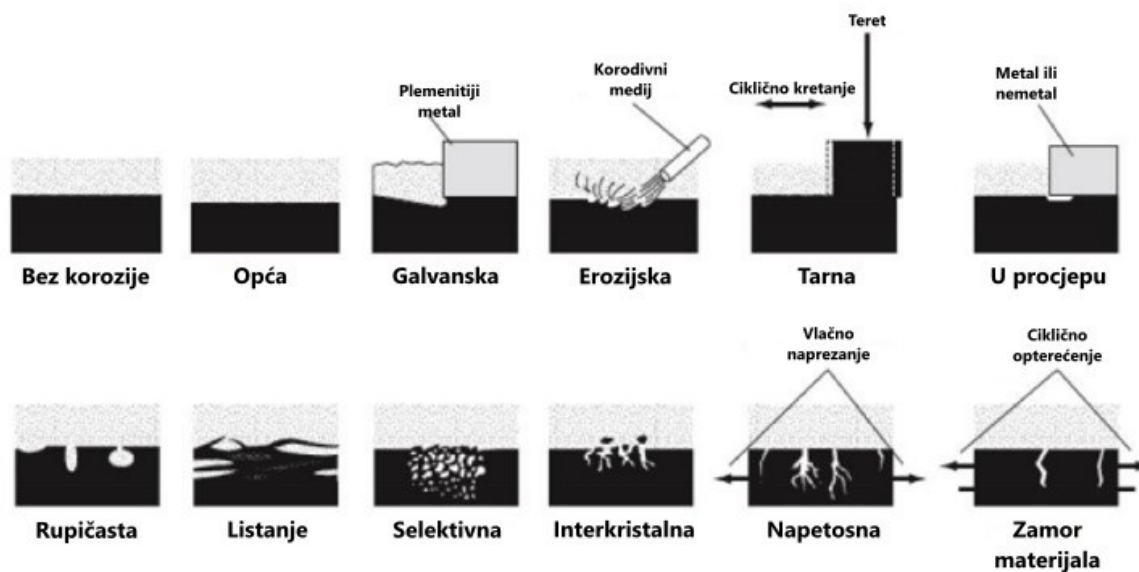
## **1. UVOD**

Korozija metala je složen kemijski proces degradacije te predstavlja ozbiljan izazov u očuvanju kvalitete kuhinjskog posuđa. Ovaj istraživački rad temelji se na detaljnoj analizi materijala, konstrukcije i postupaka proizvodnje kuhinjskog posuđa, s naglaskom na njihovu korozijsku stabilnost. Cilj istraživanja je dublje razumijevanje mehanizama korozijskog oštećenja u kontekstu kuhinjskog okoliša.

U idućim poglavljima istraženi su raznoliki materijali koji se koriste u proizvodnji kuhinjskog posuđa, analiziran je utjecaj okolišnih čimbenika i specifičnih kemijskih procesa na korozijske reakcije te razmotrene su tehnologije prevlaka materijala koje mogu unaprijediti korozijsku otpornost metala u kuhinjskim posudama. Cilj ovog pristupa je optimizirati sigurnost i trajnost kuhinjskog posuđa, osiguravajući tako ne samo zadovoljstvo u kuhanju, već i zdravlje te sigurnost korisnika.

## 2. KOROZIJA

Korozija je kemijska ili elektrokemijska reakcija između određenog materijala, često metala i okoline koja dovodi do uništavanja materijala. Propadanje materijala uzrokovano fizičkim procesima ne naziva se korozijom, nego se opisuje kao erozija, abrazija ili habanje. Postoje dvije osnovne vrste korozije: elektrokemijska i kemijska. Elektrokemijska korozija rezultat je reakcije između metalne površine i ionski aktivne okoline. Većina elektrokemijskih korozija događa se u elektrolitima kao što su prirodne vode, vlaga iz zraka, mokra zemlja, te umjetne otopine poput bojlerske vode i drugih kemijskih otopina. Kemijska korozija, koja se odvija u suhim uvjetima, rezultat je izravne kemijske reakcije između metala i agresivnih sredstava. Takva korozija obično nastaje pri visokim temperaturama u prisutnosti plinova, otopljenih soli ili tekućih metala [1]. Korozija se također može podijeliti prema obliku i mjestu razaranja materijala, što je prikazano na slici 1.



Slika 1. Vrste korozije prema obliku i mjestu razaranja [2]

Posljedice nastajanja korozije mogu biti tehničkog, ekonomskog i socijalnog karaktera [3]:

- Korozija smanjuje životni vijek proizvodnih kapaciteta i prijevoznih sustava tako što uzrokuje preuranjene kvarove. Od iznimnog je značaja nastajanje pukotina zbog napetosne korozije koja može nastati nenadano jer mali gubitak materijala dovodi do ozbiljnog oslabljenja strukture. Nadalje, u određenim situacijama može doći do curenja



tekućine što može uzrokovati ozbiljne posljedice gubitka materijala te potencijalnog zagađenja okoliša.

- Ekonomske posljedice korozije odnose se na troškove zamjene korodiranih struktura i strojeva kao što su kondenzatorske cijevi, prigušivači, cjevovodi i metalni krovovi. Uz to, troškovi zaštite od korozije, poput galvanizacije i kemijskog ili elektrokemijskog niklanja čelika, također predstavljaju značajne izravne troškove. Korozija također može uzrokovati značajne neizravne gubitke koji su teže procjenjivi. Ovo se odnosi na gubitak prihoda zbog zastoja u proizvodnji kojeg je korozija uzrokovala. Korozija također uzrokuje gubitak učinkovitosti zbog smanjenog prijenosa topline kroz akumulirane korozijske produkte ili zbog začepljenja cijevi hrđom, što zahtijeva povećani kapacitet pumpanja. Kontaminacija proizvoda također je značajan problem, jer čak i mali tragovi metala mogu oštetiti cijelu seriju proizvoda.
- Socijalne posljedice korozije uključuju gubitak neobnovljivog materijala jer korodirani metal nije moguće ponovno koristiti, što dovodi do dodatnog trošenja energije. Korozija može pridonijeti eksplozijama i prijevoznim nesrećama u kojima se gube ljudski životi. Gubitak metala zbog korozije također je rasipanje energije, vode i ljudskog truda uloženog u proizvodnju i izradu metalnih struktura. Sigurnosne posljedice korozije su ključne. Korozija može ugroziti sigurnost opreme, uzrokujući kvarove s katastrofalnim posljedicama, primjerice, na tlačnim posudama, kotlovima, metalnim spremnicima za toksične kemikalije, lopaticama i rotorima turbina, mostovima, komponentama aviona i mehanizmima za upravljanje automobilima. Sigurnost je ključan čimbenik u dizajnu opreme za nuklearne elektrane i za odlaganje nuklearnog otpada.

Brzina i tok korozije ovisi o vanjskim čimbenicima kao što je agresivnost okoline koje određeni materijal okružuje, fizičkim uvjetima prisutnim u procesu korodiranja, ali i o samom metalu koji korodira i korozijskim produktima. Postoji nekoliko različitih kvantitativnih metoda mjerenja razine korozije, ali najraširenija metoda je gravimetrijska metoda u kojoj se određuje gubitak mase vaganjem uzorka ili predmeta prije izlaganja agresivnoj okolini te ponovnim vaganjem nakon izlaganja i uklanjanja čvrstih produkata korozije. Prava mjera za napredovanje korozije je gubitak mase sveden na jedinicu početne geometrijske površine materijala [4]. Prosječna brzina formule se računa pomoću formule (1):

$$\bar{v} = \frac{|\Delta m|}{S \cdot t} \left[ \frac{g}{m^2 \times d} \right] \quad (1)$$

U kojoj je  $|\Delta m|$  gubitak mase konstrukcijskog materijala,  $S$  veličina površine, i  $t$  vrijeme izlaganja agresivnim okolnostima. Često se koristi brzina prodiranja korozije (2) koja se definira kao:

$$\bar{v}_p = \frac{\bar{h}}{t} = \frac{|\Delta v|}{S \cdot t} = \frac{|\Delta m|}{\rho \cdot S \cdot t} = \frac{\bar{v}}{\rho} \left[ \frac{mm}{god} \right] \quad (2)$$

U kojoj je  $\bar{h}$  dubina prodiranja,  $\rho$  gustoća materijala, a  $\Delta V$  gubitak volumena konstrukcijskog materijala [4].

### 3. KOROZIJA U KUHINJSKOM OKRUŽENJU

Okolina koja u kuhinjskom okruženju uzrokuje koroziju često uključuje visoku koncentraciju natrijevog klorida, ponekad u kombinaciji s organskim kiselinama. Upotreba vode u ovim procesima može varirati od pare za grijanje do rashlađivanja solju. Radi očuvanja standarda čistoće i higijene, otpornost na koroziju je ključna, posebno rupičastu koroziju. Kemijski spojevi koji se koriste u procesu obrade hrane, poput natrijevog sulfida, natrijevog bisulfida i drugih, često su korozivni prema kuhinjskoj opremi. Vrste korozije relevantne za kuhinjsko okruženje su sljedeće [5]:

- Opća korozija;
- Rupičasta korozija;
- Galvanska korozija;
- Napetosna korozija.

#### 3.1. Opća korozija

Opća korozija je, uz rupičastu, najučestaliji oblik korozije te nastaje kada je cjelokupna metalna površina izložena određenom korozivnom mediju. Ovo izlaganje uzrokuje korodiranje na cijeloj ili velikom dijelu površine, što je prikazano na slici 2. Primjeri opće korozije uključuju hrđanje željeza, tamnjenje srebra, magljenje nikla i visokotemperaturnu oksidaciju metala [6].



Slika 2. Skica opće korozije [7]

Opća korozija može biti ravnomjerna ili neravnomjerna. Ne korodiraju sva mjesta na određenom materijalu jednake brzine, čak ni u slučaju ravnomjerne korozije, što uzrokuje

povećanu hrapavost uobičajeno glatke metalne površine. Posebno treba pripaziti na neravnomjernu opću koroziju s obzirom da su korozijski produkti koji nastaju najčešće velikog volumena. S druge strane, napredak ravnomjerne korozije je moguće pratiti s lakoćom te predvidjeti kada je potrebno zamijeniti korodirani materijal [4].

Brzina stope opće korozije izražava se u milimetrima po godini (mm/god). To se odnosi na prodor metala ili gubitak težine metala te isključujuće bilo koje adhezivne ili neadhezivne korozijske produkte na površini. Za rukovanje kemijskim medijima kada je izloženost ujednačena, metali se klasificiraju u tri skupine prema brzini korozije i namjeni [3]:

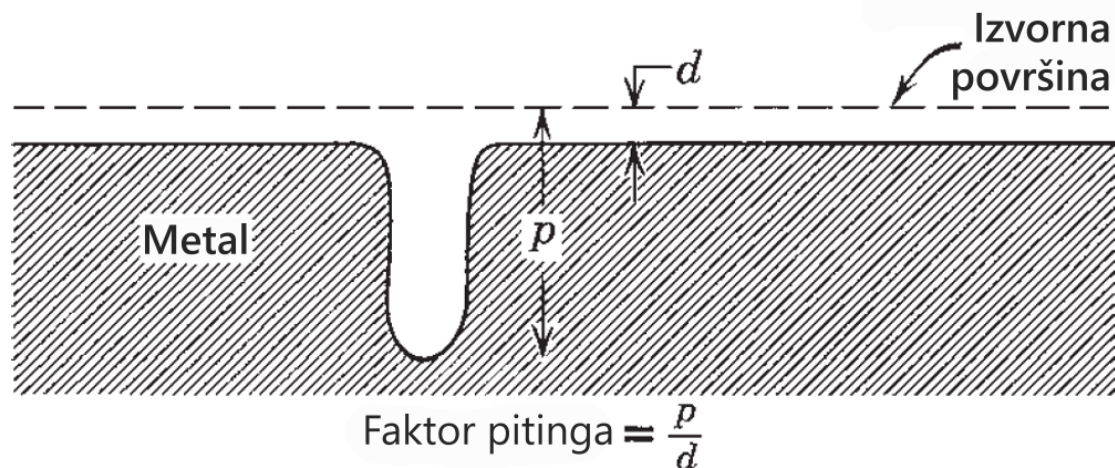
- < 0,15 mm/god – Metali u ovoj kategoriji imaju dobru otpornost na koroziju i pogodni su za kritične dijelove, kao što su sjedišta ventila, osovine pumpi i opruge.
- 0,15 do 1,5 mm/god – Metali u ovoj skupini su zadovoljavajući ako se može tolerirati viša stopa korozije, na primjer, za spremnike, cjevovode, tijela ventila i glave vijaka.
- >1,5 mm/god – Obično nisu zadovoljavajući.

### 3.2. Rupičasta korozija

Rupičasta korozija (pitting) je oblik lokalne korozije u kojoj dolazi do elektrokemijskog razaranja na lokaliziranim mjestima na površini metala. Ta lokalizirana mjesta korodiraju brže od ostatka površine metala. Nastaje zbog oštećenja zaštitnog sloja na površini metala na lokalnom mjestu u odnosu na ukupnu površinu metala. Kemijsko okruženje lokalnog područja može ukloniti zaštitne slojeve kao što su oksidi ili filmovi [8]. Stoga do tih kvarova može doći zbog:

- Nesavršenosti kristalne strukture metala na lokalnom mjestu;
- Rupica u metalu;
- Lokalnog oštećenja zaštitnog sloja protiv korozije.

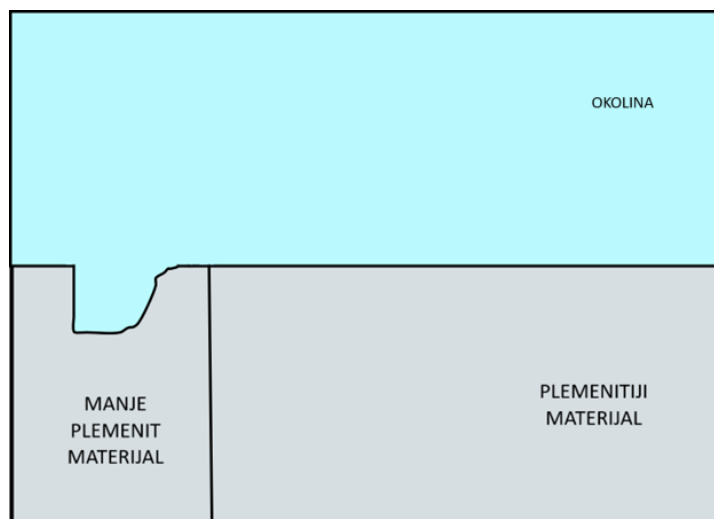
Ovo je lokalizirana vrsta napada, pri čemu je brzina korozije na nekim mjestima veća nego na drugim. Ako je značajan napad ograničen na relativno malo, fiksno područje metala koje djeluje kao anoda, rezultirajuće rupice se opisuju kao duboke. Ako je područje napada relativno veće i ne tako duboko, rupice se nazivaju plitkim. Dubina rupičaste korozije ponekad se izražava faktorom pitinga, odnosno omjerom najdubljeg prodora u metalu i prosječnog prodora u metalu kojeg određuje gubitak težine uzorka [3]. Slika 3 prikazuje grafički prikaz rupičaste korozije.



Slika 3. Skica rupičaste korozije [3]

### 3.3. Galvanska korozija

Galvanska korozija, također poznata kao bimetalna korozija, javlja se kada su različiti metali u električnom kontaktu izloženi elektrolitu. Ovo se često događa u konstrukcijama gdje nije uvijek moguće koristiti sve dijelove od istog materijala. U takvim slučajevima manje plemeniti materijal postaje anoda i korodira brže, što je prikazano na slici 4. Intenzitet galvanske korozije ovisi o razlici svojstava između metala, prirodi okoline, električnom potencijalu metala te geometrijskom odnosu metala u spoju [5].



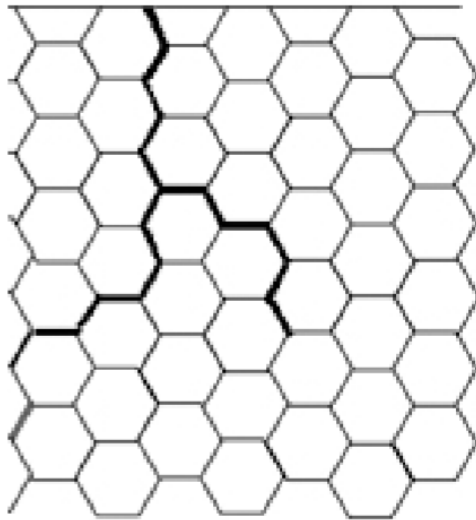
Slika 4. Skica galvanske korozije [7]

Korozijski procesi uključuju oksidaciju i redukciju, pri čemu manje plemeniti metal oksidira. Ako su različiti materijali dobro izolirani, korozija neće nastupiti bez obzira na njihove električne potencijale. Međutim, galvanska korozija može nastupiti i posredno, npr. u sustavima

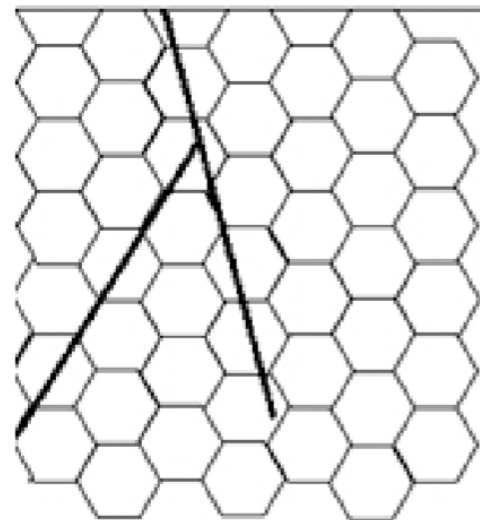
tople vode gdje se korozijski produkti plemenitijeg materijala talože na neplemenitijim dijelovima sustava, uzrokujući intenzivno razaranje. Kako bi se spriječila galvanska korozija važno je odabrati materijale sličnih korozijskih potencijala i pravilno ih konstruirati te spriječiti direktan kontakt raznorodnih materijala u električno vodljivim i agresivnim medijima, koristeći izolirajuće podloške i premaze [4].

### 3.4. Napetosna korozija

Napetosna korozija obično se pojavljuje kod napregnutih materijala u prisutnosti klorida pri povišenim temperaturama. Odnosi se na korozijski mehanizam u kojem kombinacija osjetljivog materijala, prisutnih vlačnih naprezanja i značajke medija dovode do pojave pukotina na materijalu. Teško ju je predvidjeti jer prije pojave pukotina ili pak samog loma na konstrukciji se ne nalaze lako vidljivi znakovi nastupanja korodiranja. Često se pojavljuje napetosna korozija na temperaturama višim od okoline uz prisutnost klorida. Kako bi se spriječilo njeno nastajanje, koriste se dupleks nehrđajući čelici i legure koje sadrže molibden. Pukotine mogu nastati uslijed procesa naprezanja ili izvana, na primjer ispod izolacije. Smanjenje količine kisika koji ulazi i snižavanje temperature procesa minimizira mogućnost napetosne korozije. Posljedica napetosne korozije je lom uobičajeno izdržljivih materijala u okolinama koje uzrokuju minimalnu pojavu korozije. Naprezanja koja dovode do pojave napetosne korozije obično su mala, često ispod granice razvlačenja te su vlačna i statična. Ova naprezanja mogu biti uzrokovana vanjskim silama ili unutarnjim zaostalim naprezanja, što ih razlikuje od dinamičkih opterećenja koja dovode do korozijskog zamora. Najčešće nastupa na hladno deformiranim lokalitetima gdje zaostaju naprezanja ili u okolini zavarenih spojeva na kojima su veća zaostala naprezanja i strukturne promjene. Njeno napredovanje može biti transkristalno ili interkristalno, što je vidljivo na slici 5 [4] [5].



INTERKRISTALNO



TRANSKRISTALNO

Slika 5. Širenje pukotina kod napetosne korozije [4]

## 4. METALI U KUHINJI

U ovom poglavlju obradit će se metali koji se koriste u kuhanju: aluminij i njegove legure, lijevano željezo, nehrđajući čelik i bakar. Nadalje, objasnit će se njihova svojstva te prednosti i nedostaci za njihovo korištenje u kuhinjskoj okolini.

### 4.1. Aluminij

S termodinamičkog stajališta, aluminij je metal visoke reaktivnosti s izraženom aktivnošću prema kisiku. Ipak, ovaj metal je izuzetno otporan na većinu tipova atmosfera i kemikalija. Ova otpornost proizlazi iz inertnog i zaštitnog karaktera aluminijskog oksidnog filma koji se formira na površini metala te nakon oštećenja brzo ponovno nestaje. U većini okoliša brzina korozije aluminija brzo opada tijekom vremena. Zaštitni oksidni film na aluminiju postiže debljinu od približno 10 nm na svježe izloženom metalu u samo nekoliko sekundi. Rast oksida može biti modificiran prisutnošću nečistoća i legura, a ubrzan je povećanjem temperature i vlage ili potapanjem u vodu. Zaštitni oksidni film sprječava koroziju jer je otporan na koroziju i dobar izolator koji ograničava elektrone koji nastaju tijekom oksidacije metala da sudjeluju u bilo kojoj katodnoj reakciji koja prati anodnu reakciju [8]. Slika 6 prikazuje tipičan lonac napravljen od aluminija.



Slika 6. Aluminijski lonac [9]



Prednost korištenja aluminija u kuhanju je, s obzirom da se radi o lakom materijalu, lakše rukovanje aluminijskim posuđem u odnosu na posuđe izrađeno od drugih materijala. Također, ravnomjerno i brzo provodi toplinu. U slučaju korištenja teškog aluminija, toplina se prenosi i preko poklopca te time omogućuje da se hrana u cijelosti okruži toplinom. To znači da je hranu moguće pripremati na nižim temperaturama, čime se štedi energija. Nadalje, aluminijsko posuđe ne hrđa, ali mora se pripaziti na lužnatu hranu i tvrdu vodu koja može izbljediti aluminij. Prehrambene kiseline i sol stvaraju korozijom udubine u materijalu. Deblje aluminijsko posuđe je u pravilu kvalitetnije od tanjih te će duže trajati. U slučaju pribora za kuhanje, pribor izrađen od velikih ploča i lijevanog aluminija je dugotrajan i drži svoj oblik, dok aluminijsko posuđe izrađeno od tankih ploča se lako savije i iskrivi [10] [11].

#### 4.1.1. *Aluminijeve legure*

Aluminij se u industriji uglavnom ne proizvodi u čistom stanju već dolazi u raznim legirnim tipovima, odnosno razredima. Ovisno o kemijskom sastavu, navedeni tipovi se kategoriziraju u razrede [11]. Svaki razred određuje udio određenog legirnog elementa, kao što je prikazano u tablici 1.

**Tablica 1. Značajke aluminija po seriji [12]**

RAZRED	LEGURA	ZNAČAJKE
<b>Seriya 1000</b>	99% čisti aluminij	Vodič električne energije
<b>Seriya 2000</b>	Bakar	Povećana čvrstoća
<b>Seriya 3000</b>	Mangan	Sigurno za hranu
<b>Seriya 4000</b>	Silicij	Niža točka taljenja
<b>Seriya 5000</b>	Magnezij	Veća otpornost na koroziju
<b>Seriya 6000</b>	Magnezij i silicij	Dobro reagira na toplinsku obradu
<b>Seriya 7000</b>	Cink	Visoka čvrstoća

U prehrambenoj industriji se najviše koriste serija 1000, serija 3000 te serija 5000 koje će biti detaljnije objašnjene u nadolazećim poglavljima.

## 4.1.1.1. Serija 1000

Aluminijske legure serije 1000 predstavljaju najčišće legure aluminija i nazivaju se "čistim" komercijalnim aluminijem. Sadrže najmanje 99% aluminija bez glavnog dodatnog legirnog elementa. Karakteriziraju ih velika električna vodljivost, mekoća kao i korozijska otpornost. Zbog svoje mekoće mogu se lagano hladno oblikovati kako bi im se poboljšala prvobitno loša mehanička svojstva, no nisu otporni na visoke temperature. U prehrambenoj industriji koriste se sljedeći tipovi aluminijskih legura serije 1000: 1050, 1060, 1070. Međusobno se razlikuju po udjelima aluminija: tip 1050 sadrži 99,5%, tip 1060 99.6%, a tip 1070 99.7% aluminija. Veći udio aluminija poboljšava njegova korozijska svojstva, no u praksi odabir tipa ovisi najviše o trenutnoj tržišnoj cijeni. Proizvodnja se zasniva na ekstrudiranju potrebnih oblika iz aluminijskih ploča te njihovom daljnjem oblikovanju. Takvi diskovi prikazani su na slici 7. Koriste se u proizvodnji pribora za jelo i kuhanju kao i u proizvodnji jeftinijih tava uz potrebnu anodizaciju njihove površine [13] [14].



**Slika 7. Aluminijski diskovi serije 1000 [13]**

#### 4.1.1.2. Serija 3000

Aluminijske legure serije 3000 su najkorištenije legure u prehrambenoj industriji. Razlikuju se od ostalih po tome što im je primarni legirni element mangan. On im omogućuje poboljšanu korozijsku postojanost, rad na višim temperaturama i bolja mehanička svojstva od serije 1000. Kao i prethodna serija, nisu toplinski obradive već za povećanje svojih mehaničkih svojstava koriste metode hladnog oblikovanja. Karakterizira ih dobra plastičnost u hladnim uvjetima, no prilikom hladnog oblikovanja moguća je pojava napetosne korozije. Ona rezultira pojavom pukotina na površini materijala čija se površina povećava s količinom naprezanja. U prehrambenoj industriji najčešće korišteni tipovi su 3003 i 3004. Razlikuju se u tome što tip 3003 sadrži 1.0-1,5% mangana, dok tip 3004 sadrži i 1.0-1.3% magnezija. Obje vrste su sličnih karakteristika, ali tip 3004 ima nešto bolja mehanička svojstva i time višu cijenu na tržištu. Koristi se i u proizvodnji limenki (Slika 8). U industriji se koriste za proizvodnju kuhinjskog posuđa zbog svoje kemijske postojanosti prilikom dodira sa hranom. Generalno se ne primjenjuje anodizacija površine kuhinjskog posuđa zbog moguće pojave diskoloracija [15].



**Slika 8. Limenke od aluminija serije 3004 [16]**

#### 4.1.1.3. Serija 5000

Glavni legirni element ovih serija legura je magnezij. Imaju bolja mehanička svojstva od serija 1000 i 3000, veliku korozijsku otpornost, dobru zavarljivost te dobro zadržavaju oblik prilikom hladnog oblikovanja. Zbog svoje otpornosti na koroziju najviše se upotrebljavaju u pomorskoj industriji, no u prehrambenoj industriji zbog svoje visoke cijene na tržištu nemaju veliku uporabu. Glavni tip koji se upotrebljava u kuhinjskom okruženju je 5052. On sadrži 2,2-

2,8% Mn. Karakterizira ga velika otpornost na visokim temperaturama. Stoga se upotrebljava u proizvodnji visoko kvalitetnog kuhinjskog posuđa namijenjenog za profesionalne svrhe [17].

#### 4.2. Lijevano željezo

Lijevano željezo se koristi za dugo sporo kuhanje jer se ravnomjerno grije te dugo drži toplinu. Može izbljedjeti zbog kisele hrane. Teško je za rukovanje. Ovu vrstu posuđa potrebno je održavati – posuđe se namaže masti, lojem ili uljem, te se stavi u peć zagrijanu na 120-150 °C na 2 sata. Nakon vađenja posuđa iz peći, potrebno je obrisati ostatak masti. Ovo posuđe se ne smije prati u perilici za suđe, a nakon svakog pranja potrebno ga je obrisati jer će materijal u protivnom zahrđati [10]. Na slici 9 prikazana je korodirana posuda od lijevog željeza do koje je došlo nepravilnim rukovanjem i održavanjem metala. Neke od namirnica koje treba izbjegavati koristiti u kuhanju s takvim posuđem su:

- Rajčica, češnjak, limun i ostalo povrće niske pH vrijednosti;
- Jaja i riba zbog karakterističnog mirisa koji se može vezati za površinu tave (ako nije prethodno prevlačeno zaštitnim i aromatičnim filmom);
- Mliječni proizvodi, osobito sir.

Ulja koja se koriste za premazivanje (engl. *seasoning*) su masna ulja koja se dobivaju iz sjemenki ili životinjska mast. Radi se o triesteru glicerola. Općenito, ulja koja sadrže masne kiseline s konjugiranim dvostrukim vezama brže se suše od onih s nekonjugiranim dvostrukim vezama. Ovo se događa sljedećim redoslijedom [18]:

1. Ulje se kombinira s kisikom kako bi formiralo perokside;
2. Film neprestano apsorbira kisik i razlaže se;
3. Peroksidni radikali kombiniraju se kako bi stvorili prekrizene poli perokside koji su stabilni;
4. Ovi poli peroksidi razgrađuju se svjetlom i toplinom kako bi formirali druge veze.



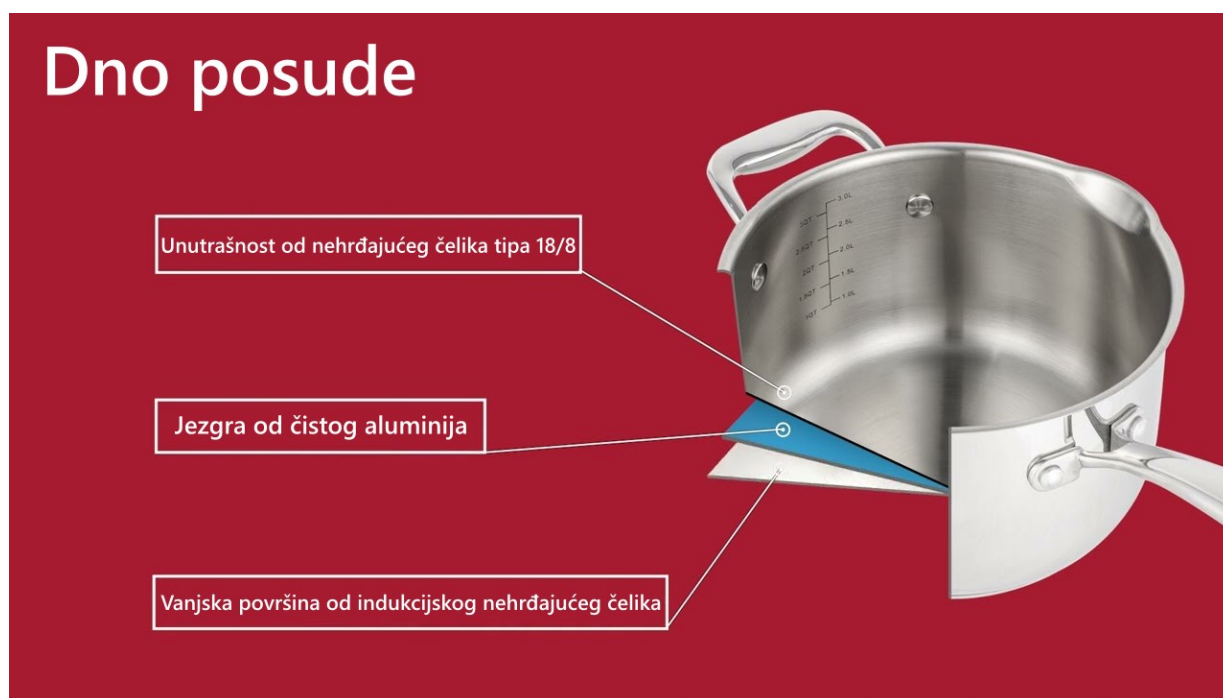
**Slika 9. Korodirana posuda od lijevanog željeza [19]**

#### **4.3. Nehrđajući čelik**

Nehrđajući čelik je legirani čelik koji sadrži 12% ili više kroma kako bi bio otporan na hrđu i agresivno djelovanje različitih kemikalija. Količina kroma iznad 12% ili dodatak drugih metala otpornih na koroziju leguri (nikal, molibden ili vanadij, na primjer) ne uzima se u obzir u definiciji. Iz tog razloga, tržište je prepuno pribora označenog i prodavanog kao nehrđajući čelik. Međutim, otpornost na koroziju predmeta u potpunosti ovisi o ukupnoj količini kroma i dodatnih metala koji čine leguru. Otpornost na koroziju svih vrsta nehrđajućeg čelika posljedica je površinskog stanja uzrokovanim legiranjem željeza s kromom ili niklom. Oni nisu potpuno otporni na hrđu niti kemijski neaktivni materijali, već su legure koje se bolje odupiru koroziji od drugih metala zbog stvaranja tankog filma. Ovaj oksidni film je proziran, čvrsto prianja na površinu čelika i vrlo je tanak. Sve dok ovaj film ostane netaknut na površini nehrđajućeg čelika, osnovno željezo bit će zaštićeno od korozije [20].

Za razliku od prethodno navedenih vrsta posuđa, nehrđajući čelik je otporan na lužnatu i kiselu hranu te se ne stvaraju udubine u materijalu i lako se čisti. Njegov nedostatak je da, u slučaju da se koristi posuda napravljena od čistog nehrđajućeg čelika, toplina se neće ravnomjerno rasprostirati cijelom površinom nego će nastati vruće točke. Da bi se ovo izbjeglo prilikom izrade posuđa ono se kombinira s drugim metalima, najčešće aluminijem, bakrom ili

ugljičnim čelikom. Stoga, takve se kombinacije dijele na dvoslojne (kod kojeg je unutrašnjost od nehrđajućeg čelika, a vanjska strana od nekog drugog metala), troslojne (nehrđajući čelik na vanjskoj i unutrašnjoj strani te sloj nekog drugog metala u sredini) i donjom površinom obložene (izrađene od čistog nehrđajućeg čelika ili od troslojne kombinacije metala na kojima je donja površina obložena aluminijem ili bakrom) [10]. Presjek takvog troslojnog lonca je prikazan na slici 10.



Slika 10. Presjek troslojnog dna lonca od nehrđajućeg čelika [21]

#### 4.3.1. Vrste nehrđajućih čelika

Uz proces pasivnog regeneriranja oksidnog filma, nehrđajući čelici moraju zadovoljiti još jedan uvjet u cilju svoje korozivne postojanosti: mikrostrukturu. Nehrđajući čelici zahtijevaju neki oblik potpune martenzitne (M), feritne (F) ili austenitne (A) strukture. Ona ne bi smjela sadržavati karbide, okside ili neke druge intermetalne faze. Razlog tomu je mogućnost nastajanja strukturnog lokaliteta različitog korozivnog potencijala od osnovnog čelika. Taj lokalitet u prisustvu vodljivog medija može rezultirati korozivnim trošenjem materijala i zove se galvanski članak [22].

Nehrđajuće čelike dijelimo po mikrostrukturi na sljedeće vrste [23]:

- Austenitne;
- Martenzitne;
- Feritne;
- Dupleks;
- percipitacijski očvrsnute (PH čelici).

Austenitni čelici također imaju podvrstu superaustenitnih čelika, a feritni podvrstu superferitnih čelika. Percipitacijski očvrsnuti čelici se dijele na: austenitne, semi-austenitne i martenzitne čelike. U tablici 2 su prikazane karakteristike različitih vrsta nehrđajućih čelika ovisno o njihovoj mikrostrukturi.

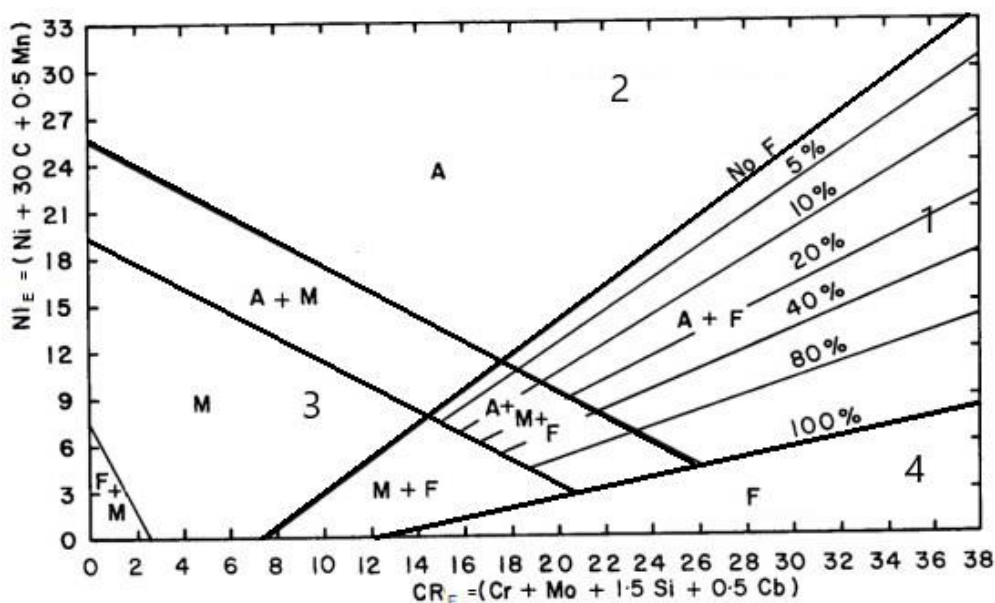
**Tablica 2. Prikaz karakteristika različitih vrsta nehrđajućih čelika ovisno o njihovoj mikrostrukturi [24]**

Grupa nehrđajućih čelika	Austenitni	Martenzitni	Feritni	Dupleks	PH čelici
<b>Magnetičnost</b>	Ne	Da	Da	Da	Da
<b>Stopa otvrdnuća</b>	Vrlo visoka	Srednja	Srednja	Srednja	Srednja
<b>Korozijska postojanost</b>	visoka	Srednja	Srednja	Vrlo visoka	Srednja
<b>Tip otvrdnuća</b>	Hladno oblikovanje	Gašenje i temperiranje	Ne	Ne	Starosno otvrdnuće
<b>Duktilnost</b>	Vrlo visoka	Niska	Srednja	Srednja	Srednja
<b>Otpornost na visokim temp.</b>	Vrlo visoka	Niska	Visoka	Niska	Niska
<b>Otpornost na niskim temp.</b>	Vrlo visoka	Niska	Srednja	Srednja	Niska
<b>Zavarljivost</b>	Vrlo visoka	Niska	Visoka	Visoka	Visoka

Nehrđajući čelici se prema kemijskom sastavu dijele na [25]:

- Cr – čelike;
- Cr-Ni – čelike;
- Cr-Ni-Mo – čelike;
- Cr-Mn – čelike.

Uvid u mikrostrukturu čelika na sobnoj temperaturi pri određenom sastavu može se dobiti pomoću strukturnih dijagrama. Na slici 11 je prikazan Schafflerov strukturni dijagram. U dijagramu je krom ekvivalenta izražena utjecajem  $\alpha$  elemenata (pospješivanje stvaranja ferita), a nikel ekvivalenta je izražena utjecajem  $\gamma$  elemenata (pospješivanje stvaranja austenita).



Slika 11. Prikaz Schafflerovog strukturnog dijagrama [26]

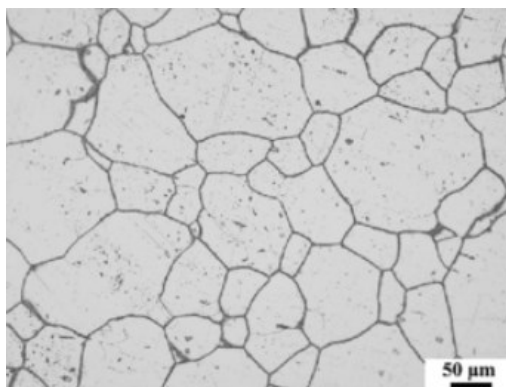
U dijagramu se pravcima dijele različita strukturna područja. Ona predstavljaju polja mikrostruktura koja tamo nastaju (feritna, austenitna, martenzitna). Polje 1 karakterizira osnovne i dodatne materijale koji su na temperaturama od 500 °C do 900 °C skloni pojavi krhke faze, posebno austenitno-feritne čelike sa većim udjelom od 10%  $\alpha$  faze. Stvaranje pukotina iznad 1250 °C je karakteristično za materijale iz područja polja 2. Austenitno-martenzitne i martenzitno-feritne strukture koje se nalaze u polju 3 su osjetljive na pojavu hladnih pukotina na temperaturama ispod 400 °C. Nehrđajući čelici malog udjela ugljika se nalaze u polju 4. Kod čelika tog tipa na temperaturama iznad 1100 °C dolazi do rasta zrna [27]. U prehrambenoj industriji se gotovo jedino primjenjuju austenitni nehrđajući čelici koji će biti objašnjeni u sljedećim paragrafima.

#### 4.3.2. Austenitni nehrđajući čelici

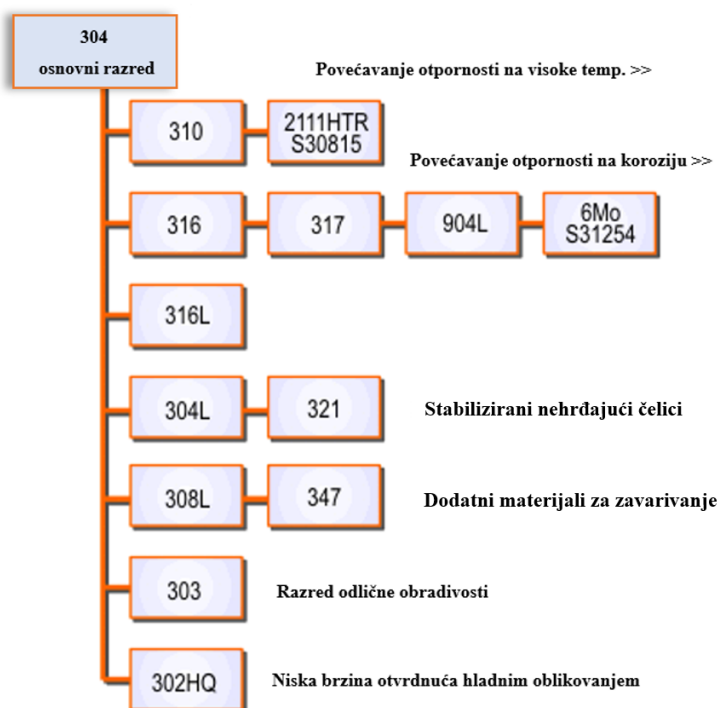
Austenitni nehrđajući čelici su najpoznatija i najviše primijenjena vrsta visokolegiranih čelika te sadrže od 16% do 25% kroma uz minimalni udio ugljika od 0,03% do 0,08%. Karakterizira ih prepoznatljiva nemagnetičnost, vrlo dobra zavarljivost i odlična mogućnost



oblikovanja hladne i tople prirode. Koriste se u širokom rasponu primjena u različitim industrijama pri izuzetno velikom rasponu temperatura. Nikal služi za stabiliziranje austenitne strukture. Legiraju je kromom, molibdenom i nekad dušikom u cilju povećavanja korozijske postojanosti. Za povećanje otpornosti prema sumpornim kiselinama se koristi legiranje bakrom, dok za veću otpornost prema oksidiranju površine se dodaje silicij. Legiranje sa selenijem i sumporom služi za povećanje obrtljivosti dok legiranje niobijem povećava otpornost prema puzanju [28]. Mikrostruktura austenita je prikazana na slici 12, a na slici 13 su prikazane karakteristike različitih razreda austenitnih čelika.



Slika 12. Prikaz mikrostrukture austenita [29]



Slika 13. razredi austenitnih nehrđajućih čelika [30]

### 4.3.3. *Nehrđajući čelici AISI 304 i AISI 316*

U industriji proizvodnje kuhinjskog posuđa, upotrebljavaju se dva tipa austenitnih nehrđajućih čelika, AISI 304 i 316. Razlikujemo ih po kemijskom sastavu od kojih je jedan različiti udio nikla i kroma. Nehrđajući čelici tipa 316 sadrže maseni udio nikla od 8-12% i kroma od 18-20%, dok oni tipa AISI 304 sadrže maseni udio nikla od 10-14% i kroma od 16-18%. Druga razlika je u tome što tip AISI 316 sadrži 2-2,5% molibdena koji mu omogućuje, usprkos manjem masenom udjelu kroma, veću korozivnu otpornost u odnosu na tip AISI 304. Ta otpornost posebno se odnosi na koroziju uzrokovanu kloridima (poput kuhinjske soli u hrani) i opću kemijsku koroziju. Tip AISI 316, također zbog masenog udjela molibdena i većeg udjela nikla, ima veću cijenu od tipa AISI 304. Oba tipa mogu izdržati maksimalnu radnu temperaturu od 850 °C što je ispod maksimalne temperature komercijalnih pećnica od 310 °C, wok plamenika od 340 °C i pizza pećnica od 510 °C te čini ih iznimno pouzdanim u svim aspektima industrije proizvodnje kuhinjskog posuđa [31] [32].

U proizvodnji kuhinjskog posuđa nehrđajućeg čelika, AISI 304 se koristi za komercijalnu izradu većinom tava i lonaca različitih varijanti. S druge strane, AISI 316 se koristi za izradu posuđa namijenjenog u profesionalne svrhe. Ono je uglavnom skuplje radi veće cijene materijala. Proizvodnja kuhinjskog posuđa se obavlja na sljedeći način: Prvo se slažu individualni slojevi osnovnog materijala jedan na drugi. Ti slojevi su prešaju na visokoj temperaturi dok dođe njihovog spajanja u jedinstvenu ploču. Iz ploča se ekstrudiraju diskovi koji se kasnije provjeravaju i filtriraju prema pojavi određenih nepravilnosti. Nakon toga, dolazi do hidrauličkog prešanja diskova u željene oblike kuhinjskog posuđa, odnosno tava, lonaca te njihovih ručaka. Ti oblici se kasnije bruse, zaobljavaju im se rubovi (Slika 15) i poliraju kako bi se postigla željena kvaliteta površine. Neki proizvođači preferiraju mat površine, dok drugi sjajne [33]. Na kraju se oblici spavaju zakovicama tvoreći nerastavljivi spoj, kao što je prikazano na slici 14.



**Slika 14. Zakovicama spojena klasična tava od nehrđajućeg čelika [34]**



**Slika 15. Strojno zaobljavanje rubova isprešanog dijela duboke tave od nehrđajućeg čelika [33]**

Glavne prednosti kuhinjskog posuđa od nehrđajućeg čelika su [35]:

- Jako dobro zadržavanje topline;
- Iznimna izdržljivost;
- Otpornost na niže pH vrijednosti;
- Velika korozijska postojanost;
- Lako je održava može se reciklirati.

Glavni nedostaci kuhinjskog posuđa od nehrđajućeg čelika su [35]:

- Neravnomjerno zagrijavanje površine;
- Moguće lijepljenje namirnica na površinu;
- Relativno visoka cijena.

#### 4.3.4. Utjecaj nikla i kroma kod kuhinjskog posuđa od nehrđajućeg čelika

Voda, različite vrste tla, biljke i meso domaćih životinja glavni su izvori nikla koji mogu doći u kontakt s čovjekom. Sam nikal se za sada nije pokazao značajnim elementom za zdravlje čovjeka zbog nepostojanja enzima u ljudskom tijelu ovisnih o udjelu nikla u krvi. Međutim, prevelika izloženost niklu može kod pojedinih osoba proizvesti alergijsku reakciju u obliku kontaktnog alergijskog dermatitisa. On se pojavljuje uglavnom radi neodgovarajuće prehrane te na bilo kojem dijelu tijela neovisno o direktnom kontaktu. Neke od glavnih izvora nikla u namirnicama su orašasti plodovi i mliječni proizvodi. Oni se kasnije koriste za proizvodnju hrane s visokim udjelom nikla poput čokoladnog mlijeka i zobene kaše. Godine 2001. provedeno je istraživanje u kojem je određena gornja granica tolerancije unošenja nikla u organizam od 1000  $\mu\text{g}$  po danu, dok je prosječan unos odrasle osobe u SAD iznosio 69-162  $\mu\text{g}$  po danu. Međutim, kod ljudi osjetljivih na nikal može već pri jednom uzimanju doze od 67  $\mu\text{g}$  doći do upale i kontaktnog alergijskog dermatitisa [31].

Za razliku od nikla, krom je u određenim dozama potreban za pravilno funkcioniranje ljudskog organizma. On služi za održavanje šećera u krvi i ravnoteže kolesterola i krvnog tlaka. Manjak kroma može ukazati na pojavnu dijabetesa. Kao i kod nikla, ljudi dolaze u kontakt s kromom konzumacijom hrane i vode. Jedna doza iznad 2500  $\mu\text{g}$  kroma može prouzrokovati kontaktni alergijski dermatitis kod osjetljivijih osoba. Međutim, toliku dozu nije lako postići jer je dnevna doza kroma populacije SAD procijenjena na 76  $\mu\text{g}$ , dok je preporučena ona od 120  $\mu\text{g}$  [31].

Kuligowski i Halperin su analizirali pojavu nikla i kroma kao rezultat korozije kuhinjskog posuđa od različitih materijala. U svojem istraživanju proučavali su sedam kuhinjskih pomagala od nehrđajućeg čelika, lijevanog željeza, mekog čelika, aluminijskog i emajliranog čelika. U vrijeme provođenja istraživanja, američka Uprava za hranu i lijekove (engl. *Food and drug administration* – FDA) nije imala određene standarde za testiranje jetkanja kuhinjskog posuđa pa je korištena petpostotna octena kiselina, inače standard za testiranje jetkanja keramičkog posuđa, u destiliranoj vodi pH vrijednosti 2,4. S obzirom da voće, povrće i škrob imaju pH vrijednost manju od 7 octena kiselina omogućava simuliranje stvarnih uvjeta u kuhinji. Rezultati istraživanja pokazali su da je hladna octena kiselina izazvala ispuštanje željeza iz woka i tave od lijevanog željeza, dok aluminij i emajlirani čelik nisu ispuštali željezo, krom ili nikal. Većina lonaca od nehrđajućeg čelika nije ispuštala mjerljive razine nijednog od ta tri metala uz hladnu octenu kiselinu, ali prilikom grijanja octene kiseline

do ključanja, posuđe od nehrđajućeg metala je pokazalo značajnu razinu nikla te prisutnost kroma i željeza [36]. Do sličnih rezultata došli su i Kamerud i drugi koji su testirali tri vrste nehrđajućeg čelika i tavu od istog materijala. Kuhali su 2-10 sati 10 uzastopnih ciklusa kuhanja koristeći četiri široko dostupna umaka od rajčice. Poslije 6 sati kuhanja u umaku od rajčice prisutnost se nikla povećala 26 puta, a kroma 7 puta u usporedbi sa drugim posuđem koje nije izrađeno od nehrđajućeg čelika. Nadalje, daljnjim kuhanjem koncentracija ta dva kemijska elementa se dodatno povećala. Opaženo je da kuhanje novim posuđem od nehrđajućeg čelika ispušta više nikla i kroma od kuhanja sa prijašnje korištenim posuđem [31].

S obzirom da pokazane koncentracije nikla uzrokovane jetkanjem nisu zanemarive, osobe osjetljive na nikal trebaju izbjegavati kuhanje kisele hrane u tavama od nehrđajućeg čelika, osim u slučaju feritnog nehrđajućeg čelika tipa AISI 434 koji ne sadrži nikal i primjeren je za izradu kuhinjskog posuđa. Naime, dodavanjem nikla u nehrđajući čelik se olakšava proizvodnja jer povećava rastezljivost materijala. Također, površina posuđa od nehrđajućeg čelika je manje sjajna što otežava prodaju. Te ekonomske prepreke otežavaju izbacivanje nikala iz proizvodnje posuđa, ali je ipak ostvarivo [36].

#### **4.3.5. Korozijska oštećenja u pripremi hrane**

Dvije najčešće vrste korozije koje se javljaju na priboru za jelo su rupičasta korozija i površinska korozija. U rupičastoj koroziji mikroskopske ogrebotine ili udubljenja formiraju se na površini pribora. Svaki put kad se rupičasto oštećenje natopi, elektrokemijski proces uzrokuje da se proširi i produbi u metal. Na kraju, oštećenje i korozija postaju vidljivi golim okom. U ekstremnim slučajevima, korozija može probiti pribor. Površinska korozija obično počinje na ogrebotini ili udubljenju i širi se lateralno preko većeg područja pribora. Time se uništava zaštitni film posuđa [20].

Na slici 16 je prikazano korozijsko trošenje kuhinjskih noževa od nehrđajućeg čelika ispitivanjem u slanoj komori kroz vremenski period od 48 sati. Pojava rupičaste korozije na površini posuđa od nehrđajućeg čelika je prikazana na slici 17.



**Slika 16. Korozijsko trošenje kuhinjskih noževa od nehrđajućeg čelika ispitivanjem u slanoj komori (Laboratorij za zaštitu materijala, FSB)**



**Slika 17. Pojava rupičaste korozije na površini posuđa od nehrđajućeg čelika**

#### 4.4. Bakar

Bakar je jedna od rjeđih materijala koji se koriste za izradu posuđa i pribora za kuhanje, ponajprije zbog visoke cijene masovne proizvodnje naspram drugih tipova materijala. Glavna prednost bakra je njegova iznimna toplinska provodljivost koja mu omogućuje da kuhinjsko posuđe od bakra vrlo brzo i ravnomjerno postiže željene visoke temperature iznad 100 °C kada počinje ključanje vode i pojavljivanje Maillardove reakcije. [10] Bakar međutim ima jednu veliku manu, a to je njegova osjetljivost na koroziju. Pri kuhanju hrane povišene pH vrijednosti, bakar toksično reagira zagađujući ju. Ta reakcija dovodi do oksidacije i stvaranja patine. Kako bi to spriječili, bakreno posuđe se prevlači tankim filmom od kositra, kao što je vidljivo na slici 18.



Slika 18. Bakrena posuda obložena kositrom [37]

## 5. PREVLAKE ZA POSUĐE

### 5.1. Anodizirani aluminij

Anodizacija je dobro usvojena i prihvaćena metoda za proizvodnju visokokvalitetnog dekorativnog aluminija i zaštitne prevlake na aluminijevim legurama. Završni proizvodi mogu se koristiti za različite primjene, od dekorativnih obloga na automobilima ili štednjacima do okvira prozora i zidova visokih zgrada prestižnog izgleda. Mnoge od ovih primjena zahtijevaju završnu obradu koja je jednolična u izgledu i ugodna za oko. Kako bismo postigli visoke standarde površinske obrade, nužno je pažljivo kontrolirati površinsku obradu i metaluršku strukturu aluminijevih legura koje se koriste za anodizaciju, kao i kontrolirati pred tretman, anodizaciju i, prema potrebi, bojenje te zatvaranje prevlake. Anodna prevlaka, koja nastaje elektrolitičkom oksidacijom golog metala, često će istaknuti nedostatke prisutne u materijalu ili čak pokazati neujednačenosti koje nije moguće vidjeti na obrađenoj leguri. Postoje metode pred tretmana koje se koriste prije anodizacije i koje mogu prikriti ili eliminirati mnoge nepravilnosti površine aluminijevih legura. Međutim, metalurško stanje legure ne može se kontrolirati od strane anodizera i ovisi o procesiranju u fazama lijevanja i ekstruzije tijekom izrade [38].

Ova prevlaka čini aluminijsku površinu sa vanjske strane posuđa otpornom na mrlje i koroziju. Upija toplinu što omogućuje da pri rađenju kruha i pita kora bude hrskava. Prilikom rukovanja sa ovakvim posuđem potrebno je izbjegavati abrazivna sredstva te jako visoke temperature. Slika 19 prikazuje mrlje i diskoloracije koje su nastale nepravilnom uporabom posuđa [10].



**Slika 19. Stvaranje mrlja i diskoloracija na posuđu od anodiziranog aluminija zbog kuhanja na previsokoj temperaturi [10]**



## 5.2. Porculanski emajl na metalu

Porculanski emajl je neorganska prevlaka koji se primjenjuje na metale u dekorativne i funkcionalne svrhe. Ova prevlaka je masivno staklo na bazi silicija koje se dobiva visokotemperaturnim pečenjem. Temperatura može varirati između 450 i 1200 °C, ovisno o podlozi. Porculanske emajlne prevlake razlikuju se od keramičkih prevlaka prvenstveno po svojoj strukturi stakla i koeficijentu dilatacije, te se razlikuju od organskih boja prvenstveno po neorganskoj prirodi matrice i kemijskoj vezi koja postoji između prevlake i podloge [39].

Karakteristike ove prevlake je da je neporozna prevlaka koja je otporna na kiseline i lužine te ju je lako čistiti. Ipak, potrebno je pripaziti da se ne izlaže naglim promjenama temperature što može pridonijeti stvaranju pukotina u prevlaci, vidljivo na slici 20. Također, nagli sudar oštre stvari može uzrokovati krhotine [10].



Slika 20. Pukotina na emajliranom metalnom loncu [40]

## 5.3. Neprijanjajuće prevlake

Neprijanjajuće prevlake posuđa su izrađene od politetrafluoroetilena (skraćeno: PTFE). Radi se o sintetičkom fluoropolimeru koji se dobiva iz tetrafluoroetilena. To je čvrsti oblik fluorokarbona i spoj s povećanom molekulskom masom. Sastoji se uglavnom od fluora i ugljika. Hidrofoban je, što znači da se ne može navlažiti tvarima koje sadrže vodu ili samom vodom. To je moguće zbog visoke elektro-negativnosti fluora i niskih razina trenja sa svim vrstama čvrstih tvari. PTFE je otkrio Roy Plunkett 1938. godine dok je radio u tvrtki Kinetic

Chemicals. Dok je radio na novom CFC rashladnom mediju, slučajno je polimerizirao perfluoretilen koji se nalazio u tlačnom spremniku s željezom, što je rezultiralo reakcijom i stvaranjem PTFE-a. Ovaj spoj nije reaktivan zbog snažnog ugljik-fluoridnog sastava. Zbog toga se široko koristi u cjevovodima i spremnicima za kemijske tvari koje su korozivne ili reaktivne. Osim toga, PTFE se također koristi kao podmazivač jer može znatno smanjiti trošenje, trenje i potrošnju energije strojeva. Također se koristi i u kirurškim intervencijama za medicinske materijale. PTFE može biti vrlo koristan u zaštiti od korozije jer odbija gotovo sve, pa se molekule ne mogu približiti dovoljno blizu da reagiraju s njim. Stoga je veza između atoma ugljika i atoma fluora značajna, čineći ga gotovo neprobojnim [41].

PTFE prevlake u domeni kuhanja rješavaju problem prijanjana zagorene hrane na površinu posuđa. Tipičan primjer takve tave je prikazan na slici 21. Visoke temperature u kuhanju uzrokuju da se zagorena hrana ubrzano taloži na prijanjajućem posuđu što dovodi do kontaminacije. Drugim riječima, PTFE omogućava povećanje kvalitete hrane te održavanje bolje higijene u procesu kuhanja. PTFE prevlake su izrazito korisne zbog, u usporedbi sa drugim polimerima, visokog tališta od 330 °C što omogućava relativnu stabilnost materijala tijekom zagrijavanja. U svrhu poboljšavanja triboloških svojstava PTFE podloga dodaju se fileri, najčešće ugljik, stakleno vlakno, minerali (primjerice tinjac) ili bronca [42].



Slika 21. Neprijanjajući PTFE premaz u praktičnoj primjeni [43]

Posuđe od neprijanjajućih prevlaka se lako i brzo čisti. Treba pripaziti na visoke temperature koje mogu prouzročiti stvaranje mrlja i značajno smanjiti učinkovitost

neprijanjajuće prevlake. Tijekom produženog korištenja, moguće je primijetiti pojavu mrlja ili površinskih ogrebotina, no isto tako treba napomenuti da ovi manji defekti neće narušiti osnovna svojstva neprijanjajućeg sloja. Neki od prepoznatljivih komercijalnih brendova za neprijanjajuće prevlake uključuju "Teflon", "Fluon" i "Debron". Vrijedno je istaknuti kako sve unutarnje obloge ne moraju nužno biti uobičajene silikonske ili fluorokarbon prevlake. Na primjer, bijela keramička obloga koja se nanosi na unutarnju površinu aluminijskog posuđa značajno se razlikuje od standardnih neprijanjajućih prevlaka. S obzirom da postoje više različitih vrsta neprijanjajućih prevlaka, potrebno je pratiti upute proizvođača o njezi proizvoda. Generalno, većina proizvođača preporučuje premazivanje uljem pri prvom korištenju. Nakon svake upotrebe je potrebno oprati takvo posuđe u toploj vodi sa deterdžentom za posuđe kako bi se spriječile mrlje. Ako se mrlje pojave, moguće ih je osvijetliti ili ukloniti korištenjem posebnog sredstva za čišćenje neprijanjajućih površina koje se može pronaći u trgovinama, ili pomoću otopine od sode bikarbone, tekućeg kućanskog izbjeljivača i vode. Za sprječavanje ogrebotina, potrebno je izbjegavati korištenje oštrog kuhinjskog pribora te umjesto toga koristiti plastičan, gumeni ili teflonom obložen pribor za jelo [10].

### **5.3.1. Toksičnost PTFE prevlaka**

U procesu sinteze PTFE prevlake koristi se perfluorooktanska kiselina (u daljnjem tekstu PFOA) koja ima negativan utjecaj na okoliš, a čiji utjecaji na ljudsko tijelo još uvijek nisu dovoljno istraženi [44]. Rezultati istraživanja o utjecajima PFOA na zdravlje su ograničeni i raznoliki. Postoje neki pokazatelji manjeg povećanja kolesterola i mokraćne kiseline kod osoba s višim razinama PFOA. Dugoročna istraživanja ukazuju na povezanost promjena u razinama PFOA s promjenama u razinama kolesterola i mokraćne kiseline. Što se tiče smrtnosti, rezultati su neujednačeni - nekim istraživanja ukazuju na povećanu smrtnost od dijabetesa. Istraživanja o reproduktivnom i razvojnom zdravlju pružaju raznolike, ali nejasne rezultate. Iako su neka istraživanja ukazala na manje utjecaje na fetalni razvoj, ti su učinci klinički ograničene važnosti [45]. Alternativa za PFOA je GenX, ali je također toksična. S druge strane, najniža izmjerena temperatura kod koje dolazi do otpuštanja PFOA tijekom kuhanja je 360 °C. Na toj temperaturi dolazi i do otpuštanja drugih opasnih plinova kao što su TFE, HFP i TFA. Veću opasnost predstavljaju čestice Teflona koje su izmjerene pri temperaturi od 240 °C što je temperatura koju je moguće postići i u vlastitom domu u pećnicama. Posljedice unošenja takvih čestica nisu istražena, ali moguće je da se zalijepe na različite dijelove tijela kao što je želučana

sluznica ili bubrezi. Stoga nije preporučljivo koristiti PFOA prevlake u pećnici. Tablica 3 prikazuje opažene promjene PTFE prevlake na raznim temperaturama [44].

**Tablica 3. Promjene PTFE prevlake pri različitim temperaturama**

Temperatura (°C)	Zapažanja
162	Ptice su uginule od prethodno zagrijane pećnice.
240	Temperatura PTFE-premazanih žarulja pod kojima su uginule ptice iz Missourija.
242	Najniža temperatura na kojoj su izmjerene Teflon čestice.
280	Ptice ubijene u eksperimentima u DuPont laboratoriju.
350	Otpuštene ultrafine čestice.
360	Otpušteni plinovi i toksični učinci: <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tetrafluoroetilen (TFE); životinjski karcinogen</li> <li>2. Heksafluoropropen (HFP); toksičan za radnike</li> <li>3. Trifluorocetna kiselina (TFA); otrovna za biljke</li> <li>4. Difluorocetna kiselina (DFA); toksična za bubrege životinja</li> <li>5. Monofluorocetna kiselina (MFA); smrtonosna za ljude pri niskim dozama</li> <li>6. Perfluorooktanska kiselina (PFOA); životinjski karcinogen</li> </ol>
470	Silicij tetrafluorid (SiF <sub>4</sub> ); vrlo toksičan pri udisanju i gutanju
475	Perfluoroizobuten (PFIB); kemijsko ratno sredstvo
500	Karbonil fluorid (COF <sub>2</sub> ); fluorirani derivat kemijskog ratnog sredstva Vodikov fluorid (HF); korozivni plin koji uništava tkivo pri kontaktu.
600	CF <sub>3</sub> COF (trifluoroacetil fluorid) razgrađuje se na HF i TFA OFCB (oktafluorociklobutan) Povezan s lupanjem srca.
650	PFB (perfluorobutan); plin koji pridonosi globalnom zagrijavanju Ugljikov tetrafluorid (CF <sub>4</sub> ); plin koji pridonosi globalnom zagrijavanju utječe na srce, pluća i živčani sustav.

### 5.3.2. Degradacija PTFE prevlaka

Prosječni životni vijek ovakvih prevlaka je između dva i četiri tjedna, no mehanička, termalna i kemijska naprezanja mogu uzrokovati jaku degradaciju materijala, a svaka promjena u strukturi i kristalinitetu može utjecati na ponašanje materijala. Istraživanje provedeno na PTFE prevlakama u raznim stanjima (nekorištene prevlake, istrošene u radu, toplinski ostarjele, ispitane radnim tijekom kroz 13000 ciklusa zagrijavanja hrane) je otkrila dva glavna fenomena degradacije koji se događaju u prevlaci, a mogli bi utjecati na PTFE prevlaku. Naime, rezultati ukazuju na sljedeće: sučelja polimera/punila i prevlake/substrata mogu biti dva glavna početna mjesta za degradaciju; ako sučelje prevlake/substrata ostane netaknuto i prijanjanje je jako, preovladavajući je fenomen pucanja na površini prevlake; nabori se pojavljuju u slučaju da prijanjanje ne može biti održano i prethodi odvajanju prevlake. Bitno je naglasiti da se ova dva mehanizma međusobno ne isključuju i mogu se istovremeno događati tijekom korištenja [42]. Provedeno je istraživanje toplinski ostarene PTFE podloge na 300 °C na dva i četiri tjedna sa posuđem iz radnog okruženja za koje se pretpostavlja da je prošlo 10000 ciklusa zagrijavanja. Rezultati su ukazali da kombinirani učinak mehaničkog trošenja i termalnog starenja dovodi do pucanja i uzrokuje stvaranje pukotina unutar polimernih matrica. Nadalje, područja u blizini pucanja pokazuju značajan gubitak svojstava protiv prijanjanja. To bi moglo biti zbog općih promjena kemijske strukture površine u oštećenim regijama. Kombinacija termalne analize, XRD-a i mehaničkog ispitivanja pokazala je mikrostrukturne promjene koje se događaju unutar matrice tijekom termalnog starenja, što pak dovodi do smanjenih mehaničkih svojstava. Simulacija kontaktnog prženja je pokazala da se nakon dva tjedna termalnog starenja svojstva protiv prijanjanja značajno smanjuju, što je u skladu sa životnim vijekom ove vrste posuđa [46].

## 6. ELEKTROKEMIJSKA KOROZIJSKA ISPITIVANJA

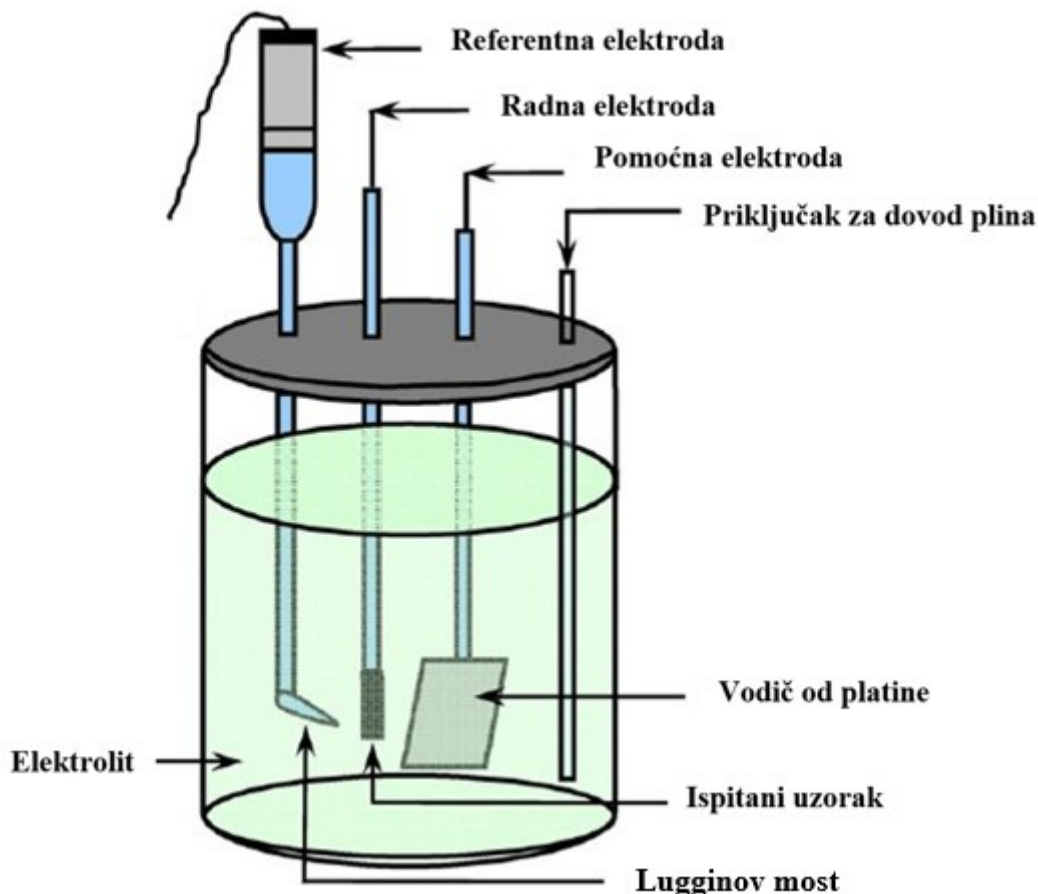
Korozija je elektrokemijski proces koji uključuje oksidacijske i redukcijske reakcije. Kada dođe do korozije, metal otpušta elektrone kroz oksidaciju, dok ih elementi u korodirajućoj otopini primaju kroz redukciju. Zbog tog protoka elektrona, koroziju možemo mjeriti i kontrolirati elektroničkim metodama. Tako se kontrolirane elektrokemijske metode mogu koristiti za ispitivanje korozivnih svojstava metala i njihovih komponenti u raznim elektrolitskim otopinama. Svaki sustav metala i otopine ima jedinstvena korozivna svojstva. Jedno od najvažnijih je brzina gubitka materijala uzorka odnosno njegova brzina korozije. Ispitivanja se primjenjuju u svrhu testiranja korozivne otpornosti različitih zaštitnih premaza i slojeva. Postoje dvije glavne vrste elektrokemijskih korozivnih ispitivanja, a to su ona sa istosmjernom i izmjeničnom strujom [47].

### 6.1. Elektrokemijska korozija ispitivanja s istosmjernom strujom

Elektrokemijska korozivna ispitivanja s istosmjernom strujom se dijele na dvije osnovne mjerne metode: potencioštatička i galvanostatička polarizacija. U potencioštatičkoj polarizaciji primjenjuje se određeni potencijal na mjernu elektrodu, dok potencioštat kontinuirano mjeri odzivnu struju sustava u realnom vremenu. S druge strane, kod galvanostatičke polarizacije određena struja se primjenjuje na mjernu elektrodu, a odzivni napon sustava se kontinuirano mjeri galvanostatom. Navedeni uređaji slanjem signala i praćenjem odziva sustava dobivaju polarizacijske krivulje struje u odnosu na napon. Takve krivulje posjeduju svoje katodne i anodne karakteristike na temelju kojih dobivamo uvid u korozivnu otpornost određenog uzorka u testiranom korodivnom mediju. Na navedene uređaje se spajaju tri elektrode različitih svrha. One su također spojene u elektrokemijski sustav putem elektrokemijske ćelije, prikazanoj na slici 22, u kojoj se provode elektrokemijska mjerenja. Navedene elektrode su sljedećeg tipa [48]:

- Radna elektroda – predstavlja ju ispitni uzorak u obliku pločice kojeg s vanjske strane elektrokemijske ćelije drži određeni držak. Dolazi u kontakt sa elektrolitom kroz provrt promjera  $0.784 \text{ cm}^2$ .
- Pomoćna elektroda – predstavlja protuelektrodu koja zatvara strujni krug. Izrađena je od dobro vodljivog materijala otpornog na koroziju poput patine ili grafita.
- Referentna elektroda – Elektroda pomoću koje potencioštat mjeri potencijal radne elektrode. Ima poznati potencijal i ne pridonosi strujnom krugu. Najčešće je korištena

zasićena kalomel ZKE elektroda standardnog elektrodnog potencijala + 242 mV s obzirom na vodikovu elektrodu. Referentnu elektrodu od elektrolitne otopine odvaja Lugginov most.

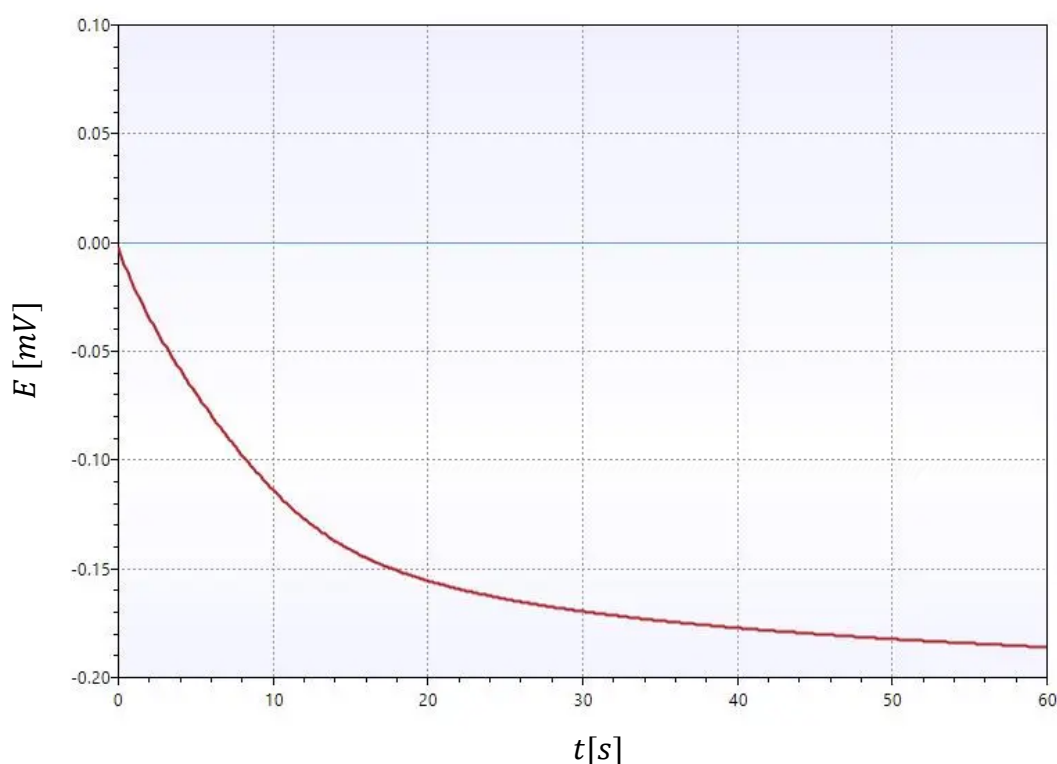


Slika 22. Skica elektrokemijske ćelije [49]

### 6.1.1. Potencijal otvorenog strujnog kruga

Nakon što radna elektroda dođe u kontakt s elektrolitom, i potenciostat pokrene navedeno ispitivanje, dolazi do otvaranja strujnog kruga između radne i pomoćne elektrode. Kako su navedene elektrode različitih potencijala, sustav je nestabilan. Provođenjem ispitivanja, sustav se dovodi u stanje relativne stabilnosti kontinuiranim mjerenjem razlike potencijala radne i referente elektrode kroz vrijeme. Vrijednost potencijala u zadnjoj točki na kraju pokusa predstavlja vrijednost potencijala otvorenog strujnog kruga  $E_{ok}$ , odnosno korozijskog potencijala  $E_{kor}$ . Struju korozije  $I_{kor}$  predstavljaju anodna struja otapanja metala  $I_a$  i katodna struja redukcije  $I_k$ , koje su istog smjera ali suprotnog iznosa. Ovisno o karakteristikama ispitnog uzorka i medija u koji je umočen, konačni graf može biti različitih

oblika i time imati različita tumačenja. Pozitivne vrijednosti  $E_{ok}$  ukazuju na otpor materijala na ispitni elektrolit i da neće doći do korodiranja ispitnog uzorka. Dok se negativne vrijednosti  $E_{ok}$  tumače kao nestabilnost materijala u odnosu na ispitni medij i pojavu određenog oblika korozije. Pasiviranje materijala predstavlja kontinuirano povećavanje vrijednosti  $E_{ok}$ . Ako na kraju ispitivanja ne dođe do stabilizacije sustava, u obzir se uzima vrijednost prednapona, što je razlika potencijala od vrijednosti korozijskog potencijala za naponsku vrijednost [48]. Na slici 23 je prikazan graf kojim se određuje konačna vrijednost korozijskog potencijala metodom otvorenog strujnog kruga.



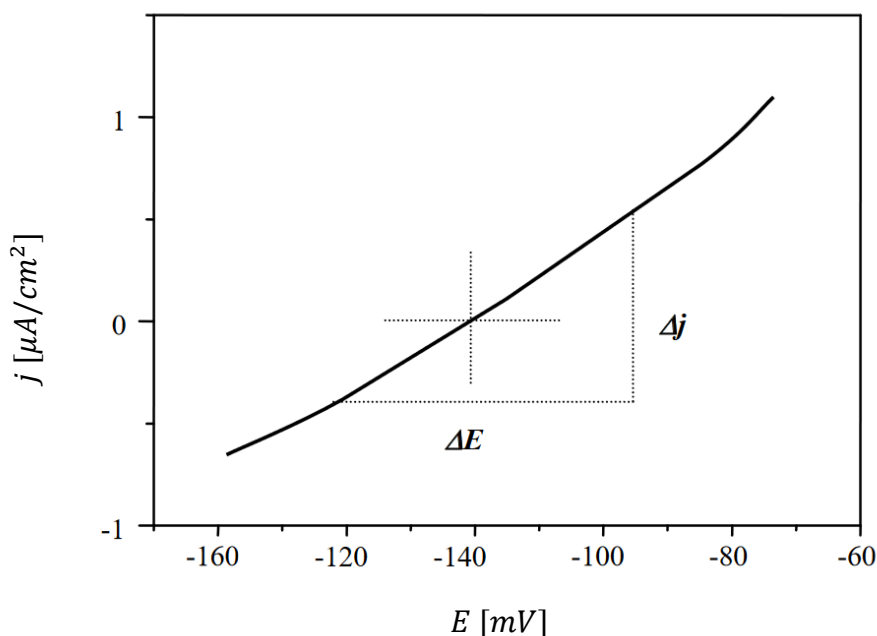
Slika 23. Određivanje korozijskog potencijala metodom otvorenog strujnog kruga [50]

### 6.1.2. Linearna polarizacija

Naziv proizlazi iz linearnog odnosa potencijala i struje u ispitnom području. Ispitivanjem linearne polarizacije računamo niz vrijednosti, od kojih je najvažniji polarizacijski otpor  $R_p$ . On predstavlja otpor prolazu elektroaktivnih čestica iz jedne faze (ispitnog uzorka) u drugu fazu (ispitnog medija) i obrnuto. U odnosu na vrijednost potencijala otvorenog strujnog kruga  $E_{ok}$ , definira se u tolerancijskom području polarizacije  $\pm 20$  mV. Vrijednosti polarizacijskog otpora  $R_p$  proizlaze iz nagiba pravca koji se računa prema jednadžbi:



$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta j} \quad (3)$$



Slika 24. Određivanje vrijednosti polarizacijskog otpora [48]

što je njegova vrijednost, veća je otpornost, ispitnog uzorka u odnosu na ispitni medij, što je prikazano na slici 24 [48].

### 6.1.3. Tafelova ekstrapolacija

Ispitna metoda Tafelove ekstrapolacije se temelji na jednadžbi elektrokemijske kinetike pod imenom *Butler – Volemerova* jednadžba koja predstavlja odnos gustoće korozijske struje i promjene napona. Cilj Tafelove ekstrapolacije je odrediti gustoću korozijske struje što se izvodi pomoću jednadžbe (4):

$$j = j_0 \left\{ \exp \left[ \frac{(1 - \alpha)zF}{RT} \eta \right] - \exp \left[ - \frac{\alpha zF}{RT} \eta \right] \right\} \quad (4)$$

U kojoj je  $i$  gustoća korozijske struje ( $\text{Am}^{-2}$ ),  $i_0$  gustoća struje izmjene ( $\text{Am}^{-2}$ ),  $\alpha$  koeficijent prijenosa,  $F$  Faradayeva konstanta,  $z$  broj izmijenjenih elektrona,  $R$  opća plinska konstanta,  $n$  prenapon (V) i  $T$  temperatura (K) [51].

Povećanjem prednapona dolazi do reakcije redukcije i ubrzanja reakcije oksidacije. Kada napon postane toliko velik da struja redukcije postane zanemarivo mala, *Butler – Volemerova* jednadžba dobiva sljedeći oblik (5):

$$j = j_0 \left\{ \exp \left[ \frac{(1 - \alpha)zF}{RT} \eta \right] \right\} \quad (5)$$

Logaritmiranjem sljedeće jednadžbe dobiva se Tafelova jednadžba (6).

$$\eta = \alpha + b \cdot \log \cdot j \quad (6)$$

Njezinim preformuliranjem dobivamo nagibe anodnog (7) i katodnog (8) Tafelovog pravca:

$$b_a = \frac{2,303RT}{(1 - \alpha)zF} \quad (7)$$

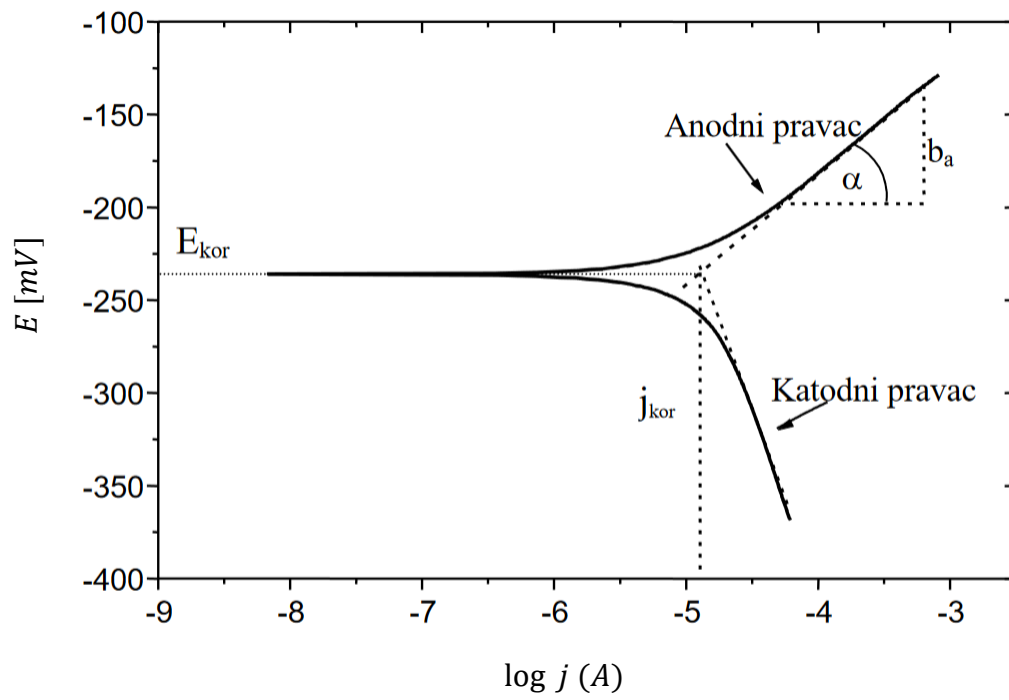
$$b_k = \frac{-2,303RT}{\alpha zF} \quad (8)$$

Dolazi do polarizacije ispitivane elektrode u anodnom i katodnom smjeru do točke iznosa korozijskog potencijala. Dobiveni rezultati su grafički prikazani u polulogaritamskom obliku u širokom području potencijala ( $E = E_{kor} \pm 250$  mV). Iznosi korozijskog potencijala ( $E_{kor}$ ) i gustoće korozijske struje ( $j_{kor}$ ) određuju se ekstrapolacijom anodnih i katodnih tafelovih pravaca u njihovom sjecištu [51], kao što je prikazano na slici 25.

Brzina korozije se računa pomoću izraza (9):

$$v_{kor} = \frac{3,3 \cdot 10^{-3} \cdot j_{kor} \cdot EW}{\rho} \quad (9)$$

U kojoj je  $EW$  ekvivalentna masa materijala, a  $\rho$  gustoća materijala ( $\text{g/m}^3$ ) [51].



Slika 25. Prikaz Tafelove ekstrapolacije [51]

## 7. EXPERIMENTALNI DIO

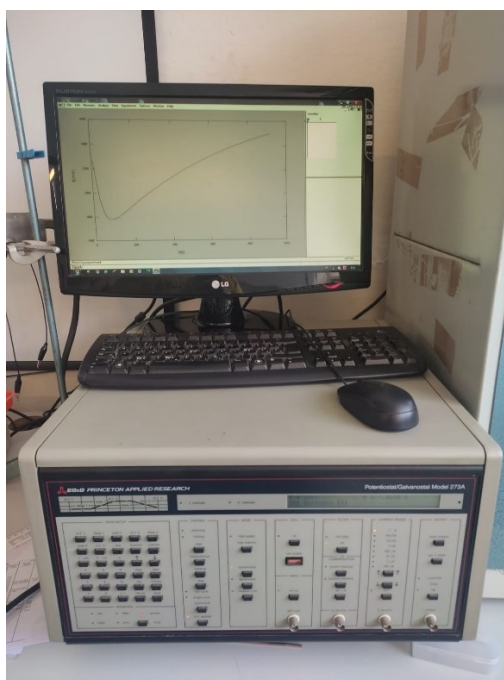
U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja s ciljem pronalaženja najpogodnijeg i najpristupačnijeg materijala za izradu kuhinjskog posuđa. Za ispitivanje su odabrana dva materijala koja odgovaraju tim zahtjevima: čelici tipa AISI 304 i AISI 316 te aluminijska legura AA 3004. Cilj istraživanja je bio usporediti otpornost ispitivanih materijala u različitim medijima na kemijske promjene elektrokemijskim metodama.

Metoda je uključivala pripremanje uzoraka odabrane vrste materijala i njihovog spajanja na elektrokemijsku ćeliju koja je napunjena različitim elektrolitima koji simuliraju namirnice u kućanstvu. Prvo je provedeno ispitivanje ispitnih uzoraka u odnosu na salinitet vodene otopine, a zatim ponašanje na različite pH vrijednosti koristeći sok od rajčice i bademovo mlijeko. Nakon toga provedena su polarizacijska elektrokemijska ispitivanja kojima se kroz dobivene grafove polarizacijskih krivulja dobio uvid u ponašanje uzorka u određenom medijima.

### 7.1. Korištena oprema

#### 7.1.1. *Princeton Applied Research Model 273A*

Za elektrokemijska ispitivanja korišten je uređaj *Galvanostat/potenciostat Princeton Applied Research Model 273A*. Dobiveni grafovi obrađeni su u programu pod nazivom *352 SoftCorr III*. Na slici 26 je prikazan navedeni uređaj.

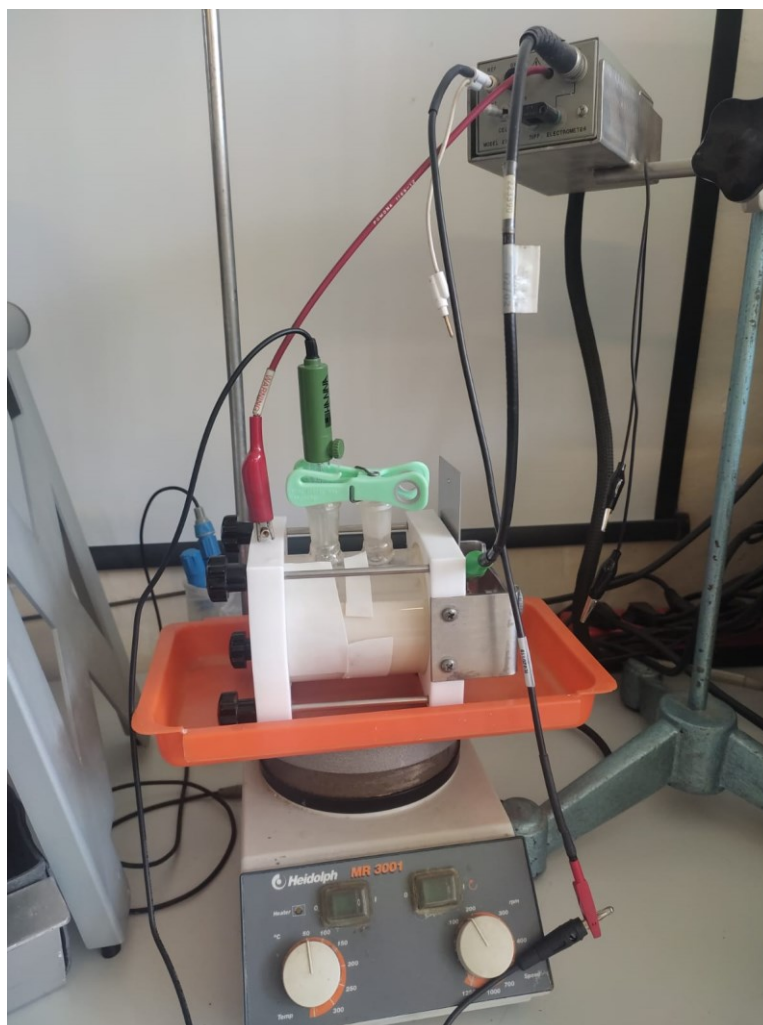


Slika 26. Uređaj Princeton Applied Research Model 273A spojen na upravljačko računalo

### 7.1.2. Elektrokemijska ćelija i elektrode

Korištena je staklena elektrokemijska ćelija prikazana na slici 27. Sadržavala je sljedeće elektrode:

- Radna elektroda – ispitni uzorak koji je u kontaktu sa elektrolitom površine  $0,785 \text{ cm}^2$ ;
- Referenta elektroda – zasićena kalomel elektroda (ZKE) potencijala  $+242 \text{ mV}$  u odnosu na standardnu vodikovu elektrodu;
- Ugrađena protuelektroda od platine.



Slika 27. Elektrokemijska ćelija tijekom ispitivanja

## 7.2. Kemijski sastav ispitanih materijala i elektrolita

Prije početka elektrokemijskog ispitivanja metodom nerazorne rendgenske fluorescentne spektrometrije (XRF) je provedeno ispitivanje kemijskog sastava samih uzoraka.

Uređaj korišten za ispitivanje je XRF- Olympus, proizvođač: Innov-X Systems, Inc., USA, model: DS 2000-C. Na slici 28 su prikazani kemijski sastavi ispitnih uzoraka.



**Slika 28. Uređaj XRF- Olympus DS 2000-C koji je korišten za ispitivanje kemijskog sastava ispitnih uzoraka te primjer njegovog korištenja**

U tablicama 4 i 5 su priloženi kemijski sastavi ispitnih uzoraka dobiveni XRF uređajem.

**Tablica 4. Kemijski sastavi ispitnih uzoraka čelika**

Čelik	Si %	Ti %	Cr %	Mn %	Fe %	Ni %	Mo %	Cu %
AISI 304	0,36	0,42	16,86	1,06	71,62	9,03	0,21	0,30
AISI 316	0,38	0,52	16,79	1,28	67,86	10,53	2,07	0,40

**Tablica 5. Kemijski sastav ispitnog uzorka aluminija**

Aluminij	Mg %	Al %	Si %	Mn %	Fe %	Cu %	Zn %	Pb %
AA 3004	1,27	96,86	0,33	1,02	0,54	0,14	0,04	0,05

U tablici 6 su priložene pH vrijednosti i saliniteti ispitnih elektrolita.

Tablica 6. Prikaz pH vrijednosti i saliniteti ispitnih elektrolita

	Obična voda	0,4% NaCl	3,5% NaCl	5,0% NaCl	Sok od rajčice	Bademovo mlijeko
pH	6,931	5,7	6,111	6,231	4,853	7,476
Sal [ppt]	0,21	3,72	28,72	38,28	1,86	3,20

### 7.3. Pripremanje uzorka

Prije samog ispitivanja, površine uzoraka brušene su brusnim papirom različitih granulacija kako bi se ravnomjerno i temeljito očistila njihova površina. Brušenje je počelo brusnim papirom granulacije P400, a završilo granulacijom P800. Brušenje čeličnih uzoraka nije stvaralo problem, međutim, prilikom brušenja aluminijskog uzorka bilo je potrebno obratiti pažnju da se ne savije. Naime, uzorak aluminija je unutarnja strana standardne Coca-Cola limenke. Zbog toga je bilo potrebno prebrusiti površinski zaštitni sloj aluminijskog uzorka limenke kako bi se došlo do osnovnog materijala. Ispitni uzorci su nakon brušenja oprani etanolom i destiliranom vodom te kasnije obrisani papirnatim ručnikom. Nakon pripreme ispitne površine, uzorak se držačem pričvrstio za vanjski dio elektrokemijske ćelije. Na slici 29 su prikazani pripremljeni materijali za ispitivanje.

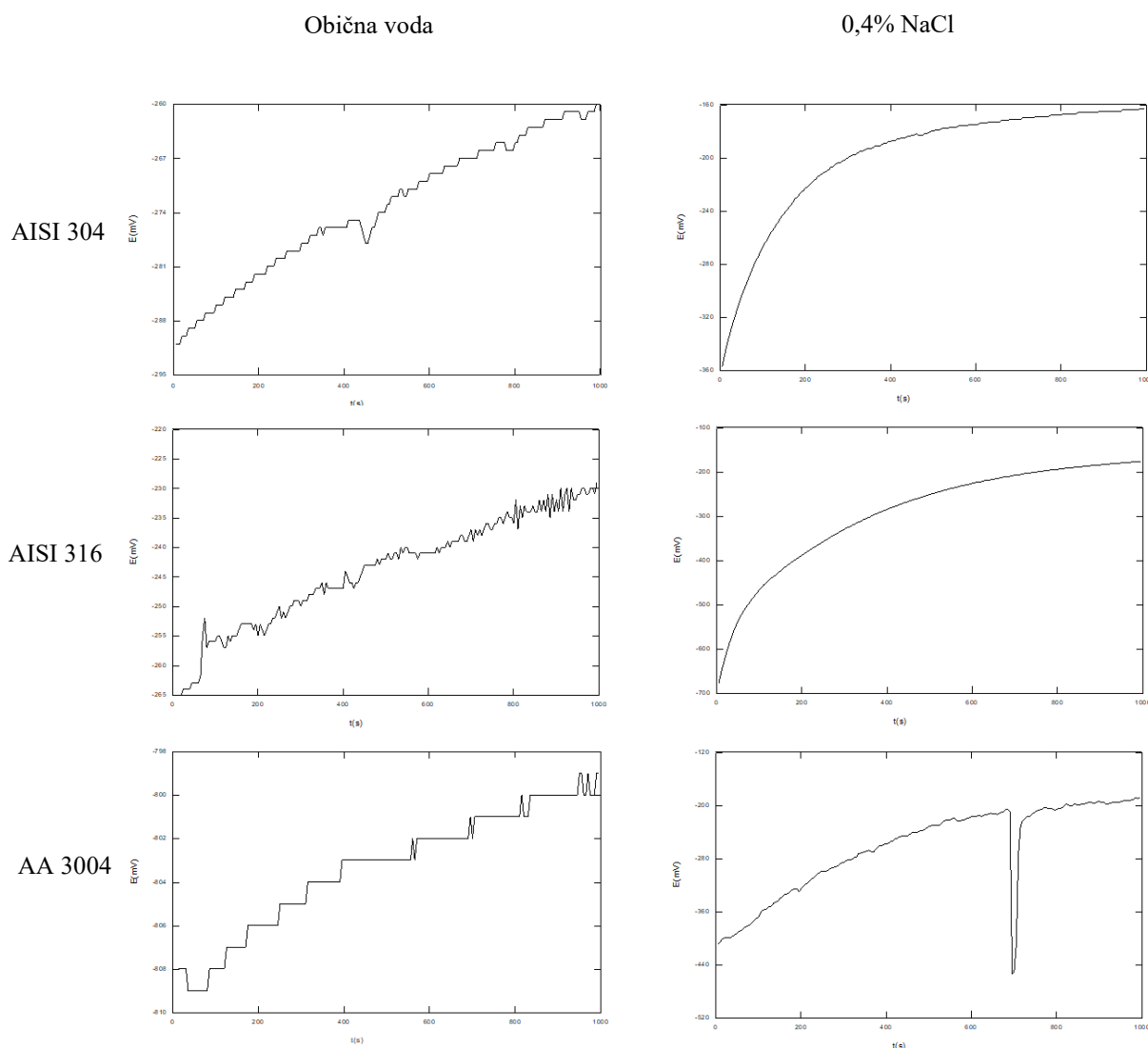


Slika 29. Pripremljeni ispitni uzorci

Kao ispitni medij, odnosno elektrolit, korišteni su obična voda, destilirana slana voda različite koncentracije soli (NaCl 0,4%, 3,5% i 5,0%), sok od rajčice razrijeđen s običnom vodom u omjeru 1:1 i bademovo mlijeko. Na ispitnim uzorcima prvotno je proveden eksperiment korozijskog potencijala otvorenog strujnog kruga, zatim eksperiment linearne polarizacije, a na kraju je provedena Tafelova ekstrapolacija. Nakon provedenog ispitivanja, korišteni elektrolit se baca, a ispitni uzorak ponovo se priprema istim postupkom za ispitivanje u sljedećem elektrolitu.

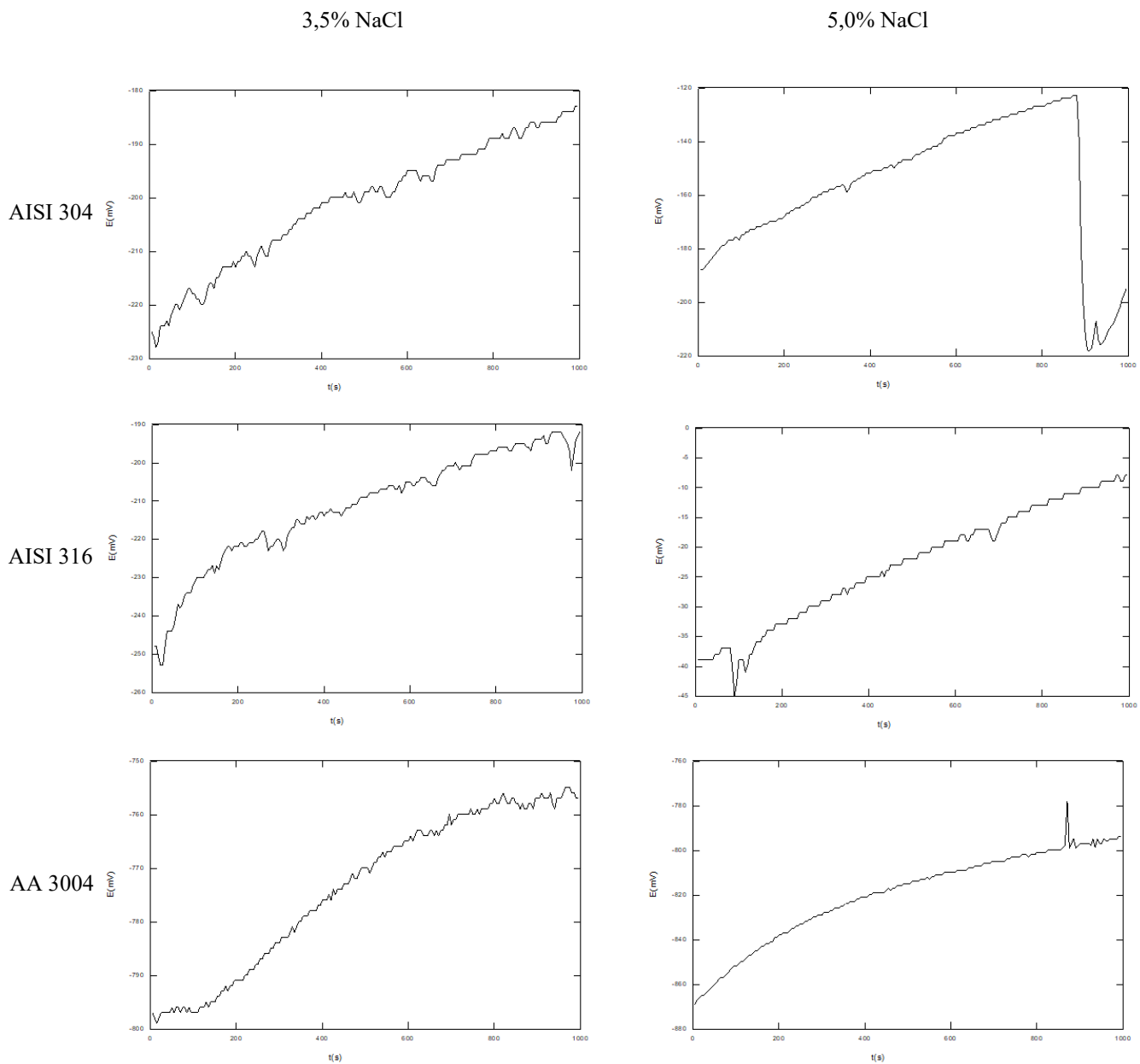
#### 7.4. Određivanje korozijskog potencijala u otvorenom strujnom krugu

Ispitni uzorak preko kružne površine dolazi u kontakt s elektrolitom i s protuelektrodom zatvara strujni krug. Sustav je na početku nestabilan i tijekom trajanja eksperimenta od 15 minuta teži stabilizaciji. Tijekom eksperimenta snima se krivulja E-t u 1000 točaka. Posljednja točka predstavlja korozijski potencijal, odnosno potencijal otvorenog strujnog kruga u odnosu na referentnu elektrodu, čiju vrijednost očitavamo. Na slikama 30, 31 i 32 su prikazani dijagrami određivanja korozijskog potencijala za ispitne uzorke u običnoj vodi i destiliranoj vodi s otopljenim 0,4%, 3,5% i 5,0% NaCl-a. Na slici 33 su grafički prikazani odnosi korozijskog potencijala različitih uzoraka za različiti ispitni medij. Rezultati mjerenja korozijskog potencijala za ispitne uzorke su prikazani u tablici 7.

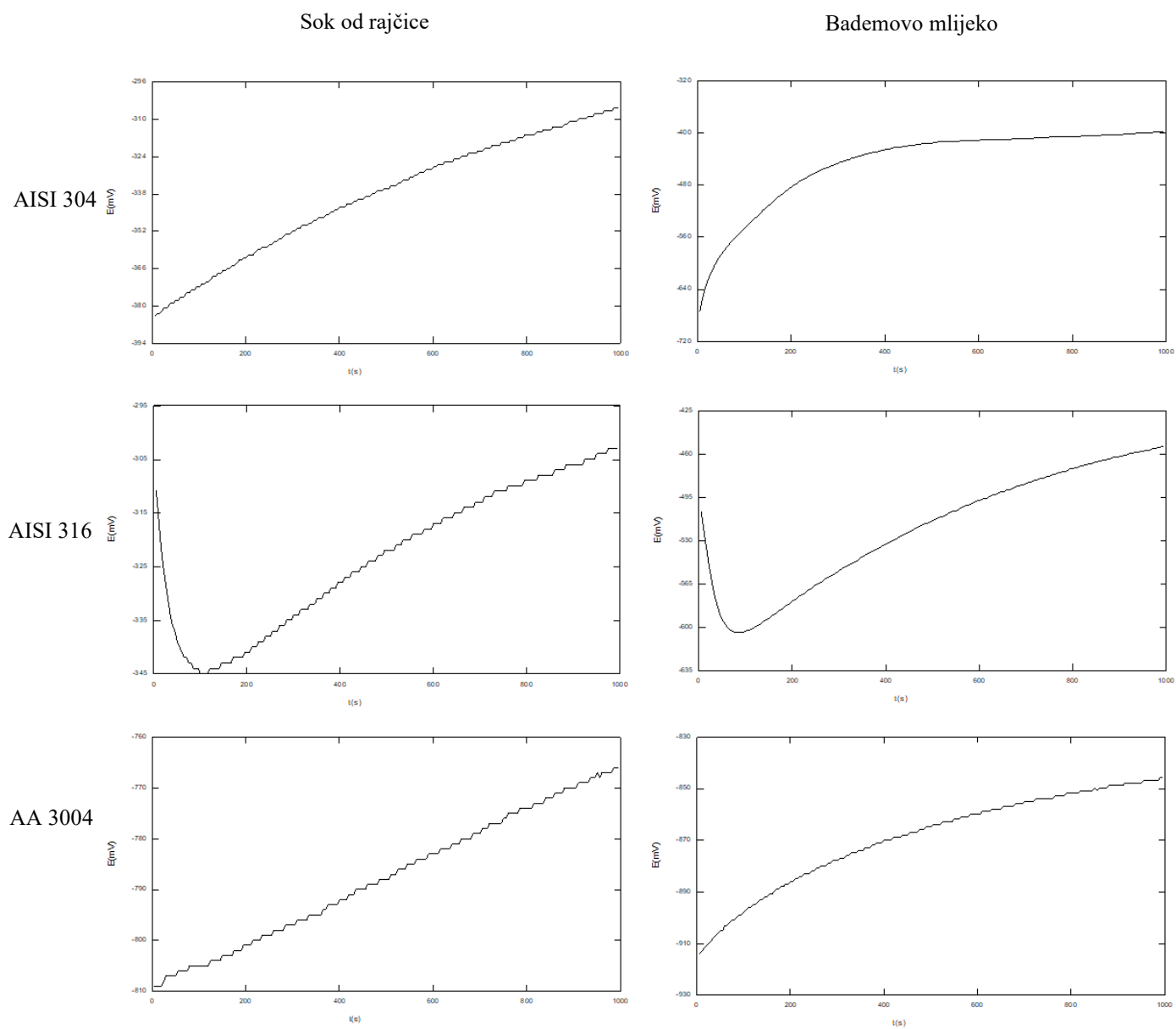


Slika 30. Dijagrami određivanja korozijskog potencijala za ispitne uzorke u običnoj vodi i destiliranoj otopini 0,4% NaCl





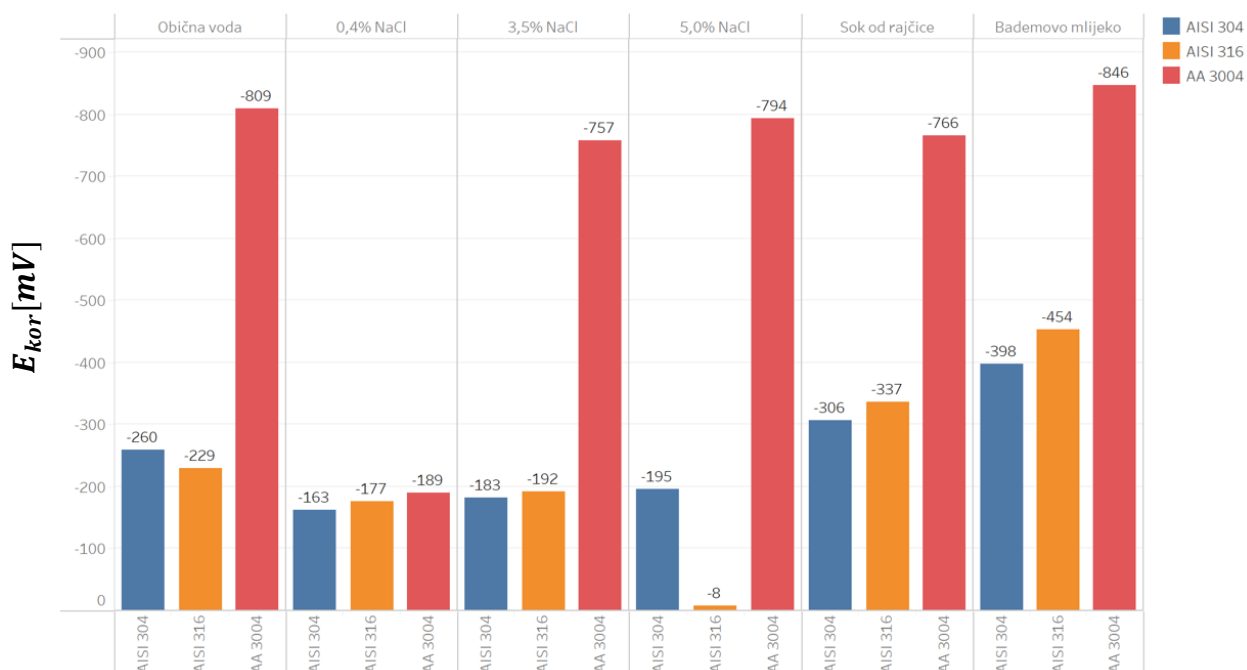
**Slika 31. Dijagrami određivanja korozivnog potencijala za ispitne uzorke u destiliranim otopinama 3,5% i 5,0% NaCl**



**Slika 32. Dijagrami određivanja korozivnog potencijala za ispitne uzorke u razrijeđenom soku od rajčice sa vodom 1:1 i u bademovom mlijeku**

Tablica 7. Rezultati mjerenja korozijskog potencijala za ispitne uzorke

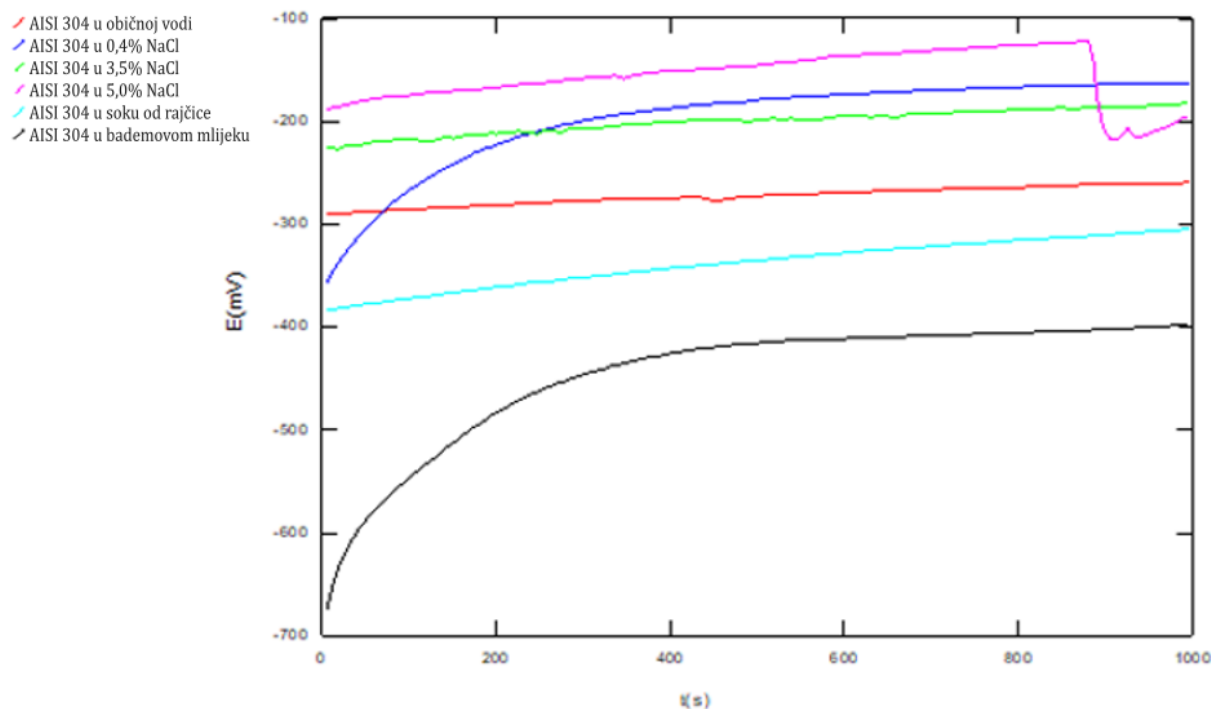
$E_{kor}$ [mV]	AISI 304	AISI 316	AA 3004
Obična voda	-260	-229	-574
0,4% NaCl	-163	-177	-189
3,5% NaCl	-183	-192	-757
5,0% NaCl	-195	-8	-794
Sok od rajčice	-306	-337	-766
Bademovo mlijeko	-398	-454	-846



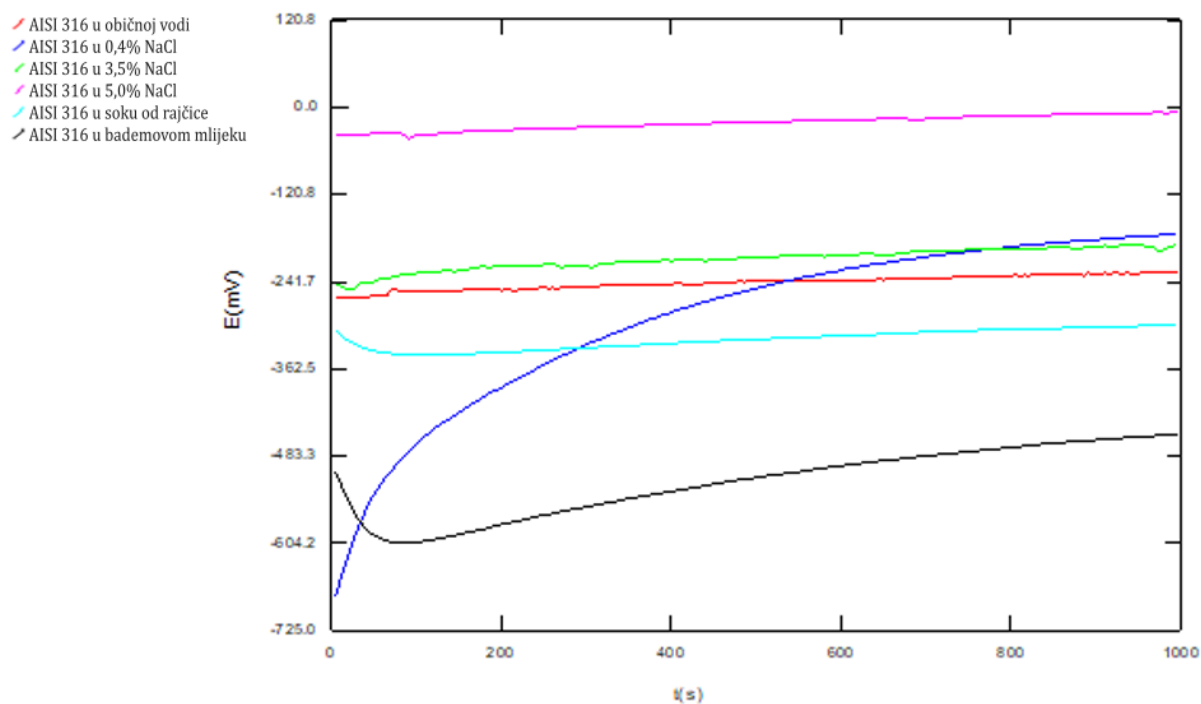
Slika 33. Graf odnosa rezultata korozijskog potencijala različitih uzoraka za različiti elektrolit

Na slikama 30, 31 i 32 prikazanih grafova otvorenog strujnog kruga je vidljivo povećavanje vrijednosti korozijskog potencijala na gotovo svim grafovima. Ta pojava upućuje na pasivaciju i otpornost materijala na stvaranje korozije u testiranim elektrolitima. No, konačne vrijednosti korozijskog potencijala su negativne. Taj podatak znači da je došlo do pasivacije površinskog sloja ispitnog materijala, ali da materijal nije u potpunosti imun.

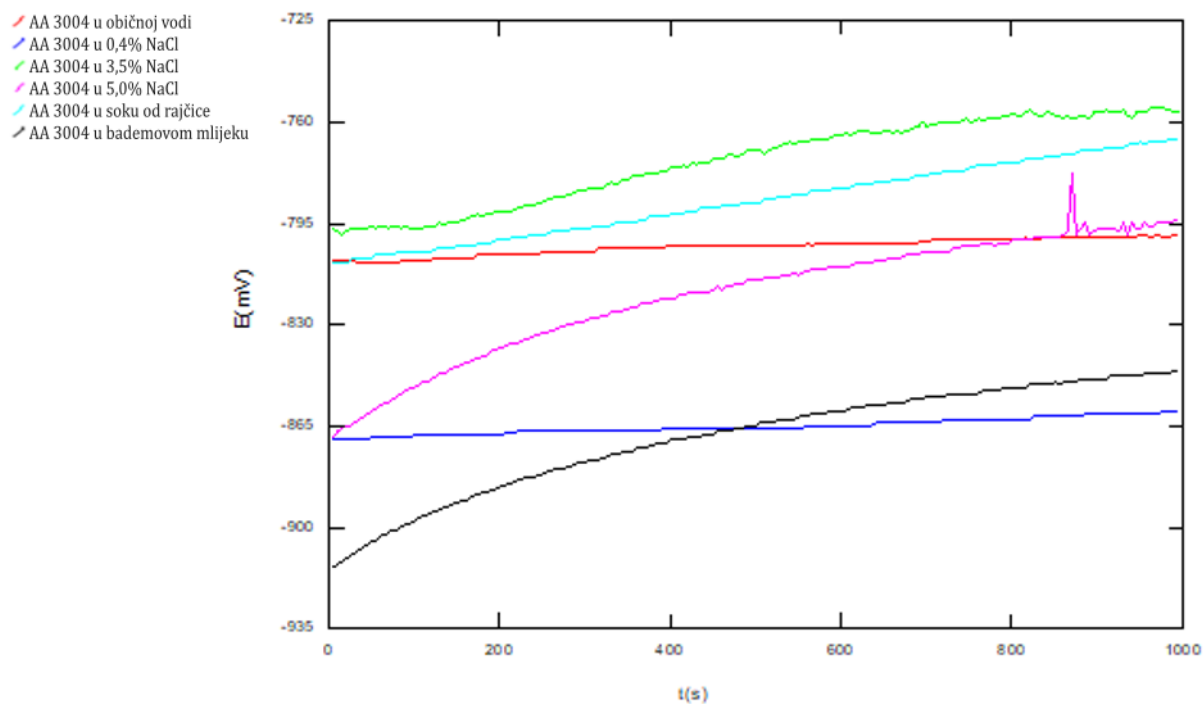
Pasivacija površinskog sloja može značiti da će ispitani uzorak biti otporan na koroziju no i ne mora. Otpornost materijala na koroziju se može zaključiti ako postoje uvjerljive naznake u grafu da se prikazana krivulja počinje stabilizirati na određenu vrijednost (vidljivo na krivuljama grafova AISI 316 i 304 u 0,4% NaCl na slici 30). U drugim slučajevima graf može izgledati kao da se pri kraju eksperimenta stabilizirao na određenu vrijednost, ali zahvaljujući vremenskom ograničenju od 1000 s, naglo opadanje grafa, odnosno popuštanje pasivnog sloja, nije prikazano u prikazanom grafu. Zbog toga nije dovoljno samo ispitivanje potencijala otvorenog strujnog kruga, već je potrebno provesti i druga ispitivanja kako bi se utvrdila otpornost ispitnog materijala na određeni elektrolit. Na slikama 34, 35 i 36 su prikazane odnosi vrijednosti korozijskog potencijala ispitanih uzoraka za sve ispitane elektrolite. Manje vrijednosti ukazuju na manju korozijsku otpornost.



Slika 34. Dijagrami određivanja korozijskog potencijala za ispitni uzorak AISI 304 za sve ispitane elektrolite



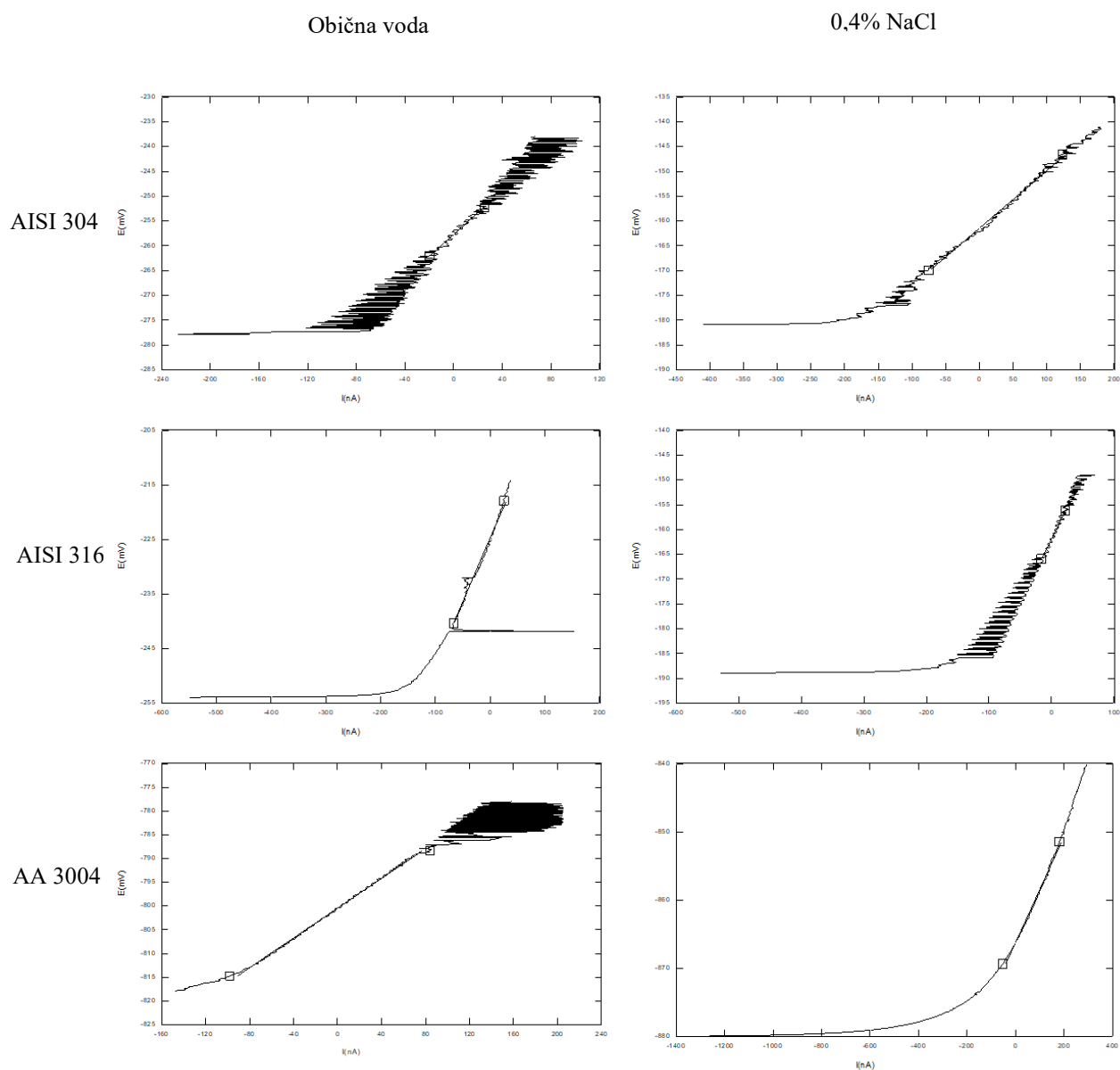
Slika 35. Dijagrami određivanja korozivnog potencijala za ispitni uzorak AISI 316 za sve ispitane elektrolite



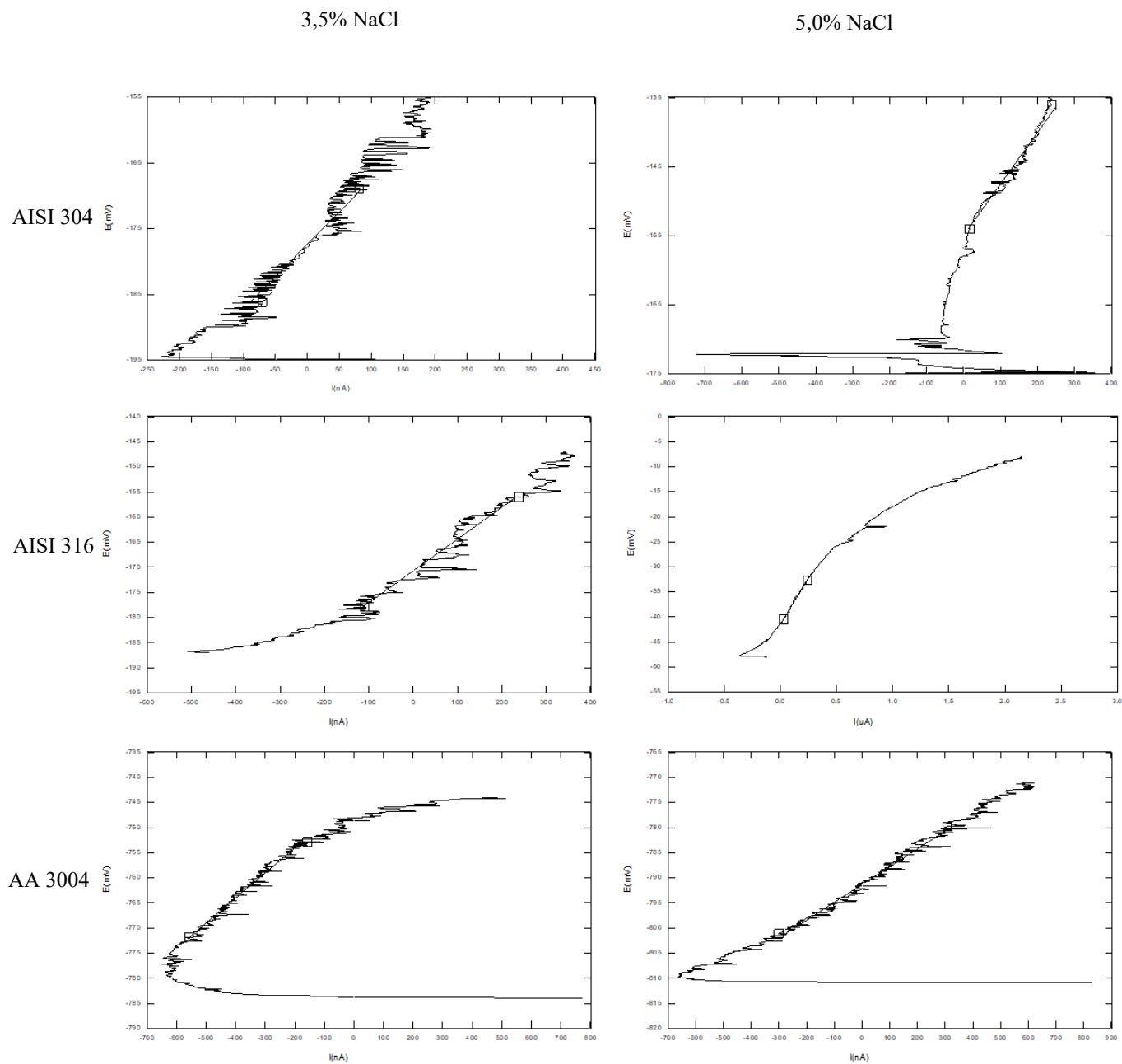
Slika 36. Dijagrami određivanja korozivnog potencijala za ispitni uzorak AA 3004 za sve ispitane elektrolite

## 7.5. Određivanje polarizacijskog otpora metodom linearne polarizacije

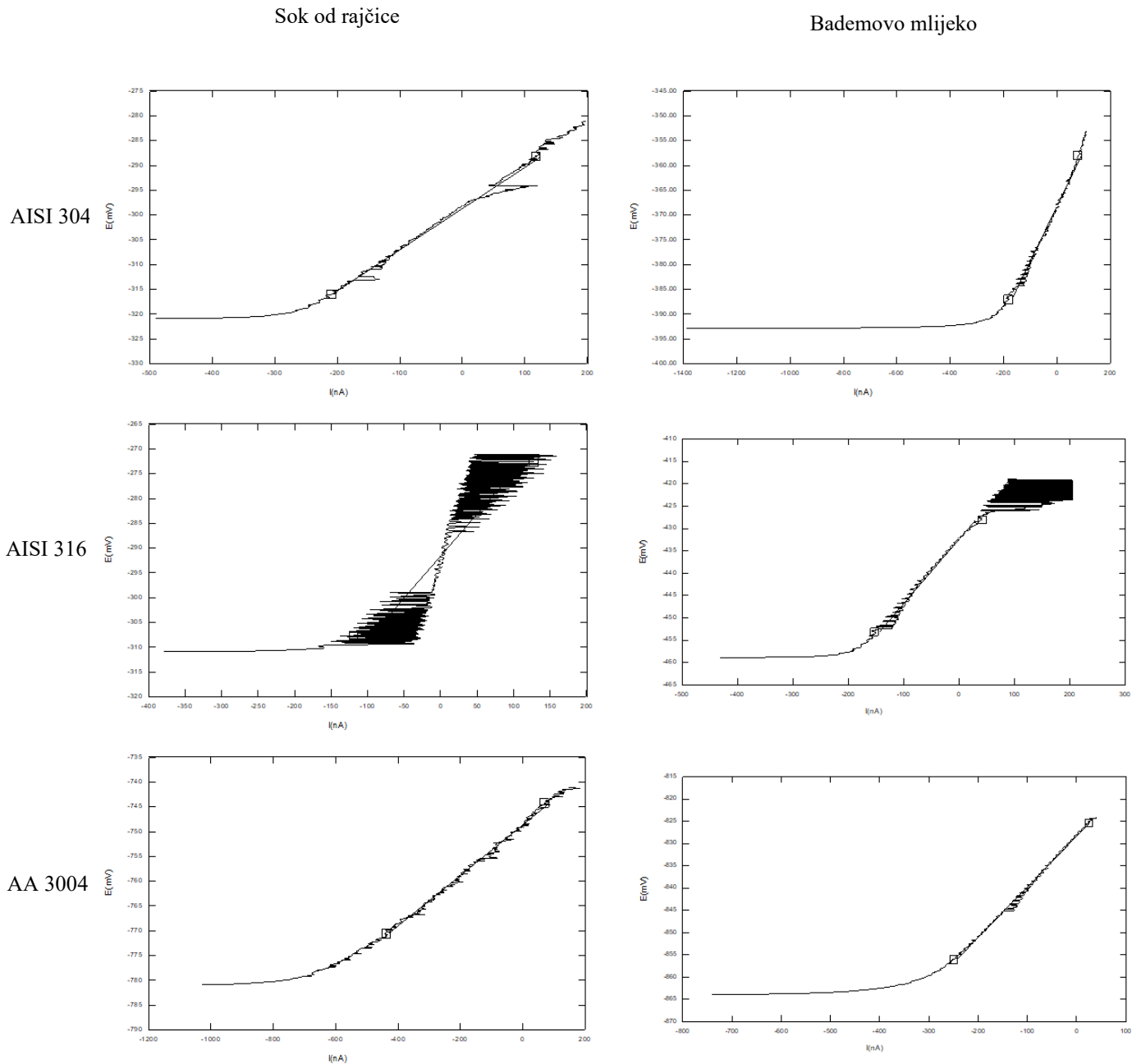
Ispitni uzorak se podvrgava linearnoj polarizaciji pomoću čega se izračunava polarizacijski otpor  $R_p$  pri vrijednostima  $\pm 20$  mV u odnosu na korozijski potencijal. Na slikama 37, 38 i 39 su prikazani dijagrami linearne polarizacije za 304, 316 i AA 3004. Rezultati njihovih polarizacijskih otpora su dani u tablici 8, a na slici 40 su prikazani odnos rezultata polarizacijskih otpora različitih uzoraka za različiti elektrolit.



Slika 37. Dijagrami linearne polarizacije za običnu vodu i destiliranu otopinu 0,4% NaCl



Slika 38. Dijagrami linearne polarizacije za destiliranu otopinu 3,5% i 5,0% NaCl

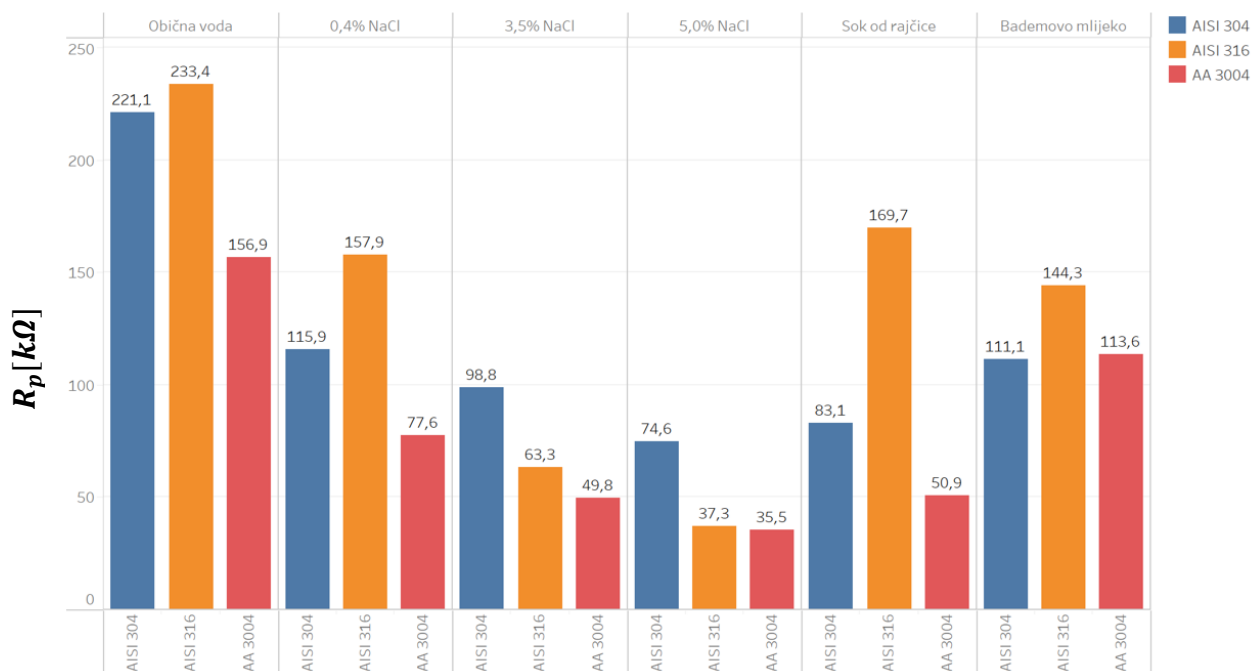


Slika 39. Dijagrami linearne polarizacije za razrijeđeni sok od rajčice sa vodom 1:1 i bademovom mlijekom



Tablica 8. Rezultati polarizacijskih otpora za grafove linearne polarizacije

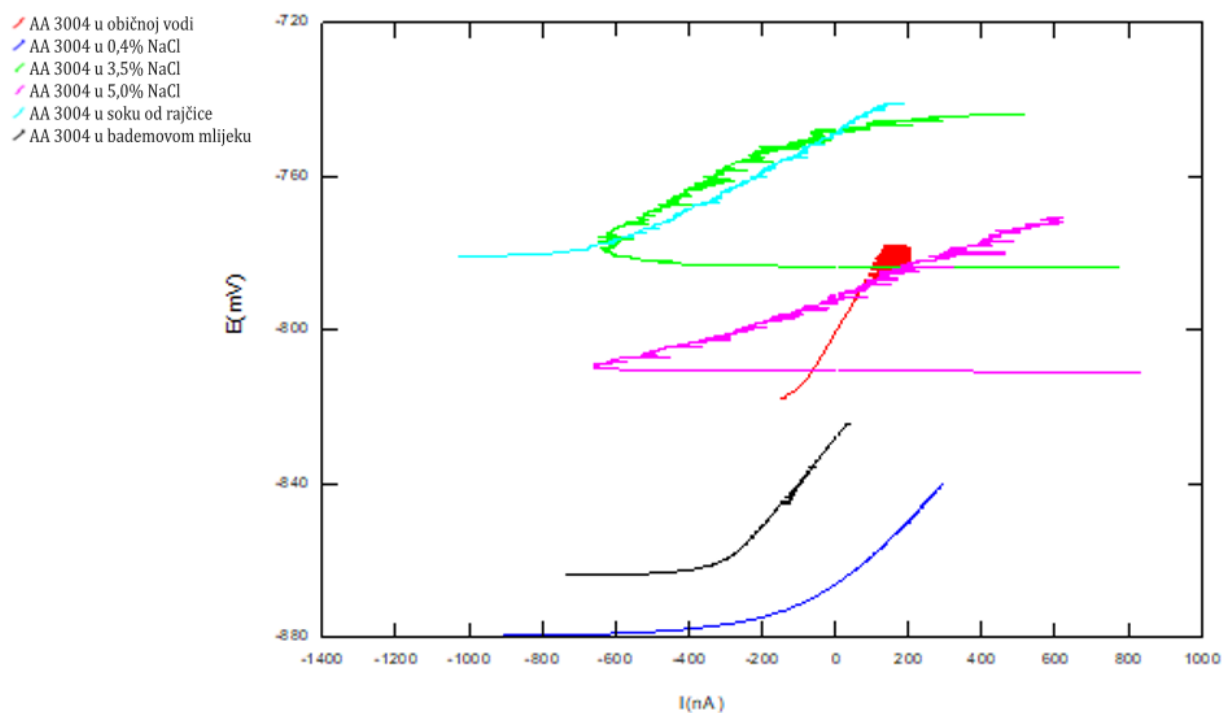
$R_p [k\Omega]$	AISI 304	AISI 316	AA 3004
Obična voda	221,1	233,4	156,9
0,4% NaCl	115,9	157,9	77,63
3,5% NaCl	98,83	63,32	49,83
5,0% NaCl	74,61	37,3	35,47
Sok od rajčice	83,14	169,7	50,91
Bademovo mlijeko	111,1	144,3	113,6



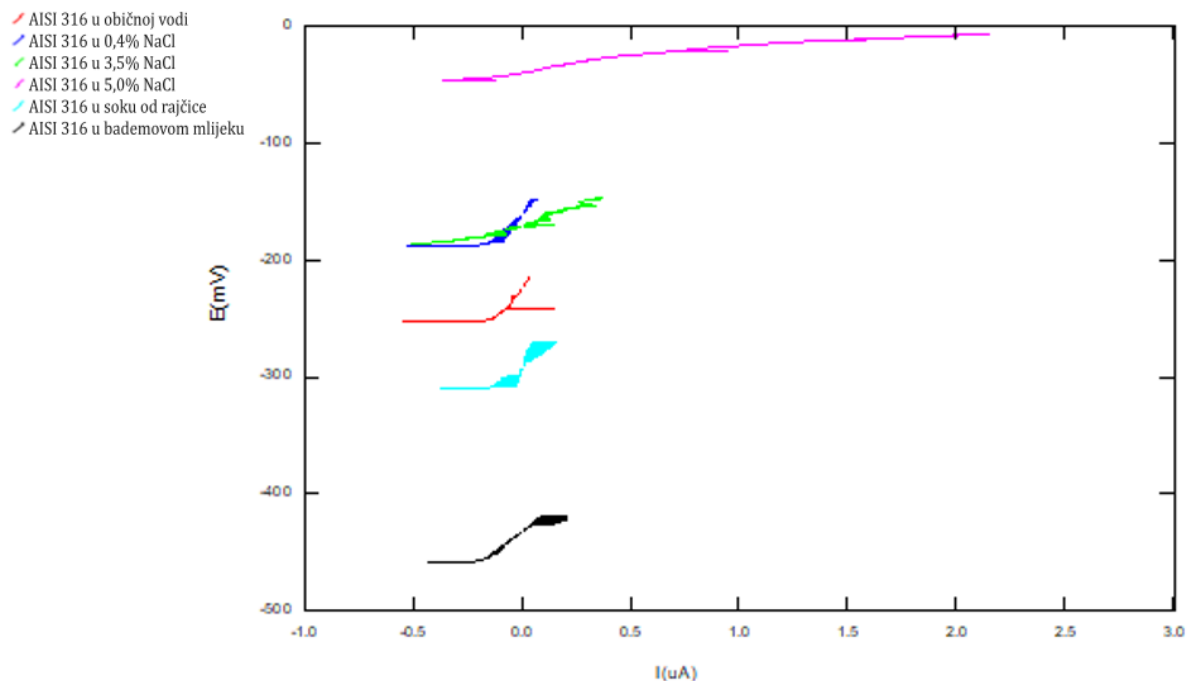
Slika 40. Graf odnosa rezultata polarizacijskih otpora različitih uzoraka za različiti elektrolit

Dijagrami prikazani na slikama 37, 38 i 39 predstavljaju testiranje koje izaziva određeno razaranje materijala. Zbog toga ga, za razliku od ispitivanja otvorenog strujnog kruga, ne smije ponavljati u slučaju lošeg rezultata već je potrebno ponovo pripremiti uzorak. Test linearne polarizacije također postaje osjetljiviji korištenjem korozivnijeg elektrolita na ispitani uzorak. U tim slučajevima dolazi do češće pojave šumova na dijagramima. Manji nagibi definiranih pravaca na krivuljama dijagrama ukazuju na manju otpornost na koroziju. S druge

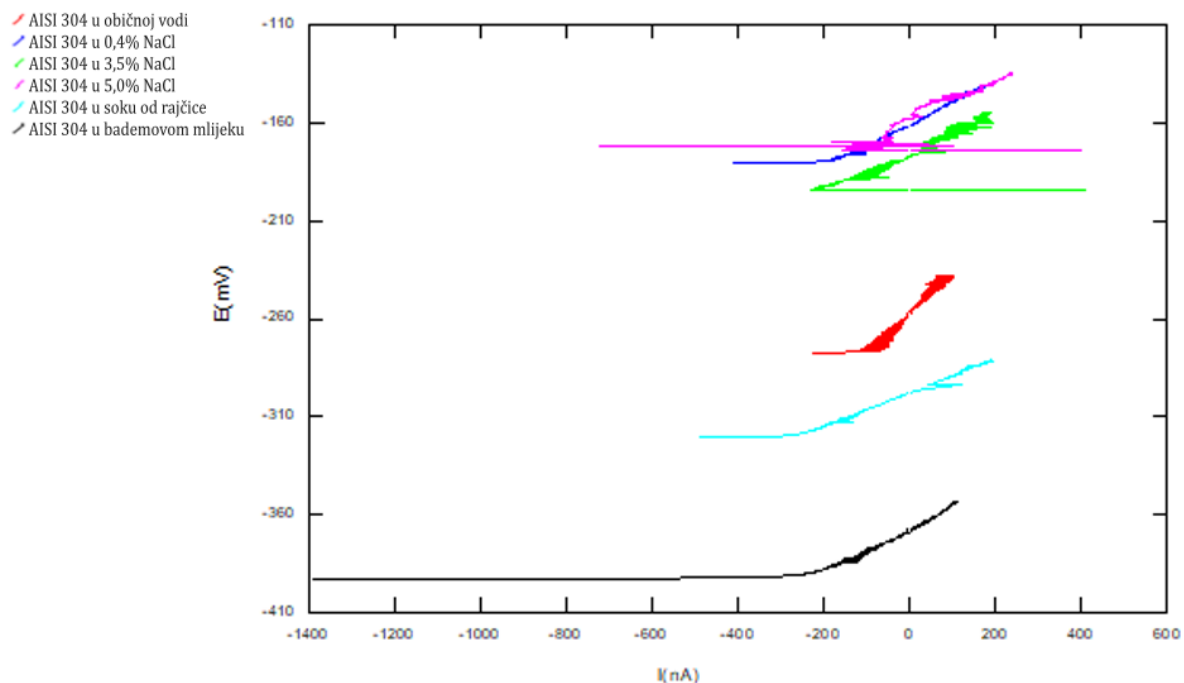
strane, veće vrijednosti polarizacijskih otpora ukazuju na veću otpornost materijala na određeni elektrolit. Shodno tome, vrijednosti polarizacijskih otpora ispitanih materijala prikazanih u grafu na slici 40 ukazuju na njihovo smanjenje prilikom povećavanja saliniteta vode. Pri tome se može vidjeti da je aluminijski uzorak AA 3004 imao manje vrijednosti od uzoraka AISI 304 i AISI 316 što pokazuje na njegovu veću podložnost koroziji u odnosu na druge uzorke. Kod elektrolita soka od rajčice je uzorak AISI 316 pokazao najveću korozijsku otpornost što ukazuje da su čelici tog tipa pogodni za proizvodnju kuhinjskog posuđa. Ispitani materijal u elektrolitu bademovog mlijeka je pokazao zadovoljavajuće vrijednosti polarizacijskih otpora, no utjecaj visoke pH vrijednosti na ispitane materijale može svejedno rezultirati korozijom površine. Na slikama 41, 42 i 43 su prikazani odnosi vrijednosti polarizacijskih otpora ispitanih uzoraka kroz sve ispitane elektrolite.



Slika 41. Dijagrami linearne polarizacije za ispitni uzorak AA 3004 za sve ispitane elektrolite



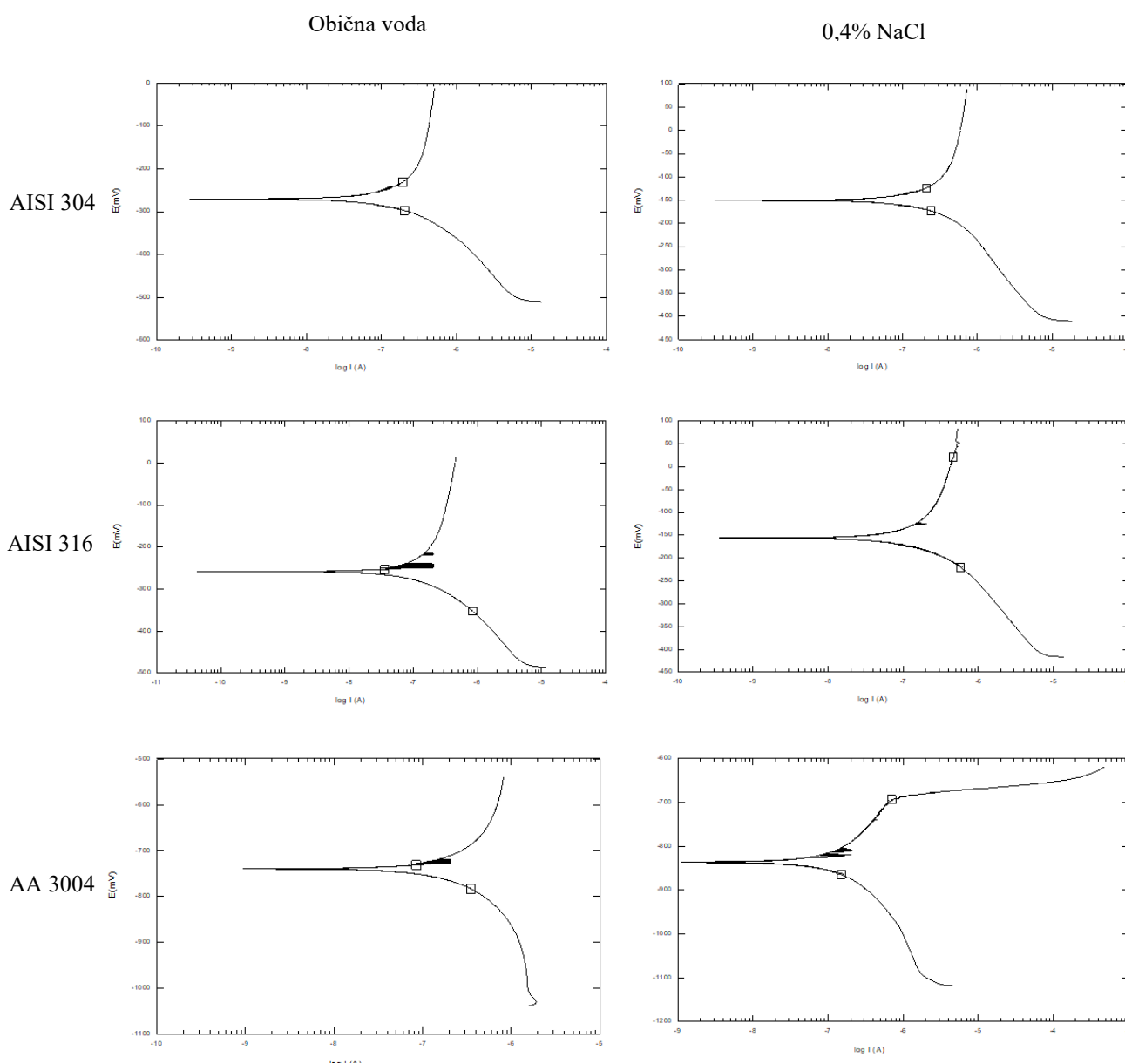
Slika 42. Dijagrami linearne polarizacije za ispitni uzorak AISI 316 za sve ispitane elektrolite



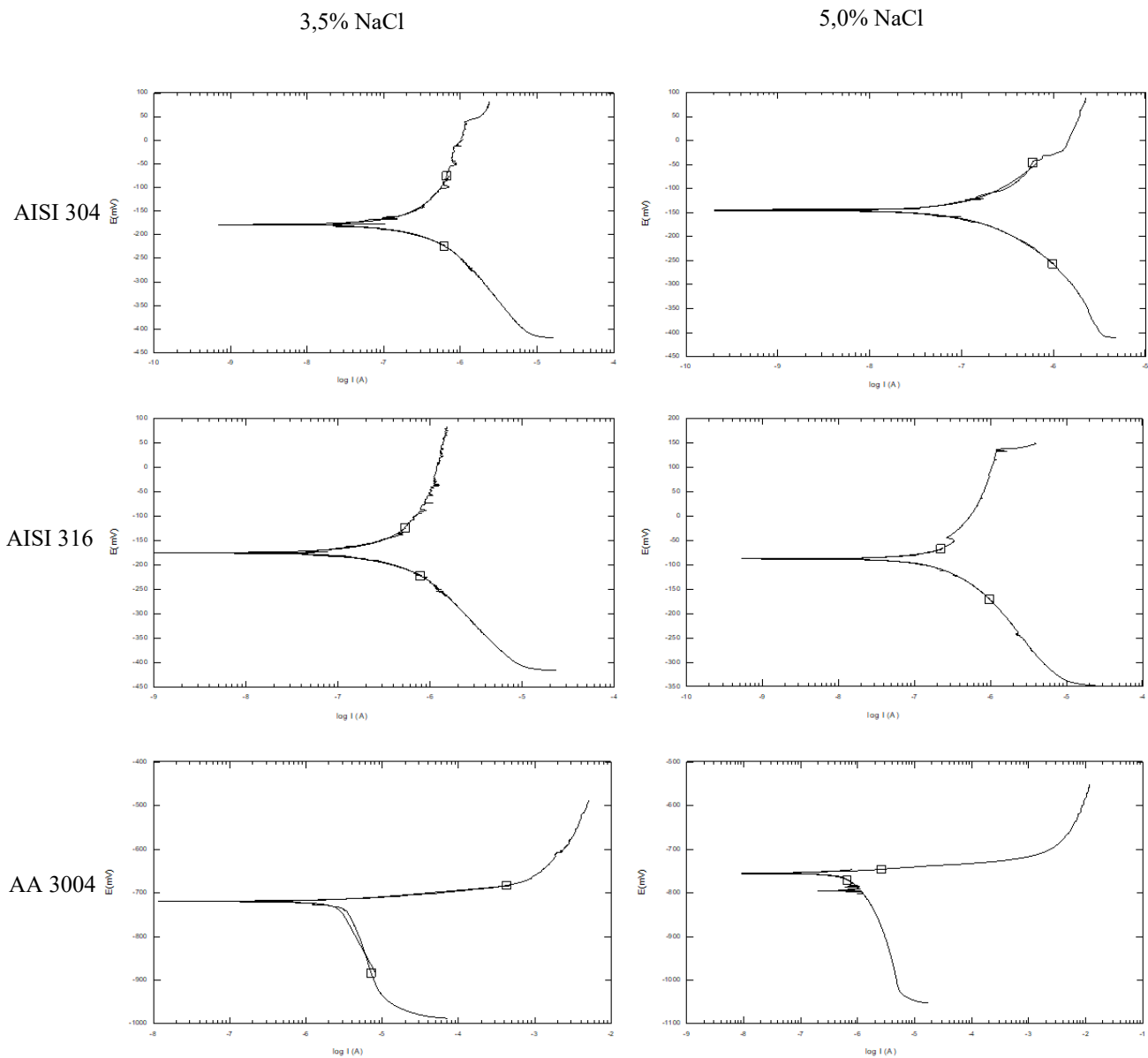
Slika 43. Dijagrami linearne polarizacije za ispitni uzorak AISI 304 za sve ispitane elektrolite

## 7.6. Određivanje gustoće korozijske struje i brzine korozije metodom Tafelove ekstrapolacije

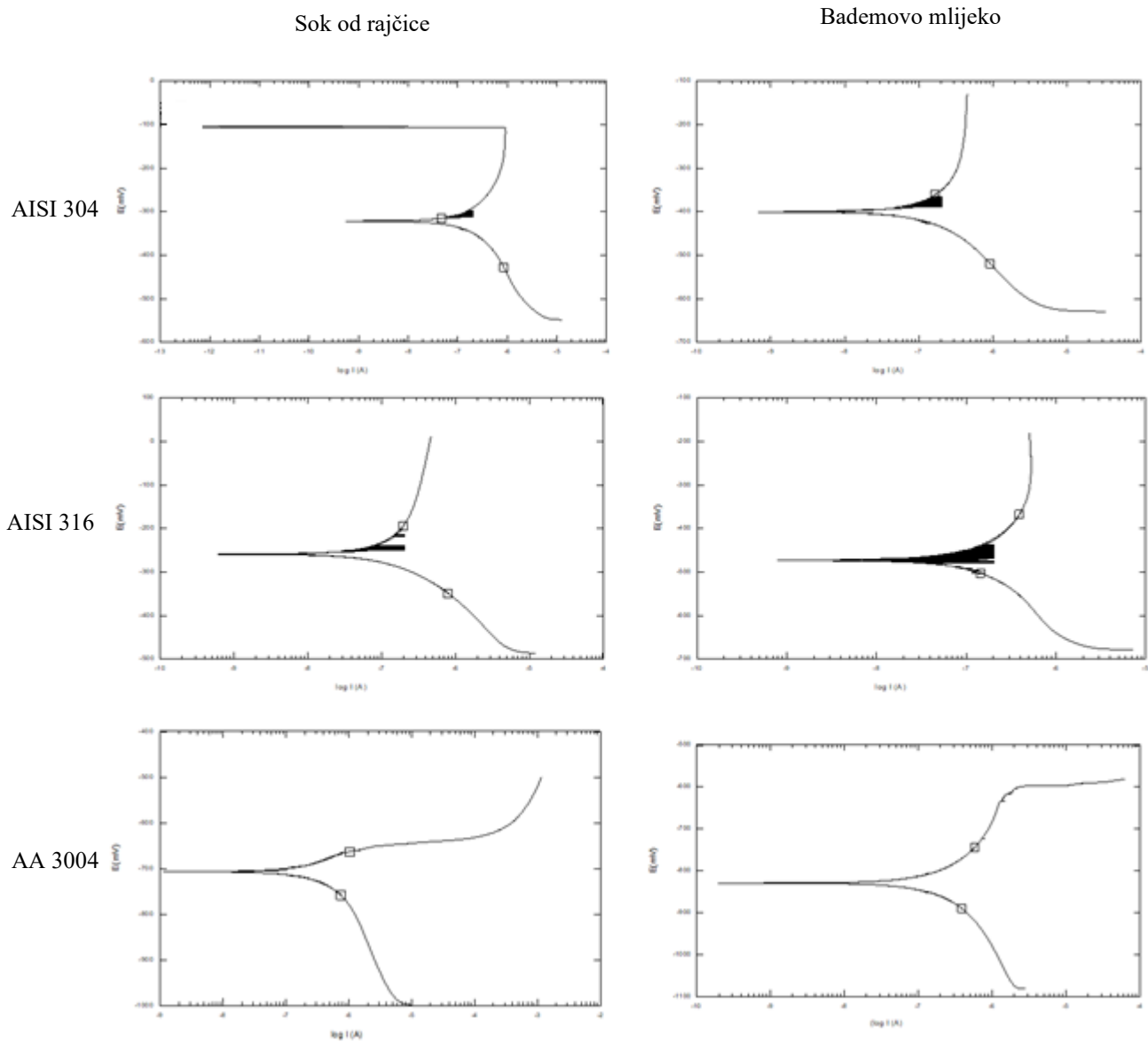
Zadnja vrsta ispitivanja je Tafelova ekstrapolacija pomoću koje se izračunava brzina, gustoća korozije te nagibi anodnih i katodnih Tafelovih pravaca. Na slikama 44, 45 i 46 su dani dijagrami Tafelove ekstrapolacije za običnu vodu, destiliranu otopinu 0,4/3,5/5,0% NaCl, razrijeđeni sok od rajčice i bademovo mlijeko. Rezultati Tafelove ekstrapolacije za navedene materijale i otopine su zapisani u tablici 9. Grafovi odnosa rezultata brzine korozije i gustoće korozijske struje različitih materijala u različitom elektrolitu su navedeni na slikama 47 i 48.



Slika 44. Dijagrami Tafelove ekstrapolacije za običnu vodu i destiliranu otopinu 0,4% NaCl



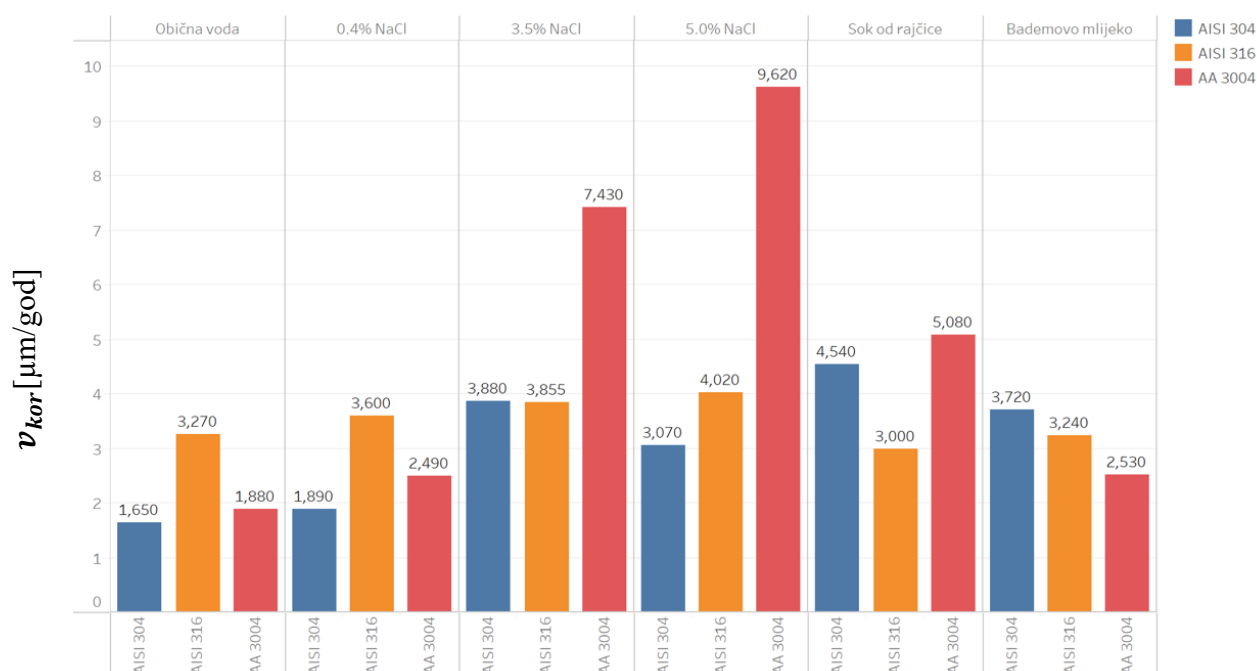
Slika 45. Dijagrami Tafelove ekstrapolacije za destiliranu otopinu 3,5% i 5,0% NaCl



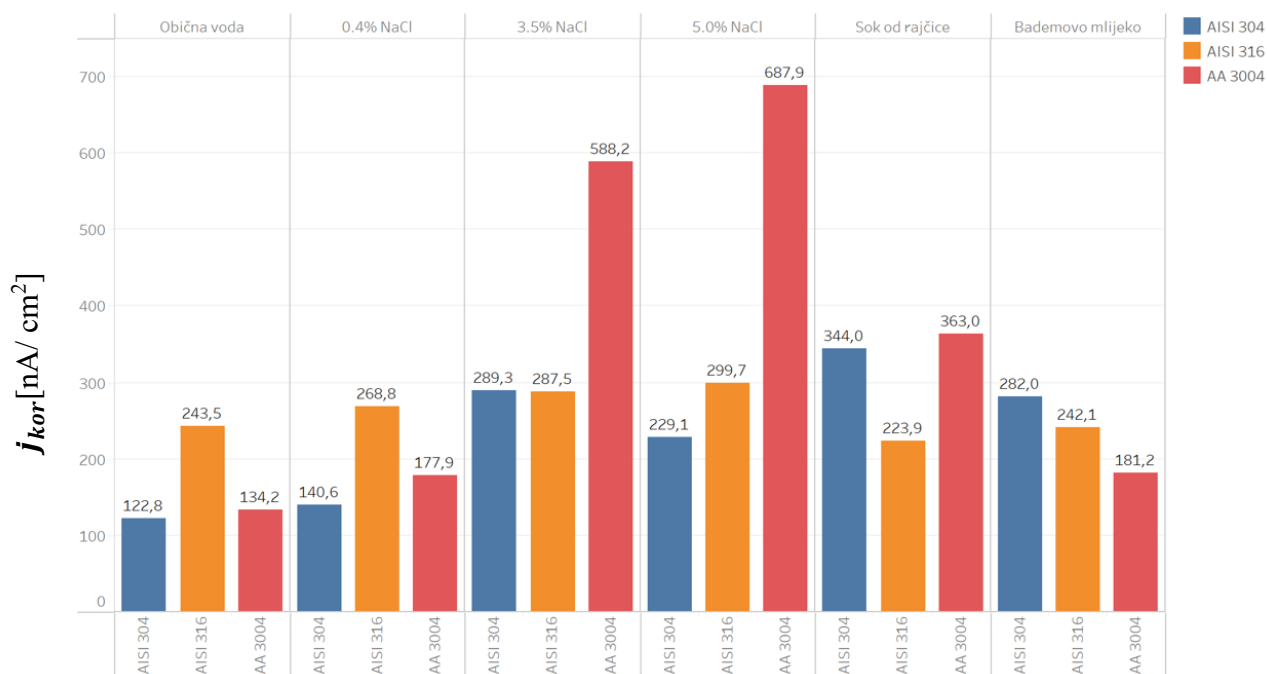
**Slika 46. Dijagrami Tafelove ekstrapolacije za razrijeđeni sok od rajčice sa vodom 1:1 i bademovom mlijekom**

Tablica 9. Rezultati dobiveni metodom Tafelove ekstrapolacije za navedene materijale

otopina	materijal	$v_{kor}$ [mm/god]	$j_{kor}$ [nA/cm <sup>2</sup> ]	$b_a$ [V/dek]	$b_c$ [V/dek]
Obična voda	AISI 304	$1,65 \times 10^{-3}$	122,8	$148,7 \times 10^{-3}$	$73,93 \times 10^{-3}$
	AISI 316	$3,27 \times 10^{-3}$	243,5	$291,6 \times 10^{-3}$	$143,4 \times 10^{-3}$
	AA 3004	$1,88 \times 10^{-3}$	134,2	$60,6 \times 10^{-3}$	$95,44 \times 10^{-3}$
0,4% NaCl	AISI 304	$1,89 \times 10^{-3}$	140,6	$99,58 \times 10^{-3}$	$62,53 \times 10^{-3}$
	AISI 316	$3,60 \times 10^{-3}$	268,8	$350 \times 10^{-3}$	$126,6 \times 10^{-3}$
	AA 3004	$2,49 \times 10^{-3}$	177,9	$250,5 \times 10^{-3}$	$117,2 \times 10^{-3}$
3,5% NaCl	AISI 304	$3,88 \times 10^{-3}$	289,3	$243,2 \times 10^{-3}$	$97,1 \times 10^{-3}$
	AISI 316	$3,855 \times 10^{-3}$	287,5	$141,7 \times 10^{-3}$	$81,06 \times 10^{-3}$
	AA 3004	$7,43 \times 10^{-3}$	588,2	$24,38 \times 10^{-3}$	$304,8 \times 10^{-3}$
5,0% NaCl	AISI 304	$3,07 \times 10^{-3}$	229,1	$202,5 \times 10^{-3}$	$165,6 \times 10^{-3}$
	AISI 316	$4,02 \times 10^{-3}$	299,7	$108,2 \times 10^{-3}$	$155,6 \times 10^{-3}$
	AA 3004	$9,62 \times 10^{-3}$	687,9	$21,08 \times 10^{-3}$	$68,42 \times 10^{-3}$
Sok od rajčice	AISI 304	$4,54 \times 10^{-3}$	344	$189,8 \times 10^{-3}$	$243,9 \times 10^{-3}$
	AISI 316	$3 \times 10^{-3}$	223,9	$274,1 \times 10^{-3}$	$234,2 \times 10^{-3}$
	AA 3004	$5,08 \times 10^{-3}$	363	$99,14 \times 10^{-3}$	$131,6 \times 10^{-3}$
Bademovo mlijeko	AISI 304	$3,72 \times 10^{-3}$	282	$299,2 \times 10^{-3}$	$207,8 \times 10^{-3}$
	AISI 316	$3,24 \times 10^{-3}$	242,1	$177,8 \times 10^{-3}$	$281,6 \times 10^{-3}$
	AA 3004	$2,53 \times 10^{-3}$	181,2	$135,4 \times 10^{-3}$	$136,1 \times 10^{-3}$



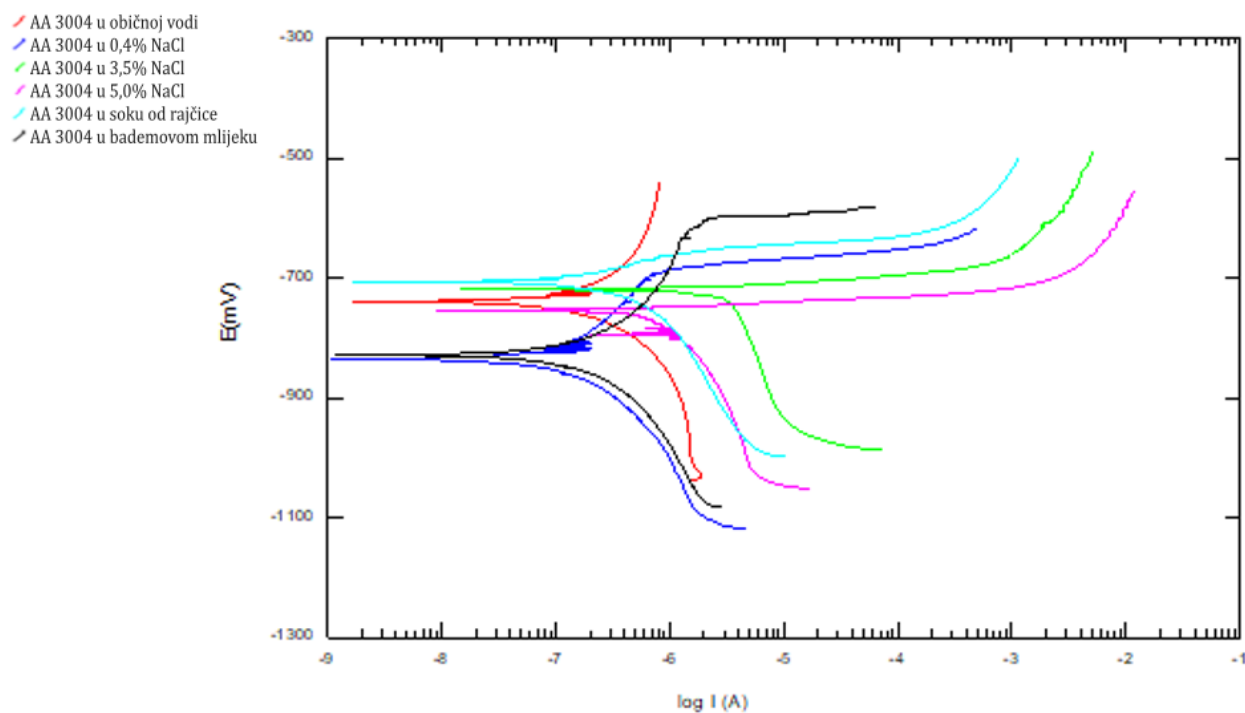
Slika 47. Graf odnosa rezultata brzine korozijske različitih uzoraka za različiti elektrolit



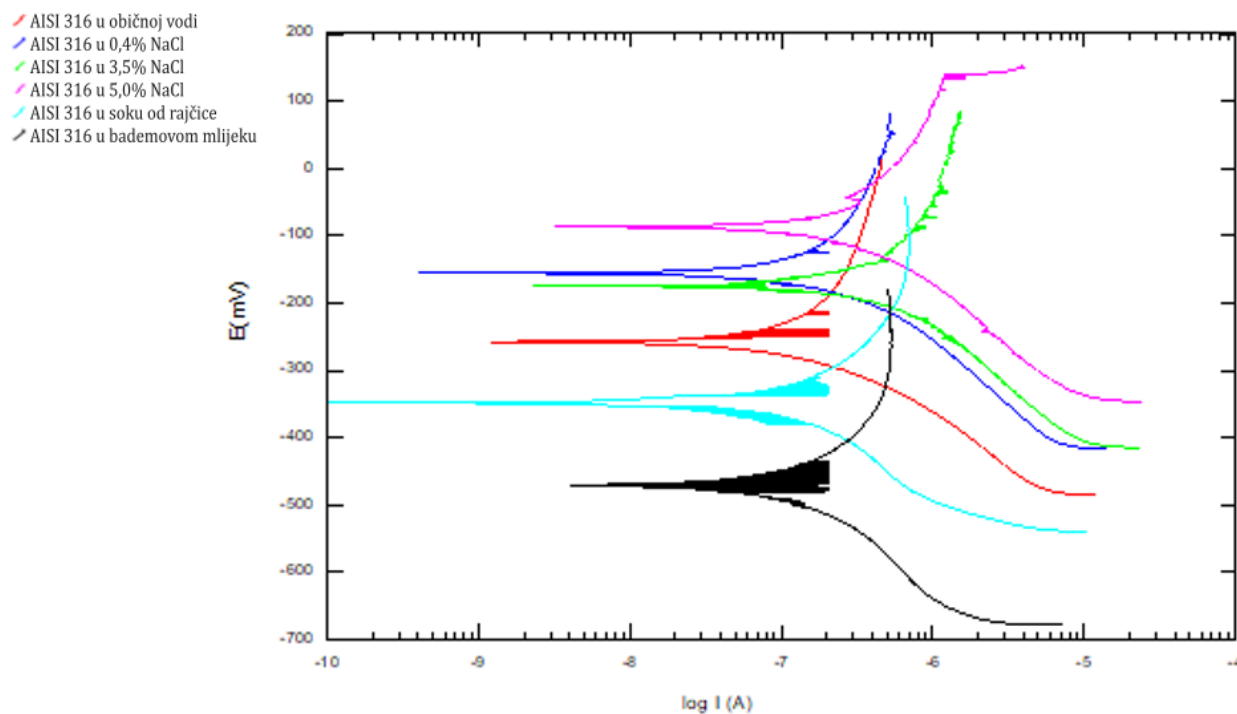
Slika 48. Graf odnosa rezultata gustoće korozijske struje različitih uzoraka za različiti elektrolit



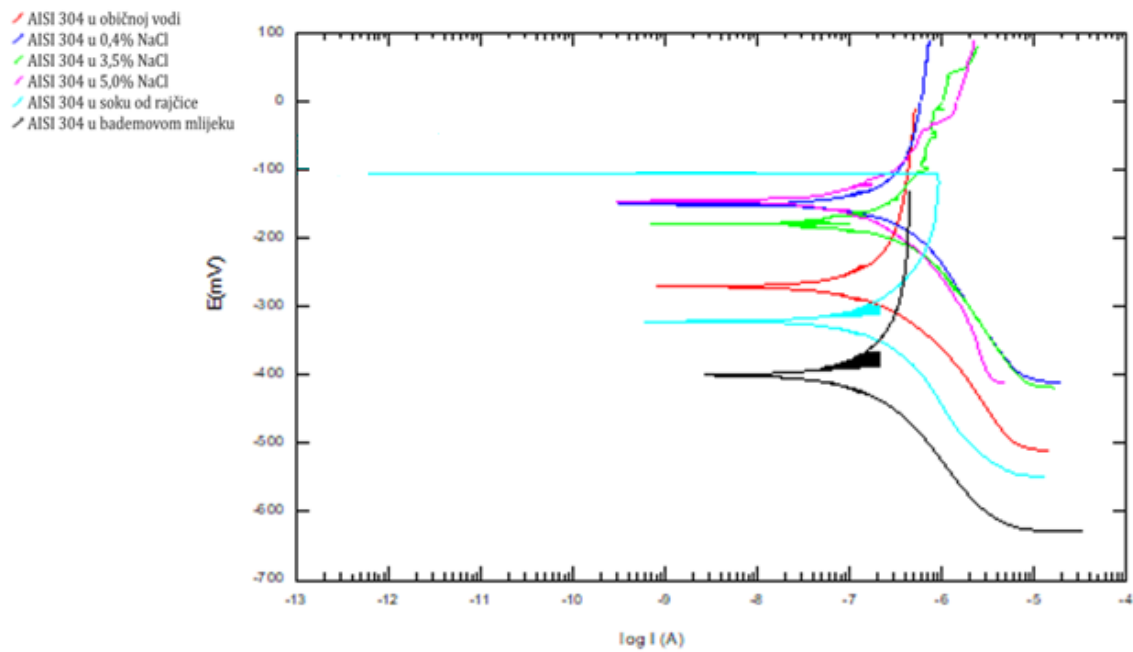
Na slikama 44, 45 i 46 su vidljivi različiti oblici krivulja katodnih i anodnih reakcija u grafovima Tafelovih ekstrapolacija. Oni ovise o tipu ispitanog uzorka. Kao i u prethodnom ispitivanju metodom linearne polarizacije, korištenje korozivnijeg elektrolita je rezultiralo nestabilnijim očitavanjem dijagrama, što je rezultiralo pojavom šumova. Šumovi, kao i nestabilnosti, su se češće pojavljivali na anodnom dijelu krivulje, sa tendencijom nagle promjene vrijednosti pri kraju eksperimenta. Ta pojava može upućivati na stvaranje određenog oblika korozije, s obzirom da metodom Tafelove ekstrapolacije dolazi do razaranja materijala. Kod grafova prikazanih na slikama 47 i 48 je vidljivo da povećanjem saliniteta vode, brzine korozije i gustoće korozivne struje ispitanih materijala AISI 304 i AISI 316 ne mijenjaju značajno svoju vrijednost. Međutim, kod ispitanog uzorka AA 3004 dolazi do nezanemarivog povećanja tih vrijednosti. Time se može zaključiti da aluminij tipa AA 3004 postaje osjetljiviji na koroziju povećanjem saliniteta vode, za razliku od čelika tipa AISI 304 i AISI 316. Međutim, u kontekstu kuhinjskog okruženja svi uzorci zadovoljavaju test saliniteta jer realna primjena soli u običnoj vodi kod kuhanja i generalne pripreme namirnica u velikoj većini slučajeva ne prelazi vrijednost 0,4% NaCl [52]. Kod testa s elektrolitom niske pH vrijednosti, odnosno sokom od rajčice, sva tri uzorka su pokazali zadovoljavajuće rezultate zanemarivih vrijednosti, a kod testa sa elektrolitom više pH vrijednosti svi ispitani materijali su pokazali približno jednako malu brzinu korozije. U kuhinjskom kontekstu, gotovo sve namirnice i preparati koji dolaze u kontakt sa kuhinjskim posuđem su kiseli, odnosno niže pH vrijednosti. Broj namirnica i sredstava viših pH vrijednosti koji dolaze u kontakt sa kuhinjskim posuđem je malen te najčešće se odnosi na sredstva za pranje posuđa. Na slikama 49, 50 i 51 su prikazani odnosi dijagrama Tafelove ekstrapolacije ispitanih uzoraka kroz sve ispitane elektrolite.



Slika 49. Dijagrami Tafelovih ekstrapolacija za ispitni uzorak AA 3004 za sve ispitane elektrolite



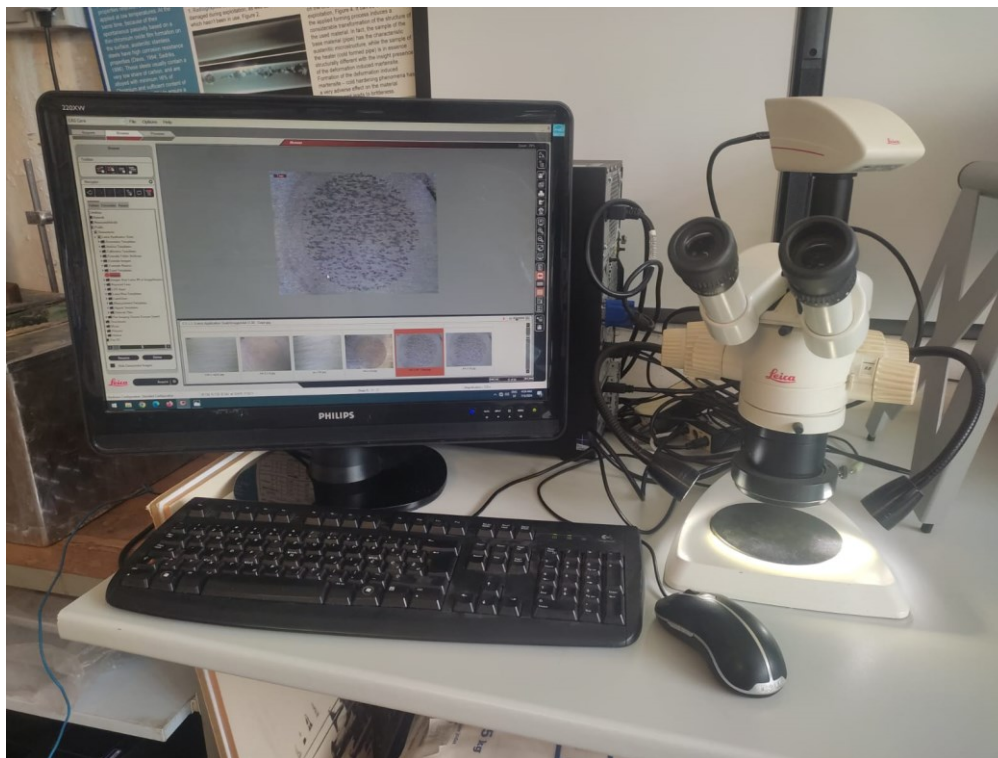
Slika 50. Dijagrami Tafelovih eksploatacija za ispitni uzorak AISI 316 za sve ispitane elektrolite



Slika 51. Dijagrami Tafelovih ekstrapolacija za ispitni uzorak AISI 304 za sve ispitane elektrolite

## 7.7. Snimanje površina uzorka pomoću mikroskopa

Snimanje površina ispitanih uzorka se obavljalo pomoću stereomikroskopa *Leica MZ6* prikazanog na slici 52.



**Slika 52. Stereomikroskop Leica MZ6 spojen na upravljačko računalo**

Na slikama 53, 54 i 55 su prikazane snimke ispitnih uzoraka testiranih u različitim otopinama. Uzorci ispitani u običnoj vodi univerzalno nisu pokazali nikakve znakove korozije na svojim površinama. Kako se destiliranoj vodi dodavao određeni udio soli, tako su se počele pojavljivati rupice (pitting) na površini aluminijskog uzorka. Njihova količina ili udubljenje je raslo proporcionalno sa povećanjem saliniteta dok se na uzorku u elektrolitu saliniteta 5,0% počela se javljati i korozija na rubovima ispitane površine. Na nehrđajućim čelicima, povećanjem saliniteta vodene otopine nisu dobivene značajne reakcije. Kod ispitivanja uzoraka u soku od rajčice su se jedino na aluminiju javili mali tragovi rupičaste korozije. To ukazuje na pogodnost korištenja čelika AISI 304 i AISI 316 u kuhinjskom okruženju jer velika većina kuhinjskih namirnica imaju niže pH vrijednosti. Ispitivanje uzoraka u bademovom mlijeku je pokazalo u nekoj mjeri osjetljivost svih ispitnih uzoraka na sredstva viših pH vrijednosti u razini lužina. Na čeliku AISI 316 su se pojavile mjestimične promjene boje ispitne površine koje ukazuju na početak oksidacije, dok se na čeliku AISI 304 pojavila površinska korozija preko cijele ispitne površine.

Aluminijski uzorak AA 3004 nije značajno reagirao na navedeni lužnati elektrolit osim mjestimične oksidacije ispitne površine.

Obična voda

0,4% NaCl

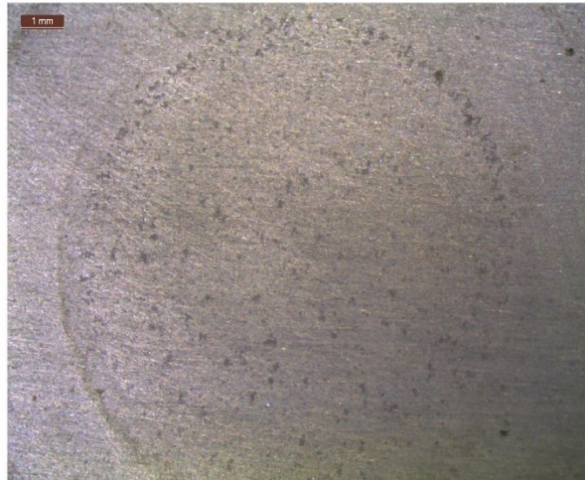
AISI 304



AISI 316



AA 3004



Slika 53. Snimke ispitnih uzoraka testiranih u običnoj vodi i destiliranoj otopini 0,4% NaCl

3,5% NaCl

5,0% NaCl

AISI 304



AISI 316



AA 3004

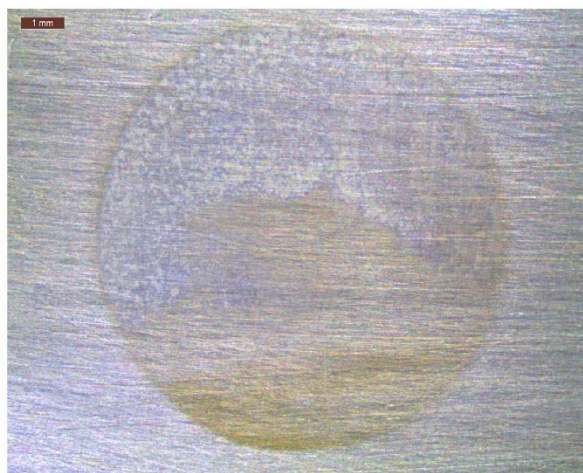
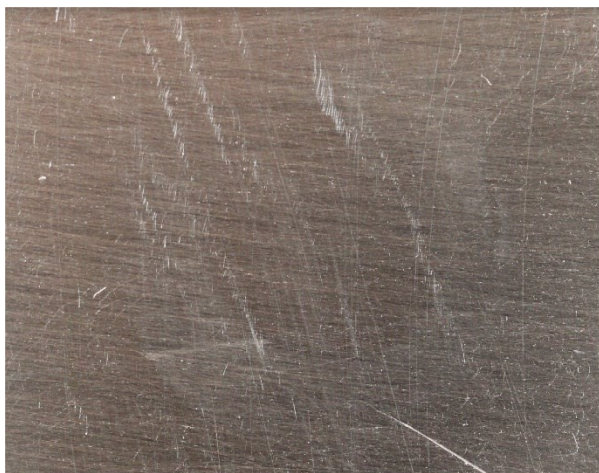


Slika 54. Snimke ispitnih uzoraka testiranih u destiliranoj otopini 3,5% i 5,0% NaCl

Sok od rajčice

Bademovo mlijeko

AISI 304



AISI 316



AA 3004



Slika 55. Snimke ispitnih uzoraka testiranih u razrijeđenom soku od rajčice i bademovom mlijeku

## 8. ZAKLJUČAK

Kuhinjsko posuđe kao ključno sredstvo u pripremi hrane treba biti izdržljivo, sigurno i otporno na korozijske procese kako bi se postigla proizvodnja hrane zadovoljavajuće kvalitete uz izbjegavanje mogućih opasnosti pri njenom korištenju i ispuštanju metalnih iona u hranu.

U teorijskom dijelu, navode se različiti tipovi korozije koji se mogu javiti pri kuhanju, različiti materijali i njihove karakteristike u kontekstu korozijske otpornosti. Nadalje, navode se tehnologije prevlačenja materijala koji mogu poboljšati otpornost metala na korozijske procese u kuhinjskim posudama. Ovi napori imaju potencijal ne samo unaprijediti trajnost i sigurnost posuđa, već i pružiti bolje iskustvo kuhanja.

Cilj eksperimentalnog dijela je bio utvrditi korozijsko ponašanje nehrđajućeg čelika AISI 304, AISI 316 i aluminijske legure AA 3004 u najčešćim kuhinjskim uvjetima pri sobnoj temperaturi. Odabrani su elektroliti obične vode, destilirane vode koncentracije 0,4/3,5/5,0% NaCl, vodom razrijeđeni sok od rajčice pH vrijednosti 4,853 i bademovo mlijeko pH vrijednosti 7,476. Utvrđeno je da povećanjem koncentracije NaCl kod materijala AISI 304 i 316 ne dolazi do značajnog korodiranja površine, no kod materijala AA 3004 dolazi do pojave korozije u obliku pitinga čak i u kuhinjskom kontekstu uporabe vode s 0,4% NaCl. To upućuje da je kuhinjsko posuđe materijala AA 3004 kraćeg životnog vijeka od AISI 304 i 316. Nadalje, kod ispitivanja utjecaja ispitanih materijala na elektrolite različitih pH vrijednosti utvrđeno je da su svi ispitani materijali (AISI 304, AISI 316 i AA 3004) otporni do zadovoljavajuće razine na sredstva nižeg pH, no u ispitivanju elektrolita više pH vrijednosti utvrđene su površinske diskoloracije na nehrđajućim čelicima.

Uzimajući u obzir složenost i raznolikost čimbenika koji utječu na korozijsku otpornost metala u kuhinjskim posudama, potrebno je napomenuti važnost daljnjeg istraživanja ovog područja. Kuhanje je jedno od osnovnih životnih iskustava koje svaki čovjek jednom mora naučiti te je od presudne važnosti osigurati njegovo neometano i sigurno izvršavanje.



## 9. LITERATURA

- [1] E. D. Durning, Ur., Corrosion Atlas: A Collection of Illustrated Case Histories, 3. ur., Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2018..
- [2] Oxyplast UK, »Different types of corrosion,« [Mrežno]. Available: <https://oxyplastuk.com/technical/different-types-of-corrosion/>. [Pristupljeno 24 Svibanj 2024.].
- [3] R. W. Revie i H. H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons, Inc., 2008..
- [4] V. Alar, Kemijska postojanost metala, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2015..
- [5] Corrosion Glossary, »Corrosion Impact on Food Industries,« [Mrežno]. Available: <https://corrosion-doctors.org/Food-Industry/Food-corrosion.htm>. [Pristupljeno 7 Rujan 2023.].
- [6] V. Sanabria, »Corrosion Types,« 2023.. [Mrežno]. Available: <https://collab.dvb.bayern/display/TUMzfp/Corrosion+Types#CorrosionTypes-PhysicalPrinciples>. [Pristupljeno 24 Svibanj 2024.].
- [7] E. Gücüyen, E. Kantar, R. T. Erdem i M. B. Alicioğlu, »Eksperimentalno i numeričko istraživanje čeličnih profila pri udarnom opterećenju,« *Građevinar*, svez. 73, br. 1, 2021..
- [8] N. H. B. Birbilis, »19 - Corrosion and corrosion protection of aluminium,« u *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, R. Lumley, Ur., Woodhead Publishing, 2011., pp. 575-604.
- [9] »Carl Roth - International,« [Mrežno]. Available: <https://www.carlroth.com/com/en/pots/pot-aluminium/p/aen9.1>. [Pristupljeno 21 Lipanj 2024.].
- [10] J. E. Woodard, »Be smart about cookware materials,« Virginia Tech, 1976..
- [11] TM BAKING, »What Are The Different Types Of Aluminum Materials Available For Baking Pans?,« 17 Svibanj 2022.. [Mrežno]. Available:

- [https://www.linkedin.com/pulse/what-different-types-aluminum-materials-available-baking-/. \[Pristupljeno 27 Svibanj 2024.\].](https://www.linkedin.com/pulse/what-different-types-aluminum-materials-available-baking-/)
- [12] F. Mazzolani, *Aluminium Alloy Structures*, Routledge, 1994..
- [13] » Aluminium Circle Discs for Cookware Profiler Prices Alloy 1100 1050 1060 1070,« Made-in-China.com, [Mrežno]. Available: <https://runkunaluminum.en.made-in-china.com/product/HFvalNjUbRTx/China-Aluminium-Circle-Discs-for-Cookware-Profiler-Prices-Alloy-1100-1050-1060-1070.html>. [Pristupljeno 3 Lipanj 2024.].
- [14] Q. Lu, Y. Zhao, Q. Wang i D. Li, »Investigation on the Corrosion Resistance of 3003 Aluminum Alloy in Acidic Salt Spray under Different Processing States,« *Metals*, svez. 14, br. 2, 2024..
- [15] Joda Tech, »The Comparison of 3003 Aluminum Alloy and 3004 Aluminum Alloy,« 7 Lipanj 2023.. [Mrežno]. Available: <https://www.joda-tech.com/news/comparisonof3003and3004.html>. [Pristupljeno 3 Svibanj 2024.].
- [16] Kloeckner Metals, »3004 Aluminum Sheet,« [Mrežno]. Available: <https://www.kloecknermetals.com/products/aluminum/grades/3004-aluminum-sheet/>. [Pristupljeno 20 Lipanj 2024.].
- [17] Rolled Metal Products, »Aluminum 5052 (UNS A95052) in Coil Form,« [Mrežno]. Available: <https://rolledmetalproducts.com/aluminum-5052/>. [Pristupljeno 4 Lipanj 2024.].
- [18] P. Syed, »Corrosion and Corrosion Control,« u *Engineering Chemistry*, 2008..
- [19] Fini Recepti, »Može li zahrđalo posuđe doista uzrokovati zdravstvene probleme?,« [Mrežno]. Available: <https://finirecepti.net.hr/zanimljivosti/moze-li-zahrdalo-posude-doista-uzrokovati-zdravstvene-probleme/>. [Pristupljeno 22 Lipanj 2024.].
- [20] Miele, »Stainless Steel and Corrosion,« [Mrežno]. Available: [http://us.mieleusa.com/MieleMedia/docs/operatinginstructions/Old-Archive/Accessories/Dishwashers/SS\\_corrosion.pdf](http://us.mieleusa.com/MieleMedia/docs/operatinginstructions/Old-Archive/Accessories/Dishwashers/SS_corrosion.pdf). [Pristupljeno 9. Rujan 2023.].
- [21] »Stainless Steel Saucepan Sauce Pan with Pour Spout & Glass Lid with Strainer Multipurpose Sauce Pot,« [Mrežno]. Available: <https://www.rorence.com/stainless-steel-saucepan-sauce-pan-with-pour-spout-glass-lid-with-strainer-multipurpose-sauce-pot-product/>. [Pristupljeno 22 Lipanj 2024.].

- [22] T. Filletin, F. Kovačićek i J. Indof, *Svojstva i primjena materijala*, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021..
- [23] Edelstahl Rostfrei, »Die Gruppen der nichtrostenden Stähle,« [Mrežno]. Available: <https://www.edelstahl-rostfrei.de/werkstoff/gruppen-nichtrostender-staehle>. [Pristupljeno 7 Srpanj 2024.].
- [24] Unified Alloys, »<https://www.unifiedalloys.com/blog/stainless-grades-families>,« [Mrežno]. Available: <https://www.unifiedalloys.com/blog/stainless-grades-families>. [Pristupljeno 7 Srpanj 2024.].
- [25] F. Kovačićek i Đ. Španiček, *Materijali: osnove znanosti o materijalima*, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2000..
- [26] The WelderDestiny Compass, »<https://www.welderdestiny.com/dissimilar-metals-welding.html>,« [Mrežno]. Available: <https://www.welderdestiny.com/dissimilar-metals-welding.html>. [Pristupljeno 7 Srpanj 2024.].
- [27] B. Mateša, I. Samardžić i M. Dunder, »Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama,« *Suvremene tehnologije i postupci pri izradi tlačne opreme, zavarenih metalnih konstrukcija i proizvoda*, pp. 233-243.
- [28] M. F. McGuire, *Stainless Steel for Design Engineers*, ASM Technical Books, 2008..
- [29] X. Yang, C. Yu, X. Yang i K. Yan, »Microstructure and Mechanical Properties of an Austenitic Heat-Resistant Steel after Service at 570 °C and 25.4 MPa for 18 Years,« *Journal of Materials Engineering and Performance*, svez. 30, br. 3, Siječanj 2021..
- [30] H. Bhadeshia i R. Honeycombe, *Steels: Microstructure and Properties*, Elsevier, 2011..
- [31] K. L. Kamerud, K. A. Hobbie i K. A. Anderson, »Stainless Steel Leaches Nickel and Chromium into Foods during Cooking,« *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, svez. 61, br. 39, 2013..
- [32] G. Priyotomo, »The Behavior of Metal Release on 430 Stainless Steel Cookware in Citric Acid Solution by Cyclic Method,« *AIP Conference Proceedings*, br. 2561, 2022..
- [33] N. Williams, »How is Stainless Steel Cookware Manufactured?,« [Mrežno]. Available: <https://kobachjs.com/how-is-stainless-steel-cookware-made-the-ultimate-guide-of-manufacturing-process/>. [Pristupljeno 7 Srpanj 2024.].

- [34] Amazon, »Heritage Steel 10.5 Inch Frying Pan | Made In USA | Titanium Series | 316Ti Skillet with Stay Cool Handle | Fully Clad Stainless Steel Pan with 5-Ply Construction | Induction Ready & Non Toxic,« Amazon, [Mrežno]. Available: [https://www.amazon.com/Heritage-Steel-Strengthened-Construction-Compatible/dp/B00ZGSB2SK/ref=sr\\_1\\_5?sr=8-5](https://www.amazon.com/Heritage-Steel-Strengthened-Construction-Compatible/dp/B00ZGSB2SK/ref=sr_1_5?sr=8-5). [Pristupljeno 7 Srpanj 2024.].
- [35] D. Gritzer, »I Tested 28 Stainless-Steel Skillets—Three Were Sear-iously Good,« Serious Eats, 25 Lipanj 2024.. [Mrežno]. Available: <https://www.seriousseats.com/best-stainless-steel-skillets>. [Pristupljeno 7 Srpanj 2024.].
- [36] J. Kuligowski i K. M. Halperin, »Stainless Steel Cookware as a Significant Source of Nickel, Chromium, and Iron,« *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, svez. 23, br. 2, 1992..
- [37] »Amazon,« [Mrežno]. Available: <https://www.amazon.co.uk/Hammered-Handcrafted-Authentic-Skillet-Turkish/dp/B08LPNSMCT?th=1>. [Pristupljeno 22 Lipanj 2024.].
- [38] E. B. A. J. Short, »A Review of Some Defects Appearing on Anodized Aluminium,« *Transactions of the IMF*, pp. 166-177, 1975..
- [39] F. Russo, S. Rossi i A. M. Compagnoni, »Porcelain Enamel Coatings,« 15 Rujan 2021.. [Mrežno]. Available: <https://www.mdpi.com/2673-8392/1/2/32>. [Pristupljeno 2023.].
- [40] E. Christensen, »Chipped Enamel: Need to Replace This Cookware?,« 20 Listopad 2020.. [Mrežno]. Available: <https://www.thekitchn.com/chipped-enamel-need-to-replace-86730>. [Pristupljeno 22 Lipanj 2024.].
- [41] Corrosionpedia, »Polytetrafluoroethylene (PTFE),« 13 Kolovoz 2019.. [Mrežno]. Available: <https://www.corrosionpedia.com/definition/1251/polytetrafluoroethylene-ptfe-corrosion>. [Pristupljeno 3 Rujan 2023.].
- [42] A. Rondinella, F. Andreatta, D. Turrin i L. Fedrizzi, »Degradation Mechanisms Occurring in PTFE-Based Coatings Employed in Food-Processing Applications,« *Coatings*, svez. 11, br. 11, 2021..
- [43] S. Boesch, »One Scratch on a Nonstick Pan Can Release 9,100 Plastic Particles, New Study Finds,« 4 Studeni 2022.. [Mrežno]. Available: <https://www.eatthis.com/teflon-pan-unsafe-study/>. [Pristupljeno 23 Lipanj 2024.].

- [44] M. Sajid i M. Ilyas, »PTFE-coated non-stick cookware and toxicity concerns: a perspective,« *Environ Sci Pollut Res Int*, svez. 30, 2017.
- [45] K. Steenland, T. Fletcher i D. A. Savitz, »Epidemiologic Evidence on the Health Effects of Perfluorooctanoic Acid (PFOA),« *Environmental Health Perspectives*, svez. 8, 2010.
- [46] F. Andreatta, A. Lanzutti, E. Aneggi, A. Gagliardi, A. Rondinella, M. Simonato i L. Fedrizzi, »Degradation of PTFE non-stick coatings for application in the food service industry,« *Engineering Failure Analysis*, svez. 115.
- [47] Materials Evaluation and Engineering, Inc., »Electrochemical Corrosion Testing,« [Mrežno]. Available: <https://www.mee-inc.com/hamm/electrochemical-corrosion-testing/>. [Pristupljeno 27 Lipanj 2024.]
- [48] I. Stojanović, Utjecaj tehnoloških parametara na zaštitna svojstva vodorazrjedivih premaza, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011..
- [49] H. Luo i C. Dong, »The electrochemical behaviour of 2205 duplex stainless steel in alkaline solutions with different pH in the presence of chloride,« *Electrochimica Acta*, br. 64, 2012..
- [50] Macias Sensors, »Open Circuit Potential: an incredibly versatile measurement,« 1 Prosinac 2023.. [Mrežno]. Available: <https://maciassensors.com/open-circuit-potential/#what-is-open-circuit-potential>. [Pristupljeno 4 Srpanj 2024.]
- [51] H. Otmačić Ćurković, *Konstruktivski materijali i zaštita*, Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2008..
- [52] T. M. Proper, »How to Salt Water,« 10 June 2024.. [Mrežno]. Available: <https://themodernproper.com/how-to-salt-water>. [Pristupljeno 4 July 2024.]